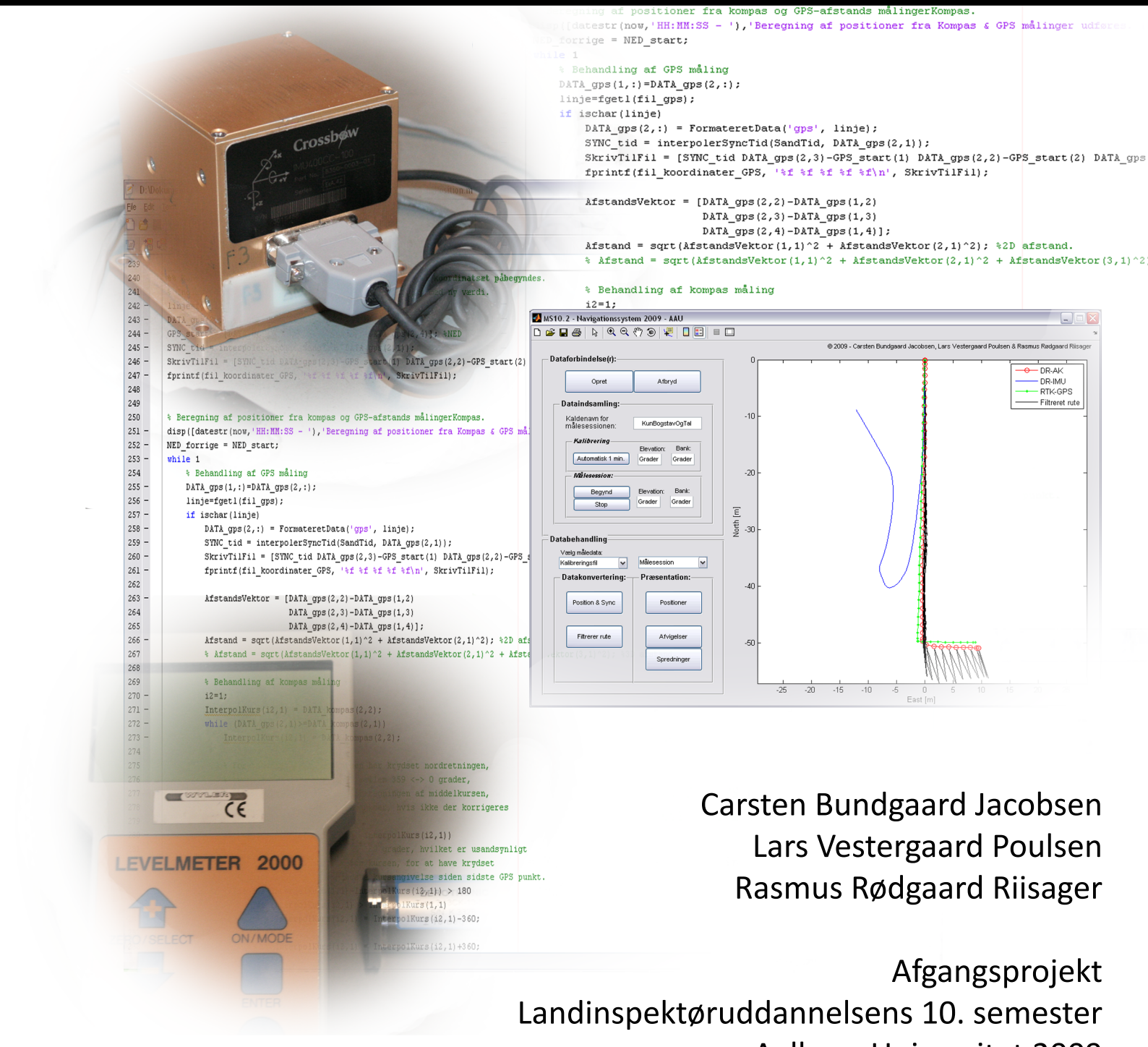
Udvikling af et positioneringssystem

- ved hjælp af dead reckoning, sensorintegration og Kalman filtrering



Carsten Bundgaard Jacobsen
Lars Vestergaard Poulsen
Rasmus Rødgaard Riisager

Afgangsprojekt
Landinspektøruddannelsens 10. semester
Aalborg Universitet 2009

Institut for Samfundsudvikling og Planlægning
Landinspektøruddannelsens 10. semester, Measurement Science
Aalborg Universitet
Fibigerstræde 11-13
9220 Aalborg Øst

Titel:

Udvikling af et positioneringssystem
- Ved hjælp af dead reckoning, sensorintegration og Kalman filtrering

Projektperiode:

2. februar 2009 – 10. juni 2009

Projektgruppe:

09ms1002

Deltagere:

Carsten Bundgaard Jacobsen | Lars Vestergaard Poulsen | Rasmus Rødgaard Riisager

Hovedvejleder: Peter Cederholm **Bivejleder:** Carsten Bech

Synopsis:

Denne rapport omhandler problemformuleringen:
Hvorledes kan et dead reckoning navigationssystem, bestående af en IMU, kompas og afstande mellem GNSS positioner, designes til positionsbestemmelse i rørsystemer, og er det muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre?

Problemformuleringen besvares gennem udvikling af et navigationssystem, bestående af IMU, kompas og GNSS, samt en udviklet softwaredel (NS-1002). Herudfra er der foretaget positionsbestemmelse med IMU samt ved integration af et kompas og en afstand beregnet ud fra to positioner fra GNSS. Disse to metoder for positionsbestemmelse filtreres efter dataindsamling i et Kalman filter, hvorefter de endelige positioner udtegnes gennem NS-1002. NS-1002 er udviklet gennem Matlab, og som en del af projektet er der udviklet kode til kommunikation, indsamling, behandling og præsentation af data.
NS-1002 er blevet testet, ved at køre forskellige ruter, som skulle simulere bevægelserne i et rørsystem under TV-inspektion, for på den vis at fastslå, hvilken nøjagtighed der kunne opnås ved integration af netop disse sensorer og valgte positioneringsmetoder.
Generelt var det ikke muligt at opnå nøjagtighedskravene opstillet i problemformuleringen. Dette er forårsaget af IMU'en, hvori der ophobes store fejl over tid i positioneringssammenhæng. Dette skyldes, at IMU-observationerne ikke løbende opdateres med stabile orienteringsværdier. Disse værdier skal måles løbende under positionsbestemmelsen for at IMU-observationerne korrigeres korrekt i forhold til vandret, og en fornuftig nøjagtighed kan opnås. Positionsbestemmelsen vha. afstand og kurs, har vist sig betydeligt mere robust over tid, og var generelt den bestemmende faktor i Kalman filtreringen. Ud fra det udførte test, har det ikke været muligt, at overholde nøjagtighedskravet opstillet i problemformuleringen.

Oplagsantal: 6
Side antal: 129
Bilagsantal og art: En bilagsmappe, en bilags CD

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne

Department of Community Development and Planning
Surveyor training 10th semester, Measurement Science
Aalborg Universitet
Fibigerstræde 11-13
9220 Aalborg Øst

Title:

Development of a positioning system
- by means of dead reckoning, sensor integration and Kalman filtering

Projectperiod:

February 2nd 2009 – June 10th 2009

Projectgroup:

09MS1002

Participants:

Carsten Bundgaard Jacobsen | Lars Vestergaard Poulsen | Rasmus Rødgaard Riisager

Main supervisor: Peter Cederholm **Supervisor:** Carsten Bech

Abstract:

This report deals with the following problem formulation:
How can a dead reckoning navigation system consisting of an IMU, compass and distances between GNSS positions, be designed for positioning in pipelines, and is it possible to achieve an accuracy of ± 0.5 meters or better?

This problem formulation is answered by developing a navigation system, consisting of an IMU, compass and GNSS, and developed software (NS-1002). Two methods of positioning are used. One position is achieved by utilizing the IMU and the other position is achieved by a sensor integration of a compass and calculated distances between GNSS positions. Data from these two methods of positioning are then used in a Kalman filter, resulting in final positions of the covered path, which NS-1002 is capable of plotting afterwards. NS-1002 has been developed in Matlab, and features modules for: communication with instruments, collection of data, processing and presentation of data.
NS-1002 has been tested by covering various paths, in order to simulate the movement in a piping system during TV inspection. This was done to determine the achievable accuracy from the sensor integration of the selected sensors and positioning method.
The final conclusion of various analyses is that it was not possible to achieve the requirement accuracy stated in the problem formulation. This is caused by the IMU, which accumulates large errors over time in positioning context. This is due to the fact that observations from the IMU are not regularly updated with stable orientation values. These values should be measured continuously during the location determination to correct the IMU observations to local level, in order to achieve a reasonable accuracy. Position determination using distance and direction, has proved considerably more robust over time and were generally the deciding factor of the results achieved from Kalman filtering.

Circulation: 6
Pages: 129
Enclosures: One annex folder, one annex CD

The content of the report is free to use, but publication (with reference) have to be authorized by the authors

Forord

Denne rapport er udarbejdet som afgangsprojekt for Landinspektørgruppe 09ms1002 på Institut for Samfundsudvikling og Planlægning ved Aalborg Universitet på uddannelsens 10. Semester, Measurement Science.
Rapporten er udarbejdet fra primo februar 2009 til medio juni 2009. Rapporten skal indgå som en del af eksaminationen af projektgruppen, og henvender sig derfor primært til censor og vejleder.
Formålet med afgangsprojektet er at;

> *"At dokumentere at den studerende er i stand til selvstændigt at planlægge og gennemføre et projektforløb på et højt fagligt niveau. Afgangsprojektet skal dokumentere den studerendes evne til at anvende videnskabelige teorier og metoder på et tilstrækkeligt højt niveau. Afgangsprojektet skal således udformes med henblik på at dokumentere, at studiets formålsparagraf er opfyldt."*
> *(L-studienævnet, 2009:5)*

Med udgangspunkt heri skal der arbejdes inden for et relevant videnskabeligt fagområde som behandles gennem projektarbejdet.
Herudfra er der arbejdet med områder inden for sensorintegration af IMU, kompas og GNSS samt udvikling af et navigationssystem ved programmering i Matlab, som kan benyttes til positionering i rørsystemer. Ideen til projektet er skabt gennem et samarbejde med Per Aarsleff A/S, som har ønsker om et positioneringssystem i forbindelse med inspektion af rørsystemer. I den forbindelse skal der rettes en tak til Carsten Jensen, Produktionschef hos Per Aarsleff A/S, for afholdelse af møde omkring TV-inspektioner af rørsystemer. Herunder takkes også Morten Thoft, Senior fagleder hos COWI A/S, for at have skabt den indledende kontakt til Per Aarsleff A/S.
For at have opnået den nødvendige viden og for at muliggøre gennemførelsen af projektet, er der taget udgangspunkt i tidligere udarbejdede projekter omkring IMU'en, (Eistrup, Gregersen & Meister, 2005a) og (Eistrup, Gregersen & Meister, 2005b) samt omkring sensorintegration og Kalman filtrering fra (Nordby & Kristensen, 1999).

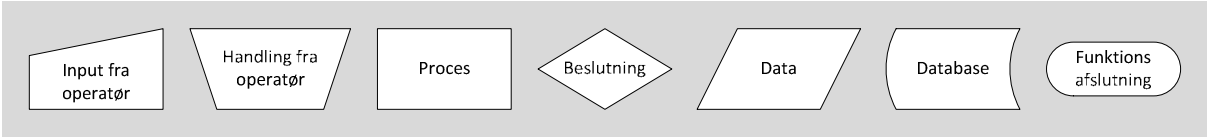
I rapporten er enkelte steder benyttet engelske udtryk, da det er vurderet at disse ikke kan oversættes korrekt til dansk og samtidig opnå den samme betydning.

Kildehenvisninger er angivet efter Harvard metoden, dvs. med forfatterens efternavn, årstal for udgivelse samt eventuelt sidetal, f.eks. (Jensen, 2005:66). Refereres til hjemmeside, angives hjemmesidens ejer som forfatter.
Figurer, ligninger, tabeller og billeder er nummereret fortløbende i hvert kapitel, f.eks. angives figur 5 i kapitel 7, som 'Figur 7.5'.

Der er i forbindelse med projekt udarbejdet flere bilagstyper, som er at finde hhv. i den vedlagte bilagsmappe samt på en vedlagt CD. CD'en er placeret i en plastlomme bagerst i bilagsmappen. Refe-

rencer til vedlagt bilagsmappe er benævnt i alfabetisk rækkefølge, f.eks. 'Bilag A', mens referencer til den vedlagte CD, indeholder referencenummer direkte til den pågældende mappe på CD'en, f.eks. 'Bilag CD.05.04' for filerne i mappe 05 samt undermappe 04.
Henvises til figurer, ligninger, tabeller og billeder i bilagsmappen nummereres disse fortløbende i hvert bilag, f.eks. angives ligning 5 i Bilag C, som 'Ligning C.5'.
En oversigt over mappestrukturen på den vedlagte CD kan ses i bilagsoversigten bagerst i rapporten.
På vedlagte CD findes desuden øvrige relevante filer, f.eks. rapporten i PDF-format. Derudover er der vedlagt dele af den litteratur, som er benyttet gennem projektet, og som er tilgængelige på internettet. Disse kan findes i Bilag CD.03.

Gennem rapporten og bilagsmappen er der udarbejdet en række procesdiagrammer for f.eks. beregningsgangen for positionsbestemmelse af IMU-data. I disse diagrammer indgår forskellige symboler og en signaturforklaring for de enkelte symboler kan ses i Figur 1.1.



Figur 1.1: Signaturforklaring for procesdiagrammer.

I forbindelse med udarbejdelsen er følgende software blevet benyttet:

- Matlab v. 7.5.0.342 (R2007b)
  af The MathWorks, Inc.
  - TMK, v. 2008-10
    af Karsten Jensen
    Laboratoriet for Geoinformatik,
    Aalborg Universitet
- GYRO-VIEW v. 2.5.8
  af Crossbow Technology, Inc.

Gennem projektet benyttes følgende ligning som definition for punktspredningen:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$$

Indholdsfortegnelse

1 Indledning 5
1.1 Projektgruppens interesse 6
1.2 Initierende problemstilling 8
1.3 Metode 9
2 Foranalyse 11
2.1 Komponenter i et navigationssystem 12
2.2 Dead reckoning 13
2.2.1 Princippet for dead reckoning 13
2.2.2 Anvendelser af dead reckoning 14
2.3 Instrumenter egnet til dead reckoning 16
2.3.1 Tilgængelige instrumenter 16
2.3.2 Azimuth 1000 18
2.3.3 Zerotronic 10 19
2.3.4 IMU400CC-100 21
2.3.5 3DM-GX1 23
2.4 Software til udvikling af navigationssystem 25
2.5 Projektafgrænsning 26
3 Problemformulering 29
3.1 Fremgangsmåde 31
4 Positionsbestemmelse af køretøj 35
4.1 Koordinatsystemer 35
4.2 Positionsbestemmelse vha. IMU 38
4.2.1 Principper for positionsbestemmelse 38
4.2.2 Beregningsgang 39
4.3 Positionsbestemmelse vha. afstand og kurs 43
4.4 Filtrering af positioner 45
4.4.1 Kalman filtrering 45
4.4.2 Filtreringsprincipper 50
5 Udvikling af navigationssystem 53
5.1 Fremstilling af simuleringskøretøj 54
5.1.1 Krav til simuleringskøretøj 54
5.1.2 Design af simuleringskøretøj 54
5.2 Fremstilling af NS software 57
5.2.1 Krav til software 57
5.2.2 Udviklet brugergrænseflade 59

6 Kalibrering af NS-1002 61
6.1 Koordinatsystemer 61
6.2 DR-IMU 62
6.2.1 Bias 62
6.2.2 Tilfældige fejl 63
6.2.3 Indledende værdier 66
6.3 DR-AK 66
6.3.1 Kompas 66
6.3.2 GPS 70
7 Planlægning af test 73
7.1 Formål med test 73
7.1.1 DR-IMU 74
7.1.2 DR-AK 74
7.1.3 Kalman filteret 75
7.2 Udvælgelse af testområde 75
7.2.1 Krav til testområde 75
7.2.2 Beskrivelse af testområde 76
7.3 Valg af testruter 77
8 Test af NS-1002 81
8.1 Udførelse 82
8.2 DR-IMU 84
8.2.1 Kalibrering 85
8.2.2 Positionering 87
8.3 DR-AK 95
8.3.1 Kalibrering 96
8.3.2 Positionering 97
8.4 Kalman filtreringen 101
8.4.1 Input til Kalman filteret 101
8.4.2 Analyse af filtreringsprincipper 103
8.4.3 Analyse af valgte filtreringsprincip 108
8.5 Afrunding af test af NS-1002 110
9 Konklusion 115
10 Perspektivering 119
10.1 Tekniske forbedringer af NS-1002 119
10.2 Anvendelsesmuligheder af NS-1002 121
Litteraturliste 123
Bilagsliste 129

1 Indledning

Kloakrørsystemer i Danmark har eksisteret i mange år, og landet over, er disse ledninger af ældre dato. Med tiden er rørsystemerne blevet slidte og i visse tilfælde er der opstået utætheder i form af både ud- og indsivninger af f.eks. spildevand og grundvand. Derudover kan der være brud på rørsystemet eller tillukninger, som forhindrer gennemstrømning.
For at konstatere disse fejl, og dermed få udbedret fejlene, er der flere firmaer i Danmark, bl.a. Per Aarsleff A/S, Aalborg Bygge og Entreprenørfirma samt Haderslev Slamsugerservice A/S, som tilbyder løsninger i form af bl.a. TV-inspektioner, hvor en form for fjernstyret bil, fagteknisk kaldet traktor, med et kamera monteret, føres ind i kloakrørene for at finde eventuelle fejl på rørsystemerne.
Derudover tilbydes der forskellige udbedringer af disse fejl, bl.a. strømpeforing, hvor en polyesterstrømpe, som er imprægneret med kunstharpiks, skydes gennem kloaksystemet, og når strømpen er på plads, hærder den, og der dannes dermed et nyt rør i det eksisterende rør. (Aarsleff, 2009)
Kræver udbedringen af kloakrøret, at det skal graves fri, skal fejlens position og dermed kameraets position estimeres. Dette foregår i dag hovedsageligt ved, at der benyttes en sonde, som kan finde kameraet ud fra en antenne placeret på kameraet. Dette er ofte en tidskrævende og dermed dyr proces, da operatøren skal forlade operatørvognen for at bestemme kameraets position. En metode til at minimere den tidskrævende positionsbestemmelse med sonde, kunne være ved at udarbejde et system, som kunne bestemme kameraets position automatisk, dvs. uden at operatøren skal forlade vognen.
Denne form for positionering af punkter, er bl.a. udarbejdet af JT-electronic gmbh (JT) i samarbejde med University of the German Federal Armed Forces, Munich. JT producerer forskellige systemer til TV- inspektioner, f.eks. de traktorer og kameraer, som benyttes til at inspicere rørsystemerne. JT har i den forbindelse, udarbejdet et kamera, hvori der er monteret et positioneringssystem, så kameraets position i rørene kan bestemmes. Hertil er der udviklet software, ASYS (Automated SYStem), som kan behandle, positionere og præsentere data, som indsamles. Herefter kan data udveksles i forskellige formater til brug i diverse CAD og GI systemer og data kan præsenteres i forhold til eksisterende kort eller lignende. (Unibw, 2009) (JTelektronik, 2009)

Til at bestemme positionerne i rørsystemer og andre områder, hvor der ikke er eksterne referencepunkter, kan benyttes en Positionsbestemmelsesmetode, kaldet dead reckoning (DR). DR omhandler, overordnet positionsbestemmelse/navigation, der er afhængig af et kendt udgangspunkt samt en retningsangivelse og en estimering af afstanden over tid. (Grewal, Weill & Andrews, 2001) Denne type positionsbestemmelse/navigering har den fordel, at der, alt efter valg af instrumenter, ikke kræves ydre referencer, som f.eks. ved GNSS, hvor udsyn til satellitter er nødvendig.
Et eksempel på denne form for positionering er inertiel navigation. Ved inertiel navigation anvendes de inertielle egenskaber fra et instrument monteret på det objekt, hvis position skal bestemmes. Dette instrument kaldes 'Inertial Measurement Unit' (IMU), og består af hovedsageligt af to typer sensorer, accelerometre og gyroskoper (gyro), som måler hhv. de accelerationer og vinkelhastighe-

der, som et objekt udfører, i forhold til en defineret referenceramme. Ud fra disse målinger, kan systemet beregne objektets nuværende position. (Britting, 1971)
Et andet eksempel på et DR system, kan være et odometer (afstandsmåler) og et kompas, som dermed bestemmer positionen ud fra en afstand og en retning, som det kendes fra traditionel landmåling ved polær måling. Derudover kan en række andre instrumenter som inklinometer, trykmåler, højdemåler og lignende, benyttes i forbindelse med positionsbestemmelse vha. DR. Der kan kobles flere forskellige datakilder sammen, hvor de forskellige datakilder kan supplere hinanden og forbedre de resultater systemet kan præstere. (Farrell & Barth, 1999)

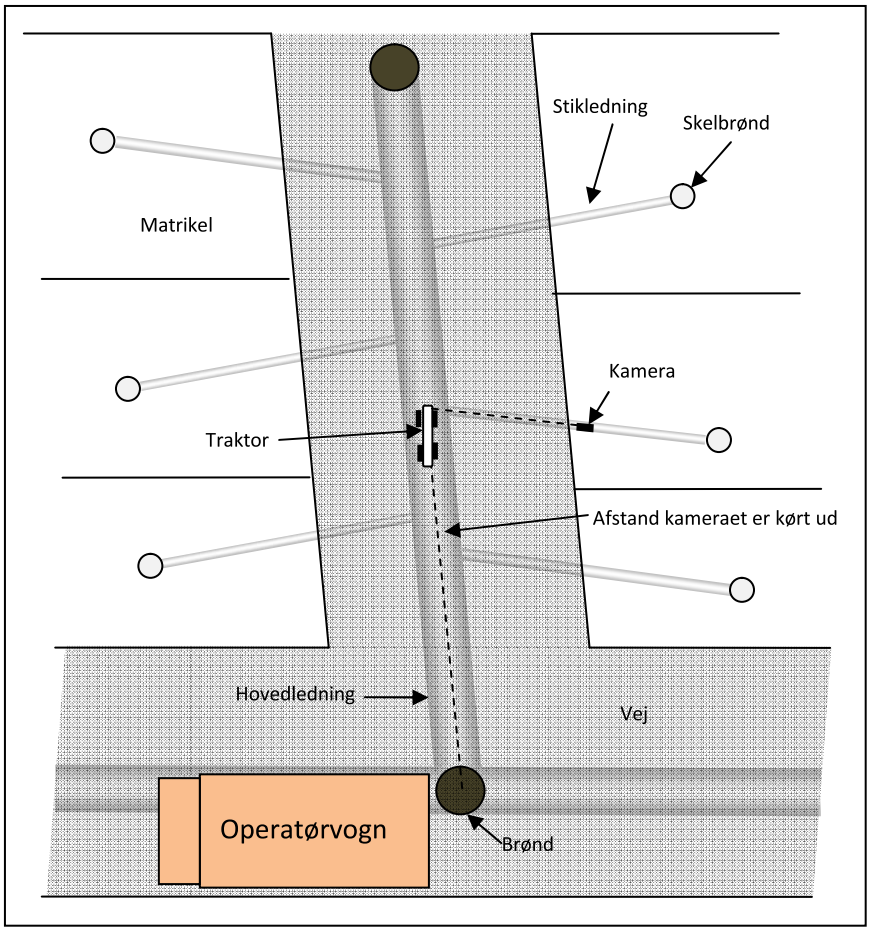
1.1 Projektgruppens interesse

Projektgruppens interesse for sensorintegration, er skabt bl.a. gennem undervisningen i forbindelse med landinspektøruddannelsen på Aalborg Universitet, hvor der i forskellige sammenhænge er blevet undervist i instrumenter, som kan benyttes til DR, bl.a. ved forskellige typer sensorintegration og fotogrammetri, hvor IMU i sammenspil med GNSS, spiller en væsentlig rolle under fotografering og orientering af de optagede billeder. Derudover blev projektgruppen præsenteret for et projektemne under et opstartsmøde, som kunne omhandle integrering og arbejde med forskellige typer af sensorer, hvilket gjorde det muligt, at prøve at arbejde med sensorintegration.
Dette projektemne omhandlede positionering af et kamera i forbindelse med TV-inspektion af rørsystemer. Projektet var et samarbejde med Per Aarsleff A/S, der foretager TV-inspektioner og renoveringer af afløbsledninger. Desuden renoveres rørsystemer over jorden bl.a. i forbindelse med produktionsanlæg, hvor f.eks. procesledninger, ventilationskanaler osv. kontrolleres og renoveres.
I forbindelse med valget af projektemne, blev der arrangeret et møde med Produktionschef hos Per Aarsleff A/S, Carsten Jensen, hvor det var muligt at høre nærmere omkring, hvorledes det eksisterende system fungerer, deres forventninger og hvad de gerne ville have ud af samarbejdet. Et resumé af mødet kan ses i Bilag A.
Per Aarsleff A/S har i dag et system, hvor de sænker traktoren, se Billede 1.1, ned i en kloakbrønd. Herefter kører traktoren ud i hovedledningen og inspektionen startes. Hovedledningen har typisk en diameter på 200 millimeter eller større. Når traktoren ankommer til en stikledning, som har en diameter på mellem 100 og 150 millimeter, skubbes et kamera ud fra traktoren og ind i stikledningen, og det er dette kamera, som Per Aarsleff A/S ønsker en bedre positionsbestemmelse af. Operatøren får konstant informationer omkring den afstand, som traktoren har tilbagelagt. Derudover registreres retningen, som kameraet bevæger sig fra hovedledningen til stikledningerne. Denne registrering foregår ved at angive retningen i forhold til en urskive f.eks. skrives 2, hvis retningen er mod kl. 2.

Billede 1.1: Eksempel på en traktor som benyttes af Per Aarsleff A/S, ved TV-inspektion i kloakledninger.

Foregår TV-inspektionen i forbindelse med en mulig renovering, så findes stedet i kloakrøret, som skal renoveres, med kameraet. Derefter er operatøren af kameraet nødt til at finde kameraet vha. en sonde, som ud fra en sender i kameraet kan lokalisere positionen af kameraet. Heref-

ter skal stedet afmærkes, og skal der foretages gravearbejde, hyres en landinspektør til at afmærke og måle positionen, så det kan genfindes. I visse tilfælde hyres Per Aarsleff A/S også til en generel TV-inspektion, hvor et større område med hoved- og stikledninger skal inspiceres, så kvaliteten af rørene kan vurderes. Her skal der i princippet kun inspiceres ind til skel, da det er den enkelte grundejer, der har ansvaret for kloakrørene på egen grund. Der er dog forskelle fra kommune til kommune på, hvem der står for inspektionen og har ansvaret for vedligeholdelsen af rør på privat grund. I tilfælde, hvor kommunen ikke har ansvaret for renoveringen på privat grund, så skal operatøren af kameraet igen ud med sonden og finde kameraet, når kameraet har nået skelbrønden på den enkelte grund. Herefter måles fra skellet til det sted, hvor det med sonden er vurderet at kameraet er placeret. Dette foregår ved brug af en tommestok og afstanden registreres i systemet, så kloakrørene kun inspiceres til skel. En principskitse for inspektion af hoved- og stikledninger kan ses i Figur 1.1.



Figur 1.1: Principskitse for TV-inspektion af hoved- og stikledninger. Kameraets position fastlægges med en sonde.

Det er bl.a. i disse tilfælde, at Per Aarsleff A/S har et ønske om, at få positioneret kameraet mere nøjagtigt og effektivt, så der kunne spares tid og dermed penge. Derfor har Per Aarsleff A/S en forhåbning om, at der kan udarbejdes et system, der kan bestemme positionen på kameraet automatisk og evt. indtegne den rute kameraet har bevæget sig, så et kortmateriale udarbejdes. Herudfra vil det også være muligt at lægge et matrikelkort over kortet som udtegnes efter inspektionen og på den måde fastslå, hvilke dele af kloakrøret, der er kommunens og som dermed skal indgå i inspektionen

og hvilken del, der ligger efter skel og som dermed ikke skal inspiceres. Dette kunne også foregå 'realtime', så der kom en besked når kameraet krydsede skel. På den måde vil der kunne spares tid, da operatøren, som udfører inspektionen ikke skulle ud og lokalisere kameraet med sonden, og hvis der automatisk b lev foretaget en positionsbestemmelse, ville det være unødvendigt at hyre en landinspektør til at bestemme positionen på det sted, hvor der skulle graves.
Det var desuden et krav, at der skulle være en nøjagtighed på min. ±0,5 meter i planen for, at systemet ville være brugbart. Derudover var det vigtigst for Per Aarsleff A/S, at der kunne fastlægges en position i planen frem for 3D, da det er placeringen på terrænniveau, som skal bruges. Mht. nøjagtigheden, så blev det ikke nærmere beskrevet, hvorledes denne nøjagtighed skal forstås, men det er projektgruppens vurdering, at nøjagtigheden skal forstås, som en konfidensgrad på 3 gange spredningen, dvs. at systemet til alle tider skal kunne levere en sådan nøjagtighed.
Ovenstående problemstilling finder projektgruppen meget spændende og den giver mange muligheder i projektarbejdet. Blandt andet giver den mulighed for samarbejde med en ekstern virksomhed, hvilket ofte er ekstra motiverende.
Ud over disse grunde til at arbejde inden for denne problemstilling, så kan arbejdet også åbne for nye muligheder i fremtiden, med forskellige former for udbygning af systemet. F.eks. med andre sensorer og måle-instrumenter, som laserscanner, kamera, videokamera osv.

1.2 Initierende problemstilling

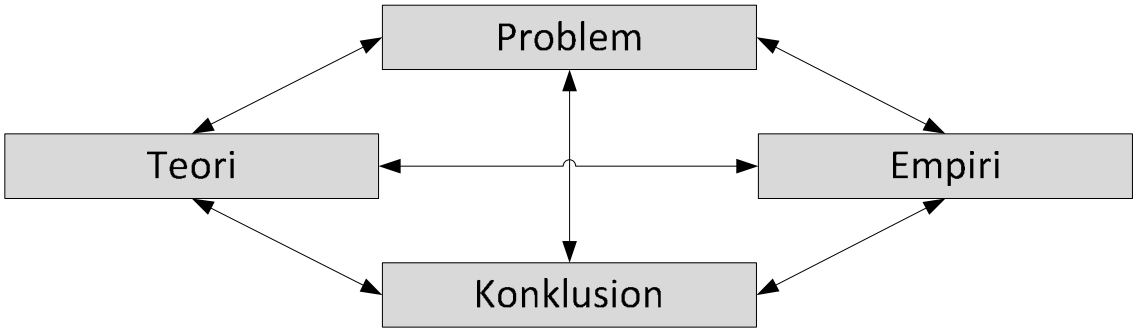
På baggrund af mødet med Per Aarsleff A/S og projektgruppens interesse, samt den indledende diskussion, hvori mulighederne inden for området og de konkrete krav er opstillet, kan følgende initierende problem opstilles.

Hvordan kan utilgængelige punkter positioneres i rørsystemer gennem et navigationssystem med baggrund i målemetoden dead reckoning ved integration af forskellige sensorer og kan der opnås en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre?

1.3 Metode

Formålet med dette afsnit er at beskrive projektets anvendelse af metode. Dette gøres for, at læseren kan få et indblik i projektets overordnede opbygning, mht. hvilke elementer og dele projektet er opbygget af.

Projektet tager udgangspunkt i de fire dele; problemformulering, teori, empiri og konklusion, som danner grundlaget for et problemorienteret projekt. Disse fire grundelementer og deres sammenhæng er illustreret i Figur 1.2. Figuren viser de fire grundelementer i projektforløbet, mens pilene illustrerer, at de enkelte elementer påvirker hinanden. Figuren illustrerer desuden, at et projekt er en iterativ proces. (Aunsborg, 1997)



Figur 1.2: Processer i problemorienteret arbejde.

2 Foranalyse

Formålet med dette kapitel er at konkretisere den initierende problemstilling, så der kan udarbejdes en problemformulering, som skal danne baggrund for den resterende del rapporten. Derudover har kapitlet til formål at give et indblik i målemetoden dead reckoning og forskellige typer instrumenter, som kan indgå i et navigationssystem, der kan foretage positionering på baggrund af DR.
Dette gøres for at opnå et kendskab til DR og herunder et nærmere kendskab til instrumenter som kan indgå i et navigationssystem, som senere kan benyttes til at fastslå positioner til utilgængelige punkter, i dette tilfælde rørsystemer. Opbygningen af kapitlet fremgår af Figur 2.1.

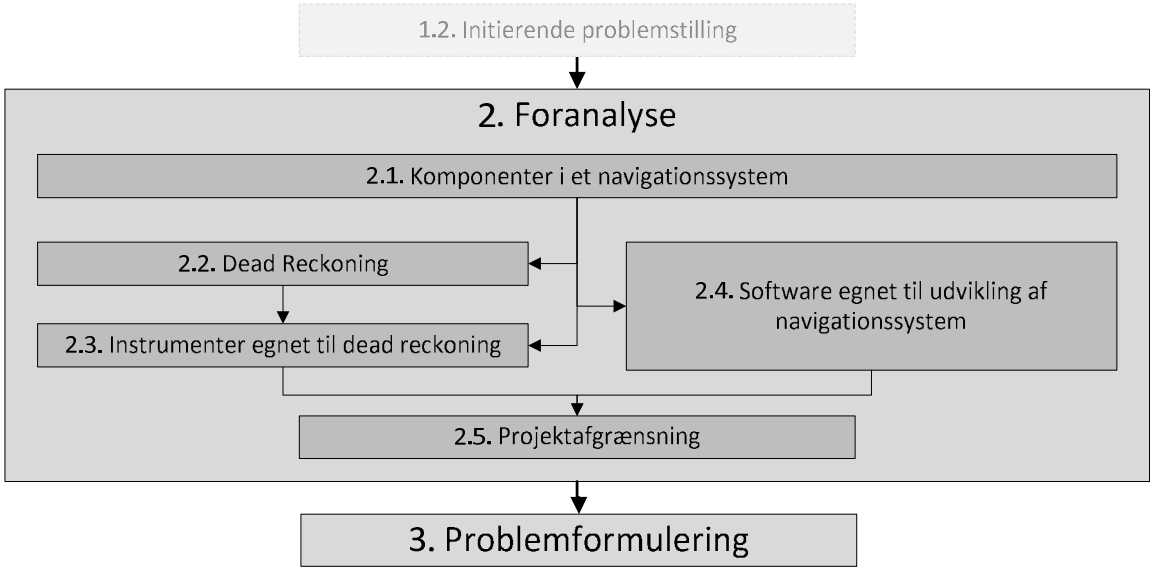
For at kunne udarbejde et system til positionsbestemmelse, er det væsentligt at have forståelse for, hvad et navigationssystem er, samt hvilke komponenter der er nødvendige i et navigationssystem. Derfor beskrives i afsnit 2.1, opbygningen af et navigationssystem, så der opnås en viden omkring de dele et sådant skal bestå af.

For at opnå viden i relation til den initierende problemstilling, og da projektgruppen ikke har en dybdegående viden omkring målemetoden DR, vil de overordnede principper for målemetoden blive gennemgået i afsnit 2.2. Desuden vil målemetoden blive beskrevet gennem en række eksempler, hvor DR er blevet benyttet, både for at vise i hvilke sammenhænge den er benyttet, men også for at vise hvilke former for sensorintegration, der tidligere er blevet foretaget, og dermed drage nytte og få inspiration til det fremtidige arbejde gennem projektet.

Derpå beskrives, i afsnit 2.3, en række af de instrumenter, der kan benyttes i en sensorintegration og dermed til målemetoden DR. Dette gøres for at få et indblik i problemer og muligheder i forbindelse med de forskellige instrumenter. Det gøres både mht. hvad det enkelte instrument måler, men også omkring, hvilken datatype instrumentet leverer, og hvorledes der kan bestemmes positioner vha. af instrumentet.

Herefter vil der i afsnit 2.4 blive set på tilgængeligt software, som kan benyttes til at udarbejde et navigationssystem og dermed den software, som skal benyttes til at indsamle og bearbejde data. Dette gøres for at få et indblik i, hvilken software som er tilgængelig og de forskelle, der er mellem dem. Herunder ses på, hvilke fordele og ulemper, der er for at bruge det ene frem for et andet, og hvorledes det er brugbart i forbindelse med det formål at indsamle og integrere data fra flere forskellige datakilder.

Afslutningsvis vil der i afsnit 2.5 blive samlet op på erfaringerne der er gjort gennem kapitlet og der vil blive foretaget valg og afgrænsninger både mht. valg af instrumenter samt valg af navigationssoftware, som skal benyttes i den resterende del af projektet.
På baggrund af disse afsnit vil det være muligt at svare på den initierende problemstilling og herefter formulere det problem, der vil være projektgruppens fokus i den resterende del af projektet.



Figur 2.1: Strukturdiagram for foranalysen.

2.1 Komponenter i et navigationssystem

Formålet med dette afsnit er at klarlægge, hvad er navigationssystem er og hvilke komponenter der er nødvendige i at navigationssystem. Dette gøres for at skabe viden om, hvilke aspekter der skal skabes yderligere viden om, og hvilke skridt der skal tages, for på egen hånd at kunne udvikle et navigationssystem, der kan anvendes i rørsystemer.

Grundlæggende består et navigationssystem for biler og andre køretøjer af en række individuelle komponenter, f.eks. moduler som ruteplanlægning, kortdatabase og positionering, der tilsammen kan udgøre et avanceret navigationssystem, der kan guide brugeren i trafikken eller lign. (Zhao, 1997:6-13). Projektets fokus begrænser sig til positioneringsmodulet i et navigationssystem. Positioneringsmodulet kan konstrueres efter forskellige teknologier og principper, afhængig af i hvilken sammenhæng navigationssystemet skal anvendes. En generel struktur for positioneringsmodulet omfatter følgende: (Zhao, 1997:43-45)

- **Instrumenter**
  En eller flere instrumenter der kan bidrage med målinger til positionsbestemmelse. Ofte er det ikke muligt at opnå en positionsbestemmelse, der opfylder den ønskede nøjagtighed for systemet, kun ved brug af et instrument. Flere instrumenter kan avendes, og er disse nøje udvalgt efter deres forskellige karakteristika, kan de supplere hinanden og derved kompensere for en række af de øvrige instrumenters fejl.
- **Positioneringsteknologi**
  Ved positioneringsteknologi forstås forskellige metoder til beregning af en position. Positioneringsteknologier kan inddeles i stand-alone-, satellit- eller radiobaserede systemer. Af disse tre teknologier er kun stand-alone systemer af interesse, da positionsbestemmelsen kan foretages uafhængig af eksterne referencer, hvilket vil være nødvendigt i rørsystemer. DR er et selvstændigt system, der kræver målinger af en bestemt type for at beregne positioner.

- **Filtrerings algoritme**
  Inkluderer positioneringsmodulet flere instrumenter, kræves der en filtreringsmekanisme, som kan samordne de forskellige målinger og herved kompensere for det enkelte instruments fejl, for derigennem at opnå en bedre bestemt position end, hvis der kun blev anvendt ét af instrumenterne. Filtreringen kræver kendskab til, hvilken rækkefølge de enkelte målinger er observeret. Dette kendskab skabes f.eks. gennem tidsstempling af målingens modtagelse, fra en fælles tidsreference.

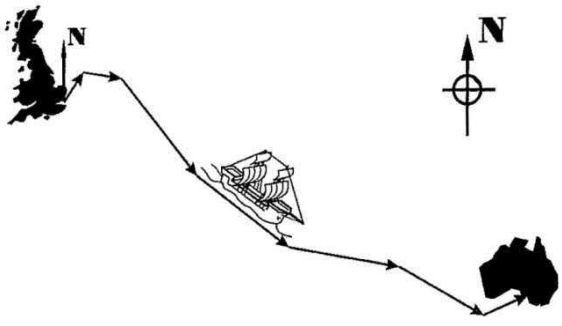
For alle tre ovenstående elementer er anvendelige til positionsbestemmelsen, kræves at der som en del af navigationssystemet også indgår en beregningsenhed, f.eks. en PC. Det er beregningsenhedens opgave såvel at indsamle målinger fra de anvendte instrumenter, beregne positioneringsteknologien for målingerne og filtrere positionerne til én forbedret positionsbestemmelse med navigationssystemet. Der er altså først tale om et egentlig NS, når instrumenter egnet til DR er forbundet til en beregningsenhed, der kan foretage en databehandling af målingerne til en position.

2.2 Dead reckoning

Formålet med dette afsnit er at beskrive målemetoden DR, så der kan opnås et kendskab til målemetoden og de overordnede principper. Desuden er formålet at undersøge, hvor målemetoden er benyttet, dvs. i hvilke sammenhænge DR er anvendt. I underafsnit 2.2.1 beskrives først princippet bag DR og fordele ved denne målemetode frem for GNSS. Derefter gennemgås i afsnit 2.2.2 en række eksempler, hvor DR er benyttet og i eksemplerne ses der på, hvad formålet har været, hvilke instrumenter der er anvendt, til positionsbestemmelse.

2.2.1 Princippet for dead reckoning

Navigation ved hjælp af DR er i århundreder blevet anvendt af søfolk til at finde vej over de store have. DR har desuden fundet anvendelse i luftfarten, når piloter skulle navigere sikkert over oceanerne. Betegnelsen 'dead reckoning' stammer fra udtrykket 'deduced reckoning', der betyder, at udlede en position. (Farrell, et al. 1999:5)
Grundlaget for at bestemme denne position er en kendt startposition, samt kendskab til bevægelsesretning og afstand. Et eksempel på dette kan være et skib, der sejler fra England til Australien, se Figur 2.2. Ved hjælp af kompasset kender navigatøren kursen, som skibet bevæger sig i og ud fra en hastighedsangivelse, knob, og tiden fra et ur, beregnes den tilbagelagte strækning, afstanden. Hver gang skibet skifter retning, beregnes positionen på baggrund af de indsamlede observationer, hvorefter denne kan markeres på skibets søkort. På denne måde er det muligt, hele tiden at holde styr på, hvor skibet er og bringe skibet til den rigtige havn. Metoden minder i princippet om et blindt polygontræk, som kendes fra den almindelige landmåling, hvor metoden kendes, som polær måling. Metoden består i, at



Figur 2.2: Eksempel på DR fra England til Australien. (Lawrence, 1998:5)

der fra et kendt udgangspunkt måles retninger og afstande, hvorpå de efterfølgende positioner kan bestemmes.
Navigation efter DR har dog visse svagheder. Et af de største problemer sømænd har haft op gennem tiden har været tidsangivelsen. Tidsangivelserne var i mange år meget upræcise og det var ikke før midt i det 18. århundrede, at skibene kunne have et ur med, som kunne give rimelig præcise tidsangivelser. De dårlige tidsangivelser medførte, at de tilbagelagte afstande var svære at beregne korrekt. Derudover ophobes der hele tiden fejl i positionsangivelsen. Hvis en position er beregnet forkert, bliver den næste position behæftet med denne fejl, også selv om selve angivelsen af retning og afstand fra det første punkt til det andet er korrekt. Samlet set sker der altså en fejlophobning gennem et længere forløb, hvor der kun måles relativt, dvs. kendte referencepunkter ikke indgår i beregningerne. På trods af dette, har denne metode fundet bred anvendelse i både søfart og luftfart. Efterhånden som instrumenterne er blevet bedre, er også positionsbestemmelsen blevet mere nøjagtig og pålidelig. Derudover benyttes i dag GNSS til at rette positionerne op, dvs. der benyttes absolutte koordinater når disse er til rådighed. (Lawrence, 1998:4-5)
Definitionen af, hvornår der måles relativt eller absolut, afhænger af den sammenhæng, hvori målingen foretages. Når det er måling på Jorden, der er i fokus kan relativ og absolut defineres på følgende måde:

- Absolut: Måling der har et referencesystem, som følger Jorden og dens rotation. Det vil sige måling, der er foretaget ud fra eksterne referencer, såsom satellitter i rummet eller lokale landmærker. Det er f.eks. måling med GNSS, måling på magnetfelter, afstandsmåling på Jorden, med andre ord måling, hvor resultatet af målingen ikke er afhængig af forrige måling.
- Relativ: Måling der er afhængig af et startpunkt og hvor hver ny position er afhængig af den forrige position. Det vil sige måling, hvor der beregnes positioner, på baggrund af en retning og en afstand, hvorefter der foretages nye målinger med udgangspunkt i det nye punkt. Dette medfører dog en vis fejlophobning, da fejl på en position vil give fejl på alle efterfølgende positioner.

Det er ikke altid muligt at anvende absolut måling, da der f.eks. ikke kan opnås forbindelse til GNSS satellitter under jorden. I disse situationer, er det derfor nødvendigt, at anvende relativ måling.

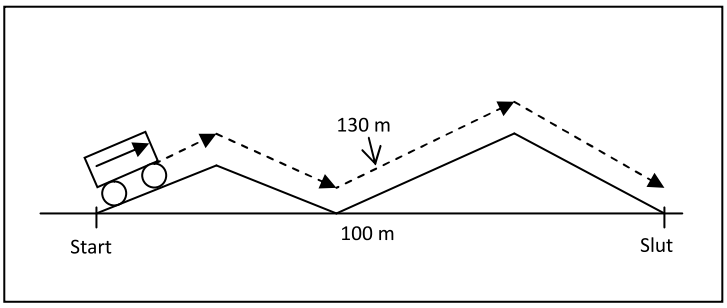
2.2.2 Anvendelser af dead reckoning

For at se i hvilke sammenhænge DR benyttes og hvilke forskellige instrumenter og sensorer, der kan benyttes ved DR, beskrives her en række eksempler på dette.

Eksempel 1
Første eksempel er fra University of Calgary i Canada, hvor nøjagtigheden af et GPS og Inertial navigation System (INS) er blevet kontrolleret af Mostafa & Schwarz (2001), i forbindelse med georeferering af et multikamerasystem. Formålet med testen var at samle et multikamerasystem, hvor der indgik to kameraer, samt en GPS/INS til orientering, og herudfra teste nøjagtigheden af det enkelte billedes placering, samt om tilføjelsen af det ekstra kamera, kunne forbedre nøjagtigheden for, hvor godt der kunne måles i billederne.
Mht. georefereringen af kamerasystemet, så bestod det anvendte NS af et GPS understøttet med INS, og gennem en Kalman filtrering, var det muligt, at georeferere kameraet, med en tilfredsstillende positioneringsnøjagtighed. (Mostafa, et al. 2001)

Eksempel 2

Andet eksempel er et system, der tænkes anvendt på en rover, der skal køre på månen. Forudsætningen for udviklingen er, at der ikke er GNSS signal på månen og samtidig er terrænet så kuperet, at DR fra f.eks. skibsnavigation, hvor der kun anvendes retning og afstand, ikke er nøjagtigt nok til en kortlægning af det område der køres i. Derfor anvendes der, udover odometre til at bestemme den tilbagelagte afstand, samtidig observationer fra IMU i beregningen af positionen. På denne måde er det muligt at kompensere for de fejl i afstanden, der kan opstå, når roveren kører over f.eks. en bakke, se Figur 2.3. Ved at kombinere instrumenter, er det således muligt at beregne roverens position med en højere nøjagtighed, da der kan tages hensyn til det kuperede terræn. (Fuke & Krotkov, 1996)



Figur 2.3: Effekten af meget kuperet terræn på afstandsmålingen.

Eksempel 3

I dette eksempel anvendes DR som supplement til GNSS, (Cederholm, 2000). Til at indsamle data til DR anvendes et kompas, der måler retningsændringer samt et odometer, der registrerer den tilbagelagte afstand, og til at knytte de indsamlede data sammen, anvendes et Kalman filter. Systemet blev anvendt i en bil, der kørte rundt i et byområde med tæt-høj bebyggelse. Der blev simuleret udfald på GNSS signalet, hvor positionen i stedet skulle beregnes ved hjælp af DR. Det viste sig, at systemet var i stand til at følge vejene tæt, også når der blev simuleret udfald på GNSS signalet. Med denne metode vil det være muligt, at fortsætte navigeringen, selvom GNSS signalet i perioder forsvinder. (Cederholm, 2000)

Eksemplet viser, at ved at sammensætte flere instrumenter, kan der kompenseres for udfald på nogle af instrumenterne.

Eksempel 4

I fjerde eksempel er det forsøgt, kontinuerligt at give en position på en fodgænger. Baggrunden er, at det er forholdsvis nemt at få en position ved hjælp af GNSS, men hvis en fodgænger bevæger sig ind i f.eks. en bygning mistes signalet og positionen kan ikke længere måles. Derfor er det forsøgt at kombinere tre forskellige instrumenter:

- GNSS (til positionering udendørs)
- Elektronisk kompas (der angiver retning)
- IMU (der måler retningsændringer og hastighedsændringer)

GNSS'en giver fodgængerens position når denne er udendørs, men når fodgængeren bevæger sig ind i en bygning, tager kompasset og IMU'en over og beregner positionen. Et af de største problemer var, at kompasset var meget følsomt overfor lokale magnetfelter, hvilket gjorde det nødvendigt, at kalibrere kompasset ofte. (Herrera, Kaufmann & Quirós, 2007)

Eksempel 5
Femte eksempel omhandler kalibrering og test af en IMU, der skal anvendes til DR. En IMU blev kalibreret for systematiske fejl og monteret i en bil. Herefter blev der kørt en række ture på en kendt strækning og positionerne blev beregnet på baggrund af de indsamlede data. Når IMU'en blev kalibreret, kunne der inden for korte tidsrum efter kalibreringen opnås tilfredsstillende resultater. Det viste sig dog, at der var en ophobning af fejl i systemet. Dette medførte, at afvigelserne på de plane koordinater kunne blive op til 47 meter på bare 60 sekunder. Jo længere tid, der skulle navigeres kun ved hjælp af IMU'en, jo større fejl kom der på positionen. (Eistrup, Gregersen & Meister, 2005a) Det er således klart, at en IMU kan anvendes til DR, men der ophobes fejl i systemet, hvis der udelukkende anvendes IMU. Det må derfor overvejes, om denne kan støttes af andre instrumenter.

Opsamling
Gennem disse eksempler kan det ses, at DR kan benyttes i flere forskellige sammenhænge, og der kan implementeres flere forskellige datakilder, som kan integreres i et samlet system.
Som beskrevet i flere eksempler, så benyttes et DR system ofte som supplement til GNSS målinger, dvs. enten i områder, hvor GNSS ikke kan benyttes pga. manglende udsyn, eller mellem to GNSS observationer, da GNSS måles med en lav frekvens. Dette er kendetegnet for de instrumenter, som indgår i DR systemer, at de ofte leverer data med en høj frekvens, men til gengæld, er data ofte relativt, dvs. data skal suppleres med f.eks. GNSS positioner for, at der kan bestemmes pålidelige positioner.
Det kan desuden ses, at det i de fleste tilfælde er nødvendigt at vælge forskellige sensorer og instrumenter til at indgå i et NS. Dog vil data fra en IMU alene kunne give brugbare positioner, men grundet fejl i systemet, vil den ikke være brugbar over en længere periode. Derfor vil det være oplagt at supplere med andre instrumenter, for at stabilisere systemet.

2.3 Instrumenter egnet til dead reckoning

Formålet med dette afsnit er at klarlægge, hvilke instrumenter der kan anvendes til DR, i et miljø som rørsystemer, med baggrund i de instrumenter projektgruppen har til rådighed.
Dette gøres dels for at skabe et overblik over, hvilke instrumenter der i øjeblikket anvendes af Per Aarsleff A/S under en inspektion, samt klargøre hvilke tilgængelige instrumenter der vil være mulighed for at integrere i et NS. Derudover gøres det for at sikre, at det NS, der skal udvikles til positionsbestemmelsen, opbygges omkring de instrumenter, der er mest hensigtsmæssige at benytte til positionsbestemmelsen.
I underafsnit 2.3.1 beskrives først de instrumenter, der kan være tilgængelige for projektgruppen og det afdækkes, hvilke instrumenter der fokuseres på videre i rapporten. Herefter beskrives i underafsnit 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 og 2.3.5 instrumenterne, Azimuth 1000, Zerotronic 10, IMU400CC-100 samt 3DM-GX1.

2.3.1 Tilgængelige instrumenter

Som beskrevet i afsnit 2.2, er princippet for DR at bestemme en position på baggrund af retnings- og afstandsændringer i forhold til den forrige position. Der findes forskellige instrumenter fra et utal af producenter, der på forskellig vis kan registrere ændringer af retning, afstand, hastighed, acceleration, højde mv. Selvom flere af disse produkter er designet efter samme teknologi vil det være tvivl-

somt om eksempelvis en højdemåler fra to forskellige producenter ville have de præcis samme specifikationer. Det vil derfor være et tidskrævende arbejde, at lave en udtømmende liste over de instrumenter, der vil egne sig til et NS, der kan fungere i underjordiske kloakker, med henblik på, at kunne udvælge de bedst egnede instrumenter til positionsbestemmelse.
I stedet vil instrumenter, der kan indgå i et NS, blive udvalgt blandt de instrumenter projektgruppen allerede har til rådighed gennem hhv. Institut for Samfundsudvikling og Planlægning ved Aalborg Universitet og Per Aarsleff A/S. Det skal dog nævnes, at det kunne have været en mulighed at skaffe andre instrumenter, f.eks. et odometer for at have afstandsdata, som en del af de tilgængelige data. Projektgruppen vælger dog, at denne datatype kan simuleres på anden vis, da Per Aarsleff A/S' interesse er en principiel løsning af positioneringen, hvorfor der blot tages udgangspunkt i de tilgængelige instrumenter. Derfor tages der heller ikke højde for dette under beskrivelsen og valg af hvilke instrumenter det udviklede NS skal bestå af.
På traktoren, som Per Aarsleff A/S benytter til TV-inspektioner af rørsystemer, er der allerede installeret nogle instrumenter, som findes egnet i et NS.
Det er blevet oplyst, at der er påmonteret en afstandsmåler på traktoren, hvilket angiver afstanden som traktoren tilbagelægger under en inspektionsopgave, jf. Bilag A. Derudover er der på enkelte monteret en trykmåler, der vil kunne indikere højden eller i de fleste tilfælde, den dybde, som kameraet befinder sig under overfladen. Desuden stiller Per Aarsleff A/S et instrument, de tidligere har forsøgt at ombygge, til rådighed for projektgruppen. Instrumentet er en IMU kombineret med tre magnetometre.
Til det afholdte møde med en repræsentant for Per Aarsleff A/S, blev det fastlagt, at projektgruppen ikke ville kunne få stillet en traktor med udstyr til rådighed under udviklingen af et NS, grundet høje driftsomkostninger, jf. Bilag A. Det betyder, at data fra odometer og højdemåler ikke vil være tilgængelig under kalibrering og test af det NS, der skal udvikles. En mulig løsning på det manglende data fra odometer og højdemåler kunne være, at simulere værdier for disse observationer under tests af et udviklet NS.

Institut for Samfundsudvikling og Planlægning ved Aalborg Universitet har en større samling af instrumenter anvendt til forskellige opmålingsarbejder, som GNSS-modtagere, totalstationer mv. Fra denne instrumentsamling, er der fundet tre instrumenter egnet til at kunne indgå i et NS anvendt i rørsystemer.
Det ene instrument er en IMU, som kan bestemme accelerations- og retningsændringer. Det andet instrument er et elektronisk kompas, der kan bestemme en kurs, mens det tredje instrument er et inklinometer, der kan bestemme hældningsændringer i forhold til enten det lodrette eller vandrette plan, alt efter hvordan det er monteret.

De instrumenter, der vurderes egnet til et NS til brug i rørsystemer, og samtidig vil være tilgængelige for projektgruppen under projektperioden fremgår af Tabel 2.1. Hvert af de fire instrumenter vil blive beskrevet nærmere i det følgende. Det har dog ikke under beskrivelse af de to IMU'er, som indgår været muligt at finde samme specifikationer for de to IMU'er. Derfor kan der være forskelle i beskrivelserne af instrumenterne, hvilket medfører, at en direkte sammenligning er vanskeligt at lave.

Instrument type	Produkt navn	Producent
Elektronisk kompas	Azimuth 1000	KVH Industries Inc.
Inklinometer	Zerotronic 10	Wyler AG
IMU	IMU400CC-100	Crossbow Technology Inc.
IMU & magnetometer	3DM-GX1	MicroStrain Inc.

Tabel 2.1: Tilgængelige instrumenter, som er fundet egnet til at indgå i et NS til positionering i rørsystemer.

2.3.2 Azimuth 1000

Azimuth 1000 er et elektronisk fluxgate kompas, udstyret med LCD display, samt mulighed for overførsel af data til eksterne enheder, se Billede 2.1. Delene er samlet i en vandtæt pakke og det produkt, som er til rådighed for projektgruppen, er ombygget, så data kan overføres gennem en RS-232 seriel forbindelse.

Billede 2.1: Azimuth 1000, placeret i ramme.

Anvendt teknologi

Et kompas er helt overordnet et måleinstrument, som kan bestemme retningen i forhold til f.eks. geografisk eller magnetisk nord. Retningsangivelsen fra et kompas benævnes kurs, og er en absolut retningsangivelse, da den bestemmes på baggrund af enten magnetisk eller geografisk nord. Inden for de elektroniske kompastyper, er der to forskellige metoder til at bestemme kursen, enten geomagnetisk eller vha. gyroer. Azimuth 1000 er af typen 'fluxgate', hvilket betyder at kompasset bestemmer kursen geomagnetisk vha. induktion på baggrund af jordens magnetfelt. Induktion virker ved, at der sættes strøm til en spole og når en magnet eller et magnetfelt bevæges nær eller i forhold til spolen, så induceres der strøm i spolen, som kan måles. Ud fra den strøm, som induceres i de spoler, som er placeret i kompasset, kan retningen bestemmes.
Azimuth 1000 bestemmer kun en kurs og vil dermed ikke selvstændigt kunne udgøre et DR-system. Kursen er dog en absolut bestemt retning, og kompasset vil derfor egne sig til at støtte instrumenter der kun kan bestemme relative retninger.

Tekniske specifikationer

Af Tabel 2.2 fremgår det, at Azimuth 1000 kan bestemme kursen med en frekvens på 10 Hz, svarende til 10 gange i sekundet. Kursen bestemmes i tiendedele grader, og nøjagtigheden, hvormed kursen bestemmes, er ±0,5° i et optimalt miljø. Kursændringer mindre end en tiendedel af en grad registreres dermed ikke af Azimuth 1000. Det elektroniske kompas er udstyret med en gimbal kompensator, der sikrer, at kursen kan bestemmes selvom kompasset har en hældning på ±25° i forhold til det vandrette plan.
Oprettes der en dataforbindelse til kompasset, vil dataformatet som kursen angives i, følge standarden NMEA 0183, jf. Bilag B.

Nøjagtighed	±0,5°
Gimbal kompensator	±25°
Frekvens	10 Hz
Output dataformat	NMEA 0183

Tabel 2.2: Tekniske specifikationer for Azimuth 1000 (KVH, 2009a).

Fejlkilder

Det magnetiske felt omkring jorden kan påvirkes lokalt, hvilket gør, at kompasset er afhængig af det miljø den benyttes i. Omkringliggende omgivelser, der kan få indflydelse på den kurs som kompasset angiver, kan f.eks. være det fysiske objekt som kompasset er placeret på, bygninger eller andre menneskeskabte objekter, jf. Bilag C.

Tidligere erfaringer

Det elektroniske kompas, Azimuth 1000, som er til rådighed ved Aalborg Universitet, er blevet benyttet af Nordby & Kristensen (1999), ved udviklingen af et integreret positioneringssystem til køretøjer. Efter en autokalibrering af kompasset, konstaterer Nordby, et al. 1999:42), at kursen stadig forstyrres af magnetisk støj fra køretøjet, hvor kompasset er installeret, resulterende i fejlkurs på mellem -13,6° til 14,7°, afhængig af kørselsretning. Der udarbejdes en deviationstabel som supplement til autokalibreringen, hvorefter kursen kan korrigeres og bestemmes med en nøjagtighed på ±1,7° mod de ±0,5° der fremgår af de tekniske specifikationer, se Tabel 2.2 (Nordby, et al. 1999:46).

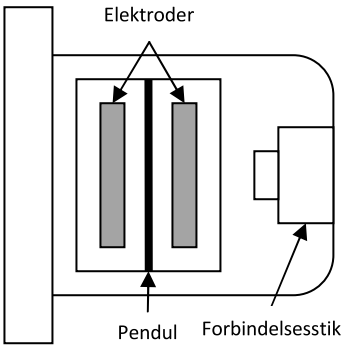
2.3.3 Zerotronic 10

Zerotronic 10 er et inklinometer, der måler hældninger, se Billede 2.2. De målte hældninger kan, aflæses elektronisk med en tilhørende aflæser. Det er dog også muligt, vha. en RS-485 seriel forbindelse, at overføre data fra sensorerne. Kabler til oprettelse af den serielle forbindelse er dog ikke til rådighed, og skal derfor rekvireres fra producent eller selv fremstilles, Såfremt dette instrument skal kobles direkte til computeren.

Billede 2.2: Zerotronic 10 og aflæsningsenhed.

Anvendt teknologi

Zerotronic 10 inklinometeret, registrerer ændringer i hældning i forhold til tyngdekraften. Zerotronic 10 er afskærmet, så lokale magnetfelter ikke forstyrrer målingerne. Inklinometeret kan dermed siges at måle absolut i forhold til jordens tyngdekraft. Dette gøres ved hjælp af et pendul, ophængt mellem to elektroder. Når inklinometeret står vandret, er pendulet midt imellem elektroderne. Når inklinometeret tipper, kommer pendulet tættere på den ene elektrode, hvilket medfører en spændingsændring mellem de to elektroder, der kan omsættes til en hældning. Opbygningen af inklinometeret kan ses i Figur 2.4.



Figur 2.4: Opbygning af Zerotronic inklinometer.

Zerotronic 10 bestemmer kun en hældning i forhold til tyngdekraften, og kan derfor ikke bestemme retningsændringer omkring tyngdekraftens akse. De to hældningsakser er dog en absolut bestemt retning, og inklinometrene vil derfor egne sig til at støtte instrumenter, der kun kan bestemme relative retninger, men kun i forhold til det vandrette plan. Da inklinometrene kun bestemmer hældninger vil de dermed ikke selvstændigt kunne udgøre et DR-system.

Tekniske specifikationer

I Tabel 2.3 ses udvalgte specifikationer for Zerotronic 10. R.O. i tabellen står for Read Out, nærmere betegnet den udlæste hældningsværdi. Det vil sige, at den maksimale afvigelse på en angivet hældning inden for 24 timer er +0,02 %. Bliver instrumentet ikke kalibreret i seks måneder er den maksimale afvigelse +0,15 %. Begge disse nøjagtigheder gælder ved måling i 20 °C. Det ses desuden af tabellen, at temperaturens indflydelse på den udlæste hældning, maksimalt er +0,03 % per °C.
Dataforbindelse til inklinometeret, oprettes ved hjælp af en seriel forbindelse, med protokollen RS-485, hvorfra der fås data i ASCII-format, jf. Bilag B. Kabler der muliggør oprettelse af dataforbindelsen med en computer er ikke til rådighed, hvorfor disse skal rekvireres i fald data fra inklinometrene ønskes anvendt direkte i et NS. Inklinometrene kan til gengæld forbindes til den medfølgende elektroniske aflæser, hvor et display løbende viser hældningsværdierne som sensorerne registrerer.
Instrumentets observationer måles med en frekvens mellem 250.000 og 350.000 Hz. Dette sikrer, at selvom der ønskes mange målinger i sekundet, vil der altid være en høj opløsning på data.

Fejlgrænse inden for 24 timer	+ 0,02 % R.O.
Fejlgrænse inden for 6 måneder	+ 0,15 % R.O.
Temperatur indflydelse (per °C)	+ 0,03 % R.O.
Digitalt output dataformat	RS-485
Frekvens (Hz)	250.000 - 350.000

Tabel 2.3: Udvalgte specifikationer for Zerotronic 10 (Wyler, 2007).

Fejlkilder

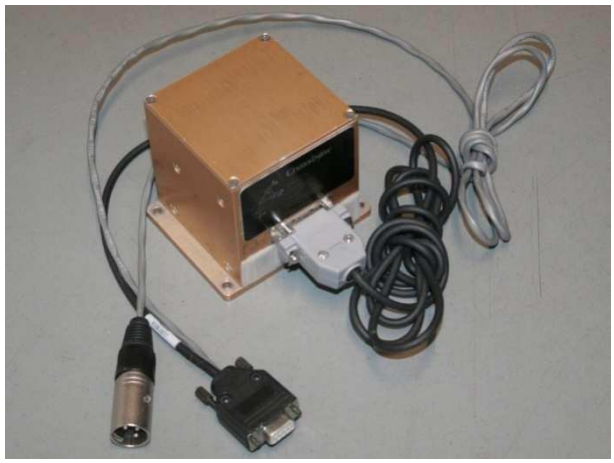
Inklinometerets målinger, er baseret på hældningsændringer i forhold til tyngdekraften, hvorfor inklinometeret kan blive påvirket af ændringer i den lokale tyngdeacceleration, hvis inklinometeret flyttes over en længere afstand. Det er dog usandsynligt, at dette skulle forekomme, da der skal være væsentlige ændringer i den underliggende masse, før tyngdeaccelerationen ændres, f.eks. et skift fra land til dybt hav. Derudover er Zerotronic 10 inklinometeret, som nævnt tidligere, afskærmet så det ikke påvirkes af ændringer i magnetfeltet. Instrumentet burde derfor være pålideligt.

Tidligere erfaringer

Zerotronic inklinometre er bl.a. blevet brugt til deformationsmåling af en bro for biler i Schweiz. Resultaterne fra dette arbejde, hvor inklinometre har foretaget målinger i tre måneder, har vist, at inklinometrene er meget robuste og fejlophobningen over et længere tidsrum ikke var af nævneværdig betydning. Derudover har de vist stor nøjagtighed i dataindsamlingen. (Burdet, 1998)

2.3.4 IMU400CC-100

IMU400CC-100 er en strapdown IMU, se Billede 2.3. Den er udstyret med mulighed for at overføre data gennem en RS-232 seriel forbindelse. Ønskes en dybere gennemgang af teknologien for instrumentet og fejlkilderne under brug, henvises der til Bilag C.



Billede 2.3: IMU 400CC-100.

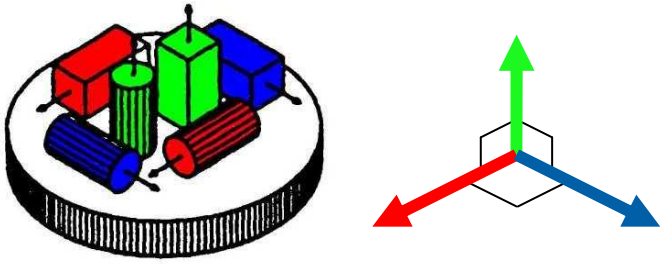
Anvendt teknologi

En IMU består af to forskellige typer sensorer, accelerometre og gyroer. IMU'en hører under kategorien relative sensorer, idet den bestemmer accelerationer og vinkelhastigheder i forhold til den tilstand IMU'en befandt sig i, ved forrige bestemmelse af pågældende ændringer.

Der findes tre grundlæggende forskellige måder at opbygge en IMU, som betegnes hhv. gimbaled, floated og strapdown, som hver især har indflydelse på produktionsomkostninger såvel som fejlkilder og metoder, der skal benyttes for at kalibrere enheden. IMU400CC-100 er af strapdown typen, hvilket betyder, at accelerometre og gyroer, er monteret som en fast del af instrumentet, og dermed følger dets bevægelser.

I IMU400CC-100 er der monteret seks sensorer; tre MEMS accelerometre og tre MEMS gyroer. Der findes forskellige konstruktioner for sensorer, der kan bestemme accelerationer eller vinkelændringer f.eks. påvirkningerne af en fjederophængt masse, eller MEMS (Micromashined Electro-Mechanical System) som er små mikrochips.

Der findes forskellige konstruktionsprincipper for MEMS sensorer, men det er grundlæggende, at MEMS sensorerne måler inertial kraften på IMU'en, for derigennem at kunne bestemme såvel accelerationer som vinkelændringer. De to sensortyper kan registrere ændringer langs eller omkring én akse, hvorfor de tre sensorer, både accelerometre og gyroer, er monteret ortogonalt på hinanden, så de bestemmer accelerations- eller vinkelændringer parallelt med et rumligt referencesystem og dermed bevægelser i tre dimensioner, se Figur 2.5.



Figur 2.5: Viser tre par accelerometer og gyro, monteret ortogonalt på hinanden (Cederholm, 2007).

IMU400CC-100 bestemmer accelerationer og retningsændringer i et rumligt referencesystem. Disse bestemmes på baggrund af de kræfter, som IMU'en påvirkes med. IMU400CC-100 kan selvstændigt udgøre et DR system, da retningsændringer løbende bestemmes, mens accelerationerne matematisk kan omregnes til hastighed, og med kendskab til intervallet disse målinger foretages i, kan en positi-

on løbende beregnes fra IMU'ens startpositionen. En IMU er til gengæld følsom overfor fejlophobning, da sensorerne i IMU400CC-100 foretager relative målinger, så fejlbidragene for hver måling akkumulerer, hvilket medfører, at nøjagtigheden af positionsbestemmelsen forringes over tid.

Tekniske specifikationer

Af Tabel 2.4 fremgår det, at IMU400CC-100 kan bestemme accelerationer og vinkelændringer fra alle seks sensorer med en frekvens på minimum 100 Hz. Den faktiske frekvens som IMU'en fungerer ved afhænger af den tilstand som IM400CC-100 opsættes til.

De benyttede MEMS gyroer kan for hvert sekund registrere vinkelændringer på ±100 grader, mens accelerometrene kan registrere accelerationer med en kraft på 2 g. IMU400CC-100 er konfigureret så 1 g svarer til 9,80 m/s^2.

Der kan oprettes en dataforbindelse til IMU400CC-100 efter RS-232 standarden, og dataformatet af hver måling fra sensorerne vil være angivet efter det binære talsystem, som 16-bit anden komplements tal, jf. Bilag B.

Frekvens	>100	Hz
Output dataformat	RS-232, 16-bit	
Gyro:		
Funktionsområde (Roll, Pitch, Yaw)	± 100	°/sek.
Accelerometer:		
Funktionsområde (X/Y/Z)	± 2	g

Tabel 2.4: Uddrag af tekniske specifikationer for IMU400CC-100, se Bilag CD.02.

Fejlkilder

Når en IMU anvendes, er der flere forskellige fejl, som influerer på hver måling, men afhængig af IMU'ens konstruktion, er det muligt at minimere det samlede fejlbidrag til hver måling, gennem en kalibrering af IMU'en.

Som eksempel på en fejlkilde, der kan minimeres kan nævnes, bias, som er den mest almindelige og enkleste fejl, der kan forekomme. Bias er et konstant fejloutput fra sensoren, uanset hvilket input sensoren får. Det vil sige, at selvom sensoren står stille, viser outputtet, at den er i bevægelse. For IMU400CC-100 er størrelsen af bias oplyst til at være et bidrag på op til ±1,0 grad for hvert sekund gyroerne er aktive, mens den for accelerometrene kan være op til ±8,5 mg, svarende til ±0,083 m/s^2 i fejlbidrag til accelerationen, jf. Tabel 2.5. (Crossbow, 2007)

En fejlkilde, der til gengæld ikke kan minimeres gennem en kalibrering af IMU'en, er random walk, som er et udtryk for tilfældige normalfordelte fejl, der forekommer på en sensor. For gyroerne i IMU400CC-100 er fejlbidraget fra random walk oplyst til at være maksimalt 2,25 °/√time mens IMU'en er aktiv, og for accelerometrene er fejlbidraget fra random walk maksimalt 0,1 m/s/√time, jf. Tabel 2.5.

Gyro:		
Random walk	< 2,25	°/√time
Bias (Roll, Pitch, Yaw)	< ± 1,0	°/sek
Accelerometer:		
Random walk	<0,1	m/s/√time
Bias (X/Y/Z)	< ± 8,5	mg

Tabel 2.5: Uddrag af tekniske specifikationer for IMU400CC-100, se Bilag CD.02.

Tidligere erfaringer

Den IMU400CC-100, der er til rådighed, er tidligere blevet anvendt af hhv. Eistrup, et al. (2005a) og Eistrup, Gregersen & Meister (2005b), som har foretaget undersøgelser af nøjagtigheden, hvormed positionen kan bestemmes på baggrund af en IMU400CC-100.

