Udvikling af et fotogrammetrisk alternativ til terrestrisk laserscanning



Landinspektørstudet 2011 - Aalborg

10. Semester - Measurement Science

Gruppe L10MS.01

Anders Kvist Simonsen Kristian Kobborg

Titel:

Udvikling af et fotogrammetrisk alternativ til terrestrisk laserscanning

Tema:

Terrestrisk fotogrammetri

Projektperiode:

1. februar 2011 - 9. juni 2011

Projektgruppe:

L10MS.01

Deltager:

Anders Kvist Simonsen Kristian Kobborg

Vejledere:

Jens Juhl Carsten Bech

Synopsis:

Detaljerede tredimensionelle modeller udarbejdes normalt vha. en terrestrisk laserscanner, der er et forholdsvist dyrt instrument. Projektet tager sit udgangspunkt i en idé om, at det bør være muligt at erstatte den dyre laserscanner med et fotogrammetribaseret system, uden at gå på kompromis med kvaliteten af slutproduktet. Projektet mål er at foretage en praktisk undersøgelse af anvendeligheden af nogle grundlæggende fotogrammetriske metoder, som er udført vha. et stykke software, som projektgruppen selv har udviklet. Det konkluderes, at selvom fotogrammetrien har potentialet til at kunne anvendes som alternativ til terrestrisk laserscanning, så er det i praksis vanskeligt at opbygge et fotogrammetrisk modelleringssystem,

der er lige så robust som laserscanning.

Anders Kvist Simonsen

Kristian Kobborg

Oplagstal: 5

Sideantal: 75

Bilagsantal: 2 + en vedlagt CD

Afsluttet: 9. juni 2011

Title:

Development of a Photogrammetric Alternative to Terrestrial Laser Scanning

Theme:

Terrestrial photogrammetry

Project period:

1 February 2011 - 9 June 2011

Project group:

L10MS.01

Participants:

Anders Kvist Simonsen Kristian Kobborg

Supervisors:

Jens Juhl Carsten Bech

Summary:

Detailed three-dimensional modelling is most often performed using a terrestrial laser scanner, which is a fairly expensive instrument.

This project is based in the idea, that is should be possible to replace the expensive laser scanner with a photogrammetry based system, without sacrificing the accuracy of the final product.

The aim of the project is to investigate the practical applicability of som basic photogrammetric methods using a piece of software developed by the project group.

The project leads to the conclusion, that although photogrammetry definitely has the potential to be used as an alternative to terrestrial laser scanning, it is in practice difficult to achieve the same degree of robustness as is the case for laser scanning.

Anders Kvist Simonsen

Kristian Kobborg

Number of copies: 5

Number of pages: 75

Number of appendices: 2 + an accompanying CD

Finished: 9 June 2011

2_____

Indhold

1	Indledning	5			
2	Teori	7			
	2.1 Den grundlæggende kameramodel	7			
	2.2 Linsesystemet	13			
	2.3 Epipolær geometri	18			
	2.4 Automatisk billedkorrelation	19			
	2.5 Udjævning efter mindste kvadraters princip	21			
3	Problemanalyse	23			
	3.1 Erfaringer inden for området	23			
	3.2 Den fotogrammetriske metode	25			
	3.3 Projektafgrænsning	29			
	3.4 Problemformulering \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	30			
4	31				
	4.1 Kravspecifikation	31			
	4.2 Implementering	31			
5	Dataindsamling og behandling	39			
	5.1 Udvælgelse af testfelter	39			
	5.2 Metoder for beregning af punkter	42			
	5.3 Resultater for testområde "Mur"	43			
	5.4 Resultater for testfeltet "Glasparti"	57			
	5.5 Vurdering af resultater	64			
6	Konklusion	67			
Li	Litteratur				
Α	A Udvalgte billeder af testfelterne				
в	B Oversigt over filer på CD'en				

Kapitel 1 Indledning

I forbindelse med modellering af komplekse og detaljerede bygningsværker og andre objekter vil det ofte være nødvendigt at foretage mange målinger i et tæt interval for at få de mange detaljer med. Til dette formål benyttes som regel en terrestrisk laserscanner, der netop besidder evnen til at foretage mange målinger i tæt interval inden for et forholdsmæssigt overskueligt tidsrum. Laserscanneren registrerer afstande og vinkler til punkter i et givent område, hvorved en punktsky genereres. En sådan punktsky kan efterfølgende bearbejdes til en 3D-model af det givne objekt.

Terrestrisk laserscanning er dog ofte forbundet med forholdsvist store udgifter i forbindelse med anskaffelsen af udstyret, og derfor er det hovedsageligt kun de større firmaer, der benytter sig af teknikken.

Dette afgangsprojekt tager sit udgangspunkt i ønsket om at udvikle et billigt alternativ til terrestrisk laserscanning baseret på fotogrammetri. Fotogrammetriens umiddelbare fordel frem for laserscanning er, at selv et dyrt, professionelt kamera koster markant mindre end en laserscanner. Muligheden for at fremstille detaljerede 3D-modeller uden at skulle anskaffe en dyr laserscanner vil tillade en langt bredere brugergruppe at drage fordel af mulighederne ved 3D-visualisering, end tilfældet er i dag.

Forudsætningen for, at den fotogrammetriske metode kan opfattes som et anvendeligt alternativ til laserscanning, er, at metodens nøjagtighed og tidsforbrug svarer til det, en laserscanner kan levere. Det vil derfor være interessant at foretage en gennemgang af de metoder, der kan benyttes, samt en vurdering af kvaliteten af de modeller, der produceres ved brug af terrestrisk fotogrammetri. Der findes allerede adskillige fotogrammetriske modelleringsværktøjer på markedet, der alle i et vist omfang formår at skabe tredimensionelle punkskyer på baggrund af et antal billeder, men eftersom projektgruppen ønsker at undesøge selve den fotogrammetriske modelleringsproces og dens indflydelse på slutresultaterne, vil projektgruppen koncentrere sig om at demonstrere de grundlæggende principper gennem et selvudviklet demonstrationsprogram frem for at foretage en uddybende undersøgelse af de eksisterende modelleringsværktøjer. Projektets initierende problemstilling lyder derfor således:

Projektgruppen ønsker at foretage en praktisk undersøgelse af, hvorvidt det ved hjælp af nogle grundlæggende fotogrammetriske metoder er muligt at uvikle et anvendeligt alternativ til terrestrisk laserscanning.

Kapitel 2

Teori

Med fokus på en fotogrammetrisk metode til udarbejdelsen af en punktsky er det nødvendigt at få klarlagt nogle af de grundlæggende begreber, der gør sig gældende for terrestrisk fotogrammetri.

2.1 Den grundlæggende kameramodel

Billeddannelse ved centralprojektion

Den grundlæggende forudsætning for fotografering er muligheden for at registrere intensiteten af det lys, der rammer en given flade. Denne billedflade kan bestå af en glasplade eller et stykke plastikfilm, der er behandlet med nogle lysfølsomme kemikalier, eller den kan bestå af en elektronisk sensor, der omdanner det indkommende lys til elektriske spændingsforskelle. Den sidste tilgang er i dag den mest udbredte, idet den gør det muligt at optage og lagre billeder i digitalt format.

Det er dog ikke muligt at danne billeder alene ved hjælp af et lysfølsomt billedplan, idet ethvert punkt på billedplanet vil blive belyst af et vilkårligt antal punkter foran billedplanet som vist på figur 2.1. For at sikre, at et vilkårligt punkt i billedplanet kun rammes af lys fra et enkelt punkt på objektet, placeres billedplanet bag en blænde, der kun tillader lys fra objektet at passere gennem et lille hul i blændens midte. Dette hul betegnes projektionscentret, og det resulterende billede fremtræder som en centralprojektion af objektet. Blændens funktion er illustreret på figur 2.2. Det fremgår af figuren, at lysstrålerne krydser hinanden i projektionscentret, hvilket fører til en negativ afbildning af objektet, således at der bliver byttet om på op og ned og højre og venstre.

Perspektiviske konsekvenser af centralprojektionen

Som nævnt tidligere er der i forbindelse med billeder tale om en centralprojektion. Dette medfører nogle grundlæggende egenskaber for, hvordan linjer og planer opfører sig i den rumlige geometri. Udgangspunktet er en centralprojektion, en billedflade, et projektionscenter og den rumlige verden, der her i rapporten benævnes referencesystemet. De linjer i referencesystemet, der er parallelle med billedfladen, kaldes frontlinjer, mens alle andre linjer benævnes dybdelinjer. For frontlinjer gælder det, at hvis de er parallelle i referencesystemet, så vil de også



Figur 2.1: Et lysfølsomt billedplan er i sig selv ikke nok til at danne et billede af objektet, idet ethvert punkt på billedplanet rammes af lys fra mange forskellige punkter på objektet. Et uafskærmet billedplan vil derfor kun kunne registrere den generelle lysintensitet i billedplanets omgivelser.



Figur 2.2: Når billedplanet placeres bag en blænde, der kun tillader lyset at passere gennem et enkelt punkt, opstår der en centralprojiceret afbildning af objektet på billedplanet.

blive afbilledet parallelt i billedfladen. For dybdelinjer vil dette i imidlertid ikke være tilfældet. Det gælder for alle dybdelinjer, at hvis de forlænges, vil de skære med billedfladen, mens det for parallelle dybdelinjers afbildning gælder, at deres forlængelser vil mødes i et forsvindingspunkt F. Dette er illustreret i figur 2.3.¹ Ud over linjer, der udelukkende beskriver forhold i billedet, kan der ligeledes bestemmes linjer, der beskriver et forhold i referencesystemet. Iagttages to sæt dybdelinjer vil hvert sæt beskrive et forsvindingspunkt. Hvis det endvidere gælder, at linjerne er vandrette i referencesystemet, vil linjen mellem de to forsvindingspunkter beskrive horisonten i referencesystemet. Denne vil være sammenfaldende med kameraets horisontalakse, hvis kameraet vel og mærke står i lod. Er dette ikke tilfældet, vil det ud fra de to akser være muligt at bestemme kameraets hældning.

Linjer, hvis forlængelse går gennem projektionscentret, vil blive afbilledet som et punkt på billedfladen, mens en ret linje l, hvis forlængelse ikke går gennem projektionscentret, vil blive afbilledet i billedplanet ved den rette linje l'. For et plan i referencesystemet, der er parallelt med billedplanet, gælder det, at fladen gengives med samme vinkler og forhold mellem siderne, som det er tilfældet i referencesystemet. Dette er derimod ikke tilfældet for alle andre planer i referencesystemet.² Dette er illustreret i figur 2.4.

Det ovenstående har vist, at selvom centralprojektionen bevarer rette linjer, så er det generelt ikke en vinkelbevarende transformation. Det betyder blandt andet, at det samme objekt ser forskelligt ud, når det fotograferes fra to forskellige kamerastandpunkter, hvilket gør det vanskeligere at finde sammenhørende punkter i forskellige billeder.

Indre orientering

Den indre orientering beskriver den geometriske situation inde i selve kameraet. Den indre orientering omhandler således projektionscentrets position i forhold til billedfladen samt hovedpunktets placering i billedfladen. Hovedpunktet er projektioncentrets vinkelrette projektion på billedfladen. I et simplificeret tilfælde er hovedpunktet sammenfaldende med billedmidtpunktet, men i praksis er dette som regel ikke gældende. Hovedpunktets afvigelse fra billedmidtpunktet benævnes henholdsvis PP_x og PP_y , for en afvigelse langs billedfladens x- og y-akse. I figur 2.7 ses en illustration af et simplificeret kameras indre orientering. I figuren er projektionscentret markeret angivet med O, mens hovedpunktet er angivet med H. Afstanden mellem hovedpunktet og projektionscentret angiver kamerakonstanten og er angivet med c. Der er således tre ubekendte, der ønskes bestemt i den indre orientering. Kamerakonstanten c og hovedpunktets koordinater PP_x og PP_y .

Ved betragtning af de ensvinklede trekanter, $\Delta OA'B'$ og ΔOAB , i figur 2.7 kan følgende formler for et punkts centralprojektion på billedplanet umiddelbart udledes:

$$x^{\circ} = -c\frac{X_k}{Z_k} \tag{2.1}$$

 $[\]frac{1}{2}$ [Vedelsby & Felsager, s. 3]

²[Vedelsby & Felsager, s. 5]



Figur 2.3: Illustration af billeders egenskaber ved en centralprojektion.



 $Figur \ 2.4: \ Illustration \ af \ bevarelse \ af \ fladers \ vinkler \ og \ indbyrdes \ forhold.$



Figur 2.5: Illustration af centralperspektivet. Linjer parallelle med billedplanet (|AB| og |CD|) bliver afbilledet i parallelle linjer, hvis længde i billedet er proportional med linjernes afstand fra kameraet. Parallelle linjer, der ikke er parallelle med billedplanet, |AD| og |BC|, bliver afbilledet i et linjebundt, der konvergerer mod et forsvindingspunkt i billedplanet.



