

FFI RAPPORT

3D TERRENGMODELL GENERERT PÅ BAKGRUNN AV DATA FRA DIGITAL BILDEANALYSE

PALM Hans Christian, BRAATHEN Bjørn

FFI/RAPPORT-2003/00991

FFIBM/835/350

Godkjent
Kjeller 4. desember 2003

Stein Grinaker
Forskningsjef

**3D TERRENGMODELL GENERERT PÅ
BAKGRUNN AV DATA FRA DIGITAL
BILDEANALYSE**

PALM Hans Christian, BRAATHEN Bjørn

FFI/RAPPORT-2003/00991

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT (FFI)
Norwegian Defence Research Establishment

UNCLASSIFIED

P O BOX 25
 NO 2027 KJELLER, NORWAY

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/00991	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 42												
1a) PROJECT REFERENCE FFIBM/835/350	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE													
4) TITLE 3D TERRENGMODELL GENERERT PÅ BAKGRUNN AV DATA FRA DIGITAL BILDEANALYSE (3D TERRAIN MODEL BASED ON DATA DERIVED BY DIGITAL IMAGE ANALYSIS)														
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) PALM Hans Christian, BRAATHEN Bjørn														
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)														
7) INDEXING TERMS <table border="0" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">IN ENGLISH</th> <th style="text-align: left;">IN NORWEGIAN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a) <u>Image segmentation</u></td> <td>a) <u>Segmentering</u></td> </tr> <tr> <td>b) <u>Parallelogram approximation</u></td> <td>b) <u>Parallelogramapproximasjon</u></td> </tr> <tr> <td>c) <u>Distance estimation</u></td> <td>c) <u>Avstandsestimering</u></td> </tr> <tr> <td>d) <u>Triangulation</u></td> <td>d) <u>Triangulering</u></td> </tr> <tr> <td>e) <u>Distance image computation</u></td> <td>e) <u>Beregning av avstandsbilder</u></td> </tr> </tbody> </table>			IN ENGLISH	IN NORWEGIAN	a) <u>Image segmentation</u>	a) <u>Segmentering</u>	b) <u>Parallelogram approximation</u>	b) <u>Parallelogramapproximasjon</u>	c) <u>Distance estimation</u>	c) <u>Avstandsestimering</u>	d) <u>Triangulation</u>	d) <u>Triangulering</u>	e) <u>Distance image computation</u>	e) <u>Beregning av avstandsbilder</u>
IN ENGLISH	IN NORWEGIAN													
a) <u>Image segmentation</u>	a) <u>Segmentering</u>													
b) <u>Parallelogram approximation</u>	b) <u>Parallelogramapproximasjon</u>													
c) <u>Distance estimation</u>	c) <u>Avstandsestimering</u>													
d) <u>Triangulation</u>	d) <u>Triangulering</u>													
e) <u>Distance image computation</u>	e) <u>Beregning av avstandsbilder</u>													
THESAURUS REFERENCE:														
8) ABSTRACT <p>This report describes a technique for generating a digital terrain model of a given scene. The technique is based on first estimating the position and distance to parallelograms placed in various parts of the scene by image processing. This estimation is performed by extracting the parallelograms by a region growing procedure, determining its line segments, and applying a priori knowledge of its physical size for estimating the distance. Next, these positions are used as input to a triangulizing algorithm. The resulting planes are in turn used for determining the distance between a point in the scene corresponding to a given pixel and the camera. The distance between the camera and points outside the planes are determined by extrapolation, and are thus making the distance image of the scene complete.</p> <p>In the report we have applied the technique on two different scenes. The experiments demonstrate that the technique generates (terrain models and) distance images of acceptable accuracy.</p>														
9) DATE December 4 2003	AUTHORIZED BY This page only Stein Grinaker	POSITION Director of Research												

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	7
2	DETEKSJON AV REFERANSEOBJEKTER	8
2.1	Segmentering av rektangler	8
2.2	Beregning av hjørnepunkter	9
2.2.1	Oppdeling av randa i linjestykker	9
2.2.2	Bestemmelse av linjeparаметre	10
2.2.3	Beregning av skjæringspunkt mellom to linjer	10
2.3	Avstandsberegning	11
2.4	Mulige estimeringsfeilkilder	13
2.4.1	Feilkilde 1	14
2.4.2	Feilkilde 2	14
3	TRIANGULERING OG SAMPLING AV EN TRIANGULERT FLATE	15
3.1	Triangulering	16
3.2	Den implementerte trianguleringsalgoritmen	17
3.3	Triangulering i tre dimensjoner	19
3.4	Trianguleringsprogrammet Triangle	21
3.5	Sampling av flaten	21
3.6	Ekstrapolering, håndtering av himmel og vertikale strukturer	25
4	EKSPERIMENTER	25
4.1	Eksperiment 1	25
4.1.1	Validering/evaluering av terrengmodellen (eksperiment 1)	27
4.2	Eksperiment 2	31
4.2.1	Validering/evaluering av terrengmodellen (eksperiment 2)	32
4.3	Diskusjon	36
5	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	36
	Litteratur	38

APPENDIKS

3D TERRENGMODELL GENERERT PÅ BAKGRUNN AV DATA FRA DIGITAL BILDEANALYSE

1 INNLEDNING

Digitale 3D terrengmodeller vil generelt være til stor hjelp i sceneanalysen. Både sannsynligheten for objekt-deteksjon og falskalarmeraten vil kunne forbedres fordi en enkelt kan få et anslag på 3D-størrelsen til detekterte objekter. Kameraovervåkingsystemet OPAK¹ er et eksempel på et system som inkorporerer en slik terrengmodell. I OPAK kan detekterte objekter klassifiseres til en lang rekke ulike klasser som biler, mennesker, dyr, osv. ved at informasjon om avstand til objektene er tilgjengelig.

Problemet er imidlertid å enkelt kunne generere en terrengmodell. Det er f.eks. en temmelig komplisert prosess dersom den skal genereres v.h.j.a. landmålerutstyr. Vi har derfor utviklet en metode der avstanden mellom kamera og et sett punkter i terrenget bestemmes ved bruk av digital bildeanalyse, deretter utføres en triangulering mellom disse punktene, og en terrengmodell i form av et sett stykkevis plan kan så genereres på denne bakgrunnen. Denne rapporten beskriver hele dette systemet. Detaljer om bildeanalysen og posisjons- og avstandsberegning til bildepunkter finnes i (12). Detaljer om terrengmodellen og genereringen av denne finnes i (4).

Idéen er å benytte en flate med kjent geometrisk form og størrelse og plassere denne ut i terrenget. Ved å gjenkjenne denne i bildet og beregne størrelsen i bildekoordinater, kan posisjon og avstand estimeres. Vi har valgt å benytte et rektangel. Dette vil generelt bli avbildet som et parallelogram². I en ønsket posisjon settes denne med spissen ned og med flatens normalvektor parallelt med linjen mellom kameraet og senterpunktet i rektangelet. Avstanden estimeres og tilordnes rektangelets nederste spiss - det punktet som berører terrenget. Ved å sørge for at rektanget har en homogen intensitet med svært god kontrast til terrenget, kan bildeanalysen gjøres enkel og sikker.

Når avstandene til punktene i terrenget er bestemt og disses posisjon i bildeplanet er kjent, dannes en flate bestående av triangler. Triangelens hjørner er de målte punktene i terrenget. Siden det mellom de målte punktene vil bli dannet plan vil det være viktig å måle tett der hvor terrenget er kupert. I flatt terreng kan man måle mere sjeldent. På bakgrunn av denne triangulariserte flaten dannes avstandsbildet ved å trekke linjer gjennom brennpunktet og alle bildepunktene i bildeplanet. Disse linjene vil skjære gjennom forskjellige triangler på forskjellige steder. Avstanden til disse skjæringspunktene vil være avstanden for det tilsvarende bildepunktet. De triangulerte flatene vil generelt ikke dekke hele bildeflaten med den teknikken vi beskriver fordi det er begrenset hvor langt ut mot bildets vertikale kanter bildepunktene kan ligge. Dette kommer av at (det meste av) objektet (rektanget) må være synlig i bildet for at vi skal kunne estimere avstanden. I de områdene der vi ikke kan gjøre

¹Objekt og Periferisikring med Automatisk Kameraovervåking

²Dette skyldes både geometriske faktorer så vel som at i våre anvendelser er pikselopløsningen større horisontalt enn vertikalt.

målinger, har vi beregnet en avstand ved ekstrapolasjon.

Neste kapittel beskriver bildebehandlingen og avstandsestimeringen. Deretter beskrives genereringen av terrengmodellen i kapittel 3, og i kapittel 4 presenteres og diskuteres resultatene fra et par eksempler. Til slutt gis det en oppsummering og konklusjon i kapittel 5.

2 DETEKSJON AV REFERANSEOBJEKTER

Som input til terrengmodellgenereringen trengs avstanden til et sett med punkter i bildet. Vi har valgt å bestemme disse v.h.a. digital bildeanalyse. A priori antar vi at kameraets åpningsvinkel er kjent. På det grunnlaget kan avstander estimeres ved at et objekt med kjent størrelse og geometrisk form plasseres i ønsket terrengposisjon. Deretter segmenteres objektet og objektparametre beregnes. Ved å sammenholde størrelsen på objektet i bildet med dets fysiske størrelse, kan vi beregne et avstandsestimat ut fra kunnskap om kameraets åpningsvinkel.

Vi kan naturlig dele prosesseringen opp i følgende punkter:

- Segmentering av objekt (rektangel).
- Beregning av hjørnepunkter i rektangelet.
- Avstandsestimering.

Vi vil i det etterfølgende kort beskrive algoritmene for de enkelte punktene. For ytterligere detaljer, henvises det til (12).

2.1 Segmentering av rektangler

Vi nevnte innledningsvis at den rektangulære flaten var forutsatt å ha stor kontrast til bakgrunnen i tillegg til at den skulle være homogen. Dermed kan segmenteringen gjøres relativ enkel. Vi har valgt å benytte en enkel områdegroingsalgoritme (14) som så langt har fungert tilfredsstillende. Dette er en algoritme for å segmentere homogene områder. Initielt består segmentet av ett piksel som benevnes kimcelle. Ut fra denne kimcellen gros (d.v.s. tilordnes) det pixler til segmentet så lenge et sett predefinerte kriterier er oppfylt.

Som kimcelle benyttes et manuelt utplukket piksel på flaten. Forventning $\hat{\mu}$ og standardavvik $\hat{\sigma}$ til gråtonene estimeres i et område på 7×7 pixler rundt kimcellen. Deretter gros det ut fra dette pikselet så lenge det finnes nabopixler til "current" område som er slik at

$$|p - \hat{\mu}| < \max \{T_0 \hat{\sigma}, p_0\} \quad (2.1)$$

der p er nabopikseletes intensitet og T_0 og p_0 er a priori valgte konstanter.

I figur 2.1 er det vist et eksempel på segmentering av rektangulære flater plassert ut i fire forskjellige posisjoner. Størrelsen på disse er A4, avstanden er mellom 2.85 meter og 7.15 meter, og kameraets åpningsvinkel er 50.7° .



Figur 2.1 Eksempler på segmenteringer av objekter i form av rektangulære flater i A4-størrelse der avstanden mellom kamera og objekt er 2.85 m, 3.95 m, 5.10 m og 7.15 m. Bildet har "OPAK-format" (256×512 pixler og forholdet 4:3 for hvert piksels romlige avbildning).

2.2 Beregning av hjørnepunkter

Gitt et segment av rektangelet, må hjørnepunktene til dette (i bildekoordinater) først beregnes før det kan foretas noen avstandsberegning. Input til denne hjørnepunktsberegningen er segmentranda. I prinsippet kan en tenke seg simultant å bestemme alle hjørnepunktene (eller evt. linjeparametrene). Dette er trolig relativt komplisert og regnekrevende. Vi har derfor valgt en prosess bestående av følgende steg:

1. Del randa opp i linjestykker.
2. Bestem parametrene til hvert parallelle linjepar.
3. Bestem hjørnepunktene som skjæringspunktene mellom linjene.

Vi vil beskrive disse punktene nærmere i de etterfølgende avsnitt.

2.2.1 Oppdeling av randa i linjestykker

Vi forutsetter at rektangelet settes med en av spissene ned i bakken. Ideelt skal det da i den øvre linja i bildet der rektangelet er avbildet kun være ett piksel som faktisk avbilder rektangelet. Tilsvarende gjelder også for den nederste linja, den venstre kolonna og den høyre kolonna. Linjene som kan trekkes mellom øverste og nederste piksel og mellom venstre og høyre piksel brukes så til å dele randpikslene inn i fire mengder som igjen brukes for å bestemme hjørnepunktene i parallelogrammet. Oppdelingen gjøres som beskrevet i følgende punkter:

1. Finn omsluttende rektangel (x_{\min} , x_{\max} , y_{\min} , y_{\max}).

2. Finn midlere kolonnennummer til pikslene langs
 - (a) øvre rad (\bar{x}_1),
 - (b) nedre rad (\bar{x}_2).
3. Finn midlere radnummer til pikslene langs
 - (a) venstre kolonne (\bar{y}_1),
 - (b) høyre kolonne (\bar{y}_2).
4. Beregn linjeparаметrene som går gjennom (y_{\min}, \bar{x}_1) og (y_{\max}, \bar{x}_2) og linjeparаметrene som går gjennom (\bar{y}_1, x_{\min}) og (\bar{y}_2, x_{\max}) .
5. Bruk disse linjene til å tilordne randpikslene til fire ulike datasett avhengig av hvilken "kvadrant" de befinner seg i; \mathcal{X}_1 er mengden med randpixler som befinner seg i øvre høyre hjørne, \mathcal{X}_2 er randpikslene i nedre høyre hjørne, \mathcal{X}_3 er randpixler i nedre venstre hjørne, og \mathcal{X}_4 er randpixler i øvre venstre hjørne.