Eistrup, et al. (2005a) undersøger forskellige kalibreringsmetoders indflydelse på nøjagtigheden af positionsbestemmelsen for en IMU400CC-100 monteret i en bil og konkluderer på baggrund af 60 målingssessioner at 2D-positionen efter 60 sekunder har en middelspredning på 27 meter. Eistrup, et al. (2005b) undersøger ligeledes nøjagtigheden af positionsbestemmelsen for IMU400CC-100 monteret i en bil, men med fokus på, om middelværdier for de systematiske fejl estimeret i laboratorium, kan anvendes til kalibrering af IMU'en. Eistrup, et al. (2005b) konkluderer, at middelværdier for de systematiske fejl kan anvendes til kalibrering, og på baggrund af 10 målingssessioner er middelspredningen på 2D-positionen fundet til 34 meter efter 60 sekunders aktivitet.

Begge undersøgelser nævner dog nogle områder, der sandsynligt vil forbedre de opnåede resultater, f.eks. filtrering af det indsamlede data. (Eistrup, et al. 2005a:116) (Eistrup, et al. 2005b:129)

2.3.5 3DM-GX1

3DM-GX1 er ligesom IMU400CC-100 en strapdown IMU, men adskiller sig ved, at orienteringen fra gyroerne understøttes af indbyggede magnetometre. Den 3DM-GX1, som stilles til rådighed, er ombygget af Per Aarsleff A/S, så elektronikken er indbygget i udstyr, der kan anvendes sammen med øvrigt udstyr på traktoren til tv-inspektion, jf. Billede 2.4. Enheden er ombygget, så der er mulighed for at overføre data gennem en RS-232 seriel forbindelse, der konverterer signalerne fra 3DM-GX1.

Billede 2.4: 3DM-GX1, klargjort til brug i rørsystemer.

Anvendt teknologi

3DM-GX1 er ligesom IMU400CC-100 opbygget af MEMS sensorer, men adskiller sig ved, at der foruden tre gyroer og tre accelerometre også er installeret tre magnetometre. Inden for hver af de tre sensortyper er sensorerne monteret ortogonalt på hinanden, hvilket betyder at der kan bestemmes accelerations- eller vinkelhastigheder parallelt og omkring tre akser. 3DM-GX1 fungerer ifølge Microstrain (2008) som en gyro-forbedret IMU, da en indbygget mikrochip sørger for at integrere signalerne fra magnetometrene og gyroerne under brug af IMU'en, og dermed eliminerer nogle af de fejlkilder, som målinger fra en MEMS gyro ellers vil være behæftet med.

3DM-GX1 kan ligesom IMU400CC-100 selvstændigt udgøre et DR-system, da der både bestemmes retninger og accelerationer. 3DM-GX1 skiller sig dog ud ved at kunne bestemme kursen, der er en absolut retningsangivelse, der kan stabilisere målingerne fra gyroerne.

Tekniske specifikationer

Af Tabel 2.6 fremgår det at 3DM-GX1 kan bestemme accelerationer og vinkelændringer med en frekvens på højest 100 Hz. De to sensortyper der bestemmer orienteringen, gyroer og magnetometre, har et funktionsområde på hhv. ±300 grader for hvert sekund, og ±1,2 Gauss. Jordens magnetfelt har en styrke på ca. 0,5 Gauss. Den samlede nøjagtighed, som 3DM-GX1 kan forventes at have på orienteringen, er oplyst til mellem ±0,5 til ±2 grader, afhængig af om IMU'en befinder sig i statisk eller dynamisk miljø. Accelerometrene har et funktionsområde på ±5 g, men der oplyses ikke, hvilken nøjagtighed accelerationerne kan forventes bestemt med.
Der kan oprettes en dataforbindelse til 3DM-GX1 efter to standarder, bl.a. RS-232, se Bilag B.

Frekvens	< 100 Hz
Output dataformat	RS-232/RS-485
Orientering nøjagtighed	
- statisk miljø	±0,5 °
- dynamisk miljø	±2 °
Gyro:	
Funktionsområde (Roll, Pitch, Yaw)	±300 °/sek.
Accelerometer:	
Funktionsområde	±5 g
Magnetometer:	
Funktionsområde	±1,2 Gauss

Tabel 2.6: Uddrag af tekniske specifikationer for 3DM-GX1, se Bilag CD.02.

Fejlkilder

Af Tabel 2.7 fremgår det, at bias for 3DM-GX1 er oplyst til at være et bidrag på op til ±0,7 grad for hvert sekund gyroerne er aktive, mens den for accelerometrene kan være op til 10 mg i fejlbidrag til accelerationen, samt 10 mGauss for magnetometrene. Disse værdier repræsenterer middel af målinger foretaget med 3DM-GX1, i miljøer med varierende temperatur, der er en parameter, som har indflydelse på sensorernes estimeringer. Random walk er for 3DM-GX1 oplyst til at være 3,5 grader/√time for gyroerne, mens der ikke er oplyst random walk for accelerometrene.

Gyro:	
Bias (under brug, middelværdi)	0,7 °/sek.
Random walk	3,5 °/√time.
Accelerometer:	
Bias (under brug, middelværdi)	10 mg
Magnetometer:	
Bias (under brug, middelværdi)	10 mGauss

Tabel 2.7: Uddrag af tekniske specifikationer for 3DM-GX1, se Bilag CD.02.

Tidligere erfaringer
3DM-GX1 er i kandidatprojektet, Ellingsen (2008), forsøgt integreret med en GPS-modtager til udvikling af et navigationssystem for ubemandede skibe. Resultaterne for positionsbestemmelsen er tilfredsstillende, hvis GPS-signalet er til rådighed, mens der opnås utilfredsstillende resultater, hvis positionsbestemmelsen udelukkende foregår på baggrund af 3DM-GX1 i mere end 20 sekunder. Efter 20 sekunder er fejlophobningen under dynamiske forhold resulterende i en spredning på 400 m. Årsagen hertil kan jf. Ellingsen (2008), findes i en fejlagtig implementering af instrumentet, da resultatet ikke overholder producentens specifikationer for udstyret.

2.4 Software til udvikling af navigationssystem

Formålet med dette afsnit er at klarlægge nogle af de programmeringsmuligheder der er, for at udvikle det software, der skal forestå kommunikationen med instrumenterne og integrere, behandle og præsenterer de indsamlede data.
Dette gøres for at kunne udvikle et NS, der foruden selve instrumenterne, der foretager indsamlingen af data, består af en software del, der kan behandle og filtrere det indsamlede data til en positionsbestemmelse.

Programmeringssproget 'C'
Der findes mange programmeringssprog, der giver mulighed for oprettelse af seriel forbindelse med eksterne enheder fra en computer. Programmeringssprog kan inddeles i kategorier for, hvor let oversættelige de er fra den skrevne kode, til det maskinkode sprog, som computeren afvikler. Des tættere programmeringssprogets opbygning er på maskinkode (lav-niveau sprog) des mere effektivt vil en funktion kunne oversættes til maskinkode sproget og des hurtigere kan det udviklede program afvikles på computeren. Her har C-sproget sin styrke i, at der kan udvikles avanceret kodning, som let kan oversættes, hvorved programmer udviklet i C-sproget ofte kan afvikles af computeren med en større hastighed end tilsvarende avancerede programmeringssprog (høj-niveau sprog) (UoL, 2001). Fordelen ved C-sproget er, at det kan benyttes på mange softwareplatforme, herunder både Microsoft Windows og forskellige Linux-distributioner.
For projektgruppen er ulempen ved udvikling af et NS-software i C-programmeringssproget, at kendskabet til programmering i sproget først skal tilegnes i løbet af projektperioden.

LabView
LabView er et program udviklet af National Instruments, Inc., som muliggør oprettelse af forbindelse til instrumenter gennem en grafisk brugergrænseflade og hardware udviklet til oprettelse af kommunikationsforbindelser. Fordelen ved denne løsning er, at det uden dybere kendskab til serielle forbindelser og programmering i C-programmeringssproget, er muligt at oprette et interface til dataindsamling. LabView fungerer ved at forskellige foruddefinerede moduler trækkes-og-slippes til et samlet system, hvor de enkelte parametre kan opsættes gennem pop-up bokse for hvert modul. (NI, 2009)
Ulempen ved denne løsning er, at der ikke findes en driver til alle de tilgængelige instrumenter, f.eks. Azimuth 1000, der muliggør at instrumentet tilføjes som et modul til LabViews instrument database. Derudover vil kendskab til programmets virkemåde først skulle tilegnes gennem projektperioden.

Matlab
Matlab er et program udviklet af The MathWorks, Inc. og har den fordel frem for de to førnævnte muligheder, at projektgruppen allerede har et forholdsvis godt kendskab til programmeringssproget som benyttes i Matlab. Desuden har det været benyttet på landinspektørstudiet i en længere årrække, og været anvendt ved lignende projekter, der har beskæftiget sig med den benyttede IMU400CC-100.
Ulempen ved Matlab er, at det karakteriseres som et høj-niveau programmeringssprog, hvilket kan forårsage, at udviklet kode ikke kan afvikles med en frekvens, svarende til den instrumenterne producerer data med, og dermed umuliggør real-time positionsbestemmelse. Erfaring fra Eistrup, et al. (2005b), der senest arbejdede med IMU400CC-100 på landinspektørstudiet, er desuden, at det ikke var muligt at oprette seriel forbindelse til mere end ét instrument af gangen i Matlab på samme computer.

2.5 Projektafgrænsning

Formålet med dette afsnit er, at fastlægge hvilke instrumenter der vil være fornuftige at integrere i et NS, der bygger på DR-princippet, samt fastlægge, hvilket software der skal benyttes til at udvikle et NS.
Dette gøres for at afgrænse projektet til de komponenter, der skal indgå i udviklingen af et NS, der kan anvendes principielt inden for det arbejdsfelt Per Aarsleff A/S foretager TV-inspektioner, som klarlagt i kapitel 1.

Instrument afgrænsning
Det er i afsnit 2.2 klarlagt, at princippet bag NS byggende på DR er, at beregne et objekts position på baggrund af kendskab til retningen objektet bevæger sig i, samt en afstand, som objektet tilbagelægger. I afsnit 2.3 er beskrevet, hvilke instrumenter der kan stilles til rådighed, som vil egne sig til et DR system, til løsning af Per Aarsleff A/S automatiske positionsbestemmelse af det fjernstyrede kamera. På baggrund af pågældende afsnit er Tabel 2.8 opstillet, som opsummerer hvilke instrumenter, der kan bidrage med hhv. hastigheds-, afstands- og retningsobservationer, samt hvorledes disse parametre er bestemt.

Produkt navn	Hastighed/afstand	Retning	Dimension
Azimuth 1000	-	Absolut	Orientering i horisontal plan.
Zerotronic 10	-	Absolut	Hældning i forhold til horisontale eller vertikale plan.
IMU400CC-100	Relativ	Relativ	Flytning og rotation langs/omkring horisontal og vertikal plan.
3DM-GX1	Relativ	Relativ og absolut	Flytning og rotation langs/omkring horisontal og vertikal plan, samt absolut orientering i horisontal plan.

Tabel 2.8: Karakteristik af de fire tilgængelige instrumenter, opstillet på baggrund af afsnit 2.3.

Der er flere parametre, der har indflydelse på hvilke instrumenter, der vil være fornuftige at udvælge til et DR-system. Først og fremmest vil projektgruppen benytte færrest mulige instrumenter for at minimere antallet af fejlkilder og kompleksiteten af DR systemet. Dernæst vil projektgruppen fokusere på at udvikle et NS i 2D, da Per Aarsleff A/S primært har interesse i at få bestemt det fjernstyrede kameras position i planen, på terrænniveau, mens højdeinformationer er af sekundær interesse.

Af Tabel 2.8 fremgår det, at der kun er absolutte instrumenter til rådighed inden for retningsbestemmelse, og kun i 2D. Det fremgår også af Tabel 2.8, at både IMU400CC-100 og 3DM-GX1 vil kunne benyttes selvstændigt til at udvikle et DR system. Det er dog tidligere nævnt, at det ikke vil være fornuftigt at udvikle et DR system på baggrund af instrumenter, der kun bestemmer relative værdier, da disse akkumulere fejl over tid, hvorved nøjagtigheden af det benyttede NS forringes med tiden. Derfor vil 3DM-GX1 være det oplagte valg som instrumentet, der benyttes til NS, da den relativt bestemte orientering kan stabiliseres af magnetometrene. Den 3DM-GX1, der er til rådighed, har det til gengæld ikke været muligt at oprette dataforbindelse til, selv med det medfølgende software til instrumentet. Projektgruppen har fået instrumentet undersøgt nærmere ved instrumentværkstedet, Komponenten, ved Aalborg Universitet, der efter en række målinger af signalet fra det serielle kabel til selve 3DM-GX1 kunne konstatere at komponenten, der konverterer signalet fra RS-485 til RS-232 var defekt. Efter anskaffelse af en ny konverter viste det sig dog, at selve IMU'en ligeledes var defekt.

Af de resterende tre instrumenter er IMU400CC-100 den eneste, som kan bidrage med hastighed/afstandsbestemmelses målinger. Tidligere erfaringer fra arbejde med IMU400CC-100 indikerer til gengæld, at et NS byggende udelukkende på IMU'ens data ikke kan opfylde den ønskede nøjagtighed på ±0,5 meter i planen. Hvilken nøjagtighed af positionsbestemmelsen, der kan opnås ved integration med de øvrige instrumenter er svært at vurdere, da parametre som valg af kalibrerings- og filtreringsmetoder, foruden de tekniske specifikationer for hvert instrument også vil have indflydelse på den nøjagtighed, det udviklede NS kan opnå.
De to øvrige instrumenter, Azimuth 1000 og Zerotronic 10, kan bidrage med absolutte retningsmålinger. Af disse to instrumenter, har Zerotronic 10 ikke en fornuftig anvendelse, da instrumentet ikke kan forbindes direkte til computeren, hvorved aflæsninger skal foretages manuelt, hvilket giver problemer mht. tidsstempling af aflæsningen. Azimuth 1000 kan til gengæld kun bidrage med en absolut retningsmåling i det horisontale plan.
Ingen tilgængelige instrumenter kan bidrage med afstandsmålinger. En mulig løsning kunne være at simulere data for den afstandsmåler, som Per Aarsleff A/S har oplyst, der er monteret på kameraerne, jf. Bilag A. Simuleringen af afstandsmålingen kunne f.eks. gøres ved sammenholde den tilbagelagte afstand, beregnet på baggrund af målinger fra IMU400CC-100, med et nøje kendskab til afstanden for den benyttede testbane, som et testkøretøj anvendes på. En anden mulighed kunne være, at integrere en GPS-modtager under tests af det udviklede NS system. Herved kan der beregnes afstande mellem hver positionsbestemmelse, som vil give et kvalificeret bud på den tilbagelagte afstand. Positionsbestemmelsen kan forventes bestemt med en nøjagtighed på ca. ±1 cm, ved brug af målemetoden netværks-RTK (Jensen & Steenfeldt, 2008). Derved kan positionsbestemmelsen med en GPS-modtager både benyttes til beregning af tilbagelagte afstande, samt give et egentlig bud på den 'sande' rute, der er tilbagelagt under den enkelte test. Aalborg Universitet kan stille en GPS System 500, af Leica Geosystems AG, til rådighed for projektgruppen. GPS System 500 giver mulighed for at

oprette en dataforbindelse til en computer via en RS-232 dataforbindelse, hvorved koordinater kan indsamles og tidsstemples direkte i computeren, jf. Bilag B. Integreres en GPS-modtager begrænses området, hvor et udviklet NS kan afprøves, til udendørsområder med udsigtsforhold til satellitterne.

På baggrund af ovenstående vælger projektgruppen indledningsvis at udvikle et NS bestående af følgende tre instrumenter,

- IMU400CC-100
- Azimuth 1000
- GPS System 500

Valget af instrumenter forstærkes yderligere af, at der tidligere er blevet arbejdet med disse tre instrumenter på Aalborg Universitet. Der eksisterer derfor allerede et erfaringsgrundlag der kan arbejdes videre med, for såvel kommunikation med instrumenterne i Matlab, samt kalibreringen af IMU400CC-100 og Azimuth 1000. Det vægtes derfor højt at disse erfaringer kan benyttes i kalibreringen af instrumenterne, frem for at starte dette arbejde fra bunden. Desuden har de tidligere arbejder med IMU400CC-100 ikke omhandlet en egentlig integration med andre instrumenter, hvorfor projektgruppen forventer at NS, kan forbedre tidligere opnåede resultater, når flere forskellige instrumenter integreres.

Software afgrænsning

Til at oprette dataforbindelse til instrumenterne samt behandle og filtrere data fra disse instrumenter vælges det at udvikle et NS i,

- Matlab

Matlab er valgt som platform til at udvikle softwaredelen, da der i tidligere projekter på Aalborg Universitet er udviklet kode, der kan oprette dataforbindelse til instrumenterne.

3 Problemformulering

Formålet med dette kapitel er at opstille problemformuleringen for projektet, samt at beskrive fremgangsmåden for den resterende del af projektet. Problemformuleringen tager specielt udgangspunkt i afsnit 2.5, men derudover også i den øvrige del af foranalysen, samt den initierende problemstilling:
Hvordan kan utilgængelige punkter positioneres i rørsystemer gennem et navigationssystem med baggrund i målemetoden dead reckoning ved integration af forskellige sensorer og kan der opnås en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre?

Derudover tager problemformuleringen indledningsvist udgangspunkt i en kortfattet diskussion af, om den initierende problemstilling er blevet besvaret og herunder hvad der er fundet frem til gennem Kapitel 2 med baggrund i den initierende problemstilling.
Efter problemformuleringen er formuleret, beskrives i afsnit 3.1, fremgangsmåden for den resterende del af projektet, stadig med udgangspunkt i metoden, som blev gennemgået i kapitel 1. Til at understøtte dette er der i afsnittet udarbejdet et strukturdiagram, som har til formål at give et overordnet indblik i projektets videre forløb.

Gennem kapitel 2 er principperne for målemetoden DR blevet belyst, med henblik på at benytte målemetoden til at positionere et kamera i rørsystemer. For at metoden kan benyttes, skal der modtages data omkring køretøjets bevægelseshastighed eller den retning og afstand, som køretøjet har bevæget sig. Disse informationer er der en række forskellige typer instrumenter, som kan levere. For at afgrænse projektet til ikke at være en uendelig jagt på instrumenter og deres fordele og ulemper, er der taget udgangspunkt i de instrumenter, som er tilgængelige for projektgruppen enten gennem Aalborg Universitet eller gennem Per Aarsleff A/S, som var en af initiativtagerne til projektet.
Et af kravene til instrumenterne er umiddelbart fundet gennem målemetoden, da denne stiller det krav, at det er instrumenter, som ikke er afhængige af eksterne referencer, som f.eks. GNSS, der er afhængig af data fra satellitter for at kunne levere en position. Herudfra er der fundet frem til fire tilgængelige instrumenter; et kompas, et inklinometer og to typer IMU. Forskellene på de to IMU'er er, at den ene, udover tre accelerometre og gyroer, har tre magnetometre installeret, som automatisk kan forbedre præcisionen af de målte vinkelændringer fra gyroerne. Desværre har det ikke været muligt at få IMU'en med magnetometrene til at fungere, da instrumentet ellers ville være et oplagt valg for systemet.
Fordelen ved at have en IMU i navigationssystemet er, at den leverer vinkelhastigheder og accelerationer, som kan omregnes til hastigheder og positioner uden brug af eksterne referencer. Dog har det vist sig gennem litteraturstudie, at det med de tilgængelige IMU'er, ikke alene er muligt at opnå en nøjagtighed, som krævet, på ±0,5 meter eller bedre. Derfor er det oplagt at tilføje en eller flere instrumenter til systemet for at opnå en højere nøjagtighed. Det kunne være kompasset eller inklinometeret. Kompasset kan levere retningsdata for drejninger omkring tyngdeaksen, hvorfor den vil være med til at øge præcisionen i planen. Et inklinometer vil levere hældninger for drejninger omkring det vandrette plan, hvorfor den hovedsageligt vil kunne øge nøjagtigheden i højden.

Som en del af traktoren hos Per Aarsleff A/S, er der ligeledes en afstandsmåler, så fjernoperatøren hele tiden har kontrol over, hvor langt kameraet er kørt ud. Derfor vil denne datakilde være oplagt at tilføje i systemet, da den ligeledes vil være med til at øge nøjagtigheden af positionerne. Dette kan gøres ved at simulere en afstand, f.eks. med GNSS, som måler punkter, hvorudfra der kan beregnes afstande.
Med baggrund i, at det for Per Aarsleff A/S er vigtigst med en god nøjagtighed i planen er det oplagte valg derfor at udarbejde et navigationssystem med IMU, kompas og en simulering af en tilbagelagt afstand, som de tre dataleverende instrumenter til navigationssystemet.
Det er dog på nuværende tidspunkt ikke muligt at konkludere, om det er muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre, ved at benytte de valgte instrumenter, hvorfor dette må besvares gennem yderligere test af systemet gennem den resterende del af rapporten.
For at kommunikere, indsamle og behandle data fra instrumenterne er Matlab blevet valgt, da projekt-gruppen har kendskab til softwaren og da der tidligere, på Aalborg Universitet, er blevet arbejdet med de valgte instrumenter i netop dette software.

Ud fra de valg, som er foretaget i afsnit 2.5 kan der laves et navigationssystem, som kan benyttes til, at positionere et køretøj, og dermed simulere den situation, som projektet har taget udgangspunkt i, nemlig at positionere et kamera i rørsystemer.
Der skal derfor udarbejdes et navigationssystem, som består af et køretøj, hvor instrumenterne er placeret. Derudover skal det bestå af en computerdel, som kommunikerer, indsamler og behandler data.
Herunder skal data præsenteres, og jf. Bilag A skal det være i form af koordinater til kameraets position, og det kunne derudover være en mulighed at data blev præsenteret på et kort, eller i hvert fald en grafisk præsentation af kameraets bevægelser gennem rørsystemet. Det vurderes, at det er tilfredsstillende at gennemføre behandling og præsentation af data som post-processering. Dette skyldes, at det vil gøre bearbejdningen af data nemmere, og det stiller desuden ikke de samme krav til, hvor hurtigt softwaren skal kunne beregne data, sammenlignet med real-time processering.

Herudfra vælger projektgruppen at fokusere på at filtrere data fra IMU'en, kompasset samt simuleret afstandsdata fra GPS for at se, om det er muligt at forbedre den præcision, som det har vist sig muligt at opnå med IMU'en, og samtidig opnå en nøjagtighed, som kan tilfredsstille de krav som Per Aarsleff A/S indledningsvist har opstillet til systemet. Derudover vil der blive fokuseret på behandlingen af data, samt præsentationen af data.

Problemformulering:
Hvorledes kan et dead reckoning navigationssystem, bestående af en IMU, kompas og afstande mellem GNSS positioner, designes til positionsbestemmelse i rørsystemer, og er det muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre?

For at besvare problemformuleringen, udarbejdes et navigationssystem, der herefter kaldes NS-1002, og gennem en række test, ønskes det synliggjort, om det er muligt at opnå en nøjagtighed på

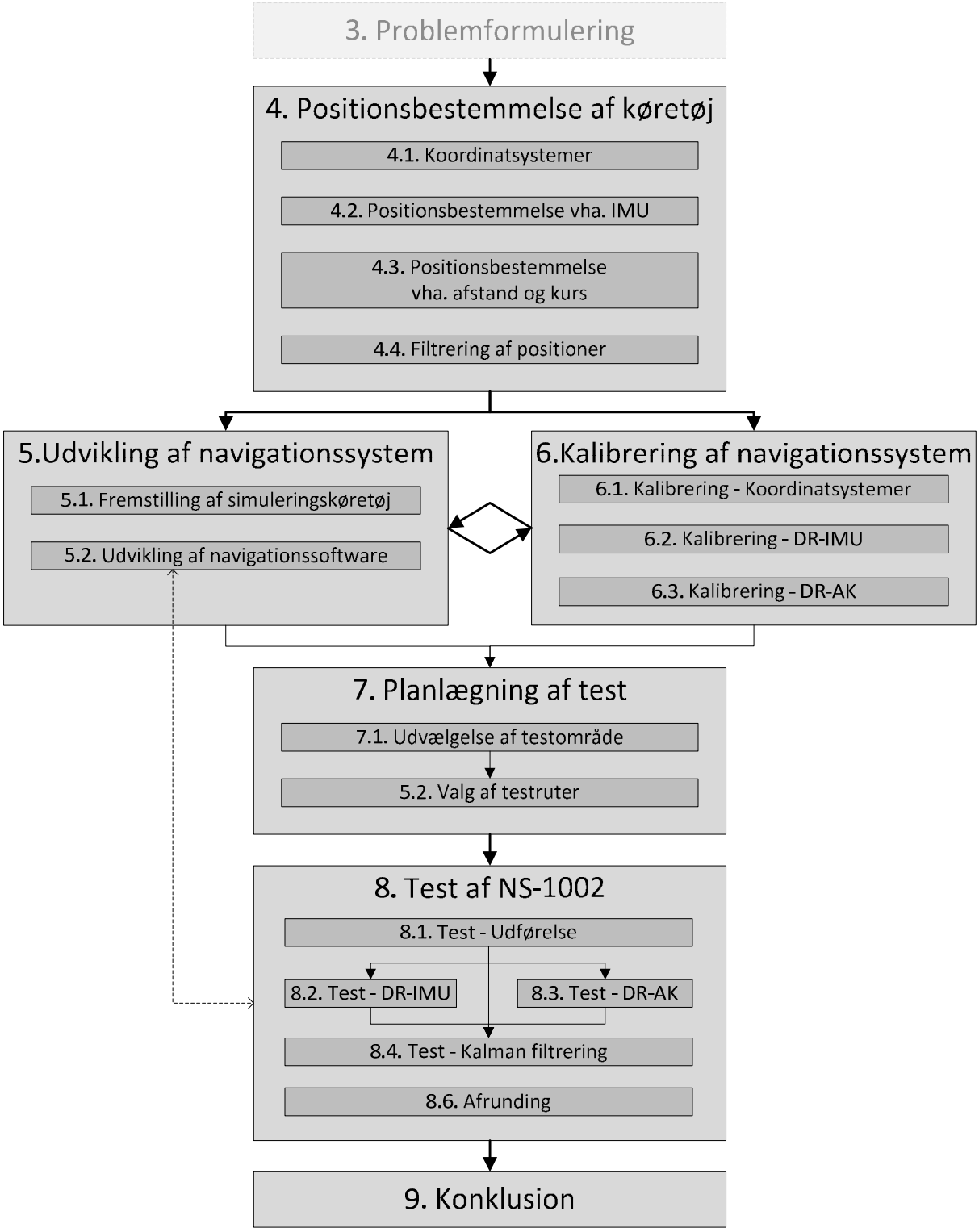
±0,5 meter, så principperne for navigationssystemet kan indgå, som en del af det daglige arbejde i forbindelse med TV-inspektion af rørsystemer. Herunder ses på hvorledes der kommunikeres med, og opsamles, data fra instrumenterne, samt hvordan data behandles og præsenteres.

3.1 Fremgangsmåde

Formålet med dette afsnit er at beskrive fremgangsmåden for den resterende del af projektet.
Dette gøres for at give læseren et indblik i projektets opbygning, samt hvilken sammenhæng der er de enkelte kapitler imellem, gennem projektet.

Projektets overordnede fremgangsmåde kan ses i Figur 3.1, hvilket viser strukturen gennem projektet fra problemformulering til konklusion og de delprocesser, som indgår herigennem for at målet kan nås.
Forløbet i projektet skal ikke ses som en ligefrem proces, men er et forløb, hvor der gøres erfaringer og der arbejdes med disse erfaringer, hvilket gør forløbet til en iterativ proces. Som det fremgår af problemformuleringen, skal der gennem den resterende del af projektet udarbejdes et NS, og der skal foretages forskellige test af systemet for at undersøge, om det er muligt at opnå en tilfredsstillende nøjagtighed, hvilket gøres ved at simulere forskellige mulige senarier, som kan udspille sig i rørsystemer. Projektet baseres derfor på at skabe den nødvendige viden omkring opbygning af et navigationssystem, og de dele, som indgår i dette, specielt behandlingen af data, som kan foretages og gennemføres på en række forskellige måder. Efterfølgende vurderes der på de opnåede resultater og konkluderes, om der kan svares på problemformuleringen på tilfredsstillende vis.

Kapitel 4 - Positionsbestemmelse af køretøj
Indledningsvist beskrives det, hvorledes positionsbestemmelsen af køretøjet foretages. Dette indebærer at definere det koordinatsystem, der skal foretages målinger i, samt præsentation af forskellige relevante koordinatsystemer, som indgår i positionsbestemmelsen.
Derudover beskrives der, hvorledes koordinater til den endelige position af køretøjet beregnes. Denne proces er inddelt i tre dele. Der er positionsbestemmelse ud fra IMU data, positionsbestemmelse ud fra kompasset og GNSS (afstand) og herefter en filtrering af de beregnede koordinater, så den endelige position kan beregnes.
I delene omkring positionsbestemmelse beskrives de generelle principper for positionsbestemmelsen, og der opstilles ligninger for at data kan omregnes til koordinater, som kan benyttes i filtreringen.
I afsnittet omkring filtreringen beskrives de generelle principper for en filtrering og der opstilles ligninger for, hvorledes der kan gennemføres en filtrering med baggrund i de beregnede koordinater, samt hvilken andre informationer og estimeringer, der er nødvendige for at de endelige positioner for køretøjet kan bestemmes.



Figur 3.1: Diagram over strukturen af projektet og rapportens opbygning, hvor den iterative arbejdsproces er formidlet.

Kapitel 5 - Udvikling af navigationssystem
Herefter beskrives og udarbejdes navigationssystemet. Dette omhandler både opsætning af køretøj og instrumenter, udarbejdelse af software interface og hvorledes de indsamlede data skal behandles. Det vil blive beskrevet, hvorledes køretøjet sættes op, hvor instrumenterne placeres mest hensigtsmæssigt osv. Dette gøres med baggrund i, hvilke krav der er til anvendelsen, bl.a. at den skal kunne simulere en TV-inspektion i et rørsystem.
Herefter vil computerdelen i navigationssystemet blive beskrevet, hvilket indebærer en beskrivelse af hvorledes software interface opbygges, herunder hvordan der oprettes forbindelse til instrumenterne, samt hvorledes indsamlet måledata behandles.

Kapitel 6 - Kalibrering af NS
Inden navigationssystemet kan tages i anvendelse er det nødvendigt at udføre en kalibrering af hele systemet. Herunder ses på, kalibrering af koordinatsystemer, kalibrering af instrumenterne der indgår i DR-IMU og kalibrering af instrumenterne der indgår i DR-AK.
Det beskrives, hvordan det sikres, at akserne i de anvendte koordinatsystemer er sammenfaldende. Derefter ses på, hvordan der kalibreres for bias og tilfældige fejl på DR-IMU, samt hvordan indledende værdier til positionsbestemmelsen bestemmes. Endelig beskrives kalibreringen af det kompas og den GPS, der indgår i DR-AK. Dette medfører blandt andet udarbejdelse af en deviationstabel for kompasset og beregningen af punktspredningen på GPS'en.

Kapitel 7 - Planlægning af test
Først fastlægges formålet med de tests, der ønskes udført. Herunder ses på, hvilke generelle forventninger der er til testene, samt hvilke test der skal udføres, for at kontrollere, hvilke parametre, der spiller ind på positionsbestemmelsen, både med hensyn til DR-IMU, DR-AK og Kalman filteret.
Herefter beskrives udvælgelsen af et testområde, der er egnet, til test af NS-1002. Dette medfører en beskrivelse af, hvilke krav der er til testområdet, samt en beskrivelse af det testområde, der i sidste ende udvælges.

Kapitel 8 - Test af NS-1002
Det overordnede mål for testene, der udføres er at undersøge, om det er muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter på positionsbestemmelsen med NS-1002. Derudover er der en række undermål for denne analyse, herunder at vurdere anvendeligheden af de forskellige positioneringsmetoder, DR-IMU og DR-AK, og en række af de parametre, der har indflydelse på positionsbestemmelsen.
På baggrund af resultaterne fra DR-IMU og DR-AK testene, vil filtreringen af positionerne ved hjælp af Kalman filteret blive analyseret.

4 Positionsbestemmelse af køretøj

Formålet med dette kapitel er at beskrive den teori, der er nødvendig for at kunne bestemme positionen af et køretøj på baggrund af data, som er indsamlet med hhv. IMU, kompas og GPS. Dette gøres for at have et teoretisk grundlag inden udviklingen og programmeringen af NS-1002 igangsættes.
Fra IMU'en fås observationer, som beskriver accelerationer samt rotationshastigheder, hhv. langs og omkring de tre akser i et koordinatsystem. Herudfra er det muligt at beregne en position for det køretøj, som IMU'en er placeret på, herefter kaldet DR-IMU. Samtidig er det ligeledes muligt vha. en kurs og en afstand, at beregne en position, herefter kaldet DR-AK. Observationer fra DR-IMU og DR-AK kan knyttes sammen til en endelig position. Dette kan gøres gennem en type udjævning, som kaldes filtrering.
I kapitlet beskrives i afsnit 4.1, hvilke koordinatsystemer, der kommer i spil, i forbindelse med dataindsamling og databehandlingen. Derpå beskrives i afsnit 4.2 udviklingen af en navigationsalgoritme, der på baggrund af IMU data kan beregne koordinater til køretøjets position.
Dernæst gennemgås i afsnit 0, hvordan observationer i form af en kurs fra et kompas og en afstand kan omsættes til koordinater. Endeligt beskrives i afsnit 4.4, teorien bag filtreringen af de indsamlede data, der skal give køretøjets endelige koordinater.

4.1 Koordinatsystemer

Formålet med dette afsnit er at beskrive de systemer, som benyttes i beregningerne af positionerne, som beregnes på baggrund af hhv. IMU observationer samt kompas- og afstandsobservationer.
Dette gøres for at præsentere de systemer, som benyttes, mht. deres definition og herunder, hvorledes de er orienteret.

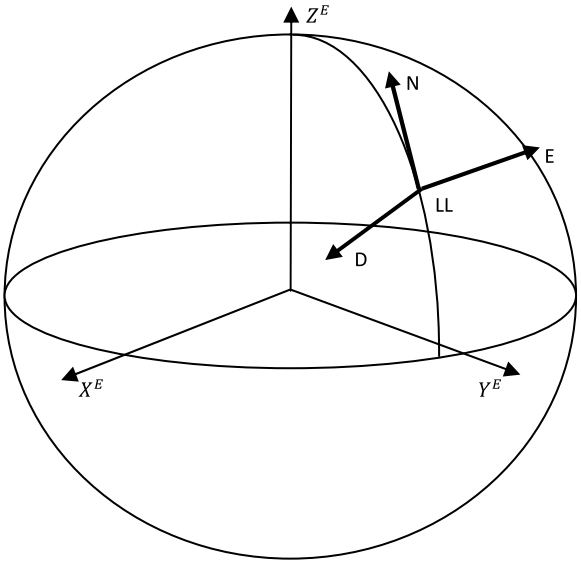
Indledningsvis ved positionsbestemmelse er det vigtigt at definere hvilket system det ønskes at arbejde i, så der kan bestemmes positioner i en foruddefineret projektion, og der dermed kan leveres brugbare positioner for køretøjet. Data fra de forskellige instrumenter bliver ikke nødvendigvis indsamlet i det samme koordinatsystem, og det er derfor nødvendigt at kunne regne mellem de enkelte koordinatsystemer, så koordinaterne endeligt kan beskrives i det samme system. I Bilag D er der beskrevet en række forskellige systemer, som kan og vil indgå i det navigationssystem, som projektgruppen udarbejder. Det kan derfor, for at opnå en fuldstændig forståelse af koordinatsystemerne være hensigtsmæssigt at have bilaget tilgængeligt under læsningen.
I den valgte type NS kan der indgå en række forskellige koordinatsystemer, og en række af dem, som kan benyttes kan ses herunder:

- ECEF
- ECI
- Local level
- Body
- Platform
- Sensor

- Magnetisk

Disse er alle beskrevet i bilaget, men der vil gennem den herpå følgende diskussion blive forklaret hvorfor de enkelte systemer indgår, og hvilke der er relevante for det videre forløb, og hvorfor enkelte systemer ikke benyttes yderligere.
Umiddelbart vælges det, at positionerne skal beskrives i et lokalt koordinatsystem. Dette skyldes, at de endelige koordinater kan beskrives i en række forskellige projektioner, og alt efter brugeren af systemet, er der sandsynligvis forskellige ønsker til den projektion, som koordinaterne skal afleveres i. Derfor vurderes det, at disse transformationer fra det lokale system til et overordnet koordinatsystem, ligger udenfor fokusområdet for dette projekt. Derfor beskrives, definitionen af et local level system, nærmere i afsnittet, som er det lokale system, som de endelige koordinater beskrives i.
Mht. sensor, platform og body systemerne, så er det IMU'ens og køretøjets systemer, og deres indbyrdes forhold er betydningsfuldt i forhold til koordinatbestemmelsen, da målingerne foretages heri. Definitionen af systemerne og deres indbyrdes forhold er derfor vigtig i forbindelse med koordinatberegningen af data fra IMU'en, hvorfor disse ligeledes beskrives i det følgende.
ECEF og ECI systemerne, som er beskrevet i Bilag D, benyttes ikke i det videre forløb, hvorfor de ikke beskrives nærmere. I teorien har begge systemer betydning for målingerne, da jordens rotationer, både relativt og absolut, kan påvirke sensorerne i IMU'en. Dette skyldes bl.a. at det lokalt definerede system, kan rotere, alt efter hvorledes det er defineret, i forhold til ECEF systemet, men vil rotere i forhold til ECI systemet, da jorden, som det lokale koordinatsystem er defineret i forhold til, vil rotere i forhold til ECI systemet. Dog har disse rotationer jf. Eistrup, et al. (2005a) ikke indflydelse på målingerne fra sensorerne, da sensorerne ikke er sensitive nok til at registrere disse rotationer.
Herudfra vurderes det, at det er local level systemet og systemerne på køretøjet, dvs. sensor, platform og body systemerne, som skal benyttes i det videre forløb. Dermed beskrives disse, mht. deres definition og hvorledes de er placeret i forhold til hinanden og hvilke antagelser, som kan have betydning for beregningerne, der fortages.

Local level koordinatsystem
Projektgruppen vælger at få køretøjets positioner beregnet i et local level (LL) system. Dette er et lokalt tangentplan på ellipsoiden, som beskriver jorden et givent sted. Systemet kan beskrives som hhv. ENU (East, North, Up) og NED (North, East, Down). Da der I dette projekt arbejdes med positionering af et køretøj, hvis koordinatsystem er defineret med Z-aksen nedad, vælges det at benytte NED koordinatsystemet. Dette har den fordel, at det er mindre beregningskrævende i forhold til ENU koordinatsystemet, at rotere i forhold til body systemet, som beskrives i det efterfølgende. Definitionen af LL systemet som et NED koordinatsystem, kan ses på Figur 4.1. (Grewal, Weill & Andrews, 2007) En fordel ved at benyttet et LL system, er muligheden for at vælge eget nulpunkt og dermed benytte de relative målinger, som leveres af sensorerne. Dette vil i praksis betyde at under test eller brug af NS er det muligt at starte målingerne i nulpunktet og derefter arbejde derudfra.



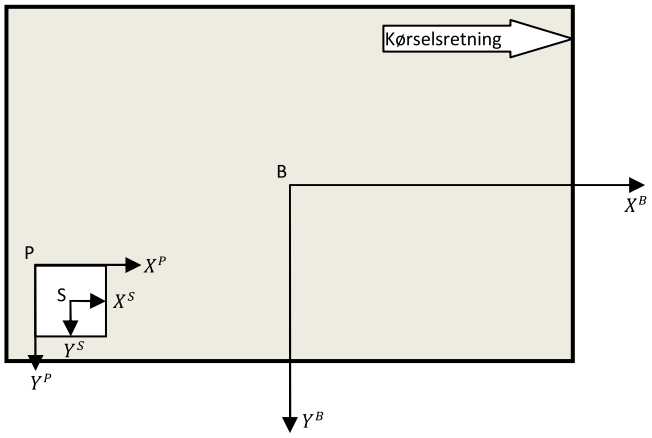
Figur 4.1: Definition af LL systemet (NED) på ellipsoiden i forhold til ECEF systemet (XYZ).

IMU'ens systemer

IMU'en placeres på køretøjet, hvor systemet er defineret som body systemet. I selve IMU'en, er der defineret to koordinatsystemer, et platform og et sensor system. Det kan dog antages at disse koordinatsystemer er parallelle og sammenfaldende i en IMU og hvis IMU'en placeres omhyggeligt, ligeledes sammenfaldende med body systemet. Dvs. at accelerationer og vinkelændringer sker hhv. langs og omkring body systemets akser.

Vinkelændringer i body systemet i forhold til LL systemet, kan defineres som Roll, Pitch og Yaw. Definitionen af body systemet kan ses på Figur 4.2. Dog er Z-akserne ikke vist, for at simplificere tegningen, men denne er placeret med retning nedad, dvs. når køretøjet foretager en drejning mod højre vil det være en positiv drejning. (Grewal, et al. 2007)

Body systemet bevæger sig frit i LL systemet, hvorfor målinger i body systemet, ved hver positionsbestemmelse, skal transformeres over i LL systemet. Dette gøres vha. de målte vinkelændringer fra gyroerne. Derfor er det vigtigt, at gyroerne kan levere nøjagtige målinger, da det er på baggrund af disse at målingerne fra accelerometrene transformeres til LL systemet, så disse kan omsættes til positioner i LL systemet. (Grewal, et al. 2007)



Figur 4.2: Definition at body (B) systemet, i forhold til platform (P) og sensor (S) systemerne, i planen.

4.2 Positionsbestemmelse vha. IMU

Formålet med dette afsnit er at beskrive udviklingen af en navigationsalgoritme, der kan beregne positioner på baggrund af IMU data og herunder opstille de ligninger, der skal benyttes gennem beregningerne af data.
Dette gøres for at give et indblik i beregningsgangen fra rå observationer til positioner, samt for at vise, hvordan det ene sæt koordinater, som skal benyttes i filtreringen, findes.
I underafsnit 4.2.1 beskrives først de generelle principper for positionsbestemmelse ud fra IMU data, og herunder forskellige forhold som har indflydelse på beregningerne. Herefter beskrives i underafsnit 4.2.2 beregningsgangen mere konkret og relevante ligninger opstilles.

4.2.1 Principper for positionsbestemmelse

Et NS bestående af en IMU og en computer er i princippet et selvstændigt DR system, som kan give dynamisk information omkring position og hastighed ud fra målingerne foretaget af IMU'en.
Ved måling med IMU'en fås tre accelerationer og tre vinkelhastigheder. Disse skal omsættes til vinkelændringer samt hastighed og position. Dette gøres ved at integrere de målte vinkelhastigheder og accelerationer hhv. en og to gange. Første gang accelerationerne integreres fås hastigheden og anden gang positionen. (Godha, 2006) Dermed kan de rå data i princippet beregnes som angivet i Ligning 4.1 og 4.3:

Princip for positionsbestemmelse af IMU

$$v(t) = \int a(t)\, dt \qquad (4.1)$$

$$r(t) = \iint a(t) d^2t \qquad (4.2)$$

$$\alpha(t) = \int \omega(t) dt \qquad (4.3)$$

Hvor,
a er de målte accelerationer (m/s^2)
v er hastigheden (m/s)
r er positionsvektoren for køretøjet (m)

ω er de målte vinkelhastigheder $(grader/sek)$
α er vinkelændringer (°)

Dette ville dog kun være tilstrækkeligt, hvis målingerne skulle beskrives i et ECI koordinatsystem, jf. Bilag D, og resultaterne ikke skulle beskrives i et LL system, samt hvis sensorerne var fejlfrie. Ved positionsbestemmelsen i et LL system, er det data fra gyroerne, som er vigtige, da disse gør det muligt at korrigere de målte accelerationer korrekt til vandret. Derfor er gyroernes nøjagtighed også meget væsentlige for nøjagtigheden af de endelige resultater.
Da målingerne skal beskrives i et LL system, er der en række ydre forhold, som har indflydelse på målingerne, såsom tyngdeaccelerationen og Coriolis kraften. Derudover vil der også skulle tages højde for en række af de systematiske fejl, som påvirker målingerne, som f.eks. bias, skalafejl osv., se Bilag C, hvilke der kan tages højde for gennem en kalibrering af sensorerne.
Dette betyder, at målingerne skal gennem en række beregninger for, at den endelige navigationsløsning kan opnås, dvs. en position af køretøjet beregnet på baggrund af målinger fra IMU'en.
En af de ydre forhold, der altid skal tages højde for er tyngdeaccelerationen, da en IMU altid vil være påvirket af Jordens tyngdeacceleration. Dvs. de endelige accelerationer er alle målte accelerationer bortset fra den lokale tyngdeacceleration. I Ligning 4.4 kan en overordnet navigationsligning dermed opstilles: (Godha, 2006)

Navigationsligning

$$\bar{a}_s = \bar{a}_m - \bar{g}_l \qquad (4.4)$$

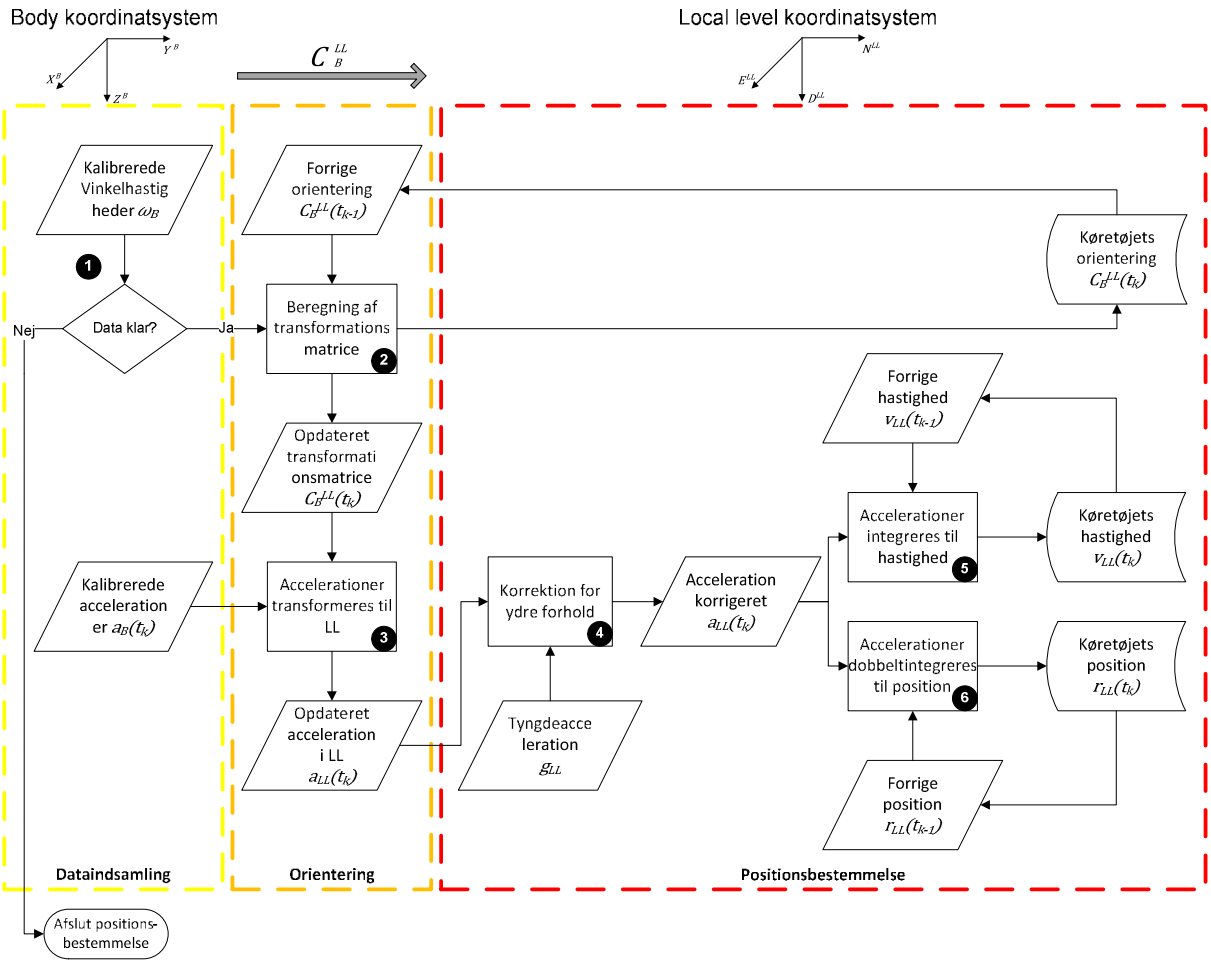
Hvor,
a_s er de 'sande' accelerationer, (3x1 vektor). (m/s^2)
a_m er de målte accelerationer, (3x1 vektor).(m/s^2)
g_l er den lokale tyndeaccelerationen, (3x1 vektor). (m/s^2)

4.2.2 Beregningsgang

For at bestemmes positioner på baggrund af data fra IMU'en, skal der foretages en række beregninger. Hvis beregningsgangen kort skal beskrives, så skal der ud fra de målte vinkelhastigheder, samt indledende værdier for body systemets rotation i forhold til LL systemet, beregnes en transformationsmatrice, som beskriver forholdet mellem body og LL systemerne. På baggrund af denne transformationsmatrice skal accelerationer herefter transformeres over i LL systemet, hvorefter der skal tages højde for de ydre forhold. Derpå kan der integreres for at finde hastigheder og positioner for køretøjet. For at integrationen kan foretages, skal der benyttes værdier fra hhv. den forrige hastighed og position, og der skal derfor også indledningsvist vælges foreløbige værdier for disse.
De foreløbige værdier bestemmes bl.a. gennem kalibrering, men beskrives i forbindelse med kapitel 6.

Beregningsgangen er nærmere beskrevet gennem det følgende og i Figur 4.3 er beregningsgangen for navigationsløsningen illustreret. Numrene i den herpå følgende punktopstilling svarer til tallene i cirklerne på figuren. Efter figuren beskrives de enkelte beregninger yderligere, og relevante ligninger og vurderinger, som har indflydelse på beregningerne præsenteres.

1. De indsamlede observationer, accelerationer og vinkelhastigheder, kalibreres og indgår herefter i positionsbestemmelsen.
2. De kalibrerede vinkelhastigheder fra gyroerne benyttes til at opstille en transformationsmatrice, som beskriver forholdet mellem body og LL systemet.
3. De kalibrerede accelerationer transformers derefter over i LL systemet vha. transformationsmatricen, jf. punkt 2.
4. Accelerationerne korrigeres herefter for de ydre forhold.
5. Derpå er de 'sande' accelerationer beregnet. Integreres den 'sande' acceleration en gang i forhold til tiden opnås hastigheden.
6. Integreres de 'sande' accelerationer to gange, igen i forhold til tiden, opnås køretøjets position.



Figur 4.3: Diagram som beskriver beregningsgangen, for positionsbestemmelse af IMU data.

Markør 1. De indsamlede data fra IMU'en, bestående af vinkelhastigheder og accelerationer, er udtrykt i body systemet og skal indledningsvis kalibreres, f.eks. for systematiske fejl. Herefter kan de kalibrerede vinkelhastigheder og accelerationer indgå i beregningsgangen for positionsbestemmelsen for DR-IMU. Når der ikke er flere observationer, stopper beregningsgangen, og positionsbestemmelsen er færdig.

Metoden for kalibreringen er hentet i Eistrup, et al. (2005a), hvor denne kalibreringsmetode er benyttet. Kalibreringen af IMU'en beskrives nærmere i kapitel 6.

Markør 2. Navigationsalgoritmen opstilles for beregning af positioner i et LL system, og derfor skal der indledningsvis opstilles en transformationsmatrice for transformation mellem LL systemet og de øvrige koordinatsystemer, som indgår i navigationssystemet. IMU'en er placeret på et køretøj, hvorfor body systemet opstår.

Transformationsmatricen, som beskriver forholdet mellem B og LL systemet, fremgår i Ligning 4.5: (Nebot & Durrant-White, 1999)

Transformationsmatrice - generelt

$$C_B^{LL}(t_k) = C_B^{LL}(t_{k-1})\Omega_{\mathrm{BLL}} \qquad (4.5)$$

Hvor,

$C_B^{LL}(t_{k-1})$ er rotationsmatricen for koordinatsystemer med sammenfaldende origo, som kan ses i Bilag E, og matricen indeholder værdier for den forrige orientering

$\Omega_{\mathrm{LLB}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{Z_B} & \omega_{Y_B} \\ \omega_{Z_B} & 0 & -\omega_{X_B} \\ -\omega_{Y_B} & \omega_{X_B} & 0 \end{bmatrix}$ er den antisymmetriske vinkelhastighedsmatrice, og $\omega_{X_B Y_B Z_B}$ er rotationerne omkring X, Y og Z aksen i body systemet, dvs. Roll, Pitch og Yaw, målt af gyroerne.

Den antisymmetriske vinkelhastighedsmatrice indeholder de kalibrerede vinkelhastigheder som gyroen har målt. $C_B^{LL}(t_{k-1})$ beskriver transformationsmatricen til den forrige epoke og transformationsmatricen, $C_B^{LL}(t_k)$, beskriver således ændringerne i forhold til den forrige epoke og dermed vinkelændringen, som køretøjet foretager på dette tidspunkt.

For at Ligning 4.5 kan benyttes i den beregningsgang, som projektgruppen har valgt, skal der tages højde for tiden til de enkelte målinger fra gyroerne, hvorfor en approksimation introduceres i Ligning 4.6:(Nebot, et al. 1999)

Transformationsmatrice – approksimation

$$C_B^{LL}(t_k) = C_B^{LL}(t_{k-1})(I + \Delta\theta) \qquad (4.6)$$

Hvor,

$C_B^{LL}(t_k)$ er den forrige eller indledende transformationsmatrice

I er en 3 x 3 enhedsmatrice

$\Delta\theta = \Omega_{\mathrm{LLn}}\mathrm{d}t = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{Z_B} & \omega_{Y_B} \\ \omega_{Z_B} & 0 & -\omega_{X_B} \\ -\omega_{Y_B} & \omega_{X_B} & 0 \end{bmatrix} dt$

Ω_{LLn} er an antisymmetriske vinkelhastighedsmatrice

dt er tiden mellem to målinger eller epoker

$(I + \Delta\theta)$ benyttes til at relatere koordinatsystemet til tiden k, og det roterede koordinatsystem til tiden k+1. Dvs. at Ligning 4.6 benyttes til at opdatere transformationsmatricen til den enkelte epoke.

Ligning 4.6 kan dog kun benyttes ved små vinkelændringer, hvilket stiller krav til, hvor hurtigt data indsamles fra gyroerne, så transformationsmatricen kan bestemmes med tilfredsstillende nøjagtighed. I Nebot, et al. (1999) benyttes, som i dette projekts tilfælde, en 'low cost' IMU, der skal benyttes i forbindelse med bestemmelse af et køretøjs position, og her forventes en rotationshastighed på

omkring 25 grader/sek, samt indsamling af data med 100 Hz, hvilket betyder at vinkelændringen vil være ca. 0,25 grader. I Eistrup, et al. (2005b), hvor der også er benyttet en IMU400CC-100, forventes rotationshastigheden at være på 30 grader/sek, samt indsamling af data med 100 Hz, hvilket giver en vinkelændring på 0,3 grader og her er IMU'en placeret i en bil. I begge disse eksempler er det vurderet, at approksimationsligningen kan benyttes i beregningerne af transformationsmatricen. I Projektgruppens tilfælde forventes en lidt lavere rotationshastighed. Hvor der i Eistrup, et al. (2005b) roteres med 90 grader på tre sekunder forventer projektgruppen en rotation med 90 grader på ca. 5 sekunder. Dette betyder en rotationshastighed på ca. 18 grader/sek. Gennem forskellige forsøg har det vist sig at være muligt at indsamle data med en frekvens på 45 Hz fra IMU'en. Dette betyder en vinkelændring på omkring 0,40 grader, hvilket, på baggrund af de øvrige eksempler, må antages at være små vinkelændringer, hvorfor approksimationen i Ligning 4.6 kan benyttes til beregning af transformationsmatricen..

Markør 3. Efter transformationsmatricen er beregnet, skal accelerationerne transformeres fra body systemet til LL systemet, hvilket gøres vha. Ligning 4.7:

Transformation af accelerationer til LL systemet

$$a_{LL}(t_k) = C_B^{LL}(t_k)a_B(t_k) \qquad (4.7)$$

Hvor,

$C_B^{LL}(t_k)$ er transformationsmatricen fra Ligning 4.6

$a_B(t_k)$ er den accelerationen, som er målt i accelerometrene i body systemet

Markør 4. Herefter skal der tages højde for de ydre forhold. De ydre forhold består af følgende: (Eistrup, et al. 2005a)

1. Jordens varierende tyngdeacceleration.
2. Coriolis.
3. LL systemet roterer i forhold til ECI koordinatsystemet.
4. Jordens rotation.
5. Jordens krumning.

Jf. Eistrup, et al. (2005a:95) har de ydre forhold fra 2-5 ikke nogen nævneværdig indflydelse på bestemmelserne af positionerne i forhold til en række øvrige forhold, bl.a. pga. opløsningen af gyroerne og accelerometrene, samt de øvrige fejlkilders indflydelse, som f.eks. random walk. Dog vil den varierende tyngdeacceleration have indflydelse ved målinger over længere afstande, men da målinger i dette projekt vil foregå over korte afstande har dette ingen betydning.

Tyngdeaccelerationen beregnes primært på baggrund af den breddegrad, som målingerne foretages på samt højden over ellipsoiden. Jf. Eistrup, et al. (2005a:57) sker der ingen betydende ændring på tyngdeaccelerationen ved en ændring på hhv. 0,00-0,03 grader i bredden og 0-100 meter i højden. 0,03 grader svarer til 3,3 km, hvorfor det vurderes, at den varierende tyngdeacceleration ikke har betydning for målingerne i dette projekt. Det er dermed tilstrækkeligt at anvende én værdi under den enkelte opmåling, men det ville samtidig være nødvendigt, at den lokale tyngdeacceleration skal beregnes inden hver ny opmåling, hvis det geografiske område ændres væsentligt. Der skal dog gøres opmærksom på, at disse ovennævnte forhold kun vil være gældende for det pågældende instrument, som benyttes i dette projekt, og benyttes et andet instrument, kan forholdene være anderledes.

Dermed skal der, af de ydre forhold, kun korrigeres for tyngdeaccelerationen, og denne beregnes som en fast værdi ud fra det område målingerne foretages i. Dette gøres ved, at den lokale tyngde-

acceleration subtraheres fra de beregnede accelerationer i LL systemet for at de 'sande' accelerationer kan findes. Den lokale tyngdeacceleration er i et NED system defineret som angivet i Ligning 4.8: (Farrell, et al. 1999)

Lokal tyngdeacceleration

$$g_{LL} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma(\varphi, h) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Hvor,
$\gamma(\varphi, k)$ er tyngdeaccelerationen, som primært er afhængig af breddegraden og højden over ellipsoiden.

Den lokale tyngdeacceleration er beregnet ved hjælp af funktioner, udviklet af Peter Cederholm, der kan ses i Bilag CD.06.01.
Efter den lokale tyngdeacceleration er beregnet kan navigationsligningen løses og den 'sande' acceleration kan beregnes efter Ligning 4.9:

Korrektion for lokal tyngdeacceleration

$$a_{LL}(t_k) = a_{LL}(t_k) - g_{LL} \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} a_{X_{LL}} \\ a_{Y_{LL}} \\ a_{Z_{LL}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{X_{LL}} \\ a_{Y_{LL}} \\ a_{Z_{LL}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma(\varphi, h) \end{bmatrix}$$

Markør 5. Herefter er det nu muligt at bestemme hastigheden for køretøjet, ved at integrere den 'sande' acceleration en gang i forhold til tiden, hvorved hastigheden bestemmes, se Ligning 4.10:

Beregning af hastighed

$$v_{LL}(t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} a_{LL}(t_k)\, dt \quad (4.10)$$

Hvor,
$v_{LL}(t_k)$ er hastigheden (m/s)

Markør 6. Ud fra den sande acceleration kan positionen ligeledes beregnes. Dette gøres ved at integrere den 'sande' acceleration to gange i forhold til tiden, se Ligning 4.11:

Beregning af position

$$r_{LL}(t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \int_{t_{k-1}}^{t_k} a_{LL}(t_k)\, d^2t \quad (4.11)$$

Hvor,
$r_{LL}(t_k)$ er positionen (m)

Den besskrevne proces kører hver gang der er observationer til rådighed. Når der ikke er flere observationer stander processen jf. Figur 4.3.

4.3 Positionsbestemmelse vha. afstand og kurs

Formålet med dette afsnit er at beskrive positionsbestemmelse på baggrund af en kursændring fra et kompas og en afstand beregnet vha. GPS, derudover beskrive princippet for målemetoden DR på

baggrund af hhv. retningsdata og afstandsdata. Derudover er det formålet at opstille de ligninger, der skal benyttes gennem beregningerne af data.
Dette gøres, da positionerne, der beregnes herudfra skal indgå i det filter, som estimerer den endelige position for køretøjet.

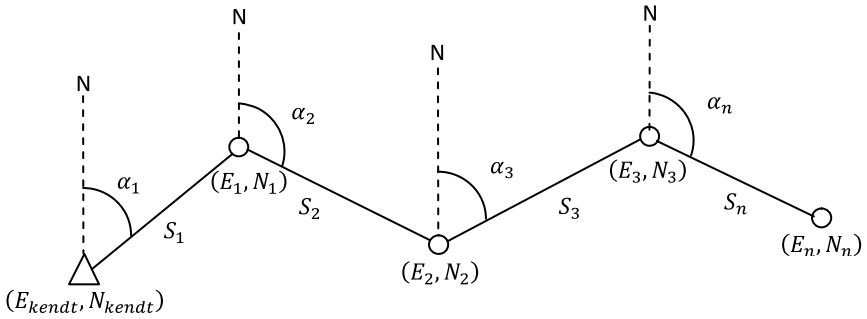
Gennem kapitel 2 er målemetoden DR blevet beskrevet, som en målemetode, hvor det ud fra en kendt startposition, samt kendskab til bevægelsesretning og afstand, er muligt at bestemme positionen af f.eks. et køretøj. Denne metode kan dermed benyttes til bestemmelsen af positionerne af køretøjet, som en simulering af en TV-inspektion i et rørsystem.
Kompasset benyttes til at angive den bevægelsesretning, som køretøjet har, hvilket gøres i forhold til magnetisk nord.
For at finde en tilhørende afstand, benyttes en GPS, hvor afstandene beregnes ud fra de koordinater som måles af GPS'en. Afstanden mellem de enkelte GPS punkter beregnes ud fra Ligning 4.12: (Jensen, 2005)

Beregning af afstand

$$S_i = \sqrt{(E_n - E_{n-1})^2 + (N_n - N_{n-1})^2} \qquad (4.12)$$

Hvor,
E_{n-1} og N_{n-1} er koordinaterne til det forrige punkt i meter
E_n og N_n er koordinaterne til det nye punkt i meter

Princippet for DR og for beregning af en position ud fra retning og afstand kan ses på Figur 4.4. Som det ses af figuren, tages der udgangspunkt i et kendt punkt og der skal findes en udgangsretning mod f.eks. nord. Herudfra kan der ved hjælp af kursen i forhold til nord og en beregnet afstand findes efterfølgende positioner af køretøjet.



Figur 4.4: Positionering af køretøj ved målemetode DR ud fra kurs og afstand.

For at beregne positionerne ud fra retningsændringer og afstande kan Ligning 4.13 og 4.14 anvendes: (Jensen, 2005)

Beregning af positioner ud fra retning og afstand

$$E_n = E_{n-1} + S_n \sin(\alpha_n) \quad (4.13)$$

$$N_n = N_{n-1} + S_n \cos(\alpha_n) \quad (4.14)$$

Hvor,
E_n er øst koordinaten til det nye punkt i meter
N_n er nord koordinaten til det nye punkt i meter
E_{n-1} er øst koordinaten til det forrige punkt i meter
N_{n-1} er nord koordinaten til det forrige punkt i meter
S_n er afstanden mellem det nye og tidligere punkt i meter
α_n er vinkel mellem nord og den nye bevægelses retning i grader

4.4 Filtrering af positioner

Formålet med dette afsnit er at beskrive filtreringen af de indsamlede data. Afsnittet skal beskrive, hvordan de indsamlede data behandles. Det vil sige, hvordan positionsbestemmelsen foretages.
Først beskrives det i underafsnit 4.4.1, hvordan de modeller, der skal anvendes i filteret, opstilles og hvordan beregningsgangen i filteret er, samt hvorledes der kan foretages efterbehandling af de filtrerede positioner. I underafsnit 4.4.2 beskrives forskellige principper for at implementere filteret, dvs. hvordan data skal indgå.
En grundigere gennemgang af teorien bag opstilling af modellerne, kan ses i Bilag F. Det kan være en forudsætning for den fulde forståelse af Kalman filtreringen, at bilaget læses, eventuelt sideløbende med nærværende afsnit. Det følgende samt bilaget er skrevet med baggrund i Strang & Borre (1997), Cederholm (1999) og Nordby & Kristensen (1999).

Et filter er en metode til udjævning af særlige matematiske problemer. Der findes flere former for filtre, der alle har hver deres styrker og svagheder. Projektgruppen er imidlertid blevet præsenteret for metoden, Kalman filtrering, gennem undervisningen. Der er derfor bedst grundlag for at arbejde med Kalman filtrering, da denne i forvejen er kendt for projektgruppen. Derudover skulle Kalman filteret være forholdsvis simpelt at anvende og samtidig give nogle fornuftige resultater. Derfor har projektgruppen valgt, udelukkende at kigge på Kalman filtrering.

4.4.1 Kalman filtrering

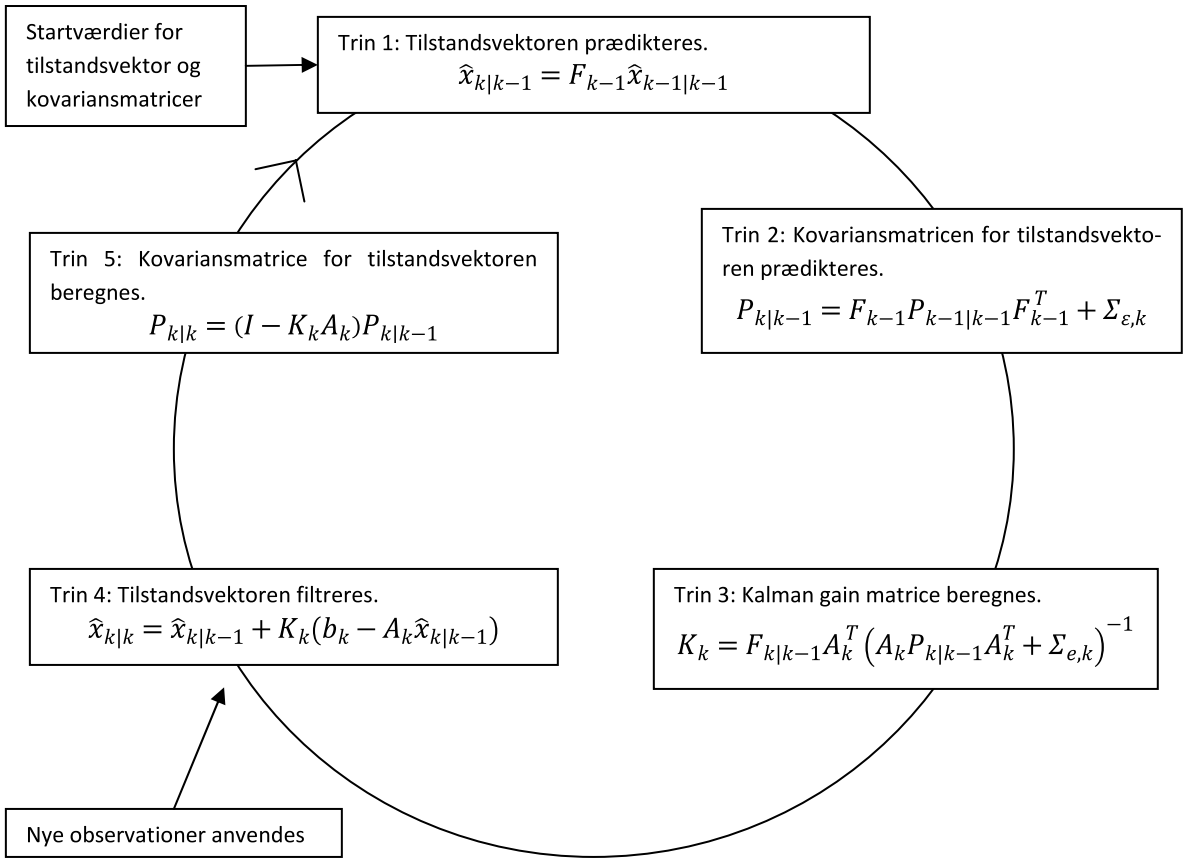
Kalman filtrering blev til i 1960, hvor R. E. Kalman offentliggjorde en metode til løsning af mindste kvadraters problemer, hvor de ubekendte varierer over tid. Kalman filtrering blev hurtigt populært verden over, pga. at det var nemt at implementere og det gav gode resultater.
Ved normal landmåling indsamles en række data og såfremt der er overbestemmelser, kan der findes en entydig løsning ved hjælp af Mindste Kvadraters Princip (MKP). Denne databehandling sker efter data er indsamlet (Post processering). Ønskes data behandlet efterhånden som de bliver indsamlet, f.eks. fra en stationær GPS modtager, kan positionerne bestemmes ved hjælp af en Rekursiv Mindste Kvadraters Udjævning (RMKU). Her behandles data løbende, efterhånden som de bliver indsamlet (Real-time processering). Hvis der derimod indsamles data, der ikke er stationære, f.eks. data fra en IMU (i et køretøj der er i bevægelse), kan de to foregående metoder ikke anvendes. I stedet må an-

vendes Kalman filtrering, der fungerer som en rekursiv mindste kvadraters løsning på det ikke-stationære problem. Kalman filterets styrke ligger således i, at det kan løse dynamiske problemer både ved post processering og real-time.

Kalman filteret har tre virkeområder.

- Prædiktion, på baggrund af de opstillede ligninger kan de ubekendte prædikteres. Det vil sige, at hvis de ubekendte er koordinater, kan en position forudsiges.
- Filtrering, de ubekendte, f.eks. koordinater, bestemmes ved hjælp af prædiktionen og indsamlede observationer.
- Udglatning, efter endt dataindsamling kan de beregnede positioner forbedres på baggrund af prædikteringen og filtreringen.

Baggrunden for Kalman filteret er otte filterligninger, fem til prædiktion og filtrering, og tre til udglatning. Prædiktion og filtrering foretages i samme beregningsgang, mens udglatning foretages i en selvstændig beregningsgang når prædiktionen og filtreringen er gennemført. Det er således kun prædiktion og filtrering der kan foretages real-time, mens udglatning udelukkende kan anvendes i forbindelse med post-processering.
Filterligningerne fungerer ved hjælp af forskellige input, såsom tilstandsvektoren, der beskriver de ubekendte, altså de værdier, der ønskes estimeret. Derudover er kovariansmatricen for tilstandsvektoren vigtig, idet den beskriver nøjagtigheden af tilstandsvektoren. Dette er vigtigt fordi det angiver kvaliteten af filtreringen.
Nedenstående figur, Figur 4.5, viser beregningsgangen for prædiktion og filtrering. Hvert trin repræsenterer anvendelsen af en filterligning og af figuren ses det, at før filteret kan sættes i gang, er det nødvendigt med startværdier for tilstandsvektoren og kovariansmatricerne. Når filteret er sat i gang, skal der ikke nye inputs før efter trin 3. I trin 4 tages nye observationer ind, hvilket muliggør en filtrering af tilstandsvektoren, så der kommer et nyt estimat for de ubekendte.



Figur 4.5: Beregningsgangen i prædiktions- og filtreringsdelen af Kalman filteret.