Figur 2.6: Figuren viser den perspektiviske deformation af en terning. F.eks. vil de parallelle sider |AB| og |CD| tilsyneladende konvergere mod et fælles forsvindingspunkt i billedplanet.



Figur 2.7: Illustration af et simplificeret kameras indre orientering.

$$y^{\circ} = -c\frac{Y_k}{Z_k} \tag{2.2}$$

Hvor x° og y° betegner koordinater i billedet målt i forhold til hovedpunktet, mens X_k , Y_k og Z_k betegner koordinater i et koordinatsystem, der har origo i projektionscentret og er orienteret således, at XY-planet er parallelt med billedplanet. Dette koordinatsystem omtales i det følgende som kameraets koordinatsystem.

Formel 2.1 og 2.2 udgør det matematiske grundlag for den analytiske fotogrammetri, idet de beskriver, hvorledes et tredimensionelt punkt på objektet afbildes i et todimensionelt punkt i billedplanet. Det skal bemærkes, at selvom centralprojektionen er en entydig transformation fra \mathbb{R}^3 til \mathbb{R}^2 , så gælder det samme ikke om den inverse transformation. Det vil sige, at det ikke er muligt at bestemme et punkts tredimensionelle koordinater alene ud fra punktets centralprojektion i et billede. Dette er ét af de fundamentale problemer inden for fotogrammetrien.

Ydre orientering

Ligningerne 2.1 og 2.2, samt figur 2.7 forudsætter, at objektet er givet i et koordinatsystem, der har origo i kameraets projektionscentrum og er orienterets således, at xy-planet er parallelt med billedplanet. Dette kamerakoordinatsystem anvendes sjældent i praksis, da det som regel er mere hensigtsmæssigt af foretage beregninger i et ydre referencesystem, der ligeledes tillader sammenknytning af observationer foretaget i forskellige billeder.

Det er derfor nødvendigt at udvide ligning 2.1 og 2.2 til også at omfatte nogle parametre, der beskriver kameraets position og orientering i referencesystemet. Disse parametre betegnes kameraets ydre orientering, og de beskrives som regel ved projektionscentrets koordinater i referencesystemet, X_0 , Y_0 og Z_0 , samt kameraets rotationer omkring hhv. referencesystemets X-, Y-, og Z-akse, der betegnes ω (omega), φ (phi) og κ (kappa). Dette er illustreret i figur2.8.

De seks parametre for den ydre orientering kan inkluderes i stråleligningerne, så det bliver muligt at omregne direkte mellem punkter, hvis koordinater er givet i det ydre referencesystem, og deres projektioner i billedplanet. Transformationen fra referencesystemet til kameraets system er givet ved:



Figur 2.8: Illustration af de seks parametre for kameraets ydre orientering.

$$\left[\begin{array}{c} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{array}\right] \quad = \quad R \left[\begin{array}{c} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{array}\right]$$

	$\cos \varphi \cos \kappa$	$-\cos \varphi \sin \kappa$	$\sin arphi$
R =	$\cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa$	$\cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa$	$-\sin\omega\cos\varphi$
	$\sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa$	$\sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa$	$\cos\omega\cos\varphi$

Hvor rotationsmatricen R beskriver kameraets rotation omkring de tre akser, og vektoren $\begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T$ beskriver projektionscentrets koordinater i referencesystemet. Ved substitution i ligning 2.1 og 2.2 opnås det almindelige udtryk for stråleligningerne:

$$x = PP_x - c \frac{r_{11} \left(X - X_0 \right) + r_{12} \left(Y - Y_0 \right) + r_{13} \left(Z - Z_0 \right)}{r_{31} \left(X - X_0 \right) + r_{32} \left(Y - Y_0 \right) + r_{33} \left(Z - Z_0 \right)}$$
(2.3)

$$y = PP_y - c \frac{r_{21} \left(X - X_0 \right) + r_{22} \left(Y - Y_0 \right) + r_{23} \left(Z - Z_0 \right)}{r_{31} \left(X - X_0 \right) + r_{32} \left(Y - Y_0 \right) + r_{33} \left(Z - Z_0 \right)}$$
(2.4)

Hvor r_{11}, \ldots, r_{33} betegner de ni elementer i rotationsmatricen. Det skal bemærkes, at stråleligningerne for den digitale fotogrammetri kan udvides til også at indeholde en konstant omregningsfaktor mellem mål i pixler og de tilsvarende mål i meter.

2.2 Linsesystemet

Indtil nu er strålernes bane fra et objekt til billedfladen beskrevet for et simplificeret tilfælde. Det ovenstående har således været gældende under den forudsætning, at der var tale om en fuldkommen korrekt centralprojektion af et billede taget med et hulkamera uden nogen linse. Ideelt set, bør åbningen i et hulkamera være så lille, at den kun lige akkurat tillader en lysstråle at passere, hvillket i praksis medfører at billedfladen skal belyses i meget lang tid, før der kan dannes et billede. For at få belyst billedplanet tilstrækkeligt inden for et overskueligt tidsrum, er det derfor nødvendigt at gøre åbningen større, så der slipper mere lys ind i kameraet, men dette fører umiddelbart til, at billedet bliver uskarpt, idet lysstråler, der er reflekteret fra det samme punkt på objektet rammer et område i billedplanet frem for et enkelt punkt, jvf. figur 2.9.



Figur 2.9: Blændens åbning skal have en vis størrelse for at slippe tilstrækkeligt lys ind i kameraet til, at der kan dannes et billede. Dette medfører, at billedet bliver uskarpt, idet lys, der er reflekteret fra det samme punk på objektet, vil blive fordelt over et område i billedplanet.



Figur 2.10: Ved at indsætte en samlelinse i blændens åbning er det muligt at opnå en tilstrækkelig belysning af billedplanet uden at billedet bliver uskarpt.

For at opnå et skarpt billede, der samtidigt er tilstrækkeligt belyst, er det derfor nødvendigt at indsætte en samlelinse i blændens åbningen. En sådan linse fokuserer strålerne således, at de stråler, der udgår fra det samme punkt på objektet, samles i det samme punkt på billedplanet.³ Dette er vist på figur 2.10.

Radial linsefortegning

Indsættelsen af en linse i kameraet tilfører dog også kameraet nogle systematiske fejl, idet lysets brydning i linsen ændrer strålernes gang igennem kameraet. Efter indsættelsen af en linse i systemet, ser strålernes bane ud som vist i figur2.11. I et tilfælde med en perfekt linse vil indgangsvinklen τ være identisk med udgangsvinklen τ' , hvorfor der heller ikke opstår nogen linsefortegning, hvilket er ensbetydende med, at den radiale linsefortegning $\Delta r'$ er lig 0. Dette kan dog ikke forventes i praksis, og det er derfor nødvendigt at bestemme en matematisk model for den radiale linsefortegning således, at målinger foretaget i billedet kan korrigeres for denne. Den radiale linsefortegning opstår i de tilfælde, hvor

³[Mikhail et al. 2001, s. 13]

positionen af indgangs- og udgangspupillen ikke stemmer overens med de teoretiske brydningsplaner, hvor strålernes baner ændres. Figur 2.12 viser et mere virkelighedstro linsesystem.

Det ses her, at hovedstrålen gennem O og O' ikke står vinkelret på billedfladen. Derfor beregnes et teoretisk projektionscenter O_m , der skal sørge for, at nadir er sammenfaldende med hovedpunktet, hvilket ikke var tilfældet ved brug af de egentlige projektionscentre. Den rette linje fra hovedpunktet gennem O_m er således den "fotogrammetriske referenceakse". Den radiale linsefortegnings størrelse kan ud fra ovenstående bestemmes ved ligningen:

$$\Delta r' = r' - c \cdot tan\tau$$

Omfanget af en sådan radial linsefortegning er således proportional med strålens indgangsvinklen, som er sammenhængende med afstanden i billedplanet fra hovedpunktet. Linsefortegningen er radial symmetrisk omkring punktet S'. Dette er illustreret i figur 2.13.

For linser af høj kvalitet kan den radielle linsefortegning være mindre end $4\,\mu$ m, mens der for linser af lavere kvalitet må forventes markant større linsefortegninger.⁴

Til at beskrive linsefortegningens størrelse opstilles i praksis et tilnærmet udtryk for den linsefortegningskurve, den pågældende linse giver. Et eksempel på en sådan kurve er vist i figur 2.14. Linsefortegningen kan herved udtrykkes ved:

$$\Delta r'_{rad} = K_1 r'^3 + K_2 r'^5 + K_3 r'^7 + \cdots$$

For de fleste tilfælde vil det være tilstrækkeligt at udtrykke linsefortegningskurven med de tre første led uden videre tab af nøjagtighed. Med størrelsen af den radiale linsefortegning på plads, kan der foretages en korrektion for denne. De korrigerede koordinater kan herefter bestemmes ved nedenstående udtryk.⁵

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$
$$\Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}$$

Tangentiel linsefortegning

Den tangentielle linsefortegning er en asymmetrisk linsefortegning, der opstår i forbindelse med individuel tiltning og decentrering af de enkelte linse
elementer. Den tangentielle linsefortegning kan modelleres ved hjælp af ned
enstående udtryk.⁶

$$\Delta x'_{rad} = L_2(r'^2 + 2x'^2) + 2L_1x'y'$$

⁴[Luhmann et al. 2006, s. 108]

⁵[Luhmann et al. 2006, 116]

⁶[Luhmann et al. 2006, 118]



Figur 2.11: illustration af strålebanen gennem en linse.[Luhmann et al. 2006, s. 107]



Figur 2.12: Illustration af strålers gang gennem en linse i praksis. [Luhmann et al. 2006, s. 108] O_m betegner det teoretiske projektionscenter.



Figur 2.13: Eksempel på en radial linsefortegnings fejlvektorer.[Luhmann et al. 2006, s. 117]



 ${\bf Figur~2.14:~Illustration~af~en~linsefortegningskurve. [Luhmann~et~al.~2006,~s.~116]}$



Figur 2.15: Illustration af den tangentielle linsefortegnings indflydelse.[Luhmann et al. 2006, s. 118]

$$\Delta y'_{rad} = L_1(r'^2 + 2y'^2) + 2L_2x'y'$$

Et eksempel på en tangentiel linsefortegnings indflydelse er gengivet i figur 2.15. Den tangentielle linsefortegning bidrager normalt med fejl på 1/10 af den radielle linsefortegning, hvorfor der oftest ses bort fra denne.⁷

2.3 Epipolær geometri

Ved optagelse af flere billeder af det samme objekt fra forskellige kamerapositioner er det vigtigt at kende billedernes indbyrdes geometri. Denne betegnes den epipolære geometri. Figur 2.16 viser de indbyrdes relationer mellem to billeder af de samme punkt. Punktet P og dets projektioner, P_1 og P_2 , i de to billeder udspænder et såkaldt epipolært plan. Det epipolære plan skærer billederne i to epipolære linjer. Skæringspunkterne mellem basen og billedplanerne, E_1 og E_2 , benævnes de to epipoler. Det fremgår således af figuren, at det ud fra kendskabet til et punkts projektion i ét billede er muligt at bestemme en linje i et andet billede, hvorpå punktets projektion i dette billede vil ligge. Denne egenskab er meget vigtig i forbindelse med automatisk søgning efter sammenhørende punkter i et antal billeder, hvis ydre orientering er kendt, idet det ved hjælp af den epipolære geometri er muligt at afgrænse søgeområdet til en linje frem for at gennemsøge hele billedet.

⁷[Luhmann et al. 2006, s. 109]



Figur 2.16: Illustration af de grundlæggende principper for den epipolære geometri.

2.4 Automatisk billedkorrelation

Processen med at foretage en automatisk rekonstruktion af en tredimensionel scene fra et antal billeder kan opdeles i tre delprocesser:

- Bestemmelse af parametrene for kameraets indre- og ydre orientering for hvert billede.
- Identifikation af interessepunkter i billederne.
- Genfinding af interessepunkter de øvrige billeder.

Orientering af billeder

Den normale fremgangsmåde for bestemmelsen af parametrene for den indreog den ydre orientering af nogle billeder, der er taget af et kamera, der ikke indeholder sensorer til direkte orientering, er at optage en række billeder i et testfelt, der består af en række paspunkter, der er afmærket og indmålt med noget andet måleudstyr, hvorefter paspunkternes projektioner i de enkelte billeder måles. Billedernes orienteringsparametre kan herefter beregnes ved udjævning efter mindste kvadraters princip, som omtalt i afsnit 2.5.

Detektion af interessepunkter

Der findes et utal af forskellige metoder til udvælgelse af interessepunkter i et billede. De fleste operatorer forsøger at finde punkter, hvor der sker en markant ændring i billedets intensitet langs to retningerne. [Jazayeri et al. 2008] har ved sammenligning af nogle af de mest benyttede interessepunktsoperatorer påvist, at operatoren FAST⁸ er særdeles velegnet til terrestrisk fotogrammetri, iden den både er simpel at implementere, kan beregnes betydeligt hurtigere end

⁸[Rosten & Drummond 2006]



Figur 2.17: Illustration af grundprincippet bag FAST-metoden til detektion af interessepunkter. For at givet punkt undersøges det, om der på en cirkel omkring punktet kan findes en kontinuerlig serie punkter, hvis intensitetsværdier alle er enten højere eller lavere end det pågældende punkts intensitetsværdi. Hvis dette er muligt, anses punktet som et hjørnepunkt og hjørnets markanthed beregnes som den største numeriske intensitetsforskel mellem cirklens centrum og et punkt på periferien.