Pikslene i \mathcal{X}_1 og \mathcal{X}_3 benyttes så for å generere to parallelle linjer (like stigningstall men forskjellig "offset"). Det samme gjøres for pikslene i \mathcal{X}_2 og \mathcal{X}_4 . Bestemmelse av linjeparаметre beskrives i neste avsnitt.

2.2.2 Bestemmelse av linjeparаметre

Den enkleste – og kanskje hyppigst benyttede – metoden for bestemmelse av linjeparаметre er å minimalisere summen av kvadratavvik (langs ordinataksen) mellom linjene og samplene i datasettet de er bestemt på bakgrunn av. Problemet med dette kriteriet er at det er uten robusthet overfor dårlige segmenteringer, noe som kan forekomme dersom det er lav kontrast mellom objekt og bakgrunn. En dårlig segmentering vil igjen påvirke avstandsestimatet. Derfor har vi i stedet valgt å basere oss på en minimalisering av *medianen* av kvadratavviket. Metoden er presentert i (15). Ved å benytte medianen til kvadratavviket i stedet for summen, oppnåes en helt annen grad av robusthet (fra et "breakdownpoint" på 0% til et "breakdownpoint" på 50% – hvilket betyr at inntil halvparten av målingene kan være "ville" (såkalte "outliers") før estimatoren bryter sammen).

Kriteriefunksjonen er gitt som

$$J = \operatorname{med}_{[x,y] \in \mathcal{X}_\alpha} (ax - b_\alpha - y)^2 + \operatorname{med}_{[x,y] \in \mathcal{X}_\beta} (ax - b_\beta - y)^2, \quad (2.2)$$

der a er stigningstallet til linja, b_α og b_β er offset til linja basert på samplene i h.h.v. \mathcal{X}_α og \mathcal{X}_β . Prosedyren for minimaliseringen av 2.2 er beskrevet i (12).

2.2.3 Beregning av skjæringspunkt mellom to linjer

Etter at de to linjeparameetre er funnet, gjenstår det kun å bestemme hjørnene i parallelogrammet. Dette kan enkelt gjøres ut fra de fire linjene.

Vi ønsker å finne skjæringspunktet mellom to linjer, og vi antar at disse er representert i polarkoordinater; (θ_1, r_1) og (θ_2, r_2) . Dette skjæringspunktet er gitt som det punktet (x_p, y_p) som oppfyller

$$\begin{aligned}x_p \cos \theta_1 + y_p \sin \theta_1 &= r_1 \quad \text{og} \\x_p \cos \theta_2 + y_p \sin \theta_2 &= r_2.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Løsningen av likning 2.3 gir etter litt regning

$$\begin{aligned}y_p &= \frac{r_2 \cos \theta_1 - r_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \sin \theta_2 - \cos \theta_2 \sin \theta_1} \\x_p &= \frac{r_1 - y_p \sin \theta_1}{\cos \theta_1}\end{aligned}\tag{2.4}$$

dersom $\theta_1 \neq \pi/2 + k\pi$ og

$$\begin{aligned}y_p &= r_1 \\x_p &= \frac{r_2 - r_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_2}\end{aligned}\tag{2.5}$$

ellers.

2.3 Avstandsberegning

Avstandsberegningen baserer seg på

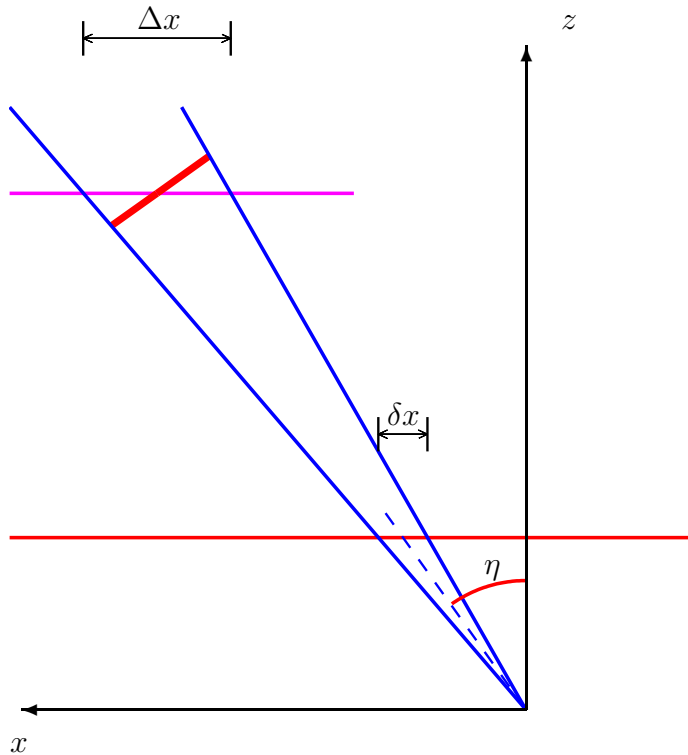
1. Beregning av størrelsen på detektet parallellogram projisert ut i et plan som er parallelt med bildeplanet én meter fra kameraet (brennpunktet) (δx for segmentbredden i figur 2.2), og
2. Størrelsen på objektet projisert ned i et plan parallelt med bildeplanet og i samme avstand som objektet (Δx for objektbredden i figur 2.2).

Avstandsestimatet kan nå avledes av forholdet mellom disse to størrelsene. Det kan baseres på forholdet mellom bredde, høyde eller arealet. Vi har valgt det siste fordi dette kombinerer både bredde- og høydeforholdet i en slags "geometrisk midling".

La θ og φ betegne h.h.v. horisontal og vertikal åpningsvinkel. Vi forutsetter også at kameraaksen går gjennom senterpunktet til bildet, og at "pin-hole"-kameramodellen³ kan benyttes. Ei linje fra brennpunktet gjennom punktet P vil skjære et plan parallelt med bildeplanet og én meter fra kameraet i punktet $U = (x_u, y_u, 1)$;

$$\begin{aligned}x_u &= \frac{O_x - x_p}{2O_x - 1} \tan \theta/2 \\y_u &= \frac{O_y - y_p}{2O_y - 1} \tan \varphi/2,\end{aligned}\tag{2.6}$$

³Dette er en vanlig benyttet teknikk basert på sentralprojeksjonen. Den er beskrevet mange steder i litteraturen, ofte i forbindelse med kamerakalibrering. Se f.eks. (11) for en beskrivelse.



Figur 2.2 Illustrasjon av avbildningen av et "flateobjekt" (altså av et objekt uten "dybde"). Scenen/objektet er sett rett ovenfra, og objektet befinner seg i en vinkel η ut fra kameraaksen og står normalt på linja mellom objekt og kamera. Objektbredden i et plan parallelt med bildeplanet og i samme avstand som objektet er Δx , og bredden i et plan parallelt med bildeplanet og i en avstand på én meter fra kameraet er δx .

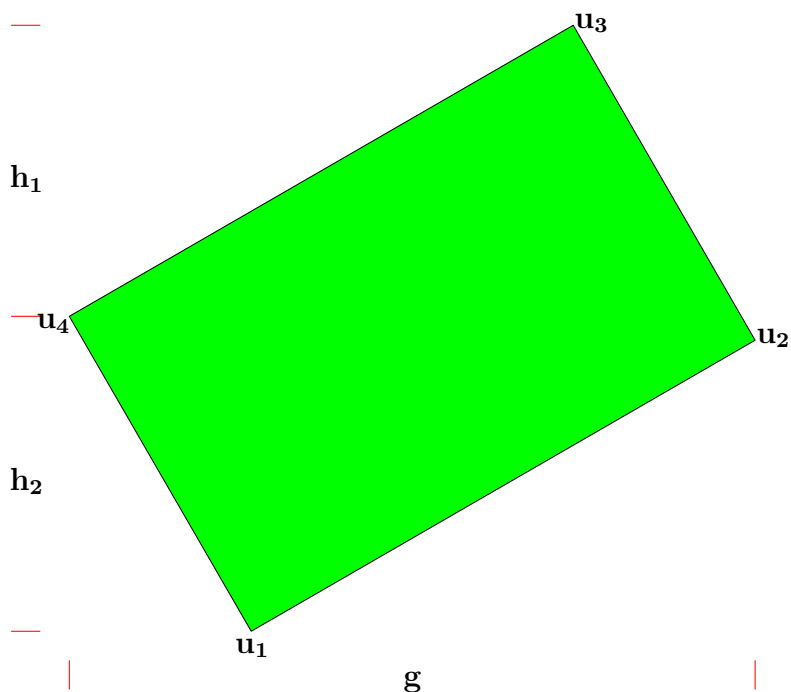
der (O_x, O_y) er koordinatene til senterpunktet i bildet ((1,1) er øvre venstre hjørne). Med referanse til figur 2.3, vil arealet til parallelogramapproximasjonen til segmentet i en avstand på én meter fra kamera være

$$a = \frac{1}{2}g(h_1 + h_2), \quad (2.7)$$

der $g = \|U_2 - U_4\|$, $h_1 = |\mathbf{n}^t (U_1 - U_2)|$, $h_2 = |\mathbf{n}^t (U_3 - U_2)|$, \mathbf{n} er normalvektoren (med lengde 1) til $U_2 - U_4$, d.v.s. $\mathbf{n}^t = [(U_2(2) - U_4(2)), (U_2(1) - U_4(1)), 0] / g$.

Før noe avstandsestimater kan bestemmes, må vi finne hvor stort areal et parallelogram vil få i et plan parallelt med bildeplanet. Med referanse til figur 2.2 ser vi at siden til objektet og linjene derfra til brennpunktet utgjør en likebeinet trekant. Følgelig vil Δx , bredden i et plan parallelt med bildeplanet, være avstandsavhengig. Tilsvarende gjelder for objekthøyden. Imidlertid er det vist i (12) at feilen blir neglisjerbar om vi forenkler problemet og betrakter linjene fra objektsidene til brennpunktet som parallelle og stående normalt på objektet⁴. Gitt denne tilnærmingen er det lett å se at forholdet mellom "projisert bredde" og objektbredde er $1/\cos\eta$. Tilsvarende høydeforhold vil være $1/\cos\gamma$, der γ er vinkelen mellom

⁴Det er vist i (12) et "worst case"-eksempel der denne tilnærmingen gir en feil på 0.04%.



Figur 2.3 Illustrasjon av arealbestemmelse på bakgrunn av de 4 hjørnene i parallelogrammet.

kameraaksen og objektet i vertikal retning. Følgelig vil arealet i planet være

$$A = \frac{A_0}{\cos \eta \cos \gamma}, \quad (2.8)$$

der A_0 er arealet til objektet (parallelogrammet). Kvadratroten til forholdet mellom A og a vil nå være forholdet til avstanden mellom kamera og objekt (parallelogram) og avstanden mellom kamera og segmentets avbildning i et plan parallelt med bildeplanet én meter fra kamera. Følgelig blir estimatet på avstanden mellom objekt og kamera gitt ved

$$\hat{d} = \sqrt{\frac{A}{a}} \|(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)\| \quad (2.9)$$

2.4 Mulige estimeringsfeilkilder

Det er to hovedkilder som kan medføre at avstandsestimatet blir galt;

1. Dårlig parallelogramapproximasjon,
2. Objektet (altså flaten) står ikke normalt på linja mellom objektet og kameraet.

Vi vil i det etterfølgende kommentere disse to punktene nærmere.

2.4.1 Feilkilde 1

En dårlig parallellogramapproksimasjon kan enten skyldes at metoden for denne approksimasjonen er dårlig i seg selv, eller så kan det ha sitt opphav i en dårlig segmentering slik at den etterfølgende parallellogramapproksimasjonen nødvendigvis må bli dårlig. Spørsmålet er nå hvordan denne feilkilden påvirker estimatet. La oss anta at segmentbredden blir gal slik at $\delta x' = \alpha \cdot x$, der α er en konstant. Kombinerer vi dette med likning 2.9 får vi at

$$\hat{d}' = \frac{\hat{d}}{\sqrt{\alpha}}. \quad (2.10)$$

En feil i estimatet til objektbredden på 10% ($\alpha = 1.1$), hvilket er relativt mye, medfører en feil i avstandsestimatet på 4.7%. Skulle det være en like stor feil i estimatet til både objektbredden og -høyden, hvilket er temmelig usannsynlig, blir feilen i avstandsestimatet på 9.1%. Vi ser altså at ved å basere avstandsestimatet på objektarealet, får vi et rimelig robust estimat.

Men så kan man spørre seg om hva slags feilkorrigerende tiltak som kan tenkes for å forhindre dårlige estimater. Når det gjelder selve segmenteringen, så kan denne kvalitetssikres ved å sørge for en "man-in-the-loop"-kontroll av hvert segmenteringsresultat. En god parallellogramapproksimasjon kan sikres ved å benytte en robust metode for linjeapproksimasjon slik som f.eks. vi allerede gjør. Begge deler anbefales. I (12) er denne linjeapproksimasjonsmetoden sammenliknet med to andre metoder som er prosesseringsmessig svært effektive, men som til gjengjeld er lite robuste. Betydningen av en robust linjeapproksimasjonsmetode var i (12) tydelig.