Den anvendte indeksering skal forstås på følgende måde. Hvis indeks:
$\hat{x}_{k|k-1}$ foretages en prædiktering
$\hat{x}_{k-1|k-1}$ foretages en filtrering
Det vil sige, at ved prædiktering, foretages en beregning af f.eks. $\hat{x}_k$ på baggrund af $\hat{x}_{k-1}$, altså data fra foregående epoke.
Det er vigtigt at forstå, at Kalman filteret er rekursivt og fungerer således, at når en observation er brugt, kan denne smides væk, da tilstandsvektoren indeholder alle relevante oplysninger. Tilstandsvektoren bliver løbende opdateret på baggrund af observationerne og det er derfor ikke nødvendigt at gemme observationerne, når de først har været anvendt. Grundlaget for at dette kan lade sig gøre, er Kalman gain matricen K_k, samt nøjagtigheden af tilstandsvektoren, der angives af kovariansmatricen for tilstandsvektoren $P_{k|k-1}$.

Før filterligningerne kan tages i anvendelse, er det nødvendigt at opstille de modeller, der skal anvendes i filteret. I opstillingen af de følgende modeller forudsættes det, at observationer fra IMU'en, samt komas og GPS'en omregnes til koordinater, der anvendes i Kalman filteret er således to sæt koordinater i et retvinklet koordinatsystem. Et sæt fra DR-IMU og et sæt fra DR-AK.
I dette projekt, arbejdes med et kamera, der bevæger sig i rørsystemer. Det er nødvendigt med en model, der beskriver kameraets bevægelse. Hvis f.eks. kameraet bevægede sig i cirkler kunne cirklens

ligning anvendes som model for denne bevægelse. Det ligger dog fast, at kameraet bevæger sig i lige linjer og at der ikke er store ændringer i hastigheder og accelerationer, da bevægelsesfriheden er begrænset af rørsystemet. Der er derfor to modeller, der kan være relevante at arbejde med. Bevægelsesligningen for et objekt, der bevæger sig med konstant hastighed, eller bevægelsesligningen for et objekt, der bevæger sig med konstant acceleration. Da kameraets bevægelse hele tiden startes og stoppes, af hensyn til inspektionen af rørene, vil kameraet sandsynligvis oftere accelerere frem for at bevæge sig med konstant hastighed. Af denne grund anvendes bevægelsesligningen for et objekt, der bevæger sig med konstant acceleration som model for, hvordan kameraet bevæger sig i rørsystemet (Elvekjær, 2002:367).
Denne ligning omskrives, så den finder anvendelse på et objekt, der bevæger sig i to dimensioner med konstant acceleration, hvilket fremgår af Ligning 4.15:

Bevægelsesligninger på matrice-form

$$\begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{k-1} \\ N_{k-1} \\ v_{E,k-1} \\ v_{N,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{E,k-1} \\ a_{N,k-1} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Hvor,
E_k og N_k er positioner til epoke k
$v_{E,k}$ og $v_{N,k}$ er hastighederne i hhv. E og N retning til epoke k
E_{k-1} og N_{k-1}er positioner til forrige epoke
Δt er tidsforskellen mellem to epoker
$v_{E,k-1}$ og $v_{N,k-1}$ er hastighederne i hhv. E og N retning til forrige epoke
$a_{E,k-1}$ og $a_{N,k-1}$ er accelerationerne hhv. i E og N retning til forrige epoke

Modellen i Ligning 4.15 for kameraets bevægelser i et todimensionelt system danner grundlag for den primære og sekundære model, der anvendes i Kalman filteret. En grundigere gennemgang af omskrivningen af bevægelsesligningen kan findes i Bilag F.

Primær model
I den primære model beskrives sammenhængen mellem observationer og ubekendte. Dette gøres ved hjælp af et sæt observationsligninger. Observationsligningerne for positionsbestemmelsen af kameraet kommer, med baggrund i ovenstående bevægelsesmodel, til at fremstå som i Ligning 4.16:

Observationsligninger

$$\begin{bmatrix} E_{DR-IMU,k} \\ N_{DR-IMU,k} \\ E_{DR-AK,k} \\ N_{DR-AK,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} + e_k \quad (4.16)$$

De ubekendte er således valgt at være koordinater til kameraets position og hastighed til epoke k, givet ved E_k , N_k, $v_{E,k}$ og $v_{N,k}$. Observationsligningerne påvirkes af fejlene angivet i e_k. Disse fejl forudsættes normalfordelte omkring 0 og beskrives ved hjælp af kovariansmatricen Σ_{e_k} der kan ses i Bilag F sammen med en grundigere beskrivelse af baggrunden for den primære model.

Sekundær model

I den sekundære model beskriver et sæt systemligninger sammenhængen mellem de ubekendte til epoke k og de ubekendte til epoke k-1. Systemligningerne beskriver, hvordan de ubekendte varierer over tid og er afhængige af den valgte bevægelsesmodel.

For at simplificere udtrykket og lette beregningsgangen, forudsættes det, at kameraet bevæger sig med konstant hastighed. Når accelerationen dermed er 0, kan systemligningerne udtrykkes som:

Systemligninger ved konstant hastighed

$$\begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{k-1} \\ N_{k-1} \\ v_{E,k-1} \\ v_{N,k-1} \end{bmatrix} + \varepsilon_k \tag{4.17}$$

Udtrykket ε_k dækker over, at det er usandsynligt, at kameraet bevæger sig med konstant hastighed, men derimod hele tiden vil blive påvirket af blandt andet accelerationer. Dette udtrykkes med baggrund i Ligning 4.15 på følgende måde:

Fejl på systemligningerne

$$\varepsilon_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{E,k-1} \\ a_{N,k-1} \end{bmatrix} = G_k \cdot w_k \tag{4.18}$$

Accelerationerne er ukendte, men for at kunne bestemme kovariansmatricen for systemfejlene forudsættes det, at et estimat for deres kovariansmatrice kendes.

Kovariansmatricen for accelerationerne

$$\sum_w = \begin{bmatrix} \sigma^2_{a_{E,k-1}} & \sigma_{a_{EN,k-1}} \\ \sigma_{a_{EN,k-1}} & \sigma^2_{a_{N,k-1}} \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

Kovariansmatricen for fejlene i systemligningerne kan bestemmes ved hjælp af den generelle fejlforplantningslov.

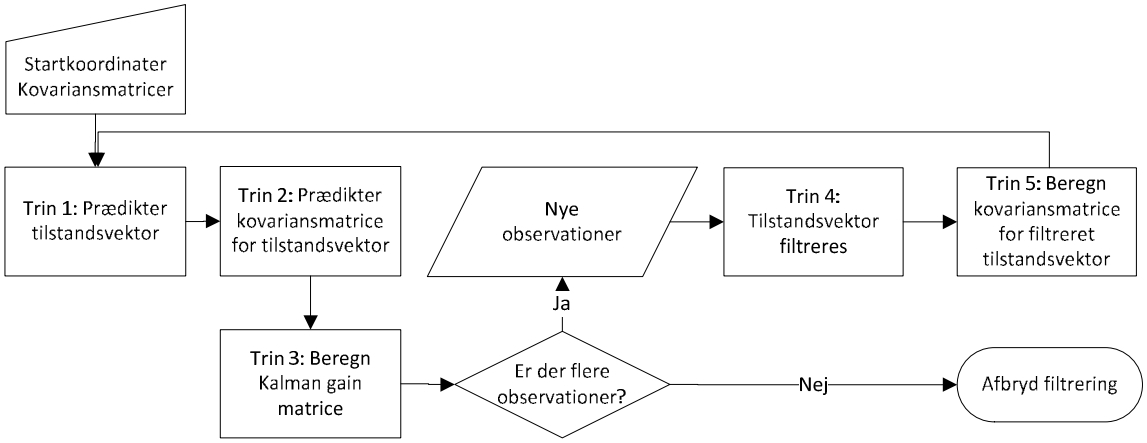
Kovariansmatrice for ε_k

$$\sum_{\varepsilon_k} = G_k \sum_w G_k^T \tag{4.20}$$

En grundigere gennemgang af baggrunden for den sekundære model kan findes i Bilag F. Når den primære og sekundære model således er opstillet, er det muligt at tage filterligningerne i anvendelse.

Kalman filtrering – beregningsgang

Filterligningerne og de opstillede modeller kan nu sættes i sammenhæng og estimater for kameraets position kan erhverves. Figur 4.6, viser beregningsgangen i Kalman filteret. Filteret sættes i gang ved hjælp af kameraets startkoordinater, samt kovariansmatricer, der angiver forventede varianser og kovarianser til tilstandsvektoren. Herefter gennemløbes løkken fra trin 1 til trin 5, ved hjælp af elementerne fra den primære og sekundære model. De nye observationer tilføres i trin 4 og når trin 5 er overstået starter løkken forfra.



Figur 4.6: Diagram for Kalman filtrering.

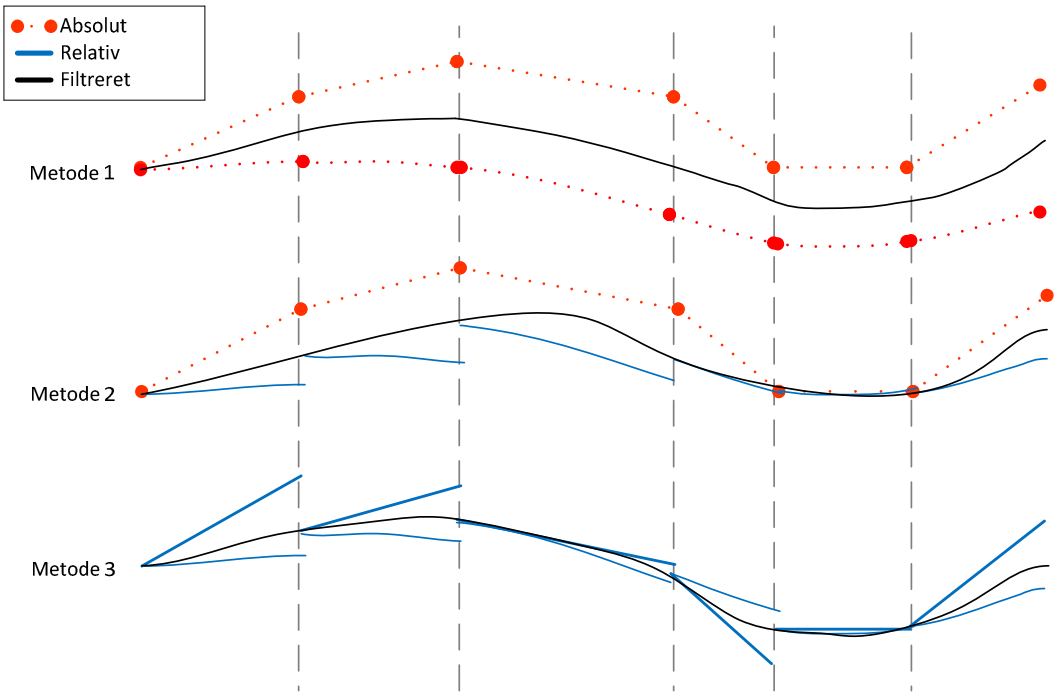
4.4.2 Filtreringsprincipper

Kalman filtreringen af data kan foretages efter flere forskellige principper. Der er fundet tre forskellige metoder, som vurderes anvendelige til Kalman filtreringen. De tre filtreringsmetoder er principmæssigt illustreret i Figur 4.7.

Metode 1. Den første metode, bygger på princippet om, at en tilbagelagt rute er positionsbestemt med to forskellige metoder, f.eks. to absolutte instrumenter, som herefter anvendes i Kalman filteret. Filtreringsmetoden stiller krav til at begge positionsbestemmelser er stabile, dvs. har god nøjagtighed over tid, hvis ikke nøjagtigheden på den filtrerede position skal forringes væsentlig. Gennem filteret vil positionerne blive rettet ind til den filtrerede position.

Metode 2. Den anden metode bygger på princippet om, at nøjagtigheden for en af de to positionsbestemmelser er god over tid, f.eks. et absolut instrument, eller en relativ positioneringsmetode med høj nøjagtighed. Den anden af de to positionsbestemmelser kunne være et relativt instrument, hvis positionsbestemmelse foretages løbende med filtreringen. Dvs. positionsbestemmelsen fra det absolutte instrument benyttes til at korrigere det relative instrument til det filtrerede punkt og positionsbestemmelsen med det relative instrument foretages hver gang med udgangspunkt i det filtrerede punkt. I princippet benyttes det relative instrument dermed kun til at bestemme positioner, som ligger mellem to absolutte punkter.

Metode 3. Den tredje metode bygger på princippet om, at begge positionsbestemmelser foretages løbende med filtreringen. Det kunne f.eks. være to forskellige relative positionsbestemmelser. Disse har hver deres forcer og er ikke lige stabile over tid, hvilket der tages højde for gennem filteret. Når et punkt er filtreret, trækkes begge observationerne ind i det filtrerede punkt og positionsbestemmelsen foregår med udgangspunkt heri.

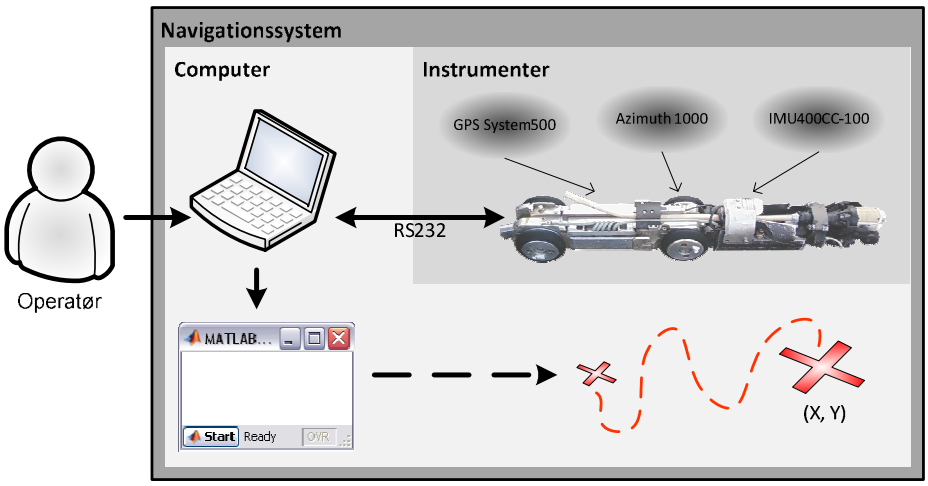


Figur 4.7: Princip for de tre filtreringsmetoder, ud fra eksempler med absolutte og relative positionsbestemmelser.

5 Udvikling af navigationssystem

Formålet med dette kapitel er, at beskrive og udvikle et NS, der principielt kan positionsbestemme et fjernstyret kamera ved TV-inspektion i rørsystemer. Udviklingsprocessen af det samlede NS, støtter sig til den teoretiske viden fra kapitel 4, samt viden om det udstyr, der blev udvalgt i afsnit 2.5.

Figur 5.1 illustrerer, hvordan det kommende NS forventes opbygget, hvilket også relaterer sig til opbygningen af dette kapitel. Overordnet består systemet af måleinstrumenter monteret på det fjernstyrede kamera, som er forbundet til en computer, der kontrolleres af en operatør af det fjernstyrede kamera og traktoren.
Det har ikke været muligt at låne en traktor til montering af anvendte måleinstrumenter, hvorfor der i afsnit 5.1 fremstilles et køretøj, der kan simulere det fjernstyrede kameras bevægelser i forbindelse med test af NS-1002.
Når det fjernstyrede kamera er i bevægelse, skal en operatør have mulighed for at indsamle data fra de monterede instrumenter til positionsbestemmelse af kameraet. Denne kommunikation med instrumenterne foregår, for operatøren, gennem en computer. I computeren er der installeret beregningsprogrammet Matlab, der muliggør oprettelse af en dataforbindelse til instrumenterne samt bearbejdning af de indsamlede observationer, til en positionsbestemmelse af det fjernstyrede kamera, hvor måleinstrumenterne er monteret. Dette kunne i princippet udvikles til at blive foretaget i real-time, men projektgruppen har, som nævnt i kapitel 3, valgt at udvikle et NS, hvor måledata først indsamles og efterfølgende bearbejdes. De enkelte funktioner skal derfor igangsættes af en operatør manuelt. I afsnit 5.2 beskrives kravene til det udviklede NS og på denne baggrund udvikles opbygningen af systemet. Der beskrives derfor hvorledes en operatør kan igangsætte disse funktioner i det udviklede NS, og dels hvordan datagangen er i det udviklede NS, fra dataindsamling til udtegning af simuleringskøretøjets tilbagelagte rute.



Figur 5.1: Komponenterne der indgår i et NS og deres indbyrdes relation.

5.1 Fremstilling af simuleringskøretøj

Formålet med dette afsnit er at beskrive overvejelserne i forbindelse med opbygningen af et køretøj, der kan simulere det fjernstyrede kameras bevægelse i rørsystemer under TV-inspektioner.
Dette gøres, da monteringen af instrumenterne og anvendelse af køretøjet under tests, kan have indflydelse på nøjagtigheden, som kan opnås på positionsbestemmelsen.
Først fremsættes i underafsnit 5.1.1 en række krav til det NS, der ønskes udviklet. Derefter beskrives i underafsnit 5.1.2 de overvejelser, der har været vedrørende montering af instrumenterne på det valgte køretøj.

5.1.1 Krav til simuleringskøretøj

Det fjernstyrede kameras bevægelser i rørsystemer skal simuleres af et andet køretøj, hvor de anvendte instrumenter kan monteres. Instrumenterne er dog af en fysisk størrelse, der umuliggør en direkte undersøgelse med simuleringskøretøjet i rørsystemer. Det skal i den sammenhæng bemærkes, at der er udviklet instrumenter, der har en fysisk størrelse, der også vil passe i rørsystemer på Ø10-15 cm, eksempelvis 3DM-GX1 jf. afsnit 2.3. Principielt er simuleringskøretøjets fysiske størrelse derfor ikke vigtig for undersøgelsen af, hvordan de valgte instrumenter kan anvendes til et NS. Når nøjagtigheden af positionsbestemmelsen skal undersøges, er det til gengæld vigtigt, at simuleringskøretøjet kan foretage bevægelser tilsvarende dem, som det fjernstyrede kamera udøver i rørsystemer. Derfor opstilles nogle krav til køretøjet, der skal minimere fejlene som simuleringen bidrager med i positionsbestemmelsen, samt sikre at køretøjet kan simulere de mulige bevægelser, det fjernstyrede kamera kan foretage under TV-inspektion i rørsystemer.

Simuleringskøretøjet skal have en fysisk størrelse der muliggør montering af instrumenterne, der har følgende størrelser (længde, bredde, højde);

- Azimuth 1000 (21 cm, 25 cm, 21 cm)
- IMU400CC-100 (8 cm, 10 cm, 8 cm)
- GPS System 500 (Antenne: 16 cm, 16 cm, 6 cm)
- Computer (27 cm, 33 cm, 30 cm)

De bevægelser som simuleringskøretøjet skal kunne opfylde, begrænser sig til følgende;

- Bevægelse i en konstant retning.
- Retningsændring på op til 90° i samme punkt.

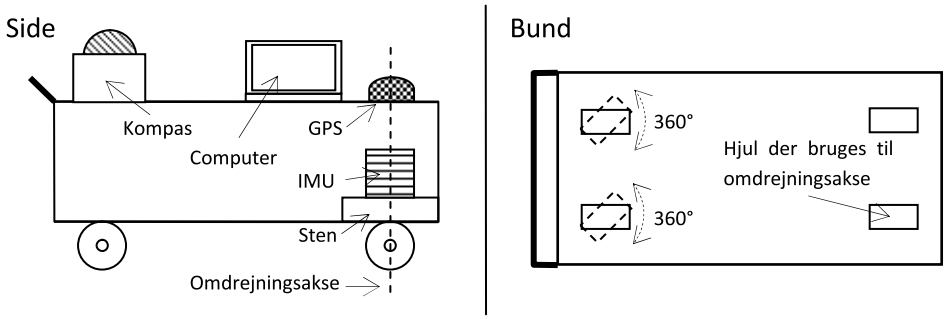
Principielt har det fjernstyrede kamera mulighed for, at foretage både lodrette og vandrette retningsændringer, for at kunne tilgå stikledninger, uanset deres tilslutningsvinkel på hovedledningen. Fokus i dette projekt er, at bestemme en position i det vandrette plan, hvorfor der ikke stilles krav til at simuleringskøretøjet kan bevæge sig i det lodrette plan.

5.1.2 Design af simuleringskøretøj

Projektgruppen har udvalgt et eksisterende køretøj til simuleringen af det fjernstyrede kamera, som vurderes at kunne simulere de påkrævede bevægelser, samt har en størrelse, der gør at instrumenterne kan monteres tilfredsstillende. Simuleringskøretøjet er en vogn med fire hjul, der kan skubbes

eller trækkes af en person, se Billede 5.1. Indledende undersøgelser af vognen har vist, at en omdrejningsakse er let definerbar, da kun to af de fire hjul kan dreje, hvilket gør det muligt at foretage retningsændringer med et af de to fastspændte hjul som omdrejningsakse.
Monteringen af instrumenterne på simuleringskøretøjet fremgår af Figur 5.2.

Billede 5.1: Simuleringskøretøj med monterede instrumenter.



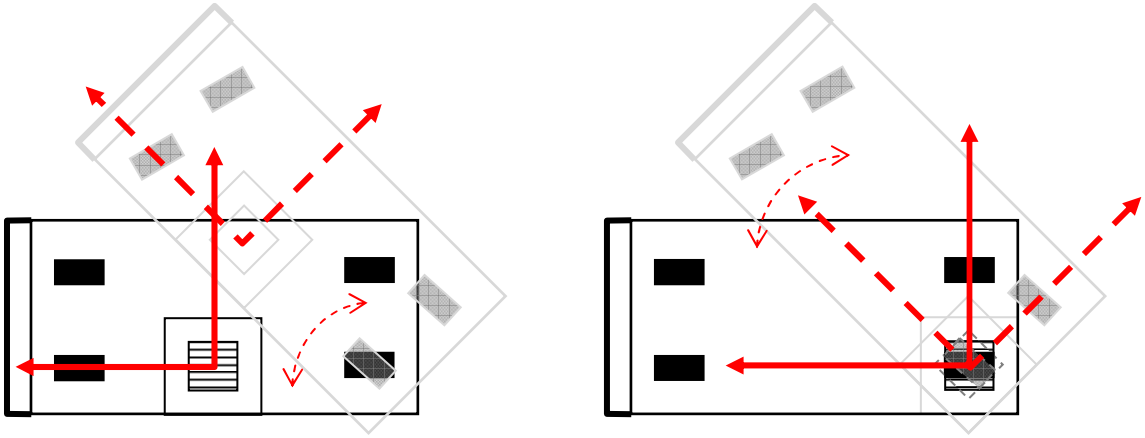
Figur 5.2: Montering af instrumenter, og designet af simuleringskøretøjet, set fra to retninger.

Der knytter sig en række overvejelser til placeringen af de forskellige instrumenter på køretøjet, for at minimere de fejl, der kan opstå i forbindelse med positionsbestemmelsen af køretøjet.

Montering af IMU400CC-100

IMU400CC-100 bestemmer retnings- og accelerationsændringer. Placeringen af IMU400CC-100 kræver, grundet accelerationsbestemmelserne, en placering, som er sammenfaldende med køretøjets omdrejningsakse, se Figur 5.3. Simuleringskøretøjet kan i princippet rotere 360 grader om et af de

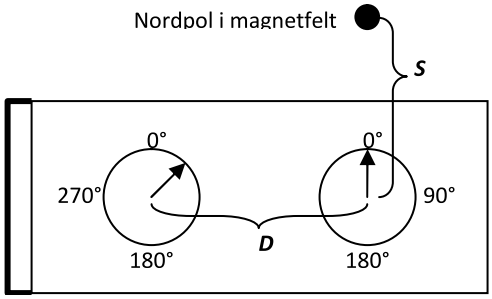
fastspændte hjul. Hvis ikke IMU400CC-100 er monteret præcis over det hjul, der udgør omdrejningsaksen, vil der fejlagtigt blive registreret en acceleration, selvom simuleringskøretøjet udelukkende foretager en drejning.



Figur 5.3: Placering af IMU over omdrejningsaksen af simuleringskøretøj, ses til højre, mens placering andetsteds på køretøjet vil resultere i en acceleration ved drejning.

Montering af Azimuth 1000

Azimuth 1000 bestemmer en kurs i forhold til jordens magnetfelt. Kursen fra det elektroniske kompas er principielt afhængig af placeringen på simuleringskøretøjet, og bør derfor ligesom IMU'en være placeret i omdrejningsaksen. For lokale undersøgelser af positionsbestemmelsens nøjagtighed inden for 100 meters afstand i Danmark, er placeringen af Azimuth 1000 på simuleringskøretøjet dog underordnet, se Figur 5.4. Forskellen i placeringen af kompasset på vognen, *D*, er maks. 2 meter mens afstanden til jordens magnetiske nordpol, *S*, er flere hundrede km. Fejlbidraget for en vilkårlig placering af kompasset på simuleringskøretøjet vil i en afstand af 100 km fra magnetfeltets nordpol være,



Figur 5.4: Hvor store udslag et kompas viser, ved flytningen D, er afhængig af afstanden S til nordpolen af magnetfeltet.

$$\text{Kursforskel} = \tan^{-1}\left(\frac{D}{S}\right) \Leftrightarrow \tan^{-1}\left(\frac{2\ m}{100\ km\ \cdot 1000m}\right) = 0{,}0011°$$

Fejlbidraget kan derfor ikke måles af Azimuth 1000, der kun bestemmer kursen med 0,1°.
Kursen kan til gengæld påvirkes af lokale magnetfelter, f.eks. fra andre elektriske apparater, hvorfor montering af Azimuth 1000 skal ske i størst mulig afstand fra kabler og andre apparater på simuleringskøretøjet.

Montering af GPS System 500

GPS System 500 bestemmer koordinater i et globalt referencesystem, der kan anvendes til simulering af simuleringskøretøjets tilbagelagte afstand. Placeringen af GPS-antennen har indflydelse på bestemmelsen af den tilbagelagte afstand, da enhver placering, som ikke er sammenfaldende med omdrejningsaksen vil resultere i, at GPS-antennen tilbagelægger en afstand, selvom simuleringskøretøjet udelukkende foretager en drejning. Dette kan illustreres i venstre del af Figur 5.3, hvis IMU'en anta-

ges, i stedet, at været en GPS, som ved drejning i så fald tilbagelægger en afstand. Derfor skal GPS-antennen monteres over omdrejningsaksen på simuleringskøretøjet.

5.2 Fremstilling af NS software

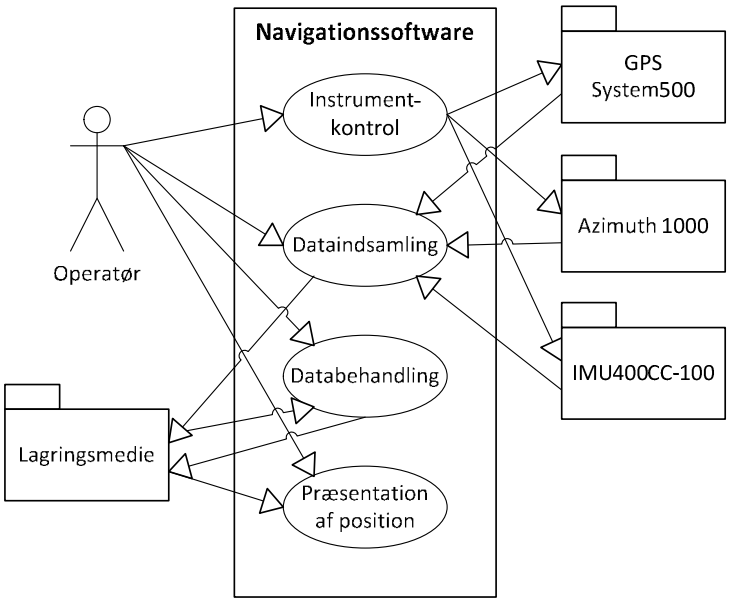
Formålet med dette afsnit er at beskrive overvejelserne, der knytter sig til udviklingen af softwaredelen til et NS.
Dette gøres for at sikre, at den udviklede softwaredel opfylder de krav der stilles til, at positionsbestemmelsen kan udføres tilfredsstillende.
Først fremsættes i afsnit 5.2.1, en række krav til softwaredelen, i forhold til de funktioner det forventes, den skal kunne udføre. Derefter opsættes i afsnit 0, en brugergrænseflade, der skal sikre, at en operatør kan udføre de krævede funktioner til positionsbestemmelsen af simuleringskøretøjet, der er beskrevet nærmere i Bilag B.

5.2.1 Krav til software

Kravspecifikationen skal bidrage med et overblik over, hvilke funktioner der skal udvikles til NS-1002, for at der kan foretages en positionsbestemmelse på baggrund af indsamlet måledata. Projektgruppen har fundet frem til fire nødvendige hovedfunktioner i NS-1002:

- Instrumentkontrol
- Dataindsamling
- Databehandling
- Præsentation af positionsbestemmelse

For at udvikle disse funktioner kræves der et overblik over, hvilke eksterne systemer de enkelte funktioner er i forbindelse med. Med udgangspunkt i Scott (2002), er der udarbejdet et usecase-diagram, der skal bidrage til at skabe dette overblik, se Figur 5.5.



Figur 5.5: Usecase-diagram, der illustrerer hver funktion (usecase) i NS-1002, og deres eksterne forbindelser.

Instrumentkontrol
Hovedformålet med denne funktion er, at en operatør kan oprette en dataforbindelse til hvert af de måleinstrumenter, der er tilsluttet computeren gennem NS-1002.. Funktionen skal sikre at:

- Flere instrumenter skal kunne tilsluttes samtidig.
- Operatøren kan oprette og lukke dataforbindelserne efter behov.

Dataindsamling
Hovedformålet med denne funktion er, at en operatør kan starte en indsamling af måledata fra hvert af de instrumenter, der er oprettet en dataforbindelse til, og lagre disse data til senere efterbehandling. Funktionen skal sikre at:

- Måledata kan modtages fra hvert af de tilsluttede instrumenter.
- Operatøren kan starte og afslutte modtagelse af måledata efter behov.
- Frekvensen hvormed hvert instrument overfører måledata, skal være højest muligt.
- Måledata tidsstemples ved modtagelse, så senere sammenknytning af måledata, kan fortages korrekt.
- Måledata valideres for korrekt modtagelse.
- Måledata kan lagres på et lagringsmedie, til senere efterbehandling.

Databehandling
Hovedformålet med denne funktion er, at en operatør kan foretage efterbehandlingen af det indsamlede måledata, og således få beregnet en opdateret positionsbestemmelse af simuleringskøretøjet. Funktionen skal sikre at:

- Måledata kan indlæses fra dets lagring på et lagringsmedie, til efterfølgende bearbejdning.
- Det indsamlede måledata kan konverteres til en position.
- Indsamlet måledata kan sammenkobles til én position.
- Nøjagtigheden af positionsbestemmelsen kan estimeres.
- Positionsbestemmelserne kan lagres på et lagringsmedie.

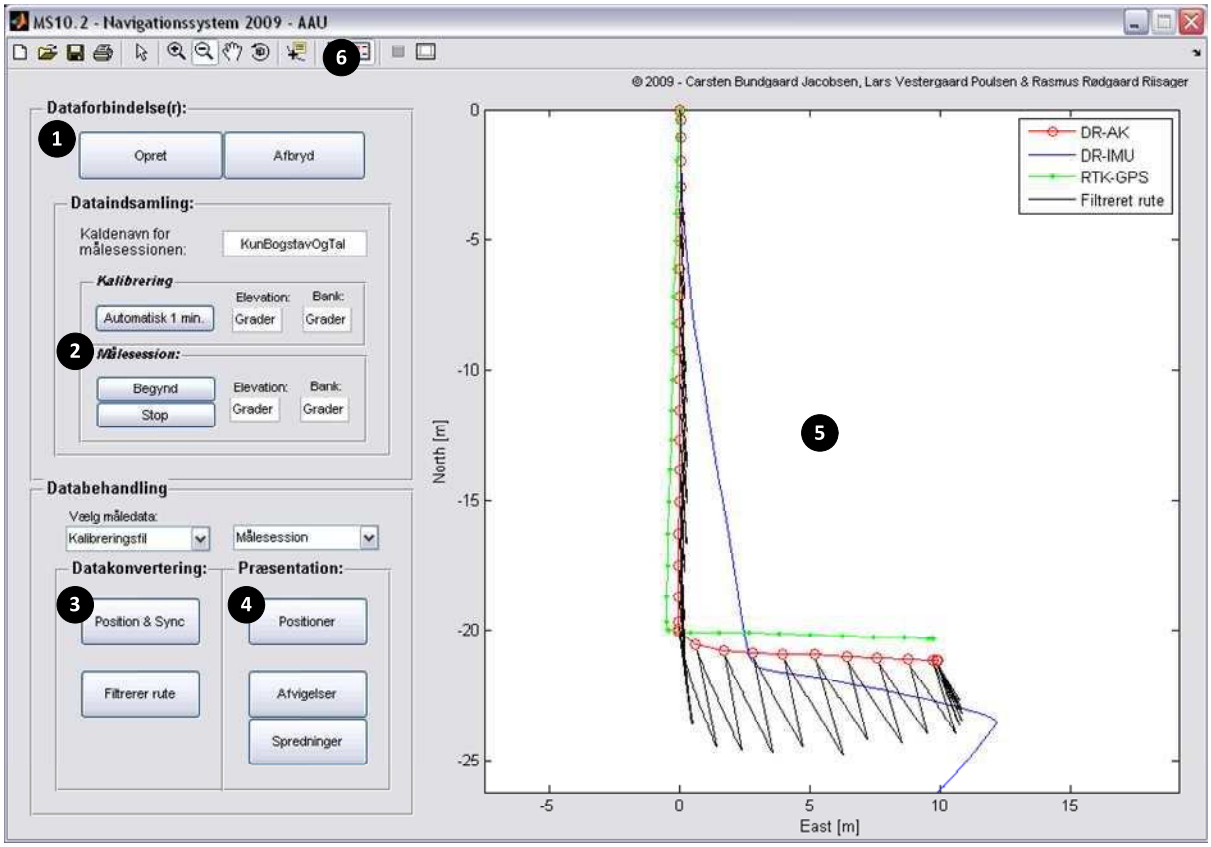
Præsentation af position
Hovedformålet med denne funktion er, at en operatør kan udtegne den beregnede rute som simuleringskøretøjet tilbageligger, og sammenholde denne med den 'sande' rute som simuleringskøretøjet følger. Funktionen skal sikre at:

- Positionsbestemmelser kan indlæses, til efterfølgende bearbejdning.
- Spredningen på hver positionsbestemmelse kan beregnes og illustreres.
- Ruten, der blev tilbagelagt, kan udtegnes, og sammenholdes med den 'sande' tilbagelagte rute.

5.2.2 Udviklet brugergrænseflade

Projektgruppen har valgt at udvikle en brugegrænseflade til NS-1002, for at sikre operatøren let adgang til de krævede funktioner, fra indsamling af data til udtegning af simuleringskøretøjets tilbagelagte rute. Brugergrænsefladen sikrer samtidig, at en operatør ikke manuelt kan ændre måledata eller variabler, men kun har adgang til den databehandling som NS-1002 er tilsigtet. Brugergrænsefladen underbygger desuden at dataindsamlingen kan påbegyndes og stoppes efter behov, og dermed tilpasses udførelsen af de enkelte test. I Bilag B fremgår en udførlig gennemgang af funktionerne, der kan aktiveres gennem brugergrænsefladen, mens det udviklede NS-1002 findes på Bilag CD.05.

Brugergrænsefladen er opbygget som det fremgår af Figur 5.6, hvor funktionerne er grupperet til hhv. dataindsamling og efterbehandling af det indsamlede data.



Figur 5.6: Udviklet brugerinterface til NS.

Markør 1. Knapperne 'Opret' og 'Afbryd' sørger for hhv. at oprette og afbryde dataforbindelserne til instrumenterne.

Markør 2. Hvis der er oprettet dataforbindelse til instrumenterne, kan operatøren indsamle data til to forskellige scenarier. Knappen 'Automatisk 1 min.' anvendes til automatisk at indsamle data i 1 min. til senere kalibrering af IMU400CC-100, imens simuleringskøretøjet ikke er i bevægelse. Knappen 'Begynd' benyttes til indsamling af positioneringsdata, når simuleringskøretøjet er i bevægelse, og forsætter indtil operatøren trykker på knappen 'Stop'. Forud for hvert dataindsamlingsscenarie

noterer operatøren IMU'ens bank og elevation for startpositionen, der er nødvendige indledende værdier for positionering med IMU, jf. afsnit 6.2.

Markør 3. Når operatøren har indsamlet både data i kalibrerings- og positioneringsøjemed, vil disse målesessioner kunne vælges under rubrikken Databehandling. Efter valg af måledata, kan et tryk på knappen 'Position & Sync' synkronisere tidsstemplingen af data fra de forskellige instrumenter, samt beregne hhv. DR-IMU og DR-AK positioner.

Efterfølgende kan et tryk på knappen 'Filtrerer rute' udføre en filtrering af det nu synkroniserede data, gennem Kalman filtrering.

Markør 4 (→6). Knapperne ved markør 4, giver mulighed for at udtegne enten de beregnede og filtrerede positioner af simuleringskøretøjet eller grafer, der viser afvigelser og spredningen af positionerne på simuleringskøretøjets tilbagelagte rute. Udtegningen sker i området ved markør 5, og det er muligt eksempelvis at zoome og panorere for nærmere indblik i udtegningernes detaljer, ved brug af værktøjerne i bjælken ved markør 6.

6 Kalibrering af NS-1002

Formålet med dette kapitel er at beskrive og udføre kalibreringen af det udviklede NS. Dette gøres for at sikre, at de data, der indsamles er så gode som muligt. Kvaliteten af data sikres ved, at sørge for, at de instrumenter og systemer, der anvendes er sat op og indstillet således, at registreringen af data giver så få fejlregistreringer som muligt. I kapitlet beskrives hvad det vil sige at kalibrere systemet, samt hvad der skal til, for at kunne udføre kalibreringen. Dette omfatter blandt andet at sikre, at de anvendte koordinatsystemer er sammenfaldende, at fjerne en del af indflydelsen fra de systematiske fejl, samt at estimere indflydelsen fra de tilfældige fejl og nøjagtigheden af både kompas og GPS.
I afsnit 6.1 beskrives først kalibreringen af de koordinatsystemer, der indgår i NS-1002. Herefter beskrives i afsnit 6.2 kalibreringen af DR-IMU systemet, herunder ses på bias, tilfældige fejl og indledende værdier. Endelig beskrives i afsnit 6.3 kalibreringen af DR-AK systemet, hvilket omfatter kalibreringen af kompas og GPS.

6.1 Koordinatsystemer

Formålet med dette afsnit er, at beskrive kalibreringen af de koordinatsystemer, der indgår i NS-1002. Kalibreringen foretages, da det jf. afsnit 4.1 er vigtigt, at koordinatsystemerne for DR-IMU og DR-AK er sammenfaldende med køretøjets koordinatsystem, idet dette er en forudsætning for den opstillede beregningsmetode. I afsnittet beskrives først kalibreringen af koordinatsystemerne mellem køretøjet, IMU'en og kompasset.

Kalibreringen af koordinatsystemerne skal sikre, at akserne i de anvendte koordinatsystemer er sammenfaldende. Kalibreringen foretages forud for dataindsamlingen ved hjælp af både flugt og totalstation.
Den indledende kalibrering af koordinatsystemerne sker ved flugt. Køretøjets koordinatsystem defineres til at have X-akse langs med kørselsretningen, sammenfaldende med køretøjets ramme. Derfor flugtes siden på IMU'en og justeres, så den er parallel med siden på køretøjet. Herefter er kalibreringen søgt kontrolleret ved hjælp af en totalstation, Trimble S6. Dette er gjort ved at måle to punkter ind på køretøjets X-akse og etablere en linje mellem disse to punkter. Dernæst måles afstandene fra IMU'ens hjørnepunkter til den etablerede linje. Disse to afstande skal være lige store for at koordinatsystemerne er kalibrerede. Samme metode blev anvendt til kalibrering af kompasset.
Kalibreringen af koordinatsystemerne med totalstationen, er ikke bedre end den punktspredning, der kan opnås med denne. De punkter der måles på, på IMU'en, har en kort indbyrdes afstand. Den korte afstand medfører, at spredningen på de målte punkter påvirker nøjagtigheden af kalibreringen i høj grad. Det vurderes derfor, at kalibreringen af koordinatsystemerne ikke bliver bedre ved at bruge totalstationen, men at kalibreringen med flugt er tilstrækkelig. IMU'ens kompassets og køretøjets koordinatsystemer antages herefter at være kalibrerede.

Det har efterfølgende været nødvendigt at rotere IMU'en 180 grader om Z-aksen for at få fornuftige resultater i positionsbestemmelsen. Dette skyldes angivelsen af positiv akseretning på IMU'en. Med den nuværende angivelse fås en negativ acceleration, når IMU'en bevæges i, hvad der burde være positiv retning. Dette giver en fejl, idet IMU'en udsættes for en positiv acceleration. Det vælges derfor, at vende IMU'en 180 grader, for at få korrekte værdier i dataindsamlingen. En grundigere beskrivelse af årsagerne til aksefejlene kan ses i Bilag C.

6.2 DR-IMU

Formålet med dette afsnit er, at beskrive kalibreringen af DR-IMU systemet. I underafsnit 6.2.1 beskrives kalibreringen for en af de systematiske fejl. Herefter redegøres i underafsnit 6.2.2 for størrelsen af de tilfældige fejl, og endeligt beskrives, i underafsnit 6.2.3, vigtigheden af at have indledende værdier for IMU'ens orientering, inden dataindsamlingen igangsættes.

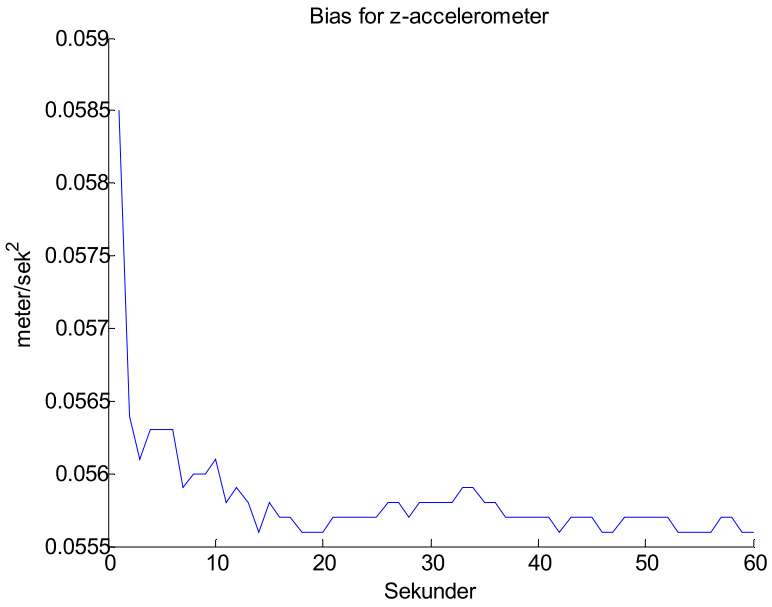
6.2.1 Bias

Der er en række systematiske fejl, der påvirker observationerne fra IMU'en jf. Bilag C. I Eistrup, et al. (2005a) er det påvist, at der kan opnås en væsentlig forbedring i positionsbestemmelsen, selvom der kun kalibreres for en af de systematiske fejl, bias. Bias er en systematisk fejl, der kan ændre sig hver gang IMU'en tændes og slukkes. Det er derfor nødvendigt at kalibrere for bias, hver gang IMU'en tændes. I Eistrup, et al. (2005a) er desuden beskrevet en simpel metode til kalibrering for bias.
Kalibreringen foregår ved, at der indsamles data i et vist tidsrum, hvor IMU'en står stille. I disse data fjernes bidraget fra tyngdeaccelerationen, hvorefter der for hver sensor, findes middel af de indsamlede data. Der fås således en værdi for bias for hver sensor, i alt seks forskellige værdier. Bias værdierne subtraheres, ved den efterfølgende dataindsamling, fra de værdier, hver sensor registrerer.
Det er vigtigt at kende IMU'ens orientering i forhold til LL systemet, da en forkert orientering vil resultere i, at positionsbestemmelsen, reelt ikke foretages i forhold til LL systemet. Orienteringen bestemmes ved at måle X- og Y-aksernes hældning i forhold til vandret, betegnet hhv. elevation og bank, samt X-aksens retning i forhold til f.eks. nord, betegnet heading.
Kalibreringen foretages som det første inden dataindsamlingen begynder. Bank og elevation måles ved hjælp af et Zerotronic 10 elektronisk inklinometer, hvorefter der indsamles data til kalibrering mens IMU'en er stillestående. Tidsrummet, hvor der samles data kan ifølge Eistrup, et al. (2005a:47) med fordel være ca. 30 sekunder. For at efterprøve dette, er der udført en beregning af bias for alle seks sensorer. Data til denne test-beregning er indsamlet ved hjælp af dataindsamlingsprogrammet Gyroview fra Crossbow. Data er indsamlet på følgende måde:

- IMU'en er stillet op så den står stabilt og fuldstændig stille.
- Bank og elevation måles med Zerotronic 10 inklinometer.
- Heading er irrelevant i denne sammenhæng, hvorfor denne sættes til nul.
- Der er indsamlet data i ca. 50 minutter.
- Herefter beregnes bias efter forskellige tidsrum.

Funktioner og data anvendt til beregningen kan ses på Bilag CD.08.01. Figur 6.1 viser beregningen af bias for Z-accelerometeret. Det ses af figuren, at størrelsen af bias ikke ændrer sig meget efter 20-30 sekunder. Denne tendens er ligeledes gældende for de øvrige sensorer. 30 sekunder er derfor tilsy-

neladende nok til at opnå en fornuftig angivelse af værdien for bias. For at være sikker på at have nok data til at bestemme værdierne for bias korrekt, vælges det dog at indsamle data i ca. et minut.



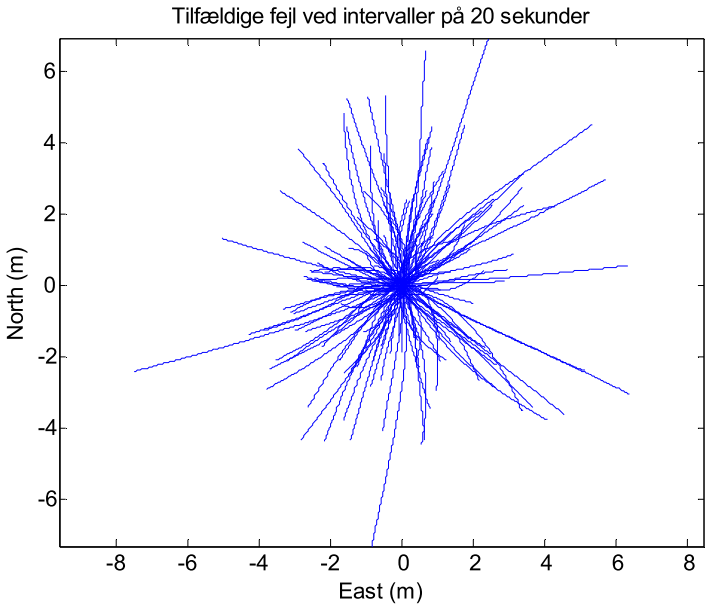
Figur 6.1: Beregning af bias på Z-accelerometer.

Den ovenfor beskrevne kalibreringsmetode kalibrerer, som nævnt kun for bias. Det er muligt at udføre en kalibrering for de øvrige systematiske fejl, men dette er mere omfattende end den beskrevne metode. Den anvendte metode er derfor valgt, ud fra overvejelser omkring simpel implementering og synlige resultater.

6.2.2 Tilfældige fejl

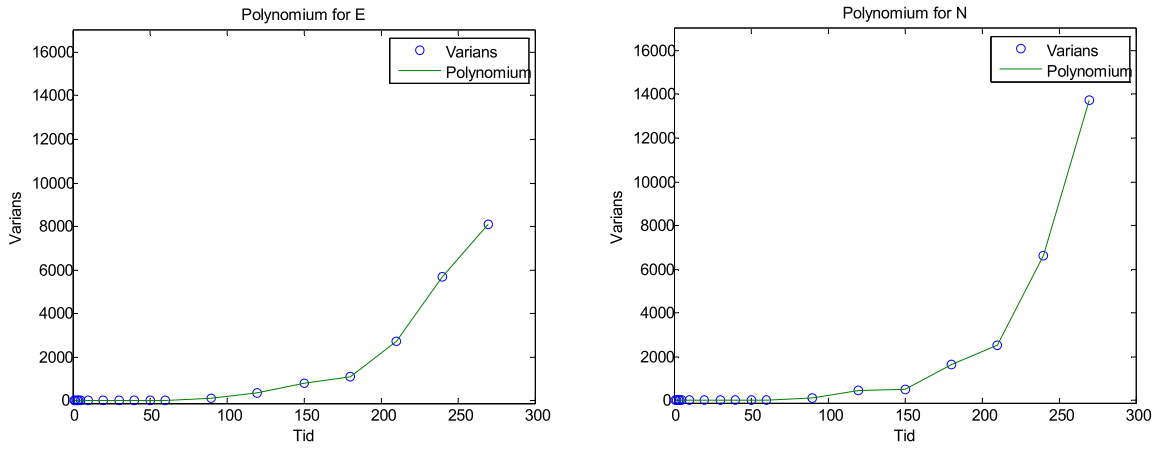
Data fra IMU'en er påvirket af tilfældige fejl. Der kan ikke direkte kalibreres for disse fejl, men for at kunne anvende Kalman filteret, er det nødvendigt at have en angivelse af størrelsen af de tilfældige fejl. Til dette formål anvendes de samme data, som til den tidligere test-beregning af bias. Inden beregningerne er foretaget er der fjernet bias fra data. Beregningerne er udført med de funktioner og data, der kan ses på Bilag CD.08.02. De indlæste data deles op i tidsintervaller af forskellig størrelse, hvorefter der foretages en positionsberegning for hvert interval. Det vil sige, at data f.eks. deles op i intervaller af et sekund, hvorefter der beregnes en position efter hvert sekund. Når positionsbestemmelsen er foretaget for det første interval, foretages en ny positionsbestemmelse for næste interval. Dette fortsættes indtil alle intervaller er behandlet. Da IMU'en har stået stille under indsamlingen af data, vil de positioner, der beregnes, kunne give en størrelse på, hvor meget de tilfældige fejl påvirker de positioner, der beregnes i NS-1002.
Intervallernes størrelse ændres for at se, hvordan de tilfældige fejl påvirker positionsbestemmelsen over tid. Der er lavet beregninger i følgende interval-størrelser:
1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 sekunder. Positionsbestemmelsen af alle intervaller inden for en interval-størrelse plottes i samme vindue, hvilket giver en fornemmelse for udviklingen af de tilfældige fejl.
I Figur 6.2, ses positionsbestemmelsen ved interval-størrelser på 20 sekunder. Det ses af figuren, at positionerne fordeler sig tilfældigt om (0,0). Da IMU'en har stået stille under hele dataindsamlingen,

er det således ud fra figuren klart, at IMU'en bliver påvirket af tilfældige fejl. Det samme gør sig gældende for positionsbestemmelsen af de andre interval-størrelser.



Figur 6.2: Illustration af de tilfældige fejl, positionsbestemmelse med 20 sekunders interval.

Ved hjælp af slutkoordinaterne for hvert interval, er der beregnet kovariansmatricer for koordinaterne for hver interval-størrelse. Da det vil være alt for omfattende, at beregne kovariansmatricer for alle tænkelige tidsrum IMU'en kan komme til at køre, anvendes de beregnede kovariansmatricer som grundlag for udvikling af to polynomier, der beskriver udviklingen af variansen på IMU koordinaterne, E og N over tid. De udviklede polynomier kan ses i Figur 6.3. Polynomiumsberegningen er foretaget på baggrund af 18 punkter og det er valgt at anvende et 17. grads polynomium. Årsagen til dette valg, skal findes i det efterfølgende.



Figur 6.3: De udviklede polynomier for variansen på IMU koordinaterne i hhv. E og N.

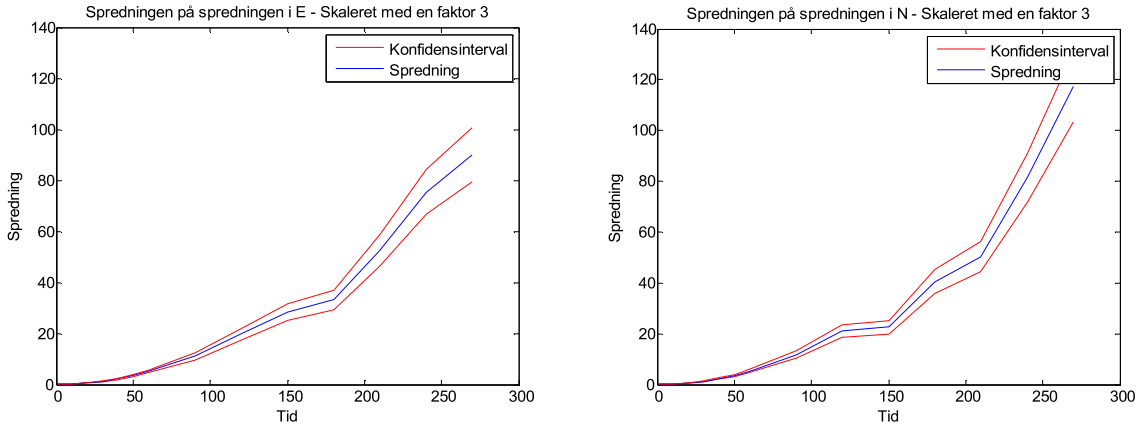
I Figur 6.4 ses de anvendte varianser omregnet til spredninger, hvorefter spredningen på spredningen er beregnet. Spredningen på spredningen er beregnet ved hjælp af Ligning 6.1 (Klenum, 1965:73):

Spredningen på spredningen

$$\sigma_{\sigma_k} = \frac{\sigma_k}{\sqrt{2(m-n)}} \qquad (6.1)$$

Hvor,
σ_{σ_k} er spredningen på spredningen på koordinaterne
σ_k er spredningen på koordinaterne
m er antallet af observationer
n er antallet af ubekendte

Spredningen på spredningen er ganget med tre, for at få et 99,7 % konfidensinterval. Dette er yderligere skaleret med en faktor tre, for at tydeliggøre konfidensintervallets udvikling. Det ses i Figur 6.4 at de spredninger, der er anvendt til udviklingen af polynomierne bliver mere og mere usikre jo længere tid der går. Dette var forventet, da der anvendes færre og færre observationer til at beregne spredningerne. Denne udvikling forklarer, hvorfor der er valgt et 17. grads polynomium til at beskrive udviklingen i varians. Data til beregningen af polynomiet er bedst beskrevet i starten af polynomiet, hvorefter data bliver dårligere og dårligere, fordi der bliver færre og færre koordinater til rådighed til beregningen af varianserne. Det er derfor vigtigt, at polynomiet beskriver startpunkterne, der er godt bestemt, bedst muligt, hvilket bedst kunne opnås med et 17. grads polynomium.



Figur 6.4: Konfidensintervaller på de anvendte spredninger. Bemærk: Konfidensintervaller er skaleret med en faktor tre.

Funktionerne der er anvendt til beregningen af polynomierne kan ses på Bilag CD.08.02. Polynomierne kan anvendes til at beregne variansen i E eller N til et vilkårligt tidspunkt. Det er dog jf. Figur 6.4 bedst at bruge polynomierne over så korte tidsrum som muligt, da de hurtigt bliver usikre. Samtidig må det frarådes at anvende polynomierne på datasæts, indsamlet over længere tid end fire et halvt minut, da beregningen af polynomierne kun bygger på interval-størrelser op til fire et halvt minut. Derudover må det bemærkes, at polynomierne ikke kun beskriver de tilfældige fejls udvikling over tid, men også en del systematiske fejls udvikling over tid, da de anvendte observationer kun er korrigeret for bias. Polynomiumsfunktionerne kan ses på Bilag CD.08.03.

Det er i opstillingen af polynomierne ikke muligt at opstille en funktion, der beskriver koordinaternes kovarianser. Dette skyldes, at kovarianserne ikke udvikler sig efter et bestemt mønster, ligesom varianserne på koordinaterne. Det må i anvendelsen af de opstillede polynomier derfor forudsættes, at koordinaterne er ukorrelerede, så kovarianserne kan sættes til nul.

6.2.3 Indledende værdier

Forud for hver måling med IMU'en er det nødvendigt at fastslå IMU'ens orientering i forhold til LL systemet, angivet ved elevation, rotation omkring Y-aksen, bank, rotation omkring X-aksen og heading, rotation omkring Z-aksen. Hældningerne måles med et Zerotronic 10 inklinometer og heading måles ved hjælp det elektroniske kompas. Hvis der er fejl på den målte hældning, vil det give fejl i positionerne helt fra starten, da gyroerne dermed måler rotationer i forhold til et forkert system, hvilket vil påføre fejl på de målte accelerationer, da disse ikke roteres til det korrekte system. En fejl på 0,005 grader vil give en fejl på en centimeter efter fem sekunder. Denne fejl vokser lineært, hvilket vil sige, at en fejl på 0,050 grader giver en fejl på ti centimeter, en fejl på 0,500 grader giver en fejl på en meter osv. Denne beregning kan ses på Bilag CD.08.04. For at opnå så godt et resultat som muligt, skal bank og elevation derfor måles ind med en nøjagtighed på tusinddele grader.
Hældningerne og Heading anvendes som indledende værdier inden positionsbestemmelsen igangsættes. Derudover anvendes altid startkoordinaterne (0,0,0).

6.3 DR-AK

Formålet med dette afsnit er, at beskrive kalibreringen af DR-AK systemet, hvilket betyder, at der redegøres for kalibreringen af de instrumenter, der indgår i DR-AK systemet. Derfor beskrives kalibreringen af det elektroniske kompas, Azimuth 1000, og GPS'en, Leica GPS System 500. Kalibreringen af kompasset i underafsnit 6.3.1, indebærer både en intern kalibrering, samt udarbejdelsen af en deviationstabel, der øger nøjagtigheden af observationerne fra kompasset. Kalibreringen af GPS'en i underafsnit 6.3.2, er ikke en egentlig kalibrering, men en beregning af den forventede punktspredning.

6.3.1 Kompas

Når kompasset skal kalibreres, er det væsentligt, at komme omkring den automatiske kalibrering, skulle sikre, at kompasset holder de nøjagtigheder, som producenten specificerer. Derudover vil der være en spredning på kursen ved det kørselsmønster, projektgruppen agter at anvende. Endelig vil en deviationstabel være meget anvendelig i positionsbestemmelsen.

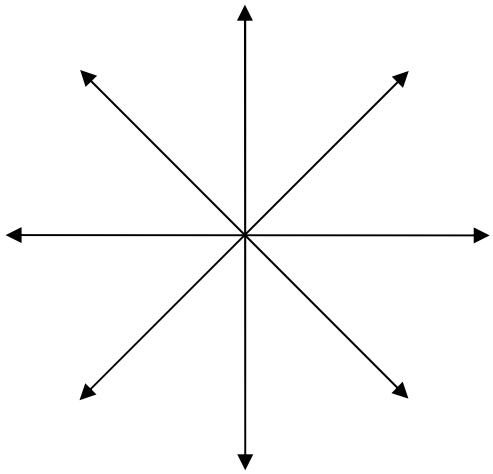
Automatisk kalibrering

Der er i afsnit 2.3.2 beskrevet, at kompasset, Azimuth 1000, har en nøjagtighed på ±0,5 grader. Dette vurderes at være under optimale forhold, dvs. at kompasset ikke er påvirket af lokale magnetfelter. I KVH (2009a) er der beskrevet en metode for kalibrering af kompasset, hvilket indebærer en automatisk kalibrering af kompasset, så ydre forhold tages i betragtning. Ved at gennemføre en automatisk kalibrering, er det muligt at opnå en nøjagtighed på ±1,0 grader. Denne forskel i nøjagtighed opfatter projektgruppen, som forskellen mellem nøjagtigheden under optimale forhold og nøjagtigheden, det er muligt at opnå under normalt brug, dvs. i miljøer, hvor der vil være svage lokale magnetfelter, f.eks. fra det objekt, som kompasset er placeret på.

Den automatiske kalibrering udføres ved at bevæge kompasset i en cirkel, to gange, og hver cirkel skal minimum tage 2 minutter. Dette er foregået som foreskrevet og er fundet sted på den parkeringsplads, som er udvalgt som testområde, så der tages højde for eventuelle lokale magnetfelter i området. Resultatet af kalibreringen var '9' og '4'. Er det første ciffer '9' skulle der være en nøjagtighed på ±1,0 grader. Hvis det andet tal er under '3' har kompasset en ringe magnetisk placering, dvs. det er påvirket af lokale magnetfelter, og det skal overvejes at flytte kompasset til en anden placering. Det betyder, at der er foretaget den bedst mulige kalibrering, men at kompasset er påvirket af lokale magnetfelter. Dog er det ikke alarmerende, og kompasset forventes herefter have en nøjagtighed på ±1,0 grader.

Spredning på kompaskursen

For at kontrollere spredningen på kursen fra kompasset, udføres en test af kompassets nøjagtighed. Kontrollen udføres ved at udstikke otte retninger (linjer), som herefter skal køres med køretøjet, hvor kompasset er placeret. Dette gøres, da en del af, hvor godt kursen kan bestemmes afhænger af, hvorledes det er muligt for projektgruppen at følge en lige linje. De otte linjer vil blive lagt, så de bedst muligt beskriver en cirkel. På denne måde vil usikkerhederne fra kompasset og 'chaufføren' blive indeholdt i beregningen af spredningen. Denne spredning skal ligeledes benyttes som input i Kalman filteret.



Figur 6.5: Linjer som følges for at bestemme spredningen ved kompasmålingen. Linjerne køres både frem og tilbage.

I Figur 6.5 kan linjerne, som følges ses. Alle linjerne køres både frem og tilbage. Praktisk udføres testen ved, at der udstikkes fire krydsende linjer i de viste retninger. Linjerne er ca. 20 meter lange. For at markere linjerne, trækkes en snor fra start- til slutpunkt, som herefter følges ved kørslen.
Data til at beregne spredningerne for kompaskursen er indsamlet vha. navigationssoftwaren, se kapitel 5. Der er indsamlet minimum 200 observationer pr. kørt strækning. Resultaterne fra testen kan ses i Tabel 6.1. Beregningen af resultaterne kan ses på Bilag CD.08.05. I tabellen kan ses middelkursen, som er blevet fulgt, samt spredningen, som er beregnet ud fra de observerede kurser og middelkursen. Maks. spredningen er et udtryk for, hvor stor en spredning, der er risiko for at have på de målinger, som indsamles under de test, som foretages i kapitel 8. Som udgangspunkt vælger projektgruppen, at det er maks. spredningen, som skal benyttes i Kalman filteret, for at sikre en korrekt vægtning af observationerne.

Retning	Middelkurs (grader)	Spredning (grader)
Test 1	178,2	0,8
Test 2	357,9	0,4
Test 3	268,7	1,1
Test 4	90,0	1,6
Test 5	43,7	1,0
Test 6	225,3	0,7
Test 7	135,2	1, 6
Test 8	316,1	0,7
Middelspredning		1,0
Maks. spredning		1,6
Min. spredning		0,4

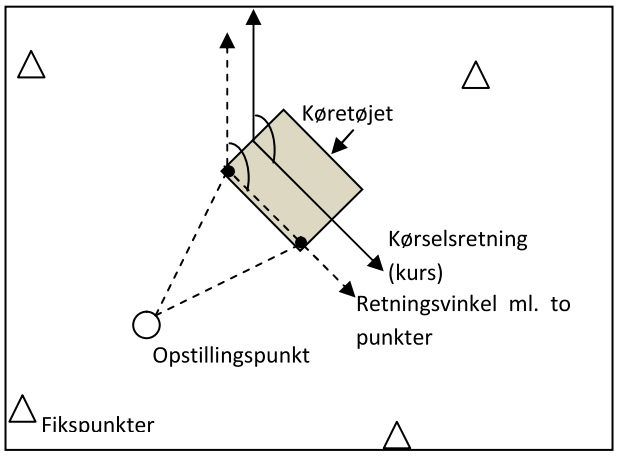
Tabel 6.1: Spredninger på kursen observeret fra kompasset.

Spredningen er et udtryk for, hvor godt kompasset kan følge en forudbestemt retning, men siger ikke noget om lokale magnetfelter f.eks. fra køretøjet eller andre objekter, som kan påvirke den observerede kurs negativt. Man kan derfor betegne det som en relativ spredning, hvorfor der skal laves en model for, hvorledes kompaskurserne bliver absolutte, dvs. så der tages højde for forstyrrelser i området. Derfor vælger projektgruppen at udarbejde en deviationstabel, til at bestemme korrektioner til de observerede kompaskurser.

Deviationstabel

For at udarbejde en tilfredsstillende og dækkende deviationstabel, vælger projektgruppen at bestemme deviationen i 36 retninger, dvs. med et interval på 10 grader. Princippet for at bestemme en afvigelse er, at indstille køretøjet i hver af de 36 retninger, dvs. så kompasset viser kursen i intervaller af 10 grader. Samtidig beregnes retningen af køretøjet ud fra to punkter målt i KP2000J langs den linje som køretøjet peger. Koordinaterne hertil beregnes i KP2000J, og ud fra de to punkter kan en retningsvinkel beregnes.

På Figur 6.6 kan ses en skitse af, hvorledes opmålingen er foregået. For at måle to punkter i den retning som køretøjet peger, er der monteret to prismer på vognen, som er blevet monteret, så de er sammenfaldende med køretøjets kørselsretning. Når vognen er stillet i den retning, som det ønskes ud fra kompasangivelsen, f.eks. nul grader, så måles prismerne ind med totalstation. Totalstationens opstillingspunkt beregnes ud fra fire fikspunkter som er målt med GPS. Herudfra kan koordinaterne, til de to målte punkter på vognen, beregnes og retningsvinklerne kan beregnes ved Ligning 6.2: (Jensen, 2005:36)



Figur 6.6: Princip for måling af retningsvinkel vha. totalstation til udarbejdelse af kurs.

Beregning af retningsvinkel

$$\alpha_{AB} = arctan\frac{(E_B - E_A)}{(N_B - N_A)} + n100gon \qquad (6.2)$$

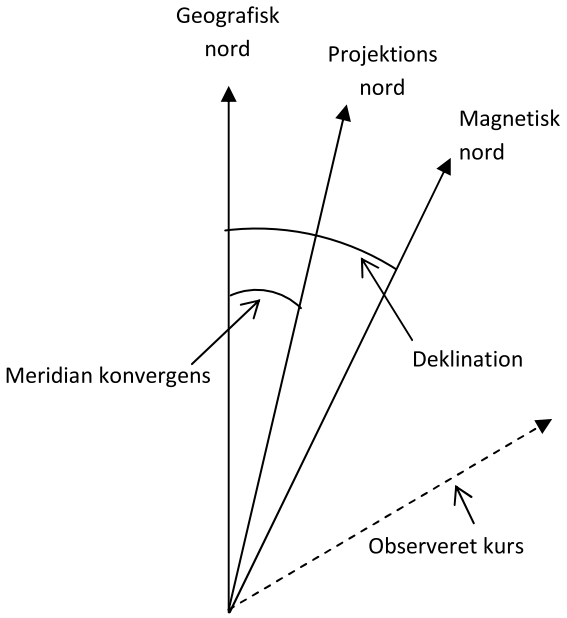
Hvor,
E_A og N_A er koordinaterne til det første punkt i meter
E_B og N_B er koordinaterne til det andet punkt i meter
n er 1, 2, 3 eller 4 alt efter fortegnet der fremkommer når hhv. E og N koordinaterne subtraheres

Retningsvinklerne, som de observerede kurser skal sammenlignes med og som deviationstabellen dermed udarbejdes på baggrund af, er beregnet ud fra koordinater, der er beregnet på baggrund af totalstationsmålinger. Dokumentationen af beregningerne i TMK ud fra totalstationsmålingerne kan ses i Bilag CD.08.06.01. Koordinaterne er beregnet ud fra Ligning 4.13 og 4.14.
Ud fra resultaterne beregnet med TMK kan et skøn for punktspredningen i de målte punkter beregnes. Denne beregnes til 9 mm. Herudfra kan spredningen på retningsvinklen mellem to punkter, hvor afstanden herimellem kendes til 87 cm, beregnes vha. følgende ligning.

Beregning af spredningen på retningsvinklen

$$\sigma_{ret} = \arctan\left(\frac{\sqrt{0{,}009^2\ m + 0{,}009^2\ m}}{0{,}870\ m}\right) = 0{,}9°$$

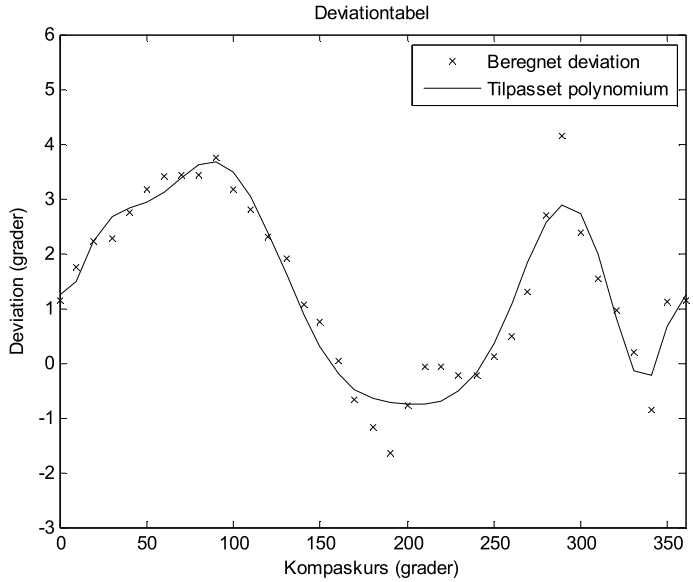
Dette betyder altså, at der er en spredning på 0,9 grader på retningsvinklen, som er beregnet på baggrund af totalstationsmålingerne. Dette medfører derfor også en fejl på den deviationstabel som udarbejdes. Projektgruppen vælger dog alligevel at indføre deviationstabellen, da deviationen i de fleste tilfælde er større end spredningen på retningsvinklen.



Figur 6.7: Forholdet mellem forskellige angivelser af nord.

I forbindelse med udarbejdelsen af deviationstabellen, opstår der dog et problem i, at retningsvinklen angives i forhold til nord i projektionen, som er KP2000J, og kompaskurserne angives i forhold til magnetisk nord. Forholdet mellem de forskellige angivelser af nord kan ses i Figur 6.7. I princippet skulle disse begge angives i forhold til geografisk nord, men da positionerne fra DR-AK, i forbindelse med test af systemet, skal sammenlignes med GPS-koordinater målt i KP2000J, vælges det, at omregne kompaskursen til nord i denne projektion. Derfor skal deklinationen adderes til kursangivelsen fra kompasset, da deklinationen angiver forskellen mellem magnetisk og geografisk nord, jf. Bilag D. Derefter skal meridiankonvergensen subtraheres denne kurs, så kursen fra kompasset angives i forhold til nord i KP2000J. Meridiankonvergensen for KP2000J, er i testområdet beregnet til 0,4 grader. Forholdet mellem de forskellige angivelser af nord kan ses i. Deviationerne er beregnet ved

hjælp af funktioner og data, der kan ses på Bilag CD.08.06.02. Deviationerne plottes herefter i forhold til den tilhørende kurs.
Herudfra kan der beregnes et bedst tilpasset polynomium, se Figur 6.8. Det er valgt at beskrive det bedst tilpassede polynomium som et 11. grads polynomium. 11. grads polynomiet er valgt, da det beskriver en rimelig jævn kurve. Der kunne godt laves et polynomium, der følger punkterne bedre, men det vurderes, at det er usandsynligt, at deviationerne har de skarpe knæk, der er beskrevet af punkterne i figuren. Disse knæk tilskrives i stedet små fejl opstået under opmålingen.
11. grads polynomiet benyttes herefter til at korrigere den observerede kompaskurs, som skal benyttes i Kalman filteret. Korrektionerne af kompas observationerne er beregnet vha. af funktioner og data, der kan ses på Bilag CD.08.06.03.



Figur 6.8: Deviationstabellen for de observerede kompaskurser.

6.3.2 GPS

Positionerne fra GPS kan ikke direkte kalibreres, men det er nødvendigt at tage stilling til hvilken projektion opmålingen skal foretages i, af hensyn til afstandskorrektionen. Derudover kan der beregnes en punktspredning, for have en fornemmelse af, hvilken nøjagtighed GPS'en kan måle med.