Figur 2.18: FAST-operatoren anvendt i praksis med n = 9 og $\Delta I = 16$. Billedet er et udsnit fra ét af billederne fra glaspartiet, der forestiller en avisstander.

f.eks. Förstners operator 9 , og returnerer et meget stort antal velegnede interessepunkter.

FAST-metoden er en såkaldt hjørnedetektor, og den grundlæggende idé bag metoden er at undersøge, om det er muligt at finde et bestemt antal sammenhængende punkter på periferien af en cirkel omkring et givet punkt, som alle har en lysere eller mørkere intensitet end cirklens centrum. Dette simple princip er illustreret på figur 2.17 og figur 2.18.

Identifikation af sammenhørende interessepunkter

For at afgøre, hvorvidt to billedpunkter er projektioner af det samme objektpunkt, er der brug for et mål for ligheden mellem punkterne. Ligesom der findes mange forskellige interessepunktsoperatorer, findes der også mange lighedsmål. Fælles for de fleste lighedsmål er, at de beregnes over et rektangulært område omkring interessepunktet for at mindske indflydelsen af tilfældig støj og øge

⁹[Förstner 1987]

chancen for et unikt match.

Den umiddelbart simpleste måde at vurdere ligheden mellem to områder er at beregne de direkte afvigelse mellem pixelværdierne. Dette mål bliver dog nemt forstyrret af variationer i lysstyrke og kontrast mellem de to billeder, og derfor anvendes som regel et statistisk mål, der kan kompensere for sådanne systematiske afvigelser mellem billederne. Et meget udbredt lighedsmål er den såkaldte normaliserede korrelationskoefficient, der beregnes ud fra pixelværdiernes afvigelser fra deres respektive gennemsnit. Den normaliserede korrelationskoefficient er således invariant over for forskelle i lysstyrke og kontrast mellem to billeder. Den normaliserede korrelationskoefficient beregnes således:

$$Corr(X,Y) = \frac{Cov(X,Y)}{Spr(X) \cdot Spr(Y)}$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$

2.5 Udjævning efter mindste kvadraters princip

Formålet med en udjævning er at bestemme den løsning til et overbestemt ligningssystem, der medfører, at residualernes kvadratsum bliver mindst muligt.

Generelle formler

Grundlaget for en udjævning er en matematisk model, der beskriver den funktionelle sammenhæng mellem en observeret vektor b og en ubekendt vektor \hat{x} vha. et lineært ligningssystem:

$$b = A\hat{x}$$

Da det normalt ikke kan antages, at observationerne er fejlfrie, må den funktionelle model udvides til også at indeholde en residualvektor, der beskriver de rettelser, som hver enkelt observation skal tilføres for at tilfredsstille ligningssystemet.

$$b = A\hat{x} - r$$

Ved anvendelse af mindste kvadraters princip, opstilles de såkaldte normalligninger, der efterfølgende kan løses mht. \hat{x} :

$$A^{T}b = (A^{T}A)\hat{x}$$
$$\hat{x} = (A^{T}A)^{-1}A^{T}b$$

Såfremt observationerne ikke kan antages at have samme nøjagtighed, må udjævningssystemet tilføres en vægtmatrix C, der beskriver observationernes reciprokke varians. For observationerne b_1, \ldots, b_i , ser vægtmatricen således ud:

$$C = \begin{bmatrix} Var(b_{1})^{-1} & \cdots & Cov(b_{1}, b_{i})^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(b_{i}, b_{1})^{-1} & \cdots & Var(b_{i})^{-1} \end{bmatrix}$$

Den vægtede løsning til udjævningssystemet kommer dermed til at se således ud:

$$\hat{x} = \left(A^T C A\right)^{-1} A^T C b$$

Når løsningen er fundet, kan variansfaktoren, de ubekendtes kovariansmatrix og residualernes kovariansmatrix beregnes ved formlerne:

$$\sigma_0^2 = \frac{r^T C r}{m - n}$$

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sigma_0^2 \left(A^T C A\right)^{-1}$$

$$\Sigma_{\hat{r}} = \sigma_0^2 \left(C^{-1} - A N^{-1} A^T\right)$$

Stråleudjævning

En stråleudjævning er en udjævning efter mindste kvadraters princip, der anvender stråleligningerne (ligning 2.3 og 2.4) som observationsligninger. Da stråleligningerne er ulineære, anvendes en iterativ metode til løsning af ligningssystemet som omtalt i [Cederholm 2000].

Observationsvektoren består af forskellen mellem hver observation, og de værdier, der kan beregnes ved hjælp af de foreløbige værdier for de ubekendte.

$$b = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^0 \\ \vdots \\ x_m - x_m^0 \\ y_1 - y_1^0 \\ \vdots \\ y_m - y_m^0 \end{bmatrix}$$

Designmatricen opstilles som en jakobimatrix, der indeholder stråleligningernes afledede mht. hver af de ubekendte:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\delta x_1}{\delta c} & \frac{\delta x_1}{\delta P P_x} & \frac{\delta x_1}{\delta P P_y} & \frac{\delta x_1}{\delta X_0} & \frac{\delta x_1}{\delta Y_0} & \frac{\delta x_1}{\delta Z_0} & \frac{\delta x_1}{\delta \omega} & \frac{\delta x_1}{\delta \varphi} & \frac{\delta x_1}{\delta \kappa} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\delta x_m}{\delta c} & \frac{\delta x_m}{\delta P P_x} & \frac{\delta x_m}{\delta P P_y} & \frac{\delta x_m}{\delta X_0} & \frac{\delta x_m}{\delta Y_0} & \frac{\delta x_m}{\delta Z_0} & \frac{\delta x_m}{\delta \omega} & \frac{\delta x_m}{\delta \varphi} & \frac{\delta x_m}{\delta \kappa} \\ \frac{\delta y_1}{\delta c} & \frac{\delta y_1}{\delta P P_x} & \frac{\delta y_1}{\delta P P_y} & \frac{\delta y_1}{\delta X_0} & \frac{\delta y_1}{\delta Y_0} & \frac{\delta y_1}{\delta Z_0} & \frac{\delta y_1}{\delta \omega} & \frac{\delta y_1}{\delta \varphi} & \frac{\delta y_1}{\delta \kappa} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\delta y_m}{\delta c} & \frac{\delta y_m}{\delta P P_x} & \frac{\delta y_m}{\delta P P_y} & \frac{\delta y_m}{\delta X_0} & \frac{\delta y_m}{\delta Y_0} & \frac{\delta y_m}{\delta Z_0} & \frac{\delta y_m}{\delta \omega} & \frac{\delta y_m}{\delta \varphi} & \frac{\delta y_m}{\delta \kappa} \end{bmatrix}$$

Løsningen til ligningssystemet giver en tilvækst til de foreløbige værdier for de ubekendte. Efter opdatering af de foreløbige værdier for de ubekendte, kan et nyt ligningssystem opstilles og udjævningen kan gentages indtil den største tilvækst er mindre end en given tærskel.

Kapitel 3

Problemanalyse

3.1 Erfaringer inden for området

Som en indledende del af problemanalysen foretages en undersøgelse af erfaringer inden for området omhandlende modellering på baggrund af terrestrisk fotogrammetri. Denne undersøgelse skal være med til at give en idé om, hvilke problemer der må forventes, og samtidigt danne grundlag for forventningerne til nøjagtighed og funktionalitet.

PhotoModeler Scanner

I rapporten "Photomodeller Scanner - A rival for traditional laser scanning?"¹ udarbejdet af en gruppe studerende på Aalborg universitet testes programpakken Photomodeller Scanner. I denne rapport gennemgås hele processen fra kalibrering af kamera til generering af punktsky.

I forbindelse med kamerakalibreringen blev det fundet, at de bestemte værdier for den indre orientering kun i nogen grad var konstante. Derfor vil det være fornuftigt at foretage kamerakalibreringen umiddelbart inden en opmåling, eller endnu bedre hvis kamerakalibreringen foretages over de billeder, der bruges til opmålingen. Hermed vil kalibreringen foretages over præcist de samme forudsætninger, som er gældende for de billeder, der bruges til opmålingen.

Højde/basis-forholdet for de enkelte kamerapositioner blev anbefalet til at være mellem 2 og 10, mens det ligeledes blev anbefalet, at kameraorienteringen var så tæt på parallel som muligt for at undgå konvergerende billeder.

Overfladen på det objekt, der ønskedes registreret, havde ligeledes stor indflydelse på resultatet, hvor overflader med farvevariation, som f.eks. en rå murstensvæg, gav et bedre resultat end en ensfarvet væg. Derudover gav overflader med genskin eller gennemsigtige vinduespartier ligeledes problemer.

Det blev fundet, at nøjagtigheden for de producerede modeller var på et niveau, der kunne leve op til en tilsvarende model genereret på baggrund af en laserscanning. Det anslås endvidere, at det vil være muligt at producere en punktsky over et givet objekt på enkelte minutter. Projektgruppen oplevede dog, at der i forbindelse med efterbehandlingen af punktskyen var et øget tidsforbrug sammenlignet med efterbehandlingen af en punktsky fra en laserscanner.

¹[Mortensen et al. 2011]

Ud fra ovenstående er følgende erfaringer noteret som værende af betydning:

- Den indre orientering er kun i nogen grad konstant over tid.
- Højde/basis-forholdet anbefales til at ligge mellem 2:1 og 10:1.
- Orienteringen af billeder skal være så parallel som mulig.
- Objekter med varierende farver og struktur giver det bedste resultat.
- Databehandlingen er mere omfattende ved fotogrammetri end ved laserscanning.

Disse erfaringer vil blive taget med under overvejelse, når der i de følgende afsnit skal træffes beslutninger for proces og metode.

Terrestrisk Laserscanning

Ved terrestrisk laserscanning opereres hovedsageligt med princippet "time of flight"-scanning også kaldet LiDAR (Light Detection And Ranging). Moderne laserscannere kan registrere op mod flere hundrede tusinde punkter i sekundet med millimeters nøjagtighed, hvorved det er muligt at indsamle enorme mængder data på gangske kort tid. Den benyttede laserscanner i dette projekt kan dog kun registrere op til 1800 punkter i sekundet jf. scannerens produktspecifikation.²

Laserscanneren er et aktivt detektionssystem, der ikke er afhængigt af ydre bidrag i form af lys eller lignende for, at den kan fungere. Det er endvidere et robust system, da der foretages en måling, sålænge scannerens stråler rammer en overflade, der reflekterer strålen tilbage mod scanneren igen.

Ved foretagelsen af en stor mængde af sådanne målinger dannes en punktsky for et givet område. Punkterne er forholdsvist jævnt fordelt over området, da laserscanneren indstilles til at køre med et fast vinkelinterval imellem punkterne. Derfor vil det for en scanning gælde, at punkter med kort afstand til scanneren ligge tættere på hinanden end punkter langt fra scanneren. Da laserscanneren således "skyder i blinde", vil hjørnepunkter og lignende ikke blive bestemt specifikt. Her er det op til brugeren at indstille scannerens punkttæthed således, at det ved interpolation mellem punkterne omkring et hjørne er muligt at opnå en acceptabel beskrivelse af det egentlige hjørne. En stor punkttæthed resulterer dog i et øget tidsforbrug i forbindelse med scanningen.

Nedenfor er opstillet de toneangivende egenskaber for laserscanneren.

- Positionering foretages med stor nøjagtighed.
- Aktivt- og robust detekteringssystem, der ikke er synderligt afhængig af ydre forhold.
- Stor punkttæthed i forhold til tidsforbruget.
- Jævn fordeling af punkter over hele det scannede område.
- Risiko for interpolationsfejl ved hjørner.

²http://www.leica-geosystems.com/media/new/product_solution/Leica_HDS3000.pdf

3.2 Den fotogrammetriske metode

Ved terrestrisk fotogrammetri tages der udgangspunkt i den egenskab, at et bestemt punkt, der er registreret i to forskellige billeder, kan bestemmes, såfremt kameraets indre- og ydre geometri er kendt. På denne måde kan der i princippet bestemmes en position for hvert enkelt punkt, der er registreret i begge billeder. Det vil sige, at det i princippet er muligt at registrere lige så mange punkter, som der pixels i de pågældende billeder, på den tid, det tager at tage de billeder, der benyttes. Dette er dog en meget grov udlæggelse af forholdene og kan ikke forventes udført i praksis, da der ud over selve fotograferingen også skal bruges tid på kalibrering af kamera, orientering af billeder, detektion af interessepunkter og korrelation, hvormed tidsforbruget stiger betydeligt. Derudover vil det heller ikke i praksis være muligt at foretage en positionering for samtlige af billedernes pixler, da punkterne skal kunne genkendes unikt i hvert af billederne, for at der kan foretages en korrelation. Ikke desto mindre er der tale om en metode, hvor der potentielt kan registreres flere tusinde punkter på kort tid. Ofte er det dog netop de punkter, der kan genkendes unikt i hvert billede, der er en interesse for at bestemme, da det ofte vil være hjørnepunkter og lignende. I forbindelse med terrestrisk fotogrammetri er afstanden til objektet ofte forholdsvis lille, hvormed punkttætheden mellem det, de enkelte pixler dækker på objektet, er tilsvarende stor. Med en stor punkttæthed mindskes størrelsen af de fejl, der kan opstå i forbindelse med en interpolation ved bestemmelsen af et hjørne.