2.4.2 Feilkilde 2

Dersom objektet (flaten) ikke står normalt på linja mellom objektet og kameraet, så vil objektet bli mindre enn det faktisk er. Konsekvensen blir at avstandsestimatet blir for stort. Situasjonen er illustrert i figur 2.4.

Med referanse til figur 2.4, ser vi at antatt objektbredde er

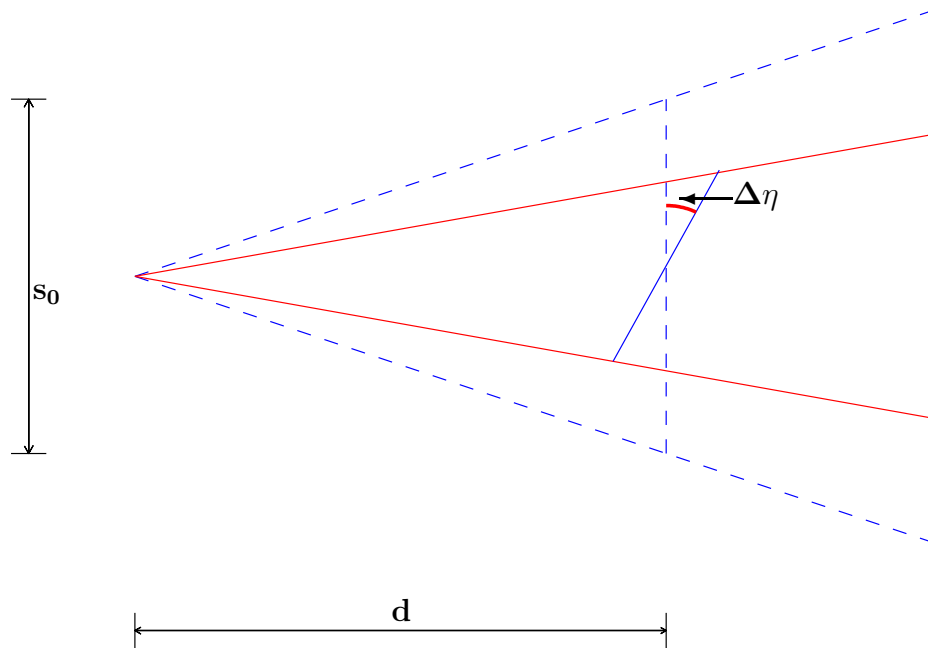
$$s(\Delta\eta) = \frac{s_0}{2} \cos(\Delta\eta) \left(\frac{2d}{2d + s_0 \sin(\Delta\eta)} + \frac{2d}{2d - s_0 \sin(\Delta\eta)} \right) \quad (2.11)$$

Det avstandsavhengige leddet er neglisjerbart⁵, og uttrykkes forenkles da til

$$s(\Delta\eta) = s_0 \cos(\Delta\eta) \quad (2.12)$$

Er feilen 10° , så blir segmentbredden redusert med 1.5%, og avstandsestimatet blir 1% for stort. Dersom feilen er 10° i begge retninger (d.v.s. at både segmentbredden og -høyden reduseres med 1.5%), så vil avstandsestimatet bli 1.5% for stort. I begge tilfellene er altså feilen liten, og dersom objektet forsynes med gode sikteanordninger, er det all mulig grunn til å tro at feilen vil bli vesentlig mindre enn 10° . Følgelig vil ikke feilkilde 2 volde noe særlig bekymring.

⁵For $d = 10$, $s_0 = 1$ og $\Delta\eta = 10^\circ$ blir feilen på 0.06%



Figur 2.4 Illustrasjon av feilkilden der objektet ikke står normalt på linja mellom objekt og kamera. I denne situasjonen vil avbildet objektbredde bli mindre enn antatt.

3 TRIANGULERING OG SAMPLING AV EN TRIANGULERT FLATE

Vi vil nå beskrive hvordan man kan danne en stykkevis plan flate bestående av triangler fra målte koordinater i terrenget og hvordan denne flaten samples.

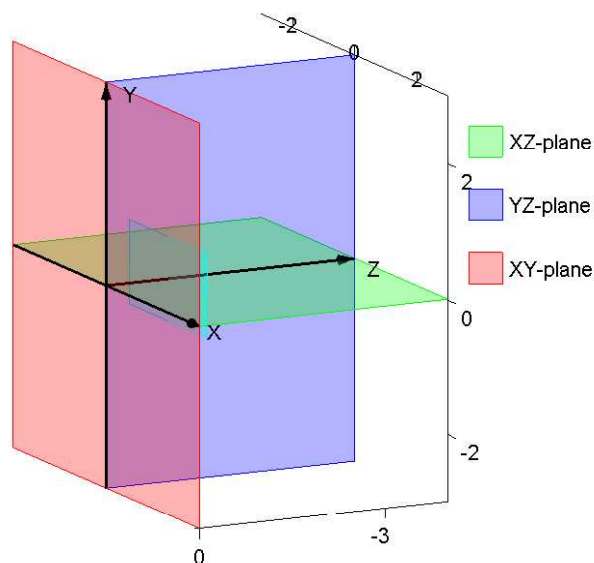
Vi vil anta at vi har målt avstanden fra kameraet til en rekke punkter i rommet. Dette vil gi oss koordinater i tre dimensjoner i kamerakoordinater. I det følgende er det også antatt at kameraet sitter i origo og alltid ser langs negativ Z -akse slik at positiv X -akse er til høyre og positiv Y -akse er oppover som indikert i figur 3.1.

Det finnes en rekke forskjellige teknikker som kan brukes for flateinterpolasjon, det vil si å estimere høyden i et punkt gitt nærliggende målte høyder. Noen av de mest vanlige metodene er interpolasjon mellom de naturlige naboene (18), kvadratiske flater, polynomisk interpolasjon, “spline” interpolasjon og Delauney triangulering.

Se (3, 5, 6, 9, 13, 10, 1, 2, 8, 19) for en beskrivelse av de fleste metodene som anvendes for flateinterpolasjon.

Triangulering er nyttig for terrengmodellering, men generelt også for anvendelser som har følgende karakteristika:

1. Det finnes områder med henholdsvis høy og lav måletetthet. For eksempel, i terrengmodellering vil det typisk være lav måletetthet i områder med vann, mens det vil være høy måletetthet i områder med spesiell interesse (topografi).
2. Det finnes diskontinuiteter i flaten som medfører målinger som ligger veldig nær hverandre, men med veldig avvikende (høyde)verdi. Dette kan være naturlige



Figur 3.1 Koordinatsystemet anvendt i dette notatet vist med kameraet i origo $(0, 0, 0)$ pekende langs negativ Z -akse. Dette gjør at positiv X -akse blir til høyre sett fra kameraet.

strukturer som klipper eller menneskelagde ting som en mur. De fleste glattingsalgoritmer håndterer slike tilfeller dårlig.

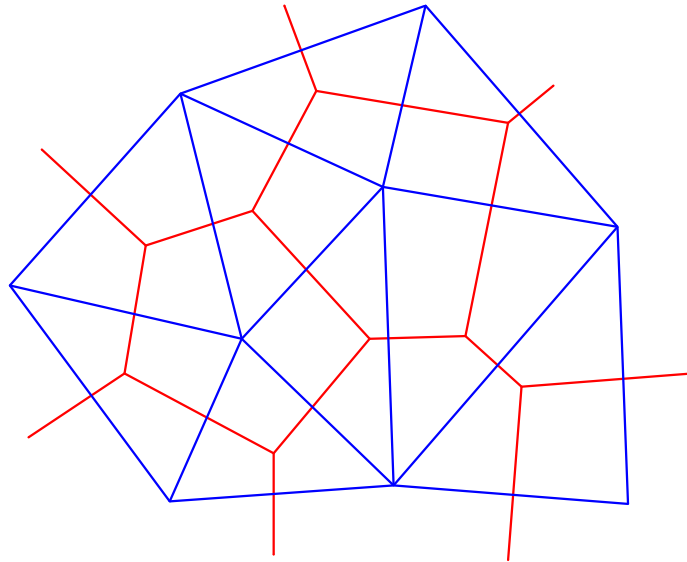
3. Målingene ligger langs konturer. Disse kan komme fra eksisterende konturkart eller fra oppmålinger langs en vei/sti. Dette er et annet eksempel på varierende måletetthet. Langs målekurvene er det en høy måletetthet mens normalt på målekurvene finnes ingen målinger før neste målekurve.
4. Et stort antall målinger må håndteres. Tiden som kreves for å håndtere et stort antall målinger må være moderat. Typiske tall for målinger er 100 til 100000 (i vår anvendelse vil vi for de fleste tilfellene ligge godt under 100 målinger).
5. Når nye målinger legges til et eksisterende målesett er det viktig at en ny løsning kan finnes uten at hele målesettet må gjennomgås på nytt.
6. Algoritmen bør være slik at den kan kjøres på en standard PC.

Triangulering har vært anvendt for terrengmodellering med stor suksess (3, 6, 13, 16) og kan brukes som et første steg for grid- og kontur-generering samt 3D rendering.

3.1 Triangulering

Triangulering innebærer å generere på basis av målepunktene et sett med ikke-overlappende triangler hvor hjørnene på trianglene er målepunktene. Det finnes en rekke trianguleringsalgoritmer og de fleste benytter Delaunay triangulering.

Delaunay triangulering er nært knyttet til Dirichlet tesselering, også kjent som Voronoi eller Theissen tesselering (7). Tesselering er å dele planet i et sett med polygoner. Hvert slikt



Figur 3.2 Delauney triangler (blå linjer) og tilsvarende Dirichlet tesselering (røde linjer) for ni genereringspunkter. Triangelkanter står normalt på polygonkanter. Punkter innenfor polygonet er nærmere genereringspunktet enn noen andre genereringspunkt.

polygon har et målepunkt i dets indre og dette punktet kalles genereringspunktet. Alle andre punkt innenfor polygonet er nærmere genereringspunktet enn noen andre genereringspunkt. Genereringspunktet er således unikt for hvert polygon.

Delaunay triangulering dannes ved å forbinde alle genereringspunkter som deler en felles polygonkant. Dette innebærer at triangelkantene står normalt på polygonkantene, se figur 3.2.

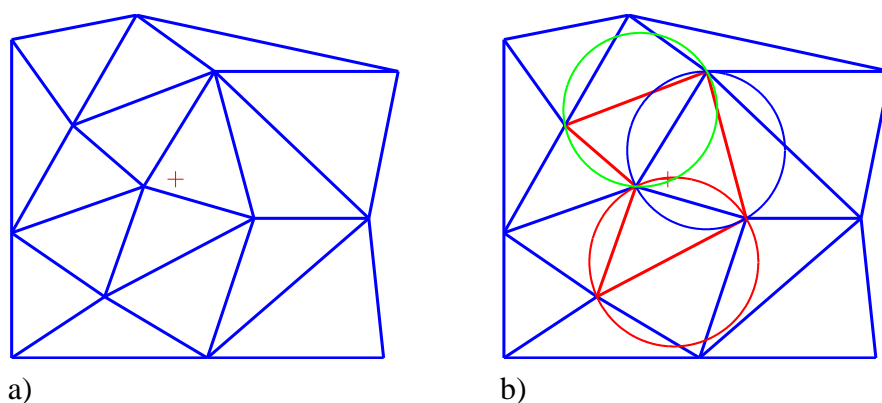
Dette gir mange ønskede egenskaper. Det kan vises at en konveks likekant dannet av to hosliggende triangler har en større minimum intern vinkel enn hvis likekanten var dannet på en annen måte. Dette innebærer at triangelene er så likekantete som mulig og tynne triangler med små vinkler unngås.

Trianguleringen er unik i den forstand at den blir lik uansett hvilken orden målepunktene har.

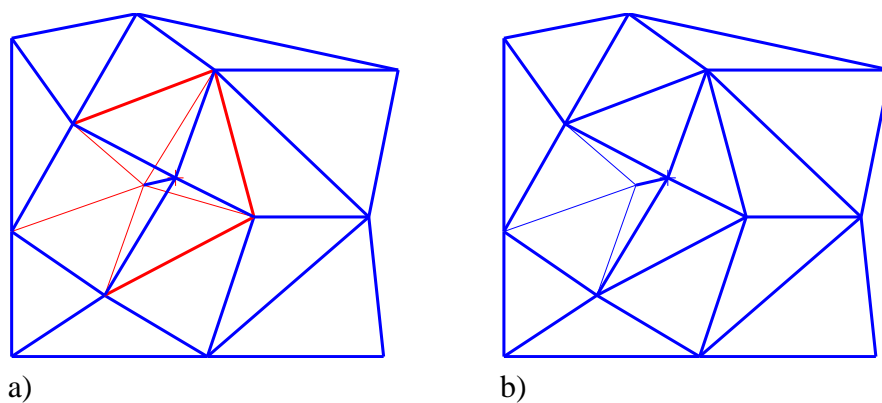
Flatene (triangelene) som dannes under trianguleringen kan brukes direkte som biter i overflaten eller de kan nyttes til å lage “samples” på en rektangulær grid. Gitt en liste med triangler trenger man kun å projisere inn i den stykkevis (triangel-)oppdelte overflaten. Skjæringspunktet med triangelflaten for linjen gjennom brennpunktet og et koordinat i bildeplanet bestemmer verdien for hvert enkelt punkt i rutenettet.