Afstandskorrektion

De afstande, der beregnes på baggrund af GPS koordinaterne, vil være påvirkede af en afstandskorrektion, da GPS'en måler i en foruddefineret projektion. For at minimere denne afstandskorrektion, foretages GPS målingen i KP2000J, der har en lille afstandskorrektion. Skalakonstanten i KP2000J er 0,99995, hvilket resulterer i en maksimal korrektion af afstanden, på fem millimeter på 100 meter. Det vælges derfor at se bort fra den fejl i afstanden den valgte metode vil give, da nøjagtighedskravet på en halv meter til fulde er opfyldt.

Punktspredning

De beregnede afstande vil dog stadig være påvirket af spredningen på positionsbestemmelsen, og denne størrelse er vigtig at kende af hensyn til inputtet i Kalman filteret. Under dataindsamlingen i

dette projekt anvendes en Leica GPS System 500 og SpiderNet som referencenet. I Jensen, et al. (2008) er der udført en række tests, der afdækker opnåelige nøjagtigheder med forskellige GPS-modtagere og referencestationer. Ifølge deres undersøgelse vil den maksimale spredning i planen, ved brug af Leica GPS System 500 og SpiderNet, for et punkt være 0,007 meter (Jensen, et al. 2008:67). Da der i den beskrevne rapport anvendes en anden definition af punktspredning end i nærværende rapport, bliver spredningen i planen dog 0,010 meter. Da afstandene kun beregnes i en retning, ønskes kun spredningen i f.eks. E, i stedet for punktspredningen. Hvis det antages at spredningen i E og N er lige store, fås en spredning i retning på 0,007 meter. Dette anvendes i beregningen af spredningen på den beregnede afstand. Da afstandene er beregnet på baggrund af to punkter vil spredningen på afstanden kunne beregnes vha. Ligning 6.3:

Spredning på afstand, beregnet vha. GPS-punkter

$$\sigma_S = \sqrt{(\sigma_P^2 + \sigma_P^2)} \qquad (6.3)$$

Hvor,
σ_S er spredningen på den beregnede afstand i meter
σ_P er spredningen på de målte punkter i meter

Hvilket giver:

$$\sigma_S = \sqrt{(0{,}007^2 + 0{,}007^2)} = 0{,}010\ m$$

Der fås således en spredning på den beregnede afstand på 0,010 meter. Denne spredning gælder under forudsætning af, at køretøjet foretager en retlinet bevægelse og at der ikke udsving mellem de to GPS-punkter.

7 Planlægning af test

Formålet med dette kapitel er at beskrive overvejelserne vedrørende planlægningen af de tests, som NS-1002 skal igennem, for at det kan vurderes, om kravene opstillet i problemformuleringen, mht. at positioneringen skal foregå med en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre, kan opfyldes. Herunder er det formålet at udvælge et testområde og beskrive de ruter, der køres med NS-1002.
Dette gøres for at testene bliver strukturerede og veldokumenterede, og så planlægningen dermed ikke har indflydelse på, om testresultaterne bliver fejlagtige.
I afsnit 7.1, beskrives formålet med at udføre testene dvs. hvad det ønskes at opnå gennem testene og de overvejelser, der har været omkring hvilke parametre, som har indflydelse på positionsbestemmelserne, og dermed skal bearbejdes yderligere. I afsnit 7.2 beskrives udvælgelsen af testområdet, og i afsnit 7.3 opstilles de ruter, som skal være indeholdt i testene på baggrund af de opstillede formål for testene.

7.1 Formål med test

Formålet med dette afsnit er at beskrive hensigten med testene. Herunder at fastslå, hvad det ønskes at opnå gennem testene og samtidig, hvad det ønskes at kontrollere, mht. parametre, som spiller ind på positionsbestemmelsen med både DR-IMU, DR-AK samt Kalman filteret.
I afsnittet beskrives først det generelle formål for testene ud fra, at testene skal simulere en TV-inspektion af et rørsystem. Herefter ses i underafsnit 7.1.1, 7.1.2 og 7.1.3 på, hvilke parametre der ønskes undersøgt inden for hhv. DR-IMU, DR-AK og Kalman filteret.

Det generelle formål med testene er at simulere en TV-inspektion i et rørsystem, for på den måde at vurdere, om det overordnede nøjagtighedskrav på ±0,5 meter eller bedre kan opfyldes. Derfor skal principperne for en TV-inspektion implementeres i testene. I Bilag A, samt i kapitel 1, er principperne for en inspektion blevet beskrevet, hvorfor kravene til ruterne opstilles på baggrund af beskrivelserne heri. På Figur 1.1 i kapitel 1 kan det overordnede princip ses.
Under en TV-inspektion, startes der med at køre traktoren, som transporterer kameraet, fra brønd til brønd og dermed inspiceres hovedledningen, hvilket typisk er over en afstand på 100 meter. Herefter køres tilbage til startbrønden, hvorefter der med udgangspunkt i denne køres ud til de enkelte stikledninger. Her sendes kameraet ind i stikledningen for at undersøge rørets tilstand. Det er således kameraet, der ønskes positioneret.
Der skal derfor udføres test, der simulerer kameraets bevægelse i disse rørsystemer, så det kan ses om kravet til nøjagtigheden kan opfyldes. Ud fra dette kan det udledes, at der overordnet skal laves følgende tests:

- Simulering af kørsel i hovedledning – ca. 100 meter.
- Simulering af kørsel fra hovedledning til stikledninger i forskellige afstande, da stikledningerne ligger fordelt langs hele hovedledningen.
- Simulering af kørsel fra hovedledning til stikledninger med knæk, da knæk på stikledningerne kan forekomme.

7.1.1 DR-IMU

Gennem kapitel 4 og kapitel 6 er der opnået viden omkring forskellige parametre, som specielt har betydning for positionsbestemmelse, med DR-IMU. Inden IMU'en kan benyttes til positionsbestemmelse skal denne kalibreres. Dette gøres ved at beregne bias og derefter tage højde for denne størrelse under positionsbestemmelsen. Derfor ønskes det at undersøge, hvilken indflydelse bias har, og om der kan vurderes noget generelt, f.eks. at bias er stabil på den enkelte sensor i IMU'en efter opstart eller om temperaturen har indflydelse på størrelsen af bias. Derfor vælges det at indsamle kalibreringsdata på universitet inden og efter selve testene udføres. Dette gøres for at kunne vurdere, om der sker en ændring af bias i forbindelse med transporten og om forskelle i temperatur har betydning.
Bank, elevation og heading er de indledende input til rotationsmatricerne, som korrigerer IMU'en til vandret, så positionsbestemmelsen kan udføres korrekt. Derfor er det relevant at se på disse parametres indflydelse på positionsbestemmelsen, herunder hvad det kan betyde at benytte forkert bank, elevation og heading. Positionsbestemmelsen kan ikke korrigeres for eventuelle fejl i orienteringen, der kan ophobes ved at gyroerne driver med tiden i tredje, jf. Bilag C. Dette skyldes, at en løbende korrektion af IMU'ens orientering ikke kan fortages, da aflæsninger fra Zerotronic 10 skal foretages manuelt og derved ikke kan tidsstemples løbende. Den voksende orienteringsfejl kan sammenlignes med forkert bestemte elevation og bank som resulterede i positioneringsfejl, jf. afsnit 6.2.3, hvorfor det må forventes at positionsbestemmelsen forringes med tiden.
Tiden som positionsbestemmelsen forløber over har også indflydelse, specielt på gyroerne, som driver meget over tid og fejlene stiger med tiden i tredje jf. Bilag C. Derfor kan denne parameter undersøges nærmere, herunder hvor længe positionsbestemmelsen er tilfredsstillende, og om det giver en forskel i nøjagtigheden, at køre ruterne med forskellige hastigheder.
Endeligt er det jf. ovenstående omkring det generelle formål for positionsbestemmelse blevet fastlagt, at der skal simuleres drejninger til stikledninger i forskellige afstande. Derfor er det relevant at undersøge parameteren drejning, dvs. undersøge hvorvidt drejninger har indflydelse på positionsbestemmelsen.
Derfor er formålet med testen, udover det overordnede formål, at se, hvilken indflydelse følgende parametre har på positionsbestemmelsen af DR-IMU:

- Bias
- Bank, elevation og heading
- Tiden
- Drejning

7.1.2 DR-AK

Mht. DR-AK, så er der udarbejdet en deviationstabel i kapitel 6, som viser, at der kan ske en væsentlig forbedring af kursen fra kompasset. Derfor ønskes det gennem testene at vurdere indflydelsen af denne deviationstabel, dvs. sker der en forbedring i positionsbestemmelsen ved at denne benyttes.
I den forbindelse er det ligeledes relevant at undersøge, om deviationstabellen også har indflydelse på positionsbestemmelsen, når der foretages drejninger, og hvilken. Dermed undersøges det også, hvor godt DR-AK kan foretage drejningerne i forhold til de indledende overordnede formål, hvor det er vigtigt, at dette kan gøres korrekt, når der f.eks. skal simuleres kørsel i stikledninger.

I DR-AK er afstanden, som benyttes, beregnet på baggrund af GPS positionering. Dette kan give problemer i forbindelse med positionsbestemmelsen af DR-AK, da der, pga. tilfældige fejl i GPS målingen, beregnes en afstand selvom køretøjet står stille. Dette betyder, at der beregnes positioner, hvor det ser ud til at køretøjet bevæger sig, selvom denne er stillestående. Betydningen af dette ønskes derfor undersøgt.
Tiden og dermed den afstand som positionsbestemmelsen med DR-AK foregår over, er ligeledes en parameter, som kan få indflydelse. Det skal derfor undersøges om der sker en forplantning af fejl gennem positioneringen og hvilken indflydelse denne har, alt efter hvilken afstand og dermed hvor lang tid positioneringen foregår over.
Derfor er formålet med testen at se, hvilken indflydelse følgende parametre har på positionsbestemmelsen af DR-AK:

- Kalibrering
- Drejning
- Afstandsberegningen
- Tid og afstand

7.1.3 Kalman filteret

I forhold til Kalman filteret, så skal det undersøges, hvilket princip, det er bedst at benytte i den givne situation, hvor der sker en filtrering på baggrund af observationer fra DR-AK og DR-IMU. Dette undersøges på baggrund af underafsnit 4.4.2, dvs. om det er Metode 1, 2 eller 3. Herudfra skal Kalman filtreringen undersøges nærmere, dvs. hvordan opnås det bedste resultat gennem Kalman filtreringen ud fra det valgte princip.

7.2 Udvælgelse af testområde

Formålet med dette afsnit er at udvælge det område som testene skal udføres på, og desuden at beskrive området mht. placering og områdets visuelle udtryk.
Dette gøres for at give et indblik i de overvejelser projektgruppen har været igennem for at udvælge området.
Indledningsvist opstilles i underafsnit 7.2.1 en række krav til området, ud fra at det skal benyttes til test af NS-1002, og kunne fungere til at udføre en måling, som kan simulere en TV-inspektion af et rørsystem. Herefter beskrives i underafsnit 7.2.2 det valgte område ud fra placering og dets generelle udtryk.

7.2.1 Krav til testområde

Forud for udvælgelsen af testområde er det muligt at opstille en række krav til området, mht. placering og det generelle udtryk af området.

- Området skal være af en størrelse så det er muligt at manøvrere køretøjet rundt uden forhindringer. På området skal det ligeledes være muligt at simulere en TV-inspektion af et rørsystem, f.eks. kloak- og stikledninger. I Bilag A er en typisk måleopgave beskrevet, hvor der køres fra brønd til brønd og herimellem ud i de enkelte stikledninger. Afstanden mellem brøndene er typisk 100 meter og stikledningerne ligger så herudfra. Derfor vurderes det, at

området gerne skal være omkring 100 meter langt og min. 20 meter bredt, for at en TV-inspektion i en stikledning kan simuleres.
- På området skal der ligeledes foretages en kalibrering af kompasset, hvilket kræver at der kan køres i cirkler.
- Området må ikke have store niveauforskelle, for at give det bedste billede af den nøjagtighed, det er muligt at opnå i planen med NS-1002. Området skal desuden være plant og uden huller og andre ujævnheder, da dette kan påvirke målingerne og de meget sensitive sensorer negativt og give et forkert billede af de endelige resultater.
- Der skal være gode udsigtsforhold til GPS-satellitter, så GPS'en kan benyttes uden forstyrrelser.
- Ikke for mange større objekter, såsom bygninger og biler med eget magnetfelt, som dermed kan påvirke målingerne fra kompasset.

7.2.2 Beskrivelse af testområde

Ud fra den ovenstående krav til et testområde, har projektgruppen undersøgt området omkring Aalborg Universitet for store og jævne områder, som f.eks. parkeringspladser og lignende. På denne baggrund har projektgruppen valgt parkeringspladsen ved Føtex på Niels Bohrsvej i Aalborg Øst, som området, hvor testene af NS-1002 skal udføres. Parkeringspladsen kan ses på Billede 7.1.

Billede 7.1: Føtex og parkeringspladsen omkring. (Ophavsrettigheder: COWI)

Området er valgt ud fra en vurdering om, at den opfylder de opstillede krav bedst muligt.

Stort område (min. 100m x 20m):

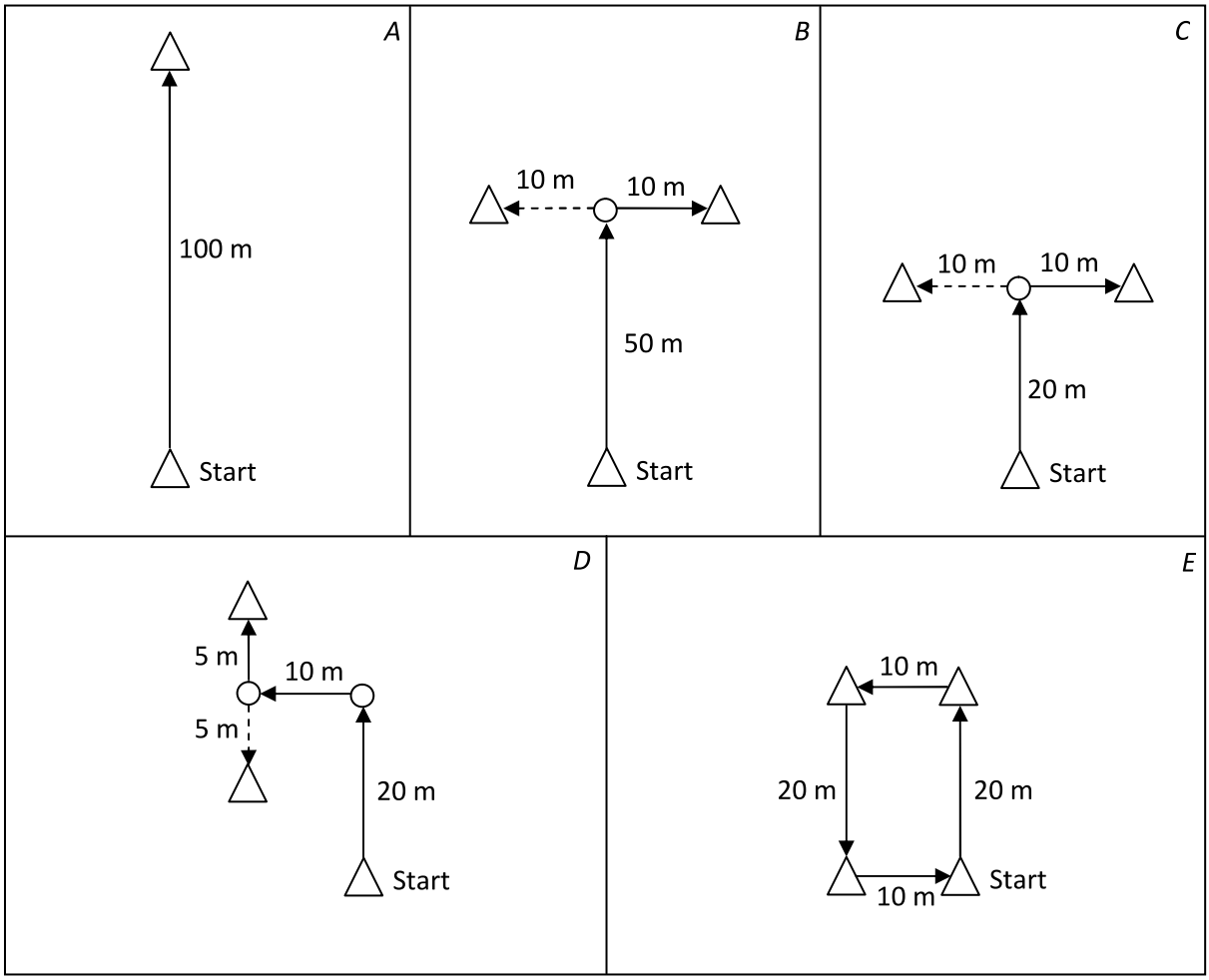
Området vurderes at være af tilfredsstillende størrelse, hvor det er muligt at simulere en kørsel mellem to brønddæksler i afstand af 100 meter, da parkeringspladsen er op til 180 meter i øst-vest retning. Derudover er pladsen mere end 30 meter bred i nord-syd retningen, hvor det dermed er muligt at simulere TV-inspektion af stikledninger. Samtidig vurderes det, at det er muligt at kalibrere kompasset, da der er områder i de sydvestlige og nordøstlige dele, som er store nok til at en sådan kalibrering kan foretages.

Plant og små niveauforskelle:
Efter en inspektion af området, har projektgruppen vurderet, at området kun har små niveauforskelle, hvilke dog vurderes, at være ubetydelige for målingerne og dermed det endelige resultat af positionsbestemmelsen. Det er ligeledes vurderet, at området er tilstrækkeligt plant og uden store ujævnheder. Som belægning på parkeringspladsen er lagt mindre fliser, hvilket kunne medføre rystelser i forhold til f.eks. asfalt, men det vurderes at fliserne er lagt tilstrækkeligt tæt og jævnt til, at det ikke har påvirkning i form af rystelser på køretøjet.
Gode udsigtsforhold til GPS-satellitter:
Som det kan ses på Billede 7.1, er området omkring parkeringspladsen åbent, hvilket giver gode udsigtsforhold til GPS-satellitter. Dog ligger der en relativ stor bygning i nærheden (Føtex), men det vurderes, at den ikke vil påvirke målingerne, og samtidig vil det blive tilstræbt at foretage målingen så langt fra bygningen som testene, der skal foretages, tillader det.
Få eller ingen lokale magnetfelter fra omkringliggende objekter:
For at målingerne fra kompasset kan indsamles på tilfredsstillende vis, må kompasset ikke være påvirket af lokale magnetfelter, f.eks. fra bygninger, biler og andre objekter, som kan være placeret i området. Dette kan selvfølgelig give nogle problemer idet det er en relativt befærdet parkeringsplads. Dette skyldes Føtex, hvorfor det vurderes at målingerne skal foretages i tidsrum, hvor denne er lukket. Dette vil forhåbentligt medføre, at der ikke er nogen biler på pladsen, som det også kan ses på Billede 7.1. Derudover er der andre objekter på pladsen, men det vurderes at disse er så små, at de ikke vil have indflydelse på målingerne. Mht. bygningen, så vurderes det, at hvis målingerne foretages i tilpas afstand fra bygningen, så vil denne ligeledes ikke have indflydelse. Derudover vil der i forbindelse med kalibreringen af kompasset blive taget højde for eventuelle lokale magnetfelter i nærheden. Af samme grund foretages kalibreringen på parkeringspladsen.

7.3 Valg af testruter

Formålet med dette afsnit er at beskrive de ruter, som NS-1002 skal testes i forhold til, samt hvilket formål den enkelte rute har. Dette gøres for at give et indblik i de overvejelser og vurderinger som projektgruppen har haft i forbindelse med udvælgelsen af de ruter, som NS-1002 skal igennem, og herunder præsentere de ruter, som skal køres.

Ud fra beskrivelsen af formålet med testene i afsnit 7.1 er det muligt at planlægge de ruter, som NS-1002 skal igennem for, at nøjagtigheden, hvormed det er muligt at positionere kameraet med, kan bestemmes og for at de forskellige parametres indflydelse kan undersøges. I princippet vil det være muligt at gennemføre testene ved to kørsler, en ved et langt lige stræk, og en hvor der simuleres kørsel mellem og ind i enkelte stikledninger.
Det kan dog være en mulighed at delene ruterne op i flere enkelte kørsler. Det vil give flere fordele, bl.a. for resultaterne og vurderingen heraf. Dette skyldes bl.a. at tiden, som nævnt, kan påvirke resultaterne, men det gøres også for generelt at vurderingen af resultaterne er mere tilgængelig. Herudfra har projektgruppen valgt ruterne, som er illustreret i Figur 7.1.



Figur 7.1: Illustration af ruterne som skal køres for at teste NS. Ryterne B, C, og D køres alle 2 gange.

Figuren er inddelt i fem testruter, *A*, *B*, *C*, *D* og *E*, og formålet og en nærmere beskrivelse af ruterne gives i det efterfølgende.

A. Denne rute skal simulere TV-inspektion i en hovedledning, hvor der køres fra brønd til brønd i en afstand af 100 meter. Kørslen foretages for at se hvilken nøjagtighed det er muligt at opnå efter de 100 meter. Kørslen vil desuden blive foretaget med to forskellige hastigheder.
B. Denne rute skal simulere TV-inspektion i stikledninger. Der startes i det samme startpunkt som tidligere, og efter 50 meter, drejes hhv. til højre og venstre, hvorefter der køres ud i stikledningen. Dette køres for at kontrollere, hvor stor nøjagtighed det er muligt at opnå, når der sker en drejning af køretøjet. Kørslen med drejning til venstre vil desuden blive foretaget med to forskellige hastigheder.
C. Denne rute skal ligeledes simulere TV-inspektion i stikledninger. Der startes i det samme startpunkt men efter 20 meter, drejes hhv. til højre og venstre, hvorefter der køres ud i stikledningen. Dette køres for at kontrollere, om der er forskel i nøjagtigheden alt efter, om der køres 50 eller 20 meter ud inden der drejes. Kørslen med drejning til venstre køres ligeledes med to forskellige hastigheder.
D. Denne rute simulerer ligeledes TV-inspektion i stikledninger, men her tilføjes et knæk på stikledningen. Igen startes i samme punkt og efter ca. 20 meter drejes der til venstre og efter ca.

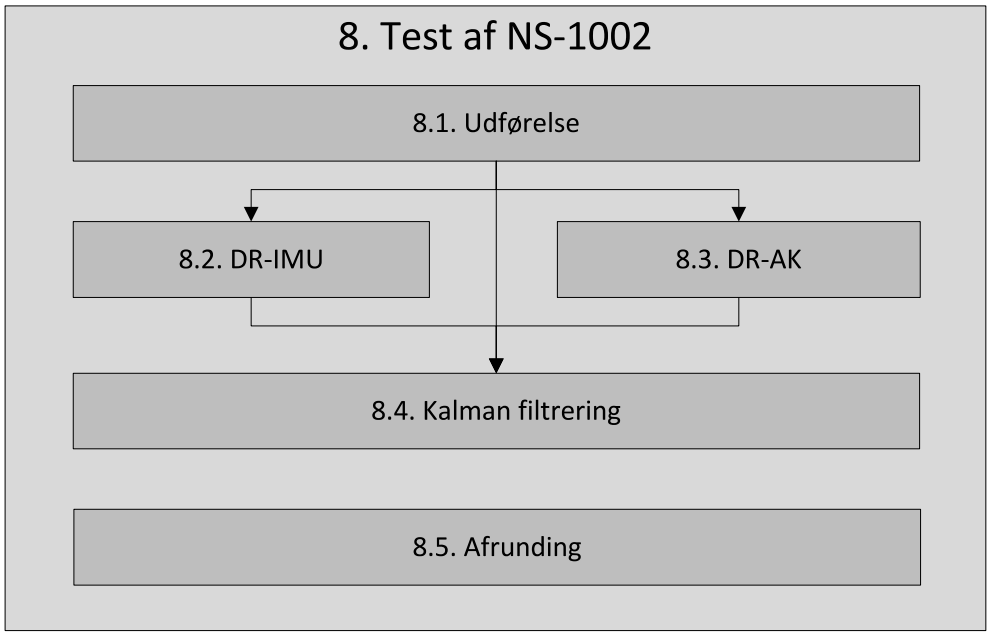
10 meter foretages endnu en drejning, enten mod højre eller venstre. Denne rute køre for at se, om flere knæk har betydning for den endelige nøjagtighed, det er muligt at opnå med NS.

E. Denne rute skal ikke direkte simulere en TV-inspektion, men foretages for at få en kørsel med en lukkesum og flere drejninger, som kan give et billede af kvaliteten af NS-1002 og de enkelte positionsbestemmelser, DR-IMU og DR-AK.

Dermed er de overordnede principper for test af systemerne beskrevet og der skal i alt gennemføres 11 tests. Inden testene foretages, er der en række indledende manøvrer, der skal gennemføres. Dette medfører at ruterne bliver opmålt og afmærket. Afmærkningen sker med snor og kridt, hvor snoren spændes ud mellem de enkelte start-, dreje- og slutpunkter, som er afmærket med kridt. Dette vil gøre det nemmere at følge ruterne under kørslen.

8 Test af NS-1002

Formålet med dette kapitel er at beskrive og udføre test af NS-1002. Det overordnede mål for testene er at undersøge, om det er muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter, jf. kapitel 3.
Derudover er der en række undermål for denne analyse, herunder at vurdere på de forskellige positioneringsmetoder, DR-IMU og DR-AK. Dette gøres for at se, hvilken indflydelse parametrene fra afsnit 7.1 har på positioneringen og om parametrene kan ændres og forbedres, så en bedre positionering kan foretages vha. de forskellige positioneringsmetoder. På baggrund af resultaterne, vil filtreringen af positionerne ved hjælp af Kalman filteret blive analyseret, så den endelige positionsbestemmelse kan foretages.
Kapitlet er opbygget, så udførelsen af testene i marken beskrives i afsnit 8.1. Derpå ses der på positionsbestemmelsen med DR-IMU i afsnit 8.2 samt DR-AK i afsnit 8.3 og de parametre, det er valgt at undersøge nærmere. Herefter vælges metoden for, hvordan Kalman filteret skal foretages i afsnit 8.4 bl.a. ud fra analyserne af positioneringerne med DR-IMU og DR-AK, og det undersøges om øvrige parametre kan forbedre resultaterne. Til slut samles i afrundingen op på, hvad resultaterne af de enkelte tests har været og det beskrives, hvordan en efterfølgende testkørsel kan optimeres og udføres. I Figur 8.1 er strukturen for kapitlet illustreret, for at øge forståelse af forløbet i kapitlet og sammenhængen, de enkelte processer imellem.



Figur 8.1: Struktur for kapitlet – Test af udviklede navigationssystem.

I analyserne af DR-IMU, DR-AK og Kalman filteret, vil de enkelte parametre ikke blive undersøgt for alle testkørsler. Der udvælges repræsentative testruter til at gennemføre analyserne af parametrenes indflydelse. Dette gøres med baggrund i, at karakteristika for de enkelte positionsbestemmelser

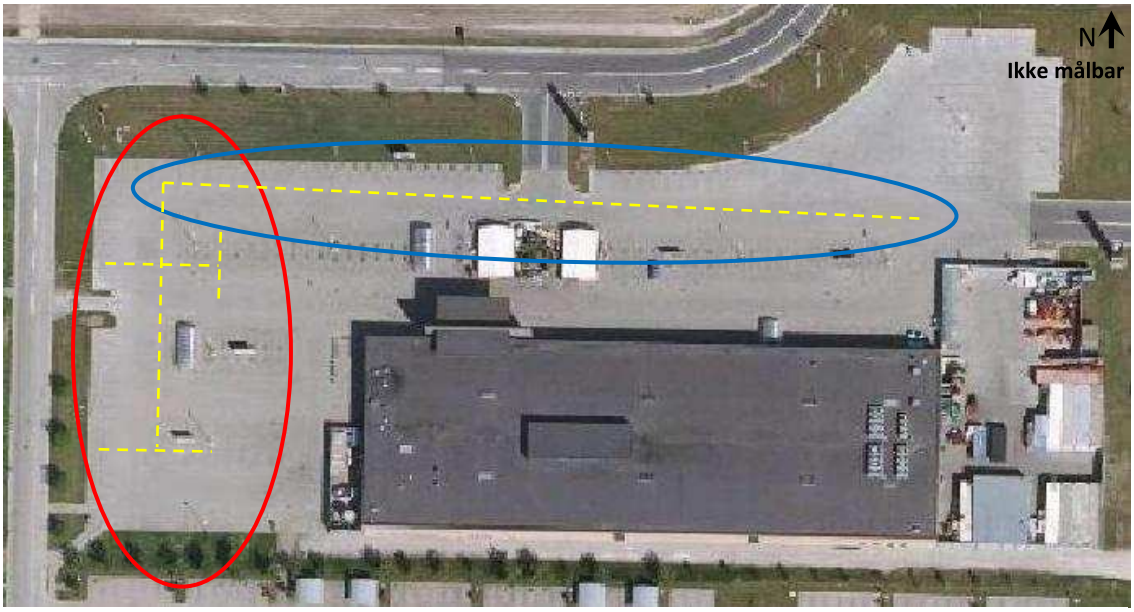
er vurderet til at være ens. Skulle der dog være positionsbestemmelser, som opfører sig specielt, vil de blive indeholdt i de enkelte analyser.
Positionsbestemmelserne af alle 11 tests vil blive udført, når NS-1002 er optimeret ud fra analyserne, og plot af hhv. positionsbestemmelserne, afvigelser i forhold til sand rute samt spredninger for den enkelte test kan ses på Bilag CD.09.01.
Som sammenligningsgrundlag til de forskellige positioneringsmetoder, både i den efterfølgende analyse, samt i de enkelte plot i bilaget, vil positioneringen fra RTK-GPS, blive benyttet som den 'sande' positionering. Det er desuden i forhold til disse koordinater, der beregnes afvigelser.

8.1 Udførelse

Formålet med dette afsnit er at beskrive udførelsen af testene i det udvalgte område, og herunder bl.a. redegøre for eventuelle problemer der er opstået i forbindelse med udførelsen.
I afsnittet beskrives først de indledende overvejelser og hvorledes ruterne er blevet afmærket. Herefter beskrives proceduren for en test, dvs. hvordan de enkelte tests er udført. Endeligt opstilles og beskrives testene, som er foretaget. Hele beskrivelsen tager udgangspunkt i kapitel 7.

Indledende procedurer

Med udgangspunkt i testruterne beskrevet i afsnit 7.3 blev ruterne afmærket på parkeringspladsen. Som lokalitet for opmålingerne blev området i den røde markering valgt, da det blev vurderet at det var det mest plane område, og det område med færrest objekter, som kunne påvirke målingerne, se Billede 8.1. Afstanden, fra nord mod syd, var dog ikke lang nok til, at der kunne udføres en kørsel på 100 meter, hvorfor denne test blev afmærket og udført i retningen, vest mod øst, som er vist med den blå markering.



Billede 8.1: Parkeringspladsen hvor testene blev udført. Den røde cirkel er det overordnede testområde. Den blå cirkel, er området for kørslen på 100 meter. De gule linjer markerer ruterne. (Ophavsrettigheder: COWI)

Der blev valgt et startpunkt i den nordlige del af den røde markering, som skulle være udgangspunkt for testene. Herudfra blev der med målebånd målt ud til alle ruterne. Start-, dreje- og slutpunkterne blev alle afmærket med kridt. Ruternes placering er markeret med gul i Billede 8.1.

Som en yderligere indledende procedure, blev der er foretaget en dataindsamling til kalibrering for bias, indenfor på universitetet, både før og efter testkørslerne blev udført.

Billede 8.2: Bank og elevation måles med inklinometer, som placeres på IMU'en, langs hhv. X- og Y-aksen. På billedet indsamles data til elevation.

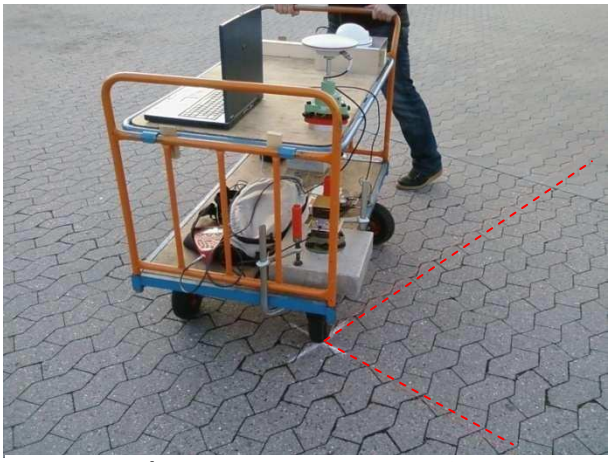
Procedure for test

Køretøjet blev inden hver test placeret i startpunktet, dvs. med IMU'en placeret over startpunktet. Derpå blev bank og elevation målt, vha. et inklinometer og noteret, se Billede 8.2. Herefter blev der indsamlet kalibreringsdata fra IMU'en.

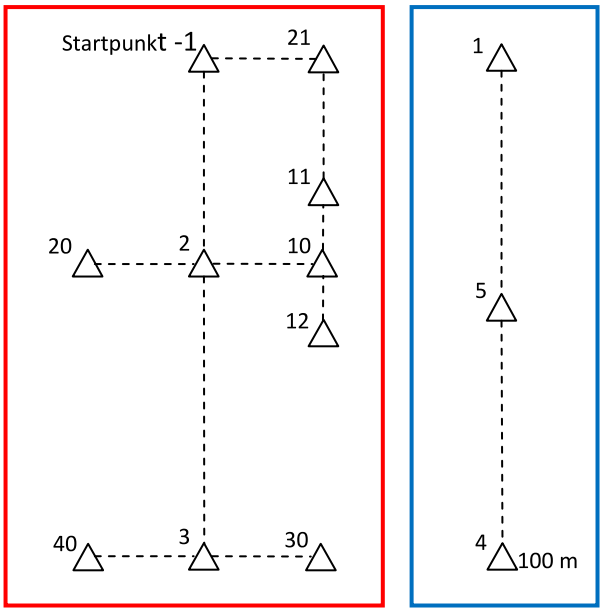
Så blev selve testkørslen udført, hvilket skete ved at starte dataindsamlingen i NS-1002 og herefter skubbede, et medlem af projektgruppen, vognen rundt på ruten. Ved endepunktet stoppes dataindsamlingen gennem softwaren.

Ved kørsel af de enkelte ruter blev der trukket en snor ud langs ruten, som derved gjorde det nemmere at følge en lige linje mellem punkterne på ruten, se Billede 8.3 og Figur 8.2. Dette stemmer ligeledes overens med den metode, der blev benyttet til at beregne spredningen på kompasset, hvorfor denne metode også skulle bruges under testene. Drejninger blev, som foreskrevet, foretaget omkring det hjul, som IMU'en og GPS'en er centreret over, så det på den måde, så vidt muligt, bliver en drejning omkring IMU'ens og dermed body systemets Z-akse. En drejning kan ligeledes ses på Billede 8.3.

Denne proces blev gennemført for alle testene, for at have ensartet data til databehandlingen.



Billede 8.3: På billedet er snoren, som blev fulgt, markeret med rød stiplet linje, og en drejning af køretøjet over et punkt (markeret med kridt), hvor hjulet står stille.

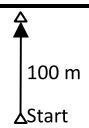
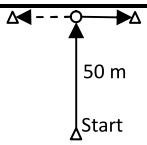
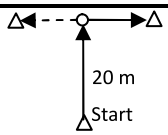
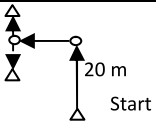
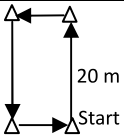


Figur 8.2: De enkelte ruter som køres, samlet og punktnummerstrategien kan ses herudfra. Farverne (rød og blå) henviser til farverne på Billede 8.1.

Udførte tests

Der blev, i alt blevet kørt 11 tests, som planlagt i kapitel 7. I Tabel 8.1 kan testene, der er blevet foretaget, ses. Første søjle i tabellen viser, hvil-

ken testrute det omhandler, dvs. om det er rute A, B, C, D eller E. I tabellen kan desuden ses navnet på testene, punkter, der er kørt til ud fra punktnummerstrategien i Figur 8.2 og endelig kan der ses bemærkninger til de enkelte test. Bemærkningerne beskriver, hvilken hastighed der er kørt i den enkelte test. Testene blev foretaget som planlagt, og de ruter, der skulle køres med forskellige hastigheder blev kørt hhv. langsomt og hurtigt. De øvrige test blev foretaget i det hurtige tempo.

Ruter	Test	Punkter der er kørt til	Bemærkning
A 	KloakHoved1	1 – 5 – 4	Langsom
	KloakHoved2		Hurtig
B 	KloakStik3	1 – 2 – 3 – 30	Langsom
	KloakStik32		Hurtig
	KloakStik4	1 – 2 – 3 – 40	Hurtig
C 	KloakStik1	1 – 2 – 20	Hurtig
	KloakStik2	1 – 2 – 10	Langsom
	KloakStik22		Hurtig
D 	KloakStikDrej1	1 – 2 – 10 – 11	Hurtig
	KloakStikDrej2	1 – 2 – 10 – 12	Hurtig
E 	Lukkesum1	1 – 2 – 10 – 21 – 1	Hurtig

Tabel 8.1: De foretagne test ud fra de planlagte ruter samt bemærkninger til de enkelte tests.

Kalibreringsdata fra IMU'en, herunder en tabel for de målte vinkler til beregning af elevation og bank, samt positioneringsdata indsamlet fra IMU'en, GPS'en og kompasset kan ses på Bilag CD.07.01.

8.2 DR-IMU

Formålet med dette afsnit er at analysere og konkludere på resultaterne af de udførte tests af NS, mere præcist på positioneringen af DR-IMU. Dette gøres for at se på forskellige parametres indflydelse på positioneringen af DR-IMU og om disse parametre kan ændres for at opnå bedre resultater.
I underafsnit 8.2.1 ses på effekten af kalibreringen og f.eks. om der er forskel i de beregnede bias til de enkelte test. I underafsnit 8.2.2 undersøges de forskellige parametres indflydelse på positionsbestemmelsen, som blev beskrevet i afsnit 7.1. Følgende parametre vil dermed blive behandlet nærmere under hhv. kalibrering og positionering.

- Kalibrering
    - Bias
- Positionering
    - Bank, elevation og heading
    - Tid
    - Drejning

8.2.1 Kalibrering

Før IMU'en kan benyttes til positionering kræves det, at IMU'en bliver kalibreret. Dette gøres bl.a. ved at bestemme bias, som er en systematisk fejl, der kan måles og korrigeres for inden positioneringen fortages.

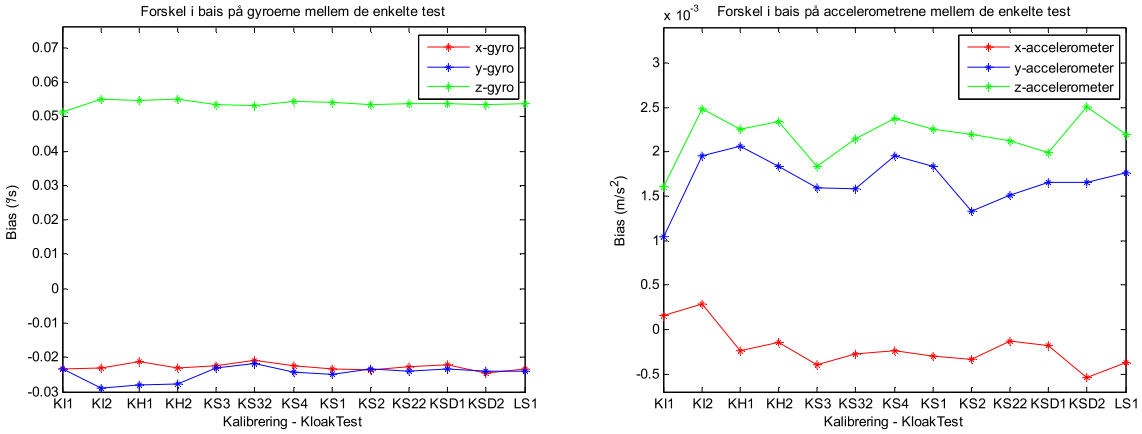
Bias

I teorien er bias ikke stabil fra opstart til opstart, men burde være stabil, når IMU'en først er tændt, jf. Bilag C. Derfor undersøges om dette er tilfældet, dvs. er den stabil og systematisk, samt om den forskel der måtte være, har betydning for positioneringen af DR-IMU.

I forbindelse med hver test, er der samlet kalibreringsdata i et minut, så bias kan beregnes og der kan kompenseres for denne inden positionerne bestemmes. Derudover er der indsamlet kalibreringsdata indenfor på universitetet, både før og efter testene er udført, for at undersøge, om der sker en ændring af bias. Der ses dermed på, om der er forskel i den bias, som er beregnet for hver dataindsamling. Bias er beregnet for hver af de seks sensorer i IMU'en, dvs. de tre gyroer og de tre accelerometre, og er beregnet ud fra data indsamlet på 1 minut. I Tabel 8.2 kan forskellen i bias for de seks sensorer samt temperaturen ses, for hver af de 13 gange der er indsamlet kalibreringsdata. I Figur 8.3 er disse ligeledes vist på graf, med bias på gyroerne til venstre og bias på accelerometrene til højre. I graferne er navnet på de enkelte test blevet forkortet, så f.eks. *KloakStikDrej1* hedder *KSD1*.

	Gyro – bias			Accelerometer – bias			Temperatur
Test	**X (°/s)**	**Y (°/s)**	**Z (°/s)**	**X (m/s^2)**	**Y (m/s^2)**	**Z (m/s^2)**	**(°)**
KloakInde1	-0,02320	-0,02329	0,05146	0,00016	0,00105	0,00161	27
KloakInde2	-0,02310	-0,02879	0,05507	0,00029	0,00196	0,00248	15
KloakHoved1	-0,02131	-0,02792	0,05476	-0,00024	0,00206	0,00225	14
KloakHoved2	-0,02288	-0,02759	0,05502	-0,00014	0,00183	0,00234	14
KloakStik3	-0,02252	-0,02291	0,05349	-0,00040	0,00159	0,00184	20
KloakStik32	-0,02074	-0,02183	0,05312	-0,00028	0,00158	0,00215	20
KloakStik4	-0,02226	-0,02440	0,05450	-0,00024	0,00195	0,00237	15
KloakStik1	-0,02322	-0,02479	0,05409	-0,00030	0,00184	0,00226	16
KloakStik2	-0,02360	-0,02328	0,05363	-0,00034	0,00133	0,00219	19
KloakStik22	-0,02280	-0,02393	0,05391	-0,00013	0,00151	0,00212	19
KloakStikDrej1	-0,02220	-0,02339	0,05391	-0,00018	0,00165	0,00199	19
KloakStikDrej2	-0,02448	-0,02386	0,05365	-0,00054	0,00166	0,00251	18
Lukkesum1	-0,02335	-0,02392	0,05373	-0,00037	0,00176	0,00219	16

Tabel 8.2: Beregnet bias for de forskellige tests samt temperaturen.



Figur 8.3: Forskel i bias mellem de enkelte test på hhv. gyroerne og accelerometrene. (Forskel i skala på de viste grafer)

Jf. underafsnit 2.3.4 er bias på gyroerne anført til at være <±1,0 °/s, samt <±8,5 mG ≈ <±0,0833 m/s^2 for accelerometrene. Dermed kan det, ud fra værdierne i tabellen og graferne, ses, at IMU'en overholder specifikationerne.

Derudover er det umiddelbart vanskeligt, at vurdere noget ud fra værdierne i tabellen og graferne, men det ses, at bias ikke er stabil efter opstart, da IMU'en ikke har været slukket mellem testene. Det ses desuden, at bias på accelerometrene fra *KloakInde1* er ca. halv så store som bias fra *KloakInde2*. Det kunne skyldes temperaturen, da denne jf. Bilag C, har indflydelse på størrelsen af bias. Temperaturen for *KloakInde1* er næsten dobbelt så høj i forhold til *KloakInde2* og generelt er bias på accelerometrene fra *KloakInde1* mindre end de øvrige bias. For bias på gyroerne, er den samme vurdering ikke mulig at lave.

I tabellen og graferne er det tydeligt at fortegnet for bias på de enkelte sensorer stort set er ens. F.eks. er bias for X- og Y-gyroerne begge negative, mens bias for Z-gyro og Y- og Z-accelerometrene er positive. Mht. X så er de to *KloakInde* tests positive mens de øvrige er negative. Derfor er det heller ikke muligt at sige, at bias systematisk er positiv eller negativ på den enkelte sensor.

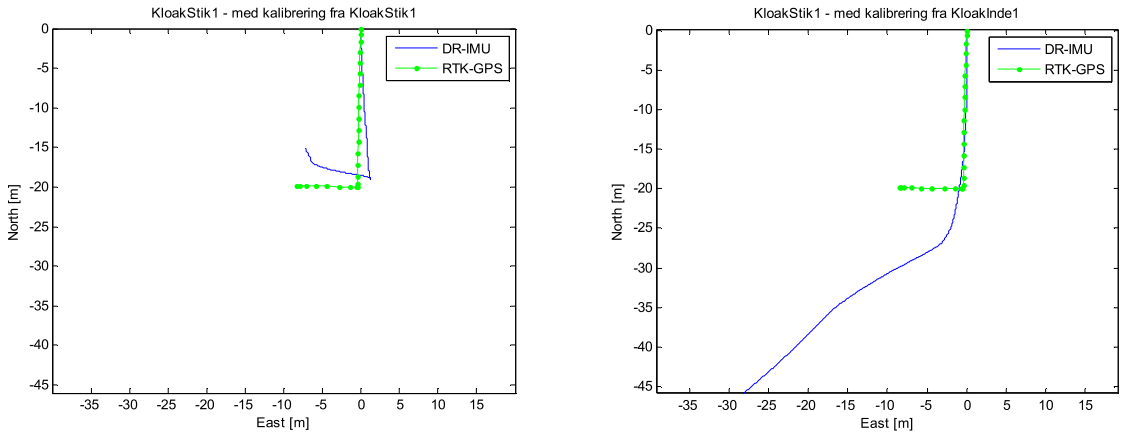
Mht. de specifikke værdier, kan det være vanskeligt at vurdere, hvor stor indflydelse det har på positioneringen, når der f.eks. er en forskel på hhv. 0,00013 m/s^2, 0,00091 m/s^2 og 0,00087 m/s^2, i bias for X-, Y- og Z-accelerometrene ved data fra hhv. *KloakInde1* og *KloakInde2*.

For at give et billede af bias betydning eller forskellen på at bruge de forskellige bias, gennemføres et beregningseksempel for betydningen. Dette gøres ved at foretage en positionsbestemmelse ud fra forskellen mellem bias i *KloakInde1* og *KloakInde2*. Funktionerne og data anvendt til denne beregning kan ses på Bilag CD.09.02. Positionsbestemmelsen giver en samlet afstand på 0,00058 meter efter et sekund og 2,230 meter efter 60 sekunder, hvilket stemmer godt overens med teorien, der siger, at en fejl på accelerometer bias giver en fejl i positionen, svarende til tiden i anden. Vigtigheden af, at anvende den korrekte kalibrering er dermed tydelig. Det er samtidig klart, at en forkert bias, hurtigt vil give store fejl i positionsbestemmelsen.

Det har ikke været muligt at udarbejde et lignende eksempel for gyroerne, men for at vise kalibreringens betydning generelt for positioneringen, kan vises et eksempel, fra en test, som både beregnes med bias indsamlet umiddelbart inden testen og derefter med bias for en anden test.

Som eksempel er valgt testen, *KloakStik1*, og bias indsamlet i forbindelse med denne, samt bias fra *KloakInde1*. Forskellen kan ses i Figur 8.4.

Ud fra figuren er det tydeligt, at positioneringen ikke foretages korrekt, når der benyttes andet kalibreringsdata, end det, som er indsamlet i forbindelse med testen.



Figur 8.4: Forskel i positioneringen af DR-IMU med hhv. den tilhørende kalibrering til venstre og samme positionering, med kalibreringsdata fra *KloakInde1* til højre.

På baggrund af ovenstående vurderes det derfor, at bias ikke er systematisk for IMU'en, og det er derfor nødvendigt at indsamle kalibreringsdata inden brug, også selvom IMU'en er tændt hele tiden. Da en fejl på bias giver fejl på positionerne, er det et problem, at bias tilsyneladende varierer meget, formentlig på grund af temperaturskift. Det kan derfor være nødvendigt at have en stabil temperatur i IMU'en, da det ser ud til, at temperaturen har betydning for bias på accelerometrene, idet bias vurderes at være mindre ved en højere temperatur. Dette kan dog ikke konkluderes endeligt ud fra de foretagne tests, men stabiliseringen kunne implementeres i systemet ved at placere IMU'en i f.eks. en kasse, som kan holde temperaturen stabil.

8.2.2 Positionering

Under positioneringen er der flere forskellige parametre, som har betydning for nøjagtigheden, og som dermed påvirker resultaterne. Bl.a. er der indledende parametre, som kan have betydninger for resultaterne, som bank, elevation og heading. Derudover er der en række parametre under testen, som kan få indflydelse, f.eks. tiden som IMU'en er i gang eller drejninger.

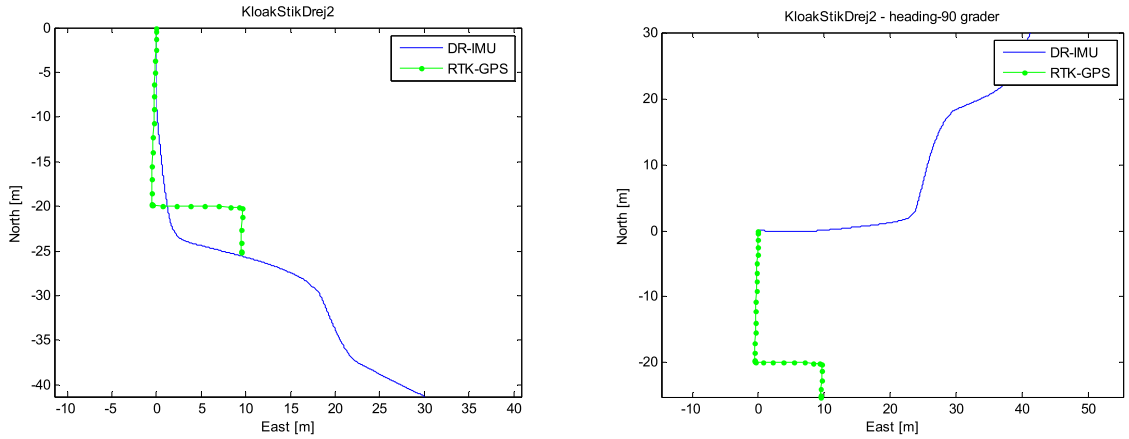
Bank, elevation og Heading

Inden hver test skal bank, elevation og heading findes for at rotationsmatricen kan beregnes og de målte accelerationer kan roteres til LL systemet, hvor positionerne beregnes. I teorien er det disse parametre, som bestemmer hele orienteringen af IMU'en, dvs. de sørger for, at positioneringen roteres korrekt til vandret og at kursen er sand. Derfor undersøges her, hvilken indflydelse bank, elevation og heading har for positioneringen, herunder hvilken effekt det har, hvis bank, elevation og heading ikke er bestemt korrekt. For at vise disse parametre, ses der først på headings indflydelse og herefter på bank og elevation.

<u>Heading</u>

Heading er drejningen omkring Z-aksen, dvs. den retning eller kurs som køres. I NS-1002, bestemmes denne ud fra den korrigerede kompaskurs. Heading har betydning for, hvilken retning DR-IMU umiddelbart foretager sin positionering i, og dermed også betydning for de endelige resultater. For at vise

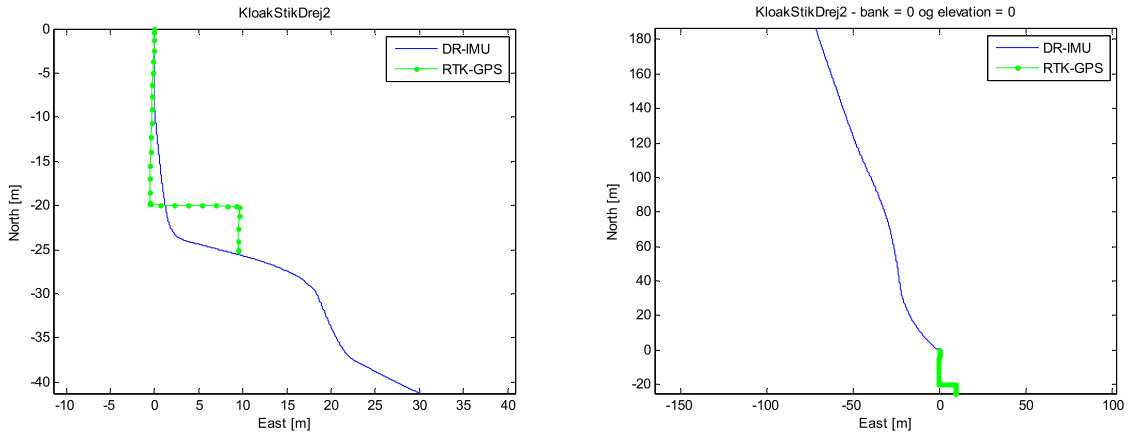
dette, laves en test, hvor der vises en positionering med en korrekt angivet kurs, og den samme positionering, men med en anden kurs. Til hver positionering er der benyttet de samme kalibreringsdata med korrekt bank og elevation.
Figur 8.5 viser, at heading er vigtig for, at positioneringen foretages korrekt, samt er afgørende for, at positionerne vises korrekt i en ønsket projektion. Skal heading gøres bedre, skal kursen bestemmes på anden vis med f.eks. et bedre instrument end det benyttede kompas.



Figur 8.5: Forskellen i positionering, ved at bruge den korrekte heading, til venstre, og en heading 90 grader mindre, til højre. (Forskel i skala på de viste grafer)

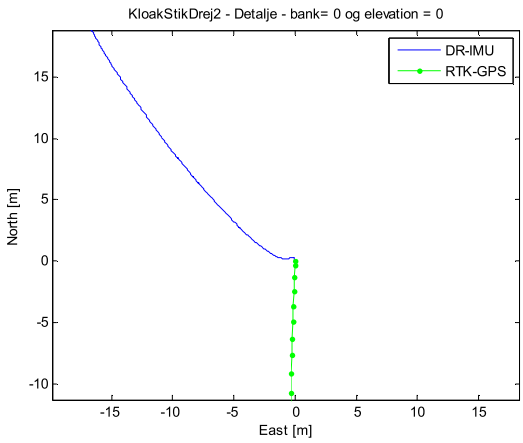
Bank og elevation

Bank og elevation er de vinkler, som korrigerer IMU målingerne i forhold til vandret inden positionsbestemmelsen foretages. Bank beskriver hvorledes IMU'en er roteret omkring X-aksen og elevation er rotationen omkring Y-aksen. Er disse ikke korrekt bestemt indledningsvist, er det forventningen, at positioneringen har det forkerte udgangspunkt, og IMU'en vil derfor være roteret og dermed ikke korrigeret til vandret, som den skal. Dette bør give forkerte resultater i positionsbestemmelsen. For at vise denne påstand, gennemføres en test af bank og elevations indflydelse på målingen. I Figur 8.6 kan positioneringen af *KloakStikDrej2*, foretaget med korrekt elevation og bank, ses til venstre. Til højre ses positionering af *KloakStikDrej2*, med bank og elevation som nul. Heading er i begge tilfælde den kalibrerede kurs fra kompasset. Til hver positionering er der benyttet de samme kalibreringsdata med korrekt bank og elevation.



Figur 8.6: Forskel i positioneringen af DR-IMU med hhv. korrekt bank og elevation og med bank og elevation lig nul til højre. (Forskel i skala på de viste grafer)

Ændringen af bank og elevation i Figur 8.6 betyder, at DR-IMU til højre er positioneret forkert, idet der er korrigeret forkert til vandret. Man kan i princippet sige, at IMU'en korrigeres til et 'forkert' koordinatsystem, som ikke er LL systemet, men visualiseres i forhold til det 'rigtige' koordinatsystem, dvs. det koordinatsystem, hvor RTK-GPS anses som den 'sande' positionering. Ud fra Figur 8.7, som er et detaljeudsnit af positioneringen, hvor bank og elevation er lig nul, kan det ses, at ændringen betyder, at positioneringen sker i en modsat retning, hvorfor headings betydning ikke er stor, og det er dermed bank og elevation, som er meget afgørende for de endelige resultater af positioneringen.



Figur 8.7: Detalje udsnit fra starten af DR-IMU med bank og elevation lig nul.

Vurdering – bank, elevation og heading

Ud fra ovenstående undersøgelser kan det vurderes, at bank, elevation og heading, som forventet, er vigtige for, at DR-IMU kan fungere. Heading er vigtig i forhold til at positioneringen indledningsvis foretages i den rigtige retning. Bank og elevation benyttes til at oprette positioneringen til vandret og disse skal måles med høj nøjagtighed, jf. afsnit 6.2.3, da de har stor indflydelse på den senere positionering. Ud fra figurerne kan det dog ses, at DR-IMU driver over tid. Dette skyldes, at der sker en betydelig fejlophobning, specielt i gyroerne, så rotationsmatricen ikke bestemmes korrekt.

Tid

Et af problemerne ved positionering med DR-IMU, er at IMU'en driver, dvs. der påføres og ophobes fejl på målingerne, hvilket resulterer i dårlige resultater i positioneringen over tid. I IMU'en er det specielt fejlophobningen på gyroerne, der har stor betydning. Jf. Bilag C er tiden der positioneres over vigtig, idet fejlene stiger med tiden i tredje. Derfor undersøges det her, hvilken indflydelse tiden har på målingerne, herunder hvor lang tid, der kan måles før målingerne ikke længere er anvendelige til positionering. Derudover ses der på, om der er mulighed for at optimere positioneringen i forhold til tiden, så et tilfredsstillende resultat kan opnås over et længere tidsinterval.

Ved udførelsen af test er tre forskellige ruter kørt som både langsom og hurtig. I Tabel 8.3, kan de ruter, som er kørt både langsom og hurtig, samt den tid det har taget at køre ruten, længden og hastigheden ses.

Test	Langsom (sek.)	Hurtig (sek.)	Længde (m)	Hastighed(km/t)
KloakHoved1	180		100	2,0
KloakHoved2		82	100	4,4
KloakStik3	94		60	2,3
KloakStik32		50	60	4,3
KloakStik2	53		30	2,1
KloakStik22		37	30	2,9

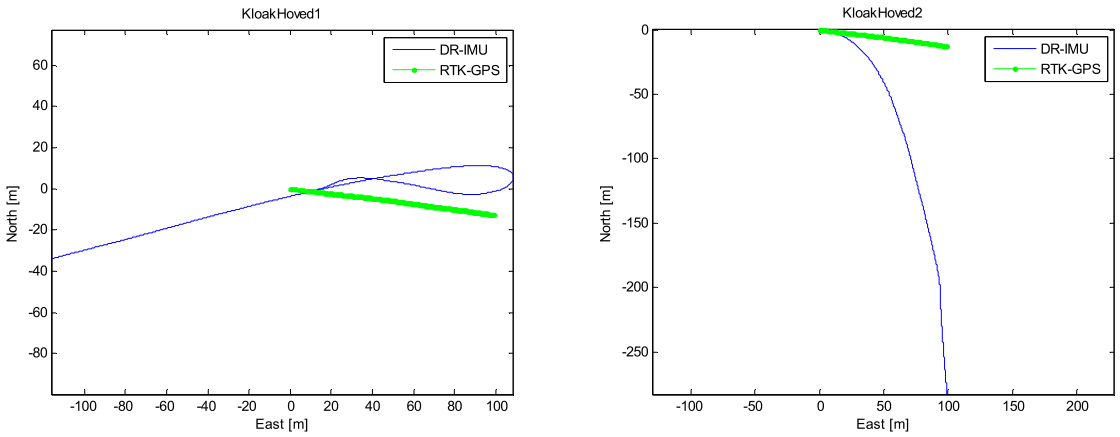
Tabel 8.3: Test udført langsomt og hurtigt samt tiden, længden og hastigheden af testene.

I tabellen kan det ses, at de hurtige målesessioner er udført med ca. dobbelt hastighed i forhold til de langsomme. For at vise hastighedens indflydelse på fejlene over tid, vises figurer med testene to og to, så forskellen kan ses, hvilket gør det muligt, at vurdere, om de langsomme målinger driver væk fra den sande rute, efter en kortere tilbagelagt afstand end de hurtige målinger. Derudover ses der på, om de langsomme test generelt driver længere væk, og dermed om de hurtige test har givet bedre resultater i positioneringen.

KloakHoved

På Figur 8.8 kan den langsomme test, *KloakHoved1*, ses til venstre og den hurtige, *KloakHoved2*, til højre. I begge test driver DR-IMU væk fra RTK-GPS efter omkring 10 meter, og i figuren til venstre driver DR-IMU omkring 300 meter. I den hurtige, til højre, driver DR-IMU omkring 275 meter. At *KloakHoved1* er drevet mere end *KloakHoved2* er også ventet, da testen har taget ca. dobbelt så lang tid.

I Tabel 8.4 kan afvigelserne de første 13 sekunder mellem DR-IMU og RTK-GPS ses. DR-IMU er drevet ca. 0,5 meter efter omkring 10 sekunder for *KloakHoved1* og omkring 11 sekunder for *Kloakhoved2*.



Figur 8.8: Forskel i den langsomme testkørsel af *KloakHoved1* til venstre, og den hurtige, *KloakHoved2*, til højre. (Forskel i skala på de viste grafer)

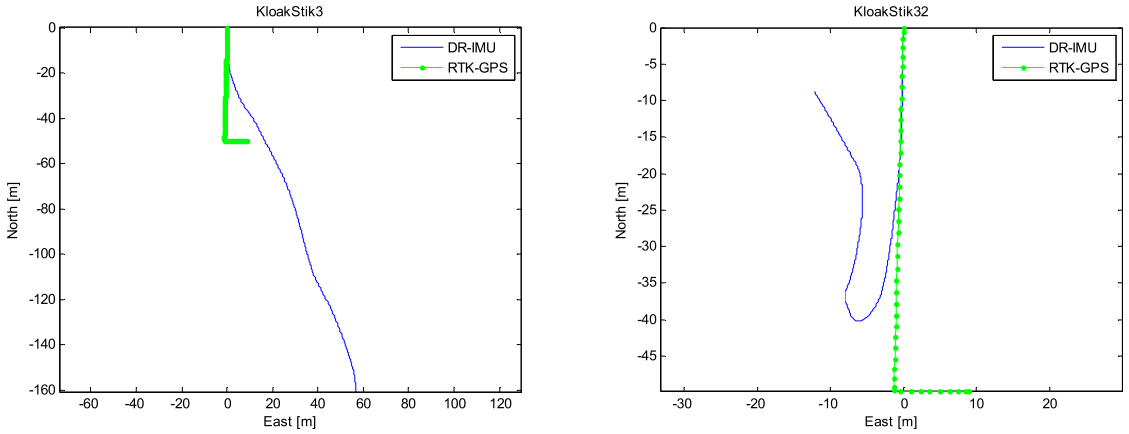
KloakHoved1 (langsom)		*KloakHoved2* (langsom)	
Tid (sek.)	**Afvigelse (m)**	**Tid (sek.)**	**Afvigelse (m)**
0,4	0,00	0,5	0,00
1,4	0,01	1,5	0,00
2,5	0,06	2,5	0,03
3,4	0,01	3,5	0,04
4,4	0,06	4,4	0,05
5,4	0,12	5,5	0,04
6,4	0,17	6,5	0,04
7,4	0,23	7,5	0,12
8,4	0,25	8,5	0,20
9,4	0,45	9,6	0,28
10,4	0,56	10,6	0,43
11,4	0,73	11,5	0,63
12,4	0,90	12,4	0,82
13,4	1,07	13,5	1,06

Tabel 8.4: Afvigelse for DR-IMU i forhold til RTK-GPS for hhv. *KloakHoved1* og *KloakHoved2*.

KloakStik3 - 32

På Figur 8.9 kan den langsomme test, *KloakStik3*, ses til venstre og den hurtige test, *KloakStik32*, til højre. I den langsomme test, driver DR-IMU ca. 160 meter. Her kan det samtidig ses, at DR-IMU i den hurtige test ikke driver så meget, og stopper efter ca. den samme afstand som RTK-GPS, dvs. efter ca. 60 meter.

I Tabel 8.5 kan afvigelserne mellem DR-IMU og RTK-GPS ses indtil 13 sekunder. DR-IMU i den langsomme test er drevet ca. 0,5 meter fra RTK-GPS efter omkring 9 sekunder. I den hurtige test, er DR-IMU drevet de ca. 0,5 meter efter omkring 5 sekunder. Dette betyder ligeledes, at påstanden omkring tiden, som en vigtig faktor for nøjagtigheden, det er muligt at opnå, er sand.



Figur 8.9: Forskel i den langsomme testkørsel af *KloakStik3* til venstre, og den hurtige, *KloakStik32*, til højre. (Forskel i skala på de viste grafer)

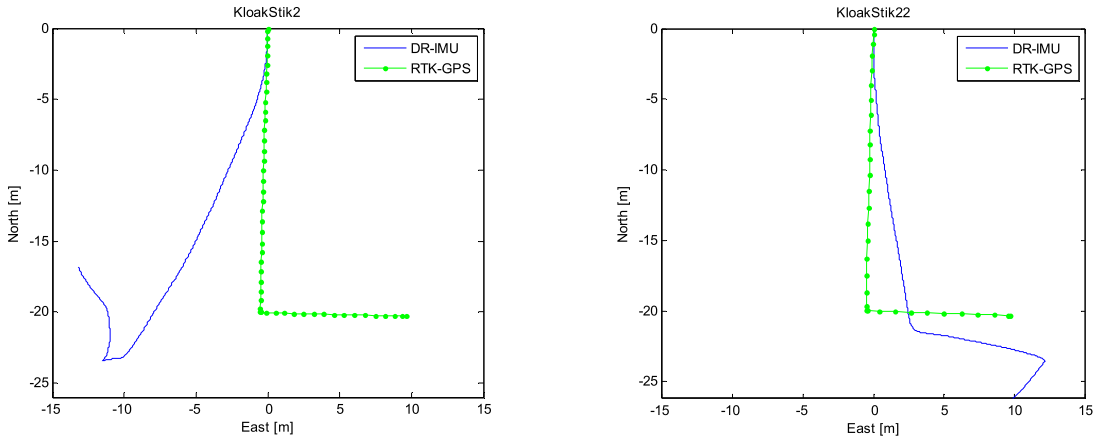
KloakStik3 (langsom)		*KloakStik32* (hurtig)	
Tid (sek.)	Afvigelse (m)	Tid (sek.)	Afvigelse (m)
0,2	0,00	0,8	0,00
1,2	0,00	1,8	0,05
2,1	0,01	2,9	0,15
3,1	0,05	3,8	0,25
4,1	0,08	4,8	0,44
5,1	0,16	5,8	0,57
6,1	0,22	6,8	0,77
7,1	0,32	7,8	0,86
8,1	0,47	8,8	1,09
9,1	0,54	9,8	1,38
10,1	0,65	10,9	1,68
11,1	0,83	11,8	1,85
12,1	0,97	12,8	2,02
13,1	1,23	13,9	2,33

Tabel 8.5: Afvigelse for DR-IMU i forhold til RTK-GPS for hhv. *KloakStik3* og *KloakStik32*.

KloakStik2 - 22

På Figur 8.10 kan den langsomme test, *KloakStik2*, ses til venstre og den hurtige test, *KloakStik22*, til højre. Ingen af testene driver lige så meget som i det foregående, men det kan dog ses, at positionsbestemmelsen for den langsomme driver mere end den hurtige test.

I Tabel 8.6 kan afvigelserne mellem DR-IMU og RTK-GPS ses indtil 13 sekunder. DR-IMU i den langsomme test er drevet ca. 0,5 meter fra RTK-GPS efter omkring 9 sekunder. I den hurtige test, er DR-IMU drevet de ca. 0,5 meter efter omkring 7 sekunder. Dermed kan det igen ses at IMU'en driver hurtigt over tid.

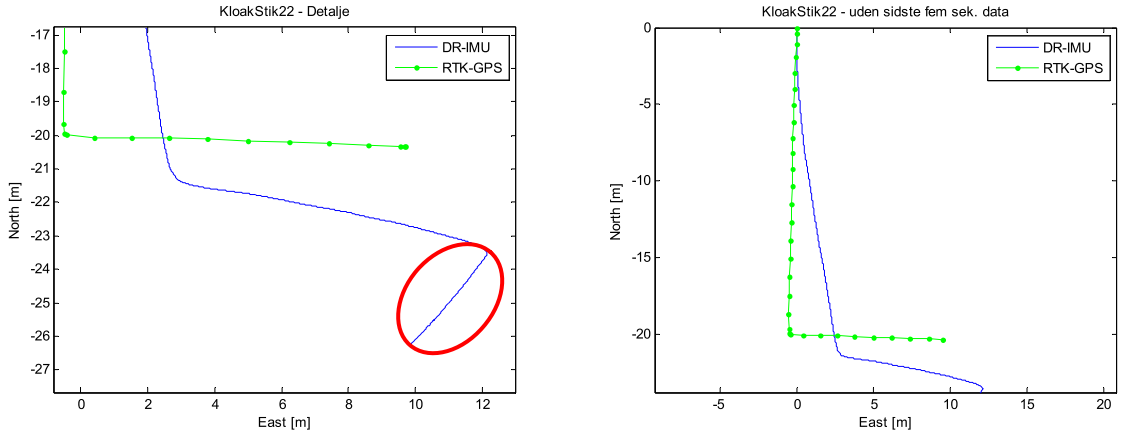


Figur 8.10: Forskel i den langsomme testkørsel af *KloakStik2* til venstre, og den hurtige, *KloakStik22*, til højre.

KloakStik2 (langsom)		*KloakStik22* (hurtig)	
Tid (sek.)	**Afvigelse (m)**	**Tid (sek.)**	**Afvigelse (m)**
0,3	0,00	0,4	0,00
1,2	0,01	1,3	0,02
2,3	0,03	2,3	0,05
3,2	0,05	3,3	0,13
4,3	0,08	4,3	0,19
5,3	0,15	5,4	0,33
6,3	0,20	6,3	0,43
7,2	0,26	7,3	0,51
8,2	0,40	8,4	0,72
9,2	0,60	9,3	0,80
10,2	0,78	10,3	1,02
11,2	1,01	11,3	1,25
12,2	1,29	12,3	1,44
13,3	1,61	13,3	1,64

Tabel 8.6: Afvigelse for DR-IMU i forhold til RTK-GPS for hhv. *KloakStik2* og *KloakStik22*.

Ses der på *KloakStik22* i Figur 8.10, så har den taget 37 sekunder og vurderes der isoleret på DR-IMU, dvs. uden RTK-GPS, så vil det være muligt, at få et visuelt indtryk af den rute som er kørt, dog er der en lille afvigelse til sidst, hvor DR-IMU er drevet i en modsat retning. Dette kan skyldes at køretøjet holder stille. Vurderes koordinaterne fra RTK-GPS, så flytter køretøjet sig omkring 0,01 meter i de sidste seks sekunder. Dette betyder sandsynligvis, at der er samlet data mens køretøjet står stille. Dermed vil IMU også have samlet data mens køretøjet har stået stille. Står IMU'en stille og samler data, vil der blive foretaget positionering idet IMU'en driver og DR-IMU vil dermed blive behæftet med unødvendige fejl. For at undersøge dette foretages en positionering af DR-IMU og RTK-GPS, hvor de sidste fem sekunders data fjernes. I Figur 8.11 er et udsnit af *KloakStik22* vist til venstre. Her er de sidste fem sekunders data fra DR-IMU visualiseret i den røde cirkel. Positioneringen af RTK-GPS og DR-IMU uden de sidste fem sekunders data, kan ses i højre del af Figur 8.11. Her skal det bemærkes, at det sidste sving nu er fjernet, og det reelt set er dette, der er den endelige positionering af DR-IMU. Dette betyder, at det ligeledes er sandsynligt at flere af de andre test har fået påført yderligere fejl ved, at dataindsamlingen ikke stoppes nøjagtig samme tid, som køretøjet holder stille. Dette eksempel viser ligeledes, hvordan IMU'en driver over tid, hvor den ellers skulle stå stille. For at vurdere den faktiske størrelse på, hvor meget IMU'en har drevet ved at stå stille og hvilken betydning det har for nøjagtigheden, vurderes der på afstanden mellem endepunkterne mellem RTK-GPS og DR-IMU, jf. Tabel 8.7. Ud fra tabellen kan det ses, at den driver godt 1,5 meter ved at stå stille.