Den fotogrammetriske metode kræver kun almindeligt fotoudstyr til selve registreringen, mens der udover dette kræves et program til udførelsen af den betydelige mængde databehandling, der skal foretages efterfølgende. Metoden er sammenlignet med laserscanning noget mindre robust, da den fotogrammetriske metode er afhængig af en række forhold, for at processen forløber tilfredsstillende.

Teoretisk nøjagtighed for terrestrisk fotogrammetri

I forbindelse med en vurderingen af terrestrisk fotogrammetri er det nødvendigt at se på den nøjagtighed, der kan opnås ved bestemmelse af 3D-koordinater for et objekt. Derfor foretages en teoretisk vurdering af den nøjagtighed, det burde være muligt at opnå. Denne vurdering vil således også kunne bruges som målestok for den nøjagtighed, der opnås i praksis.

I vurderingen anskues de variable, der gør sig gældende i forbindelse med en målesituation, for derigennem at kunne afgøre, hvilken indflydelse de måtte have på nøjagtigheden. Hvis det antages, at der arbejdes med billeder taget i normaltilfældet, det vil sige med parallel orientering og med samme afstand til objektet, så vil der umiddelbart kun være fire parametre, som kan justeres. Det vil således være muligt at ændre basen mellem kamerapositionerne, samt afstanden til objektet langs hver af de tre akser. Dette er illustreret i figur 3.1. Da det ville være muligt at opnå samme forhold mellem afstandene ved at ændre på basens længde, er det mere interessant at se se på de tre afstande langs akserne set i forhold til basis. Derved er der kun tre parametre, der kan ændres ved en opstilling.

- Afstanden til punktet langs X-aksen i forhold til basis $\frac{\Delta X}{h}$
- Afstanden til punktet langs Y-aksen i forhold til basis $\frac{\Delta Y}{h}$



Figur 3.1: Illustration af de parametre, der kan varieres under opstilling. *b* er basen mellem de to kameraopstillinger. ΔX er afstanden til punktet langs X-aksen med udgangspunkt midt mellem de to kamerapositioner. ΔY er afstanden til punktet langs Y-aksen med udgangspunkt midt mellem de to kamerapositioner. ΔZ er afstanden til punktet langs Z-aksen med udgangspunkt midt mellem de to kamerapositioner.

• Afstanden til punktet langs Z-aksen i forhold til basis - $\frac{\Delta Z}{h}$

Med udgangspunkt i dette opstilles et hypotetisk testnet med punkter fordelt jævnt ud over et område, hvor det forventes, at det vil være muligt at måle. Testnettet består således af $5 \times 4 \times 5$ punkter i en rektangulær kube, hvor der er 5 meters afstand langs akserne til nabopunkterne. De nærmeste punkter har en perpendikulærafstand på 5 meter fra basen, således at punkterne ligger i en perpendikulærafstand på mellem 5 meter og 20 meter fra basen, mens punkterne i højden og bredden ligger fra -10 meter til +10 meter i forhold til midtpunktet af basen.

Da vinklen mellem strålen fra hvert af de to kameraer og til et vilkårligt punkt varierer i henhold til, at de tre ovennævnte parametre ændres, vil der således også være forskel på den nøjagtighed, der kan opnås i forbindelse med bestemmelsen af punkters position alt efter, hvor i rummet de er. På baggrund af en antagelse om, at et punkt kan bestemmes med en tredjedel pixels nøjagtighed i billedet, kan der beregnes punktspredning og konfidenselipse for de enkelte punkter i testnettet. I figur 3.2 er testnettet vist set i X/Y-planet, her med konfidenselipser for de punkter der ligger i Z = 0.

Punktspredningen er ligeledes beregnet for hvert af punkterne i testnettet. Punktspredningerne er udtrykt i forhold til basens lægde som funktion af perpendikulærafstanden fra basen til de enkelte punkter. Dette er gjort for varierende størrelser af afstanden X på henholdsvis 0, 5 og 10 meter. I figur 3.3 er ovenstående illustreret for punkter der ligger i højden Z = 0.

Det samme er ligeledes gjort for de punkter, der ligger i højderne Z = 5 og Z = 10. Der er ikke foretaget beregninger for punkter, der ligger tilsvarende under X/Y-planet, da punktspredningerne her må antages at være identiske med punktspredningen for de netop nævnte punkter. Punktspredningerne udtrykt i forhold til basens lægde som funktion af perpendikulærafstanden fra basen til de enkelte punkter er udtrykt for punkter i højderne Z = 5 og Z = 10 i figurerne 3.4 og 3.5.



Figur 3.2: Illustration af testnettet set i X/Y-planet.

Det ses her, at punktspredningerne som forventet stiger med øget hastighed i takt med, at afstanden langs de enkelte akser forøges. Det ses endvidere, at det i princippet burde være muligt at opnå en nøjagtighed på 2% af basens længde, ved en afstand fra basen på 5 gange basens længde, mens punktspredningen holdes under 32% af basens længde, hvis afstanden holdes under 20 gange basens længde.

Opsummering på den fotogrammetriske metode

Med henblik på ovenstående er der således en række forhold, der gældende for positionering med terrestrisk fotogrammetri. De mest markante er opstillet nedenfor.

- Metoden medfører hurtig registrering af en stor mængde punkter.
- Der opnås stor punkttæthed ved signifikante punkter.
- Der kræves kun forholdsvist billigt og simpelt udstyr.
- Metoden medfører store mængder databehandling.



Figur 3.3: Forventet punktspredning for punkter i højden Z = 0 som funktion af perpendikulærafstanden fra basen.



Figur 3.4: Forventet punktspredning for punkter i højden Z = 5 som funktion af perpendikulærafstanden fra basen.



Figur 3.5: Forventet punktspredning for punkter i højden Z = 10 som funktion af perpendikulærafstanden fra basen.

• Metoden er knap så robust som ved brug af laserscanner.

På baggrund af ovenstående afsnit vurderes det fortsat at være relevant at arbejde med tilvejebringelsen af et program, der kan benyttes for den fotogrammetriske metode.

3.3 Projektafgrænsning

Fokus

Med et fokus fastlagt på terrestrisk fotogrammetri er mulighederne for brug af forskellige metoder og udstyr, samt de objekter der ønskes bestemt, meget brede. Der vil således skulle tages stilling til, hvad, hvordan, med hvilket udstyr, samt under hvilke forudsætninger der arbejdes.

Objekter For at kunne fastslå, hvad det er programmet skal kunne, er det først og fremmest nødvendigt at bestemme, hvilke objekter det er, der ønskes registreret, samt hvordan disse objekter forholder sig. Det skal således vurderes hvilke materialer, der skal kunne registreres, afstanden til objektet, samt om disse er bevægelige eller i stilstand.

Tages der udgangspunkt i de forhold, der er gældende for en traditionel terrestrisk laserscanning, vil der således være tale om et objekt af et ikke-transparent materiale, der er i stilstand, og som er inden for en afstand af højest nogle hundrede meter alt efter typen af laserscanner. Det vil for den fotogrammetriske metode ligeledes være fornuftigt at udelukke transparante materialer, da objektet selvsagt skal være synligt i billedet, for at det kan registreres. For den fotogrammetriske metode vil det umiddelbart være muligt at registrere et objekt så længe, at det kan ses i billedet, men i dette projekt vil der udelukkende ses på eksempler, hvor afstanden til objektet holdes under 75 meter. Det vil ligeledes også være muligt at registrere bevægelige objekter, såfremt det er muligt at synkronisere flere kameraer til at tage billeder samtidigt. Dette er dog en omfangsrig proces, hvorfor det udelades i denne rapport. Af samme grund vil der udelukkende blive arbejdet med stationære objekter.

Udstyr Da ét af formålene med den fotogrammetriske tilgang til problemstillingen er at gøre hele processen mere tilgængelig, ønskes det alene at benytte lettilgængeligt og forholdsvist billigt udstyr. Der vil således ikke blive benyttet et decideret fotogrammetrisk kamera, men derimod et "almindeligt" spejlreflekskamera. Det eneste krav, der stilles til kameraet, er, at det skal være muligt at slå autofokus fra, således at kamerakonstanten kan fastholdes imellem de enkelte billeder.

Udover kameraet benyttes en laserscanner af typen Leica HDS 3000 til generering af kontroldata, samt en totalstation til indmåling af paspunkter. Laserscanneren skal således kun benyttes i forbindelse med kontrollen af resultatet fra den fotogrammetriske metode, mens totalstationen er nødvendig i forbindelse med kalibrering af kameraet, samt hvis der ønskes en georefereret punktsky i stedet for en lokal punktsky.

Metoder Da der ikke findes en endegyldig vejledning til det bedste resultat for den fotogrammetriske metode, vil der også foretages en gennemgang af forskellige metoder. Der haves i forbindelse med dataindsamlingen og databehandlingen nogle hypoteser omhandlende de parametre, der kan have en henholdsvis positiv eller negativ effekt på resultatet. Der vil her lægges særligt fokus på forskellige korrelationsmetoder, da det vurderes, at det er her, den største udfordring findes i forbindelse med den fotogrammetriske metode. Derfor vil der laves en række forsøg i forbindelse med dataindsamling og databehandling for netop at undersøge disse forhold.

Der haves en forestilling om, at den fotogrammetriske metode er bedre end laserscanning til at bestemme skarpe kanter og hjørner, mens laserscanning omvendt forventes at være bedre til modellering af ensfarvede flader. For at undersøge dette registreres flere forskellige objekter, mens der ligeledes vil blive forsøgt at kompensere for nogle af de problemer, de fotogrammetriske metoder måtte have.

3.4 Problemformulering

Projektgruppen har grund til at tro, at det er muligt opnå samme nøjagtighed ved brug af fotogrammetriske metoder som ved brug af moderne laserscanning. Formålet med projektet vil derfor være at undersøge, hvor robust den fotogrammetriske metode er. Med udgangspunkt i dette opstilles projektets problemformulering:

Projektgruppen vil undersøge omfanget af dé grove fejl, der må forventes at opstå ved automatisk billedkorrelation. For at have fuld kontrol med beregningsprocessen foretages undersøgelsen ved hjælp af et stykke selvudviklet software. Selve undersøgelsen foretages ved sammenligning af en fotogrammetrisk genereret punktsky med et laserscannet referencedatasæt. Projektet skal munde ud i en vurdering af fotogrammetriens potentiale som alternativ til terrestrisk laserscanning.

Kapitel 4

Systemudvikling

4.1 Kravspecifikation

I henhold til rapportens teoriafsnit opstilles en kravspecifikation for systemet:

- Brugeren skal kunne foretage manuelle målinger af paspunkter i billederne med subpixelnøjagtighed.
- Givet et tilstrækkeligt antal paspunktsobservationer skal systemet kunne beregne kameraets indre orientering og hvert billedes ydre orientering ved stråleudjævning.
- Systemet skal selv kunne detektere et stort antal interessepunkter, der egner sig til korrelation, i et af brugeren udpeget hovedbillede.
- Systemet skal kunne foretage en automatisk søgning efter interessepunkternes projektioner i de øvrige billeder.

Da projektets formål er at vurdere omfanget af de grove fejl, der opstår ved billedkorrelation, er det ikke nødvendigt, at programmet kan foretage en egentlig modellering ved at genskabe det afbildede miljø i tre dimensioner. Dette ville dog være endnu et krav til systemet, såfremt det skulle kunne anvendes i praksis.

4.2 Implementering

Systemet udvikles som et objektorienteret Java-program, der struktureres i fire pakker:

- 1. En samling klasser til beskrivelse af programmets interne datatyper.
- 2. En grafisk brugergrænseflade, der tillader brugeren at udpege og registrere paspunkter i et antal billeder. Brugeren benytter desuden den grafiske brugergrænseflade til at kalde programmets øvrige rutiner.
- 3. Et modul til beregning af stråleudjævning med at variabelt antal parametre.
- 4. Et modul til automatisk korrelation af billeder.

Det følgende forklarer, hvorledes programmet fungerer på et konceptuelt niveau. En mere teknisk dokumentation af programmets faktiske klasser og metoder kan findes på den medfølgende CD sammen med programmets kildekode.