3.2 Den implementerte trianguleringsalgoritmen

På et hvilket som helst stadium i trianguleringsprosessen har man en eksisterende triangulær “mesh” og man ønsker å legge til et nytt målepunkt, vist i figur 3.3. Man danner først et såkalt supertriangel, et kunstig triangel som omslutter alle punktene. Supertriangelet



Figur 3.3 a) Nytt målepunkt (+) legges til eksisterende triangulære mesh. b) Trianglene hvis omskrevne sirkel inneholder det nye målepunktet danner et omskrevet polygon. I dette eksempelet har det nye målepunktet 3 triangler hvis omskrevne sirkel omslutter punktet. Disse omskrevne sirkelene er angitt i fargene rødt, grønt og blått. Det omskrevne polygonet er trukket i rødt.



Figur 3.4 a) Nye triangler dannes fra det nye målepunktet til de utvendige kantene til det omsluttende polygonet. b) Det nye målepunktet har medført at noen triangler er blitt slettet og nye er blitt dannet.

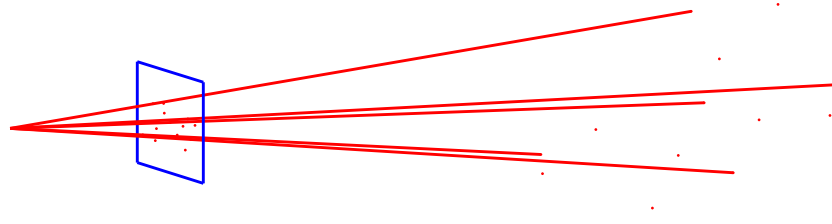
skal i teorien ha hjørnene på uendelig avstand, men i praksis holder det med at hjørnene plasseres slik at man er garantert at alle målepunktene er omsluttet. Ved slutten av hvert steg sletter man alle triangler som har felles kant med supertriangelet. Alle triangler hvis omskrevne sirkel⁶ omslutter målepunktet finnes. De ytre kantene av disse trianglene danner et omsluttende polygon (se figur 3.3).

Trianglene i det omsluttende polygonet slettes og nye triangler dannes mellom det nye målepunktet og hver utsidig kant av det omsluttende polygonet, vist i figur 3.4.

Etter at det enkelte målepunkt er lagt til vil to nye triangler bli lagt til. Dette innebærer at det totale antall triangler er to ganger antall målepunkter⁷.

⁶Den omskrevne sirkel til et triangel er den sirkelen som har alle tre hjørnene til triangelet på sirkelen. Se appendix A.

⁷Dette inkluderer supertriangelet. Når trianglene som deler kanter med supertriangelet slettes ved slutten vil det eksakte antallet triangler være mindre enn to ganger antallet målepunkter, det nøyaktige antallet avhenger av fordelingen til målepunktene.



Figur 3.5 Perspektivprojeksjon. Punktene i rommet projiseres inn på et plan parallelt med bildeplanet (XY -planet). Perspektivprojeksjon er “sann” projeksjon lik den projeksjonen som man har i et kamerasystem. Figur 3.6 viser tilsvarende punkter projisert ortografisk inn på et plan parallelt med XY -planet og et plan parallelt med XZ -planet.

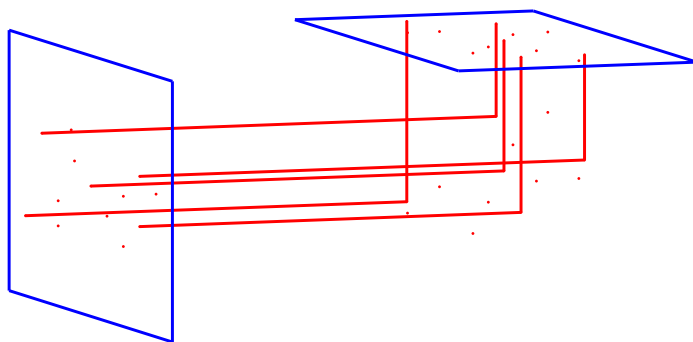
Koden kan forfines på en rekke måter for å gjøre den mer effektiv. Den mest signifikante forbedringen fremkommer ved å sortere målepunktene langs en koordinat. Den valgte koordinaten bør være den som har størst spredning av målepunktene.

Hvis X -aksen benyttes i sorteringen kan man for et gitt triangel sjekke om avstanden til målepunktet er større enn radius i triangelets omskrevne sirkel. Hvis avstanden er større trenger man ikke å vurdere dette triangelet i den videre prosesseringen av målepunktet.

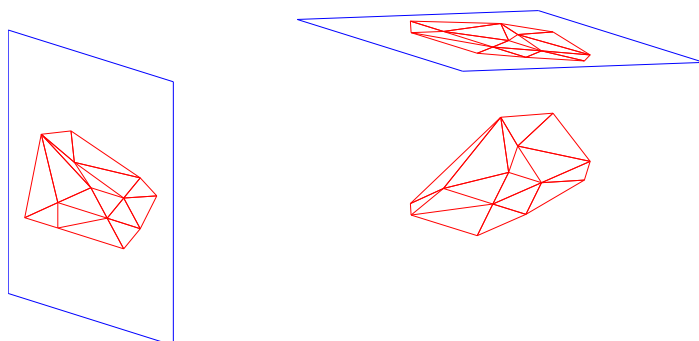
3.3 Triangulering i tre dimensjoner

Å triangulere i tre dimensjoner er mye vanskeligere enn å triangulere i to dimensjoner. I vårt tilfelle, hvor vi ønsker å triangulere målepunkter i terrenget, vil det være tilfredsstillende å triangulere i et plan. Siden vi har 3-dimensjonale koordinater må vi definere et plan og projisere målepunktene (koordinatene) inn på planet og triangulere i dette planet. Det perseptuelt enkleste vil være å projisere koordinatene inn på bildeplanet, enten ved en perspektivprojeksjon (se figur 3.5) eller ved en ortografisk projeksjon (se figur 3.7), men siden terrenget som skal trianguleres som en god tilnærming ligger i horisontalplanet kan trianguleringen gi et bedre resultat ved å projisere inn på et plan parallelt med horisontalplanet. Dette kommer av at det er større sjanse for å lage triangler med noder som ligger nært hverandre i 3D når man projiserer inn på et slikt plan. Dette forutsetter at kameraets pitch vinkel (elevasjon) er liten. Disse problemstillingene er illustrert i figur 3.6 og figur 3.7. Som utgangspunkt har vi brukt syntetiske målinger av et terreng vist i figur 3.5 og figur 3.6. Målepunktene blir projisert inn i to plan, ett parallelt med XY -planet og ett plan parallelt med XZ -planet. De projiserte punktene blir triangulert i de to planene og resultatet er vist i figur 3.7. Siden målingene ligger tildels langs et plan som står 45° på både XY -planet og XZ -planet blir trianguleringene i dette tilfellet identiske i den forstand at samme punkter knyttes sammen til triangler. Resultatet av trianguleringen er ført tilbake i rommet (figur 3.7).

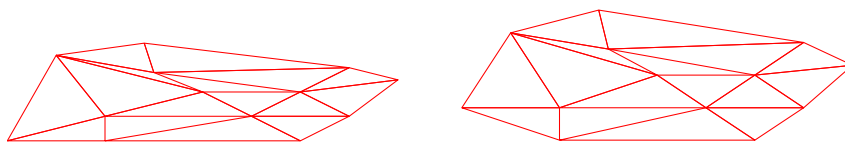
De to projeksjonene er vist i figur 3.8.



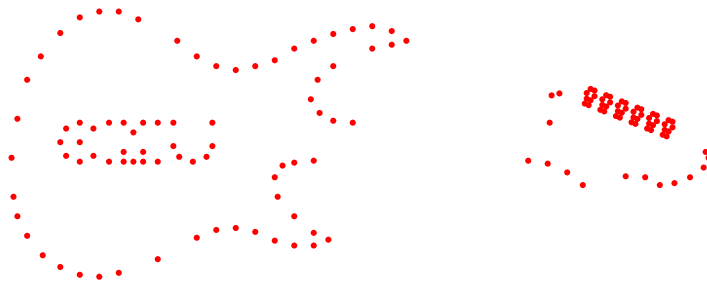
Figur 3.6 Punkter i tre dimensjoner projisert inn på to plan, det ene parallelt med XY -planet, det andre parallelt med XZ -planet. Noen av projeksjonene er vist med linjer inn i planene. Den ene projeksjonen kan ses som en ortografisk projeksjon av de 3-dimensjonale punktene inn på bildeplanet (XY -planet), mens den andre er en projeksjon inn på et plan parallelt med XZ -planet.



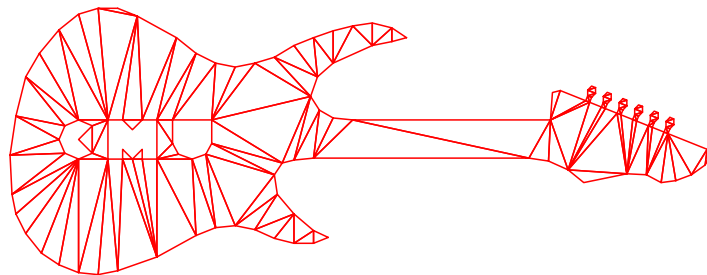
Figur 3.7 3-dimensjonale punkter i rommet (se figur 3.6) projisert inn på to forskjellige plan som står normalt på hverandre og triangulert i de respektive planene. Trianguleringen i de to planene ble identisk som følge av at de 3-dimensjonale punktene ligger tilnærmet langs et plan som står i 45° vinkel i forhold til begge projeksjonsplanene. Innbyrdes avstand mellom punktene i de to projeksjonsplanene blir derfor ganske like. Trianguleringen kan derfor uten konflikt føres tilbake og knytte de 3-dimensjonale punktene sammen. Den ene projeksjonen kan ses som en ortografisk projeksjon av de 3-dimensjonale punktene inn på bildeplanet (XY -planet), mens den andre er en projeksjon inn på et plan parallelt med XZ -planet.



Figur 3.8 Projeksjonen inn på henholdsvis XY -planet til venstre og XZ -planet til høyre. Vi ser at projeksjonene blir forskjellige noe som kan medføre en forskjellig triangulering. I figuren er det vist samme triangulering. Desto mer flaten som er triangulert avviker fra et plan som ligger i 45° vinkel i forhold til projeksjonsplanene desto større blir forskjellene mellom de to trianguleringene. Av figurene over kan det observeres at det ikke er satt noen nedre grense for vinkelåpning mellom innbyrdes punkter i samme triangelflate.



Figur 3.9 Målte punkter langs konturene av en elektrisk gitar.



Figur 3.10 Triangler fjernes fra konkaviteter og hull.

3.4 Trianguleringsprogrammet Triangle

Det finnes flere gratis programmer for triangulering tilgjengelig på internett. Vi valgte et program som kalles Triangle som er skrevet av Jonathan Richard Shewchuk (17). Triangle er begrenset til å virke i to dimensjoner, men dette er uten betydning for oss siden terrenge vi ønsker å triangulere tilnærmet ligger i et plan. 3D-triangulering er nødvendig i tilfeller hvor flaten som skal trianguleres har både en forside og en bakside.

Triangle (17) er et C-program for to-dimensjonal mesh-generering og konstruksjon av Delaunay triangulering, Delaunay triangulering med føringer og Voronoï diagrammer.

Ifølge forfatteren er Triangle hurtig, hukommelseeffektiv og robust. Brukeren kan sette føringer på vinkler og triangelflate, hull og konkaviteter. Derfor er det velegnet til vårt formål.

Et resultat av triangulering av punktene i figur 3.9 med bestemte føringer er vist i figur 3.10. Figur 3.9 viser et komplisert objekt. Det er stor variasjon i måletetthet og det er områder som ikke skal trianguleres.

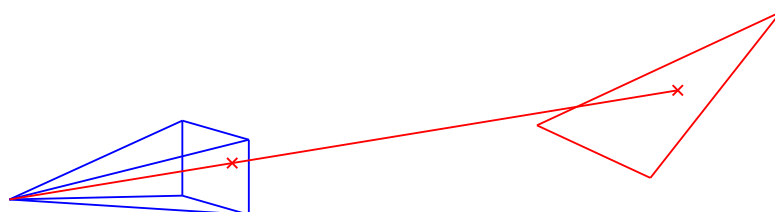
3.5 Sampling av flaten

For å kunne danne et avstandsbilde der intensiteten i hvert piksel angir avstanden mellom kamera og punktet i scenen som pikselet avbilder, må man danne en flate basert på de målte punktene i registreringsprosessen.

Når flaten er definert, dvs. triangulert i kamerakoordinatsystemet, må flaten samples. Et eksempel på en triangulert flate er vist i figur 3.11.



Figur 3.11 Eksempel på et bildeplan i normalisert avstand, $Z = -1$, fra brennpunktet som ligger i $(0, 0, 0)$. Linjene fra brennpunktet til hjørnene av bildeplanet er trukket opp. Figuren viser også et eksempel på en triangulert flate.