Figur 8.11: Udsnit af *KloakStik22*, til venstre, samt *KloakStik22* uden de sidste fem sekunders data, til højre.

	Med alt data (m)	Uden sidste fem sekunder (m)
Afstand ml. slutpunkter	5,9	4,2

Tabel 8.7: Afstand mellem slutpunkter, hhv. med og uden sidste fem sekunders data.

Vurdering – tid

Ud fra testene ser det ud til, at der går ca. 10 sekunder, før driften i IMU'en betyder, at nøjagtighedskravet på en halv meter er overskredet. I testene *KloakStik32* og *KloakStik22* er nøjagtighedskravet dog overskredet efter hhv. 5 og 7 sekunder. Derfor kan det ikke vurderes, at IMU'en systematisk driver væk efter et fast tidsinterval, men det kan konstateres, at den driver og at den driver mere og mere over tid. Dermed kan der i princippet kun stoles på målingerne i løbet af de første 5-10 sekunder, hvorefter afvigelserne overskrider 0,5 meter, hvorefter observationerne skal rettes op igen.

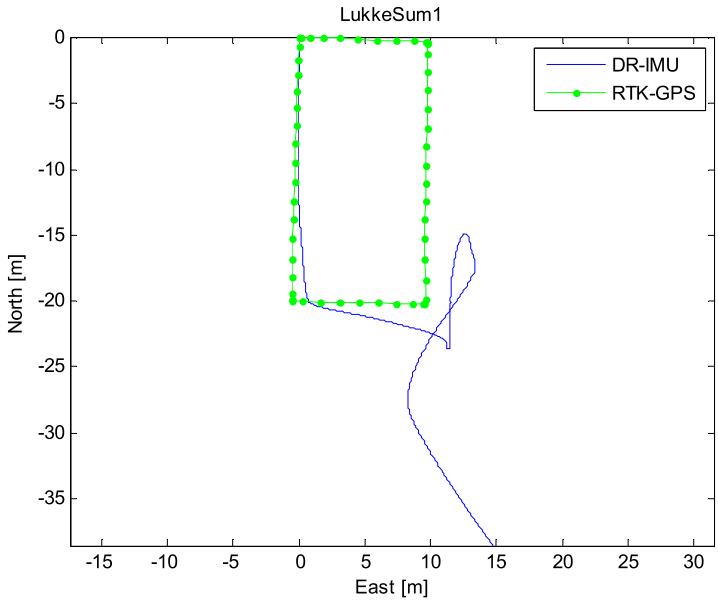
Ud fra testene kan det tyde på at bank og elevation har stor betydning for, at der opnås høj nøjagtighed i starten, hvorefter der ophobes fejl på sensorerne over tid. Denne ophobning af fejl betyder, at målingerne ikke bliver korrigeret til vandret, og positionen. En løsning kunne være at få målt bank og elevation, f.eks. hvert femte sekund, for at korrigere målingerne korrekt til vandret. Dette kunne gøres ved at montere inklinometre på IMU'en, som hele tiden måler bank og elevation, så der kan foretages en korrekt korrektion til vandret, ligesom der gøres inden opstarten af hver måling. Dette betyder, at rotationsmatricerne skal genberegnes hver gang der kommer nye bank og elevation værdier fra inklinometrene. Dette undersøges nærmere i afsnit 8.4.

I testene *KloakStik3* og *KloakStik32* er den langsomme test drevet meget og denne test har taget 94 sekunder. Derimod har den hurtige test taget 50 sekunder, og er ikke drevet i samme størrelsesorden. Det er det samme billede, som viser sig i testene af *KloakStik2* og *KloakStik22*, hvor testene har taget hhv. 53 og 37 sekunder. Dette kan dermed betyde, at der sker noget efter omkring et minut, hvor fejlene på sensorerne begynder at få meget stor betydning.

Drejning

For at NS-1002 kan benyttes i f.eks. rørsystemer er det vigtigt, at drejninger kan foretages med tilfredsstillende nøjagtighed. Det kan dog bl.a. fra det ovenstående ses, at DR-IMU ikke vil have tilfredsstillende nøjagtighed, når drejningen først foretages efter et bestemt tidspunkt, hvor der er opbygget så mange fejl i IMU'en, at positioneringen ikke er anvendelig.

Dette er særligt tydeligt i testen af *LukkeSum1*, der illustreres i Figur 8.12. DR-IMU følger RTK-GPS i starten, hvorefter den begynder at drive, og det er kort efter sving to, vanskeligt visuelt at sammenligne DR-IMU med RTK-GPS. For at der kan vurderes på drejninger, skal det være drejninger der er foretaget inden for de første 10-15 sekunder hvor nøjagtighederne er Da ingen af de udførte test indeholder en drejning foretaget inden for de første 10 sekunder, er det derfor ikke muligt, at sige noget konkret om, hvor godt IMU'en kan foretage drejninger. Dette må derfor gøres i en eventuel opfølgende test.



Figur 8.12: Testen *LukkeSum1*.

8.3 DR-AK

Formålet med dette afsnit er, at analysere og konkludere på resultaterne af de udførte forsøg med NS-1002, mere konkret på positioneringen af DR-AK. Der ses i afsnittet på resultaterne fra DR-AK og disse sammenlignes med målingerne fra GPS'en, for at kunne se afvigelsen fra den 'sande' position. Afsnittet skal sætte projektgruppen i stand til, at optimere DR-AK systemet, for derigennem at kunne opnå en mere nøjagtig endelig position.

I underafsnit 8.3.1 ses på effekten af kalibreringen og det afklares, om kalibreringen har haft en positiv eller negativ effekt. I underafsnit 8.3.2 ses på forskellige faktorers indflydelse på positionsbestemmelsen og det fastslås, hvad årsagen til indflydelsen er og hvad der kan gøres, for at mindske denne indflydelse.

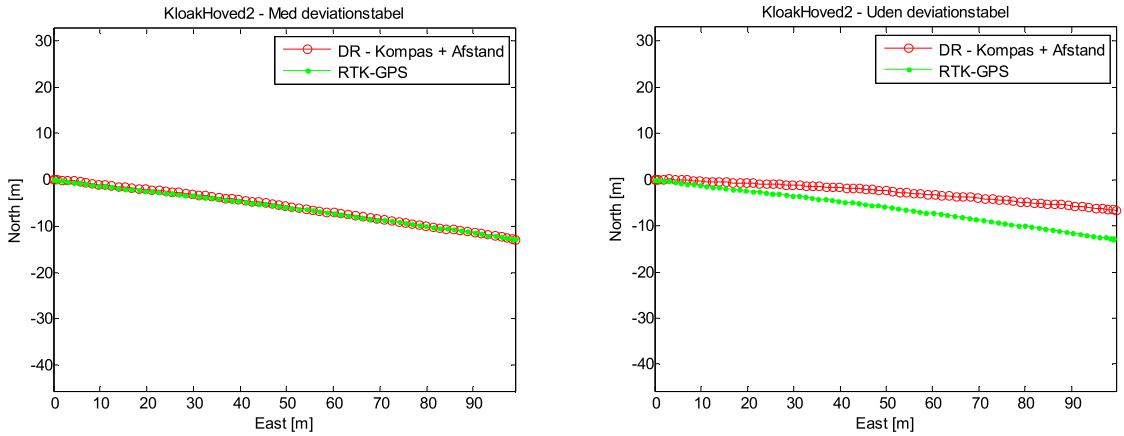
Følgende parametre bliver behandlet nærmere under hhv. kalibrering og positionering:

- Kalibrering
    - Deviationstabel
- Positionering
    - Drejninger
    - Afstandsberegningen
    - Tid og afstand

8.3.1 Kalibrering

Udover den manuelle kalibrering af kompasset er der, som nævnt tidligere, lavet en deviationstabel, der korrigerer kursen fra kompasset yderligere, så kursen fås i KP2000J, samt er kalibreret for lokale magnetfelter.

For at vise effekten af anvendelsen af deviationstabellen vises nedenfor plot af positionsbestemmelse af en testkørsel, beregnet hhv. med og uden deviationstabellen. Figur 8.13 viser testkørslen *KloakHoved2,* der jf. afsnit 8.1 er et 100 meter stræk mod øst.



Figur 8.13: Positionering med DR-AK, med og uden deviationstabel.

Det ses tydeligt af Figur 8.13, at deviationstabellen har haft en væsentlig effekt. Når deviationstabellen anvendes, følger de beregnede positioner, positionerne fra RTK-GPS, men når der ikke anvendes deviationstabel, begynder positionerne fra DR-AK hurtigt at bevæge sig væk fra RTK-GPS positionerne. Idet det er de samme data, der er anvendt i de to beregninger, vil eventuelle fejl fra opmålingen påvirke positioneringen i lige stor grad. Det kan derfor slås fast, at det udelukkende er anvendelsen af deviationstabellen, og dermed forbedringen af kursen, der er årsag til forbedringen af positionerne. Hvis der foretages en beregning af afstanden mellem slutpunkterne fra hhv. RTK-GPS og DR-AK, fås følgende:

	Med deviationstabel	**Uden deviationstabel**
Afstand ml. slutpunkter:	0,163 meter	6,188 meter

Tabel 8.8: Afstanden mellem slutpunkterne fra RTK-GPS og DR-AK.

Tabel 8.8 giver samme billede som Figur 8.13, at der opnås en væsentlig forbedring af slutpositionen ved anvendelse af deviationstabellen.

Størrelsen af forbedringen afhænger selvfølgelig af, hvilke forhold der ligger til grund for positioneringen. I ovenstående eksempel er testkørslen foretaget i en retning, der ifølge deviationstabellen, se afsnit 6.3.1, skal korrigeres med ca. 3,5°. Jo længere der køres i denne retning, jo større vil afvigelsen mellem slutkoordinaterne blive, hvis der ikke anvendes en deviationstabel. Hvis der køres i en retning, hvor der ikke skal korrigeres ret meget, vil der ikke opnås samme store forbedring, men deviationstabellen vil stadig medvirke til at korrigere den observerede kurs.

Overordnet må det siges, at anvendelsen af deviationstabellen har stor betydning for den nøjagtighed, der kan opnås på positionerne fra DR-AK. Det vurderes derfor, at implementeringen af deviationstabellen i beregningerne har haft den ønskede effekt og medvirker til at sikre gode resultater.

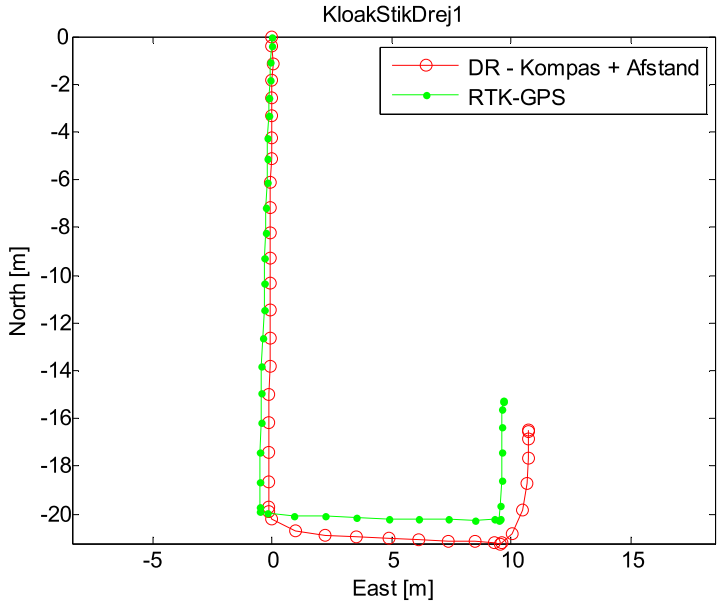
8.3.2 Positionering

Positionsbestemmelsen ved hjælp af DR-AK, sker udelukkende på baggrund af observationer af en kurs og en beregnet afstand. Det vil derfor kun være faktorer, der kan påvirke disse observationer, der i sidste ende kan påvirke de endelige positioner. Der ses derfor på, hvordan drejninger, afstandsberegningen og tid og tilbagelagt afstand påvirker positionsbestemmelsen.

Drejninger

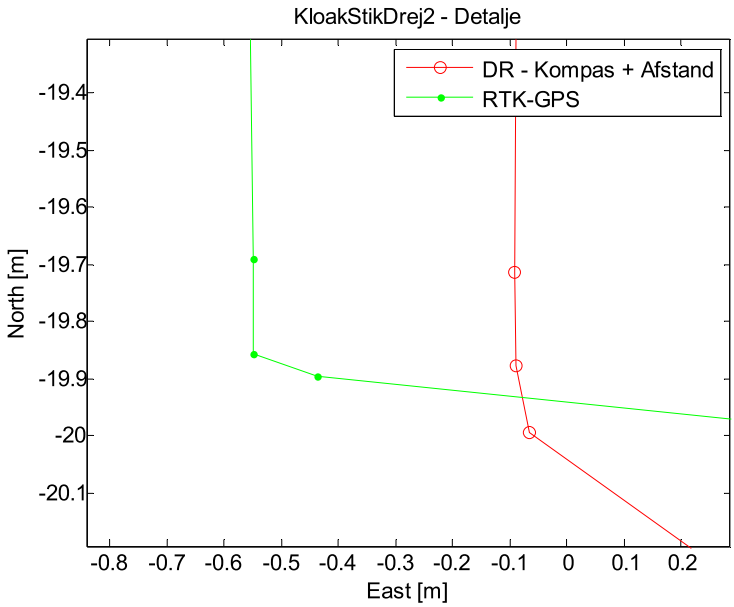
Der er i kalibreringen taget højde for, hvordan magnetfelter påvirker målingerne og disse burde derfor ikke have indflydelse.

Figur 8.14 viser en testkørsel, hvor der er foretaget to drejninger. Det ses af figuren, at positionerne fra DR-AK følger referencekoordinaterne fra RTK-GPS, indtil den første drejning. I drejningen bestemmes tilsyneladende en forkert kurs, men efter et par meter er kursen rettet op, så positionerne igen forløber parallelt med GPS koordinaterne. Ved næste drejning gentager dette sig.



Figur 8.14: Testkørsel med to drejninger.

Denne tendens kan tyde på, at kompasset ikke er hurtig nok, i forhold til den hastighed drejningen er foretaget med. Denne teori understøttes af Figur 8.15, der viser et udsnit af første sving i forrige figur. Da afstandene, der anvendes i positioneringen med DR-AK, er beregnet som afstanden mellem de indsamlede RTK-GPS punkter, kan punkterne på figuren sammenlignes direkte. Det ses, at drejningen kun sker gradvist, men at den efterhånden bevæger sig i den rigtige retning. Dette bekræfter mistanken om, at kompasset ikke er hurtigt nok til at følge med drejningen. Dette skyldes sandsynligvis, at kompasset er udviklet til brug på en båd, der har et andet bevægelsesmønster end det testen er kørt med. En båd foretager ikke samme skarpe drejninger med samme hastighed som i testen.

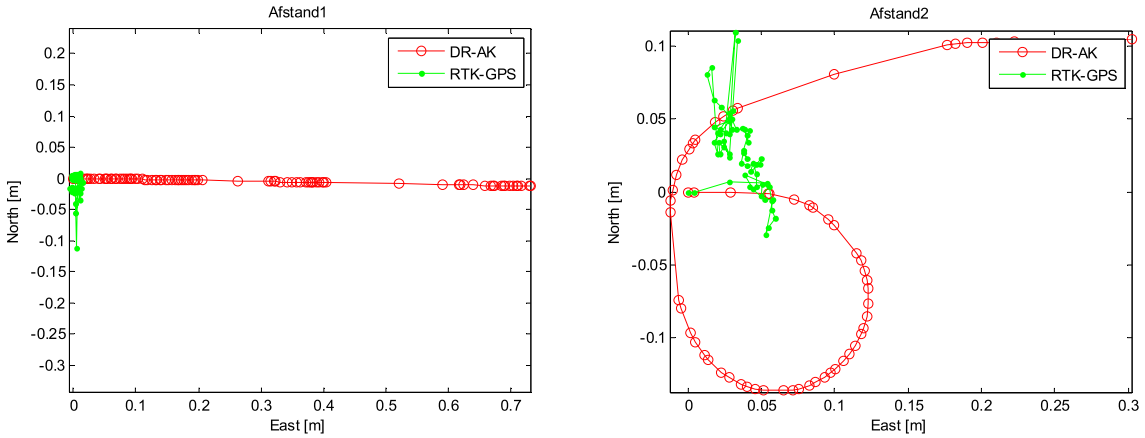


Figur 8.15: Detaljeudsnit af testkørsel *KloakStikDrej2*, første drejning.

Dette problem kan løses ved enten at anvende et kompas, der kan følge med drejningshastigheden, eller ved at foretage drejningerne i et langsommere tempo, hvilket muliggør, at kompasset kan stille sig ind på den rigtige kurs, inden kørslen fortsættes.
En del af forklaringen på fejlen ved drejning kan dog også findes i måden, hvorpå kursen bliver beregnet, som middel af ca. 10 observationer. Da kursen skifter gradvist, men bliver beregnet på baggrund af ti observationer, vil det i princippet kun være den sidste kurs, af de ti, der er korrekt. Kursen påføres således en lille fejl ved at tage middel af ti observationer. Problemet kan løses ved at ændre kursberegningen, så der ikke findes middel af ti observationer, men i stedet anvendes sidste aflæste kurs. Dette forudses dog at give en fejl i positionerne, når der køres lige stræk. På de lige stræk fås en bedre angivelse af kursen ved at finde middel af ti observationer, da der hele tiden sker små retningsændringer.

Afstandsberegningen

Hvis det vælges at optimere drejningerne ved at dreje i et langsommere tempo, fås imidlertid et problem i forhold til afstandsberegningen så længe der anvendes RTK-GPS til denne. De tilfældige fejl på GPS'en bevirker, at der hele tiden vil blive beregnet små afstande, der sammen med kompaskursen vil blive brugt til en positionsbestemmelse. Hvis køretøjet holder stille i samme punkt, vil dette derfor give en ny fejl i positionsbestemmelsen. Dette problem opstår, idet det ikke er muligt at registrere negative afstande i NS-1002. Problematikken er illustreret i Figur 8.16. Plottet til venstre viser en positionering, hvor køretøjet har stået stille. Det ses, at de små variationer i RTK-GPS bevirker, at der bliver beregnet en afstand, der sammen med kursen fra kompasset, sender positionerne fra DR-AK i kursens retning. Plottet til højre viser en positionering, hvor køretøjet har drejet om sin egen akse. Igen bevirker de små variationer i RTK-GPS, at der bliver beregnet små afstande og når kursen ændrer sig, bevæger positionerne fra DR-AK sig i en cirkel.

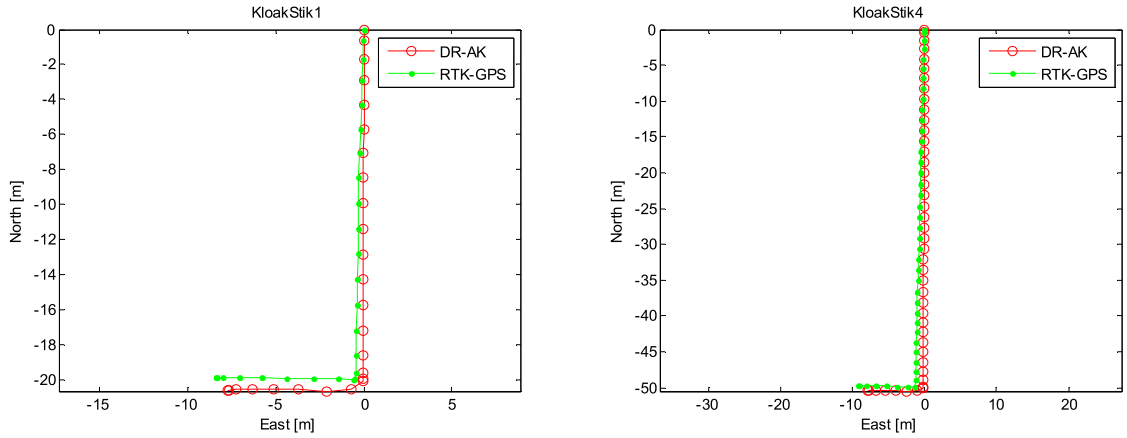


Figur 8.16: Viser fejlen fra afstandsberegningen, stillestående til venstre, drejning om egen akse til højre.

Dette problem kan løses ved at anvende et odometer til måling af afstanden, da dette kun måler afstande, når køretøjet reelt bevæger sig. Alternativt kan beregningen af afstanden modificeres, således, at der ses bort fra afstande, som ligger lige under den størrelse de tilfældige fejl kan give, f.eks. 5 cm. Denne modifikation kræver, at drejningerne foretages med stor omhu, så der ikke sker en lille flytning af GPS'en, der sammen med de tilfældige fejl giver en afstand over fem cm, hvilket igen vil påføre en fejl. Det må også kontrolleres, at der ikke slettes nogen afstande, som reelt skulle bruges.

Tid og afstand

For at undersøge, hvor stor indflydelse den tid og den afstand der positioneres over har på den opnåelige nøjagtighed, er der udført to testkørsler, der har samme bevægelsesretning, og drejninger til samme side. Eneste forskel er, at hovedkørslen i *KloakStik1* er på tyve meter, mens den i *KloakStik4* er på halvtreds meter. Disse kørsler er således meget ens i deres udførelse, men den sidste er udført over en længere afstand og har taget dobbelt så lang tid at køre. Umiddelbart ser det i Figur 8.17 ud til, at der ikke er stor forskel på afvigelserne mellem DR-AK og RTK-GPS i de to kørsler.



Figur 8.17: Positionering med DR-AK i hhv. kort og lang tid.

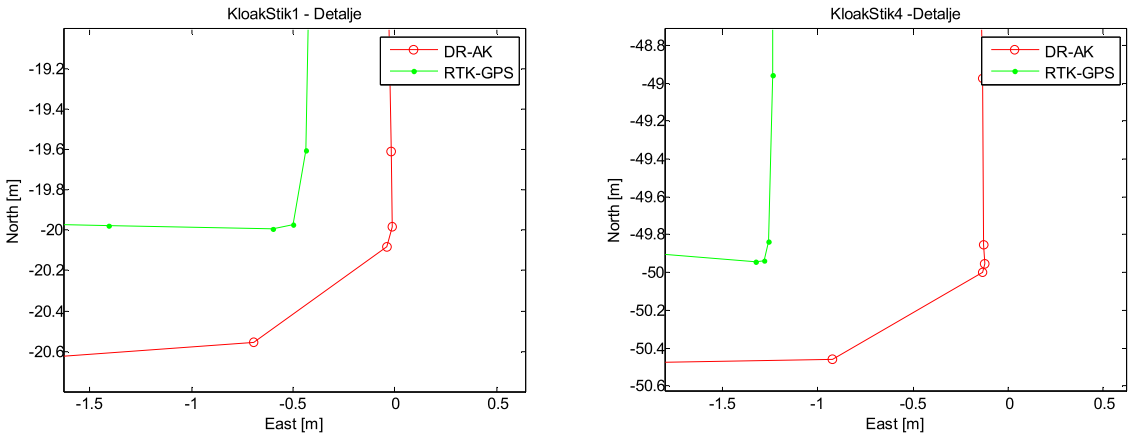
Der er derfor foretaget en beregning af forskellen mellem DR-AK og RTK-GPS koordinaterne. Afstandene kan ses i Tabel 8.9. Da begge kørsler er kørt på samme strækning, blot med et længere stræk på KloakStik4, forventes det, at afvigelserne vil være sammenlignelige i forhold til tiden. Det ses, at afvi-

gelserne er nogenlunde lige store i begge kørsler, indtil der er gået ca. 16 sekunder. På dette tidspunkt foretages drejningen i *KloakStik1*, hvilket bevirker, at afvigelserne bliver større i *KloakStik1* end i KloakStik4 i forhold til tiden. Det ses desuden, at der kun er knap en halv meters forskel mellem afvigelserne i slutkoordinaterne.

KloakStik1		***KloakStik4***	
Tid (sek.)	**Afvigelse (m)**	**Tid (sek.)**	**Afvigelse (m)**
1,4	0,003	1,3	0,000
4,4	0,1213	4,3	0,098
7,4	0,212	7,2	0,169
10,4	0,293	10,2	0,270
13,3	0,371	13,2	0,373
16,3	0,422	16,2	0,453
19,3	0,915	19,3	0,556
22,3	0,958	22,2	0,663
25,3	1,044	25,2	0,674
26,3	1,039	26,2	0,706
29,3	1,034	29,1	0,820
-	-	35,1	1,093
-	-	40,1	1,439
-	-	45,1	1,493
-	-	49,1	1,481

Tabel 8.9: Afvigelsen mellem DR-AK og RTK-GPS, i forhold til tiden.

En af årsagerne til forskellene i afvigelserne, kan delvist findes i de fejl, der kan opstå ved drejninger. Drejningerne er dog foretaget nogenlunde ens, se Figur 8.18, og det vurderes derfor, at slutkoordinaterne stadig kan sammenlignes direkte. Forskellen mellem afvigelserne vurderes derfor, at stamme delvist fra fejlene, der opstår ved drejning, men vurderes også at stamme fra almindelig fejlforplantning på de anvendte observationer.



Figur 8.18: Udsnit af drejningerne.

8.4 Kalman filtreringen

Formålet med dette afsnit er at analysere de tre filtreringsprincipper til filtrering af positioneringen fra hhv. DR-IMU og DR-AK. Derudover skal det forsøges at optimere det udvalgte filtreringsprincip gennem opdatering af filteret med ny bank og elevation.
I underafsnit 8.4.1 beskrives først, bestemmelsen af en række parametre, der er nødvendige for udførelsen af Kalman filteret. Herefter analyseres i underafsnit 8.4.2 de tre filtreringsprincipper, der blev beskrevet i afsnit 4.4, hvorefter det vurderes, hvilken metode der giver den bedste positionering ved brug af DR-IMU og DR-AK observationer. Det udvalgte filtreringsprincip undersøges nærmere i underafsnit 8.4.3, for at afdække, hvordan opdatering af bank og elevation, påvirker de filtrerede positioner.

8.4.1 Input til Kalman filteret

Dette underafsnit indeholder opstillingen af inputtet til Kalman filteret. Inputtet til Kalman filteret er væsentligt i forhold til afviklingen af filteret, da disse værdier er afgørende for et fornuftigt resultat. På baggrund af afsnit 4.4 og viden fra forudgående testberegninger i kapitel 6, opstilles de nødvendige input..

I afsnit 4.4 er modellerne, samt de nødvendige kovariansmatricer til Kalman filteret blevet beskrevet. Før Kalman filteret kan udføres tilfredsstillende kræves der fornuftige bestemmelser af de kovariansmatricer, der indgår i filteret. Den første kovariansmatrice der bestemmes, er kovariansmatricen for observationerne, Ligning F.18, der indeholder varianser og kovarianser til koordinaterne fra DR-IMU og koordinaterne fra DR-AK i NS-1002. Efterfølgende bestemmes kovariansmatricen for accelerationerne, Ligning 8.5.

DR-IMU kovariansmatricer

I underafsnit 6.2.2 er der udviklet to polynomier, der beskriver varianserne til koordinaterne fra IMU'en. Beregningen af variansen for E-koordinaten kaldes i det følgende for $\mathrm{Poly_E}$ og beregningen af variansen for N-koordinaten kaldes $\mathrm{Poly_N}$. Disse polynomier skal derfor anvendes på de tilhørende pladser i kovariansmatricen for observationerne. I denne forbindelse bliver kovarianserne for koordinaterne fra IMU'en sat til nul.

DR-AK kovariansmatricer

Varianserne og kovarianserne for koordinaterne fra DR-AK beregnes ved hjælp af nøjagtigheden af de observationer, der ligger til grund for koordinatberegningen, jf. afsnit 6.3. Beregningen af DR-AK koordinater fremgår af Ligning 4.13 og 4.14 og når den generelle fejlforplantningslov anvendes på denne ligning kan kovariansmatricen udtrykkes, som det ses i Ligning 8.1: (Jensen 2005:67)

Kovariansmatrice for koordinaterne fra DR

$$\begin{bmatrix} \sigma_E^2 & \sigma_{EN} \\ \sigma_{NE} & \sigma_N^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sin^2(\alpha)\sigma_S^2 + S^2\, cos^2(\alpha)\sigma_\alpha^2 & ½\, sin(2\alpha)(\sigma_S^2 - S^2\sigma_\alpha^2) \\ ½\, sin(2\alpha)(\sigma_S^2 - S^2\sigma_\alpha^2) & cos^2(\alpha)\sigma_S^2 + S^2\, sin^2(\alpha)\sigma_\alpha^2 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

Hvor,

σ_S^2 er variansen på den beregnede afstand, tidligere beregnet til = 0,0001 meter

σ_α^2 er variansen på retningsvinklen, tidligere beregnet til = 1,6 grader

S er afstanden tilbagelagt siden forrige DR-AK position i meter.

α er den beregnede middelvinkel, siden forrige DR-AK position i grader.

Kovariansmatrice for observationerne

Ovenstående resulterer i nedenstående kovariansmatrice for observationerne som input til Kalman filteret. NS-1002 bygger på DR, der karakteriseres som et blindt polygontræk, hvor der løbende sker en fejlophobning. For korrekt anvendelse af kovariansmatricen for observationerne er det derfor vigtigt at nøjagtigheden af forrige position inddrages sammen med kovariansmatricen for den nye observation under filtreringen.

Kovariansmatrice for observationerne

$$\sum_{e_k} = \begin{bmatrix} \mathrm{Poly_E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{Poly_N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & sin^2(\alpha)\sigma_S^2 + S^2\, cos^2(\alpha)\sigma_\alpha^2 & ½\, sin(2\alpha)(\sigma_S^2 - S^2\sigma_\alpha^2) \\ 0 & 0 & ½\, sin(2\alpha)(\sigma_S^2 - S^2\sigma_\alpha^2) & cos^2(\alpha)\sigma_S^2 + S^2\, sin^2(\alpha)\sigma_\alpha^2 \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

Kovariansmatrice for accelerationerne

Tilbage mangler bestemmelsen af kovariansmatricen for accelerationerne, se Ligning 4.19. Kovariansmatricen bestemmes på baggrund af beregnede middelaccelerationer mellem to på hinanden følgende RTK-GPS positioner, jf. Ligning 8.3 (Elvekjær, F., 2002:357-362). For hver af de 11 udførte test beregnes efterfølgende en spredning på accelerationen for hele den udførte test, i E- og N-aksernes retning, se Ligning 8.4. Gennemsnittet af varianserne på accelerationen for de 11 udførte test, anvendes herefter som et generelt repræsentativt bud på kovariansmatricen for accelerationerne for alle 11 udførte test, se Ligning 8.5. De udførte beregninger og resultatet af dem fremgår af Bilag CD.09.03.

Middelacceleration

$$\bar{v}_n = \frac{RTKGPS_n - RTKGPS_{n-1}}{dt}$$

$$\bar{a}_n = \frac{\bar{v}_n}{dt} \quad (8.3)$$

$$\bar{a} = \frac{\sum \sigma^2_{\bar{a}_{\text{test}}}}{t} \quad (8.4)$$

Hvor,
$\bar{v}_n$ er middelhastigheden mellem to RTK-GPS positioner (m/s).
$\bar{a}_n$ er middelaccelerationen mellem to RTK-GPS positioner (m/s^2).
dt er tidsdifferencen mellem de observatioenn af de to RTK-GPS i sekunder, $dt = Tid_n - Tid_{n-1}$.
$\sigma^2_{\bar{a}_{\text{test}}} = \frac{\sum(\bar{a}_n)}{n-u}$, hvor u = 2, da der skal findes varianser i både E og N akseretninger.
t er antal test hvor der er fundet en varians på accelerationen. Dvs. $t = 11$.

Kovariansmatrice for accelerationerne

$$\sum_w = \begin{bmatrix} 0{,}469^2 & 0 \\ 0 & 0{,}596^2 \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

Der er stor forskel i på den beregnede varians for accelerationen mellem de 11 test, hvilket også afspejles i Ligning 8.5. Dette kan forklares ved forskellen i bevægelsesmønsteret mellem de 11 test. Eksempelvis er variansen på accelerationen lav for *KloakHoved1* og *KloakHoved2*, da disse ruter er 100 m strækninger uden knæk, mens f.eks. ruterne i *KloakStikDrej1* og *KloakStikDrej2* er kortere og samtidig omfatter stop i to positioner for at udføre kursændring. Variansen på accelerationen er derfor større end i *KloakHoved1* og *KloakHoved2* hvor der over en lang strækning er holdt en stabil hastighed.

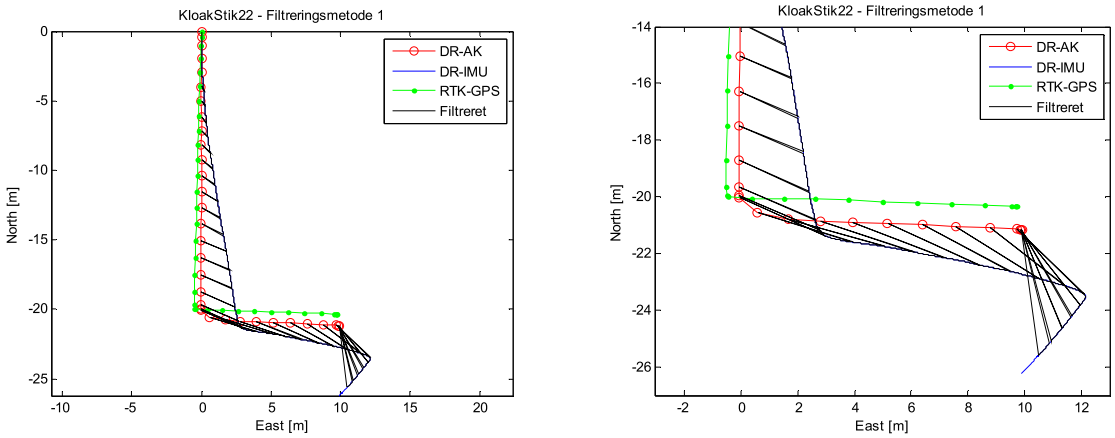
8.4.2 Analyse af filtreringsprincipper

Det indsamlede data kan anvendes i et Kalman filter efter forskellige principper. I underafsnit 4.4.2 er der beskrevet tre forskellige filtreringsmetoder som er vurderet egnet til en filtrering af det indsamlede data fra hhv. IMU'en, kompasset og GPS'en. Nedenfor vil den filtrerede positionsbestemmelse for hvert af de tre filtreringsprincipper blive analyseret, med henblik på at udvælge den mest nøjagtige af de tre metoder, til yderligere undersøgelser i underafsnit 8.4.3.

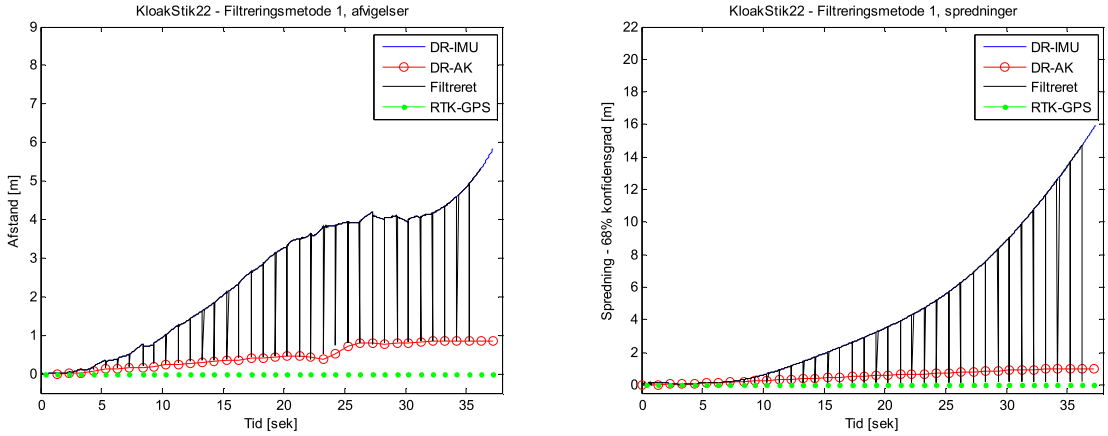
Filtreringsmetode 1

Figur 8.19 viser en filtreret rute ved brug af filtreringsmetode 1. Metoden resulterer i, at den filtrerede rute ligger sig tæt med den sande rute de første 5 sekunder, se Figur 8.20 venstre del. Derefter er de filtrerede positioner i høj grad påvirket af DR-IMU, når disse positioner, i perioder, alene indgår i filteret. Når der foreligger en position fra DR-AK, bevirker gain matricen i Kalman filteret (trin 3, Figur 4.5), at den filtrerede position fastlægges helt inde ved positionen fra DR-AK. Dette skyldes at spredningen på DR-IMU er højere end DR-AK positionen, der anvendes i filteret, hvorved DR-AK positionen vægtes højt.

Forskellen i nøjagtigheden af DR-IMU og DR-AK koordinater er afhængig af hhv. tilbagelagt afstand/tid. Spredningen på DR-IMU koordinaterne vokser hurtigt over tid, siden starten af målesessionen. Spredningen på DR-AK er derimod forholdsvis stabil grundet den primært er afhængig af den tilbagelagte afstand siden startpunktet, se Figur 8.20 højre del. Korrektionen af positionerne fra DR-IMU illustreres i Figur 8.19 som sorte streger, der springer ind til DR-AK positionerne, mens det i Figur 8.20 illustreres som de lodrette knæk på grafen, Filtreret.
De filtrerede positioner vender hurtigt tilbage til de, med tiden, dårligt bestemte DR-IMU positioner, når disse indgår alene i filteret, hvilket afspejles i afvigelserne mellem den filtrerede og sande rute, som relativt stor, til trods for korrektionerne ved hver DR-AK, se Figur 8.20 venstre del. Spredningen på de filtrerede positioner stiger tilsvarende, og afvigelsen på slut positionen er ca. 5 m, mens spredningen på koordinaten er ±15 m.



Figur 8.19: Filtrering af testkørsel *KloakStik22* med metode 1 til venstre, udsnit af samme filtrering til højre.

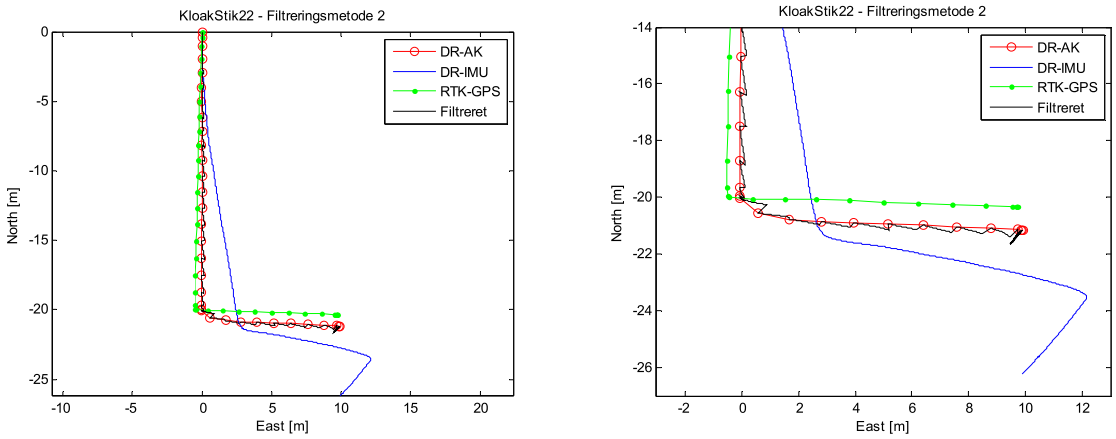


Figur 8.20: Til venstre – afvigelserne for *KloakStik22* positionsbestemmelsers til den sande rute ved metode 1. Til højre vises spredningen på de beregnede positioner.

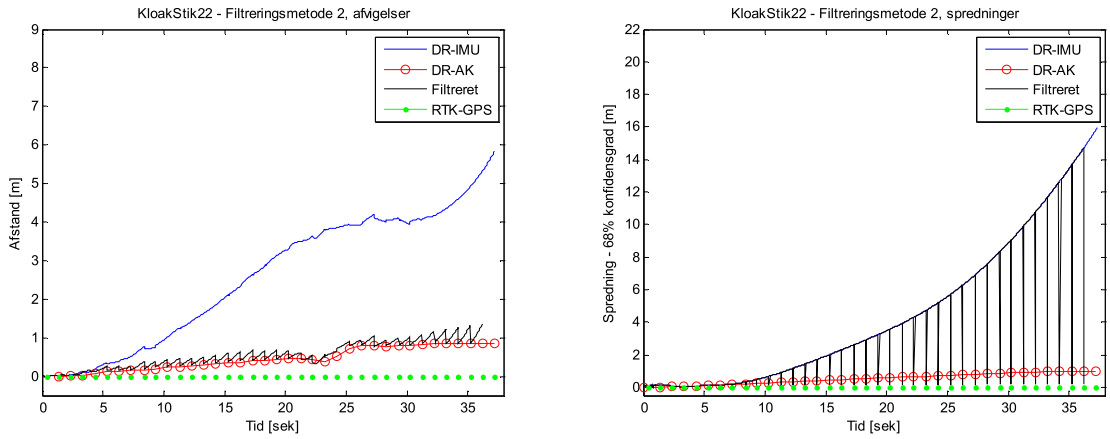
Filtreringsmetode 2

I Figur 8.21 ses effekten af at anvende filtreringsmetode 2 på det indsamlede data. Denne metode resulterer i, at den filtrerede position tilnærmelsesvis følger DR-AK ruten, se Figur 8.21, højre side. Dette var forventet, da den filtrerede position korrigeres, hver gang der foreligger en position fra DR-AK. Idet spredningen på DR-AK ikke udvikler sig med samme hastighed som DR-IMU, får DR-AK positionen en høj vægt i filteret, og den filtrerede position vil fastlægges tæt på DR-AK positionen. Når

den filtrerede position mellem DR-AK og DR-IMU er blevet korrigeret, bliver positionsbestemmelsen med DR-IMU fremover beregnet fra de rå indsamlede data, med udgangspunkt i seneste filtrerede position, hvor en DR-AK position indgik i filteret.
Positioner, filtreret alene på baggrund af IMU observationer, afviger ikke mere end 1 meter fra DR-AK ruten, men spredningen på disse filtrerede positioner er stadig styret af DR-IMU, jf. Figur 8.22. Dette skyldes igen den manglende opdatering af orienteringen, med nye værdier for bank, elevation og heading. Afvigelsen på slutpositionen er med metode 2, ca. 1,5 m fra den sande slutposition, mens spredningen på koordinaten stadig er ±15 m.



Figur 8.21: Filtrering af testkørsel *KloakStik22* med metode 2 til venstre, udsnit af samme filtrering til højre.

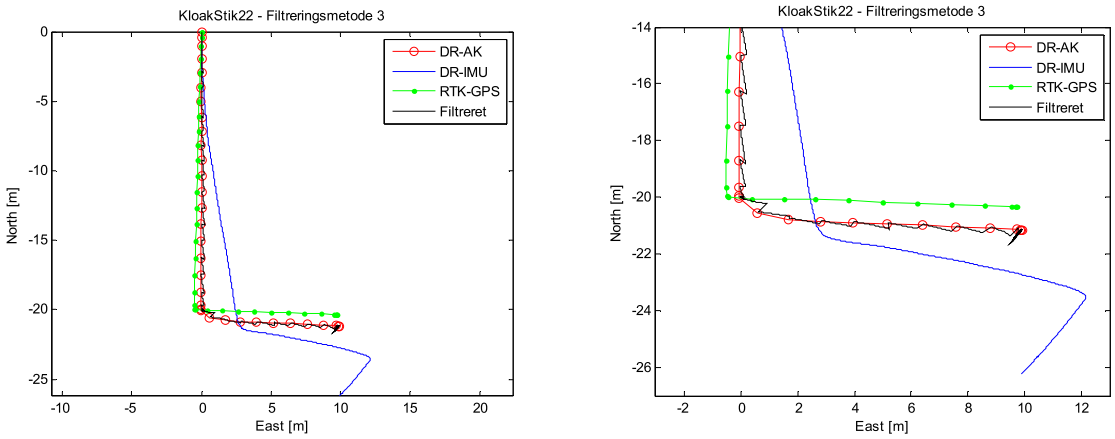


Figur 8.22: Til venstre – Afvigelserne for *KloakStik22* positionsbestemmelsers til den sande rute ved metode 2. Til højre vises spredningen på de beregnede positioner.

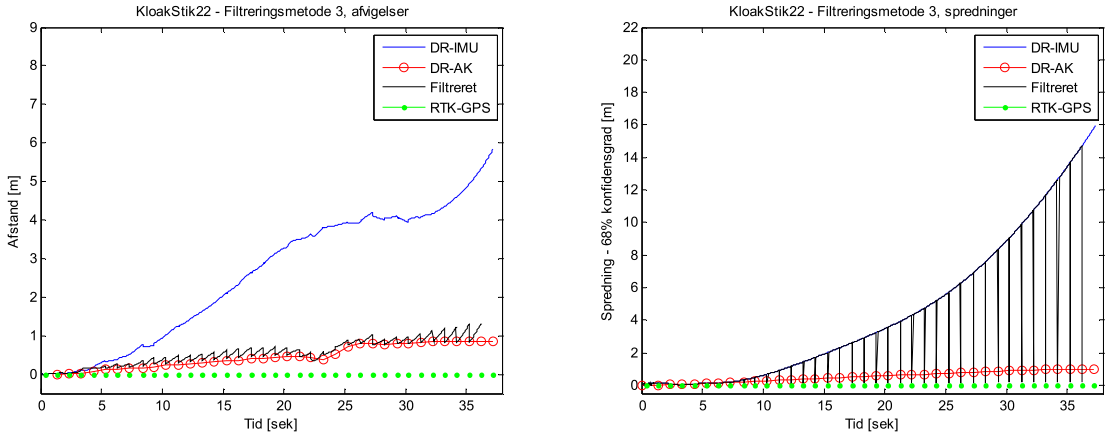
Filtreringsmetode 3

I Figur 8.23 ses effekten af at anvende filtreringsmetode 3 på det indsamlede data. Til trods for, at DR-AK observationerne nu også løbende tager udgangspunkt i det seneste filtrerede punkt hvor en DR-AK observation indgik, er der ikke nævneværdig forskel til den filtrerede rute fra metode 2. Det kunne ellers forventes, at den manglende orienteringsopdatering af IMU'ens rotationsmatrice, vil påvirke den filtrerede rute negativt.
Spredningen på IMU'ens observationer er stadig hastigt stigende med tiden, jf. Figur 8.24, hvorfor disse observationer vægtes lavt, når en DR-AK observation indgår i filteret. Afvigelsen på slutpositio-

nen er stadig ca. 1,5 m fra den sande slutposition, og spredningen på denne position er omkring 15 m.



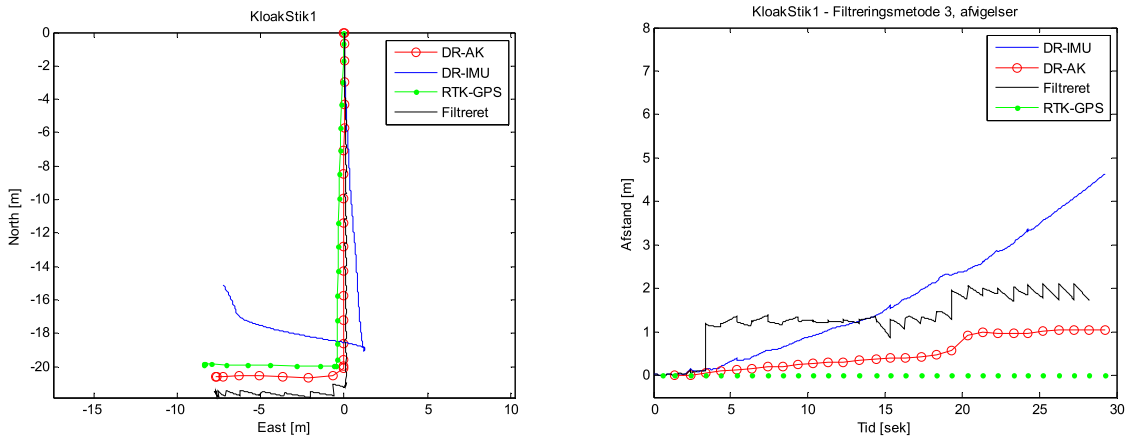
Figur 8.23: Filtrering af testkørsel *KloakStik22* med metode 3 til venstre, udsnit af samme filtrering til højre.



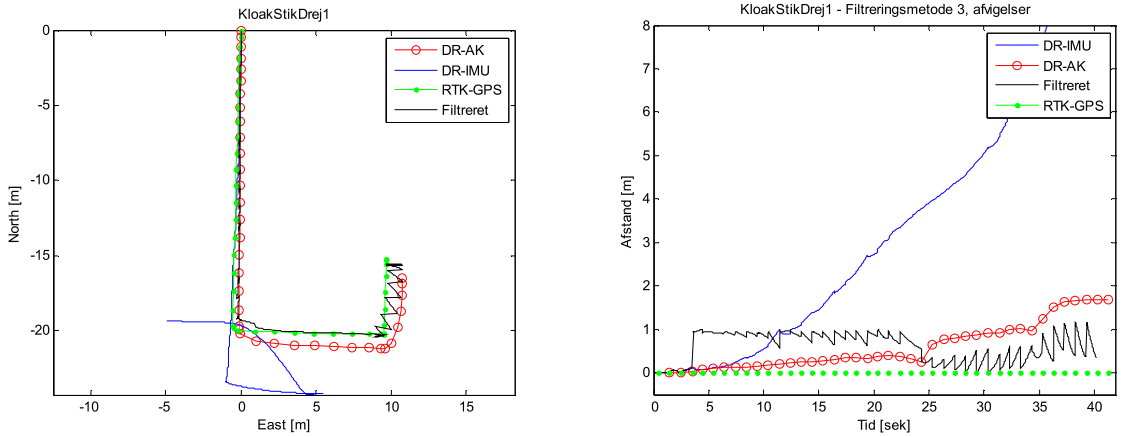
Figur 8.24: Til venstre – Afvigelserne for *KloakStik22* positionsbestemmelsers til den sande rute ved metode 3. Til højre vises spredningen på de beregnede positioner.

Brug af filtreringsmetode 3 på testene, *KloakStik1* og *KloakStikDrej1*, resulterer i en speciel positionsafvigelse efter ca. 4 sekunders måling, hvor afvigelsen stiger brat med ca. 1 m, men har derefter et parallelt forløb med observationerne fra DR-AK, jf. højre del i Figur 8.25 og Figur 8.26. En nærmere undersøgelse af observationerne, indsamlet ved det pågældende tidspunkt, indikerer ikke umiddelbart en årsag til den pludselige afvigelse til den sande rute.

Det har ikke været muligt at fastlægge årsagen til denne særlige afvigelse, men det undrer projektgruppen, hvorfor afvigelsen kun forekommer for de to nævnte test, mens de øvrige 9 tests, resulterer i en forholdsvis fornuftig filtreret rute, IMU observationernes spredning taget i betragtning.



Figur 8.25: Filtreringsmetode 3 benyttet på *KloakStik1*. Venstre: Positionsbestemmelsen. Højre: Afvigelserne fra positionsbestemmelserne til den sande rute.



Figur 8.26: Filtreringsmetode 3 benyttet på *KloakStikDrej1*. Venstre: Positionsbestemmelsen. Højre: Afvigelserne fra positionsbestemmelserne til den sande rute.

Valg af filtreringsmetode

I analysen af de tre filtreringsmetoder, er der anvendt de samme startparametre og spredning på observationerne. Analyserne af filtreringsmetoderne har vist, at valget af metode har stor indflydelse på, hvilken afvigelse der opnås fra den sande rute. Inden for de første 5 – 10 sekunder, hvor spredningen på IMU'en er under ±0,5 meter, opnås ikke nogen nævneværdig forskel i den filtrerede position mellem de tre filtreringsmetoder. Efter ca. 10 sekunder giver den filtrerede position fra metode 1, som ventet, en større afvigelse end de to øvrige metoder, da rotationsmatricen er påvirket af de tilfældige fejl, der især påvirker gyroerne i IMU'en. Rotationsmatricen bliver derfor gradvist dårligere, hvilket afspejler sig i nøjagtigheden af de filtrerede positioner, når der ikke er en observation fra DR-AK til rådighed. Efter de ca. 10 sekunder holder afvigelserne på de filtrerede positioner, fra de to øvrige metoder, sig til gengæld stadig tæt på de stabile DR-AK positioner på trods af den manglende opdatering af rotationsmatricen. Det er ud fra de udførte test, ikke muligt at fastlægge, om enten metode 2 eller 3, generelt resulterer i nøjagtigere filtrerede positioner, og dermed vil være at foretrække som filtreringsmetode.

Projektgruppen vurderer dog, at den principielle forskel mellem filtreringsmetode 2 og 3 vil få indflydelse på den filtrerede positionering, hvis observationerne fra IMU400CC-100 kunne opdateres lø-

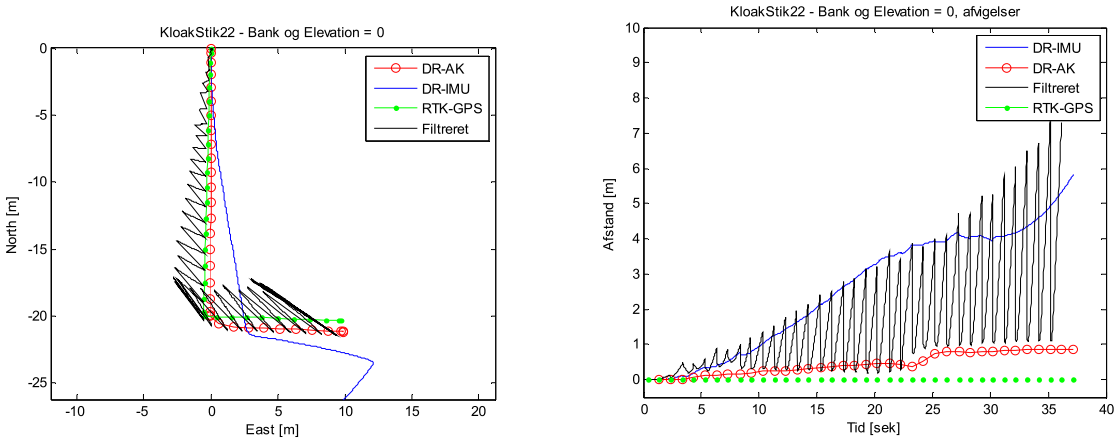
bende med nye orienteringsparametre til rotationsmatricen. Er dette muligt vil spredningen på observationerne fra IMU'en nulstilles ved hver opdatering af rotationsmatricen. Ved store tilbagelagte afstande vil spredningen på IMU'ens observationer sandsynligvis være mindre end den fejlophobede på DR-AK positioneringen. Eftersom DR-AK i det tilfælde ikke vil være mest præcise af de to observationstyper, vil det ikke give mening at fremskrive DR-AK positioneringen selvstændigt, og kun korrigere observationerne fra DR-IMU efter den filtrerede position. Med baggrund i antagelsen om, at orienteringsparametrene kan opdateres løbende, vælges det at undersøge filtreringsmetode 3 nærmere i det kommende afsnit.

8.4.3 Analyse af valgte filtreringsprincip

Med den valgte filtreringsmetode bliver de væsentligste faktorer, der kan påvirke den endelige positionering, bestemmelsen af bank og elevation, da disse har stor betydning for positionsbestemmelsen, med DR-IMU, jf. afsnit 6.2. Det er i underafsnit 6.2.3 vist, at der kun skal små fejl i disse værdier til at give store fejl i positionerne bestemt ved IMU'en. Derudover har vægtningen af de observationer der indgår i Kalman filtreringen også betydning for de opnåelige resultater. Projektgruppen har dog valgt at fokusere på den indflydelse elevation og bank har på positionsbestemmelsen. Dette valg foretages med baggrund i kendskabet til spredningen på DR-IMU, der hurtigt vokser og bliver væsentlig større end spredningen på DR-AK. Det vil derfor ikke give mening at f.eks. at tildele DR-IMU højere vægt, da dette vil give dårligere resultater mens tildelingen af en højere vægt til DR-AK, blot vil forstærke tendensen til, at de filtrerede positioner ligger sig tæt på DR-AK. Der kan på et senere tidspunkt arbejdes mere i dybden med denne problemstilling, men af tidsmæssige hensyn, har projektgruppen valgt, udelukkende at fokusere på bank og elevation.
Hvis ikke IMU'en skal betragtes som ubrugelig i NS-1002, skal rotationsmatricens orientering løbende opdateres med nye værdier for bank, elevation og heading. Hvis nøjagtigheden af DR-IMU skal overholde en maksimum afvigelse fra den sande rute på ±0,5 m, bør denne opdatering af rotationsmatricen foretages i intervaller på maksimum 5 sekunder. Der har dog ikke været instrumenter til rådighed, som kan bestemme bank og elevation løbende. ZeroTronic10 inklinometeret kan, i den udgave tilgængelig for projektgruppen, kun aflæses via den analoge aflæsningsenhed.. For at optimere nøjagtigheden af den filtrerede position, må der derfor tages stilling til, hvordan elevation og bank kan opdateres i Kalman filtreringen.

Bank og elevation sættes til nul

Det udvalgte testområde på Føtex' parkeringsplads blev bl.a. udvalgt da det levede op til kravet om, at det kunne antages at være plant og uden niveauforskelle. Det prøves derfor at udnytte denne antagelse, til at opdatere rotationsmatricen for hver DR-AK position, ved at sætte bank og elevation til nul og bruge heading fra kompasset.
Venstre del af Figur 8.27 viser de filtrerede positioner, hvor bank og elevation bliver sat til nul, hver gang en DR-AK observation inkluderes i filtreringen. De filtrerede positioner følger den faktiske rute til en vis grad, men med større og større afvigelser. Ved slutningen af testkørslen afviger de filtrerede positioner med op til otte meter fra den sande rute, jf. Figur 8.27 højre del.
Det er dermed tydeligt, at ved at sætte bank og elevation til nul, hver gang rotationsmatricen opdateres, opnås der ikke bedre resultater i filtreringen af data i forhold til metoden, hvor rotationsmatricen genbruges under hele målesessionen, jf. Figur 8.23.

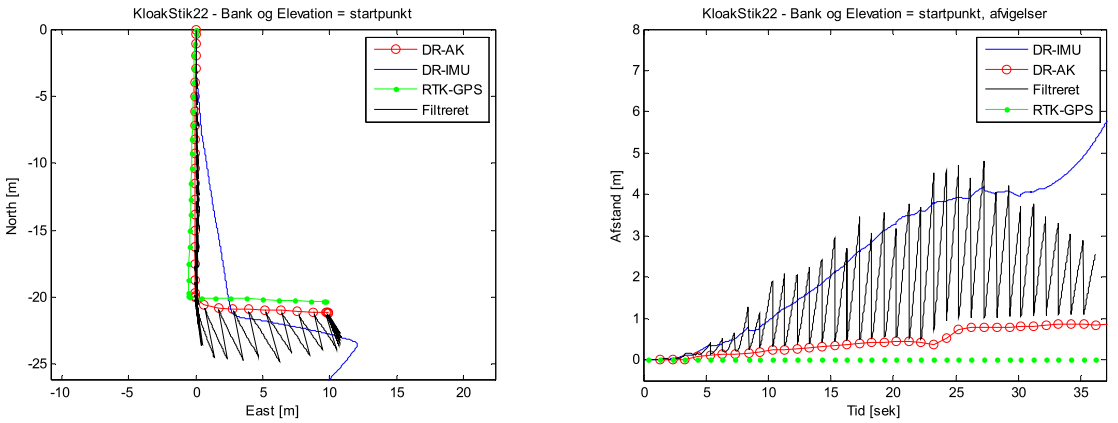


Figur 8.27: Kalman filtrering med bank og elevation = 0. Til venstre ses den beregnede positionsbestemmelse. Til højre ses afvigelsernes udvikling med tiden.

Bank og elevation fastholdes

Antagelsen om at hele testområdet er et vandret plan var ikke korrekt. Ved startpunktet er elevation og bank blevet bestemt. Derfor modificeres forrige antagelse omkring testområdet i stedet til, at området stadig er plant, men med en fast hældning svarende til de målte bank og elevation til startpunktet.

Positionsbestemmelsen på baggrund af disse antagelser ses i venstre del af Figur 8.28. Særligt i starten af filtreringen, opnås bedre resultater end med bank og elevation sat til nul. Dette dækker dog over, at der er mange overlap i de filtrerede positioner og efter drejningen, efter ca. 10 sekunder, er det tydeligt, at denne metode også tilfører væsentlige fejl til den filtrerede rute.



Figur 8.28: Kalman filtrering med fast bank og elevation. Til venstre ses den beregnede positionsbestemmelse. Til højre ses afvigelsernes udvikling med tiden.

Afrunding

Under indsamling af data for de elleve test har det ikke været muligt at registrere bank og elevation løbende med det udstyr der har været til rådighed. Derfor er der blevet foretaget to undersøgelser af mulig opdatering af elevation og bank på baggrund af antagelser, om de fysiske forhold ved det udvalgte testområde. Optimering af den filtrerede positionering vurderes ikke mulig på baggrund af de to udførte test. Det må derfor konkluderes, at testområdet ikke er plant. Bank og elevation skal derfor bestemmes efter andre principper før positioneringen kan optimeres yderligere.

Resultaterne af de to førnævnte test, hvor bank og elevation opdateres for hver DR-AK observation, bygger på, at spredningen på observationerne fra IMU'en stadig er fastlagt på baggrund af det udarbejdede polynomium, jf. 6.2. Det kan argumenteres, at når bank og elevation opdateres og rotationsmatricen dermed beregnes på ny, vil spredningen på IMU'ens observationer mindskes. Hvad de nye spredninger på observationerne skal fastsættes til, afhænger af målenøjagtigheden af bank og elevation.

8.5 Afrunding af test af NS-1002

Formålet med dette afsnit er, at samle op på de væsentligste resultater fra analyserne af de udførte tests. Derudover beskrives det, hvordan videre arbejde kan foretages, for sandsynligvis at opnå bedre resultater. Da software angående dataindsamlingen og databehandlingen nu er på plads, vil forbedringer i positionsbestemmelsen primært kunne opnås gennem anvendelse af bedre eller flere instrumenter, samt ved ændrede metoder og procedurer i selve dataindsamlingen.
I afsnittet beskrives de væsentligste resultater fra analyserne af hhv. DR-IMU, DR-AK og Kalman filtreringen. Herefter anvendes erfaringerne fra rapporten til at beskrive, hvilke forhold der skal ændres, samt hvilke metoder, der skal tages i anvendelse ved et videre arbejde med det udviklede navigationssystem, NS-1002. Herunder ses på nye instrumenter og målemetoder.

DR-IMU

Det har vist sig i analysen af DR-IMU, at bias ikke er stabil fra IMU'en startes til den stoppes, hvilket ellers var forventet. Ustabiliteten på bestemmelsen af bias er sandsynligvis relateret til temperaturen i IMU'en, men der kræves yderligere undersøgelser for at bestemme variansen på bias bestemt flere gange efter en IMU opstart. Resultatet gør det dog nødvendigt, at indsamle data til kalibrering for bias umiddelbart inden indsamling af data til positionering påbegyndes.
For at opnå et godt resultat i positionsbestemmelsen er det som forventet vigtigt, at værdierne for bank, elevation og heading er bestemt præcist, helst med en nøjagtighed i tusindedele grader. Heading er bestemmende for, hvilken retning positionerne bliver beregnet i, ud fra, hvordan LL systemet er defineret. Denne er særlig vigtig, når de beregnede positioner skal anvendes i f.eks. et Kalman filter, eller direkte sammenlignes med referencekoordinater. I NS-1002 kan kursen fra kompasset kan anvendes som heading. Bank og elevation er bestemmende for, hvor godt IMU'en bliver roteret til LL systemet. Hvis disse værdier ikke er korrekte, bliver observationerne ikke rettet korrekt op, hvilket medfører, at der vil være fejl på systemet helt fra starten. Ingen af sensorerne i NS-1002 kan bidrage med opdatering af værdierne for bank og elevation.
En anden væsentlig faktor for nøjagtigheden af de positioner, der beregnes, er den tid IMU'en skal køre, før DR-IMU begynder at drive og give dårlig positionsbestemmelse. Efter mellem 5 og 10 sekunder bliver positionerne fra DR-IMU dårlige og kan ikke længere overholde nøjagtighedskravet på ±0,5 meter. Dette medfører, at positionsbestemmelsen fra DR-IMU med korte intervaller bør opdateres med nye værdier for bank, elevation og heading, så de ophobede fejl i gyroerne, der benyttes til at korrigere observationerne til vandret, elimineres.

DR-AK

Den udviklede deviationstabel giver en væsentlig forbedring af de opnåelige resultater. Fejlene ved drejningerne opstår primært fordi kompasset, under den tilsigtede anvendelse, er for langsomt til at

registrere de udførte drejninger. Dette kan løses ved enten at anvende et hurtigere opdaterende kompas, eller ved at udføre drejningen langsommere. Sidstnævnte metode vil medføre en fejl i afstandsberegningen, hvis afstanden beregnes på baggrund af GPS positioner. Denne fejl kan løses ved at anvende et odometer til afstandsbestemmelsen frem for GPS, eller ved en ændring i beregningsmetoden. Denne fejl ses dog ikke som afgørende, da afstandsbestemmelsen automatisk vil blive foretaget med odometer, hvis positioneringsmetoden skal implementeres i opmålingen af rørsystemer. Ændringen i beregningsmetode kan dog udføres for at se effekten af en bedre afstandsbestemmelse.
Positionsbestemmelsen ved hjælp af DR-AK virker meget robust, specielt på lige stræk, hvor de nævnte fejl ved drejning ikke har indflydelse og på en strækning på 100 meter, tilbagelagt på ca. fem minutter, kunne positionen bestemmes inden for 20 centimeter. Nøjagtighedskravet på 0,5 meter var således overholdt i dette tilfælde.

Kalman filtrering

Der er i analysen af Kalman filtreringen undersøgt forskellige metoder til udførelse af Kalman filtreringen. Den første gik ud på, at foretage al positionsbestemmelse inden filtreringen igangsættes og dermed foretage filtreringen på baggrund af koordinater fra hhv. DR-IMU og DR-AK. Dette giver et meget dårligt filtreringsresultat. I den anden metode foretages positionsbestemmelsen af DR-IMU sideløbende med filtreringen. Dette medfører, at positionsbestemmelsen af DR-IMU genstartes, hver gang der foreligger en filtreret position, hvori der indgår en position fra DR-AK. Denne metode giver et bedre resultat, men åbner samtidig for nogle nye problemstillinger, fordi det nu er nødvendigt at angive en ny bank og elevation, hver gang positionsbestemmelsen fra DR-IMU genstartes. Dette løses i første omgang ved, at genbruge rotationsmatricen hver gang, positionsbestemmelsen genstartes. Dette giver forholdsvis gode resultater, men det er vigtigt at være opmærksom på, at rotationerne fra IMU er fejlbehæftede på grund af, at gyroerne driver med tiden. I den tredje metode foretages positionsbestemmelsen af både DR-AK og DR-IMU sideløbende med filtreringen. Det betyder, at positionsbestemmelsen hele tiden foretages fra de filtrerede positioner og ikke, som i metode to, fra positionerne fra DR-AK. Dette giver resultater nogenlunde tilsvarende dem fra metode to, men giver også de samme problemer med opdateringen af bank og elevation.
Derfor er der afprøvet to alternative metoder til opdatering af bank, elevation og heading. Der er lavet et forsøg, hvor værdierne for bank og elevation sættes til nul, mens heading hentes fra kompasset. Forudsætningen for forsøget var, at området, hvor testkørslerne blev foretaget, var helt plan resulterede som forventet i, at positionsbestemmelsen herefter bliver dårligere. I det andet forsøg bevares bank og elevation, som de er målt indledningsvist. Dermed forudsættes det, som i det forrige forsøg, at området er helt plant med samme hældning som i startpunktet, og startværdierne for bank og elevation anvendes, hver gang positionsbestemmelsen genstartes. Heading hentes fra kompasset ved hver ny filtrering. Dette giver, også som forventet, et dårligt filtreringsresultat. Forudsætningerne om, at området er helt plant kan ikke bruges, da der er små variationer og ændringer i køretøjets orientering.
Da elevation og bank således ikke kan korrigeres, vil spredningen på positionerne fra DR-IMU således hele tiden blive større. Da spredningen på positionerne fra DR-AK er meget mindre, vil de filtrerede positioner hele tiden ligge i nærheden af DR-AK positionerne, når disse er til stede. Nøjagtigheden af DR-AK bliver derfor meget bestemmende for, hvor nøjagtige de filtrerede positioner bliver.

Forudsat at DR-IMU systemet kunne 'nulstilles' med ny bank, elevation og heading for hver, f.eks. fem sekunder, ville der kunne opnås en bedre positionsbestemmelse, da positionerne fra DR-IMU, der har lille spredning når der køres i korte intervaller, ville få større indflydelse på det endelige resultat.

Videre arbejde med NS-1002

Det har gennem analyserne af de udførte test vist sig, at visse ændringer af NS-1002 bør kunne medføre en højere nøjagtighed i positionsbestemmelsen af køretøjet. Grundet projektperiodens tidsbegrænsning er de mulige resultater ved en implementering af de beskrevne ændringer ikke blevet undersøgt nærmere. I stedet vil det i dette underafsnit blive beskrevet, hvordan et videre arbejde med NS-1002 kan udføres, ved at præsentere nogle af de idéer projektgruppen har til det videre arbejde.

Derudover har analyserne vist, at en række af de anvendte rutiner fortsat skal anvendes i dataindsamlingen og -behandlingen. I et videre arbejde med NS-1002, vil der f.eks. fortsat skulle samles data ind til kalibrering for bias, inden dataindsamlingen påbegyndes. Der samles fortsat data ind til kalibreringen i et minut, for at få bestemt bias så nøjagtigt som muligt.

<u>DR-IMU</u>

Det forventes, at de væsentligste forbedringer af DR-IMU delen og dermed af hele NS-1002 vil kunne opnås ved at implementere en opdatering af bank, elevation og heading. Heading kan hentes fra kompasset og vil derfor ikke kræve store ændringer at implementere. Bank og elevation kan erhverves på flere måder. Det mest optimale vil være, at anskaffe udstyr, der gør det muligt at fastmontere et inklinometer på både x- og y-aksen, samt datakommunikationsudstyr, så observationerne fra inklinometrene kan indsamles med computeren og synkroniseres med de øvrige observationer. En anden mulighed som kan benyttes for at vise effekten af opdateret bank og elevation er, at foretage et nivellement af området, for derigennem at kunne definere hældninger i et bestemt punkt.

Der er flere måder at foretage denne nivellering på. Det kan vælges at foretage et traditionelt nivellement og derved bestemme et net af punkter i det område, hvor testen foretages. De nivellerede punkter måles ind med GPS, hvilket gør det muligt, at beregne hældninger, hvor som helst i det nivellerede net af punkter. I stedet for et traditionelt nivellerinstrument, kan der anvendes en totalstation og foretages et trigonometrisk nivellement i stedet. På denne måde kan det desuden undgås at måle alle punkterne ind med GPS, da de kan knyttes til systemkoordinater via det trigonometriske nivellement.

Det er desuden muligt at foretage en laserscanning af området testkørslen foretages i. Dette gør det muligt at modellere overfladen. På den genererede overflade kan der, i et ønsket punkt, dannes en normalvektor til overfladen og ud fra denne bestemmes bank og elevation.

Endelig er det muligt at anvende en mere simpel metode til at finde bank og elevation i andre punkter end startpunktet. Med denne metode foretages først testkørslen, hvorved der måles et punkt med GPS hvert sekund. Efter endt kørsel, kan køretøjet, ved hjælp af afsætning af de indsamlede GPS punkter, placeres i et tidligere målt punkt, hvorefter der manuelt kan måles bank og elevation, på samme måde, som inden testkørslen blev igangsat, dvs. med inklinometer. De aflæste værdier kan herefter implementeres i beregningerne.