Databeskrivelser

Der skelnes imellem følgende tre grundlæggende datatyper: Billeder, paspunkter og observationer, dvs. paspunkternes observerede projektioner i billederne. Desuden indføres en klasse til beskrivelse af det kamera, som billederne er taget med, og en projektklasse, der fungerer som en container for de øvrige datatyper. De indbyrdes relationer mellem de fem dataklasser er vist på figur 4.1, og de enkelte klasser beskrives nedenfor:

- Projekt Projektklassens opgave er at holde styr på de øvrige datatyper, hvilket vil sige, at programmets beregningsrutiner tilgår de enkelte datasæt gennem et projektobjekt. Projektklassen kan derfor opfattes som programmets database.
- Kamera Eftersom alle billeder tages med det samme kamera, er det mest hensigtsmæssigt at modellere kameraet som et separat objekt, hvortil de enkelte billeder refererer. Kameraklassen indeholder næsten udelukkende variable til beskrivelse af kameraet indre orientering, og der foregår derfor ikke nogen egentlige beregninger i denne klasse.
- BilledeEt billede består af et raster, nogle parametre for kameraets ydre
orientering på optagelsestidspunktet og en reference til det kamera,
billedet er taget med.Billedklassen indeholder desuden funktioner til omregning mellem
billedets koordinatsystem og referencesystemet vha. stråleligninger-
ne.
- Paspunkt Et paspunkt beskrives som et punkt i et tredimensionalt koordinatsystem, dvs. at paspunktsklassen skal indeholde variable for de tre koordinater.
- Observation Ved en observation forstås et paspunkts observerede projektion i et givet billede. Et observationsobjekt indeholder derfor udover billedpunktets koordinater både referencer til det observerede paspunkt og det billede, hvori punktet er observeret.

Brugergrænsefladen

Når programmet startes åbnes et vindue indeholdende den grafiske brugergrænseflade. Dette vindue er vist på figur 4.2. I midten af skærmbilledet vises det aktuelle billede, og det er her muligt at foretage målinger af paspunkter ved hjælp af musen. Det er muligt at skifte imellem de enkelte billeder ved hjælp af den dropdown-menu, der findes i skærmbilledets øverste venstre hjørne.

Til venstre vises en liste over de billeder, der er tilknyttet det aktuelle projekt. Det er muligt at få vist parametrene for et billedes ydre orientering, når der klikkes på det respektive billede i listen.


Figur 4.1: Oversigt over systemets datatyper og deres indbyrdes relationer.



Figur 4.2: Programmets hovedskærmbillede.

I bunden af skærmbilledet vises en statuslinje, der løbende opdateres med musens position i billedet og den aktuelle pixelværdi for musepositionen.

Brugeren kan foretage målinger af paspunkternes projektioner i et billedet ved at klikke med musen. Til dette formål anvendes en specialdesignet musemarkør, hvis størrelse og farve kan ændres, som vist i figur 4.3. Formålet med at kunne ændre størrelsen er, at det således bliver muligt at tilpasse markøren til dé cirkulære målemærker, der anvendes til afmærkning af paspunkterne, hvilket f.eks. er en stor fordel ved indmåling af laserscanningstargets, der ikke har et tydeligt markøren ring til målemærkets periferi. Det er desuden muligt at ændre farven på musemarkøren for at opnå den størst mulige kontrast mellem musemarkør og baggrund.

Stråleudjævning

Når alle synlige paspunkter er målt, kan billedernes ydre orientering og eventuelt også kameraets indre orientering bestemmes ved udjævning efter mindste kvadraters princip. I menuen "Udjævning" i programmets menubjælke kan brugeren vælge imellem nogle prædefinerede udjævningsindstillinger, eller brugeren kan vælge en brugerdefineret udjævning, hvorved den i figur 4.4 viste dialog fremkommer. I denne dialog er det muligt at udpege de variable, der ønskes estimeret ved udjævning, og om der skal foretages en separat udjævning for hvert billede, eller der skal foretages én stor udjævning af alle observationer. Selve udjævningen gennemføres som beskrevet i afsnit 2.5. Efter en løsning er fundet foretages en global test som beskrevet i [Cederholm 2000] for at undersøge, om der kan være grove fejl blandt observationerne. Hvis den globale test indikerer, at løsningen er påvirket af grove fejl, gentages udjævningen som en robust udjævning, der anvender en iterativ genvægtning af observationerne til at isolere de grove fejl. Resultatet af denne grovfejlsdetektion er gengivet i figur 4.5.



Figur 4.3: Brugeren kan selv vælge målemærkets størrelse for at gøre det nemmere at måle cirkulære paspunkter. Det er desuden muligt at vælge en anden farve til målemærket, så det er nemmere at skelne fra baggrunden.

Brugerdefineret stråleudjævning			
Alle parametre 👻			
Indre orientering	Ydre orientering		
c	✓ X0		
🖌 k	✓ Y0		
✓ PPx	✓ Z0		
🗹 РРу	✓ omega		
<mark>⊮ K1</mark>	✓ phi		
✓ K2	🖌 kappa		
🔲 КЗ	□ X		
🗆 L1	Y		
L2	Z		
Udjævn billeder hver for sig			
ОК	Annuller		

Figur 4.4: Inputdialog til stråleudjævning.



Figur 4.5: Udjævningsrutinen detekterer grove fejl ved hjælp af en iterativ genvægtning af observationerne. Efter en udjævningen vises fejlvektorer for de enkelte observationer, og grove fejl markeres med en advarselstrekant.



Figur 4.6: Når programmet skal finde interessepunkter, bedes brugeren udpege et hovedbillede og derefter en tærskelværdi for FAST-operatoren.

Automatisk billedkorrelation

Programmets algoritme til automatisk billedkorrelation tager udgangspunkt i et af brugeren udpeget "hovedbillede", hvori programmet detekterer en række interessepunkter, som programmet efterfølgende forsøger at genfinde i de øvrige billeder.

Programmets rutine til detektion af interessepunkter er baseret på FAST-operatoren, der er beskrevet i afsnit 2.4. Denne rutine kaldes fra programmets menubjælke, hvorved brugeren bedes udpege hovedbilledet og indtaste en tærskelværdi for den mindste acceptable forskel mellem den lyseste og den mørkeste pixel omkring et muligt interessepunkt. Den konkrete implementering af FAST-metoden forsøger at finde 9 på hinanden følgende punkter på en cirkel omkring et muligt interessepunkt. De fundne interessepunkter vises efterfølgende som gule prikker i programmets hovedvindue, når det valgte hovedbillede udtegnes.

Ifølge afsnit 2.3 svarer hvert af de fundne interessepunkter til en stråle i det tredimensionelle rum, og formålet med billedkorrelationen er dermed at bestemme det punkt på strålen, som interessepunktet er en afbildning af. Eftersom retningen fra hovedbilledet til det søgte punkt er givet ved interessepunktets billedkoordinater, gælder det bare om, at finde den afstand fra kameraet, der giver den største korrelationskoefficient i flest muligt billeder.



Figur 4.7: Programmet viser de fundne interessepunkter som gule prikker oven på det valgte hovedbillede.

Korrelation		
Hovedbillede:	DSC_1511 🗸	
Mindste Z:	1	
Største Z:	1000	
Template-radius:	5	
Opretning af template: 🔽		
Output-mappe:	Korrelation	
Start	Annullér	

Figur 4.8: Inden en automatisk korrelation påbegyndes, kan brugeren vælge nogle indstillinger for korrelationsberegningen.

Løsningen til dette problem er implementeret ved en algoritme, der først beregner korrelationskoefficienter for hvert hele multiplum af kamerakonstanten langs den stråle, der er repræsenteret ved et givet interessepunkt, hvorefter algortimen finder den afstand, der giver den maksimale korrelationskoefficient.

Brugeren kan ved opstart af korrelationsrutinen afgrænse søgningen til kun at foregå inden for givet afstandsinterval. Det er endvidere muligt at vælge størrelsen på det søgevindue, som programmet beregner korrelationskoefficienten over, ligesom brugeren kan vælge, om der skal foretages en opretning af søgevinduet forud for beregningen af hver korrelationskoefficient. En opretning af søgevinduet foretages ved at skalere søgevinduet således, at de billeder, der sammenlignes får samme målforhold, hvilket i princippet burde øge chancerne for at finde det rigtige match for billeder, der er taget i forskellige afstande fra objektet.



Figur 4.9: Korrelationsrutinen gemmer de beregnede korrelationskoefficienter for alle punkter i en matrix, hvor hver række svarer til ét interessepunkt, mens hver søjle svarer til et multiplum af kamerakonstanten. Figuren viser et eksempel på en sådan matrix, hvor de fleste punkters korrelationsfunktioner tilsyneladende antager et maksimum for en afstand fra kameraet, der ligger mellem 500 og 600 gange kamerakonstanten.

Kapitel 5

Dataindsamling og behandling

Med det fotogrammetriske analyseprogram på plads skal det nu afprøves i virkeligheden. I dette kapitel vil der blive foretaget en gennemgang af processen med indsamlingen af data, samt den efterfølgende databehandling. Der vil ligeledes også være en gennemgang af de forhold, der skal tages hensyn til i forbindelse med processen, for at de bedst mulige resultater opnås.

5.1 Udvælgelse af testfelter

Der er i forbindelse med afprøvningen af det udviklede program etableret to testfelter, der hver især skal teste nogen af de forhold, hvor det forventes at metoden fungerer mere eller mindre godt. Det første testområde benævnes "Mur", og dækker over et område med en bar murstensvæg samt nogle beplantninger i umiddelbar nærhed. Hovedfokus i dette testområde vil være på selve muren, hvor det ønskes at finde ud af, hvor godt metoden virker under gode forhold. Det andet område dækker over et indgangsparti med glasdøre og ruder og benævnes "Glasparti". Der forventes ikke, at nogen af de benyttede metoder kan bestemme punkter på glasfladerne, ligesom der i det pågældende område er flere komplekse objekter. Området er således tænkt som det "værst tænkelige eksempel". I de følgende afsnit vil der blive foretaget en gennemgang af de enkelte testfelter. De anvendte billeder af testfelterne kan findes i stort format i rapportens bilag A og på den medfølgende CD.

Etablering af paspunkter

I forbindelse med dataindsamlingen oprettes en række paspunkter, der skal være synlige i billederne. Dette gøres, for at billederne kan orienteres, mens det ligeledes er nødvendigt med målte paspunkter i forbindelse med en kamerakalibrering. En relativ orientering af billederne vil i princippet godt kunne foretages uden paspunkter, men punktskyen vil i så fald ikke kunne relateres til et referencekoordinatsystem. Da punktskyen skal sammenlignes med kontroldata, er det derfor nødvendigt, at de to datasæt kan bestemmes i det samme koordinatsystem. De paspunkter, der oprettes, skal være visuelt tydelige og entydige således, at de kan genkendes i billederne, mens de ligeledes skal være lette at måle ind med totalstation og laserscanner. Her kan bl.a. benyttes laserscanningstargets, da disse lever op til de anførte krav.

Ved etablering af paspunkterne er det vigtigt, at der skabes en god indbyrdes geometri mellem paspunkterne. Dette skal sikre en bedre bestemmelse af kameraets orientering. Ved en god geometri forstås her, at vinklen ved observation mellem to paspunkter bliver så ret som muligt. Herved opnås det bedste resultat ved almindelig tilbageskæring, hvilket der i princippet er tale om i forbindelse med kameraorientering ud fra paspunkterne. Ud over så rette vinkler som muligt mellem paspunkterne ønskes det endvidere, at paspunkterne for så vidt muligt omkranser de forskellige testområder. Dette medvirker ligeledes til at styrke stabiliteten af positionsbestemmelsen for disse.

Registrering af testfelter

De forskellige paspunkter i testområdet bliver indledningsvist målt med totalstation. Dette sker fra en fri opstilling, der samtidgt benyttes til orienteringen af referencesystemet.

Til den fotogrammetriske metode tages der for hvert område en række billeder, hvoraf ét bestemmes til at være hovedbilledet. Dette billede er så vidt muligt taget, så det står vinkelret på objekterne i testområdet, samtidig med at alle paspunkter er synlige i billedet. De øvrige billeder er taget således, at nogen af billederne er forholdsvist parallelle, mens nogen af billederne er konvergerende med hovedbilledet.

For laserscanningen placeres laserscanneren så vidt muligt i samme punkt, som det ovennævnte hovedbillede er taget fra, således at de forskellige punktskyer dækker de samme områder så meget som muligt. Efter scanningen udpeges de enkelte targets i punktskyen, hvorefter der foretages to finscanninger for hvert target, således at positionen af de enkelte targets fastlægges mere nøjagtigt.

Kamerakalibrering

Kamerakalibreringen vil blive foretaget som en testfeltskalibrering, hvor billeder for et givet testområde benyttes til en kamerakalibrering. Selve kamerakalibreringen foregår ved en stråleudjævning, hvor kameraets indre- og ydre orientering bestemmes på baggrund af en række paspunkter målt både i billedet og i referencesystemet. Dette gøres som et led i databehandlingen i det udviklede program. For at udjævningen kan forløbe planmæssigt, således at de ønskede ubekendte bestemmes, er det nødvendigt at gøre sig overvejelser med hensyn til udformningen af testfeltet. Et hensigtsmæssigt udformet testfelt skal hjælpe med at minimere korrelationen mellem de forskellige ubekendte under udjævningen. Det er en grundlæggende forudsætning for et godt testfelt, at der skal være god dybde mellem paspunkterne, der ligeledes skal være fordelt jævnt over billedfladen.