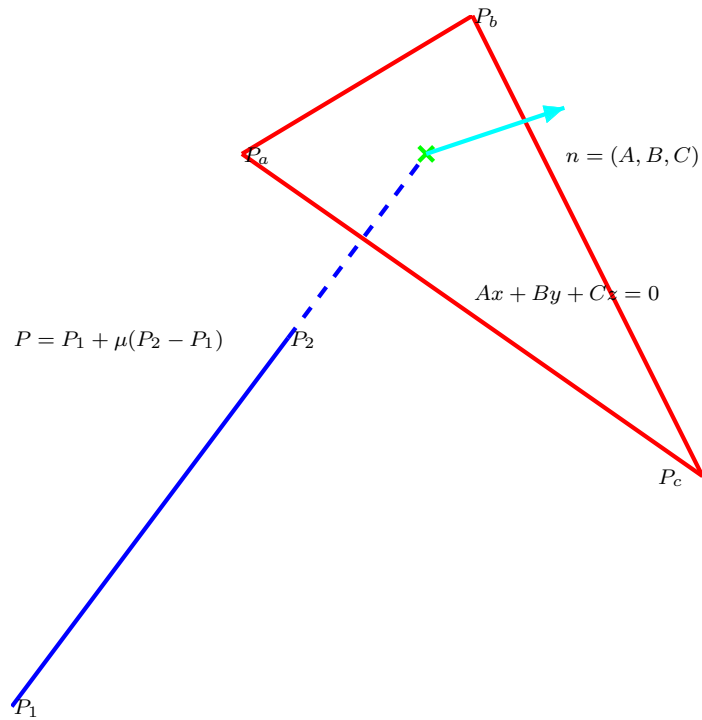
Figur 3.12 Figuren viser bildeplanet i normalisert avstand, $Z = -1$, fra brennpunktet som ligger i $(0, 0, 0)$. Normalisert bredde og høyde på bildeplanet er en funksjon av fysisk størrelse på CCD-brikken og kameraets optikk. Figuren viser også ett av trianglene som den triangulerte flaten består av samt skjæringspunktet mellom en linje gjennom et bestemt pixel i bildeplanet og denne triangelflaten. Dette punktet på triangelflaten blir således projisert inn på bildeplanet og pixelen får verdi lik avstanden til punktet på triangelflaten.

Dette innebærer å løpe gjennom alle bildekoordinater og danne linjer som går gjennom kameraets brennpunkt (origo i kamerakoordinatsystemet) og disse bildekoordinatene. Linjene vil enten skjære den triangulerte flaten i et bestemt punkt eller bomme på flaten hvis denne ikke dekker hele synsfeltet. Å lete gjennom alle koordinater i bildeplanet og sjekke alle triangler for eventuell skjæring er generelt en ganske omstendelig prosess. I vårt tilfelle har vi forholdsvis få triangler i flaten og belastningen vil således være forholdsvis liten.

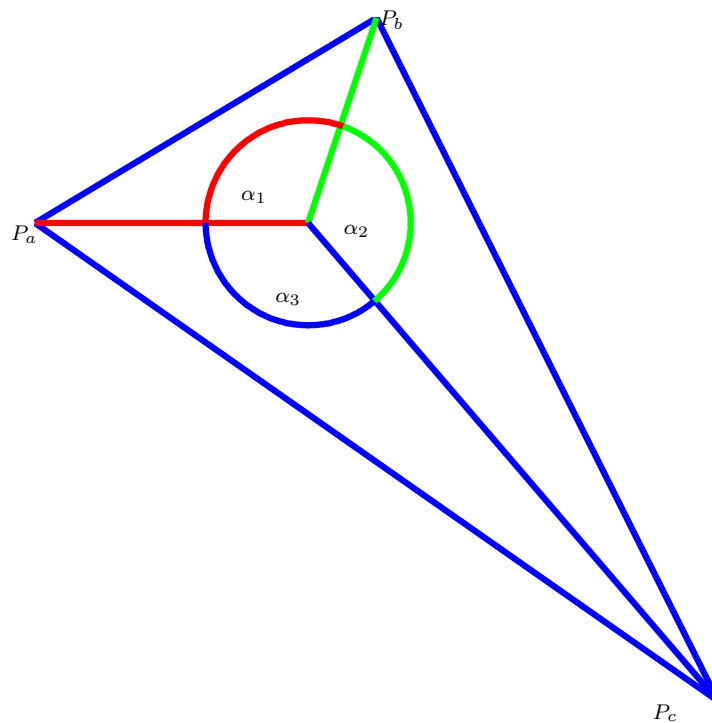
En viktig del i samlingen av den triangulerte flaten er å avgjøre om hvorvidt et linjesegment skjærer gjennom et triangel. En måte å gjøre dette på er å definere linjesegmentet ved origo og punktet i bildeplanet som linjen går gjennom. Triangelet er definert ved de tre hjørnene gitt i 3D.

Framgangsmåte med referanse til figur 3.13:

1. Sjekk at linjen fra kameraet og normalvektoren n til planet utspent av punktene P_a , P_b og P_c ikke står normalt på hverandre.
2. Hvis punkt 1) over er oppfylt, finn linjens skjæringspunkt med planet.
3. Sjekk om skjæringspunktet ligger innenfor triangelet.
4. Sjekk om det finnes andre triangler som samme linje går gjennom og som har mindre avstand.



Figur 3.13 Linjesegmentet er definert ved endepunktene P_1 og P_2 . Likningen for linjesegmentet er gitt ved $P = P_1 + \mu(P_2 - P_1)$. Triangelet er definert ved hjørnene P_a , P_b og P_c . Likningen for denne flaten er gitt ved $Ax + By + Cz = 0$. Normalen til triangelet peker i retning (A, B, C) .



Figur 3.14 Når skjæringspunktet er innenfor flaten begrenset av punktene P_a , P_b og P_c vil summen av vinklene som skjæringspunktet danner med de tre hjørnene ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$) være lik 2π .

Skjæringspunktet finnes ved å substituere likningen for linjen

$$P = P_1 + \mu(P_2 - P_1) \quad (3.1)$$

inn i likningen for planet

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (3.2)$$

Verdiene for A , B og C , som er normalkomponentene til planet, kan finnes ved å ta kryss-produktet av hvilke som helst normaliserte kantvektorer, for eksempel

$$(A, B, C) = (P_b - P_a) \times (P_c - P_a) \quad (3.3)$$

D kan så finnes ved å substituere et hjørne inn i likningen for planet, for eksempel,

$$AP_ax + BP_ay + CP_az = -D \quad (3.4)$$

Dette gir et uttrykk for μ som kan gi oss skjæringspunktet P :

$$\mu = (D + AP_1x + BP_1y + CP_1z) / (A(P_1x - P_2x) + B(P_1y - P_2y) + C(P_1z - P_2z)) \quad (3.5)$$

Hvis nevneren over er 0 er linjen parallell med planet slik at det ikke finnes noe skjæringspunkt. For at skjæringspunktet skal ligge på linjesegmentet må μ ligge mellom 0 og 1.

Til slutt må vi sjekke hvorvidt skjæringspunktet ligger innenfor triangelet avgrenset av P_a , P_b og P_c .

Metoden vi vil anvende er basert på det faktum at summen av de interne vinklene til et punkt inni triangelet er 2π , se figur 3.14. Punkter på utsiden vil ha en lavere vinkelsum.

Vi danner enhetsvektorene P_{a1} , P_{a2} og P_{a3} på følgende måte (P er det punktet som skal testes):

$$P_{a1} = (P_a - P) / |(P_a - P)| \quad (3.6)$$

$$P_{a2} = (P_b - P) / |(P_b - P)| \quad (3.7)$$

$$P_{a3} = (P_c - P) / |(P_c - P)| \quad (3.8)$$

Vinklene er

$$\alpha_1 = \arccos(P_{a1} \cdot P_{a2}) \quad (3.9)$$

$$\alpha_2 = \arccos(P_{a2} \cdot P_{a3}) \quad (3.10)$$

$$\alpha_3 = \arccos(P_{a3} \cdot P_{a1}) \quad (3.11)$$

3.6 Ekstrapolering, håndtering av himmel og vertikale strukturer

Flaten som genereres gjennom samplingen av flaten beskrevet over vil kun være definert innenfor flatens ytre kanter. Utenfor dette området kan det være ønskelig å definere avstander basert på verdiene som er dannet gjennom samplingen av flaten. Vi har valgt å gjøre dette i to steg; først en horisontal lineær ekstrapolasjon langs hver rad i bildet der det er avstandsestimater for et visst antall pixler, og deretter en vertikal ekstrapolasjon for de pixelene som ikke har fått tilordnet noen avstandsverdi. Denne vertikale ekstrapolasjon gjøres for hver kolonne, og den er basert på antagelsen om plant terreng i ekstrapolasjonsområdet.

Det antas at det defineres et bilde med informasjon om himmelen i scenen. Denne informasjonen blir anvendt på den måten at pixler innenfor området definert som himmel blir tilegnet avstanden -1 .

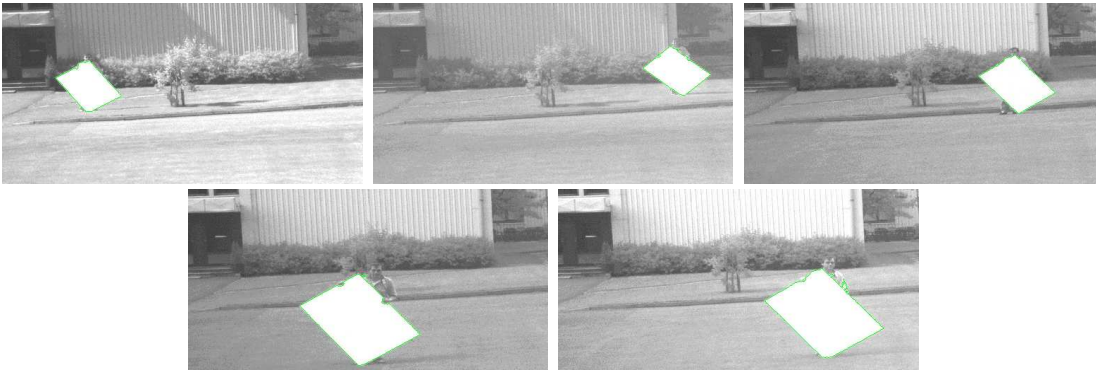
Vertikale strukturer kan opptre både innenfor flaten fremkommet ved trianguleringen og på utsiden/kanten av denne flaten. Vertikale strukturer håndteres ved å tilegne alle pixler i en gitt kolonne innenfor en vertikal struktur samme verdi (avstand) som den avstanden som er definert for den nederste pikselen i kolonnen. Håndteringen av vertikale strukturer gjøres ut fra et manuelt generert maskebilde.

4 EKSPERIMENTER

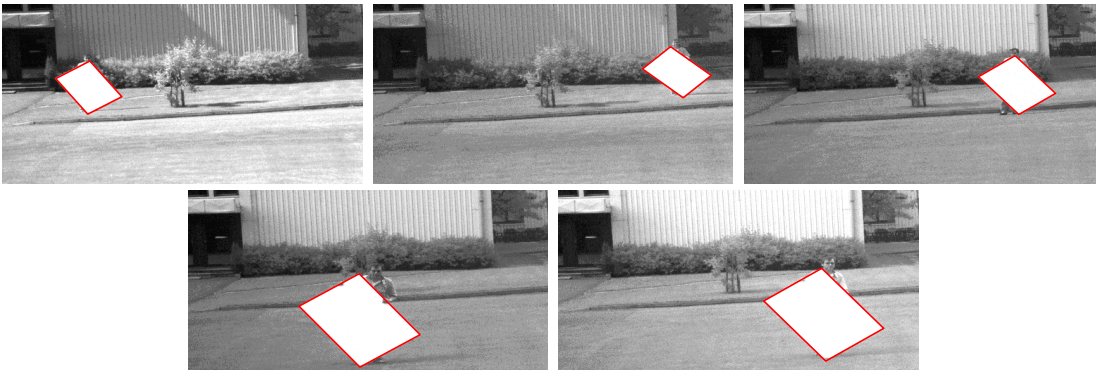
For å vurdere den anvendte metoden for generering av avstandsbilde har vi tatt utgangspunkt i to scener og to metoder. De to metodene er hhv. med og uten foten av kamerastolpen som koordinat i trianguleringen og disse blir referert til som hhv. Terrengmodell 1 og Terrengmodell 2.

4.1 Eksperiment 1

Det første eksperimentet benytter data fra en relativt flat utendørscene. Et objekt bestående av en plakat med form av et rektangel og en størrelse på 1×1.4 meter er plassert i 5 forskjellige posisjoner. Avstand mellom videokamera og plakat ble målt med laser avstandsmåler til å ligge mellom 27 meter og 47 meter. Software i kameraovervåkingssystemet OPAK ble benyttet til å grabbe bilder. Bilder med plakaten i de ulike posisjonene samt detektert plakatrand overlappet er vist i figur 4.1.



Figur 4.1 Figuren viser bildene som er benyttet i eksperimentet. Segmenttrendene er overlagret. Plakaten har en rektangulær form og har en størrelse på 1×1.4 meter, kameraets åpningsvinkel er 11° , og avstanden til plakaten varierer mellom 27 meter og 47 meter.



Figur 4.2 Utsnitt av plakater med overlagret parallellogramapproximasjon.

Parallellogramtilpasningen er vist i figur 4.2.

Avstanden mellom kamera og plakat ble estimert ut fra prosedyren beskrevet i kapittel 2. Resultatet er vist i tabell 4.1.

På bakgrunn av disse målingene er selve terrengmodellen (les: avstandsbildet) generert i henhold til prosedyren beskrevet i kapittel 3. Vi har benyttet to metoder for å beregne avstandsbildet: i den første har vi benyttet foten av kamerastolpen som node i trianguleringen (terrengmodell 1), i den andre har vi unnlatt å bruke denne som node (terrengmodell 2). Årsaken til at vi innførte foten av kamerastolpen som node i trianguleringen var for å ta hensyn til at når vi får snø oppå terrenget vil terrenget (les snø) som tidligere ikke var synlig i scenen komme inn nederst i synsfeltet. Vi har derfor valgt å dele evalueringen i to.