For samtlige metoder gælder, at det selvsagt er vigtigt, at køretøjets orientering i punktet kendes. Uanset om hældningerne skal findes i et net med højde information, en overflademodel, eller i et

genafsat punkt, er IMU'ens akseretninger i et punkt, nødt til at være kendt, da det er aksernes hældning i punktet der ønskes bestemt.
De beskrevne metoder til at finde bank og elevation, hvor der i området udføres et nivellement eller modelleres, giver selvsagt ikke ligeså gode resultater, som hvis der fastmonteres inklinometre på IMU'en. De to metoderne forventes dog med fordel, at kunne anvendes til at sandsynliggøre, at der kan opnås bedre resultater ved at angive en ny bank og elevation for f.eks. hvert femte sekund. På denne måde kan konceptet sandsynligvis illustreres, inden der indkøbes udstyr til en automatisk opdatering af bank og elevation.

DR-AK

Deviationstabellen skal fortsat anvendes sammen med kompasset, for at få så nøjagtige målinger fra dette som muligt. Da kursen fra kompasset tilsyneladende ikke opdateres med den hastighed, som drejningerne blev foretaget med, kan det være en mulighed at anvende et kompas, der kan måle de hurtige drejninger. I så fald er det nødvendigt at udarbejde en ny deviationstabel, og hvis det videre arbejde foretages i et nyt testområde, skal det også undersøges om den udarbejde deviationstabel stadig er anvendelig. I stedet vil det i det videre arbejde derfor være nærliggende, at udføre nye test i samme testområde, anvende det samme kompas samt deviationstabel og i stedet foretage drejningerne i et tempo, så kompasset kan følge med. Dette nødvendiggør en ændring i afstandsberegningen, så de kort afstande, der kommer af de tilfældige fejl på GPS positionerne, når der drejes langsomt i det samme punkt, kan sorteres fra. Dette skal implementeres i databehandlingen i NS-1002, hvor det kan forsøges at slette alle korte afstande, f.eks. under fem-syv centimeter. Denne metode kan vise, om det, som forventet, er drejningshastigheden, der har været skyld i fejlen ved drejningerne. Det vil desuden kunne fastslås, hvilken nøjagtighed der reelt kan opnås med DR-AK, når der samtidig udføres drejninger.

Kalman filtrering

I forhold til filtreringen viser de udførte test, at den beskrevne metode 3 vil give det bedste resultat. Dette gælder i endnu højere grad, hvis den foreslåede opdatering af bank og elevation implementeres.

9 Konklusion

Formålet med dette kapitel er, at konkludere på de forudgående kapitler, som er udarbejdet for at muliggøre besvarelsen af nedenstående problemformulering:
Hvorledes kan et dead reckoning navigationssystem, bestående af en IMU, kompas og afstande mellem GNSS positioner, designes til positionsbestemmelse i rørsystemer, og er det muligt at opnå en nøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre?
I kapitlet vil der først konkret blive besvaret på problemformuleringens spørgsmål, hvorefter denne besvarelse knyttes mere detaljeret sammen med erfaringer og resultater fra analysen, hvilket vil kræve at læseren har en indsigt i det udført arbejde, der er beskrevet gennem hovedrapporten og de udarbejdede bilag.

For at være i stand til at besvare problemformuleringen er der udarbejdet et navigationssystem, NS-1002. Dette er bestående af instrumenterne omtalt i problemformuleringen, IMU, kompas og simuleret afstandsmåler med GNSS samt en software del, hvor indsamlingen, lagringen og behandlingen af data kan foretages. Herefter er der udført en række test af NS-1002, ud fra en simulering af en TV-inspektion af et rørsystem. NS-1002 er blevet monteret på et køretøj og der er herefter kørt en række testruter, for at undersøge, om det er muligt, vha. af NS-1002, at opnå en positionsnøjagtighed på ±0,5 meter eller bedre. Gennem NS-1002 foretages positionsbestemmelsen ved hjælp af DR-IMU, der består af en IMU samt DR-AK, der består af et kompas og en beregnet afstand ud fra GNSS-målinger. På baggrund af disse systemer er der foretaget en Kalman filtrering, hvorudfra de endelige resultater kan analyseres. Gennem det udviklede NS-1002, har der vist sig, at være forskellige afvigelser for den filtrerede rute. Når der filtreres på baggrund af både DR-IMU og DR-AK ligger afvigelserne på mellem 0,5 meter og 3 meter. Afvigelserne, hvor der kun filtreres på baggrund af DR-IMU, dvs. mellemliggende punkter er væsentligt højere og ligger mellem 0,6 meter og 8 meter, alt efter i hvilken situation testen er foretaget. Spredningen på de filtrerede positioner er ligeledes varierende afhængig af observationerne, der anvendes til filtrering af den pågældende position. For filtrerede positioner kun bestemt ved DR-IMU følger spredningen det udarbejde polynomium for spredningernes udvikling over tid, hvilket efter 1 min resulterer i ca. ±50 m. Spredningerne for et filtreret punkt på baggrund af DR-IMU og DR-AK ligger under ±0,3 meter, hvilket primært skyldes DR-AK, hvor positionerne bestemmes med en væsentlig bedre kvalitet, hvorfor de ligeledes tildeles stor vægt i filtreringen. Disse spredninger skal yderligere ses i forhold til, at der under en TV-inspektion også vil være en spredning på, hvor præcist traktoren kan placeres i startpunktet, når den nedsænkes i en hovedbrønd. Det vurderes ikke umiddelbart muligt at der med sikkerhed kan foretages positionsbestemmelsen, så kravene på ±0,5 m opfyldes. Det vil dog være muligt i visse tilfælde, og primært være afhængig af DR-AK, som er betydeligt mere robust over tid.
Den ofte høje spredning skyldes primært positionsbestemmelsen af DR-IMU, som er meget ringe over tid. Samtidig skyldes de høje spredninger også DR-IMU, da denne driver meget over tid og korrigeres ikke korrekt til vandret. Det vurderes, at med en bedre korrektion af IMU'ens rotationer, vil det sandsynligvis være muligt at opnå en højere nøjagtighed og væsentligt lavere spredninger.

Derudover har DR-AK en række problemer, som er med til at øge unøjagtigheden på den endelige positionsbestemmelse, bl.a. opdaterer kompasset ikke hurtigt nok. Det ville kræve et bedre kompas, og sandsynligvis et gyrokompas, da et magnetisk kompas ville blive påvirket ved at blive benyttet i rørsystemer, pga. omkringliggende lokale magnetfelter, hvilket dog vil medføre ændret kalibreringsprocedurer. Derudover vil en bedre angivelse af afstanden, f.eks. fra et odometer, give et bedre resultat på DR-AK.
Udover disse problemer har det dog været muligt at udarbejde et navigationssystem, som principielt ville kunne benyttes i rørsystemer. Metoder, software og beregningsgang, ville kunne implementeres, med andre sensorer, som kunne levere observationer med en højere nøjagtighed, og det vil herved sandsynligvis være muligt, at opnå en bedre nøjagtighed og en nøjagtighed, som kunne opfylde kravene til systemet.

Under positionsbestemmelserne er der undersøgt forskellige parametres indflydelse på de beregnede positioner, samt om der kunne foretages ændringer, så positionsbestemmelsen kunne optimeres. Dermed er besvarelsen af problemformuleringen fortaget gennem arbejde med følgende dele:

- Udvikling af NS-1002
- Kalibrering af NS-1002
- Test af NS-1002

Udvikling af NS-1002
Kravene til NS-1002, var rettet mod anvendelse af køretøjet, herunder montering af instrumenter og software til indsamling og behandling af data.
Systemet skulle benyttes i forbindelse med en simulering af en TV-inspektion af et rørsystem. Det skulle derfor forsøges at få køretøjet til at foretage bevægelser svarende til dem, det fjernstyrede kamera udfører i rørsystemer. Derudover var der en række krav til montering af instrumenterne. Bl.a. var det vigtigt, at GPS'en og IMU'en kunne placeres over hinanden, for at positionsbestemmelsen blev foretaget korrekt. Kravene til softwaren var bl.a. at programmet skulle kunne foretage følgende:

- Instrumentkontrol
- Dataindsamling
- Databehandling
- Præsentation af positionsbestemmelse

På baggrund af dette er der udviklet en brugergrænseflade, med det til formål at lette brugen af navigationssystemet. Heri er alle de opstillede krav indeholdt og grænsefladen er forsøgt at gøre så intuitiv så muligt for brugeren og samtidig, så programmet indeholder de elementer, der var stillet krav om. Derudover er det gjort muligt at udtegne positionerne umiddelbart efter dataindsamlingen, hvilket ligeledes er et element, som er med til at øge brugervenligheden.
For at kunne udarbejde NS-1002 skulle teorien for flere forskellige metoder for positionsbestemmelse, herunder DR-IMU, DR-AK klarlægges. I NS-1002 indgår metoderne for positionsberegningen herefter i en filtrering af positionerne, nærmere bestemt Kalman filtrering, så den endelige positionsbestemmelse foretages herudfra. Et af de vigtige parametre i Kalman filtreringen er en præcis tidsstemplingen af de observationer, der indsamles af instrumenterne, så integrationen foretages korrekt i filtreringen.

Kalibrering af NS-1002

For at fortage en positionsbestemmelse med NS-1002, skal der foretages en kalibrering af systemet og der skal foretages kalibrering af de enkelte instrumenter, som indgår i NS-1002. Dette gøres for at sikre, at de data, som indsamles er fejlbehæftede, herunder at fjernes indflydelsen fra de systematiske fejl der vælges at kalibrere observationerne for, samt at estimere indflydelsen af de tilfældige fejl på instrumenterne. Kalibreringen benyttes ligeledes til at finde en række indledende værdier, som skal benyttes, for at Kalman filtreringen kan udføres. Generelt er denne kalibrering meget vigtig og betydende for resultaterne, både for det samlede NS, men også for de enkelte instrumenter som indgår i systemet.

Koordinatsystemer: For at navigationssystemet kan fungere korrekt er det vigtigt, at de forskellige systemer, som indgår, er blevet kalibreret. I dette tilfælde handlede det om, at gøre de forskellige systemers akser sammenfaldende. Køretøjets akser, blev gjort sammenfaldende med IMU'ens akser, og kompassets gjort sammenfaldende med kørselsretningen. Samtidig blev GPS'en placeret, så den er placeret i køretøjets, samt IMU'ens omdrejningsakse.

DR-IMU: I forhold til kalibrering af IMU'en, så er der valgt en metode, som kalibrerer for bias. Gennem undersøgelser af størrelsen på bias blev det fastslået, at middelbias var stabil efter 20-30 sekunder, hvorfor der minimum skal indsamles kalibreringsdata i dette tidsrum. Gennem tests blev det ligeledes påvist, at bias ikke er stabil efter opstart og det kunne desuden se ud til, at temperaturen har indflydelse på størrelsen af bias. Det kan samtidig konkluderes at bias har stor betydning for positionsbestemmelsen, og er vigtig at få målt inden hver positionering.

IMU'en er ligeledes påvirket af tilfældige fejl. Disse kan der ikke kalibreres for, men størrelserne af disse kan estimeres, og herigennem har det vist at de tilfældige fejl er af en betragtelig størrelse og over tid øges varianserne på de målte punkter betydeligt.

DR-AK: Som det var tilfældet med IMU'en er det nødvendigt at foretage kalibrering af DR-AK.

For at kalibrere kursen blev der udarbejdet en deviationstabel, som skulle korrigere kursen, så bedre resultater kunne opnås. For at se indflydelsen af denne blev positionsbestemmelsen af DR-AK foretaget på en test, som forløb over 100 meter. Her skete en forbedring i afvigelsen på slutpunktet mellem DR-AK og den 'sande' rute fra 6,19 meter til 0,16 meter. Denne store forbedring skyldes, at ruten var beliggende i en kurs, hvor deviationstabellen viser størst korrektion, ca. 4 grader. Det skal dermed konkluderes at udarbejdelsen af en deviationstabel er med til at forbedre positionsbestemmelsen af DR-AK, dog er det ikke sandsynligt at deviationstabellen vil være tilfredsstillende i alle områder, da denne bl.a. er afhængig af, hvor testen foretages.

Positionering med NS-1002

Positionsbestemmelsen i NS-1002 består af tre forskellige dele. DR-IMU og DR-AK er to forskellige metoder til at bestemme positioner for den rute som tilbagelægges. Disse indgår herefter i Kalman filtreringen, hvilket kan foregå på forskellig vis, alt efter, hvilke instrumenter der benyttes. Ud fra testene, er der foretaget en række analyser af forskellige parametres indflydelse, for at kunne optimere positionsbestemmelserne, og dermed opnå de bedste resultater for positioneringen af NS-1002.

DR-IMU: For positionsbestemmelsen med DR-IMU er det specielt undersøgt, hvilken indflydelse parametrene, bank, elevation og heading, samt tiden, har.

Bank, elevation og heading er indledende værdier, som skal bestemmes før positionsbestemmelsen begyndes. Heading bestemmer den umiddelbare kurs for positionsbestemmelsen med DR-IMU og er derfor vigtig for, at positionsbestemmelsen rettes korrekt op. Tests har desuden vist, at korrekt bank og elevation har større betydning. Benyttes korrekt heading, men forkerte værdier for bank og elevation, kan positionsbestemmelsen foretages direkte modsat af den målte heading. Generelt kan det konkluderes, at bank og elevation har meget stor betydning for resultaterne og det er vigtigt for positionsbestemmelsen, at IMU'en korrigeres korrekt til vandret.
Tiden der måles over er ligeledes vigtig, da spredningerne på positionsbestemmelsen stiger med tiden i tredje. Dette er ligeledes vist gennem testene, hvor afvigelserne mellem DR-IMU og den 'sande' rute stiger betydeligt over tid. Dette skyldes, at observationerne driver, specielt har drift af gyroerne stor betydning og påvirker målingerne negativt. Testene viste, at efter en periode på mellem fem og ti sekunder var der en afvigelse på mere end 0,5 meter, hvilket ligeledes tydeliggør, at observationerne fra IMU'en som forventet driver meget og hurtigt. Dvs. IMU'en ikke korrigeres korrekt til vandret på grund af ophobning af fejl på gyroobservationerne, og da der ikke måles nye bank og elevation, kan der ikke genkorrigeres til vandret, hvorfor fejlene bliver forøget over tid. Dermed ville det optimere systemet betydeligt, hvis bank og elevation kunne bestemmes løbende.
DR-AK: For positionsbestemmelsen med DR-AK er det specielt undersøgt, hvilken indflydelse parametrene, drejninger, afstandsberegningen samt tid og afstand, har.
Gennem tests kan det konkluderes, at positionsbestemmelsen på baggrund af DR-AK ikke fungerer optimalt i forhold til de drejninger, der foretages. Det skyldes primært kompasset, da det ser ud til at opdateringerne af kursen ikke foretages hurtigt nok
Ved positionsbestemmelsen benyttes en GPS til at bestemme afstandene og herudfra kan det konkluderes, at dette ikke er optimalt, da det påfører unødige fejl i positionsbestemmelsen, og der kunne dermed med fordel implementeres en anden metode til måling af afstande.
Tid og afstanden som positionsbestemmelsen foregår over har for DR-AK ikke samme betydning som tiden havde i positionsbestemmelsen med DR-IMU. Efter omkring 16-18 sekunder overstiger afvigelsen mellem DR-AK og den 'sande' rute, ca. 0,5 meter. Dermed kan det konkluderes, at afvigelserne stiger stødt over længere afstand pga. fejlforplantning og jo flere drejninger, der er på den tilbagelagte rute, jo større vil afvigelsen på punkterne blive. Dog har det også vist sig, at det på et langt lige stykke er muligt at foretage en positionsbestemmelse med en afvigelse på under 0,2 meter.
Kalman filtrering: Kalman filtreringen kan foretages vha. flere forskellige metoder, og der er valgt en metode, som vurderes at give de bedste resultater, både som positionsbestemmelserne er udviklet, men også ved positionsbestemmelser, hvor det er muligt at få opdateret bank og elevation. I Kalman filteret spiller spredningen, og dermed vægtene af de forskellige observationer en meget stor rolle. Observationerne fra DR-IMU er af så dårlig kvalitet over tid, at de efter 5-10 sekunder stort set ikke har nogen indflydelse på resultatet af filtreringen. Derfor vil der også, ud fra en forventning om, at det blev muligt at opdateret bank og elevation løbende, skulle arbejdes mere med vægtene i filtreringen, da disse har stor betydning. Derudover konkluderes det, at den valgte bevægelsesmodel ikke altid er i overensstemmelse med virkeligheden, da den sekundære model, som er benyttet bygger på en række antagelser, hvilket kan være en årsag til de indimellem dårlige resultater. Herunder er varianserne for accelerationerne bestemt ud fra et middel af alle de kørte tests, og en bedre model af denne kunne med fordel udarbejdes, da der er stor forskel i variansen på accelerationen mellem de enkelte test.

10 Perspektivering

Formålet med dette kapitel er, at reflektere over det udarbejdede projekt for derigennem at konkretisere en række arbejdsområder, som vil kunne forbedre NS-1002.
Udarbejdelsen af et NS er et komplekst arbejdsområde, hvor det er muligt at fordybe sig i mange forskellige aspekter af systemets opbygning og anvendelsesmuligheder. Igennem projektforløbet har projektgruppen løbende gjort sig erfaringer og fået en række idéer til en lang række områder, som kunne være interessante at foretage nærmere undersøgelser af, for at optimere eller skabe andre anvendelsesmuligheder af systemet. Den begrænsede projektperiode har gjort det nødvendigt at afgrænse projektet fra detaljerede undersøgelser af disse arbejdsfelter.
I kapitlet beskrives først refleksioner vedrørende nogle af de muligheder, der ses for tekniske forbedringer af NS-1002 med de valgte komponenter og derefter beskrives anvendelsesmulighederne af NS-1002.

10.1 Tekniske forbedringer af NS-1002

Formålet med dette afsnit er at konkretisere arbejdsfelter, der kan resultere i en forbedret nøjagtighed på positionsbestemmelsen med NS-1002. Dette gøres ved først at beskrive refleksioner for simuleringskøretøjet i underafsnit 0. I underafsnit 0 beskrives derefter refleksioner for, hvordan det indsamlede data kan forbedres og afsnittet afsluttes med refleksioner for forbedringsmuligheder af softwaredelen i NS-1002 i underafsnit 0.

Køretøj og montering

Anvende en anden testvogn
Den anvendte vogn til simulering af traktoren i kloakker viste sig at være ustabil under testkørsler. Dette skyldes formentlig, at vognen ikke er affjedret, hvorved hjulene forplantede rystelser til resten af vognen. Rystelserne kan få indflydelse på instrumenternes registreringer, der ved store rystelser ikke vil stemme overens med den egentlige bevægelsesretning.

Alignment af instrumenter
Der blev i projektet udført en alignment af instrumenterne ved brug af en flugtning og totalstation, hvorefter det antages at instrumenternes individuelle koordinatakser er parallelle.

- Et fokusområde kunne være, at udvikle en simpel metode, der kunne bestemme forskellen på akserne for de forskellige instrumenter og inkludere disse transformationsparametre i navigationssystemet, eller minimere alignment forskellene yderligere.
- Et andet fokusområde kunne være nærmere undersøgelse af forskydningen mellem sensorerne. Både IMU'en og GPS-antennen blev forsøgt monteret på simuleringskøretøjet så de begge var sammenfaldende med systemets omdrejningsakse. For Per Aarsleff A/S vil det ikke være muligt at montere instrumenterne direkte på kameraet. Det kunne derfor være interessant at bestemme denne forskydning af instrumenterne i forhold til systemets omdrejnings-

akse og inkludere disse parametre i positionsbestemmelsen. Dette kunne gøres ved metoden "lever-arm adjustment".

Instrumenter

Instrumenterne anvendt i projektet kan karakteriseres som 'low cost' instrumenter, og systemet vil generelt kunne forbedres ved de samme instrumenttyper, men med højere nøjagtighed og dermed også en højere pris. Nogle af fejlene på de observationer, der skal bestemmes af instrumenterne kan enten forbedres ved udskiftning med et andet 'low cost' instrument, eller minimeres ved at tilføje øvrige instrumenter.

Tidsstempling

Den oprindelige idé for dataindsamlingen var at benytte tidsstemplingen fra uret indbygget i computeren, til synkronisering af data og til integration af observationerne målt med IMU'en til positioner. Dette ur viste sig for upræcist, og i stedet blev IMU'ens indbyggede ur benyttet som synkroniseringstid. Observationer fra de øvrige instrumenter måtte efterfølgende interpoleres over i denne tidsreference, hvilket kan have påført fejl, og samtidig umuliggør en egentlig brug af metoden i en real-time udgave af positionsbestemmelsen. Dette vil kunne undgås ved at tilføje et præcist og højfrekvent eksternt ur, der benyttes til tidsstemplingen af alt modtaget data.

Afstandsbestemmelse

GPS'en blev brugt til simulering af den afstandsmåling, som allerede er installeret på Per Aarsleff A/S traktorer. Simuleringen resulterede i, at der blev registreret små afstande selv om køretøjet holdt stille, hvilket vil kunne undgås, hvis simuleringen af afstandsmålingen i stedet blev foretaget med et odometer. Herved kunne drejninger foretages i et tempo, der gjorde at registreringerne fra kompasset stabiliseres inden køretøjet forsatte bevægelse i den nye retning.

Elevation og bank

Bestemmelsen af bank og elevation udelukkende ved startpositionen viste sig ikke tilstrækkelig til at gøre IMU'en anvendelig i positioneringsøjemed. Der er tidligere blevet beskrevet tre mulige løsninger til at bestemme elevation og bank løbende i det allerede indsamlede testdata. Den fremtidige brug af NS-1002 bør dog inkludere automatisk bestemmelse af disse to parametre.

- En metode til at foretage denne automatiske opdatering kunne være ved at tilføje to inklinometre til systemet. Tilføjelsen vil kræve et større monteringsarbejde, hvor det skal sikres, at de to inklinometre med høj nøjagtighed er monteret parallelle med IMU'ens x- og y-planer. Dette kunne også føre til en interessant undersøgelse af, hvilken indflydelse ændringer af bank og elevation har på positionsbestemmelsen for IMU400CC-100.
- En anden metode til bestemmelse af bank og elevation kunne være på baggrund af registreringer fra IMU'ens accelerometre. Denne idé bygger på, at kameraet under TV-inspektion ofte ikke er i bevægelse for at operatøren kan notere tilstanden af rørsamlingerne. Hvis kameraet ikke er i bevægelse vil accelerometrene principielt kun registrere tyngdeaccelerationen. Hælder IMU'en i forhold til tyngdeaksen vil der ikke kun være en registrering på z-aksen. Projektgruppen forestiller sig, at der kan udvikles en metode til at omregne disse accelerationer til hældninger i forhold til tyngdeaksen, der kunne anvendes som elevation og bank.

Software

Bevægelsesmodel

Den benyttede bevægelsesmodel er forholdsvis simpel og forudsætter, at simuleringskøretøjet bevæger sig med en konstant acceleration. De udførte test har et varierende bevægelsesmønster, hvor eksempelvis *KloakHoved1* er én lige strækning, mens der i *KloakStikDrej1* foretages to stop med drejninger, resulterende i forholdsvis stor spredning på accelerationen under testen. Ved nærmere undersøgelser af kameraets bevægelsesmønster i rørsystemer, kan der måske udvikles en bevægelsesmodel, der stemmer bedre overens med de egentlige bevægelser som kameraet udfører.

Filtreringsmetode

Projektgruppen valgte at anvende Kalman filtrering som filtreringsmetode i NS-1002, da der gennem undervisning på uddannelsen allerede var skabt et kendskab til dette forholdsvis simple, men effektive filter. Det kunne dog være interessant at undersøge, først og fremmest om der kunne implementeres andre filtreringsmetoder til positionsbestemmelsen på baggrund af det allerede indsamlede data, og dernæst, hvilken nøjagtighed der kan opnås med disse filtre ved brug af samme data grundlag.

10.2 Anvendelsesmuligheder af NS-1002

Formålet med dette afsnit er at konkretisere arbejdsfelter, der kan resultere i en bedre anvendelse af NS-1002. Dette gøres ved beskrive ændringer og tilføjelser til NS-1002, som kan forbedre systemets anvendelse for Per Aarsleff A/S. De tekniske forbedringer beskrevet i afsnit 10.1 anses ligeledes for at højne anvendelsen for Per Aarsleff A/S, hvis implementeret, idet nøjagtigheden for positionsbestemmelsen forbedres herved.

Instrumenter

De anvendte instrumenter i NS-1002 er blevet udvalgt uden at skele til instrumenternes fysiske størrelse. Før Per Aarsleff A/S kan anvende NS-1002 er det vigtigt, at instrumenterne kan monteres på det eksisterende TV-inspektionssystem, og benyttes i rørsystemer. Metoderne der anvendes i NS-1002 vil dog stadig fungere, hvis de benyttede instrumenter udskiftes med nogle lignende instrumenter, hvortil dataindsamlingsmodulet skal tilpasses disse nye instrumenter.

- Observationerne fra IMU'en kunne f.eks. udskiftes med 3DM-GX1 af MicroStrain Inc.
- Det magnetiske kompas bør udskiftes med et andet instrument der kan bestemme en absolut retning, f.eks. et gyrokompas, der ikke påvirkes af lokale magnetfelter fra f.eks. elektriske kabler der kan krydse kloakrørene, hvor kameraet inspicerer.

Kortmodul

Hvis instrumenterne udskiftes, og NS-1002 modificeres til at kunne indsamle data fra disse instrumenter, vil en naturlig udvidelse af NS-1002 omfatte et modul, der kan transformere de beregnede positioner til forskellige projektioner. Herved kan positionerne sammenknyttes med andre kortværker som Matrikelkortet, andre ledningsregistreringer osv. Dette kortmodul vil afhængig af eksisterende registreringer i kortdatabasen også kunne anvendes som egentlige observationer i Kalman filteret, som det eksempelvis ses ved kommercielle GPS-navigtionssystemer til biler mv.

Real-time

NS-1002 er udviklet til først at kunne udtegne kameraets position efter dataindsamlingen er afsluttet, hvilket sandsynligt vil være ensbetydende med at TV-inspektionen er færdig. Dette er ikke praktisk for operatøren, som herved ikke løbende kan følge med i kameraets position og kun foretage TV-inspektionen til skelgrænsen. Databehandlingsprocessen i NS-1002 kan forsøges implementeret som en del af dataindsamlingen, hvorved positionen beregnes for hver observation, der modtages fra instrumenterne. Det er projektgruppens erfaring at Matlab ikke vil være egnet som platform til at omdanne NS-1002 til et real-time system, da den udviklede kode tilsyneladende afvikles for langsomt. Det vil derfor kræve, at koden udvikles på ny i et andet programmeringssprog som f.eks. ”C” der er et lav-niveau programmeringssprog.

Positionering i 3D

Observationerne fra instrumenterne benyttes i øjeblikket kun til at bestemme en 2D-position. For DR-AK tages dermed ikke højde for, om den tilbagelagte afstand i en given retning, er foretaget på en overflade med hældninger, hvilket vil resultere i en fejl i den plane positionsbestemmelse. NS-1002 kan udvides til at bestemme en 3D-position. Denne udvidelse vil være simpel at implementere for DR-IMU, da der allerede beregnes 3D-positioner på baggrund af de indsamlede observationer, hvor kun EN-positionen i øjeblikket anvendes i filteret. For DR-AK kræver en 3D-positionsbestemmelse, at der i beregningsprocessen også inkluderes hældningsinformationer. Disse informationer kunne stamme fra et tilføjet inklinometer, som samtidig kunne bidrage med elevation og bank til opdatering af IMU’ens rotationsmatrice.

Litteraturliste

A

Aarsleff (Per Aarsleff A/S) (2009). *Rørrenovering* (n.d.). Tilgængelig fra: http://www.aarsleff.com/internet/acms.nsf/Webpages/ACE7AD9600DABDE8C1256C770043040A (Besøgt 16. marts 2009).

Aunsborg, C. (1997). *Projektarbejdets teori og metode*. Aalborg Universitet.

Axelson, J. (2000). *Serial Port Complete – Programming and Circuits for RS-232 and RS-485 Links and Networks*, Lakeview Research.

B

Betke, K. (2001). *The NMEA 0183 Protocol.*
Tilgængelig fra: http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf (Besøgt 1. maj 2009).

BGS (British Geological Survey) (2009). *The IGRF Model*.
Tilgængelig fra: http://www.geomag.bgs.ac.uk/gifs/igrf.html (Besøgt 6. maj 2009).

Borenstein, J., Everett, H. R. & Feng, L.(1996). *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. University of Michigan, USA.

Britting, K. R. (1971). *Inertial Navigation Systems Analysis*, Wiley-Intercience, a Division of John Wiley & Sons, Inc.

Burdet, O. (1998) *Automatic deflection and temperature monitoring of a balanced cantilever concrete bridge*. Institute of Reinforced and Prestressed Concrete, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Schweiz.

C

Cederholm, P. (1999). Landinspektøren, 3:408-414. *Kalman filtrering af GPS-positioner*.

Cederholm, P. (2000). Integrating GPS with Dead Reckoning Sensors. Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, No. 4, 2000.

Cederholm, P. (2007). *Inertiel positioning 1 - instruments and coordinate systems*. Kursusslides, Aalborg Universitet, Danmark.

Crossbow (Crossbow Technology, Inc.) (2007). *IMU User's Manual - Models (…) IMU400CD-*. Revision B, February 2007.

D

DMI (Danmarks Meteorologiske Institut) (2009). *Jordens magnetfelt*.
Tilgængelig fra: http://www.dmi.dk/dmi/index/viden/jordens_magnetfelt.htm (Besøgt 28. april 2009).

E

Eistrup, P., Gregersen, R. K. & Meister A. S. B. (2005a). *Undersøgelse og kalibrering af IMU400CC-100*. Aalborg Universitet, Danmark.

Eistrup, P., Gregersen, R. K. & Meister A. S. B. (2005b). *Laboratoriekalibrering af IMU400CC-100 og praktisk test af denne integreret med RTK-GPS*. Aalborg Universitet, Danmark.

Ellingsen, H. (2008). *Development of a Low-Cost Integrated Navigation System for USVs*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics.

Elvekjær, F. (2002). *Fysikbogen*. Gads Forlag, København, Danmark.

F

Farrell, J. A. & Barth, M. (1999). *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, The McGraw-Hill Companies, Inc.

Fuke, Y. & Krotkov, E. (1996). *Dead Reckoning for a Lunar Rover on Uneven Terrain.* The Robotic Institute, Carnegie Mellon University.

Fysikbasen (Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet) (2009). *Induktion i spole*.
Tilgængelig fra: http://www.fysikbasen.dk/index.php?page=Vis&id=31, (Besøgt 28. april 2009).

G

Grewal, M. S., Weill, L. R. & Andrews, A. P. (2007). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration Second Edition*, Wiley-Intenscience, a Division of John Wiley & Sons, Inc.

Grewal, M. S. Weill, L. R. & Andrews, A. P. (2001). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration First Edition*, John Wiley & Sons, Inc.

Godha, S. (2006). *Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated With GPS for Land Vehicle Navigation Application*, University of Calgary, Canada.

Gyldendal (2009a). Den Store Danske – Gyldendals åbne encyklopædi. *ASCII*.
Tilgængelig fra:
http://www.denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Informatik/Software,_programmering,_internet_og_webkommunikation/ASCII (Besøgt 14. april 2009).

Gyldendal (2009b). Den Store Danske – Gyldendals åbne encyklopædi. *Støj*.
Tilgængelig fra:
http://www.denstoredanske.dk/It%2c_teknik_og_naturvidenskab/Elektronik%2c_teletrafik_og_kommunikation/Elektronik%2c_radio_og_tv/st%c3%b8j (Besøgt 1. maj 2009).

H

Herrera, E. P., Kaufmann, H. & Quirós, R. (2007). *Assessment of Step Determination in a GPS/Compass /IMU System for Personal Positioning.* Universitat Jaume I, Castellón, Spanien.

I

Inaudi, D. & Glisic, B. (2002). *Interferometric inclinometer for structural monitoring*
Tilgængelig fra: http://ieeexplore.ieee.org/. (Besøgt: 23. marts 2009).

J

Jensen, K. (2005). *Landmåling i Teori og Praksis*, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet, Danmark.

Jensen, M., Steenfeldt, R. (2008). *Kvalitetsundersøgelse af GNSS RTK-måling*, Aalborg Universitet, Danmark.

JTelektronik (JT elektronik gmbh) (2009). *Lindauer Mini-Schere with ASYS*.
Tilgængelig fra:
http://www.jt-elektronik.de/English/products/lateralpipe/lindauerminischerewithasys/index.html
(Besøgt 19. maj 2009).

K

Klenum, A. (1965). *Landmaaling - Fejllære*, Det private Ingeniørfond, Danmark.

KVH (KVH Industries, Inc.) (2009a). *Owner's Manual – Azimuth 1000 Digital Compass*.
Tilgængelig fra: http://www.kvh.com/pdf/540042F_Azi1000.pdf (Besøgt 1. maj 2009).

KVH (KVH Industries, Inc.) (2009b). *Overview of Compass Technology*.
Tilgængelig fra: http://www.kvh.com/pdf/compasstech.pdf (Besøgt 1. maj 2009).

L

L-studienævnet (2009). Studievejledning: Afgangsprojekt/Langt afgangsprojekt. Danmark: Aalborg Universitet, Uddannelsen i Landinspektørvidenskab.

Lawrence, A. (1998). *Modern Inertial technology*. Springer-Verlag New York, Inc. USA.

Leica (Leica Geosystems AG) (2002). *GPS System 500 - Technical Reference Manual.* Schweiz. Engelsk version 4.0.0.

M

Matlab (The MathWorks Inc.) (2007a). (Computer software - Help function) Data Acquisition Toolbox - Data Acquisition System.

Matlab (The MathWorks Inc.) (2007b). (Computer software - Help function) Overview of the Serial Port - External Interfaces.

Microstrain (MicroStrain, Inc.) (2008). *FAQs*
Tilgængelig fra: http://www.microstrain.com/manuals/3DM-GX1FAQ.pdf (Besøgt 1. maj 2009).

Mostafa M. M. R. & Schwarz, Dr. K.P. (2001). *Digital image georeferencing from a multiple camera system*, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.

N

Nebot, E. & Durrant-White, H. (1999). *Initial calibration and alignment of Low cost Inertial Navigation Units for land vehicle applications*, Journal of Robotics Systems, Vol. 16, No. 2.

NGDC (National Geophysical Data Center.) (2009). *The World Magnetic Model*.
Tilgængelig fra: http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml (Besøgt 6. maj 2009).

NI (National Instrument) (2009). *How soon do you want to try LabVIEW?.*
Tilgængelig fra: http://www.ni.com/labview/try/daq.htm (Besøgt 18. marts 2009).

Nordby, B. & Kristensen, J. A. (1999). *Sensorintegration og Kalman filtrering*. Aalborg Universitet, Danmark.

R

Radiodetection (Radiodetection Ltd. - SPX Corporation) (2008). *RD4000RX Technical Specification*.
Tilgængelig fra:
http://www.radiodetection.com/doclib/SPX_TS095en2_RD4000rx_tech_spec_SPX_en.pdf (Besøgt 16. marts 2009).

Rogers, R. M. (2001). *Applied Mathematics in integrated Navigation systems*, American Institute of Aeronautics an Astronautics, Inc, USA.

S

Salychev, Oleg S. (1998). *Inertial System in Navigation and Geophysics*, The Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Rusland.

Schwarz, Dr. K. P. & El-Sheimy, Dr. N. (2004). *Mobile mapping systems - State of the art and future trends*. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.

Scott, K. (2002). *Introduktion til UML.* 1. udgave, 1. oplag, 2002. IDG Forlag.

Stovall, S. H. (1997). *Basic Inertial Navigation*. Naval Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, USA.

Strang, G. & Borre, K. (1997). *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. USA: Wellesley-Cambridge Press.

T

Titterton, D. H. & Weston, J. L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*, *Second Edition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, USA.

U

Unibw (Universität der Bundeswehr München) (2009). *geo-ASYS - Automatisches System zur Aufnahme und Dokumentation von Gebäudeentwässerungsanschlüssen*. Tilgængelig fra: http://www.unibw.de/bauv11/geoinformatik/forschung/projektauswahl/asys (Besøgt 19. maj 2009).

UoL (University of Leicster) (2001). *Introduction to C Programming*.
Tilgængelig fra: http://www.le.ac.uk/cc/tutorials/c/ccccover.html (Besøgt 18. marts 2009).

W

Wikipedia (Wikimedia Foundation, Inc.) (2009a) *Two's complement*.
Tilgængelig fra: http://en.wikipedia.org/wiki/Two_complement (Besøg 14. april 2009).

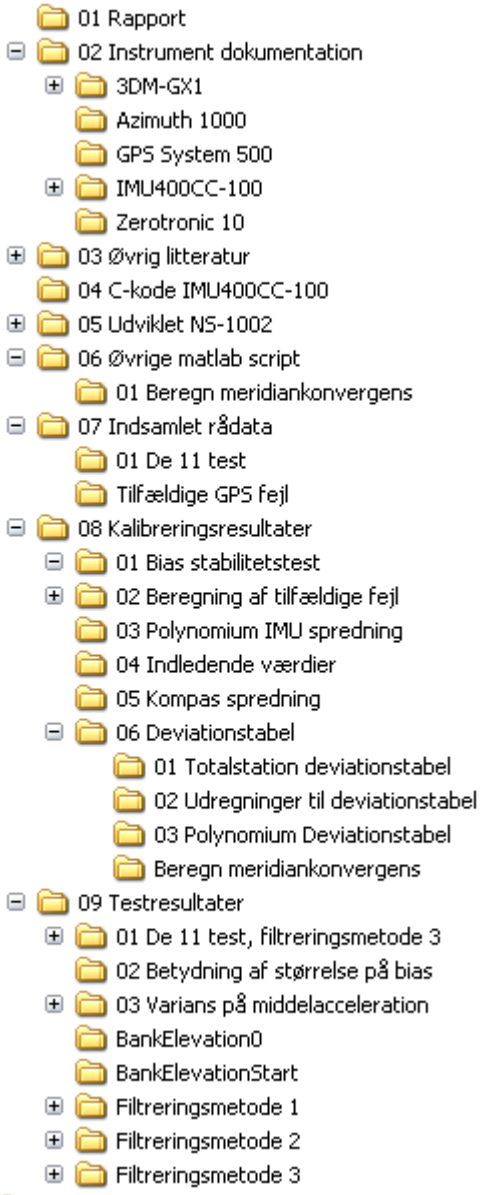
Wikipedia (Wikimedia Foundation, Inc.) (2009b). *Bitwise operation.*
Tilgængelig fra: http://en.wikipedia.org/wiki/Bitwise_operation#AND (Besøgt 2. juni 2009).

Wyler (WYLER AG.) (2007). *Manual – Zerotronic Sensoren.* Complete Revision, BlueSYSTEM 19.1.2007. Schweiz.

Bilagsliste

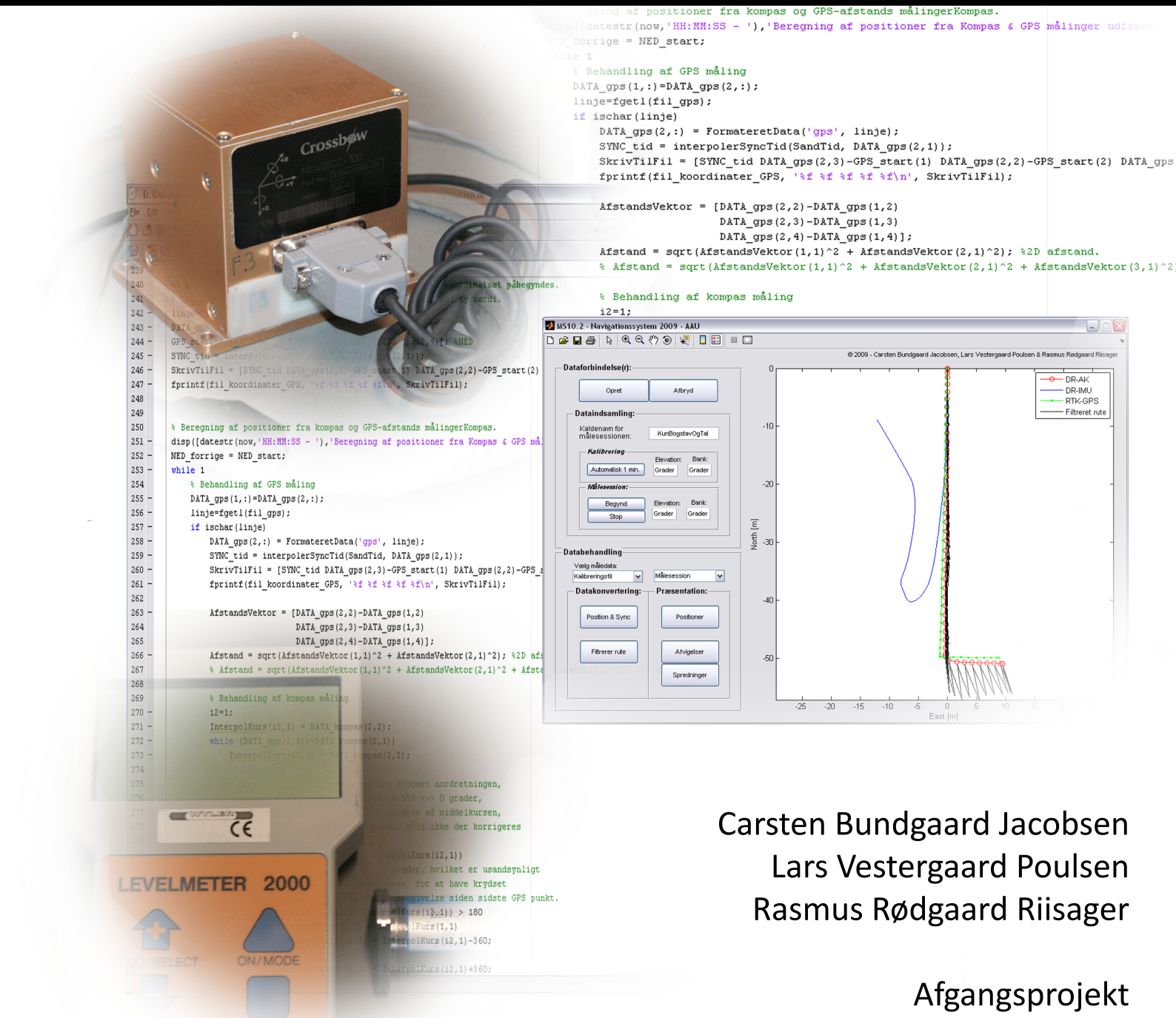
Bilag A	Møde med Per Aarsleff A/S
Bilag B	Dataforbindelse
Bilag C	Tilgængelige instrumenter
Bilag D	Systemer
Bilag E	Transformationer
Bilag F	Kalman filtrering
Bilag G	Udvikling af navigationssoftware

Vedlagte CD's mappestruktur



Udvikling af et positioneringssystem

- ved hjælp af dead reckoning, sensorintegration og Kalman filtrering



Carsten Bundgaard Jacobsen
Lars Vestergaard Poulsen
Rasmus Rødgaard Riisager

Afgangsprojekt
Landinspektøruddannelsens 10. semester
Aalborg Universitet 2009

Bilag

Bilag - Indholdsfortegnelse

Bilag A - Møde med Per Aarsleff A/S 3
A.1 Per Aarsleff A/S – Rørrenovering 3
A.1.1 Nuværende TV-inspektion af afløbsrør 4
A.1.2 Problem ved nuværende metode 5
A.1.3 Ønsker til ny positionerings metode 6

Bilag B - Dataforbindelse 7
B.1 Dataindsamlingssystemers opbygning 7
B.2 Seriel Forbindelse 9
B.2.1 Asynkron seriel forbindelse 9
B.2.2 RS-232 standarden 10
B.3 Formatering og validering af datapakken 11
B.3.1 Binært data 11
B.3.2 Tekst data 14
B.3.3 Validering af indsamlet data 16

Bilag C - Tilgængelige instrumenter 17
C.1 Generelle fejlkilder i sensorer 17
C.2 Azimuth 1000 18
C.2.1 Generelt 18
C.2.2 Kompastyper 19
C.2.3 Fejlkilder 19
C.3 Zerotronic 10 20
C.3.1 Generelt 20
C.3.2 Inklinometer typer 20
C.3.3 Fejlkilder 21
C.4 IMU400CC-100 21
C.4.1 Generelt 21
C.4.2 IMU typer 22
C.4.3 Konstruktionsprincip for accelerometer og gyro 23
C.4.4 Fejlkilder 25
C.4.5 Undersøgelse af måling med IMU400CC-100 28

Bilag D - Systemer 31

Bilag E - Transformationer 39

Bilag F - Kalman filtrering 41
F.1 Filterligninger 42
F.1.1 Udglatning 44
F.2 Bevægelsesligninger 45
F.3 Primær model 47
F.4 Sekundær model 48

Bilag G - Udvikling af navigationssoftware 51
G.1 Instrumentkontrol 51
G.2 Dataindsamling 52
G.3 Databehandling 57

Bilag A - Møde med Per Aarsleff A/S

Idéen til arbejdsområdet for dette projekt udspringer af et behov hos firmaet Per Aarsleff A/S, om at kunne kortlægge eksisterende rørsystemer, hvorfor de bl.a. har henvendt sig til COWI A/S i håb om en løsning. COWI A/S havde dog ikke en direkte løsning til kortlægningsopgaven, hvilket har resulteret i at Morten Thoft, Senior fagleder hos COWI A/S, henvendte sig til Aalborg Universitets landinspektøruddannelse, i håb om at nogle studerende ønskede at undersøge problemstillingen nærmere.
Som en naturlig del af projektopstarten primo februar 2009, blev der taget kontakt til Per Aarsleff A/S, med henblik på et møde, der kunne klargøre bl.a. hvilke behov de havde til løsning af kortlægningsopgaven.
Der blev arrangeret et møde den 23. februar 2009, som skulle afholdes hos COWI A/S Århus. Foruden hele projektgruppen deltog Morten Thoft, COWI A/S og Carsten Jensen, Produktionschef hos Per Aarsleff A/S. Forløbet af mødet var først en samtale om behov og muligheder for løsning af kortlægningsopgaven, hvorefter projektgruppen sammen med Carsten Jensen kørte ud for at følge en igangværende TV-inspektion af et kloaksystem.

Først vil virksomheden Per Aarsleff A/S blive præsenteret, med fokus på deres rørrenoverings afdeling. Herefter præsenteres den nuværende arbejdsgang ved en tv-inspektion af rørsystemer, og bilaget afsluttes med at beskrive kortlægningsproblematikken ved den nuværende arbejdsgang, samt hvilke ønsker og krav Per Aarsleff A/S stiller til en løsning på kortlægningen af rørsystemer.

Med mindre anden kildeangivelse oplyses, stammer informationerne, som fremgår af dette resume fra mødet den 23. februar 2009.

A.1 Per Aarsleff A/S – Rørrenovering

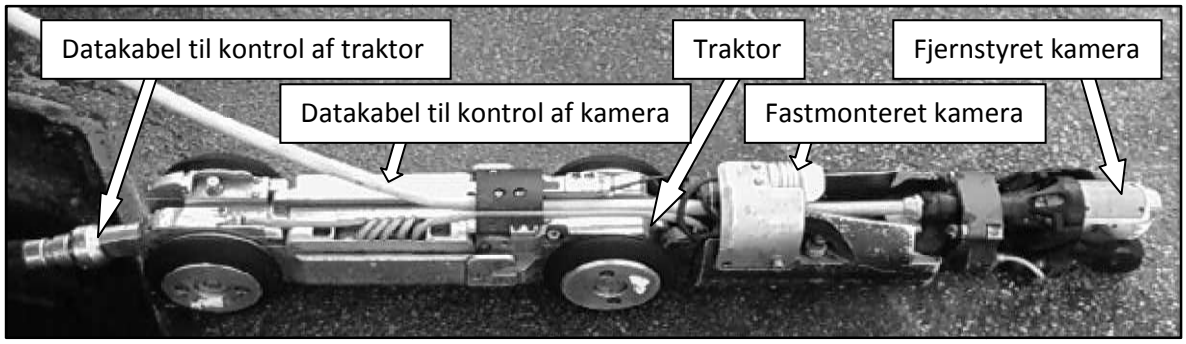
Per Aarsleff A/S er en entreprenørvirksomhed, der udfører forskellige infrastrukturprojekter og især har fokus på funderingsopgaver samt renoveringsopgaver af eksisterende rørsystemer.
Renoveringen af rørsystemer omfatter både underjordiske afløbsrørsystemer, som kloak-, spilde- og regnvandsrør såvel som rørsystemer over jorden, eksempelvis i bygninger eller på produktionsanlæg for at undgå udsivning eller indsivning til skade for miljøet. De underjordiske renoveringsarbejder udføres oftest uden behov for opgravning, og omfatter både hovedledninger, stikledninger, der tilslutter de enkelte ejendomme til hovedledningerne, samt samlinger mellem hoved- og stikledningerne. Den opgravningsfrie renovering i form af tætning, korrosionsbeskyttelse eller genopbygning af et afløbsrør består i en 'strømpeforing', der er et stykke blødt plastmateriale, som indskydes i afløbsrørets defekte del, hvor den hærdes til en hård og glat overflade. (Aarsleff, 2009)

Forud for denne renovering af et defekt afløbsrør udføres en tv-inspektion af rørsystemet. Denne inspektion udføres med en specialdesignet fjernstyret bil, kaldet en traktor. Det var kortlægning af traktorens position under disse inspektioner, der var emnet for mødet den 23. februar 2009.

A.1.1 Nuværende TV-inspektion af afløbsrør

Systemet, som Per Aarsleff A/S benytter ved tv-inspektion af underjordiske rørsystemer, består i en totalløsning, specialinstalleret i en mindre lastbil. Per Aarsleff A/S har i Danmark 14 TV-inspektionsbiler, der alle anvendes dagligt. Nypris for en TV-inspektionsbil med fuldt udstyr ligger mellem 2- 2,5 mio. kr.

Totalløsningen er udviklet af det tyske firma, IBAK Helmut Hunger GmbH & Co. KG (IBAK). Komponenterne, der indgår i totalløsningen er et fjernstyret kamera monteret på en fjernstyret traktor samt noget software. Traktorerne er alle forskelligt designet alt efter, hvilken rørtype og opgave de skal anvendes til, se Billede A.1. På traktoren er oftest også monteret to afstandsmålere til at bestemme afstanden hhv. traktoren har tilbagelagt fra startpositionen, samt hvor langt kameraet er skudt væk fra traktoren. Derudover kan der desuden være installeret en højdemåler. Kommunikationen med traktoren foregår via en kabelløsning, der er forbundet direkte til et kontrolrum i lastbilen, hvor tilstanden af rørsystemets forskellige dele, samt kameraets umiddelbare position, manuelt noteres til dokumentation.

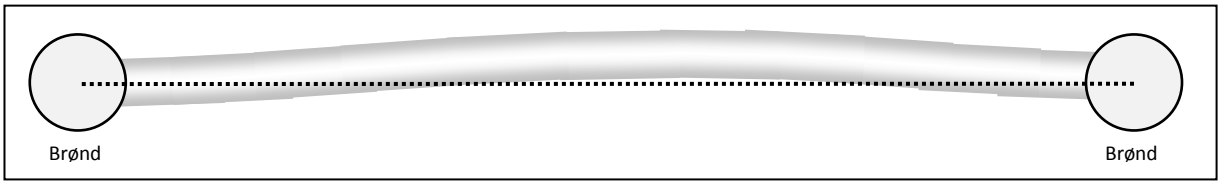


Billede A.1: Design af én af Per Aarsleff A/S' traktorer, som benyttes ved tv-inspektion af kloak rør.

Tv-inspektionerne af afløbsrør foregår ved, at traktoren sænkes ned i bunden af en brønd, hvor den efter øjemål placeres i centrum af brønden, eftersom centrum af brønddækslet og koten ned til bunden af hovedledningen er kendt. Derefter styres traktoren gennem hovedledningen, der oftest har en diameter på 200 mm eller større, indtil den ankommer til en ny brønd, efter ca. 100 meters kørsel. Ved fuld hastighed kan traktoren tilbagelægge de 100 meter på ca. 5 minutter. Mellem de to brønde tilsluttes stikledningerne, der forbinder de enkelte bygningers afløb til hovedledningerne. Antallet af stikledninger, der tilsluttes hovedledningen på en 100 meters strækning varierer, men overstiger typisk ikke 10 tilslutninger. Stikledningernes diameter er mellem 100 – 150 mm, hvor sidstnævnte størrelse er hyppigst forekommende. Grundet stikledningernes diameter og deres tilslutning til hovedledningen, er det ikke muligt at køre traktoren ind i stikledningerne, hvorfor tv-inspektionen i stedet foregår ved at traktoren placeres foran stikledningens tilslutning til hovedledningen, hvorfra det fjernstyrede kamera skubbes ind i stikledningen.

Under tv-inspektionen registreres tilstanden af alle rørmodulernes samlinger for både hoved- og stikledningerne. Der er omtrent en samling for hver meter. For at lette eventuelle renovationsarbejder af en rørsamling registreres afstanden fra hovedledningen til kameraets placering for hver samling mens placeringen af en stiklednings tilslutning til en hovedledning bliver registeret efter klokkeslæt, f.eks. kl. 2, for øverst til højre for traktoren. Det benyttede software fra IBAK giver mulighed for en egentlig kortlægning af kameraets position, som Per Aarsleff A/S dog ikke finder tilfredsstillende

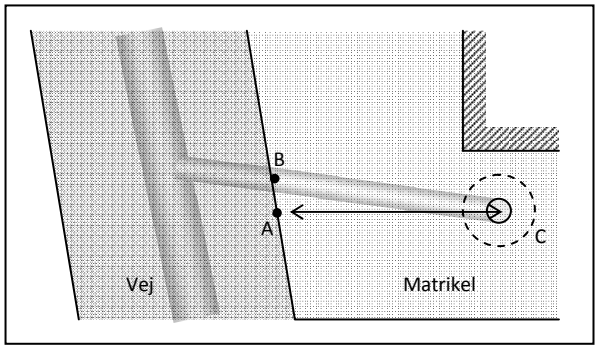
og derfor ikke benytter. Der er tale om en polær positionsbestemmelse, hvor afstanden automatisk registreres af odometret i forhold startpositionen, mens retningen manuelt skal registreres, og bestemmes ud fra typen af de enkelte rørmoduler, hvor der findes forskellige standardknæk. Retningsbestemmelsen forudsætter dog at de enkelte rørmoduler er samlet, samt standardvinklen på rørmodulets knæk, er perfekt, hvilket ikke altid er tilfældet, se Figur A.1.



Figur A.1: Stiplede linje repræsenterer den placering som rørmodulerne antages at følge mellem to brønde.

Eftersom rekvirenterne af tv-inspektioner af afløbsrør i Danmark oftest er forsyningsselskaberne, skal stikledningerne kun tv-inspiceres delvist, eftersom grundejeren selv skal forestå evt. renoveringsarbejder af afløbsrør fra skel. Skelgrænsen er ikke markeret i stikledningen, hvorfor tv-inspektionen af disse forsætter frem til skelbrønd. Skelbrøndes placering på matriklen er dog meget varierende så operatøren af kameraet skal derefter manuelt positionsbestemme det fjernstyrede kamera i marken ved hjælp af en radiosonde, der under gode forhold kan detektere signaler fra 5 m dybde (Radiodetection, 2008). Fra positionen, hvor radiosignalet er højest benyttes et målebånd til at bestemme afstanden ud til det punkt som operatøren vurderer, er stikledningens skæring med skelgrænsen, hvilket nemt kan forårsage en fejlpositionering, se Figur A.2. I visse tilfælde er der desuden behov for at rekvirere en landinspektør til at fastlægge en position af kameraet, f.eks. hvis det vurderes nødvendigt at foretage en opgravning for at foretage renoveringen eller ved mangel på skelbrønd som pejling på stikledningens retning fra hovedledning og ind til skel.

Når alle hovedledningens samlinger samt alle tilsluttede stikledninger er inspiceret mellem to brønde, bliver traktoren hævet op af brønden, hvorfra inspektionen startede.



Figur A.2: Stikledningens egentlige skæring med skel (B), bestemmes fejlagtigt til A på baggrund af afstandsmåling fra radiosignalet ved skelbrønd (C).

A.1.2 Problem ved nuværende metode

Forsyningsselskaberne, som ejer hovedledninger og stikledninger ind til skel, har ikke kortlagt disse ledningers placering. Derfor skal positionen af hvert modul bestemmes gennem tv-inspektionen. Ved renovationsarbejder, der kræver en opgravning for eksempelvis at udskifte et rørmodul, er den nuværende positionerings metode ikke tilfredsstillende grundet for stor usikkerhed på især stikledningernes egentlige forløb, samt behovet for at rekvirere en landinspektør ved visse opgaver og deraf følgende merudgifter for udførelse af tv-inspektionen.

Et andet aspekt ved den nuværende metode til positionering er, at den er tidskrævende eftersom operatøren manuelt, skal foretage opmålingsarbejde i marken ved positionering af stikledningens forløb ved skelgrænser.

Tv-inspektionen af en stikledning tager i snit 30 min, og en inspektionsopgave kan have en varighed fra én til seks timer, hvor driftsomkostningerne beløber sig til ca. 1000 kr/time.

A.1.3 Ønsker til ny positionerings metode

Det Per Aarsleff A/S, ifølge Carsten Jensen, har af behov og ønsker til et nyt positioneringssystem af traktoren og det fjernstyrede kamera, er et system, der først og fremmest kan oplyse den plane position på terrænniveau. Positioneringssystemet skal have karakter af at GPS lignende system, der fungerer under jorden, dvs. en position af traktor og kamera opdateres løbende på baggrund af et indtastet startkoordinat, så operatøren undgår markarbejde. Løsningen skal helst være real-time positionering, så operatøren kan følge med i positionen fra kontrolrummet i lastbilen, men en løsning, hvor den løbende position først beregnes efter endt tv-inspektion, vil dog også være tilfredsstillende.
Carsten Jensen lagde vægt på, at projektgruppen skulle se helt bort fra spørgsmålet om, hvorledes et evt. løsningsforslag skulle monteres på traktor og kamera, da der foruden instrumentets størrelse vil være en lang række problemstillinger som hygiejne og vandtæthed mv. som Per Aarsleff A/S har en række teknikere, der er eksperter i at løse. Projektgruppen skulle derfor ligge fokus i det matematiske aspekt af en løsning der leverer en position, som nemt eller automatisk kan udtegnes med et eksisterende kortværk som baggrund, f.eks. et matrikelkort. Carsten Jensen oplyste, at der i det IBAK software de benyttede også var inkluderet et GIS-modul, som de dog ikke benyttede endnu, men udtegningen af positionen kunne foretages heri om muligt.
For at få de bedste betingelser ved opgravningsarbejder skal den plane position være bestemt med en nøjagtighed på ±0,5 m. Koten er også af interesse i det omfang, at nøjagtigheden er så høj, at den kan benyttes til at estimere faldet, eftersom dette er varierende i ledningerne.

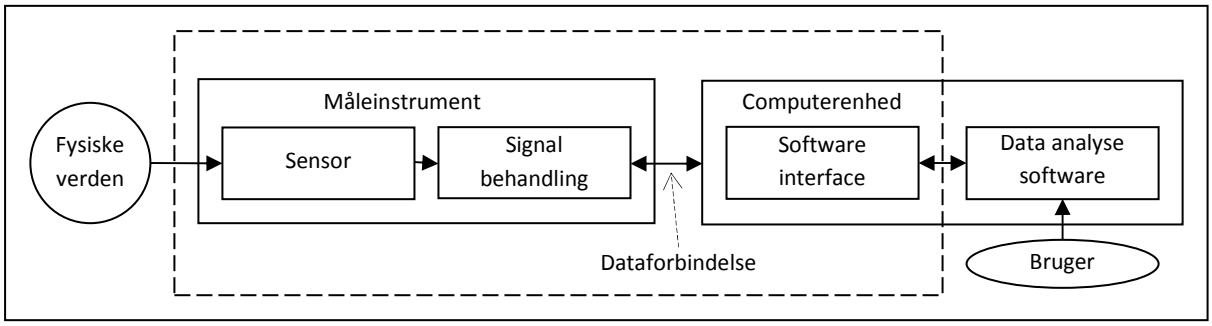
Bilag B - Dataforbindelse

Formålet med dette bilag er at klarlægge, hvordan der indsamles data til en computer, fra de i projektet benyttede eksterne måleinstrumenter, gennem seriel forbindelse.
Først beskrives i afsnit B.1 principielt, hvordan et data indsamlingssystem er opbygget. Derefter beskrives i afsnit B.2, hvad der forstås ved en seriel forbindelse og hvordan en sådan fungerer, hvorefter afsnit B.3 beskriver forskellige formateringsmuligheder af data, når det overføres gennem den serielle forbindelse med fokus på de formateringstyper, som anvendes i de benyttede instrumenter i projektet. Afsnittet afsluttes med en gennemgang af, hvordan data fra de benyttede instrumenter kan valideres inden det benyttes videre i databehandlingen, så der undgås at bruge data, der er modtaget fejlbehæftet.

B.1 Dataindsamlingssystemers opbygning

Formålet med dette afsnit er at beskrive den overordnede proces for, hvordan en hændelse i den fysiske verden kan registreres og efterfølgende behandles og analyseres på en computer. Medmindre andet er angivet, er nedenstående beskrevet med baggrund i Matlab (2007a).

Et data indsamlingssystem består af to hovedkomponenter, et måleinstrument, der kan opfange specifikke fænomener fra den fysiske verden og en computer, der kan vise og behandle målingen, se Figur B.1.



Figur B.1: Processerne der indgår fra en sensor estimerer et fænomen fra den fysiske verden, til denne måling er konverteret til et signal, der kan behandles og analyseres på en computer.

Måleinstrument
Et måleinstrument kan opdeles i to hovedkomponenter, en eller flere sensorer og hardware, der kan omdanne sensorregistreringerne til data, der kan kommunikeres til en computer. Der findes mange forskellige typer af sensorer, som hver især kan registrere fænomener fra den fysiske verden, f.eks. en mikrofon, der kan registrere lydbølger, accelerometer, der kan registrere accelerationer mv. Det registrerede signal fra sensorerne angives ofte som en elektrisk spænding, hvilket en computer ikke direkte kan aflæse, hvorfor det registrerede signal skal igennem en behandling før det kan kommunikeres videre fra måleinstrumentet.

Signalbehandlingen kan bestå i at filtrere støj fra signalet eller forstærke signalet, så det bliver genkendeligt for den enhed, der skal konvertere signalet til at være læsbart for computeren. Hvis måleinstrumentet indeholder flere sensorer, består en del af signalbehandlingen i at sikre, at signaler fra hver af sensorerne bliver konverteret i den korrekte rækkefølge og aflæst fra sensorerne med den korrekte frekvens, så der undgås tabte registrerede signaler.

Dataforbindelse

For at de konverterede signaler fra måleinstrumentet kan kommunikeres videre til en computer, skal der opsættes en dataforbindelse mellem disse komponenter. Dette kræver, at der i såvel måleinstrument som computeren, er installeret et kommunikationsstik, som via et kabel kan forbinde komponenterne. Kommunikationen mellem komponenterne foregår enten gennem en parallel eller seriel forbindelse. En seriel forbindelse kan kommunikere data i begge retninger, men kun én retning af gangen, mens en parallel forbindelse muliggør, at der kan overføres data i begge retninger samtidig, da den består af flere forbindelseslinjer. Der er for hver af forbindelsestyperne udviklet flere forskellige standarder for, hvordan data kan kommunikeres mellem komponenterne, så som USB, FireWire, Ethernet, RS-232 mv. (Axelson, 2000:6)

I projektet benyttes måleinstrumenterne, Azimuth 1000 produceret af KVH Industries Inc., IMU400CC-100 produceret af Crossbow Technology Inc. samt GPS System 500 produceret af Leica Geosystems. Instrumenterne er alle designet til at kommunikere gennem en RS-232 seriel forbindelse, hvorfor parallel forbindelser ikke beskrives nærmere.

Computerenhed

En computer er opbygget af en række hardware komponenter, som foruden kommunikationsstik, der muliggør dataforbindelse med eksterne enheder som måleinstrumenter, bl.a. også omfatter processor til beregningsopgaver, hukommelsesenheder til lagring af data og et ur. Før brugeren gennem computeren kan modtage data samt styre måleinstrumenter via dataforbindelsen, er det nødvendigt, at der på computeren udvikles og lagres et software interface, der gør, at det benyttede styresystem, f.eks. Windows XP eller en Linux distribution, kan kommunikere via den installerede serielle port i computeren. Opgaven for et software interface er at sørge for, at de serielle forbindelser opsættes og integreres korrekt med det øvrige hardware i computeren, samt at sørge for transporten af data til og fra de serielle kommunikationsstik i computeren.

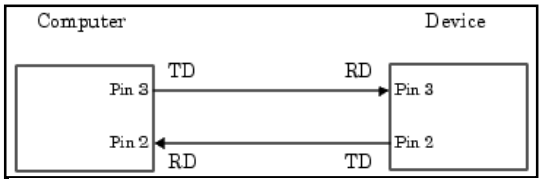
Når software interfacet er installeret korrekt, er det muligt at udvikle programmer til styresystemet, som kan benytte sig af den serielle forbindelse. Et sådant program kan bl.a. benyttes til at analysere, viderebehandle og lagre det indkomne data mv. eller sende data eller kommandoer til måleinstrumenterne forbundet via dataforbindelsen.

Afgræsning

Bilaget beskæftiger sig ikke yderligere med, hvorledes det enkelte måleinstrument registrerer og konverterer en måling, så den kan behandles af en computer. Til gengæld vil bilaget indeholde en nærmere beskrivelse af, hvorledes der kan oprettes dataforbindelse til de benyttede måleinstrumenter, samt hvordan der i Matlab udvikles et software interface, der via dataforbindelsen, kan kommunikere med måleinstrumenterne og lagre de målinger, der er foretaget.

B.2 Seriel Forbindelse

Formålet med dette afsnit er at beskrive, hvordan en seriel forbindelse fungerer, med fokus på standarden RS-232, da de benyttede måleinstrumenter i projektet anvender denne standard.
Først beskrives i underafsnit B.2.1, hvad der forstås ved en asynkron seriel forbindelse, der er forbindelsestypen som benyttes til instrumenterne. I underafsnit B.2.2 beskrives efterfølgende RS-232 standarden som er den konkrete asynkrone forbindelse der anvendes af instrumenterne der anvendes i projektet.

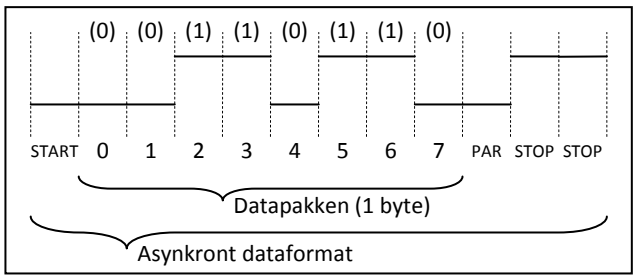


Figur B.2: Seriel forbindelse mellem to enheder. TD = afsender, RD = modtager.

En seriel forbindelse kan benyttes til at transportere data mellem to enheder, f.eks. en computer og et måleinstrument. De fleste serielle forbindelser kan transportere data i begge retninger mellem de to tilsluttede komponenter, se Figur B.2, men har kun en transportlinje dedikeret til hver retning. En datapakke, som oftest er på 8 bit (1 byte), transporteres en bit af gangen. Ved en bit forstås en værdi, der kan antage enten 1 eller 0, og repræsenteres i den serielle forbindelse som enten en elektrisk spænding eller ingen spænding (Matlab, 2007b). De to komponenter, der er forbundet ved den serielle forbindelse benytter en tidsreference til at afgøre, hvornår en bit skal sendes og modtages. Der findes grundlæggende to formater for, hvordan data transporteres over en seriel forbindelse, der benytter hver sin type af tidsreference, hhv. synkron- og asynkron forbindelse. (Axelson, 2000:11).
Asynkron forbindelse er den mest udbredte serielle forbindelsestype og den som de benyttede måleinstrumenter anvender, hvorfor kun den asynkrone serielle forbindelse beskrives i det følgende.

B.2.1 Asynkron seriel forbindelse

I en asynkron seriel forbindelse anvender begge tilsluttede enheder hver sin tidsreference, der dog anvender samme frekvens. Forud for hver datapakke som transporteres mellem de tilsluttede enheder sendes en 'start bit', der sørger for at synkronisere de to enheders tidsreferencer, mens der efter afsendelsen af selve datapakken også sendes en eller to 'stop bits' til at indikere, at overførslen af datapakken er færdig, se Figur B.3. Datapakkens først afsendte bit i en asynkron forbindelse, bit 0, benævnes 'least significant bit' (lsb) mens bit 7 benævnes 'most significant bit' (msb). Foruden ovennævnte, kan det vælges at medsende en ekstra 'parity bit' (PAR), der muliggør et simpelt tjek af, om hele den afsendte datapakke også er modtaget uændret, hvilket f.eks. kunne skyldes ekstern støj eller at en enkelt bit i datapakken ikke er modtaget. (Axelson, 2000:13) (Matlab, 2007b)



Figur B.3: Asynkront dataformat. Numre i parentes angiver bit-værdi. Numre nederst angiver bit-nummer i datapakken.

Det er kun selve datapakken, som lagres på computeren, mens de op til fire bits, der omkranser datapakken fjernes igen efter modtagelse. Hver bit i datapakken kan repræsentere alt fra en tekstbe-

sked til en værdi, og kan være formateret efter forskellige standarder, jf. afsnit B.3 (Axelson, 2000:19).

B.2.2 RS-232 standarden

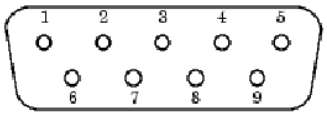
RS-232 er en af flere standarder for seriel forbindelse, og er udviklet i 1960erne, men er siden revideret flere gange og har skiftet navn til TIA/EIA-232. Der refereres stadig til standarden som RS-232. RS-232 er udviklet til at håndtere kommunikationen mellem to enheder. Standarden definerer ikke det format som data overføres, men definerer i stedet den maksimale hastighed som data kan overføres med, kabellængde, karakteren af det elektriske signal som sendes gennem kablet, samt designet af kommunikationsstikkene, der muliggør den serielle forbindelse til og fra de tilsluttede enheder (Matlab, 2007b).

Overførselshastighed

Hastigheden for dataoverførsel defineres som antal bits, der kan overføres på et sekund (bps). Tidspunktet for, hvornår en seriel forbindelse skal sende/modtage en bit, bestemmes på baggrund af et ur som bestemmer tiden med en frekvens, der skal være 16 gange hurtigere end den overførselshastighed der ønskes. Det er normalt, at uret, som er indbygget i den hardware, der behandler RS-232 forbindelsen, har en frekvens på 1,8432 Mhz, hvilket giver en maksimal overførelseshastighed af data via RS-232 på 115.200 bps. (Axelson, 2000:17)

Kommunikationsstik

RS-232 er oprindelig defineret til at kommunikere gennem DB-25 stik, men gennem tiden har de fleste enheder skiftet til at benytte DB-9 stik, der i stedet for 25 ben har 9 ben, der kan sendes signaler igennem, se Tabel B.1. Minimumskravet for at, data kan transporteres via en RS-232 forbindelse er, at ben 2, 3 og 5 er forbundet mellem de to enheder. De øvrige ben i DB-9 stikket benyttes efter RS-232 standarden til at kontrollere transporten af data gennem den serielle forbindelse, kaldet 'handshake' mellem de forbundne instrumenter. (Matlab, 2007b)



Ben	Forkortelse	Signal navn	Signal type
1	CD	'Carrier Detect'	Kontrol
2	RD	Modtaget data	Data
3	TD	Afsendt data	Data
4	DTR	'Data Terminal Ready'	Kontrol
5	GND	'Signal Ground'	Jord
6	DSR	'Data Set Ready'	Kontrol
7	RTS	'Request to Send'	Kontrol
8	CTS	'Clear to Send'	Kontrol
9	RI	'Ring Indicator'	Kontrol

Tabel B.1: Definition af DB-9 stik i RS-232 standarden.

I de benyttede måleinstrumenter fungerer DB-9 stikkene ikke efter RS-232 standarden, hvad angår benene, der omhandler kontrol af dataforbindelsen. Det er derfor ikke muligt at kontrollere, hvornår data afsendes og modtages gennem RS-232 standarden, såkaldt hardware handshake, men dette er dog muligt at styre gennem en ren software løsning, såkaldt software handshake (Axelson, 2000:20-23).

