

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP





## Sammendrag

Måling i bilder fotografert fra mikrodroner (UAV) gir nye muligheter for nærfotogrammetriske prosjekter. Droner kan fly i farlige og utilgjengelige miljøer og de kan fotografere objekter fra alle mulige vinkler. I denne mastergradsoppgaven evalueres den ytre orienteringen (YO) til bilder fotografert fra mikrodronen, MD4-200. For MD4-200 bestemmes YO direkte med GPS/INS.

Nærfotogrammetri krever nøyaktig indre og ytre orientering. Oppgaven beskriver kamerakalibrering og fotogrammetriske metoder for å beregne YO i enkeltbilde. Forskjellige sensorer som GPS, IMU og kamera opererer med ulike koordinatsystem så nødvendige transformasjoner presenteres.

Evaluering av YO ble gjort ved å fotografere et testfelt og beregne YO i enkeltbilde med tilbakeskjæring i rommet. Disse verdiene ble deretter sammenlignet med dronens GPS/INS bestemte verdier. Denne sammenligningen gav et inntrykk av kvaliteten på dronens YO.

Resultatet fra YO av 22 bilder viser at nøyaktigheten i posisjonsbestemmelsen er på meter-nivå, noe som må betraktes som normalt for udifferensierte GPS-målinger. Rotasjonene har feil på flere grader rundt alle tre akser, der feil i kappa er størst. Unøyaktigheten forklares med ustabil kameramontering og ukjent implementering av INS- og kompasdata.

Nøyaktigheten på den ytre orienteringen til MD4-200 egner seg for autonom flyving, men er ikke nøyaktig nok til at man kan gjøre målinger i bildene direkte. For å bygge en mikrodrone for nærfotogrammetriske prosjekter må alle sensorer monteres fast i en stiv ramme med kjente eksentrisiteter. I tillegg må GPS/INS integreres med dataprosessering, som for eksempel et Kalmanfilter.

## Abstract

Being able to use photographs taken from microdrones (UAV) in close range photogrammetry opens up to new applications. Microdrones can operate in dangerous and inaccessible environments and they can photograph objects from all possible angles. This thesis evaluates the external orientation of images photographed from the microdrone, MD4-200. The external orientation of the MD4-200 is calculated directly from GPS/INS measurements.

Close range photogrammetry requires both precise internal and external orientation. This thesis describes the camera calibration and photogrammetric methods to calculate the external orientation of single images. Various sensors such as GPS, IMU and the camera operate with different coordinate systems and necessary transformations between these systems are presented.

Evaluation of the external orientation was made by photographing a test field and then calculates the external orientation of the camera with single-photo resection. These values were then compared with the microdrone's GPS/INS-calculated values. By comparing these values the accuracy of the external orientation was evaluated.

The results of the 22 images show that the accuracy of positioning is on the meter-level. The rotations have errors of several degrees around all three axes, and the error in  $\kappa$  is bigger than in  $\phi$  and  $\omega$ . The quality is explained by the unstable mounting of the camera, and unknown implementation of dataprocessing algorithms.

The external orientation of MD4-200 is suitable for autonomous operations, but is not accurate enough to be able to make measurements in the images directly. In order to build a microdrone for close-range photogrammetric projects, all sensors must be mounted in a rigid frame with known eccentricities. In addition, the uncertainties in the data processing of the GPS/INS should be better documented.

## Forord

Denne masteroppgaven er et resultat av egen interesse for fotogrammetri og nye, spennende anvendelser av teknologien vi lærer ved UMB. Flyfotografering er ingen ny disiplin, men å bruke bilder fra drone, også kalt UAV, for fotogrammetriske formål, er en relativt ny disiplin. Det var spennende, og til tider utfordrende, å få lov til å bruke forskjellige disipliner som nærfotogrammetri, geodesi og GPS/INS for å forstå hvilke anvendelser slike bilder passer for.

Jeg synes det var rett å inkludere mange tema da dette gir best mulig bilde av alle utfordringer som må løses for å få full utnyttelse av en drones kapasitet.

Veileder for oppgaven har vært amanuensis Ivar Maalen-Johansen, som underviser i Fotogrammetri ved Geomatikk-seksjonen, Institutt for Matematiske realfag og teknologi på UMB. Tusen takk for hjelp og faglig frihet gjennom høsten 2010!

Jeg vil også takke førsteamanuensis Jon Glenn Gjevstad ved UMBs Geodesiavdeling for hjelp med koordinater, transformasjoner og rotasjoner til testfeltet.

Mange takk også til Rambøll Mapping og AeroVision AS for utforming av oppgavens problemstilling. Det er inspirerende å vite at man jobber med en aktuell problemstilling.

UMB, Ås, 10.desember 2010.