Eksperiment 1		
Plakat	Avstand [meter]	
	Målt	Estimert
1	46	45.7
2	47	46.7
3	41	40.8
4	26	25.6
5	27	26.0

Tabell 4.1 Resultater - avstandsestimering i eksperiment 1. (De målte avstandene for denne tabellen er utført med lasermåler som ikke gir bedre oppløsning enn til nærmeste meter.)

Eksperiment 1			
Val. pkt.	Avstand [meter, (%)]		
	Målt	Terrengmodell 1	Terrengmodell 2
1	42.9	42.1 (1.9)	42.1 (1.8)
2	57.6	55.8 (3.1)	57.0 (1.1)
3	44.6	45.9 (3.0)	45.9 (3.0)
4	57.9	58.7 (1.4)	58.6 (1.2)
5	92.3	91.6 (0.8)	85.4 (7.5)

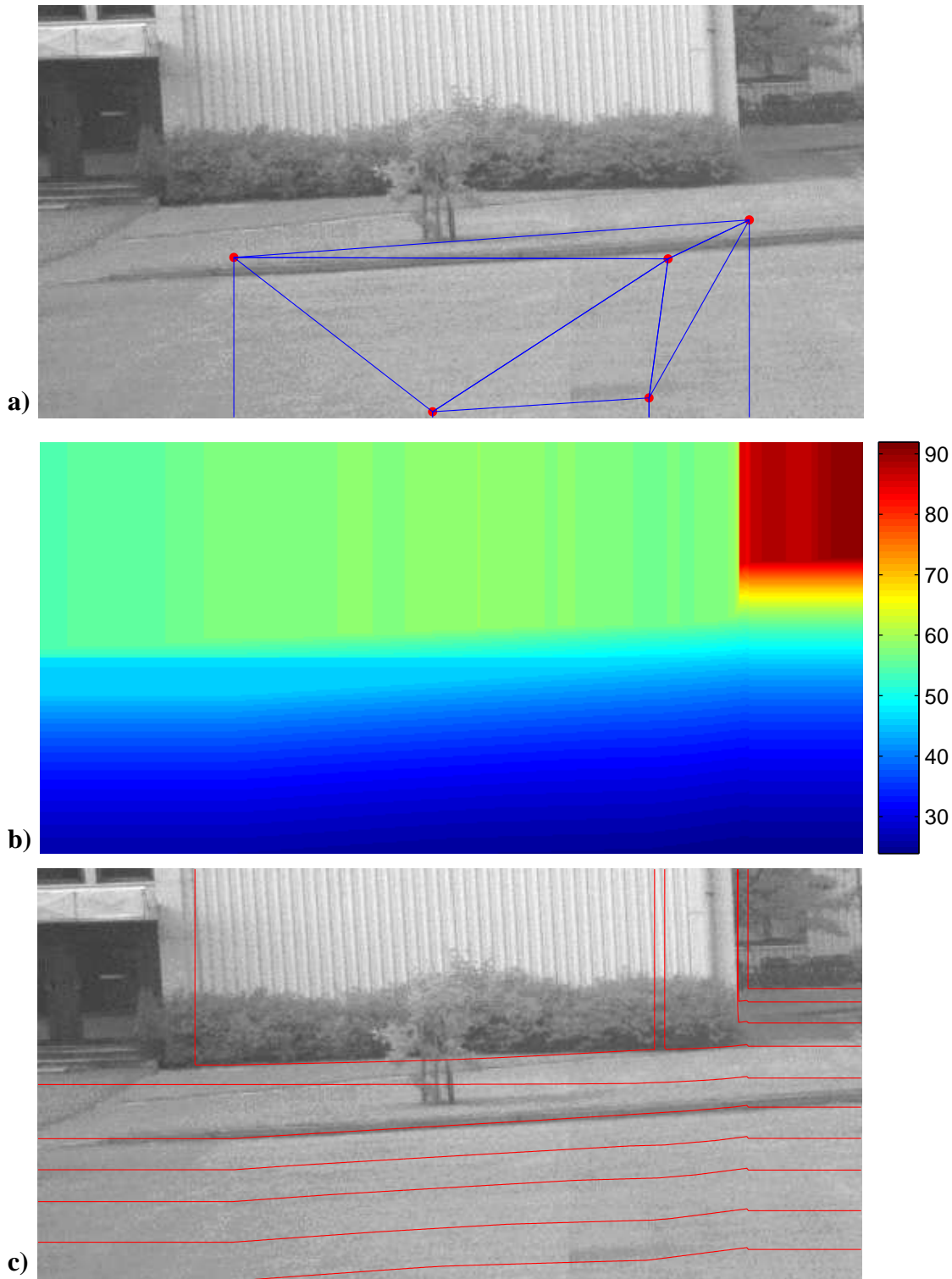
Tabell 4.2 Sammenlikning av målt avstand og avstand angitt av terrengmodell for de valideringspunktene som er vist i figur 4.5. Relativt avvik (i %) er angitt i parentes. **Terrengmodell 1:** Foten til kamerastolpen inngår i trianguleringen. **Terrengmodell 2:** Foten til kamerastolpen inngår ikke i trianguleringen. Avstandsmålingene er her utført med større nøyaktighet enn tilfellet var i tabell 4.1.

4.1.1 Validering/evaluering av terrengmodellen (eksperiment 1)

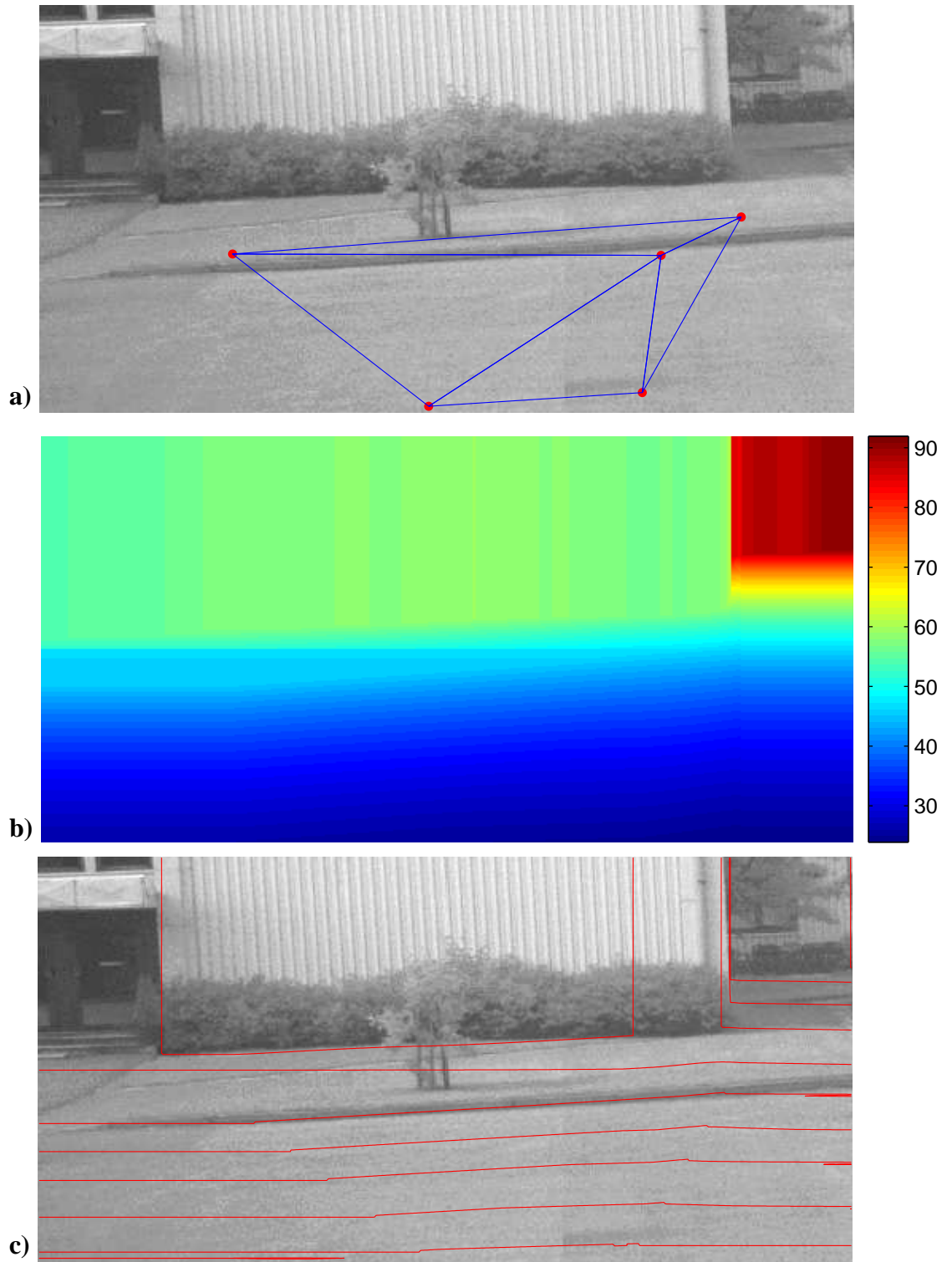
Så langt har vi kun demonstrert generering av en terrengmodell. Spørsmålet som fremdeles er ubesvart er: Hvor god er denne modellen? En validering av terrengmodellen kan gjøres på flere måter. Den absolutt enkleste og mest direkte måten å foreta valideringen på er å plukke ut et sett med punkter i terrenget, finne avstanden til disse i h.h.t. terrengmodellen og sammenlikne disse "modellavstandene" med oppmålte avstander. De målte avstandene er funnet v.h.a. en laser avstandsmåler. I figur 4.5 er et bilde av scenen med valideringspunktene avmerket.

Avstandsbildet som fremkommer med foten av kamerastolpen som node (terrengmodell 1) er presentert i figur 4.3. Avstandsbildet som fremkommer dersom foten av kamerastolpen ikke inngår som node (terrengmodell 2) er presentert i figur 4.4.

I tabell 4.2 er oppmålt avstand til valideringspunktene listet sammen med avstandene som begge terrengmodellene angir.



Figur 4.3 Resultat av triangulering og terrengmodellgenerering: foten av kamerastolpen er her benyttet som node i trianguleringen (Terrengmodell 1). Konfigurasjonen for kameraet er angitt i tabell 4.3. **a)** Punkter benyttet i genereringen av terrengmodellen i eksperiment 1 samt den resulterende trianguleringen. **b)** Resulterende avstandsbilde basert på målingene av objektet i posisjonene vist i figur 4.1. **c)** Avstandskonturer for eksperiment 1.



Figur 4.4 Resultat av triangulering og terrengmodellgenerering: foten av kamerastolpen er her ikke benyttet som node i trianguleringen. Konfigurasjonen for kameraet er angitt i tabell 4.3. **a)** Punkter benyttet i genereringen av terrengmodellen i eksperiment 1 samt den resulterende trianguleringen. **b)** Resulterende avstandsbilde basert på målingene av objektet i posisjonene vist i figur 4.1. **c)** Avstandskonturer for eksperiment 1.

Egenskap	Verdi
FocalLength	0.05
HViewAngle	11.00
VViewAngle	7.344
Angle	0
SnowDepth	0.0
CamHeight	3.0
NRows	256
NCols	512
ImagePlaneTriangulate	Yes

Tabell 4.3 Konfigurasjonsfil for kameraet benyttet i eksperiment 1.



Figur 4.5 Valideringspunkter som er benyttet i evalueringen av terrengmodellen i eksperiment 1.

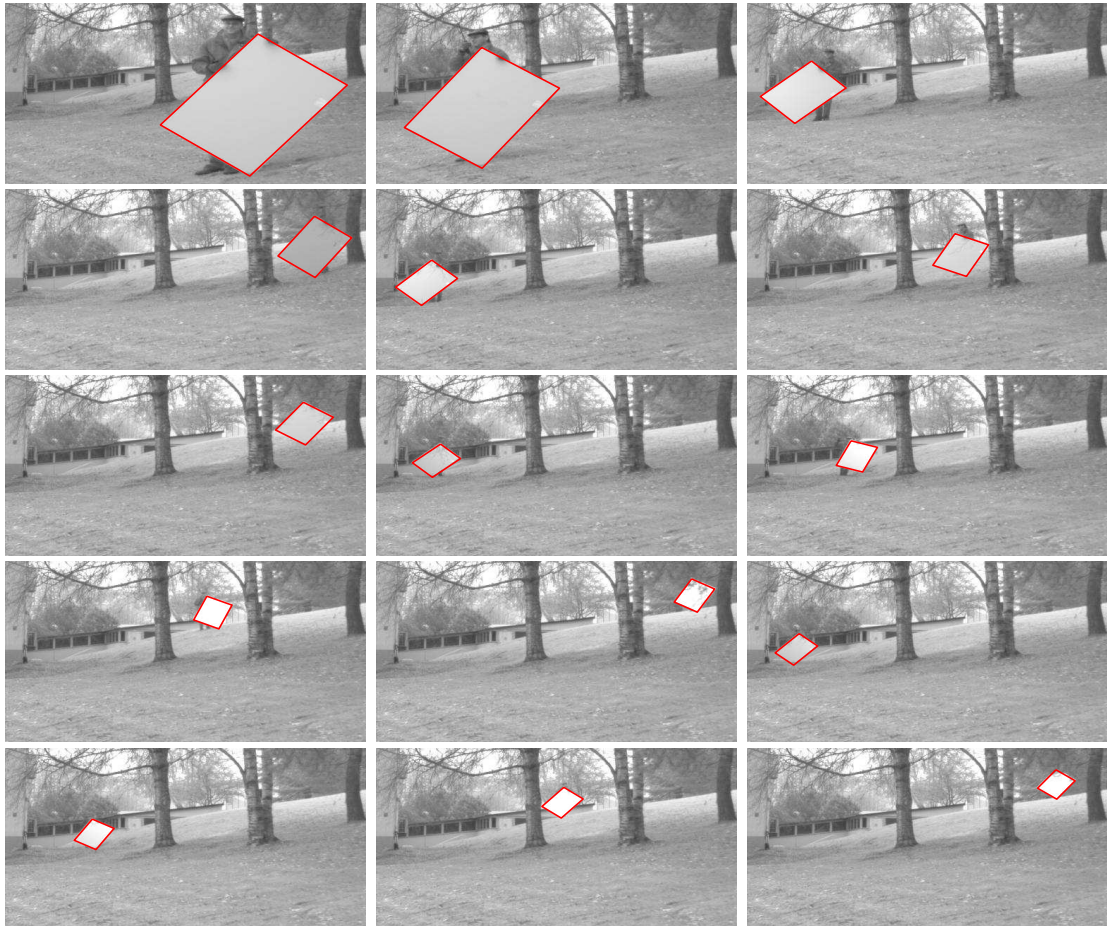
Tabell 4.3 gjengir konfigurasjonsfilen som ble benyttet i eksperiment 1.