B.3 Formatering og validering af datapakken

Formålet med dette afsnit er at beskrive de forskellige formateringer, som data kan antage ved overførelse gennem en seriel forbindelse, samt en metode til at validere at data er modtaget i korrekt format. Dette gøres for at forstå de data, som afsendes fra de forskellige instrumenter, således der kan udvikles software til kommunikation, indsamling og behandling af data fra instrumenterne.

Datapakken, som overføres over en RS-232 seriel forbindelse har en størrelse på 8 bit. Én bit kan som nævnt tidligere antage to værdier (0 eller 1), hvilket betyder at hver datapakke kan antage $2^8 = 256$ forskellige repræsentationer. Afhængigt af, hvad hver datapakke skal repræsentere, kan det overførte data grundlæggende være formateret som enten en talværdi, tekst eller en kombination af begge datatyper. De tre formateringstyper kaldes for binært, tekst og hexadecimal (Axelson, 2000:18-20). Af disse tre formateringstyper beskrives kun binært (underafsnit B.3.1) og tekst (underafsnit B.3.2), da ingen af de benyttede instrumenter anvender hexadecimal formateringen.

B.3.1 Binært data

Er datapakken formateret som binært data, oversættes datapakken som en binær talværdi. Et binært tal kan ligesom en bit antage to værdier, 0 og 1. Ved at sammensætte flere binære tal kan det binære talsystem i princippet repræsentere enhver værdi, ligesom titals-systemet, se Tabel B.2.

Binært talsystem	Titals system
0	0
1	1
10	2
11	3
11111111	255
111111111111	4095

Tabel B.2: Sammenligning af talsystemer.

De 8 bit, som er størrelsen af en datapakke ved en er en RS-232 forbindelse, begrænser dog antallet af binære tal til 256 forskellige værdier.
Hvis datapakken er formateret som et binært tal, er der dog ikke entydigt en bestemt kombination af binære tal repræsenterer værdier mellem 0-255. Dette skyldes eksempelvis, at det kan være nødvendigt at repræsentere negative tal, men det er som standard ikke en del af datapakkens format at definere fortegnet på talværdien, som overføres.

IMU400CC-100

Dataoverførslen fra instrumentet, IMU400CC-100, er formateret som binært data. Udviklerne af IMU400CC-100 har vurderet det nødvendigt, at data skal kunne antage negative værdier, og derfor er målingerne, som afsendes fra instrumentet, hovedsageligt defineret som 16 bit '2-komplement' binært data. 16 bit tal kan maksimalt antage $2^{16} = 65.536$ forskellige værdier. '2-komplement' binært data betyder, at de 256 repræsentationer af 8 bits datapakken, i en RS-232 seriel forbindelse, kan antage heltals værdier mellem ÷128 → 127, se Tabel B.3, For 16 bit formateret som 2-komplement, spænder de i alt 65.536 forskellige værdier, mellem heltals værdier fra ÷32.768 → 32.767. Hvis data-

pakken er defineret, så den kan antage både positive og negative værdier, kaldes datapakken for at være 'signed', modsat en datapakke som kun kan antage positive værdier (0-255) som kaldes for 'unsigned'.

	Datapakke								
msb	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	lsb		**Titals system**
0	1	1	1	1	1	1	1	=	127
0	1	1	1	1	1	0	1	=	126
0	0	0	0	0	1	0	0	=	2
0	0	0	0	0	0	1	0	=	1
0	0	0	0	0	0	0	0	=	0
1	1	1	1	1	1	1	1	=	-1
1	1	1	1	1	1	0	1	=	-2
1	0	0	0	0	0	1	0	=	-127
1	0	0	0	0	0	0	0	=	-128

Tabel B.3: Definition af 2-komplements binært talsystem (Wikipedia, 2009).

Princippet i 2-komplement definitionen er, at msb angiver fortegnet af tallet, mens de øvrige 7 bits af datapakken repræsenterer selve talværdien, hvilket giver 7^2 = 128 forskellige værdier, der er hhv. negative og positive. For hver positiv værdi er der en tilsvarende negativ værdi, der principmæssigt er defineret som komplementet af den binære talkombination for den positive værdi. De negative tal er dog forskudt med -1 for at undgå to repræsentationer af tallet 0 (00000000 og 11111111). (Wikipedia, 2009a)

IMU400CC-100 kan opsættes til at afsende data efter to formater, hvor projektgruppen har valgt, at data skal afsendes i Scaled Sensor mode, der gør at det afsendte data er temperatur korrigeret og tilpasset til at repræsentere fysiske enheder (Crossbow, 2007). Data for en måling med IMU400CC-100 i Scaled Sensor mode, består af i alt 18 afsendte bytes, se Tabel B.4.

Byte	Scaled Sensor Mode	Type	Afsendt definition	
0	Header	(255)	Unsigned	8 bit
1	Roll Rate	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
2		(LSB)	Unsigned	
3	Pitch Rate	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
4		(LSB)	Unsigned	
5	Yaw Rate	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
6		(LSB)	Unsigned	
7	Acceleration X	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
8		(LSB)	Unsigned	
9	Acceleration Y	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
10		(LSB)	Unsigned	
11	Acceleration Z	(MSB)	Signed	16 bit 2-komplement
12		(LSB)	Unsigned	
13	Temperatur	(MSB)	Unsigned	16 bit
14		(LSB)	Unsigned	
15	Tid	(MSB)	Unsigned	16 bit
16		(LSB)	Unsigned	
17	Checksum		Unsigned	8 bit

Tabel B.4: Oversigt over formatet af det afsendt data, for en måling med IMU400CC-100 i Scaled Sensor Mode. (Crossbow, 2007)

Konvertering af data til 16 bit

Det fremgår af Tabel B.4, at det kun er afsendt data for Header og Checksum, hvis værdier repræsenteres som 8 bit, og dermed kan anvendes uden yderligere konvertering. De øvrige målinger, f.eks. Roll Rate, er alle defineret som 16 bit. Idet alt data, der kommunikeres over den serielle forbindelse afsendes som 8 bit datapakke (1 byte), består en 16 bits måling, af to afsendte bytes, en most significant byte (MSB) og en least significant byte (LSB), der efterfølgende skal konverteres til en 16 bit værdi, se Ligning B.1. (Eistrup et al., 2005b:Appendiks D)

Konvertering til 16 bit

$$Data_{16} = MSB_8 \cdot 256 + LSB_8 \qquad (B.1)$$

Hvor,

MSB er 8 bit enten signed eller unsigned.

LSB er 8 bit unsigned.

Indekset for $Data$, MSB og LSB angiver antallet af bits den pågældende værdi er repræsenteret.

For at forstå Ligning B.1, eksemplificeres funktionen nedenfor, repræsenteret i det binære talsystem. Både MSB og LSB har værdien 100 i eksemplet. For at repræsentere værdien 256 i det binære talsystem, kræves min. 9 bits, da 8 bits som nævnt kan antage værdier mellem 0-255. Når en 8 bits værdi som MSB multipliceres med 256, forskydes MSB i princippet 8 bit pladser til venstre, markeret med grå i Tabel B.5, hvorved et 16 bit tal fremkommer, med nuller på de første otte bit pladser mod til højre.

Talsystem	Beregning				Resultat
	$8\ bit\ (MSB)$		$9\ bit$		$16\ bit$
Binært:	01100100	×	100000000	=	0110010000000000
Titals:	100	×	256	=	25600

Tabel B.5: Binært eksempel for multiplicering af et 8 bit tal med værdien '256' og heraf kommet 16 bit tal, da de 8 bit flyttes otte bit-pladser med venstre.

Derefter adderes LSB med det fremkomne 16 bit resultat fra Tabel B.5. LSB ændrer ved en addition kun de binære tal-værdier for de otte bit-pladser længst mod højre, grundet sin maksimale værdi på 255. Denne ændring er markeret med grå i Tabel B.6.

Talsystem	Beregning				Resultat
	$16\ bit$		$8\ bit\ (LSB)$		$16\ bit$
Binært:	0110010000000000	+	01100100	=	0110010001100100
Titals:	25600	+	100 (LSB)	=	25700

Tabel B.6: Binært eksempel for et 8 bit tals addering med et 16 bit tal, og heraf ændring af de første otte bit pladser mod højre.

Konvertering af data til fysiske enheder

For Roll, Pitch, Yaw, de tre accelerationer samt temperaturen, er det ikke tilstrækkeligt kun at konvertere til 16 bit, før målingerne kan benyttes. Der kræves yderligere en konvertering af det afsendte data til fysiske størrelser, fordi de afsendte da kommer som elektriske størrelser, da det er MEMS sensorer der anvendes. De afsendte data konverteres derfor ved, at multiplicere nogle konstanter på hver 16 bit måling, se Ligning B.2 - B.4. (Crossbow, 2007)

Acceleration som kraft (G)

$$Acceleration = Data_{16} \cdot GR \cdot \frac{1{,}5}{2^{15}} \quad \text{(B.2)}$$

Hvor,
GR af producenten er defineret til 2 G.

Drejning som vinkelhastighed ($°/s$)

$$Roll, Pitch, Yaw = Data_{16} \cdot RR \cdot \frac{1{,}5}{2^{15}} \quad \text{(B.3)}$$

Hvor,
RR af producenten er defineret til 100.

Temperatur (°C)

$$Temperatur = \left(Data_{16} \cdot \frac{5}{4096} - 1{,}375\right) \cdot 44{,}44 \quad \text{(B.4)}$$

B.3.2 Tekst data

Binært data er velegnet til at repræsentere tal, men vil ikke være velegnet til information, der tager form af tekstbeskeder eller anden information, der kombinerer både tal og tekst. For at kunne sende

tekst via dataforbindelsen anvendes en kodetabel, der oversætter hver af de 256 bits-repræsentationer til et tegn. Der findes forskellige tegnsæt, som definerer hvilke binære talværdier, der repræsenterer bestemte bogstaver og andre tegn, så som tegnsættene ASCII (American Standard Code for Information Interchange). (Axelson, 2000:19) Eksempelvis er bogstavet 'a' i ASCII tegnsættet fastsat til at være repræsenteret ved den binære talværdi, 01000001 (Gyldendal, 2009a).

NMEA 0183

Dataoverførslen fra instrumentet, Azimuth 1000 og GPS System 500, er formateret som en tekst efter standarden NMEA 0183 (The National Marine Electronics Association).

NMEA 0183 standarden definerer, at datapakken skal afsendes fra instrumentet som ASCII karakterer, og data for en måling skal repræsenteres i sætninger, som starter med $ og ender med <CR> <LF>. Sætningerne kan være på op til 80 karakterer udover $ og <CR> <LF>. (Betke, 2001)

Azimuth 1000

Sætningerne fra et elektronisk kompas som Azimuth 1000, leveres på følgende sætnings format:

$HCHDM,x.x,M*hh<CR><LF>

I ovenstående sætning beskriver 'HC', at det er et magnetisk kompas og 'HDM' specificerer, at det er i forhold til magnetisk nord. 'x' plads angives kursen i grader med 1/10 nøjagtighed og 'M' betyder, at det er magnetisk. '*' betyder, at sætningen er afsluttet og 'hh' angiver checksummen, hvorudfra det kan kontrolleres, om der er modtaget en fuldstændig sætning via dataforbindelsen. <CR> <LF> betyder at pakken er færdig. En nærmere beskrivelse af beregning og kontrol af checksummen kan findes i afsnit B.3.3. (Betke, 2001)

GPS System 500

GPS-modtageren, GPS System 500, har indbygget flere forskellige sætningstyper, der følger NMEA 0183 standarden for opbygning sætningen, indeholdende forskelligt relevant data, som ønskes overført via dataforbindelsen. GPS-modtageren benyttes til at simulerer en afstandsmåler. En tilbagelagt afstand mellem to målinger, kan beregnes på baggrund af to sæt koordinater, hvilket kan leveres ved at benytte den indbyggede LLQ-sætning, som har følgende format:

$GPLLK,hhmmss.ss,mmddyy,eeeeee.eee,M,nnnnnn.nnn,M,x,xx,x.x,x.x,M*hh<CR><LF>

I ovenstående sætning er det data, der er relevant i projektet understreget. Læst fra venstre mod højre repræsenterer 'eeeeee.eee' koordinatet for den østlige akseretning, bestemt med en nøjagtighed i millimeter. 'M' angiver at koordinatet er i meter. 'nnnnnn.nnn' repræsenterer koordinatet for den nordlige akseretning. 'xx' angiver antallet af satellitter, der indgik i positionsbestemmelsen. Første 'x.x' angiver Quality, der er en beregnet kvalitetsværdi for positionsbestemmelsen beregnet som $PDOP \cdot HDOP$, mens den anden 'x.x' repræsenterer et koordinat for højden over middelvandstand. 'hh' angiver checksummen, hvorudfra det kan kontrolleres, om der er modtaget en fuldstændig sætning via dataforbindelsen. En nærmere beskrivelse af beregning og kontrol af checksummen kan findes i afsnit B.3.3. (Leica, 2002:Appendiks E)

B.3.3 Validering af indsamlet data

Når der er en hel datapakke klar til modtagelse fra bufferen til et af instrumenterne, modtages og lagres den. Inden datapakken lagres, foretages et tjek af, om hele datapakken er modtaget i samme form som den blev produceret. Da computere ofte udfører andre opgaver end blot at afvente og tjekke, om der er data klar til modtagelse fra instrumenter, kan det risikeres, at en afsendt datapakke er gået tabt mellem instrument og computer. Axelson (2000:20-24) beskriver flere metoder til at undgå tab af data. En populær og simpel metode er at foretage et såkaldt checksum-tjek, der grundlæggende betyder, at en del af hele den afsendte datapakke udgør en repræsentativ værdi (checksums-værdien) for hele den afsendte datapakke, og ved at udføre en specifik beregningsmetode på hele datapakken fås en værdi svarende til checksums-værdien, hvis hele datapakken er modtaget korrekt.

For alt det data som indsamles med NS-1002, foretages et sådan checksum-tjek af datapakken inden den lagres. Beregningsmetoden er ens for data fra Azimuth 1000 og GPS System 500, da data modtages som en NMEA-sætning. Valideringen af data fra IMU400CC-100 benytter en anden beregningsmetode. Begge metoder beskrives kort nedenfor.

Datavalidering af NMEA sætninger

Checksum-værdien i en NMEA sætning er en hexadecimal værdi, som allerede beskrevet i afsnit B.3.1 og B.3.2. Beregningsmetoden for checksum af datapakken til sammenligning med den medsendte checksum-værdi foretages som beskrevet i KVH (2009a:48); *"The checksum is calculated by XOR'ing together all the characters in the sentence…'*, hvilket I Matlab kan udføres med funktionen *bitxor()*.

Datavalidering fra IMU400CC-100

Checksum-værdien i data fra IMU400CC-100 er et 8-bit unsigned tal, jf. Tabel B.4. Beregningsmetoden for checksum af datapakken til sammenligning med den medsendte checksum-værdi, kan ifølge instrumentets medfølgende manual (Crossbow, 2007), foretages ved:

1. Summere værdien af datapakkens byte 2 til byte 17, jf. Tabel B.4.
2. Dividerer summen med 256.

Den resulterende værdi skulle herefter være lig den medsendte checksum-værdi. Det er ikke lykkedes at få denne beregningsmetode til at fungere. Projektgruppen har i stedet benyttet en anden beregningsmetode som bygger på et kode-eksempel, for indsamling af data fra IMU400CC-100 udviklet af Crossbow, jf. Figur B.4. I kode-eksemplet summeres værdierne fra byte 2 til 17 ligeledes, men på den resulterende værdi foretages i stedet en 'bitwise AND' kommando, repræsenteret ved det markerede &-tegn i Figur B.4 (Wikipedia, 2009b). Dette kan i Matlab udføres med funktionen *bitand().* Kort fortalt gør en 'bitwise AND', at den summerede værdi repræsenteres binært, og de første 8 bit af denne værdi sammenlignes den binære repræsentation af den medsendte checksum-værdi, der ved overensstemmelse betyder at datapakken er modtaget korrekt.

```
for (i=1; i<packetSize-1; i++) {
    checksum += packet[i];
}
if (packet[i] != (checksum & 0xFF)) {
fprintf(gErr, '\nbad checksum: ');
retVal = FALSE;
}
```

Figur B.4: Udsnit af C-kode, der omhandler Checksum beregning. Bilag CD.04.

Bilag C - Tilgængelige instrumenter

Formålet med dette bilag, er opnå en generel forståelse af de instrumenter, der er tilgængelige for projektgruppen, samt hvorledes disse fungerer.
Dette gøres, da det er vigtigt at have en forståelse af de instrumenter, der er mulige at integrere i et NS, der principielt kan fungerer i rørsystemer. Målet med at opnå denne forståelse for instrumenterne er at kunne minimere de fejlkilder, de enkelte målinger påvirkes af, for at maksimere den endelige nøjagtighed af det udviklede NS-1002.

De instrumenter, der vurderes egnet til et NS til brug i rørsystemer efter DR princippet, og samtidig vil være tilgængelige også i test øjemed under projektperioden, fremgår af Tabel C.1. Hvert af de fire instrumenter vil blive beskrevet nærmere i bilaget.

Instrument type	Produkt navn	Producent
Elektronisk kompas	Azimuth 1000	KVH Industies Inc.
Inklinometer	Zerotronic 10	Wyler AG
IMU	IMU400CC-100	Crossbow Technology Inc.
GNSS modtager	GPS System 500	Leica Geosystems AG

Tabel C.1: Tilgængelige instrumenter som er fundet egnet til at indgå i et NS til positionering i underjordiske kloakker, med undtagelse af GPS System 500, der benyttes til simulering af et odometer.

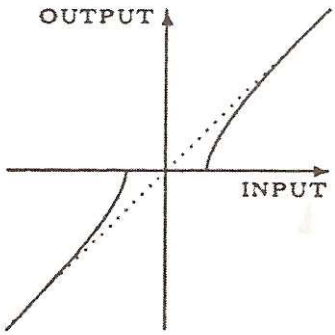
Først beskrives i afsnit C.1 to fejlkilder der er forekommende i alle sensortyper. Derefter skabes i afsnit C.2 - C.4 generel viden om teknologien der ligger bag instrumenttyperne kompas, inklinometer og IMU for at opnå en bred forståelse af de anvendte instrumenters virkemåde, samt indblik i de fejlkilder der kan påvirke målingerne disse instrumenter foretager.

C.1 Generelle fejlkilder i sensorer

Formålet med dette afsnit er kort at beskrive to fejltyper der kan forekomme i alle sensortyper, men som det ikke er muligt at korrigere outputtet for. Figurerne som benyttes til illustration af fejltyperne er konstrueret så den stiplede linje repræsenterer input, dvs. den registrerede værdi, mens den fuldt optrukne linje repræsenterer det output som instrumentet sender, efter behandling af input signalet.

Dead zone

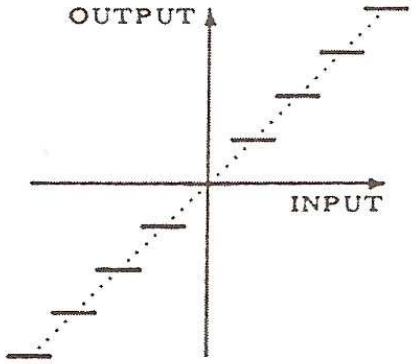
Ved dead zone forstås, at skalaen har en 'død zone', hvor der ikke registreres noget input, se Figur C.1 (Grewal, et al. 2007:337). Det betyder, at der er et input-område, hvor det ikke er muligt for sensoren, at danne et output.



Figur C.1: Dead zone (Grewal, et al. 2007:337)

Quantization

Alle sensorer har en grænse for, hvor små ændringer, der kan måles. To aflæsninger, der ligger inden for intervallet af denne mindste enhed, vil fejlagtig give samme aflæsning, kaldet Quantization, se Figur C.2. (Stovall, 1997:21)



Figur C.2: Quantization (Grewal, et al. 2007:337)

C.2 Azimuth 1000

Formålet med dette afsnit er at beskrive forskellige elektroniske kompastyper, som kan benyttes til at bestemme kursen, hvormed et objekt bevæger sig, samt opnå grundlæggende viden, om det elektroniske kompas, Azimuth 1000.

C.2.1 Generelt

Et kompas er helt overordnet et måleinstrument som kan bestemme kursen i forhold til f.eks. geografisk eller magnetisk nord. Et analogt kompas som de fleste kender, fungerer ved, at kompasset indstiller sig på baggrund af jordens magnetfelt. Kompasset består af en magnet, som er hængt op, så den kan dreje uhindret rundt i det vandrette plan.

Inden for de elektroniske kompastyper, er der to overordnede alternativer, som kan benyttes til at bestemme en kurs, ved forskellige metoder. (KVH, 2009b)

- Geomagnetisk kompas
- Gyrokompas

C.2.2 Kompastyper

Geomagnetisk kompas

Målinger af kursen vha. af geomagnetisme kendes ligeledes fra de føromtalte analoge kompastyper, hvor kursen bestemmes ud fra jordens magnetfelter. Da der måles vha. geomagnetisme, måles der i forhold til magnetisk nord. Instrumenter som måler magnetfelter kaldes magnetometre.

I et elektronisk kompas aflæses og lagres kursen digitalt og teknikken i de elektroniske kompastyper, som bestemmer kursen vha. geomagnetisme, er anderledes og mere præcis i forhold til ældre analoge kompasser. Et elektronisk kompas skal være tilsluttet en strømkilde for at fungere. I et elektronisk kompas, hvor kursen bestemmes ud fra geomagnetisme, benyttes induktion. Induktion virker ved, at der sættes strøm til en spole og når en magnet eller et magnetfelt bevæges nær eller i forhold til spolen, så induceres der strøm i spolen, som kan måles, (Fysikbasen, 2009). Ud fra den strøm, som induceres i de spoler, som er placeret i kompasset kan kursen bestemmes.

Når orienteringen af kompasset ændres, ændres dets position i forhold til magnetfeltet, hvilket påvirker de forskellige materialer i det elektroniske kompas og kursen kan fastslås.

I et elektronisk kompas, hvor der måles på baggrund af magnetisme, er der visse begrænsninger. F.eks. kan kompasset ikke benyttes, hvis det placeres på en overflade, som er magnetisk, da dette vil påvirke målingerne. (KVH, 2009b), (Borenstein et al., 1996)

Gyrokompas

Et alternativ til målinger af kurs vha. geomagnetisme er målinger vha. af et gyrokompas. I visse tilfælde kan et kompas, som bestemmer kursen ud fra geomagnetisme ikke benyttes. I disse tilfælde kan et gyrokompas benyttes.

Gyrokompasset er udarbejdet med baggrund i et hastigt roterende gyroskop. Gyrokompasset indstilles på baggrund af jordens rotationer, så det f.eks. vil pege i nord-syd retningen i forhold til geografisk nord. Ud fra jordens rotationer, vil gyrokompasset dreje mod geografisk nord, og kan dermed uanset, hvorledes f.eks. et skib bevæger sig, altid pege mod geografisk nord, og det er dermed muligt at orienterer sig på baggrund af kompasset. Dette skyldes, at gyrokompasset påvirkes af kræfterne fra jordens rotation og tyngdekraft, også kendt som corioliskraften. Herudfra bliver gyroens rotationsakse parallel med jordens rotationsakse, og på den måde viser gyroen kursen mod geografisk nord.

Under meget dynamiske forhold, er et gyrokompas ofte mere stabilt og præcist i forhold til et kompas, som er baseret på geomagnetisme.

Af negative elementer kan nævnes, at gyrokompasset ofte er dyrt, ca. 50.000 DKr. og derudover er de meget tunge og kræver meget vedligeholdelse. Desuden er de lang tid om at blive kalibreret, ofte flere timer. (KVH, 2009b), (Borenstein et al., 1996)

C.2.3 Fejlkilder

I forbindelse med brugen af et magnetisk kompas er der en række fejlkilder, der skal tages højde for. Da kursen fra Azimuth 1000 angives efter magnetisk nord, skal der tages højde for deklinationen til

geografisk nord, kompenseres for påvirkninger fra lokale magnetfelter mv. En nærmere gennemgang findes i Bilag D.

C.3 Zerotronic 10

Formålet med dette afsnit er at beskrive hvad der forstås ved et inklinometer samt dets grundlæggende funktioner.

C.3.1 Generelt

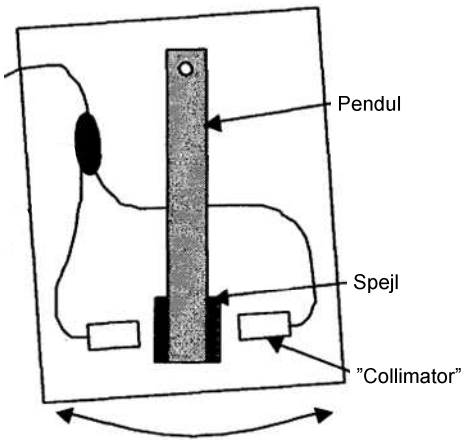
Et inklinometer er overordnet et måleinstrument som kan bestemme hældninger i forhold til det vandrette plan. Hældningerne bestemmes ved måling af tyngdekraften, hvor den måle kraft ændres afhængig af inklinometerets hældning i forhold til tyngdekraftens akse. Registreringerne kan omdannes til hældninger om det vandrette plan, da tyngdeaksen er ortogonal på det vandrette plan.

C.3.2 Inklinometer typer

Et inklinometer kan konstrueres på flere forskellige måder der muliggør registrering af instrumentets hældning i forhold til tyngdeaksen. Et konstruktionsprincip er at bestemme hældningen på baggrund af et ophængt pendul i forhold til den instrumentkasse som pendulet monteret i. Der findes forskellige metoder til at bestemme denne hældning, hvoraf to eksempler vil blive beskrevet.

Optisk

Inaudi & Glisic (2002) beskriver et konstruktionsprincip, der bygger på måling af et ophængt pendul, se Figur C.3. Pendulet følger tyngdeaksen når kassen roteres. På pendulet er monteret to spejle, der reflekterer lys udsendt fra de to 'collimator'er'. Det reflekterede lys opfanges igen og afhængig af vinklen, hvormed lyset er reflekteret tilbage, kan der beregnes en hældning af kassen i forhold til tyngdeaksen.

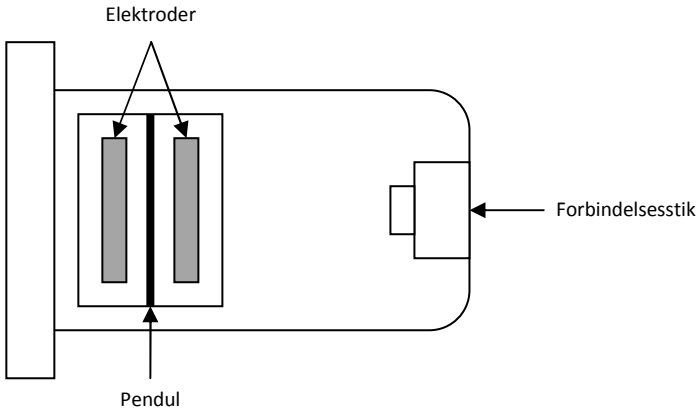


Figur C.3: Ophængt pendul påmonteret spejle der reflekterer lys i en given retning afhængig af inklinometerets hældning (Inaudi & Glisic, 2002).

Spænding

Inklinometeret, der er tilgængelig i projektet, bestemmer hældningen på baggrund af et pendul, ophængt mellem to elektroder. Når inklinometeret står vandret, er pendulet midt imellem elektroder-

ne. Når inklinometeret tipper, kommer pendulet tættere på den ene elektrode, hvilket medfører en spændingsændring mellem de to elektroder, der kan omsættes til en hældning. Inklinometeret har en simpel opbygning, hvilket vil sige, at det stort set kun indeholder teknikken til at måle hældninger (pendul og elektroder), samt et stik til udlæsning af data, se Figur C.4. (WYLER AG, 2007)



Figur C.4: Opbygning af Zerotronic inklinometer.

C.3.3 Fejlkilder

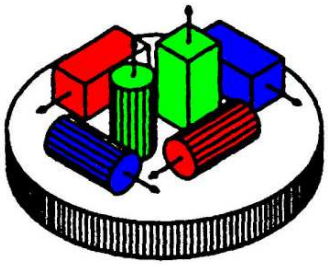
Da inklinometerets målinger er baseret på hældningsændringer i forhold til tyngdekraften, kan inklinometeret blive påvirket af ændringer i den lokale tyngdeacceleration, hvis inklinometeret flyttes over en længere afstand. Det er dog usandsynligt, at dette skulle forekomme, da der skal være væsentlige ændringer i den underliggende masse, før tyngdeaccelerationen ændres, f.eks. et skift fra land til dybt hav.

C.4 IMU400CC-100

Formålet med dette afsnit er at beskrive forskellige typer IMU'er, hvordan et sådan instrument grundlæggende fungerer, og herunder opnå konkret viden om den anvendte IMU400CC-100.

C.4.1 Generelt

En IMU består af to forskellige sensorer, accelerometre og gyroskoper, oftest benævnt gyroer. Accelerometre måler accelerationer, mens gyroer måler vinkelændringer ved at bestemme den inertielle kraft, der påvirker instrumentet under bevægelse. Antallet af accelerometre og gyroer i en IMU varierer fra model til model, men det mest normale er, at IMU'en indeholder tre accelerometre og tre gyroer, monteret vinkelret på hinanden, så der er et accelerometer og en gyro, der er parallel med hver akse i et rumligt referencesystem. En samling af accelerometre og gyroer monteret på denne måde, på en fælles enhed, så de ikke kan ændre stilling i forhold til hinanden, kaldes også Inertial Sensor Assembly (ISA), se Figur C.5. (Grewal, et al. 2007:20)



Figur C.5: Viser en ISA, med tre accelerometre og tre gyroer (Cederholm, 2007).

Inerti

Inerti kan kort beskrives som træghed, nærmere betegnet utilbøjelighed til ændring. Mere konkret kan inerti beskrives ved hjælp af Newtons første lov, der siger: (Elvekjær, 2002:33,374)

> *'Hvis den resulterende kraft på en genstand er 0, vil genstanden enten forblive i hvile eller bevæge sig med en konstant hastighed og retning, dvs. bevæge sig med konstant hastighed på en ret linie.'*

Et eksempel på dette kan f.eks. være et objekt i vakuum. Dette er ikke påvirket af luftmodstand eller gnidningsmodstand. Hvis dette objekt bevæger sig med en bestemt hastighed, vil denne hastighed og retning ikke ændre sig, medmindre objektet bliver påvirket af kræfter, f.eks. tyngdekraft fra en planet. På samme måde bliver et køretøj, der ændrer hastighed eller skifter retning påvirket af kræfter, der varierer i størrelse alt efter ændringen i hastighed eller retning. Det er disse kræfter, der kan måles ved hjælp af en IMU.

IMU kategorier

IMU'er kan inddeles i forskellige kategorier, alt efter hvilken orienterings nøjagtighed de har. Orienteringsnøjagtigheden er primært bestemt af gyroernes drift hastighed, bias stabilitet og Angle Random Walk (ARW), disse termer bliver beskrevet senere. Gyroerne kan inddeles i fire kategorier, baseret på deres drift hastighed: (Schwarz & El-Sheimy, 2004)

1. Strategiske gyroer (0,0005 - 0,0010 grader/time)
2. Navigations gyroer (0,002 - 0,01 grader/timer)
3. Taktiske gyroer (1 - 10 grader/time)
4. Lav nøjagtigheds gyroer (100 - 10 000 grader/time)

Ud fra ovenstående er det tydeligt, at der er stor forskel på gyroernes nøjagtighed og dermed også stor forskel på de nøjagtigheder, der kan opnås med forskellige IMU'er. Samtidig må det forventes at der er stor forskel på prisen, alt efter hvilken kategori IMU'en falder indenfor. Det er derfor vigtigt, at vurdere nøjagtighedskrav til en given opgave, og sammenholde dette med omkostningerne til indkøb af udstyr.

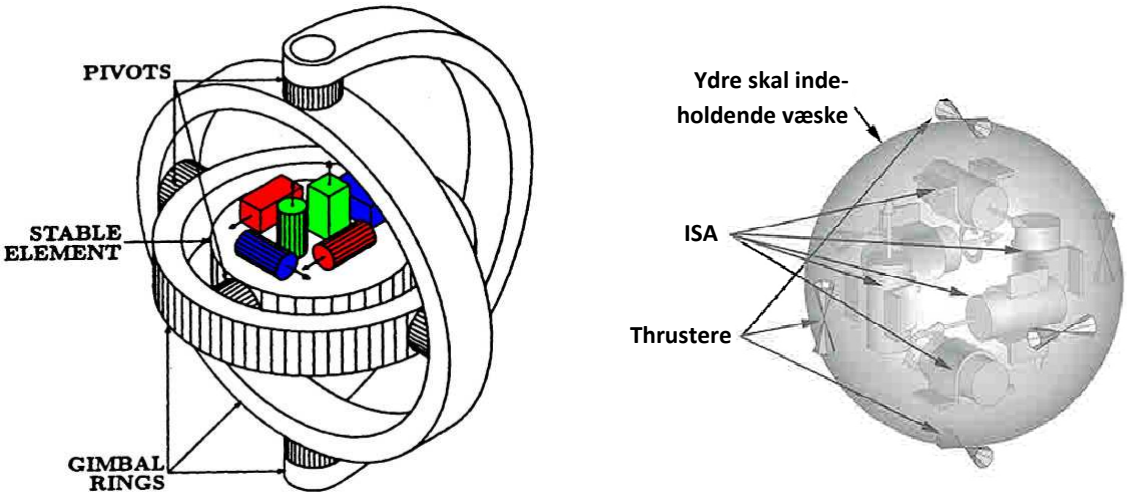
C.4.2 IMU typer

Med ISA'en som grundenhed, findes der tre grundlæggende forskellige måder at opbygge en IMU på. Disse er hhv. gimbaled, floated og strapdown hvor sidstnævnte er det konstruktionsprincip som IMU400CC-100 er bygget efter.

Gimbaled og floated

En IMU konstrueret efter gimbal princippet, betyder kort fortalt at ISA'en er ophængt i ringe der medfører at ISA'en fastholdes i den samme position, da ringene i stedet bevæger sig ved retningsændringer, se Figur C.6, venstre del. (Grewal, et al. 2007)

En IMU konstrueret efter floated princippet, bygger på samme grundtanke som et gimbaled system om, at ISA'en holdes i ro. Dette gøres i et floated system ved, at ISA'en flyder i væske i et lukket system, hvor der anvendes thrusters til at holde ISA'en i samme position, se Figur C.6, højre del. (Grewal, et al. 2007:26)



Figur C.6: Venstre: Gimbal princip med ISA isoleret af ringe (Grewal, et al. 2001:12). Højre: Floated princip med ISA isoleret af væske (Grewal, et al. 2007:23).

Strapdown

I et strapdown system er ISA'en spændt fast direkte på objektet og er således ikke isoleret fra objektets bevægelser. Sensorerne bliver derfor i nogle situationer udsat for store vinkelændringer og de skal derfor kunne fungere ved meget højere rotationshastigheder. Det betyder, at sensorerne i et strapdown system skal kunne måle større og hurtigere vinkelændringer end sensorerne i de andre systemer. De større og hurtigere vinkelændringer kræver desuden en større regnekraft, da især behandlingen af gyrodata er mere krævende. Strapdown systemer er sværere at kalibrere og teste end de øvrige systemer, da dette kræver specielle procedurer og fremgangsmåder. (Grewal, et al. 2007:27)

C.4.3 Konstruktionsprincip for accelerometer og gyro

Der findes forskellige konstruktions principper for de to sensortyper, accelerometer og gyro, som kan måle den inertial kraft, der genereres, når en masse accelererer. Dette kan beskrives ved hjælp af Newtons anden lov, der siger, at hvis en genstand med masse m, bliver påvirket med en kraft F, kan accelerationen a beskrives med Ligning C.1 (Elvekjær, 2002:374):

$$F = m \cdot a \qquad (C.1)$$

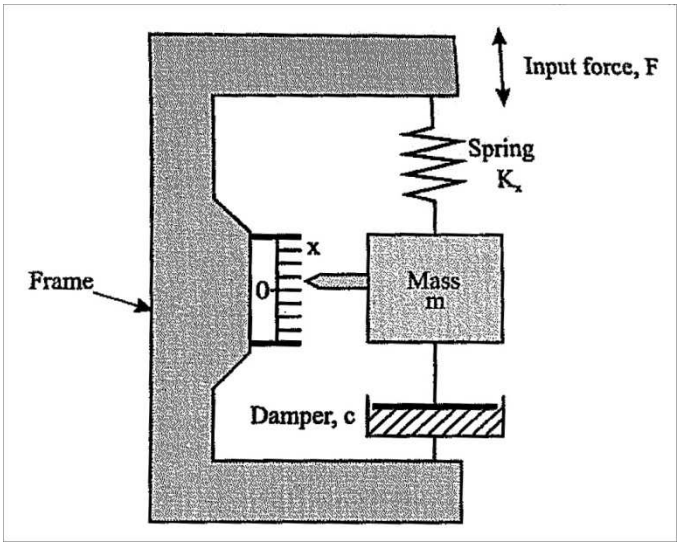
MEMS sensorer

IMU400CC-100 benytter seks MEMS-sensorer. En MEMS-sensor (Micromashined Electro-Mechanical System) er microchips, der afhængig af konstruktion kan måle spændinger ved accelerationer og

drejninger. For at simplificerer beskrivelsen af, hvordan et accelerometer og en gyro kan registrere disse ændringer, tages der ikke udgangspunkt i, hvordan en microchip er konstrueret, da dette ikke er relevant for projektets emne. Formålet er i stedet at beskrive hvordan sensorerne principielt kan registrere den pågældende ændring.

Accelerometer

Et accelerometer måler således den acceleration sensoren bliver udsat for. I den mest simple opbygning består et accelerometer af en kendt masse, der er fastgjort til sensoren ved hjælp af en fjeder. Sensoren måler, hvor meget den kendte masse flytter sig, når dette bliver udsat for en acceleration. (Titterton & Weston, 2004:539) Figur C.7 viser en simpel opbygning af et accelerometer, der måler accelerationen langs en enkelt akse. Ved hjælp af kendskab til fjederkonstanten K_x, massen m, dæmpningen, c samt sensorens output, x, kan kraften, F, som accelerometeret bliver påvirket med beregnes, hvilket så kan anvendes til at beregne accelerationen, jf. Ligning B.1 (Lawrence, 1998:45)

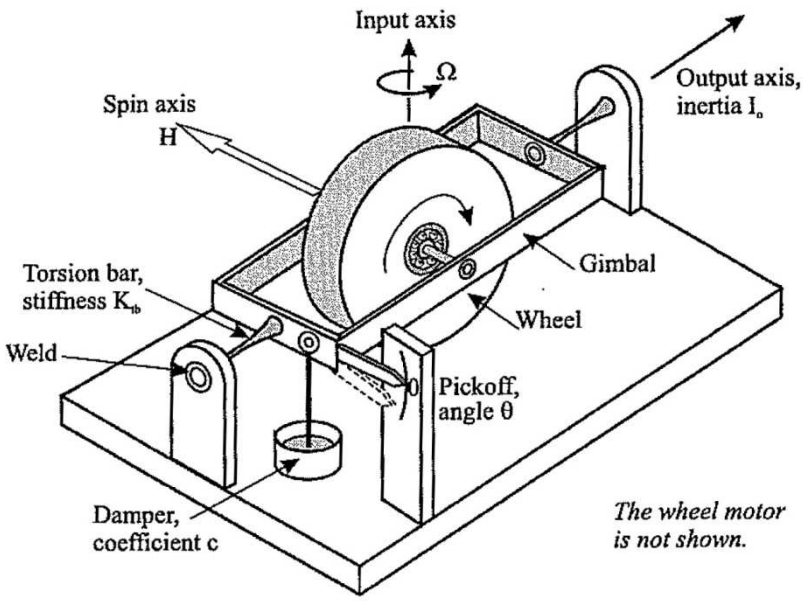


Figur C.7: Simpel opbygning af accelerometer (Lawrence, 1998:45).

Gyro

Gyroerne er vigtige i et inertial system, da de holder styr på, hvordan accelerometrene er orienteret i forhold til det referencesystem, der ønskes koordinater i. (Farrell, et al. 1999:187) En gyro fungerer, såvel som accelerometre, på baggrund af Newtons anden lov. På baggrund af denne kan nemlig udledes, at hvis et objekt snurrer omkring sin egen akse, vil vinklen på dette objekts akse, på grund af inertien i objektet, ikke ændre sig, med mindre objektet bliver påvirket af et moment, T. (Lawrence, 1998:86)

Dette kan bedst forklares ved hjælp af en snurretop. Så længe en snurretop har fart på, roterer den om sin egen akse, hvis der ikke bliver slået til den. Dette fortsætter den med indtil den taber kraften og holder op med at rotere, hvorefter den vælter, da den bliver tiltrukket af tyngdekraften. Et gyroskop fungerer på samme måde, men er konstrueret på en måde, der gør det muligt at måle de vinkelændringer 'snurretoppen' bliver udsat for, se Figur C.8. Figuren viser et hjul, der snurrer omkring en akse H og som kan rotere om output-aksen I_o. Når gyroen roterer omkring input-aksen Ω kan vinkelændringen aflæses som en vinkel θ.



Figur C.8: Simpel opbygning af en gyro (Lawrence, 1998:96)

Der findes to typer gyroer, en Rate gyro, som måler den hastighed, hvormed sensoren roterer, samt Displacement gyroer, som måler den samlede rotationsvinkel. (Grewal, et al. 2007:20) Figur C.8 viser en simpel opbygning af en Rate gyro.

C.4.4 Fejlkilder

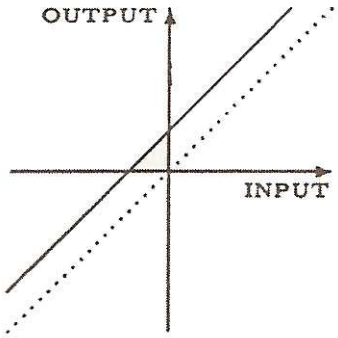
I dette underafsnit belyses de forskellige fejlkilder, der kan være i forbindelse med anvendelse af en IMU. Formålet med afsnittet er, at give en forståelse for de fejl der kan opstå det indsamlede data. I figurerne, som benyttes til illustration af fejltyperne repræsenterer den stiplede linje input, dvs. den registrerede værdi, mens den fuldt optrukne linje repræsenterer det output som instrumentet sender, efter behandling af input signalet.

Systematiske fejl

Med kendskab til de systematiske fejl, er det muligt, at kalibrere sit NS og kompensere for disse fejl. De systematiske fejl stammer fra fejl i outputtet fra sensorerne. Nedenfor præsenteres de oftest forekommende systematiske fejl.

Bias

Bias er et konstant output fra sensoren, uanset hvilket input sensoren får. Det vil sige, at selvom sensoren står stille, viser outputtet at den flytter sig, se Figur C.9. Bias er konstant fra opstart af sensoren til lukning af sensoren, men kan variere fra opstart til opstart. (Stovall, 1997:21)



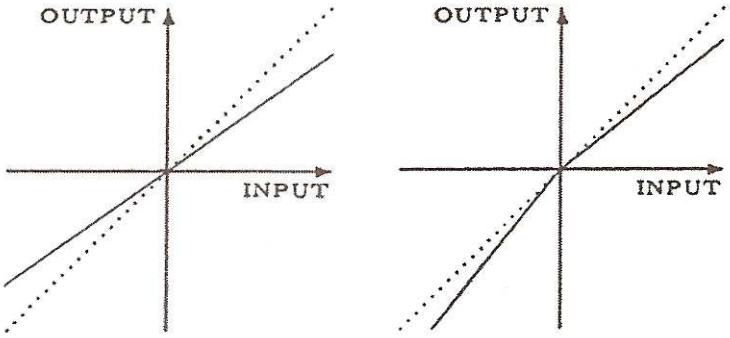
Figur C.9: Bias (Grewal, et al. 2007:337).

Bias bidrager væsentligt til fejl i positionen idet bias på f.eks. et accelerometer vil give en fejl i position, der vokser med tiden i anden, da de aflæste accelerationer integreres to gange i forhold til tiden for at få positionen. Ligeledes vil en bias på en gyro give en fejl i position, så fejlene dermed vokser med tiden i tredje på grund af den ekstra integration for at finde vinkelændringerne. (Titterton, et al. 2004:337)

Scale Factor

Scale Factor er forholdet mellem ændringen i output og ændringen i input. De fleste sensorer giver et output, der er direkte proportional med inputtet og Scale Faktor kan derfor opgives som konstant. Scale Faktor er således en lineær målefejl, der er proportional med inputtet til sensoren, se Figur C.10 venstre del.

Et særtilfælde af Scale Factor, er når et instrument har forskellig Scale Factor for positive og negative inputs, se Figur C.10 højre del. Dette kaldes Asymmetry. (Lawrence, 1998:28)



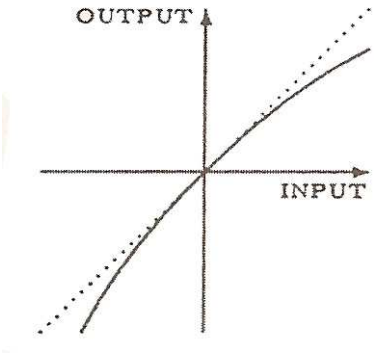
Figur C.10: Venstre: Proportional Scale Factor. Højre: Asymmetry (Grewal, et al. 2007:337)

I strapdown systemer spiller Scale Factor på gyroerne en større rolle end de gør i f.eks. gimbaled systemer. I et strapdown system skal gyroerne måle alle fartøjets vinkelændringer. Alt efter hvilket fartøj systemet befinder sig i, kan disse vinkelændringer være meget store og forekomme meget hurtigt. Scale Factor kan derfor være direkte bestemmende for, hvor nøjagtigt et system er.

Nonlinearity

I nogle tilfælde kan der være en fejl i sensoren, der ligner Scale Factor, men som ikke er lineær, se Figur C.11. For at undersøge dette kan der laves tests, der viser om outputtet kan tilpasses vha. an-

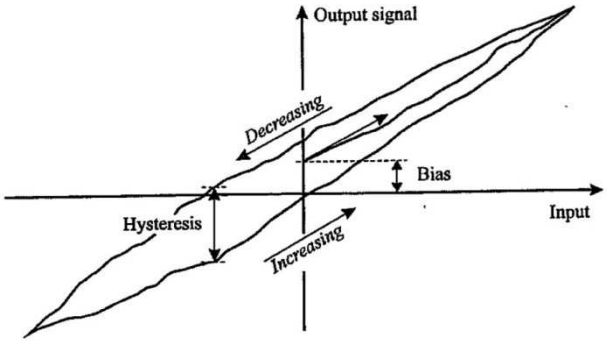
den- eller tredje-ordens kurver. Hvis dette er tilfældet, er der en Nonlinearity fejl på sensoren. (Lawrence, 1998:27)



Figur C.11: Nonlinearity (Grewal, et al. 2007:337)

Hysteresis

Hvis inputtet er enten konstant stigende eller konstant faldende, kan det medføre en forskel outputtet. Den største vertikale afvigelse mellem de to outputs er defineret som Hysteresis fejlen, se Figur C.12, hvor det ses, at outputtet er for lavt ved en konstant stigning og for højt ved et konstant fald. (Lawrence, 1998:32)



Figur C.12: Hysteresis (Lawrence, 1998:32)

Dag til dag variationer

Særlig Bias og Scale Factor kan også ændre sig fra dag til dag eller fra opstart til opstart. Det er derfor ikke sikkert, at den kalibrering, der er udført dagen før, kan bruges dagen efter.

Ud over de ovennævnte fejl, spiller temperaturen i IMU'en også ind. Ved ændringer i temperatur omkring sensorerne, kan outputtet ændre sig. (Lawrence, 1998:33)

Tilfældige fejl

De tilfældige fejl forekommer som navnet antyder tilfældigt. De kan derfor ikke fjernes ved hjælp af kalibrering, men det er ofte muligt at estimere størrelsen af fejlbidraget på outputtet.

Random Walk

Random Walk er en fejl, der opstår i både gyroer og accelerometre. Fejlen er et udtryk for tilfældige normalfordelte fejl, der forekommer i registreringer fra sensoren. For gyroer er fejlen et udtryk for sammenhængen mellem spredningen på vinklen og tidsintervallet der måles. For accelerometre er

fejlen et udtryk for sammenhængen mellem hastigheden og tidsintervallet, der måles. (Eistrup, et al. 2005a:Appendiks 6)

White sensor noise

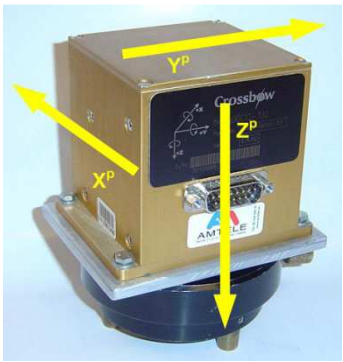
Denne fejl opstår i alle elektroniske kredsløb. Fejlen består af uønskede spændinger i det elektroniske kredsløb og opstår på grund af elektronernes tilfældige bevægelser. Disse tilfældige bevægelser medfører små ændringer i alle spændinger. (Gyldendal, 2009b) Fejlen dækker over alt elektronisk støj, der opstår i elektronikken.

Harmonic noise

Svingninger i fartøjet hvor IMU'en er monteret kan påvirke outputtet fra IMU'en. Denne type fejl på outputtet kaldes harmonisk støj. (Grewal, et al. 2007:337)

C.4.5 Undersøgelse af måling med IMU400CC-100

Akserne på IMU400CC-100 er defineret som angivet i Figur C.13. Efterfølgende forsøg har dog vist, at når IMU'ens akser er sammenfaldende med simuleringskøretøjets akser, fås et forkert resultat i positionsbestemmelsen. De positioner der beregnes, bevæger sig i modsat retning af bevægelsesretningen. Ifølge teorien burde koordinatsystemerne være sammenfaldende for at give et fornuftigt resultat, jf. Bilag D. For at opnå fornuftige resultater har projektgruppen lavet forsøg med at vende IMU'en 180 grader. Koordinatsystemerne er herefter igen kalibreret, så systemernes X-akser er sammenfaldende, men har modsatrettede bevægelsesretninger. Det samme gælder for Y-akserne. Z-akserne er stadig sammenfaldende, med ens bevægelsesretninger. Når der herefter køres test af systemet fås væsentlig bedre resultater i positionsbestemmelsen. Positionerne der beregnes, bevæger sig nu i den rigtige retning og retningsændringer foretages korrekt. Som nævnt burde det ikke give gode resultater, når IMU'en er roteret 180 grader om Z-aksen. Når IMU'en er roteret i forhold til køretøjets koordinatsystem, burde der skulle udføres en ekstra rotation for at beregne koordinaterne i LL-systemet, således at transformationen ikke kun var body-LL, men i stedet var IMU-body-LL. Dette er tilsyneladende ikke tilfældet. Projektgruppen har ikke nogen umiddelbar forklaring på dette.

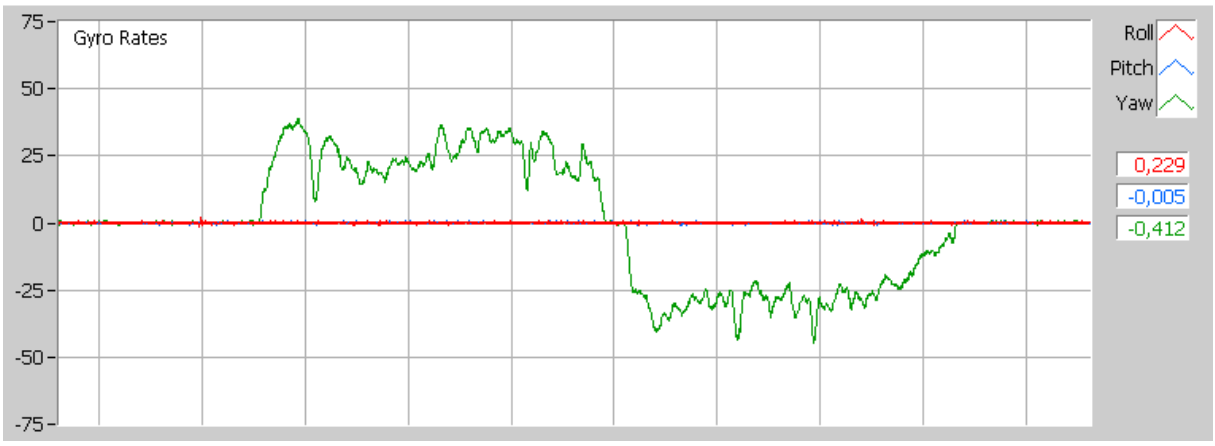


Figur C.13: Aksernes orientering i IMU400CC-100 (Eistrup, et al. 2005b:2).

Gyroview

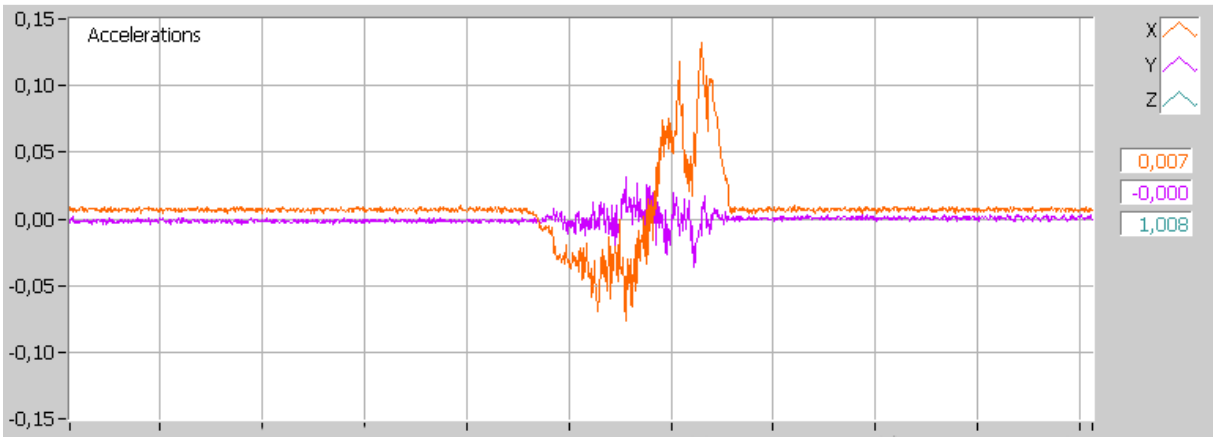
For at finde en forklaring, er der udført enkle tests af gyroerne og accelerometrene ved hjælp af Gyroview. Figur C.14 viser en test af gyroen der måler rotationen om Z-aksen. IMU'en er først drejet i positiv omløbsretning og derefter i negativ omløbsretning. Det ses af figuren, at gyroen har målt

denne rotation korrekt. Det samme gør sig gældende for gyroerne for X- og Y-aksen. Det kan således fastslås, at gyroerne måler korrekt.



Figur C.14: Test af gyroer, rotation om Z-aksen.

Testen af accelerometrene kan ses i Figur C.15. IMU'en er blevet påført en acceleration langs X-aksen, i hvad der burde være positiv bevægelsesretning. Figuren viser, at når IMU'en accelererer måles en negativ acceleration, mens der måles en positiv acceleration når IMU'en bremses. Ved test af Y- og Z-accelerometrene opnås samme resultater. Når der tænkes på det analoge eksempel på et accelerometer, med en vægt spændt ud mellem to fjedre, hvor accelerationen måles på vægtens flytning, giver denne udlæsning mening. Når IMU'en bevæger sig fremad vil vægten blive presset bagud, indtil vægten har opnået samme hastighed, som resten af IMU'en. Når IMU'en stopper op, vil vægten blive skubbet fremad og til sidst stoppe. På denne baggrund må det derfor konkluderes, at også accelerometrene i IMU'en måler korrekt.



Figur C.15: Test af accelerometre, acceleration langs X-aksen.

Dette forklarer således ikke, hvorfor IMU'ens akser ikke skal være sammenfaldende med køretøjets akser. En dataindsamling med Gyroview og projektgruppens eget dataindsamlingsprogram, med efterfølgende positionsbestemmelse, har vist, at der opnås ens resultater i positioner. Projektgruppen vælger derfor, at anvende en opsætning, hvor IMU'en er drejet 180 grader i forhold til køretøjets koordinatsystem, for at få fornuftige resultater i positionsbestemmelsen. Dette skyldes angivelsen af

positiv akseretning på IMU'en. Med den nuværende angivelse fås en negativ acceleration når IMU'en bevæges i hvad der burde være positiv retning. Dette giver en fejl, idet IMU'en jo udsættes for en positiv acceleration. Det vælges derfor, at vende IMU'en 180 grader, for at få korrekte værdier i data-indsamlingen.

Bilag D - Systemer

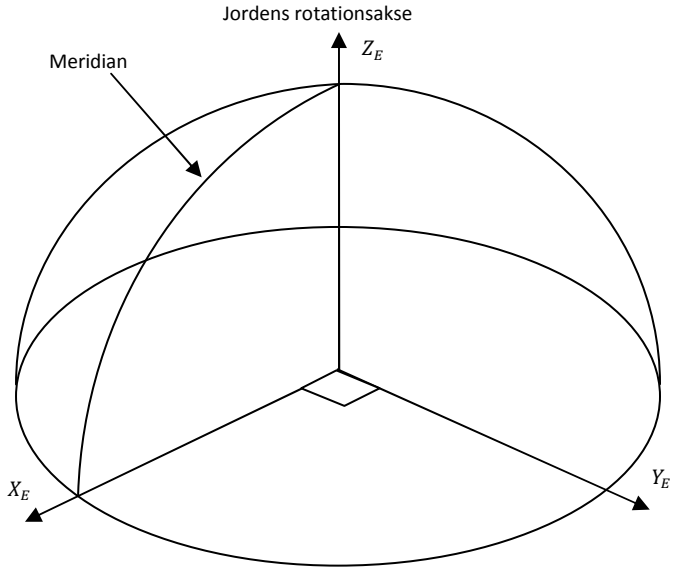
Formålet med dette bilag er at beskrive de systemer, som indgår i NS-1002, som udvikles på baggrund af de udvalgte sensorer, som vil indgå i arbejdet gennem projektet, og som vil indgå i det videre forløb med at bestemme kameraets position under en simulering af en TV-inspektion af rørsystemer.

Dette gøres for at definere og beskrive de enkelte systemer, samt forskellene de enkelte systemer imellem. Der er en række systemer, som kan indgå i det valgte NS-1002. Disse systemer vil blive beskrevet som følger:

- Earth-Centered, Earth-Fixed
- Earth-Centered Inertial
- Local level
- Body
- Platform
- Sensor
- Magnetisk

Earth-Centered, Earth-Fixed (ECEF)

ECEF er fikseret i forhold til jorden og dens rotation, og er centreret i jordens massemidtpunkt, dvs. origo er i jordens centrum. En af akserne er parallel og sammenfaldende med jordens rotationsakse. En anden af akserne ligger i det ækvatoriale plan, og peger mod en foruddefineret meridian, som f.eks. Greenwich meridianen i WGS84. Den sidste akse fuldender systemet som et ortogonalt højrehåndssystem, og er dermed placeret i det ækvatoriale plan, 90 grader øst for anden aksen. Dvs. systemet er fastlåst i forhold til jorden og drejer dermed med jordens rotation. Dette sker med en hastighed på $7{,}292115 \cdot 10^{-5}\ rad/s$. På Figur D.1 kan et ECEF system ses, hvor Z-aksen er parallel og sammenfaldende med jordens rotationsakse, X-aksen er i det ækvatoriale plan og peger mod en foruddefineret meridian. Y-aksen fuldender systemet. (Rogers, 2001)



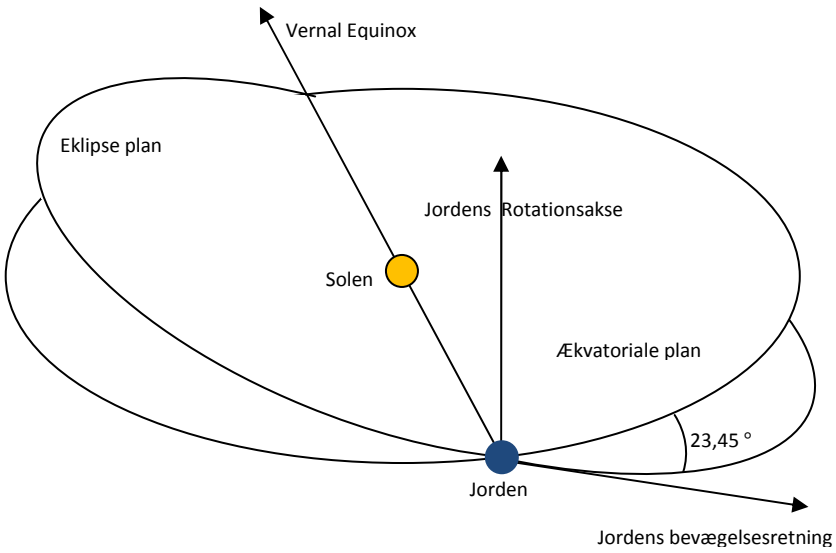
Figur D.1: Orientering af ECEF system.

Earth-Centered Inertial (ECI)

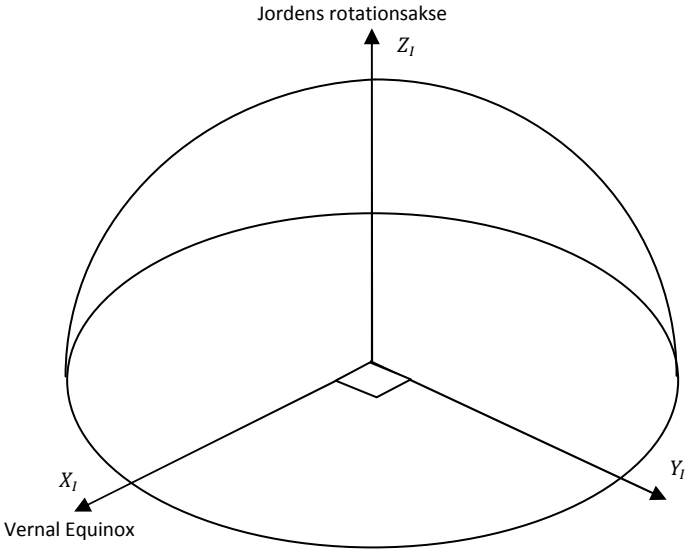
ECI systemet har origo i jordens massemidtpunkt. Forskellen mellem ECI og ECEF er, at et ECI system ligger fast i forhold til rummet, og akserne hele tiden peger i samme retning, hvor ECEF, følger jordens rotationer. X-aksen i ECI peger mod Vernal Equinox. Equinox betyder jævndøgn og er de gange i løbet af et år, hvor dag og nat er lige lange, dvs. når solen er over ækvator. Dette sker to gange om året, forår og efterår. Vernal betyder forår, og det er altså retningen mellem solen og jorden ved forårs jævndøgn, som angiver X-aksens retning i ECI. Retningen Vernal Equinox kan ses på Figur D.2. Eklipsen er jordens bevægelse rundt om solen og det er krydsningen mellem dette og jordens ækvatoriale plan, som mere præcist angiver retningen, Vernal Equinox.

Orienteringen af ECI systemet kan ses på Figur D.3, som sagt med X-aksen pegende mod Vernal Equinox. Z-aksen er den eneste retning, som er fastholdt i forhold til f.eks. et ECEF system. Denne ligger parallel og sammenfaldende med jordens rotationsakse. Dette skyldes, at rotationsaksen per definition er ortogonal med jordens ækvatoriale plan, og vil derfor være ortogonal på retningen Vernal Equinox.

Den sidste akse, Y-aksen, kan herefter defineres ved, at det er et ortogonalt højrehånds system. (Grewal, et al. 2001)



Figur D.2: Retningen af X-aksen mod Vernal Equinox.



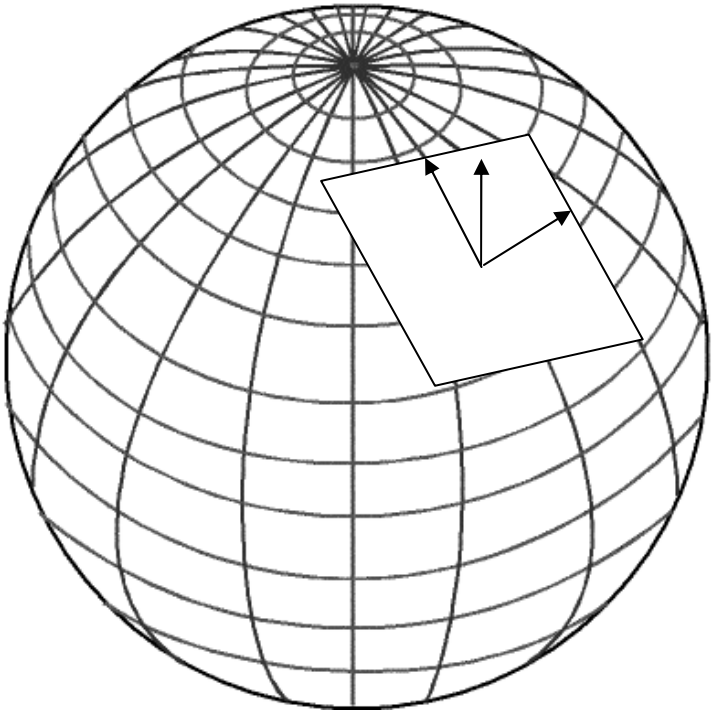
Figur D.3: Orientering af ECI system.

Local Level system (LL)

Local Level system, er et lokalt tangentplan på geoiden, som beskriver jorden et givent sted. Princippet bag systemet er en ide om, at jorden er flad, dvs. at systemet, ikke er defineret i forhold til en ellipsoide, som i de tidligere beskrevne systemer, men som en flade. Denne flade tangerer kuglen et foruddefineret sted, og det sted, hvor fladen tangerer kuglen, er defineret som origo, dvs. nulpunkt for systemet. Derudover er det sædvane, at denne type systemer har en East, E, North, N, og Up, U, retning (ENU). East retningen følger forøgelsen af længdegrader, North retningen peger mod geografisk nord og følger forøgelsen af breddegrader. Up retningen, fuldender systemet som et højrehånds, ortogonalt system. På Figur D.4 kan orienteringen af LL systemet ses.

Systemet kan også defineres som North, N, East, E, og Down, D (NED). Dvs. at tredje aksen ikke peger ud i rummet, men ind mod jorden. Der er forskellige fordele og ulemper ved de to systemer, alt efter i hvilke sammenhænge de skal benyttes. ENU systemet Har den fordel, at højden øges i retningen opad, hvilket er det mest logiske. NED systemet har den fordel, at systemet, ved en drejning i urets retning, dvs. den positive retning, omkring D-aksen, er sammenfaldende med et kørende objekts system, body systemet som beskrives senere, hvis køretøjet er vandret og pegende mod nord.

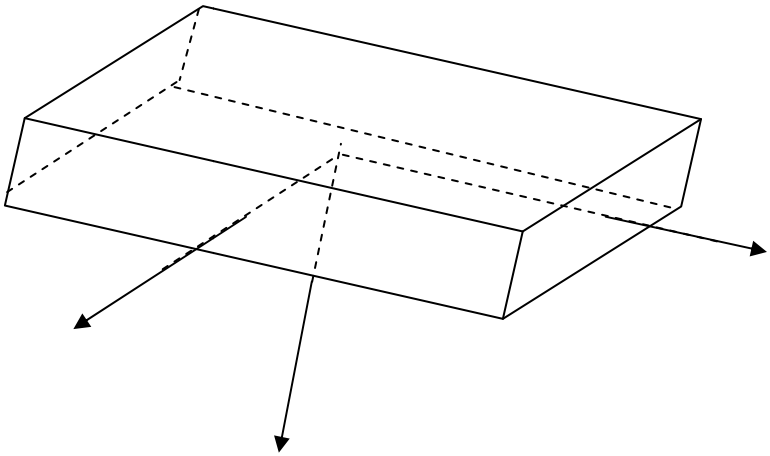
I forbindelse med dette projekt er det mest naturligt at benytte NED systemet, da der skal arbejdes med positionering af et kørende objekt. (Grewal, et al. 2001)



Figur D.4: Orientering af LL systemet

Body system

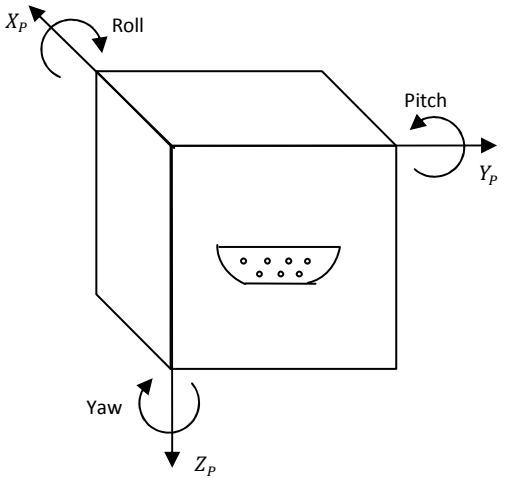
Body systemet er fast knyttet og defineret i det kørende objekt, som bærer navigationssystemet. For strapdown systemer, som benyttes i dette projekt, er body systemet oftest parallel med de inertielle sensorers retninger i navigationssystemet, dvs. platform-systemet, som beskrives efterfølgende.
Systemet har normalt origo i objektets massemidtpunkt, og derudover er X-aksen defineret langs det kørende objekts længdeakse. Z-aksen er ortogonal nedad og Y-aksen peger udad mod højre og fuldender det ortogonale højrehåndssystem, se Figur D.5. (Grewal, et al. 2001), (Rogers, 2001)



Figur D.5: Orientering af body systemet

Platform

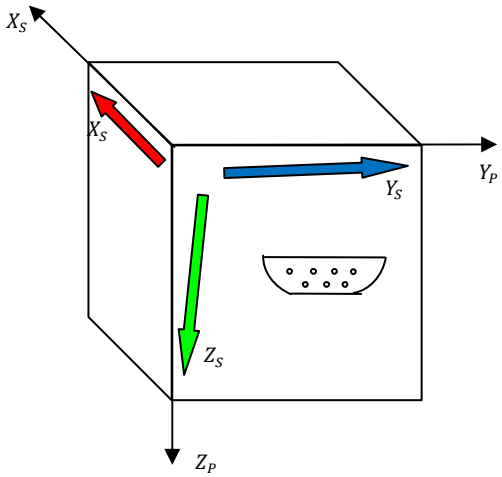
Platform systemet ligger ofte tæt på body systemet i et NS, og akserne mellem body og platform systemet er normalt tilnærmelsesvis sammenfaldende. Akserne for platform og body systemerne kan dermed være forskudte med en fast difference, dvs. en konstant vektor, samt en rotation. Origo for platform systemet er et vilkårligt punkt på IMU'en. I dette projekt er akserne for IMU'en defineret som det fremgår af Figur D.6. Placeres IMU'en med serielstikket (forsiden af IMU'en), som på figuren og monteringspladen nedad, er systemet defineret som vist på figuren. X-aksen går fra forsiden, og gennem IMU'en, Y-aksen går langs forsiden, fra venstre mod højre og Z-aksen går langs forsiden, fra top til bund. Systemet er et ortogonalt højrehåndssystem. Det skal dog nævnes at origo ikke er fast placeret i hjørnet, som det kan ses på figuren, men som nævnt, placeret vilkårligt. Placeringen af origo er irrelevant, da sensorerne måler variationen i accelerationen. Accelerationer angives som positive når de er orienteret i den positive retning for den enkelte akse. Undersøgelse af den benyttede IMU, har dog vist at dette ikke er korrekt, jf. Bilag C. Drejninger af IMU'en angives ligeledes i forhold til den enkelte akse. Retningen for en positiv drejning omkring de enkelte akser er defineret ved højrehåndsreglen og kan ligeledes ses på Figur D.6. Roll er drejning omkring X-aksen, Pitch er drejning omkring Y-aksen og Yaw er drejningen omkring Z-aksen. (Rogers, 2001) (Salychev, 1998)



Figur D.6: Orientering af platform system

Sensor

Inertielle sensorer, som accelerometre og gyroer foretager deres målinger relativt i forhold til det inertielle rum langs de enkelte akser i instrumentet. Der er både et sensor system for accelerometrene og gyroerne. I de fleste systemer er instrumentakserne parallelle med akserne fra platform systemet. Dog vil det ikke være realistisk, at akserne er fuldstændig parallelle. Det samme er gældende for de to sensor systemer indbyrdes, disse vil ligeledes ikke være fuldstændig parallelle. Der er altså misalignment mellem sensor systemerne og samtidig i forhold til platform systemet, se Figur D.7.
Desuden kan det ikke automatisk forventes at accelerometer og gyro systemerne er ortogonale.
Generelt antages det dog, at sensor og platform systemerne er sammenfaldende i en strapdown IMU, dvs. de enkelte akser i sensor systemet (de farvede pile) er parallelle med de tilsvarende akser i platform systemet. Desuden antages det ofte i et INS, som nævnt tidligere, at akserne fra sensor og dermed også platform systemet, ligeledes er sammenfaldende med body systemet. (Grewal et al. 2001)



Figur D.7: Orientering af sensor system (de farvede pile) i forhold til platform systemet.