I et tænkt eksempel med paspunkter i samme dybde vil det til en vis grad være muligt at opnå de samme billedkoordinater for paspunkterne i et andet billede taget med en anden orientering af kameraet. Det vil således være muligt at rotere og flytte kameraet, samt forskyde billedets hovedpunkt uden, at det i princippet vil medføre ændringer for paspunkternes billedkoordinater. I sådan et tilfælde vil udjævningen være ustabil, hvor resultatet vil være behæftet med en stor usikkerhed. Hvis der derimod er god dybde mellem paspunkterne, kan



Figur 5.1: Testfeltet "Mur" med tilhørende paspunkter.

de samme billedkoordinater for paspunkterne ikke på samme måde opnås for et kamera med en anden orientering.

På samme måde kan kamerakonstanten korrelere med afstanden til paspunkterne, hvilket ligeledes kan undgås med en god dybde mellem paspunkterne. Den kamerakalibrering, der ligger til grund for de værdier for den indre orientering, der benyttes til de efterfølgende beregninger, er foretaget for testfeltet "Mur".

Testfeltet "Mur"

Dette testfelt dækker, som nævnt ovenfor, en bar murstensvæg med diverse beplantninger i umiddelbar nærhed. Der blev etableret 12 laserscanningstargets og 23 paspunkter til registrering med fotogrammetri. I figur 5.1 ses en gengivelse af testområdet.

Testfeltet blev målt med laserscanneren fra en fri opstilling, hvor området så vidt muligt kunne dækkes. I den forbindelse blev der foretaget ca. 1,8 mio. målinger med en punkttæthed på omkring 2 cm, afhængigt af afstanden fra laserscanneren. Målingen af de 12 laserscanningstargets med laserscanneren blev gennemført for de 10 af dem, hvor 2 udgik på grund af vegetation foran de pågældende targets. De øvrige targets blev bestemt med en nøjagtighed på 1 mm.

Der er i forbindelse med den fotogrammetriske metode taget 18 billeder af testområdet, hvilket er gjort ud fra ovennævnte metode.

Testfeltet "Glasparti"

Dette testfelt dækker over et indgangsparti hovedsageligt bestående af glas og stål med forskellige andre elementer inden for testfeltet. Der blev etableret 10



Figur 5.2: Testfeltet "Glasparti" med tilhørende paspunkter.

paspunkter, der alle var laserscanningstargets. I figur 5.2 ses en gengivelse af testområdet.

Under opmålingen af testområdet med laserscanneren blev der foretaget ca. 1,3 mio. målinger med en punkttæthed på omkring 1 cm, afhængigt af afstanden fra laserscanneren. Målingen af de 10 laserscanningtargets blev foretaget med en nøjagtighed på 1 mm. Der er i forbindelse med den fotogrammetriske metode taget 12 billeder af testområdet.

5.2 Metoder for beregning af punkter

Efter den ovennævnte dataindsamling haves der således for hvert testfelt et antal billeder, målte paspunkter og en laserscannet punktsky. Med udgangspunkt i disse datasæt påbegyndes således testen af det udviklede program, beskrevet i det foregående kapitel. I forbindelse med testen vil der blive afprøvet nogle forskellige korrelationsmetoder, for herigennem at teste fordele ved de enkelte metoder. Der vil i alt blive testet fire forskellige korrelationsmetoder:

- 1. Enkeltbilledkorrelation uden opretning er en metode, hvor der for hvert enkelt billede foretages en korrelation med hovedbilledet. Afstand for de forskellige interessepunkter bestemmes ud fra den største korrelationskoefficient for det enkelte billede i forhold til hovedbilledet. Herved fremkommer flere forskellige afstandsbestemmelser for de enkelte interessepunkter.
- 2. Enkeltbilledkorrelation med opretning foregår på samme måde som for metoden ovenfor, hvor der tillige også foretages en opretning af søgevinduet omkring interessepunktet inden korrelationen finder sted. Dette

skal mindske indflydelsen fra de forskellige målforhold, der opstår, når to billeder er taget i forskellige afstande fra objektet.

- 3. Multibilledkorrelation uden opretning er en metode, hvor der ligeledes foretages en korrelation for de enkelte interessepunkter, men afstanden bestemmes her ud fra den maksimale middelværdi for alle de forskellige korrelationskoefficienter for de enkelte interessepunkter.
- 4. Multibilledkorrelation med opretning foregår på samme måde som beskrevet ovenfor med opretning ved interessepunkterne, ligeledes for at kompensere for forskellige målforhold.

Disse metoder er således afprøvet for hvert testfelt, hvorefter resultaterne for positionsbestemmelsen sammenlignes med de laserscannede kontroldata. Kontroldatasættet opstilles i et dybdegrid¹ med samme orientering, som hovedbilledet for det pågældende testfelt. Sammenligningen vil derfor alene foretages som en sammenligning af afstandene fra billedet til de forskellige interessepunkter. Inden beregningerne påbegyndes, foretages en frasortering af de interessepunkter, der falder uden for kontroldatasættet, samt af de interessepunkter, der ligger uden for det anvendte interval for korrelationen.

5.3 Resultater for testområde "Mur"

I hovedbilledet blev der fundet 48 044 interessepunkter, der efterfølgende blev forsøgt genfundet i de øvrige billeder ved brug af de fire ovennævnte metoder. Som nævnt frasorteres en række punkter, der vurderes at være behæftet med grove fejl. Der frasorteres i alt 7 975 punkter i dette testområde, hvilket efterlader 40 069 punkter. Da metoderne 1 og 2 minder meget om hinanden, mens metoderne 3 og 4 ligeledes minder meget om hinanden, foretages beskrivelsen af disse parvist.

Resultater for enkeltbilledkorrelationsmetoderne

For hvert interessepunkt er givet en række afstande beregnet ud fra korrelationen mellem hovedbilledet og de enkelte øvrige billeder. Derudover er der bestemt en referenceafstand fra laserscanningen til kontrol af de beregnede værdier.

For hvert interessepunkt beregnes middelafstanden ud fra forskellige afstande beregnet ud fra de forskellige billeder. Denne middelafstand er det umiddelbare bud på en afstand opnået med den fotogrammetriske metode. I det ideelle tilfælde burde de afstande, der er bestemt ud fra de forskellige billeder alle sammen ligge tæt på middelafstanden. For at vurdere i hvor høj grad dette er tilfældet, beregnes spredningen af de enkelte observationer for hvert interessepunkt. Figur 5.3 og figur 5.4 illustrerer, hvorledes observationernes spredning fordeler sig.

Der er selvsagt mest ønskeligt, at have den mindst mulige spredning på observationerne, men dette er dog ikke tilfældet her, hvor størstedelen af spredningerne på observationerne er meget store. Der kan heller ikke umiddelbart ses nogen forskel på de forskellige metoders resultat.

 $^{^1\}mathrm{Se}$ f.eks. [Vosselman et al. 2010, s. 46-48]



Figur 5.3: Fordelingen af observationernes spredning ved brug af metode 1.



Figur 5.4: Fordelingen af observationernes spredning ved brug af metode 2.



Figur 5.5: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af henholdsvis metode 1.

	Maks afv.	Middel afv.	Spredning
Metode 1	50,774 m	$6,827 { m m}$	$9,513 \mathrm{~m}$
Metode 2	$50,375 { m m}$	$6,593~{ m m}$	$9,310 { m m}$

Tabel 5.1: Maksimum og middel for afvigelserne samt spredningen ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.

Ud fra middelafstanden beregnes afvigelserne fra referencesættet. Disse afvigelser er illustreret i figur 5.5 og figur 5.6.

Det ses her, at de beregnede afstande afviger ganske meget fra referencesættet. Med henblik på den store spredning på observationerne for de enkelte interessepunkter, tyder det på, at der er mange grove fejl blandt observationerne, der således ødelægger afstandsbestemmelsen. Den maksimale afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet er beregnet for hver af metoderne, og resultaterne er opstillet i tabel 5.1.

For at forbedre afstandsbestemmelsen vil det således være nødvendigt at rydde ud i de grove fejl blandt observationerne. Dette gøres ved at fastsætte en tærskelværdi for hvert interessepunkt, som observationerne skal ligge inden for. De observationer, der ligger over tærskelværdien, kasseres og medgår således ikke i de følgende beregninger. Tærskelværdien skal omkranse den sande værdi for afstanden til objektet, men da metoden skal kunne virke uden adgang til referencedata, benyttes i stedet medianafstanden. Medianafstanden benyttes i stedet for middelafstanden, da middelafstanden påvirkes af de grove fejl, hvorved tærskelværdien i princippet kan forskydes så meget, at også de fornuftige værdier sorteres fra. Der haves ligeledes en forhåbning om, at størstedelen af observationerne er fornuftige, hvorved medianafstanden burde være en fornuftig tilnærmelse til den reelle afstand. Tærskelværdiens størrelse sættes til ±1 m. For de interessepunkter, hvor der er færre end to observationer, der godkendes, kasseres hele interessepunktet og medtages ikke i de følgende beregninger.

I figur 5.7 og figur 5.8 er det illustreret, hvor stor en andel af observationerne, der benyttes i de videre beregninger for henholdsvis metode 1 og 2. Det ses, at



Figur 5.6: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af henholdsvis metode 2.

	Maks afv.	Middel afv.	Spredning
Metode 1	$53{,}589~\mathrm{m}$	$4,705 {\rm ~m}$	$8,651 { m m}$
Metode 2	$54,\!850~{ m m}$	$4,518 { m ~m}$	8,494 m

Tabel 5.2: Maksimum og middel for afvigelserne samt spredningen ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.

næsten 3/4 af observationerne kasseres for begge metoder.

Efterfølgende beregnes de enkelte observationers spredning endnu engang for at se, hvor tæt de enkelte afstandsberegninger nu ligger på hinanden. Forekomsten af spredningen på observationerne er illustreret i figur 5.9 og figur 5.10.

Spredningerne vil selvsagt alle ligge under 1 m grundet den fastsatte tærskelværdi. Det ses, at den største forekomst ligger i intervallet under 0,1 m, men forekomsten i dette interval er dog kun marginalt større end i intervallerne fra 0,1 m - 0,5 m, hvorefter forekomsterne aftager løbende. Som det var tilfældet før, er der ingen voldsom forskel mellem metoderne 1 og 2, omend der er en lidt større forekomst af interessepunkter med en mindre spredning for metode 2.

Afvigelserne fra referenceafstandene beregnes på baggrund af middeltallet for de enkelte interessepunkters observationer, og i figur 5.11 og figur 5.12 ses et diagram over afvigelserne ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.

For begge metoder er der sket en mærkbar forbedring i forhold til før frasorteringen af dårlige observationer. Alligevel ligger kun omkring 36 % af punkterne med en afvigelse på under 1 m fra referenceværdien, mens der generelt er en tendens til, at de fotogrammetrisk bestemte afstande er for lange. I tabel 5.2 er opstillet den største afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet for metode 1 og 2.

Den beregnede spredning på afvigelserne fra referencedatasættet er langt større end forventet og er stærkt påvirket af de store afvigelser i forbindelse med afstandsbestemmelsen. Med afvigelser på over 50 m for afstande på under 65 m er der områder, hvor det går decideret galt, men med middeltal på omkring 4,5 m er der dog en klar overvægt af punkter, hvor afvigelserne er mere moderate.



Figur 5.7: Fordelingen af godkendte og kasserede afstande vist i procent ved brug af metode 1.



Figur 5.8: Fordelingen af godkendte og kasserede afstande vist i procent ved brug af metode 2 .



Figur 5.9: Fordelingen af observationernes spredning ved brug af metode 1.



 $Figur \ 5.10: \ Fordelingen \ af \ observationernes \ spredning \ ved \ brug \ af \ metode \ 2.$



Figur 5.11: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 1.



Figur 5.12: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 2.



Figur 5.13: Illustration af de forskellige segmenters placering.

Ovenstående tal er beregnet for det samlede testfelt, men da testfeltet består af flere forskellige elementer, opdeles testfeltet i segmenter således, at der kan beregnes værdier for de enkelte elementtyper. I figur 5.13 ses placeringen af de forskellige segmenter for testområdet. Der haves to forskellige segmenter af murstensvægge: "Mur 1", der er forrest i billedet, og "Mur 2", der er længere væk i billedet til højre for "Mur 1". Forrest i billedet ligger segmentet "Græs". Til venstre for "Mur 1" er segment "Træ 1", mens segment "Træ 2" er til højre for "Mur 2". Segment "Træ 3" er længere væk i billedet over "Træ 1" og til venstre for "Mur 1".

Det forventes, at spredningerne på observationerne og nøjagtigheden inden for de enkelte segmenter vil ligge mere samlet, end tilfældet er for hele testområdet. Denne antagelse bakkes op af figur 5.14, hvor de forskellige interessepunkters spredning på observationerne er vist som en funktion af interessepunkternes afvigelse fra referencesættet.