4.2 Eksperiment 2

Den neste scenen er en litt mer kompleks scene. Den består av en forgrunn som er relativt plan. Fra forgrunnen stiger terrenget. Avstanden mellom kamera og nedre og øvre del av terrenget varierer mellom ca. 10 og 50 meter. Kameraets åpningsvinkel er 18° . Samme prosedyre som beskrevet i avsnitt 4.1 ble benyttet for å generere avstandspunkter. I figur 4.6 vises bildene med plakaten utplassert i 15 posisjoner.

Avstanden mellom kamera og plakat ble estimert på samme måte som i forrige eksperiment, d.v.s. ut fra prosedyren beskrevet i kapittel 2. Resultatet er vist i tabell 4.4, mens tabell 4.5 gjengir konfigurasjonsfilen benyttet i eksperiment 2.

Avstandsbildet som fremkommer med foten av kamerastolpen som node (terrengmodell 1) er presentert i figur 4.7. Avstandsbildet som fremkommer dersom foten av kamerastolpen ikke inngår som node (terrengmodell 2) er presentert i figur 4.8.



Figur 4.6 Figuren viser bildene som er benyttet i eksperiment 2. Plakaten har en rektangulær form og har en størrelse på 1×1.4 meter, kameraets åpningsvinkel er 18° , og avstanden til plakaten varierer mellom 10.5 meter og 49 meter. Resultatet av parallellogramapproximasjonen er overlappet bildene.

Eksperiment 2						
	Avstand [meter, (%)]					
	Kolonne 1		Kolonne 2		Kolonne 3	
	Målt	Estimert	Målt	Estimert	Målt	Estimert
Rad 1	10.6	10.2 (3.7)	12.9	12.1 (6.2)	23	23.0 (0.0)
Rad 2	24	24.7 (2.9)	32	31.5 (1.6)	32	32.1 (0.3)
Rad 3	33	33.3 (0.9)	41	41.6 (1.5)	42	42.7 (1.7)
Rad 4	43	43.8 (1.9)	44	44.4 (0.9)	47	46.0 (2.1)
Rad 5	47	46.9 (0.2)	48	46.6 (2.9)	49	50.1 (2.2)

Tabell 4.4 Resultater - avstandsestimering i eksperiment 2. Den relative feilen står i parentes. Med unntak av de to nærmeste posisjonene, er den målte avstanden utført med en lasermåler som ikke gir bedre oppløsning enn til nærmeste meter (i de to nærmeste posisjonene var avstanden for kort til at laseren kunne benyttes. I disse posisjonene ble avstande målt med målebånd). Median av kvadratavvik er benyttet som linjetilpasningsmetode. Resultatene er oppført radvis og kolonnevis i samsvar med bildene i figur 4.6.

Egenskap	Verdi
FocalLength	0.05
HViewAngle	18.00
VViewAngle	12.0464
Angle	0
SnowDepth	0.0
CamHeight	1.6
NRRows	256
NCols	512
ImagePlaneTriangulate	Yes

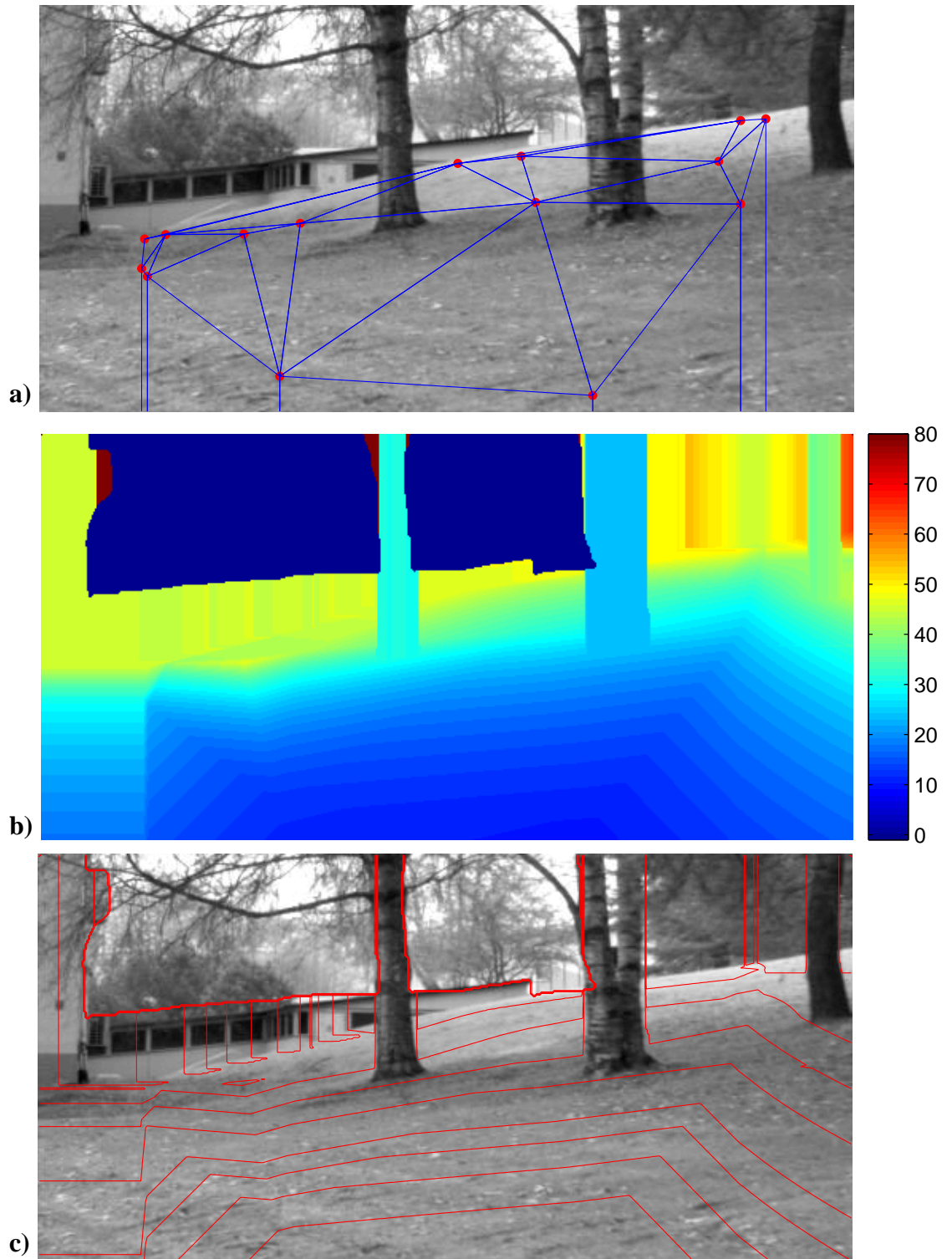
Tabell 4.5 Konfigurasjonfil for kameraet benyttet i eksperiment 2.

4.2.1 Validering/evaluering av terrengmodellen (eksperiment 2)

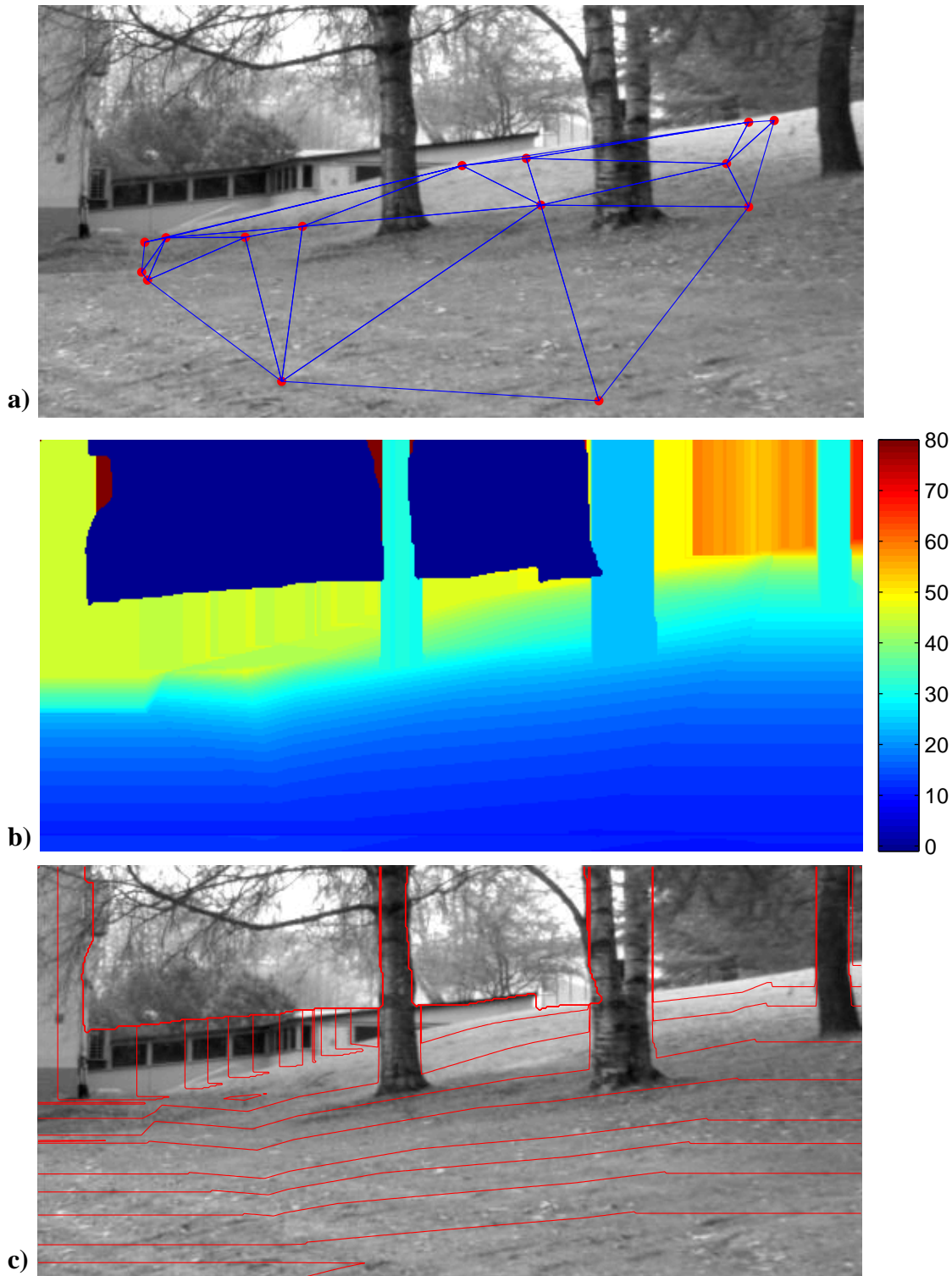
Valideringen av terrengmodellen som er generert i det andre eksperimentet gjøres identisk med den som ble utført for det forrige eksperimentet. I figur 4.9 er et bilde av scenen med valideringspunktene avmerket.

På bakgrunn av målingene i tabell 4.4 er selve terrengmodellen generert i henhold til prosedyren beskrevet i kapittel 3. Avstandsbildet er presentert i figur 4.7.

I tabell 4.6 er oppmålt avstand til valideringspunktene listet sammen med avstanden som begge terrengmodellene angir.



Figur 4.7 Resultat av triangulering og terrengmodellgenerering: foten av kamera stolpen er her benyttet som node i trianguleringen. Konfigurasjonen for kameraet er angitt i tabell 4.5. **a)** Punkter benyttet i genereringen av terrengmodellen i eksperiment 2 samt den resulterende trianguleringen. **b)** Resulterende avstandsbilde basert på målingene av objektet i posisjonene vist i figur 4.6. **c)** Avstandskonturer for eksperiment 2.



Figur 4.8 Resultat av triangulering og terrengmodellgenerering: foten av kamerastolpen er her ikke benyttet som node i trianguleringen. Konfigurasjonen for kameraet er angitt i tabell 4.5. **a)** Punkter benyttet i genereringen av terrengmodellen i eksperiment 2 samt den resulterende trianguleringen. **b)** Resulterende avstandsbilde basert på målingene av objektet i posisjonene vist i figur 4.6. **c)** Avstandskonturer.



Figur 4.9 Valideringspunkter som er benyttet i evalueringen av terrengmodellen i eksperiment 2.