Magnetisk

I forbindelse med brugen af et magnetisk kompas i et NS, er der en række elementer, det er nødvendigt at være opmærksom på. Kursen angives i forhold til magnetisk nord, hvilken ikke er sammenfaldende med geografisk nord, hvorfor der skal tages højde for dette i forbindelse med brugen af målingerne fra kompasset.

Jordens magnetfelt kan generelt, betegnes som det system, kompasset foretager sine målinger i.

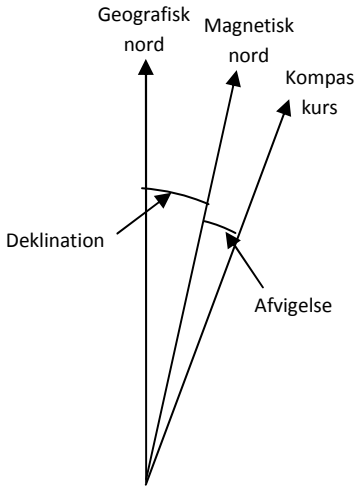
Billede D.1: Forestillingen om jordens indre, samt jordens magnetfelt ved feltlinjer ud i rummet. (DMI, 2009)

Jordens magnetfelt skabes hovedsageligt af elektriske strømsystemer i jordens indre. På Billede D.1, kan opbygningen af jordens indre ses, og jordens magnetfelt er vist ved feltlinjer ud i rummet. Inderst er en fast kerne, som hovedsageligt består af jern og nikkel. Derpå er der en flydende kerne af smeltet metal, som er elektrisk ledende og i bevægelse. Derved opstår der elektriske strømme, som danner et magnetfelt. Yderst er en fast skorpe.

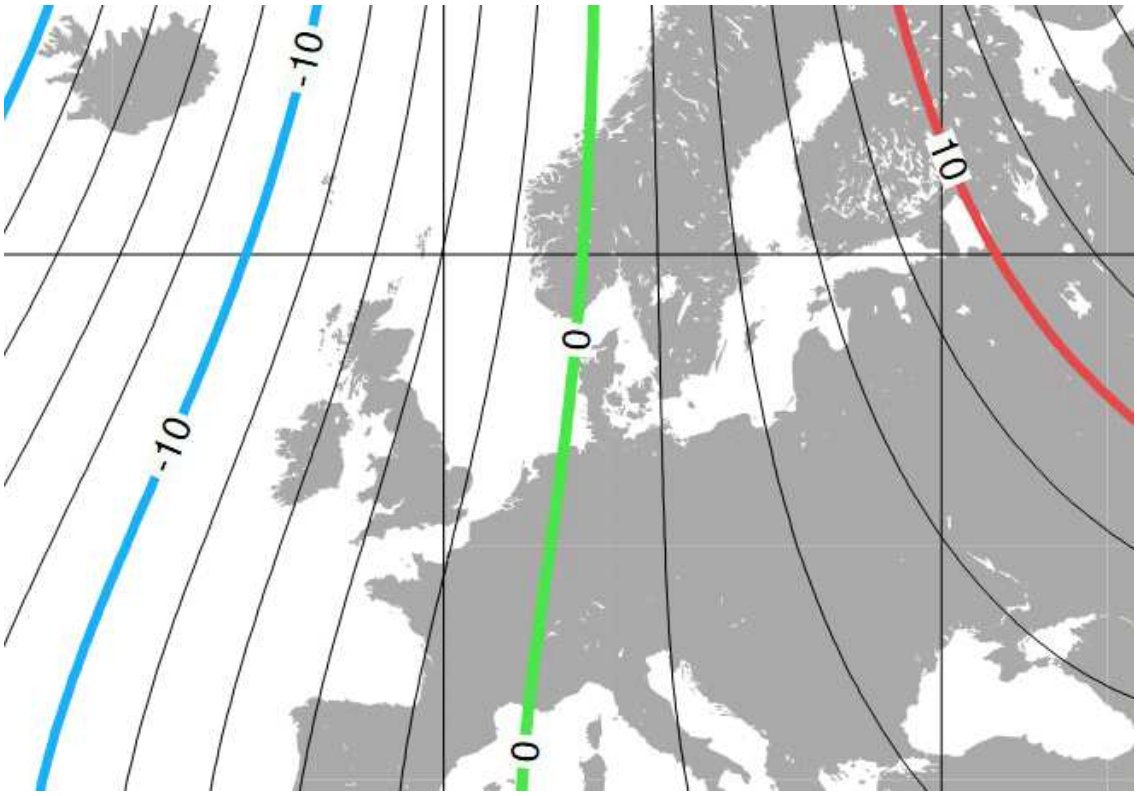
Som nævnt angives kursen i forhold til magnetisk nord, hvilken ikke er sammenfaldende med geografisk nord, hvorfor der skal tages højde for dette i forbindelse med brugen af målingerne fra kompasset. Vinklen eller forskellen mellem magnetisk nord og geografisk nord kaldes deklination, se Figur D.8. (DMI, 2009)

Forskellen mellem de to definitioner af nord, magnetisk og geografisk nord, er forskellig alt efter, hvor på jorden der måles, og derudover ændrer den magnetiske nord sig over tid. Det er dog muligt at fastslå deklinationen på et givet sted og tidspunkt, og ændringen af den magnetiske nord er kendt hele tiden. Den magnetiske nordpol ligger omkring 1000 km sydvest for det geografiske nord, og flytter sig ca. 10 km hvert år mod vest. (KVH, 2009b)

På Billede D.2 kan en model for den magnetiske deklination ses, her som et udklip over Europa. De forskellige streger viser deklinationen. Det kan desuden ses at Danmark ligger tæt på nul, dvs. der er en lille deklination. Deklinationen i Danmark ligger mellem 0 og 2 grader. Benyttes The International Geomagnetic Reference Field, som er en global model for det magnetiske felt, kan deklinationen for en given position beregnes. (BGS, 2009) Beregnes denne for en position omkring Aalborg Universitet, fås en deklination på 1,446 grader, dvs. der måles 1,446 grader for lidt i forhold til geografisk nord, og den beregnede deklination adderes derfor den målte kompaskurs.



Figur D.8: Magnetisk nord i forhold til geografisk nord og den afvigelse, som vil forekomme ved måling med kompas



Billede D.2: Udklip af model for magnetisk deklination i Europa (NGDC, 2009)

Udover forskellen mellem den geografiske nord og magnetiske nord, er der en afvigelse, som altid vil forekomme ved magnetisk måling, se Figur D.8. Denne kan ikke elimineres fuldstændigt, og er forårsaget af omkringliggende omgivelser, f.eks. det fysiske objekt, som kompasset er placeret på. Derudover kan det være bygninger eller andre menneskeskabte objekter. For derfor at få den korrekte angivelse af den geografisk nord kan ligning D.1 introduceres, som beskriver forholdet mellem geografisk og magnetisk nord samt deklinationen og afvigelse. (Borenstein, Everett & Feng, 1996)

Kurs mod geografisk nord

$$K_G = K_M \pm \sigma_{Dek} \pm \sigma_{Afv} \qquad (D.1)$$

Hvor,

K_G er kursen mod geografisk nord i grader
K_M er kursen målt mod magnetisk nord i grader
σ_{Dek} er deklinationen, som er 1,446 grader, jf. ovenstående, og adderes dermed.
σ_{Afv} er afvigelsen

Bilag E - Transformationer

Formålet med dette bilag er at beskrive transformationen mellem body og local level systemerne i forbindelse med positionering på baggrund af IMU data, og herunder opstille transformationsligningen, der skal benyttes til at rotere de målte observationer i body systemet over i LL systemet.
Dette gøres for, at koordinaterne kan beregnes og endeligt præsenteres i et lokalt koordinatsystem.

For at transformere et punkt eller en vektor fra body til LL systemet, kan ligning E.1 benyttes: (Salychev, 1998)

Transformationsligning

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{LL} = C_B^{LL} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \quad (E.1)$$

Hvor,
C_B^{LL} er rotationsmatricen mellem body og LL systemerne
X, Y og Z er koordinaterne i de enkelte systemer i meter

Denne er gældende, da det forudsættes at body og LL systemet er sammenfaldende i origo, og det derfor er tilstrækkeligt med en rotation af body systemet til LL-koordinatsystemet.
Dette er en af de mest benyttede metoder og den baseres på tre rotationer omkring de enkelte akser i koordinatsystemet. Rotationsvinklerne kaldes Euler vinkler. Euler vinkler er tre uafhængige størrelser, som gør det muligt at definere positionen af et koordinatsystem i forhold til et andet koordinatsystem. Desuden gør rotationer omkring Euler vinklerne det muligt at gøre to vilkårlige koordinatsystemer sammenfaldende. Euler vinklerne er defineret som følger: (Salychev, 1998)

- Roll (ω) – rotationen omkring X-aksen
- Pitch (φ) – rotationen omkring Y-aksen
- Yaw (κ) – rotationen omkring Z-aksen

Rotationerne omkring de enkelte akser kan foretages i tilfældig rækkefølge, men er der under en opgave først defineret en fastlagt rækkefølge, skal denne følges og være konsekvent gennem hele udførelsen af den specifikke opgave.
En opgave vil gennemføres ved at der udføres tre rotationer, en omkring hver af de tre akser i koordinatsystemet. For hver af de enkelte drejninger kan der opstilles en rotationsmatrice, som beskriver rotationen omkring den enkelte akse. Disse tre rotationer kan samles og danner herefter den samlede rotationsmatrice for det specifikke koordinatsystem. (Salychev, 1998)
Rotationsmatricerne for drejninger omkring X-, Y- og Z-akserne kan ses i ligning E.2, E.3 og E.4, og den endelige transformationsligning kan ses i ligning E.5: (Salychev, 1998)

Transformationsligning og rotationsmatricer for en vektor mellem body og LL systemerne

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\omega & sin\omega \\ 0 & -sin\omega & cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C_x \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (E.2)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\varphi & 0 & -sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ sin\varphi & 0 & cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C_y \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (E.3)$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\kappa & sin\kappa & 0 \\ -sin\kappa & cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C_z \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (E.4)$$

$$C = C_z C_x C_y$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (E.5)$$

Hvor,

ω er Roll og rotationen omkring X-aksen

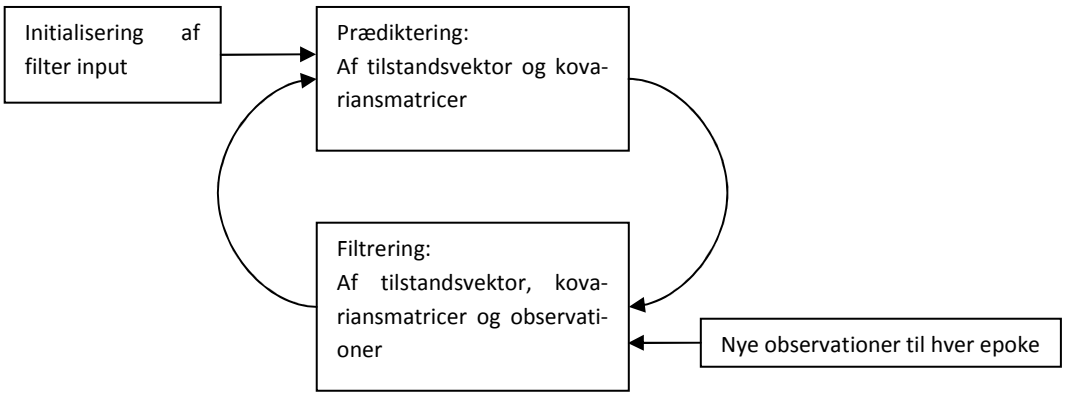
φ er Pitch og rotationen omkring Y-aksen

κ er Yaw og rotationen omkring Z-aksen

Bilag F - Kalman filtrering

Formålet med dette bilag er, at beskrive teorien bag den Kalman filtrering, der anvendes i dette projekt. Teorien beskrives ved hjælp af formler og matricer. Bilaget om Kalman filtrering skrives med baggrund i Strang & Borre (1997), Cederholm (1999) og Nordby & Kristensen (1999). Kalman filtreringen ønskes anvendt på data indsamlet med IMU, elektronisk kompas og GPS.

Kalman filteret er forholdsvist simpelt at anvende, når først de nødvendige modeller og matricer er opstillet. Opstillingen af disse beskrives i det følgende. En simpel udgave af beregningsgangen i Kalman filteret kan ses i Figur F.1. Kalman filteret er rekursivt og formår for hver observation at bestemme en nuværende og forventet fremtidig position.
Forudsætningen for at sætte beregningen i gang, er en initialisering af inputtet til filteret, hvilket vil sige, at der opstilles vektorer med de ubekendte og observationerne samt matricer der beskriver de ubekendtes ændring og kovariansmatricer. Herefter er det muligt at prædiktere tilstandsvektoren, som beskriver de ubekendte, og den tilhørende kovariansmatrice. Der tilføres observationer, der anvendes i filterligningerne, og der foretages en filtrering af tilstandsvektoren. De filtrerede data kan gemmes i den opdaterede tilstandsvektor. Herefter starter beregningen forfra, men nu på baggrund af de filtrerede data. Et gennemløb af løkken kaldes en epoke. Når dataindsamlingen er slut og prædikteringen og filtreringen er gennemført, er det muligt at lave en udglatning, blandt andet på baggrund af den opdaterede tilstandsvektor. Udglatning beskrives nærmere i afsnit F.1.1.



Figur F.1: Beregningsgangen i et Kalman filter.

Det er kun Prædiktion og Filtrering der kan foretages real-time, mens Udglatning udelukkende kan anvendes i forbindelse med post-processing.
Det er vigtigt at forstå, at Kalman filteret er rekursivt og fungerer således, at når en observation er brugt, kan denne smides væk, da tilstandsvektoren, der indeholder de ubekendte, nu indeholder alle relevante oplysninger. Tilstandsvektoren bliver løbende opdateret på baggrund af observationerne og det er derfor ikke nødvendigt at gemme observationerne, når de først har været anvendt. Grundlaget for at dette kan lade sig gøre, er Kalman gain matricen K_k, samt nøjagtigheden af tilstandsvek-

toren, der angives af kovariansmatricen for tilstandsvektoren $P_{k|k-1}$. Det er derfor vigtigt at være opmærksom på særligt disse faktorer, i den følgende gennemgang af filterligningerne.

F.1 Filterligninger

Kalman filteret består af fem filterligninger, der anvendes i en bestemt rækkefølge. I det følgende præsenteres først input og output til filterligningerne og endelig præsenteres filterligningerne og forløbet i beregningerne.

Input:

$\hat{x}_{k-1\|k-1}$	Filtreret tilstandsvektor til forrige epoke
$P_{k-1\|k-1}$	Kovariansmatrice for filtreret tilstandsvektor
F_{k-1}	Transitionsmatrice
$\Sigma_{\varepsilon,k}$	Kovariansmatrice for fejl ved bevægelsesligninger
A_k	Koefficientmatrice
b_k	Observationsvektor
$\Sigma_{e,k}$	Kovariansmatrice for fejl ved observationsvektor

Output:

$\hat{x}_{k\|k-1}$	Prædikteret tilstandsvektor
$P_{k\|k-1}$	Kovariansmatrice for prædikteret tilstandsvektor
$\hat{x}_{k\|k}$	Filtreret tilstandsvektor
$P_{k\|k}$	Kovariansmatrice for filtreret tilstandsvektor

Hvor, indeks skal forstås efter følgende princip:
$\hat{x}_{k|k-1}$, betyder at $\hat{x}$ er en prædikteret værdi, beregnet i forrige epoke
$\hat{x}_{k-1|k-1}$, betyder at $\hat{x}$ er en filtreret værdi, beregnet i forrige epoke

Ovenstående anvendes i filterligningerne, Ligning F.1 - F.5. Disse kan deles op i fem trin, et trin for hver filterligning. Trin 1-2 omhandler prædiktion, mens trin 3-5 omhandler filtrering.

Trin 1, prædiktion af tilstandsvektor

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_{k-1}\hat{x}_{k-1|k-1} \qquad (\text{F.1})$$

Trin 2, prædiktion af kovariansmatrice for tilstandsvektor

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{k-1|k-1}F_{k-1}^{T} + \Sigma_{\varepsilon,k} \qquad (\text{F.2})$$

Trin 3, Kalman gain matrice

$$K_k = F_{k|k-1}A_k^{T}\left(A_k P_{k|k-1}A_k^{T} + \Sigma_{e,k}\right)^{-1} \qquad (\text{F.3})$$

Trin 4, Filtrering af tilstandsvektor

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(b_k - A_k\hat{x}_{k|k-1}) \quad (F.4)$$

Trin 5, Kovariansmatrice for tilstandsvektor

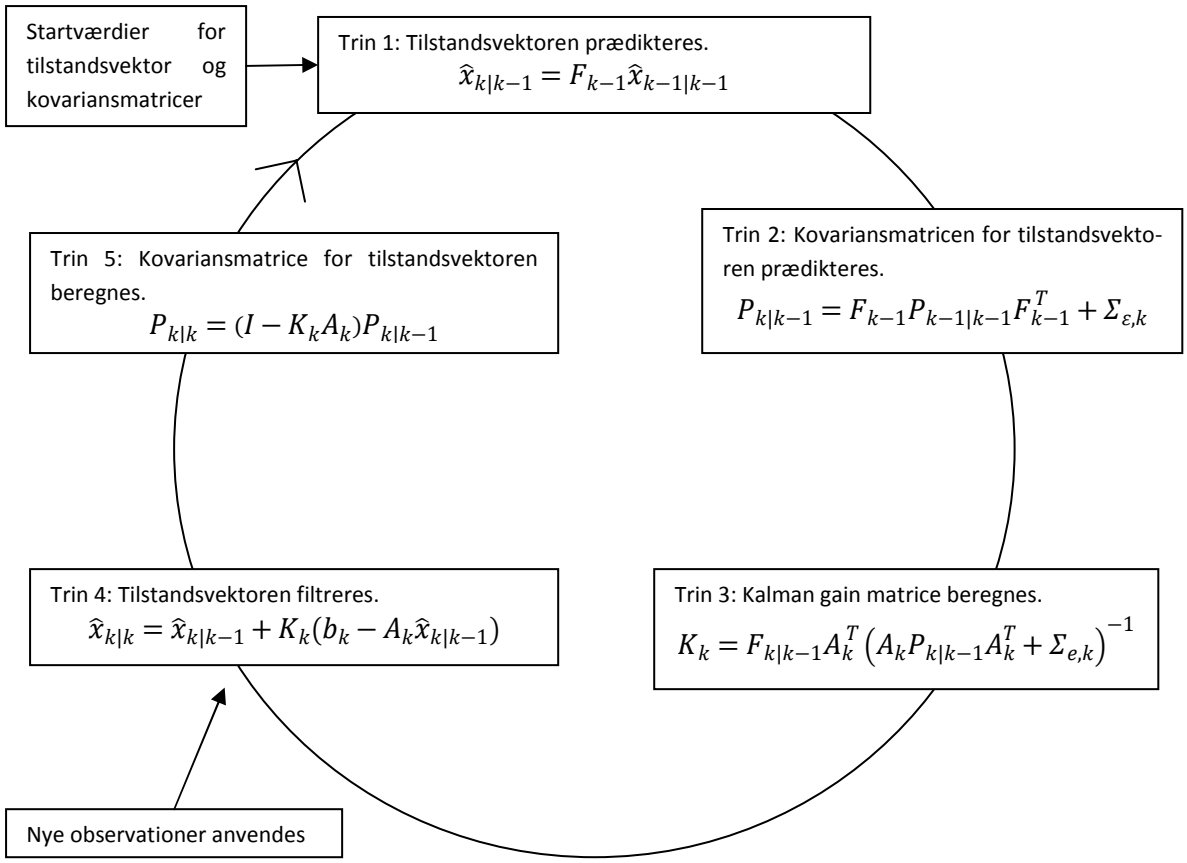
$$P_{k|k} = (I - K_k A_k)P_{k|k-1} \quad (F.5)$$

Beregningsgangen med disse ligninger, samt Kalman filterets cyklus, er illustreret i Figur F.2. Filteret startes ved initialisering af tilstandsvektor og kovariansmatricer.

Det ses af Figur F.2, at når filteret først er sat i gang og det hele tiden opdateres med nye observationer, fås der fra trin 4, en opdateret tilstandsvektor for hver epoke. Dette kan f.eks. være et nyt koordinatsæt for hver epoke og i så fald vil kovariansmatricen fra trin 5, resultere i en beregning spredningen på de opnåede koordinater.

Det er desuden muligt at foretage prædiktion (trin 1), selvom der ikke kommer nogen observationer ind i filteret. I dette tilfælde anvendes udelukkende de tre første trin i filteret og F_{k-1} samt $\Sigma_{\varepsilon,k}$ skal for hver epoke afspejle det voksende tidsrum. Filtreringen skal altid ske på baggrund af den sidst filtrerede tilstandsvektor.

En af fordelene ved Kalman filteret er, at hvis det udelukkende ønskes at prædiktere og filtrere data, er det ikke nødvendigt at gemme samtlige data. Beregningen sker hele tiden på baggrund af de sidst filtrerede data. Det vil sige, at når observationerne til en epoke er blevet anvendt i filteret, kan disse i princippet smides væk, da tilstandsvektoren er blevet opdateret på baggrund af disse observationer. Filteret kører herefter videre med den nye tilstandsvektor og nye observationer. Dette kan være en fordel, hvis der over lang tid skal indsamles mange data.



Figur F.2: Beregningsgangen i et Kalman filter.

F.1.1 Udglatning

Udglatning er en metode til at foretage en yderligere udjævning af det filtrerede data, for derved at opnå f.eks. en forbedret positionsbestemmelse. Hvis det ønskes at foretage en udglatning er det nødvendigt at gemme de beregnede tilstandsvektorer og kovariansmatricer, for hver observation der bringes igennem filtret. Fra hvert gennemløb af Trin 1-5 gemmes dermed følgende:

- Den prædikterede tilstandsvektor $\hat{x}_{k|k-1}$
- Variansen for den prædikterede tilstandsvektor $\Sigma_{k|k-1}$
- Den filtrerede tilstandsvektor $\hat{x}_{k|k}$
- Variansen for den filtrerede tilstandsvektor $\Sigma_{k|k}$

Hvor prædiktion og filtrering foregår fra den første epoke til den sidste, foregår udglatning i omvendt rækkefølge, dvs. fra den sidste epoke til den første. Udglatningen foregår ligesom resten af Kalman filteret rekursivt, og kræver tre beregningstrin, se Ligning F.6 - F.8:

Trin 1U: Ny Kalman gain matrice

$$A_k = \Sigma_{k|k}F_k^T\Sigma_{k+1|k}^{-1} \qquad (F.6)$$

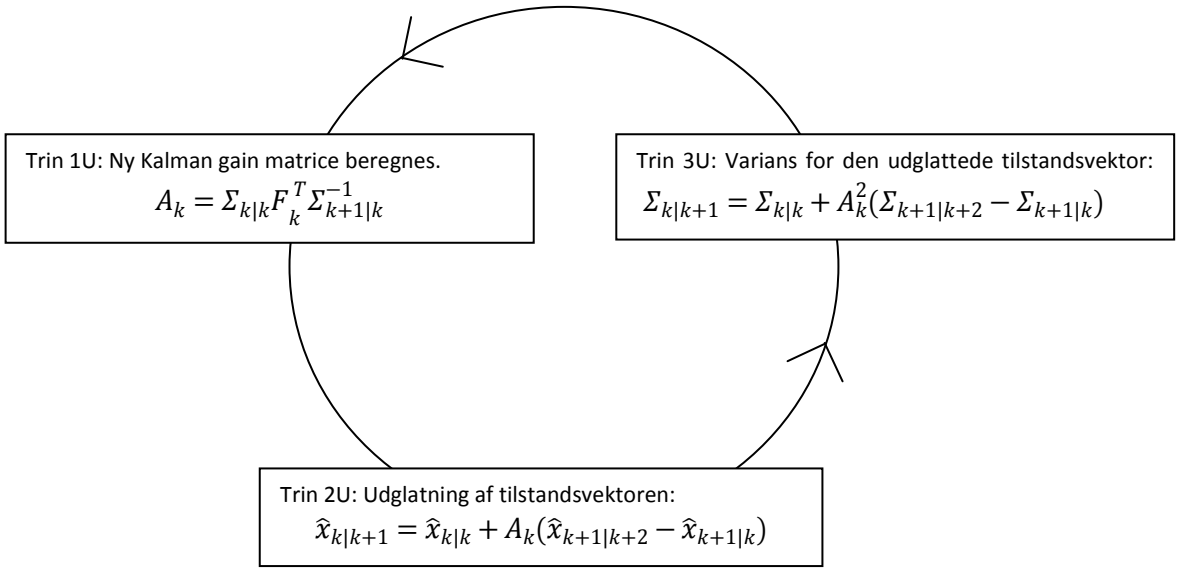
Trin 2U: Udglatning af tilstandsvektoren

$$\hat{x}_{k|k+1} = \hat{x}_{k|k} + A_k(\hat{x}_{k+1|k+2} - \hat{x}_{k+1|k}) \quad (F.7)$$

Trin 3U: Varians for den udglattede tilstandsvektor

$$\Sigma_{k|k+1} = \Sigma_{k|k} + A_k^2(\Sigma_{k+1|k+2} - \Sigma_{k+1|k}) \quad (F.8)$$

Beregningsgangen af udglatningen startes med data fra den sidste epoke og sluttes med data fra den første epoke. Det ses i Figur F.3, at udglatningsløkken startes med, at en ny gain matrice beregnes. I dette trin 1U, anvendes varianserne for både den prædikterede og filtrerede tilstandsvektor. Når gain matricen er beregnet, anvendes denne sammen med de prædikterede og filtrerede tilstandsvektorer til en udglatning af tilstandsvektoren i trin 2U. Endelig beregnes variansen for den udglattede tilstandsvektor i trin 3U, hvor varianserne for både den prædikterede og filtrerede tilstandsvektor anvendes til beregningen, som i trin 1U. Herefter starter løkken forfra.



Figur F.3: Beregningsgangen i udglatningen med Kalman filteret.

F.2 Bevægelsesligninger

Det der gør, at Kalman filtrering er så nemt at anvende er, at det udelukkende består af fem filterligninger, der kan anvendes direkte, så snart inputtet til disse ligninger er gjort klar. Før Kalman filtrering kan anvendes, er det nødvendigt at opstille to modeller, en primær model og en sekundær model. Disse modeller opstilles med baggrund i en model for, hvordan objektet bevæger sig. Den valgte bevægelsesmodel forklares i det følgende, og Kalman filteret bygges derfor op omkring den nedenfor opstillede bevægelsesmodel, se Ligning F.15.

For at Ligning F.15 gælder, forudsættes det, at data fra IMU'en omregnes til koordinater (DR-IMU), samt at data fra det elektroniske kompas og de simulerede afstandsdata sættes sammen og omreg-

nes til koordinater (DR-AK). De data, der anvendes i Kalman filteret er således to sæt koordinater i et retvinklet koordinatsystem. Koordinatsystemet har den ene akse mod øst, og den anden mod nord.

Hastigheds- og stedfunktionen til et objekt, der bevæger sig med konstant acceleration er givet ved følgende ligninger (Elvekjær, 2002:367):

Hastighedsfunktion

$$v(t) = a(t) \cdot t + v(0) \quad (F.9)$$

Hvor,
$v(t)$ er hastigheden til tiden t
$a(t)$ er accelerationen til tiden t
$v(0)$ er begyndelseshastigheden

Stedfunktion

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot a(t) \cdot t^2 + v(0) \cdot t + s(0) \quad (F.10)$$

Hvor,
$s(t)$ er stedet til tiden t
$a(t)$ er accelerationen til tiden t
$v(0)$ er begyndelseshastigheden
$s(0)$ er begyndelsesstedet

Ligning F.10 kan omskrives, så der fås et udtryk for positionen på et objekt, der bevæger sig i to dimensioner med konstant acceleration:

Bevægelsesligninger

$$E_k = E_{k-1} + v_{E,k-1} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_{E,k-1} \cdot \Delta t^2 \quad (F.11)$$

$$N_k = N_{k-1} + v_{N,k-1} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_{N,k-1} \cdot \Delta t^2 \quad (F.12)$$

Derudover gælder at hastighederne til epoke k kan beregnes som:

$$v_{E,k} = v_{E,k-1} + a_{E,k-1} \cdot \Delta \quad (F.13)$$

$$v_{N,k} = v_{N,k-1} + a_{N,k-1} \cdot \Delta t \quad (F.14)$$

Hvor,
E_k og N_k er positioner til epoke k
v_E og v_N er hastighederne i hhv. E og N retning til epoke k
E_{k-1} og N_{k-1}er positioner til forrige epoke
Δt er tidsforskellen mellem to epoker
$v_{E,k-1}$ og $v_{N,k-1}$ er hastighederne i hhv. E og N retning til forrige epoke
$a_{E,k-1}$ og $a_{N,k-1}$ er accelerationerne hhv. i E og N retning til forrige epoke

Ligning F.11 - F.14 kan omskrives til matrice form:

Bevægelsesligninger på matrice-form

$$\begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{k-1} \\ N_{k-1} \\ v_{E,k-1} \\ v_{N,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{E,k-1} \\ a_{N,k-1} \end{bmatrix} \quad (F.15)$$

Ovenstående er modellen for kameraets bevægelse. Da bevægelsesmodellen nu er opstillet, er det muligt med baggrund i denne model, at opstille den primære og sekundære model.

F.3 Primær model

I den primære model beskrives sammenhængen mellem observationer og ubekendte. Dette gøres ved hjælp af et sæt observationsligninger, se der for hver epoke opstilles efter Ligning F.16:

Observationsligninger

$$b_k = A_k \cdot x_k + e_k \quad (F.16)$$

Hvor,
b_k er observationsvektoren
A_k er en koefficientmatrix
x_k er en vektor med de ubekendte (tilstandsvektoren)
e_k er fejl ved observationsligningerne

Da alle observationer er omregnet til koordinater, indeholder observationsvektoren to sæt koordinater, DR-IMU og DR-AK. Tilstandsvektoren, x_k, beskriver de ubekendtes værdi, og er således en vektor med de ubekendte. Disse vælges at være kameraets position og hastighed til epoke k.
Da alle observationer omregnes til koordinater, kan observationsligningerne på matriceform repræsenteres som det fremgår af Ligning F.17.

Observationsligninger på matriceform

$$\begin{bmatrix} E_{IMU,k} \\ N_{IMU,k} \\ E_{DR,k} \\ N_{DR,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} + e_k \quad (F.17)$$

Observationsligningerne påvirkes af fejlene angivet i e_k. Disse fejl forudsættes normalfordelte omkring 0 og beskrives ved hjælp af kovariansmatricen Σ_{e_k} jf. Ligning F.18:

Kovariansmatrice for observationerne

$$\Sigma_{e_k} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{E_{IMU},k} & \sigma_{E_{IMU}N_{IMU},k} & 0 & 0 \\ \sigma_{E_{IMU}N_{IMU},k} & \sigma^2_{N_{IMU},k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2_{E_{DR},k} & \sigma_{E_{DR}N_{DR},k} \\ 0 & 0 & \sigma_{E_{DR}N_{DR},k} & \sigma^2_{N_{DR},k} \end{bmatrix} \quad (F.18)$$

Hvor,
$\sigma^2_{E_{IMU},k}$ og $\sigma^2_{N_{IMU},k}$ er varianserne for IMU koordinaterne
$\sigma_{E_{IMU}N_{IMU},k}$ er kovarianserne mellem IMU koordinaterne
$\sigma^2_{E_{DR},k}$ og $\sigma^2_{N_{DR},k}$ er varianserne for DR koordinaterne
$\sigma_{E_{DR}N_{DR},k}$ er kovarianserne mellem DR koordinaterne

Varianserne og kovarianserne bestemmes forud for igangsætningen af filteret og må bestemmes under hensyntagen til kvaliteten af dataindsamlingen.

F.4 Sekundær model

I den sekundære model beskriver et sæt systemligninger sammenhængen mellem de ubekendte til epoke k og de ubekendte til epoke k-1, jf. Ligning F.19.
Systemligningerne beskriver, hvordan de ubekendte varierer over tid og er afhængige af den valgte bevægelsesmodel, og hvis det forudsættes, at et objekt bevæger sig med konstant hastighed og accelerationen dermed er 0, kan systemligningerne opstilles som i Ligning F.20.

Systemligninger

$$x_k = F_{k-1} \cdot x_{k-1} + \varepsilon_k \quad (F.19)$$

Hvor:
x_k og x_{k-1} er tilstandsvektoren til epoke k og epoke k-1
F_{k-1} er en koefficientmatrix (Transition matrix)
ε_k angiver fejlene der påvirker systemligningerne

Systemligninger ved konstant hastighed

$$\begin{bmatrix} E_k \\ N_k \\ v_{E,k} \\ v_{N,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{k-1} \\ N_{k-1} \\ v_{E,k-1} \\ v_{N,k-1} \end{bmatrix} + \varepsilon_k \quad (F.20)$$

Det må forventes, at selvom hastigheden antages at være konstant, vil hastigheden stadig blive påvirket af en acceleration, repræsenteret af fejlen på systemligningerne, ε_k. For dette projekt opdeles ε_k i to komponenter, hhv. E- og N-retning (jf. Ligning F.21), samt en koefficientmatrice, jf. Ligning F.22. Kovariansmatricen for fejlene i systemligningerne kan bestemmes ved hjælp af den generelle fejlforplantningslov, jf. Ligning F.23. Accelerationerne er ukendte, men for at kunne bestemme kovariansmatricen for systemfejlene, Ligning F.23, forudsættes det at et estimat for accelerationernes varianser kan for opstilles i Ligning F.22.

Fejl på systemligningerne

$$\varepsilon_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{E,k-1} \\ a_{N,k-1} \end{bmatrix} = G_k \cdot w_k \qquad (F.21)$$

Kovariansmatricen for accelerationerne

$$\Sigma_w = \begin{bmatrix} \sigma^2_{a_{E,k-1}} & \sigma_{a_{EN,k-1}} \\ \sigma_{a_{EN,k-1}} & \sigma^2_{a_{N,k-1}} \end{bmatrix} \qquad (F.22)$$

Kovariansmatrice for ε_k

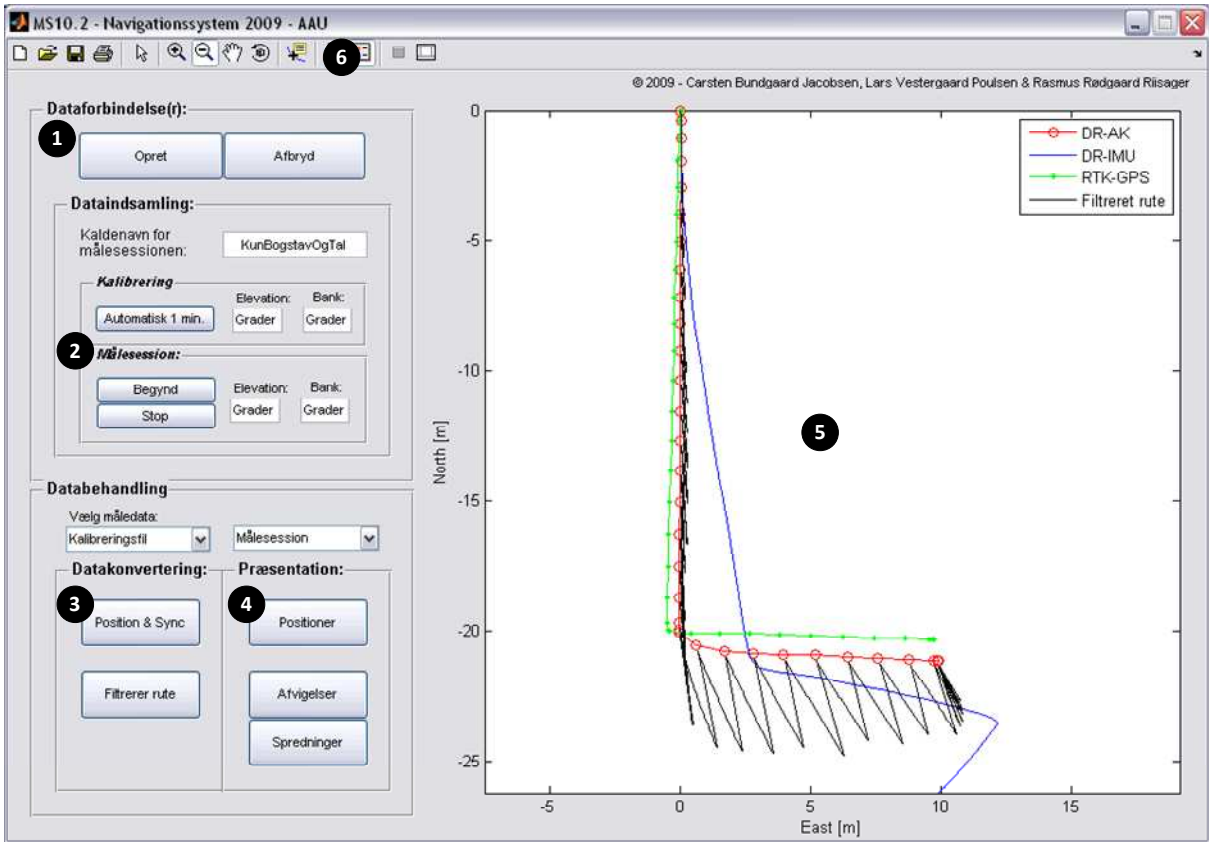
$$\Sigma_{\varepsilon_k} = G_k \Sigma_w {G_k}^T \qquad (F.23)$$

Herefter er alle nødvendige matricer er opstillet, er det nu muligt at anvende Kalman filteret.

Bilag G - Udvikling af navigationssoftware

Formålet med dette bilag er at beskrive overvejelserne, der knytter sig til udviklingen af softwaredelen til NS-1002 i Matlab. Dette gøres for at sikre, at den udviklede softwaredel opfylder de krav, der er opstillet i hovedrapportens underafsnit 5.1.1, for at positionsbestemmelse kan udføres tilfredsstillende. Dvs. oprettelse af seriel forbindelse til og dataopsamling fra de benyttede måleinstrumenter samt behandling af det indsamlede data

Afsnit G.1, G.2 og G.3 beskriver de konkrete overvejelser, der blev gjort, gennem en iterativ proces, ved udviklingen af funktionerne, der skal sikre udførelse af hhv. oprettelse af dataforbindelse, dataindsamling og databehandling. Opbygningen disse af knytter sig til funktionerne der kan aktiveres i brugergrænsefalden, der er beskrevet nærmere i hovedrapportens underafsnit 5.1.2, og gengivet i Figur G.1.

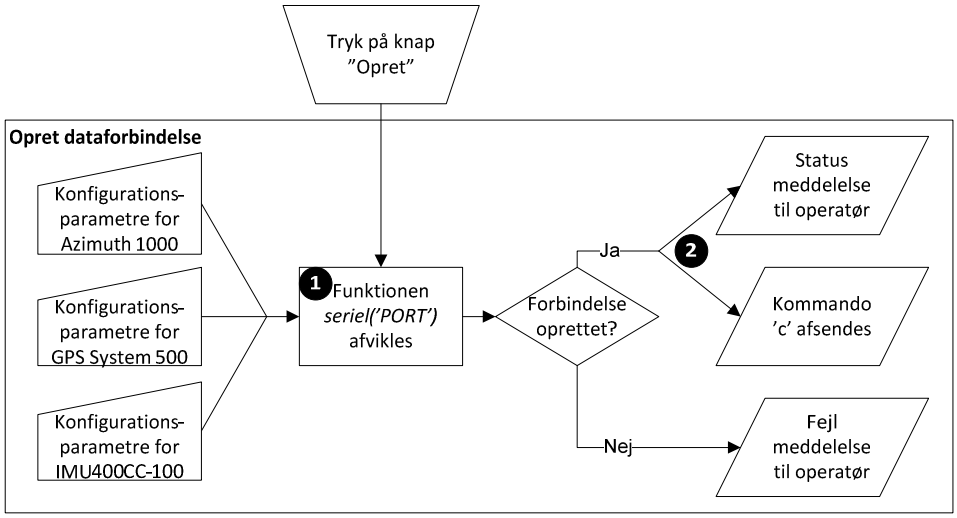


Figur G.1: Udviklet brugergrænseflade til NS-1002, til aktivering af de nødvendige funktioner.

G.1 Instrumentkontrol

Første trin i at positionsbestemme simuleringskøretøjet, er at oprette en dataforbindelse til hvert af de tre monterede instrumenter, hvorefter dataindsamling vil være mulig. Dette gøres ved at operatøren trykker på knappen 'Opret', der for hvert af instrumenterne igangsætter Matlabs indbyggede funktion *seriel()*, til oprettelse af en seriel dataforbindelse, se Figur G.2.

Markør 1. Funktionen *seriel()* kræver, at en række parametre er opsat for hvert instrument før dataforbindelsen kan oprettes, herunder hvilket kommunikationsstik instrumentet er tilsluttet i computeren, benævnt port. Mislykkes oprettelsen af dataforbindelsen til et eller flere af instrumenterne, oplyses operatøren herom via en fejlmeddelelse.
Markør 2. Lykkedes oprettelsen af dataforbindelserne afsendes efterfølgende en kommando 'c', til IMU400CC-100, der opsætter denne til at levere data i Scaled Sensor Mode, og en meddelelse til operatøren om succesfuld oprettelse af dataforbindelser vises. Dataforbindelsen kan herefter anvendes indtil operatøren trykker på knappen 'Afbryd' i brugerinterfacet.



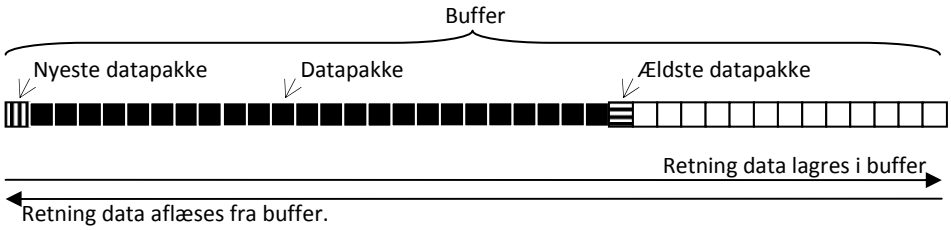
Figur G.2: Diagram for oprettelse af seriel dataforbindelse til hvert af de tre anvendte instrumenter.

G.2 Dataindsamling

Når der succesfuldt er oprettet en dataforbindelse til hvert af instrumenterne, kan operatøren af NS-1002, igangsætte en dataindsamling. Der kan i brugergrænsefladen aktiveres to forskellige dataindsamlingsfunktioner, jf. Figur G.1 markør 2. En knap til indsamling af kalibreringsdata for IMU400CC-100 mens simuleringskøretøjet holder stille, og en knap til indsamling af data i positioneringsøjemed af simuleringskøretøjet i bevægelse. Processerne for begge indsamlingsfunktioner er illustreret i Figur G.5.
Først beskrives det overordnede princip for dataindsamling samt en række faktorer, der har sat begrænsninger for, hvordan dataindsamlingen reelt er udviklet i NS-1002. Derefter beskrives processerne for dataindsamlingen til positionering og efterfølgende for kalibrering.

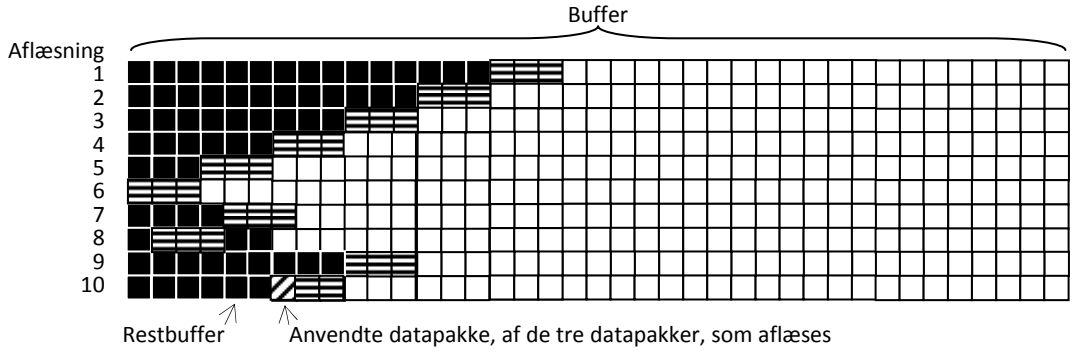
Princip og faktorer med indflydelse for dataindsamling
Indsamlingen af data foregår grundlæggende ved, at instrumenterne afsender nye datapakker til computeren, hvor de lagres i en buffer. Når denne buffer er fyldt med tilstrækkelige datapakker til en hel måling fra et af instrumenterne, modtages denne fra bufferen til videre behandling i Matlab. Hvorvidt der er data for en måling, klar til aflæsning fra bufferne til hvert instrument, tjekkes løbende via en overordnet løkke, der skal afvikles med højere frekvens end instrumenterne producerer data, for at undgå at bufferen fyldes med data, der ved aflæsning, fejlagtigt betragtes og tidsstemples som nyproduceret, jf. Figur G.3.

I Matlab findes flere funktioner til tidsstempling på baggrund af computerens indbyggede ur, men kun funktionen *tic,toc* har kunnet opdatere tiden i milisekunder med samme frekvens som den overordnede løkke afvikles. *tic,toc* er et stopur, der afvikles sideløbende med den overordnede løkke, resulterende i, at denne løkke afvikles med lavere frekvens. Dette resulterer i, at bufferen tilhørende IMU400CC-100 ikke aflæses med frekvensen som data produceres, hvorved tidsstemplingen ved aflæsningen ikke er korrekt. Fejlbehæftet tidsstempeling af målingerne vil resultere i forkert sammenknytning med målinger fra andre instrumenter, når disse anvendes i et Kalman filter, samt resultere i et forkert koordinatsæt, når accelerationerne fra IM400CC-100 integreres over tiden, til positioner.



Figur G.3: Datagangen i bufferen fungerer efter princippet, først ind, først ud. Ældste datapakke aflæses derfor først fra bufferen.

Problemet med forkert tidsstempling af aflæst data, blev løst med inspiration i Axelson (2000:21,50). Først sikres det, at intet produceret data fra IMU400CC-100 går tabt ved et 'buffer-overflow', dvs. en situation, hvor nye datapakker skal lagres i en allerede fyldt buffer. Dette er gjort ved at opsætte størrelsen på bufferen til at kunne indeholde 300 målinger (5400/18 bytes). Samtidig aflæses der tre datapakker fra IMU'ens buffer ad gangen, frem for én, hvorved bufferen ofte vil være helt tom efter en aflæsning, men voksende når bufferne for de to øvrige instrumenter aflæses. Ved kun at bruge datapakken længst mod venstre fra aflæsningen, vil denne datapakke kunne betragtes som tidsstemplet korrekt, hvis restbufferen efter aflæsningen er tom, eksemplificeret ved aflæsning 6 i Figur G.4. Når kun hver tredje datapakke anvendes, falder dataindsamlingsfrekvensen for IMU400CC-100 reelt fra 134 Hz til ca. 45 Hz.



Figur G.4: Ved aflæsning af tre datapakker, kan datamængden i IMUens buffer løbende nedbringes, som ved aflæsning 6, hvor datapakken længst til venstre kan betragtes som tidsstemplet korrekt, da denne er helt nyproduceret.

Integration af accelerationer over *tic,toc* tiden, resulterer dog stadig i fejlagtige positioneringer når aflæsningen forsinkes, eksemplificeret mellem aflæsningerne 6-7 og 8-9, se Figur G.4. Derfor anvendes den indbyggede timer i IMU400CC-100 som fælles synkroniseringstid for alle tre instrumenter ved at interpolere observationer fra GPS System 500 og Azimuth 1000 over i IMU-tidsstemplingen,

forud for filtreringen af positionerne. Interpoleringen af observationer over i IMU-tid, beskrives nærmere i afsnit G.3.

Dataindsamling – positioneringsdata

Figur G.5 illustrerer fra markør 1-8 de processer, der gennemgås for at indsamle og lagre data fra de tre instrumenter til positionering.

Markør 1. Når operatøren har igangsat dataindsamlingen, udføres der først en indledende proces. Dette skyldes, at Azimuth 1000 og GPS System 500 begynder at fylde computerens buffer med data så snart dataforbindelsen er oprettet, mens IM400CC-100 først sender data efter kommandoen 'C' er afsendt til den. Initialiseringsprocessen sørger derfor for at,

- bufferne tømmes, så data der modtages er aktuelt
- igangsætter IMU400CC-100 til løbende afsendelse af data
- opretter databaser til lagring af data fra hvert instrument
- starter Matlabs PC-stopur (*tic,toc*) til tidsstempling af dataaflæsningen fra bufferen

Markør 2. Efter initialiseringsprocessen igangsættes en løkke, der udføres indtil operatøren afbryder dataindsamlingen ved at trykke på knappen 'Stop' i brugergrænsefladen, jf. Figur G.1 markør 2. Løkken sørger overordnet for, at modtage måledata fra hvert af instrumenterne, når en hel datapakke er lagret i computerens buffer fra det pågældende instrument (for nærmere information om formatet af en hel datapakke for hvert instrument henvises til Bilag B).

Markør 3. Er der ikke en hel datapakke klar til modtagelse fra bufferen, undersøges det, om der er en hel datapakke klar fra et andet instrument.

Markør 4. Når en hel datapakke er klar til modtagelse fra bufferen til et af instrumenterne, modtages denne og en efterbehandlingsproces foretages inden datapakken lagres i databasen hørende til det pågældende instrument. Særligt for IMU'en aflæses tre hele datapakker af gangen, som beskrevet tidligere.

For at lette overskueligheden af dataindsamlingsprocessen, som beskrevet i det forrige, er efterbehandlingsprocessen blevet generaliseret. Der sker dog flere forskellige underprocesser i efterbehandlingsprocessen frem til lagring af en hel datapakke i databasen til det pågældende instrument. Efterbehandlingsprocessen illustreres derfor nærmere i den nederste del af Figur G.5, og beskrives nærmere mellem markør 5 - 8.

Markør 5. Efterbehandlingsprocessen omfatter først at modtage datapakken fra computerens buffer for at indlæse den i Matlab. Tidspunktet, hvor datapakken blev registreret klar til modtagelse fastlægges, hvorefter det undersøges, hvorvidt datapakken er modtaget korrekt over dataforbindelsen.

Markør 6. Undersøgelsen af, om datapakken er korrekt foregår ved at beregne en checksum-værdi for den modtagne datapakke, som skal stemme overens med den checksum-værdi, der udgør en del af selve den modtagne datapakke, jf. Bilag B. Er der overensstemmelse lagres datapakken i databasen hørende til det pågældende instrument. Er der uoverensstemmelse mellem de to checksum-værdier, slettes datapakken, der behandles, hvis denne tilhører enten Azimuth 1000 eller GPS System 500. Er datapakken fra IMU400CC-100 kan checksum uoverensstemmelsen skyldes, at datapakken ikke længere overføres synkront, og da data fra IMU400CC-100 ikke indikerer afslutningen på hver enkelt datapakke ved f.eks. at angive en terminator-værdi, er det vigtigt at få genetableret synkroniseringen af dataindsamlingen, jf. markør 7.

Markør 7. Denne genetableringsproces for IMU400CC-100 foretages som en del af efterbehandlingsprocessen. Frekvensen, hvormed data afsendes fra IMU400CC-100, er højere end ved de to øvrige instrumenter og vil derfor oftere have en hel datapakke klar til afsendelse. Da frekvensen er højere vil genetableringsprocessen derfor ikke forsinke modtagelsen af datapakker fra de øvrige instrumenter, når disse er klar i bufferen. Genetableringen af en synkroniseret modtagelse af datapakker for IMU400CC-100 består grundlæggende i at tælle antallet af bytes, der modtages. Dette gøres ved først at tømme bufferen til IMU400CC-100, for derefter at aflæse bufferen så snart der er en byte klar til modtagelse, indtil værdien af den modtagne byte stemmer overens med værdien for en header-byte.

Markør 8. Når der er fundet en mulig header, afventer programmet, indtil bufferen er fyldt med det resterende antal bytes, der udgør en fuld datapakke. Når hele datapakken er klar, modtages denne fra bufferen, hvorefter efterbehandlingsprocesserne gentages på ny, se markør 5.

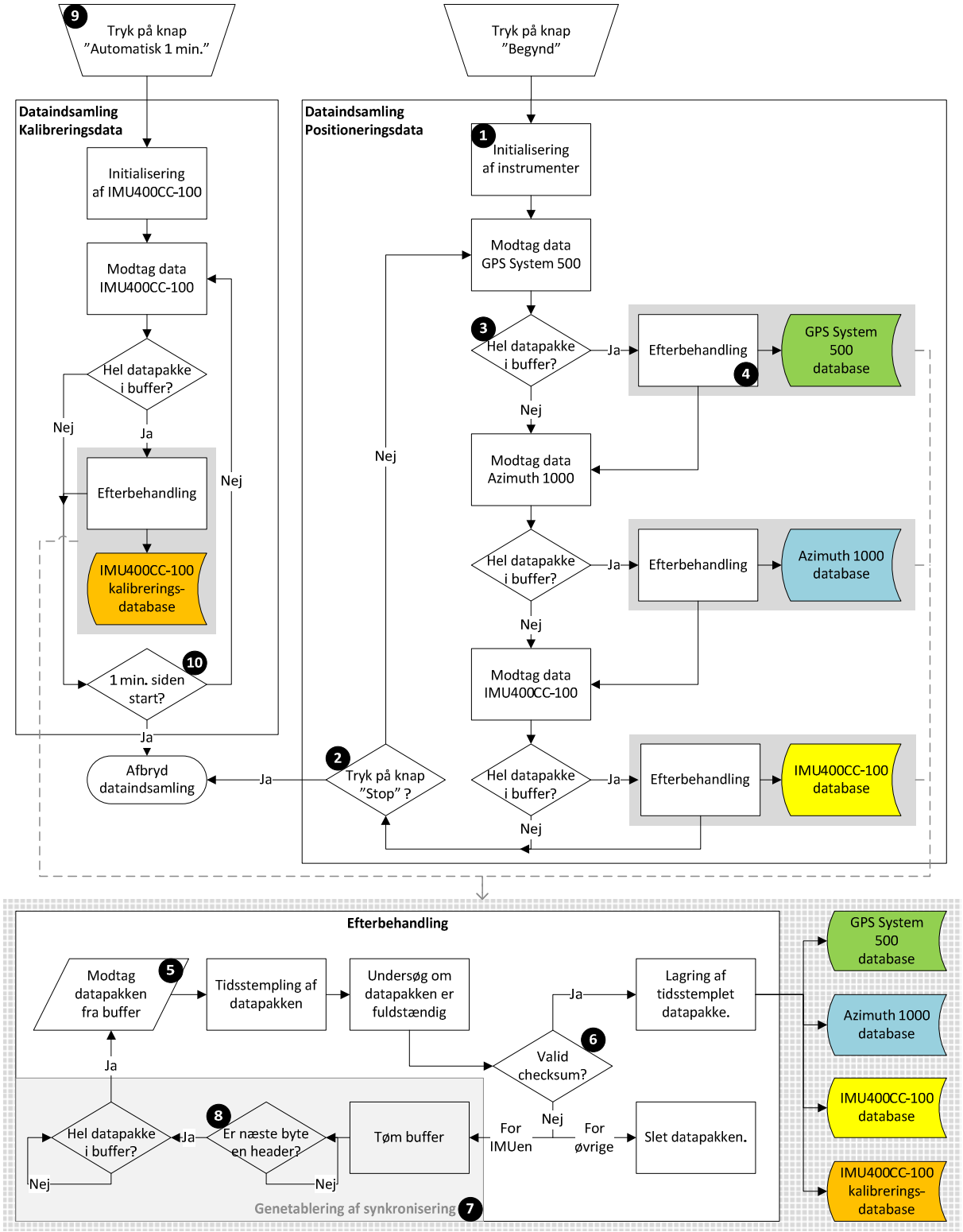
Efter endt efterbehandling af datapakken, fortsættes dataindsamlingen, ved at undersøge, om der er en datapakke klar til afsendelse ved et andet instrument.

Dataindsamling – kalibreringsdata

Figur G.5 illustrerer fra markør 9-10 og 5-8, de processer der gennemgås for at indsamle og lagre data til kalibreringsøjemed af IMU400CC-100.

Markør 9 (5→8). Ved et tryk på knappen 'Automatisk 1 min.' udføres en dataindsamling lig den beskrevet for indsamling af positioneringsdata, med den forskel at den overordnede løkke kun tjekker og modtager data fra bufferen til IMU400CC-100.

Markør 10. Den overordnede løkke stoppes modsat indsamling af positioneringsdata, automatisk. For hver gennemløb af den overordnede løkke undersøges det om der er gået et minut siden operatøren trykkede på knappen 'Automatisk 1 min.', og er dette tilfældet stoppes dataindsamlingen til kalibreringsøjemed. Indsamlingen af data i netop et minut, stammer fra resultater i hovedrapportens underafsnit 6.2.1.



Figur G.5: Diagram for funktionen Dataindsamling, for hhv. kalibrerings- og positioneringsøjemed. Nederste boks med grå-ternet baggrund, er en uddybning af indholdet i processen, 'Efterbehandling', som udføres flere steder i indsamlingen.

G.3 Databehandling

Efter endt dataindsamling fra de tre instrumenter, skal operatøren af NS-1002 foretage en konvertering af det indsamlede data til egentlige observationer og omregne disse til positioner, korrigeret for systematiske fejl, før det er muligt at udtegne den tilbagelagte rute i brugerinterfacet. Denne databehandling er opdelt i to funktioner, jf. Figur G.1 markør 3.

Et tryk på knappen 'Positionsbestem & Sync' beregnes den tilbagelagte rute bestemt på tre forskellige måder, for at senere at kunne illustrere forskellene til den filtrerede rute. Derfor bestemmes en rute kun på baggrund af det indsamlede data fra IMU400CC-100 (DR-IMU), en anden rute bestemt ved sammenknytning af afstanden mellem to RTK-GPS observationer fra GPS System 500, samt middelkursen fra Azimuth 1000 imellem disse to observationer (DR-AK). Den tredje rute består af de målte GPS observationer, der grundet den relativt høje nøjagtighed, hvormed hvert punkt er bestemt, vil blive betragtet som den 'sande' rute, der er tilbagelagt (RTK-GPS). Desuden vil observationerne fra GPS System 500 og Azimuth 1000 blive interpoleret over i IMU-tidsreferencen under denne databehandlingsfunktion.

Den anden databehandlingsfunktion, aktives ved et tryk på knappen 'Filtrerer rute'. Funktionen benytter det valgte Kalman filtreringsprincip, som er nærmere beskrevet i hovedrapportens underafsnit 8.4.2, til at bestemme en rute på baggrund af DR-AK og rå data fra IMU400CC-100. Derfor forudsætter funktionen også, at der er udført en 'Positionbestem & Sync', hvor tidsstemplingen af positionerne i DR-AK allerede er blevet konverteret til IMU-tidsreferencen.

Efter udført databehandlingen, kan operatøren udtegne de forskellige ruter via brugergrænsefladen, jf. Figur G.1 markør 4.

Databehandling – 'Positionsbestem & Sync'

Figur G.7 illustrerer de processer, der gennemgås for at synkronisere det indsamlede data til IMU-tidsreferencen og konvertere det til positioner for hhv. DR-IMU, DR-AK og RTK-GPS samt lagre dette til senere udtegning af tilbagelagte ruter.

Markør 1. Når operatøren har igangsat databehandlingen, og en række indledende værdier er blevet erklæret, f.eks. startpunkt har koordinat (0,0), behandles først data indsamlet fra IMU400CC-100. Først skal det indsamlede binære data fra IMU'en konverteres til accelerations- og vinkelhastighedsværdier, jf. Ligning B.2 - B.4.

Markør 2. Beregningsgangen fra konverterede observationer til en position, er for IMU'en beskrevet i hovedrapportens afsnit 4.2. Her fremgår det, at positionen beregnes på baggrund af observationer korrigeret for systematiske fejl. Derfor korrigeres positioneringsdata for bias, inden de indgår i positionsbestemmelsen. Beregningen af bias sker på baggrund af det data, der blev indsamlet til kalibrering i 1 min., og beskrives nærmere i hovedrapportens kapitel 6.

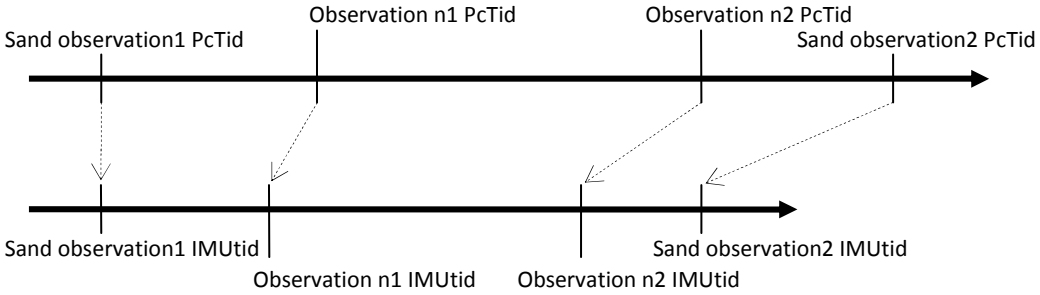
Markør 3. Under dataindsamlingen blev der ved hver aflæsning af tre datapakker også gemt restbufferens størrelse. Det undersøges her, om restbufferen, efter aflæsning af observationen under behandling, indeholdte nok data til til at udgøre en hel datapakke. Hvis dette ikke er tilfældet har IMU400CC-100 endnu ikke har produceret en hel datapakke (observation), hvorfor den observation som er under behandling nu, kan betrates som aflæst ved korrekt *tic,toc* tidsstempel. Disse 'sande' observationer er vigtige når Azimuth 1000 og GPS System 500 observationer skal interpoleres over i IMU-tidsreferencen, og derfor lagres *tic,toc*-tiden og IMU-tiden for denne observation, til senere brug ved markør 4. Herefter gentages de samme processer for resten af IMU observationerne.

Markør 4. Efter alle IMU observationerne er behandlet, og alle 'sande' tider er gemt i en matrice, påbegyndes konverteringen af observationerne fra Azimuth 1000 og GPS System 500. Hver observation interpoleres over i IMU-tidsreferencen ved at finde frem til, hvilke to sande PC-tidspunkter, som observationen under behandling, er beliggende imellem og finde den forholdsmæssige afstand til disse to sande tidspunkter. Dette forhold benyttes til at tidsstemple observationen i IMU-tidsreferencen, se Ligning G.1 og Figur G.6.

Interpolation af tidsstempel

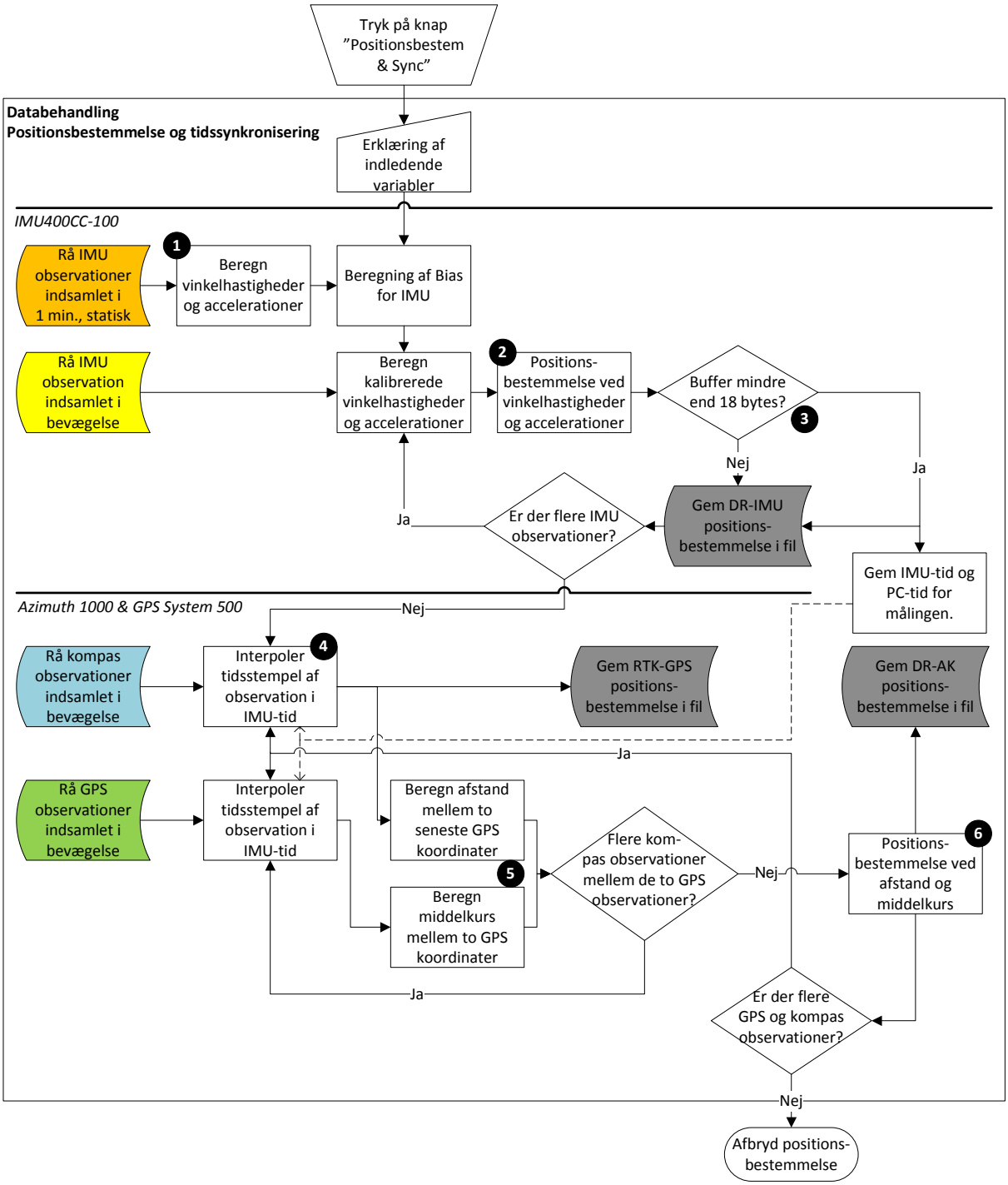
$$Stempel\big(obs(n)\big)_{IMUtid} = obs(1)_{IMUtid} + \left(\frac{obs(n)_{PcTid} - obs(1)_{PcTid}}{\Delta Sand_{PcTid}}\right) \cdot \Delta Sand_{IMUtid} \qquad (G.1)$$

Hvor,
$\Delta Sand$, er differencen mellem de to nærmeste sande observationer 1 og 2, jf. Figur G.6.
$obs(1)$, er sand observation 1.
$obs(n)$, er observationen som skal interpoleres over i IMU-tidsreferencen.



Figur G.6: Interpolation af tidsstempel fra Pc-tidsreference til IMU-tidsreferencen.

Markør 5. Før det indsamlede data fra Azimuth 1000 og GPS System 500 kan benyttes til at beregne en DR-AK position skal 2d-afstanden mellem nuværende og forrige RTK-GPS position beregnes, jf. hovedrapportens Ligning 4.12. Azimuth 1000 genererer observationer med højere frekvens end GPS System 500. Derfor benyttes den gennemsnitlige kurs for de Azimuth 1000 observationer, der tidsmæssigt er indsamlet mellem de to RTK-GPS positioner, som bruges ved afstandsberegningen.
Markør 6. Beregningsgangen fra konverterede afstand og kurs observationer, til en DR-AK position, er beskrevet i hovedrapportens afsnit 4.3. Når DR-AK positionen er beregnet og lagret, gentages processerne mellem markør 4-6 for resten af GPS og kompas observationerne, hvorefter databehandlingen afsluttes.



Figur G.7: Diagram over processerne der gennemgås i databehandlingen, ved et tryk på knappen 'Positionsbestem & Sync'.

Databehandling – 'Filtrere rute'

Figur G.8 illustrerer de processer, der gennemgås for at filtrere DR-AK og DR-IMU positioner til én optimeret rute, på baggrund af tidsstemplinen af de forskellige observationer.

Markør 1. Når operatøren har igangsat databehandlingen, og en række startværdier for Kalman filtreret er blevet erklæret på baggrund undersøgelserne i hovedrapportens underafsnit 8.4.1,

indhentes første position fra hhv. DR-AK og DR-IMU, som derefter filtreres til en position på baggrund af matematikken forklaret i Bilag F.

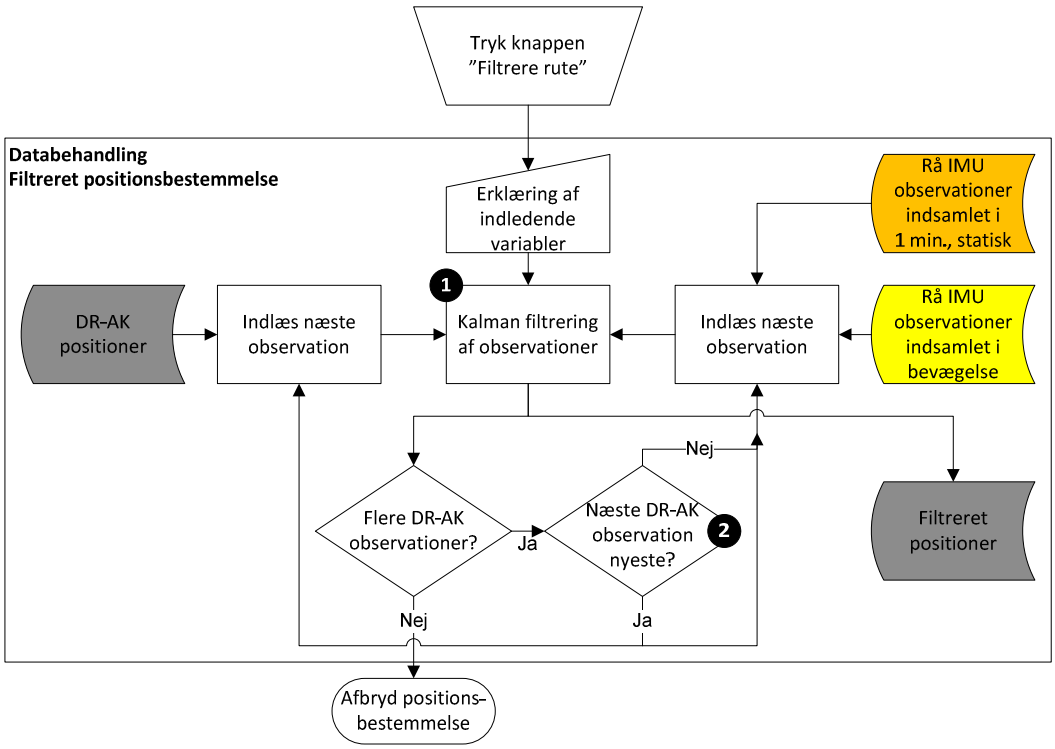
Markør 2. Herefter undersøges det, om den næste tidsmæssigt nyeste observation er bestemt ved DR-AK. Er dette tilfældet indlæses både denne og en DR-IMU observation, som filtreres til én position. Er nyeste observation ikke en DR-AK, indlæses kun en ny IMU observation, der beregnes til en position, efter det valgte filtrerings princip, (jf. hovedrapportens underafsnit 8.4.2). Dette medfører at Kalman filtrets A_k og $\sum e_k$ (jf. Bilag F), midlertidigt ændres til nedenstående matricer, indtil der igen er en ny DR-AK position.

Filtreringen af positioner forsætter, indtil der ikke er flere nye observationer.

Tilpasset A_k og $\sum e_k$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sum e_k = \begin{bmatrix} \sigma^2_{E_{IMU},k} & \sigma_{E_{IMU}N_{IMU},k} \\ \sigma_{E_{IMU}N_{IMU},k} & \sigma^2_{N_{IMU},k} \end{bmatrix}$$



Figur G.8: Diagram over processerne der gennemgås i databehandlingen ved et tryk på knappen 'Filtrerer rute'.