Det ses at de forskellige segmenter ligger nogenlunde samlet segment for segment, mens det ligeledes ses at afvigelserne er mindst for de punkter hvor observationeres spredning for det enkelte interessepunkt er mindst.

Beregningerne for observationernes spredning og nøjagtigheden af afstandsbestemmelsen er foretaget for de enkelte segmenter. Hovedfokus vil i det efterfølgende være på segment "Mur 1", da denne test især har til formål at teste den fotogrammetriske metode under gode forhold. Nedenfor i figur 5.15 og figur 5.16 er vist observationernes spredning for segmentet "Mur1" ved henholdsvis metode 1 og 2.

Der ses her en tydelig forbedring i forhold til observationernes spredning for hele testområdet. Derudover har opretningen, der foretages for metode 2, en større indflydelse på resultatet, hvor der her ses en forbedring af observationernes spredning.



Figur 5.14: Illustration af observationernes afvigelser fra referencedatasættet som funktion af deres spredning.



Figur 5.15: Forekomsten af observationernes spredning vist i procent ved brug af metode 1 for segmentet "Mur 1".



Figur 5.16: Forekomsten af observationernes spredning vist i procent ved brug af metode 2 for segmentet "Mur 1".

Afvigelserne fra referencesættet er ligeledes beregnet for segmentet "Mur 1", og er illustreret i figur 5.17 og figur 5.18.

Der ses en markant forbedring i forhold til resultatet for det samlede testfelt, da hovedparten af afvigelserne ligger under 1 meter. Beregningerne for den maksimale afvigelse, middelafvigelse og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet er foretaget for samtlige segmenter, og resultaterne for disse er opstillet i tabel 5.3.

Resultater for multibilledkorrelationsmetoden

I forbindelse med denne metode haves ligeledes et referencesæt til kontrol af data, men modsat enkeltbilledkorrelationsmetoden beregnes her kun en enkelt afstand for hvert interessepunkt. Derfor er det heller ikke muligt at frasortere interessepunkterne, hvor hvor observationer ikke passer sammen indbyrdes. Som ved metode 1 og 2 beregnes ligeledes afvigelserne fra referencesættet, der er illustreret i figur 5.21 og figur 5.20.

Der er ligeledes foretaget beregning af den maksimale afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet. Disse er opstillet i tabel 5.4.

Præcis som ved metode 1 og 2 er der nogle meget store afvigelser, hvorfor der ligeledes foretages en segmentering her for at kunne vurdere metoderne for de enkelte områder. Testfeltet opdeles i de samme 6 områder, som blev benyttet i forrige afsnit. I figur 5.21 og figur 5.22 er afvigelserne fra referencedatasættet for segment "Mur 1" illustreret for metode 3 og 4.

Der ses her, at der for metode 3 er en del store afvigelser, mens metode 4 hovedsageligt har afvigelser på under 1 meter. Beregningerne for den maksimale afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet er ligeledes udført for samtlige segmenter, og resultaterne er opstillet i tabel 5.5. Det ses her at metode 4 generelt leverer et bedre resultat end metode 3 for samtlige segmenter.



Figur 5.17: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 1 for segmentet "Mur 1".



Figur 5.18: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 2 for segmentet "Mur 1".

Metode 1	Maks. afv.	Middelafv.	Spredning	
Mur 1	12,003 m	0,139 m	$0,677 { m m}$	
Mur 2	$53,589 { m m}$	40,066 m	40,202 m	
Græs	21,281 m	$5,368 { m m}$	6,606 m	
Træ 1	45,442 m	25,822	30,325 m	
Træ 2	37,610 m	$2,161 { m m}$	$3,155 { m m}$	
Træ 3	52,573 m	40,526 m	40,797 m	
Metode 2	Maks. afv.	Middelafv.	Spredning	
Mur 1	13,642 m	0,124 m	0,704 m	
Mur 2	49,326 m	40,015 m	40,104 m	
Græs	$20,756 { m m}$	4,932 m	6,102 m	
Træ 1	12,161 m	$1,988 { m m}$	2,726 m	
Træ 2	44,767 m	$20,163 { m m}$	26,117 m	

Tabel 5.3: Resultater for segmenter ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.

40,135 m

40,359 m

54,850 m

Træ 3



Figur 5.19: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 3.

	Maks afv.	Middel afv.	Spredning
Metode 3	63,878 m	8,798 m	$13,539 { m m}$
Metode 4	63,687 m	8,429 m	13,313 m

Tabel 5.4: Maksimum og middel for afvigelserne samt spredningen ved brug af henholdsvis metode 3 og 4.



Figur 5.20: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 4.



Figur 5.21: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 3 for segment "Mur 1".



Figur 5.22: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 4 for segment "Mur 1".

Metode 3	Maks afv.	Middelafv.	Spredning
Mur 1	$26,440 { m m}$	$2,728 \mathrm{~m}$	7,215 m
Mur 2	$62,525 { m m}$	$54,169 { m ~m}$	54,605 m
Græs	20,624 m	$6,478 { m m}$	6,764 m
Træ 1	$56,155 { m m}$	$32{,}538~\mathrm{m}$	38,627 m
Træ 2	$52,807 { m m}$	14,714 m	$15,283 { m m}$
Træ 3	$62,835 { m m}$	$48,502 { m m}$	49,632 m
Metode 4	Maks. afv.	Middelafv.	Spredning
Metode 4 Mur 1	Maks. afv. 7,544 m	Middelafv. 0,404 m	Spredning 0,590 m
Metode 4 Mur 1 Mur 2	Maks. afv. 7,544 m 42,268 m	Middelafv. 0,404 m 36,910 m	Spredning 0,590 m 36,926 m
Metode 4 Mur 1 Mur 2 Græs	Maks. afv. 7,544 m 42,268 m 20,237 m	Middelafv. 0,404 m 36,910 m 6,093 m	Spredning 0,590 m 36,926 m 6,420 m
Metode 4 Mur 1 Mur 2 Græs Træ 1	Maks. afv. 7,544 m 42,268 m 20,237 m 36,638 m	Middelafv. 0,404 m 36,910 m 6,093 m 20,700 m	Spredning 0,590 m 36,926 m 6,420 m 24,822 m
Metode 4 Mur 1 Mur 2 Græs Træ 1 Træ 2	Maks. afv. 7,544 m 42,268 m 20,237 m 36,638 m 32,585 m	Middelafv. 0,404 m 36,910 m 6,093 m 20,700 m 4,019 m	Spredning 0,590 m 36,926 m 6,420 m 24,822 m 4,242 m

Tabel 5.5: Resultater for segmenter ved brug af henholdsvis metode 3 og 4.

5.4 Resultater for testfeltet "Glasparti"

Med udgangspunkt i hovedbilledet blev der for dette område fundet 31 669 interessepunkter, hvoraf 12 940 frasorteres, hvilket efterlader 18 728 punkter til de efterfølgende beregninger. Interessepunkterne skal søges genfundet i de øvrige billeder ud fra de samme fire metoder benyttet i forrige afsnit. Metoderne 1 og 2 samt metoderne 3 og 4 behandles parvis, da disse metoder minder meget om hinanden.

Resultater for enkeltbilledkorrelationsmetoden

Ud fra erfaringerne fra testen for testfeltet "Mur", antages det, at det vil være fordelagtigt at foretage sortering af observationerne på baggrund af en tærskelværdi omkring medianafstanden for de enkelte interessepunkter. Herved fjernes de observationer, der ligger langt fra medianafstanden, hvilket antages at være en indikation af, at de også ligger langt fra den reelle afstand. Det er kun de observationer, der ligeledes ligger under tærskelværdien, der benyttes i de efterfølgende beregninger. I figur 5.23 og figur 5.24 er det vist, hvor stor en del af observationerne, der benyttes.

På baggrund af de resterende interessepunkter og observationer beregnes observationernes spredning for de enkelte interessepunkter. Dette er illustreret i figur 5.25 og figur 5.26, for henholdsvis metode 1 og 2.

Observationernes spredning fordeler sig nogenlunde fornuftigt med de fleste observationer med en spredning på under 0,3 m, hvorefter forekomsten falder løbende.

Afvigelserne fra referencesættet beregnes ligeledes og resultaterne for disse beregninger er illustreret i figur 5.27 og figur 5.28.

Som det var tilfældet for det forrige testfelt, ses der igen store afvigelser, når der foretages beregninger for hele testfeltet. Der er dog en stor forekomst af afvigelser på under en meter, hvilket antyder at metoden fungerer nogenlunde visse steder.

Der er foretaget beregninger af den maksimale afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet. Resultaterne for disse er opstillet i tabel 5.6.

Resultaterne er ingenlunde gode og bærer i høj grad præg af alt for mange store afvigelser.

Det er ikke umiddelbart muligt at dele testfeltet op i fornuftige segmenter, som det blev gjort for testfeltet "Mur". I stedet er der foretaget en sortering af punkterne efter, hvor stor en afvigelse der er fra punktet og til referencedatasættet. På denne måde kan det ses for hvilke punkter, afstandsbestemmelsen lykkedes. Dette er illustreret i figur 5.29 og figur 5.30, hvor punkter med en afvigelse på under 0,1 m er angivet med blå, mens de øvrige punkter er angivet med rød.

Det ses, at resultatet er nogenlunde ens for de to metoder, hvor punkter med en

	Maks afv.	Middel afv.	Spredning
Metode 1	$34{,}533~\mathrm{m}$	$7,524 { m ~m}$	$11,061 { m m}$
Metode 2	$34,\!659 { m m}$	7,625 m	$11,153 { m m}$

Tabel 5.6: Maksimum og middel for afvigelserne samt spredningen ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.



Figur 5.23: Fordeling af godkendte og kasserede afstande vist i procent ved brug af metode 1.



Figur 5.24: Fordeling af godkendte og kasserede afstande vist i procent ved brug af metode 2.



Figur 5.25: Fordelingen af observationernes spredning ved brug af metode 1.



 $Figur \ 5.26: \ Fordelingen \ af \ observationernes \ spredning \ ved \ brug \ af \ metode \ 2.$



Figur 5.27: Afvigelser i forhold til referencedatasættet ved brug af metode 1.



 $Figur \ 5.28: \ {\rm Afvigelser} \ i \ forhold \ til \ referencedatas \\ \mbox{\it \ef{scalar}tet} \ ved \ brug \ af \ metode \ 2.$



Figur 5.29: Sortering af interessepunkter efter deres afvigelse fra referencedatasættet ved brug af metode 1.

	Maks afv.	Middel afv.	Spredning
Metode 3	36,770 m	$10,573 { m m}$	$13,922 {\rm \ m}$
Metode 4	$39,721 {\rm ~m}$	$7,762 {\rm ~m}$	$12,343 {\rm \ m}$

Tabel 5.7: Maksimum og middel for afvigelserne samt spredningen ved brug af henholdsvis metode 1 og 2.

lav afvigelse placerer sig nogenlunde jævt ud over testområdet. Der ses dog en tendens til, at der hovedsageligt er punkter med en lille afvigelse langs tydelige kanter og lignende. Der blev fundet 2 187 punkter med en afvigelse på under 0,1 m for begge metoder.

Resultater for multibilledkorrelationsmetoden

Testen foretages ligeledes for metode 3 og 4, hvor afvigelserne til referencedatasættet beregnes. Afvigelserne er illustreret i figur 5.31 og figur 5.32.

Igen ses det, at der for multibilledkorrelationsmetoden opnås en tydelig forbedring i forbindelse med opretningen. Der er dog stadig en stor forekomst af store afvigelse for begge metoder. Den maksimale afvigelse, middelafvigelsen og spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet er beregnet for hver af metoderne, og resultaterne er opstillet i tabel 5.7.

Igen foretages en sortering af interessepunkterne ud fra størrelsen på afvigelsen til referencedatasættet. Resultatet for dette er vist i figur 5.33 og figur 5.34.

Der ses en større forskel mellem metode 3 og 4 for, hvor punkterne med en lille afvigelse findes i testfeltet. Der er dog stadig en klar overvægt af punkter langs de tydelige kanter i billedet. Der blev fundet henholdsvis 2 165 og 2 051 punkter med en afvigelse på under 0,1 m for henholdsvis metode 3 og 4.



Figur 5.30: Sortering af interessepunkter efter deres afvigelse fra referencedatasættet ved brug af metode 2.



Figur 5.31: Afvigelser i forhold til referencedatasættet ved brug af metode 3.



Figur 5.32: Afvigelser i forhold til referencesættet ved brug af metode 4.



Figur 5.33: Sortering af interessepunkter efter deres afvigelse fra referencedatasættet ved brug af metode 3.



Figur 5.34: Sortering af interessepunkter efter deres afvigelse fra referencedatasættet ved brug af metode 4.