Eksperiment 2			
Val. pkt.	Avstand [meter, (%)]		
	Målt	Terrengmodell 1	Terrengmodell 2
1	36.6	45.7 (24.8)	45.7 (24.8)
2	28.1	30.9 (10.0)	30.9 (10.0)
3	22.6	23.4 (3.4)	23.4 (3.4)
4	28.7	38.6 (34.6)	30.4 (6.1)

Tabell 4.6 Sammenlikning av målt avstand og avstand angitt av terrengmodell for de valideringspunktene som er vist i figur 4.9. **Terrengmodell 1:** Foten til kamera-stolpen inngår som node i trianguleringen. **Terrengmodell 2:** Foten til kamera-stolpen inngår ikke som node i trianguleringen. Relativt avvik (i %) er angitt i parentes.

4.3 Diskusjon

Erfaringsmessig vet vi at dersom nøyaktigheten i avstandsestimatene til objektene er bedre enn 5 – 10%, så vil terrenget som genereres i det etterfølgende være tilstrekkelig god. Forutsetningen er selvsagt at oppløsningen til objektet er tilstrekkelig stor (vi har funnet at dette er tilfellet dersom det er mer enn 20 pixler diagonalt) og det er tilstrekkelig tett med målepunkter. Hvor tett disse må være, er det vanskelig å si noe generelt om. Dette avhenger fullstendig av terrenget. Et flatt terreng beskrives ved én flate, kupert terreng må beskrives ved mange stykkevise flater. Hvor mange flater som trengs, må vurderes i hvert enkelt tilfelle ved at en genererer en terrengmodell på bakgrunn av et sett punkter. Denne evalueres ved at en undersøker om avstandsestimatene er tilstrekkelig gode for et sett av tilfeldig valgte evalueringpunkter i scenen. Dersom dette ikke er tilfellet, må terrenget baseres på flere målepunkter i de delene av scenen der den er for dårlig.

I det første eksperimentet er scenen tilnærmet plan. Både visuelt betraktet og fra valideringen ser vi at den genererte terrenget blir svært god uavhengig av hvorvidt bakkepunktet under kameraet inngår i trianguleringen. Selv i punkter som ligger langt unna noen av planene (og som altså er langt inne i "ekstrapolasjonsområdet") som f.eks. punktene 1, 2 og 5, er den relative feilen liten.

I det andre eksperimentet er scenen mer kupert og resultatet også annerledes. Det første som slår en er det dårlige resultatet som oppstår for den delen av scenen som avbildes lengst til venstre og lengst til høyre når en inkluderer bakkepunktet under kameraet i trianguleringen⁸. Dette skyldes at det ved både venstre og høyre bildekant genereres plan der bakkepunktet og et av de bakre trianguleringspunktene inngår. I og med at terrenget *ikke* er flatt langs linja som går mellom bakkepunktet under kameraet og de bakre trianguleringspunktene, blir også terrenget gal i disse områdene. Årsaken til at slike "dype" plan genereres, skyldes ikke noe annet enn at de bakre trianguleringspunktene ligger lenger ut i bildekanten enn de nærmeste. Skal bakkepunktet under kameraet inngå i trianguleringen, er det derfor sterkt ønskelig at det også inngår trianguleringspunkter langt ut mot nedre venstre og høyre bildekant. Dette er spesielt viktig dersom terrenget er kupert. Vi ser at ved *ikke* å inkludere bakkepunktet under kameraet, blir resultatet langt bedre. Både visuelt betraktet og ut fra valideringspunktene synes denne terrenget å være akseptabel. Men fremdeles har vi ingen målinger langt ut mot bildekanten for korte avstander. Om ønskelig kan dette løses på flere måter. Én mulighet kan være å ha objekter (rektangulære plakater) av ulik størrelse slik at relativt små objekter benyttes nært kameraet, mens store objekter brukes på stor avstand. Et alternativ kan være å benytte plakater med annen geometrisk form. En rettvinklet trekant (som holdes med hypotenusen vertikalt) er et eksempel på en slik geometrisk form.

5 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

I denne rapporten har vi beskrevet en teknikk for generering av en terrengmodell. Denne terrenget modellerer scenen som et sett med stykkevise plan der hvert plan har form

⁸Årsaken til at dette punktet er ønskelig å inkludere er knyttet til problemet med terregndynamikk, se side 25.

av en trekant. Det er således ingen begrensninger med tanke på hvordan terrenget faktisk er. Avstandene til hjørnene i planene er funnet ved å gjenkjenne objekter med kjent form og størrelse som er plassert ut i disse posisjonene. Formen vi har valgt er rektangel. Prosedyren ved terrengmodellering består først i å plassere ut objektet i ønskede posisjoner og ta et bilde av dette i hver posisjon. Deretter estimeres avstand og posisjon. Dette er input til en triangulering som genererer planene, og fra dette genereres så et avstandsbilde. Dette vil imidlertid bare anta verdier i et område der det er triangulert. Avstandsestimater utenfor dette er beregnet ved ekstrapolasjon.

Vi har i denne rapporten presentert resultater der teknikken har vært anvendt på to ulike terrenger. I det ene tilfellet var terrenget tilnærmet plant, i det andre tilfellet var det mer kupert. I tillegg til disse, har vi benyttet teknikken for generering av 15 andre terrengmodeller. I alle disse har de resulterende terrengmodellene vist seg å samsvare godt med det faktiske terrenget dersom målepunktene ligger så tett at den delen av scenen som hver triangelformet flate representerer er flat. Vi kan derfor slå fast at vi har hatt gode erfaringer med denne teknikken, og den er enkel å benytte. Vi ser imidlertid at det er rom for minst én forbedring. Denne er knyttet til estimeringen av posisjon og avstand til et punkt i scenen. Det ville ha vært ønskelig at denne hadde hatt muligheter for valg av terrengpunkter som ligger langt ut mot bildekanten slik at "ekstrapolasjonsområdet" blir minst mulig. Betydningen av en slik forbedring sees godt i det andre eksempelet der modellen kunne ha vært bedre i bildekanten dersom dette hadde vært mulig.

Litteratur

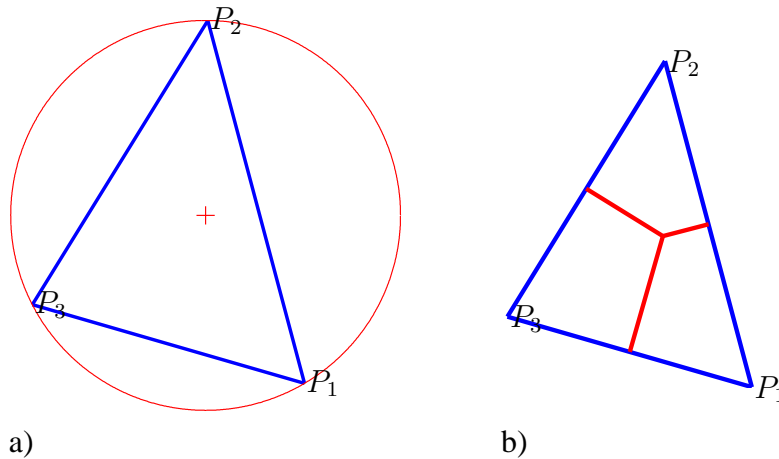
- (1) N. Akima (1978): A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points. *ACM Transactions on mathematical Software*, 4(1).
- (2) R. Barnhill og J. Gregory (1975): Polynomial Interpolation to Boundary Data on Triangles. *Mathematics of Computation*, 29.
- (3) M. Bern og D. Eppstein (1992): Mesh Generation and Optimal Triangulation. I D.-Z. Du og F. Hwang, redaktører, *Computing in Euclidean Geometry*, Lecture Notes Series on Computing, side 23–90. World Scientific, Singapore. First edition.
- (4) B. Braathen (2003): Terrengdynamikk og generering av terrengmodell. FFI/NOTAT- 2003/00992, Forsvarets Forskningsinstitutt.
- (5) L. P. Chew (1993): Guaranteed-Quality Mesh Generation for Curved Surfaces. I *Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry*, side 274–280. Association for Computing Machinery.
- (6) S. Fortune (1992): Voronoï Diagrams and Delaunay Triangulations. I D.-Z. Du og F. Hwang, redaktører, *Computing in Euclidean Geometry*, Lecture Notes Series on Computing, side 193–233. World Scientific, Singapore. First edition.
- (7) P. Green og R. Sibson (1981): Computing Dirichlet Tessellations in the Plane. *The Computer Journal*, 24.
- (8) M. Holroyd og B. Bhattacharya (1970): *Automatic Contouring of Geophysical Data Using Bicubic Spline Interpolation*. Department of Energy, Mines and Resources Publications, Geological Survey of Canada.
- (9) C. Lawson (1977): Software for C^1 Surface Interpolation. I J. R. Rice, redaktør, *Mathematical Software*, side 161–194. Academic Press, New York. Third edition.
- (10) M. McCullagh (1981): Creation of Smooth Contours Over Irregularly Distributed Data Using Local Surface Patches. *Geographical Analysis*, 13(1).
- (11) T. Melen (1994): *Geometrical Modelling and Calibration of Video Cameras for Underwater Navigation*. Doktorgradsoppgave, NTH.
- (12) H. C. Palm (2003): Bildeanalyse for generering av 3D terrengmodell. FFI/NOTAT- 2003/00993, Forsvarets Forskningsinstitutt.
- (13) G. Petrie og T. Kennie (1987): Terrain modelling in Survey and Civil Engineering. *Computer Aided Design*, 19(4).
- (14) W. Pratt (1994): *Digital Image Processing*. John Wiley and Sons.
- (15) P. Rousseeuw (1984): Least Median of Squares Regression. *American Journal of Statistical Association*, 79:871–880.

- (16) J. R. Shewchuk (1996): Robust Adaptive Floating-Point Geometric Predicates. I *Proceedings of the Twelfth Annual Symposium on Computational Geometry*. Association for Computing Machinery.
- (17) J. R. Shewchuk (1996): Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. I M. C. Lin og D. Manocha, redaktører, *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering*, bind 1148 av *Lecture Notes in Computer Science*, side 203–222. Springer-Verlag. From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.
- (18) R. Sibson (1981): A Brief History of Natural Neighbour Interpolation. I V. Barnett, redaktør, *Interpreting Multivariate Data*. John Wiley & Sons, New York.
- (19) P. Yoeli (1977): Computer Executed Interpolation of Contours into Arrays of Randomly Distributed Height Points. *Cartographer Journal*, 14(2).

APPENDIKS

A BEREGNING AV ET TRIANGELS OMSKREVNE SIRKEL

Å beregne et triangels omskrevne sirkel innebærer å beregne sirkelens senter og sirkelens radius. Det siste er enkelt antatt at man har beregnet sirkelens senter først. Radius vil da ganske enkelt være avstanden mellom senteret og et hvilket som helst av de tre punktene i triangelet. Figur A.1 viser et triangel med dets omskrevne sirkel og den omskrevne sirkels senter.



Figur A.1 a) Figuren viser den omskrevne sirkel som vi ønsker å beregne samt sirkelens senter. b) Normalene fra midten av hver sidekant er trukket inn til den omskrevne sirkels senter. Radius til sirkelen er avstanden fra senteret til hvilket som helst av de tre punktene i triangelet.

Senteret til den omskrevne sirkel vil ligge like langt fra alle de tre punktene. Senteret vil da måtte stå i skjæringspunktene for normalene fra midt på de tre kantene til triangelet som vist i figur A.1. Vi vil i det følgende ta utgangspunkt i to av kantene for beregning av den omskrevne sirkels senter, kanten mellom hjørnene $P_1 = (x_1, y_1)$ og $P_2 = (x_2, y_2)$ samt kanten mellom hjørnene $P_2 = (x_2, y_2)$ og $P_3 = (x_3, y_3)$.

Ligningen for de to linjene som går gjennom hhv. P_1 og P_2 og P_2 og P_3 er:

$$y_{1-2} = m_{1-2}(x - x_1) + y_1 \quad (\text{A.1})$$

$$y_{2-3} = m_{2-3}(x - x_2) + y_2 \quad (\text{A.2})$$

hvor stigningstallene m_{1-2} og m_{2-3} er gitt ved hhv.:

$$m_{1-2} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{A.3})$$

$$m_{2-3} = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \quad (\text{A.4})$$

Den omskrevne sirkels sentrum er skjæringen mellom normalene til disse to kantene og som også går gjennom midtpunktet til kantene. Normalen til en linje som har stigningstall m vil ha stigningstall $-1/m$. Vi får som følge av dette at ligningen for normalene blir hhv.

$$y_{1-2}^{\perp} = -\frac{1}{m_{1-2}}\left(x - \frac{x_1 + x_2}{2}\right) + \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (\text{A.5})$$

$$y_{2-3}^{\perp} = -\frac{1}{m_{2-3}}\left(x - \frac{x_2 + x_3}{2}\right) + \frac{y_2 + y_3}{2} \quad (\text{A.6})$$

Disse to linjene skjærer hverandre i senteret og ved å løse for x får man:

$$x_C = \frac{m_{1-2}m_{2-3}(y_1 - y_3) + m_{2-3}(x_1 + x_2) - m_{1-2}(x_2 + x_3)}{2(m_{2-3} - m_{1-2})} \quad (\text{A.7})$$

hvor x_C er x -koordinatet til senteret.

Ved å sette løsningen for x inn i en av likningene A.5 eller A.6 kan man finne y_C . Alternativt kan man gå fram på samme måte som med x .

Sirkelens radius er gitt ved

$$r = \sqrt{(x_C - x_1)^2 + (y_C - y_1)^2} \quad (\text{A.8})$$