5.5 Vurdering af resultater

Vurdering af resultater for testfeltet "Mur"

For de indledende test for testfeltet fremkom der meget store spredninger for observationerne og afvigelser fra referencedatasættet, og med en spredning på afvigelserne fra referencedatasættet på henholdsvis 9,513 m og 9,310 m for metode 1 og 2, blev det fundet nødvendigt at foretage en frasortering af observationer behæftet med grove fejl. Denne sortering af observationer betød, at spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet blev reduceret til henholdsvis 8,651 m og 8,494 m for metode 1 og 2. I modsætning til spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet blev de maksimale afvigelser fra referencedatasættet til gengæld større efter frasorteringen. Dette må betyde, at frasorteringen af grove fejl ingenlunde er forløbet optimalt. Det vurderes dog, at frasorteringen alligevel er at foretrække, da middelafvigelserne falder fra henholdsvis 6,827 m og 6,593 mtil 4,705 m og 4,518 m for henholdsvis metode 1 og 2. Testen for metode 3 og 4 for hele testfeltet resulterede i en spredning på afvigelserne fra referencedatasættet på 13,539 m og 13,313 m, hvilket er noget dårligere end de øvrige metoder. Disse beregninger er dog også foretaget for samtlige observationer uden frasortering af grove fejl, da en sådan ikke er mulig for multibilledkorrelationsmetoden.

Efter segmenteringen blev de samme beregninger gentaget for hvert segment, hvor der dog er fokuseret på segmentet "Mur 1", da det ønskes undersøgt, hvor godt metoderne virker under gode forhold. Resultaterne for segmentet "Mur 1" er opstillet i tabel 5.8.

Metoderne 1, 2 og 4 giver alle resultat på omkring 0,65 m mens metode 3 giver et markant dårligere resultat.

	Metode 1	Metode 2	Metode 3	Metode 4
Spredning	$0,677 { m m}$	$0,704 {\rm m}$	$7,\!215~{ m m}$	$0,590 { m m}$
Middel afv.	0,139 m	0,124 m	$2,728 { m m}$	0,404 m
Maks afv.	12,003 m	$13,\!642 { m ~m}$	26,440 m	$7,544 { m m}$

Tabel 5.8: Resultaterne for de forskellige metoder ved segmentet "Mur 1".

Resultaterne for de øvrige metoder giver ikke noget entydigt svar på, om én af metoderne giver et bedre resultat eller er mere stabil end de andre. Ved metode 1 og 2 opnås dog en noget mindre middelafvigelse, end tilfældet er for metode 4, mens den største afvigelse for metode 4 er mærkbart mindre, end tilfældet er for metode 1 og 2. Det kunne umiddelbart tyde på, at metode 4 er bedre til at få sorteret de største fejl fra, mens metode 1 og 2 umiddelbart leverer den bedste afstandsbestemmelse for de punkter, hvor det rent faktisk går godt.

Der opnås ikke umiddelbart et forbedret resultat ved at foretage opretningen ved iagtagelse af metode 1 og 2, mens opretningen ved metode 4 resulterede i et bedre resultat, end tilfældet var for metode 3, også hvis der ses bort fra resultatet for segmentet "Mur 1".

Resultaterne for alle andre segmenter end "Mur 1" er så dårlige, at de ikke kan tillægges nogen større værdi. Der var dog heller ingen forventninger til, at den fotogrammetriske metode skulle kunne give et godt resultat på græs, træer og lignende, da disse elementer er så komplekse, at korrelationen let kan gå galt. Derudover kan græs og træer have svajet i vinden under registreringen, hvilket vil have forværret resultatet yderligere.

Vurdering af resultater for testfeltet "Glasparti"

Resultaterne for dette testfelt er som det kunne forventes ikke imponerende, når der ses overordnet på hele testfeltet. Spredningen på afvigelserne fra referencedatasættet er for samtlige metoder over 10 meter, mens middelafvigelserne ligger mellem 7,5 meter og 10,5 meter. Alt i alt er der for testfeltet en stor forekomst af store afvigelser, hvilket i og for sig var forventeligt, da området netop er udvalgt for at teste metoderne under svære vilkår. Ses der på illustrationerne for, hvor interesseounkterne med små afvigelser findes, er det tydeligt, at der er en tendens til, at disse findes langs kanter og andre tydelige elementer i billederne. Dette er gældende for samtlige af metoderne, omend der er stor forskel på, hvor de forskellige metoder har punkter med små afvigelser med undtagelse af metode 1 og 2, hvor billedet stort set er det samme. Det bemærkes, at der for metode 4 ligeledes er en forholdsvis stor forekomst af punkter med en lille afvigelse ude i træet uden for glaspartiet samt i busken til venstre i billedet. Dette kunne tyde på, at denne metode er bedre til behandling af mere komplekse elementer som f.eks. beplantning.

Overordnet vurdering

Generelt for de to testfelter og de fire metoder kan det siges, at det er muligt at foretage en bestemmelse af afstanden til punkter i billedet. Resultaterne viser dog, at metoderne er behæftet med store fejl, der ødelægger den samlede nøjagtighed. Med de i projektet benyttede metoder lader det til, at der for velstrukturerede overflader under gode forhold, kan foretages en bestemmelse af afstanden med en nøjagtighed på omkring 0,65 meter. For områder, hvor forholdene ikke er gode, vil nøjagtigheden dog være markant dårligere.

På trods af de store spredninger forekommer der dog en del punkter med små afvigelser. For alle fire metoder blev der funder over 2000 punkter, hvor afvigelsen i forhold til referencedatasættet var under 0,1 meter. Ved iagttagelse af placeringerne for disse punkter ses det, at de fordeler sig nogenlunde jævnt over hele testfeltet dog hovedsageligt langs de tydelige kanter i billedet. Dette er selvfølgelig positivt, idet afstandsbestemmelsen således kan fungere tilfredsstillende for områder, hvor der er tydelige og let genkendelige interessepunkter og dette også med en nøjagtighed bedre end de 0,65 meter. Desværre findes der ligeledes også mange punkter med store afvigelser over hele testfeltet og også ved let definérbare kanter og lignende. Derfor kan det være svært at fastslå, hvornår en afstandsbestemmelse forløber godt eller dårligt.

Kapitel 6 Konklusion

I forbindelse med projektet er det blevet vist, at de resultater, der opnås ved brug af den fotogrammetriske metode, kun i begrænset grad lever op til de forventninger, der blev opstillet i projektets indledning. Det har således ikke være muligt at producere en punktsky med en nøjagtighed svarende til det, der kan forventes i forbindelse med en laserscanning. Dette skyldes i høj grad forekomsten af grove fejl, der ødelægger den overordnede nøjagtighed. Der blev foretaget forskellige filtreringer for at frasortere de grove fejl, men resultaterne for de forskellige tests gav alligevel en spredning afvigelserne fra referencedatasættet på adskillige meter. Kun i de tilfælde, hvor datasættet blev delt op i mindre segmenter, var det muligt at opnå en spredning på afvigelserne på omkring 0,65 meter for det bedste område.

Der var dog en mængde punkter i de producerede punktskyer, hvor positionsbestemmelsen forløb mere tilfredsstillende. I hvert testtilfælde blev der således bestemt over 2000 punkter med en afvigelser på under 0,1 meter. Disse punkter var hovedsageligt lokaliseret ved kanter i billedet, hvor korrelationsmetoderne havde bedre forudsætninger for at foretage en succesfuld korrelation. Det vurderes derfor, at det vil være muligt at bestemme punkter af høj nøjagtighed i de tilfælde, hvor der er tydelige og let genkendelige interessepunkter i billederne. Det er dermed ikke sagt, at alle positioneringerne langs sådanne punkter forløb tilfredsstillende. Størstedelen af punkterne med store afvigelser i forhold til referencesættet var godt nok lokaliseret i områder af billederne, hvor der ikke var gode forudsætninger for korrelationen, men der var ligeledes adskillige tydelige og let genkendelige interessepunkter for hvilke, positioneringen resulterede i store afvigelser.

Det konkluderes derfor, at den i projektet anvendte fotogrammetriske metode ikke er særligt robust sammenlignet med en laserscanning og, at det er vanskeligt at detektere og fjerne grove fejl i et fotogrammetrisk produceret datasæt. Som et anvendeligt alternativ til terrestrisk laserscanning er der derfor et stykke vej for fotogrammetrien.

Det er dog stadigt projektgruppens opfattelse, at det vil være muligt at udvikle et sådant alternativ, men det kræver, at der udvikles nogle effektive metoder til sammenligning af billeder og efterfølgende detektion af grove fejl.

Idet formålet med dette projekt har været at undersøge de grove fejl, der opstår ved automatisk billedkorrelation, er der ikke blevet gjort meget ud af at forbedre nøjagtigheden af positionering for de punkter, hvor korrelationen gik godt. Det kan diskuteres, hvorvidt det er hensigtsmæssigt kun at beregne korrelationskoefficienter for heltallige multiplum af kamerakonstanten, idet det må antages, at resultatet ville blive mere nøjagtig, hvis projektgruppen i stedet havde anvendt en metode, der sammenligner billederne på subpixelniveau.

Det kunne ligeledes være interessant at anlægge en mere objektorienteret tilgang til problemet, hvorved korrelationen foretages ved sammenligning af komplekse geometriske objekter, som linjer eller lukkede kurver, i stedet for at foregå på enkeltpunktniveau. En sådan tilgang vil dog kræve, at der implementeres en række objektgenkendelsesalgoritmer til detektion og modellering af geometriske objekter i hvert billede forud for sammenligningen, hvilket kan være en vanskelig opgave.
Litteratur

- [Brande 1993] Lavridsen, O. Brande: *Fotogrammetri*. 9. udgave. Aalborg Universitetscenter.
- [Burger & Burge 2008] Burger, Wilhelm; Burge, Mark J. 2008: Digital Image Processing – An Algorithmic Introduction Using Java. First edition. Springer.
- [Cederholm 2000] Cederholm, Peter 2000: Udjævning. 2. udgave. Aalborg Universitet.
- [Cyganek & Siebert 2009] Cyganek, Bogusław; Siebert, Paul J. 2009: An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms. John Wiley & Sons, Ltd.
- [Förstner 1987] Förstner, Wolfgang; Gülch, Eberhard 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features. Institute for Photogrammetry, Stuttgart University.
- [Jazayeri et al. 2008] Jazayeri, I; Fraser, C.S. 2008: Interest Operators in Close-Range Object Reconstruction. Department of Geomatics, The University of Melbourne.
- [Kraus 2007] Kraus, Karl 2007: Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans. 2nd edition. Walter de Gruyter. Berlin.
- [Luhmann et al. 2006] Luhmann, Thomas; Robson, Stuart; Kyle, Stephen; Harley, Ian 2006: Close Range Photogrammetry – Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing.
- [Mikhail et al. 2001] Mikhail, Edward M.; Bethel, James S.; McGlone, J. Chris 2001: Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons.
- [Mortensen et al. 2011] Mortensen, Majbrit; Martinová, Olga; Horák, Ales; Ørtved, Jakob; Riche, Olivier 2011: *PhotoModeler Scanner: A ri*val for traditional laser scanning? Landinspektøruddannelsen, Aalborg Universitet.
- [Nixon & Aguado 2008] Nixon, Mark; Aguado, Alberto 2008: Feature Extraction & Image Processing. Second edition. Academic Press.

- [Rosten & Drummond 2006] Rosten, Edward; Drummond, Tom 2006: Machine learning for high-speed corner detection. Department of Engineering, Cambridge University.
- [Tvedebrink 2009] Tvedebrink, Torben 2009: Landmålingens fejlteori. Aalborg Universitet.
- [Vedelsby & Felsager] Vedelsby, Mette; Felsager, Bjørn: Matematikken bag perspektivet I.
- [Vosselman et al. 2010] Vosselman, George; Maas, Hans-Gerd 2010: Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing.

Bilag A

Udvalgte billeder af testfelterne Testfeltet "Mur"

Testfeltet "Glasparti"

Bilag B

Oversigt over filer på CD'en

Projektet ledsages af en CD, der ud over en elektronisk udgave af rapporten indeholder de data, der er anvendt i projektet og resultatet af projektgruppens beregninger. Når CD'en lægges i CD-drevet åbnes en HTML-fil, hvorfra CD'ens øvrige indhold kan tilgås. CD'en har følgende mappestruktur:

- Rapport: Indeholder denne rapport i elektronisk format, samt de figurer, der er vist i rapporten.
- Billeder: Indeholder alle billeder optaget af testfelterne.
- Laserscanning: Indeholder de laserscannede referencedata for hvert testfelt.
- Totalstation: Indeholder paspunktsobservationer foretaget med totalstation, samt de beregnede paspunktskoordinater.
- Korrelation: Indeholder korrelationsresultaterne i det format, der er angivet i figur 4.9.
- Beregning: Indeholder de Excel-filer, der er anvendt ved beregning af statistik for korrelationsresultaterne.
- Java: Indeholder kildekode, eksekverbare filer, teknisk dokumentation og projektfiler til projektgruppens korrelationsprogram.
- Matlab: Indeholder kildekoden til et Matlab-script anvendt ved transformation af en laserscannet punktsky fra scannerens lokale koordinatsystem til referencesystemet.