Anders Arnesen Tiltnes

## Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	9
1.1 Oppgavens oppbygning.....	9
1.2 Terminologi .....	10
1.3 Forkortelser .....	11
1.4 Rambøll Mapping og AeroVision AS.....	12
1.4.1 Rambøll Mapping.....	12
1.4.2 AeroVision AS.....	12
2. Droner – fremtidens plattform for nærfotogrammetri.....	13
2.1 Klassifikasjon .....	14
2.2 Anvendelser av UAS .....	15
2.3 UAS – Unmanned Aerial Systems.....	15
2.3.1 Bakkestasjon .....	15
2.3.2 Kommunikasjon .....	16
2.3.3 Dronen .....	16
2.4 Sikkerhet og tillatelser.....	17
2.4.1 AeroVision i praksis.....	18
2.4.2 Radiofrekvensområde.....	18
2.5 AeroVision sitt system: MD4-200.....	18
2.5.1 Dronen .....	19
2.5.2 Kamera: Sigma DP1.....	20
2.5.3 Bakkestasjon .....	21
2.5.4 Dataprosessering .....	21
2.6 Andre systemer .....	22
3. Teori.....	23
3.1 Forskjeller mellom tradisjonell flyfotogrammetri og nærfotogrammetri ved fotografering fra mikroplattformer.....	23
3.2 Fotogrammetri .....	24
3.2.1 Indre orientering (IO).....	25
3.2.2 Ytre Orientering (YO) .....	27

3.3	Om vinkler: .....	31
3.4	Koordinatsystemer .....	32
3.4.1	WGS84.....	33
3.4.2	Høydesystem.....	34
3.4.3	Geodetiske koordinater .....	35
3.4.4	ECEF og ECI.....	35
3.4.5	NEU: .....	35
3.4.6	Body Frame .....	36
3.4.7	Lokalt.....	36
3.4.8	EUREF89 .....	36
3.5	Transformasjoner .....	37
3.5.1	Geodetiske til kartesiske koordinater .....	37
3.5.2	Kartesiske til geodetiske koordinater .....	38
3.5.3	Body Frame til NEU .....	38
3.5.4	ECEF til NEU.....	38
3.5.5	Body Frame til ECEF .....	39
3.5.6	Transformasjon mellom to kartesiske koordinatsystemer.....	39
4.	Test av eksisterende system.....	40
4.1	Antagelser .....	40
4.2	Kalibrering av Sigma DP1 .....	40
4.2.1	Kalibreringsresultat for Sigma DP1 .....	42
4.2.2	Kommentarer til kalibrering .....	42
4.2.3	Effekt av ukalibrert kamerakonstant .....	43
4.3	Etablering av IMT-testfelt.....	45
4.3.1	Praktiske hensyn .....	45
4.3.2	Utstyr.....	45
4.3.3	Innmåling .....	46
4.3.4	Høydedifferanse IMT-testfelt, Ås.....	46
4.3.5	Testfeltdata .....	47
4.4	Fotografering.....	48
4.4.1	AeroVision sin flyrapport .....	48

4.4.2	Kompensere for Cam.Servo .....	49
4.4.3	Kompensere for misvisning .....	50
4.4.4	Eksempel på flyrapport .....	50
4.4.5	Bakkeoppløsning – geometrisk oppløsning .....	50
4.5	Transformasjon til ønsket koordinatsystem: UTM EUREF89 .....	51
4.6	Bestemmelse av YO .....	52
4.6.1	PhotoModeler .....	52
4.6.2	Korreksjon av rotasjoner .....	54
4.7	Resultater .....	55
4.7.1	Beregnete YO ved tilbakeskjæring i PhotoModeler .....	55
4.7.2	Oppgitte YO fra AeroVision: .....	55
4.7.3	Beregnet posisjon i 3ds Max: .....	55
4.7.4	Feilvektorer, vinkelfeil og RMS-error .....	56
4.7.5	Effekt av feil i rotasjoner .....	57
4.8	Diskusjon: .....	58
4.9	Konklusjon .....	59
4.9.1	Posisjoner .....	59
4.9.2	Rotasjoner: .....	60
5	Forbedring av eksisterende system .....	61
5.1	Tekniske forbedringer .....	61
5.1.1	Montering: Innmåling av eksentrisitet .....	61
5.1.2	Nøyaktighet på GPS .....	62
5.1.3	Nøyaktighet på INS .....	63
5.1.4	Kamera .....	63
5.1.5	Dataprosessering .....	63
5.2	Bildematching og blokkutjevning .....	64
5.3	Andre sensorer: Laserskanning .....	65
5.4	3x3 regler for nærfotogrammetri .....	65
5.5	Konklusjon .....	66
6	Litteraturliste .....	67
7	Bilder, figurer og tabeller .....	68



7.1	Bilder: .....	68
7.2	Figurer: .....	68
7.3	Tabeller:.....	69
8	Vedlegg .....	70
	Resultater: .....	70
	Kalibreringsrapport: .....	74
	IMT-testfelt oversiktskart:.....	76
	Thumbnails av alle bilder: .....	76

# 1. Innledning

Målet med denne masteroppgaven er å vurdere hvordan små førerløse fly, såkalte mikrodroner, fungerer som plattform for fotografering for nærfotogrammetriske formål.

AeroVision AS er et selskap som eier og opererer mikrodroner. AeroVision sine mikrodroner tar såkalte georefererte bilder, og det skal evalueres om denne georefereringen er av så god kvalitet at den kan benyttes som direkte ytre orientering. Om den kan det er det interessant å vurdere om dataene kan benyttes til automatisk drapering av eksisterende 3D-modeller.

Det finnes flere måter å beregne ytre orientering av bilder, men denne oppgaven begrenser seg til å måle i enkeltbilder. Metoden som benyttes for å beregne ytre orientering i enkeltbilder er tilbakeskjæring i rommet. Denne metoden er eneste alternativ for manuell orientering av enkeltbilder og skal sammenlignes med direkte orientering ved bruk av GPS og INS.

## 1.1 Oppgavens oppbygning

Oppgaven består av fire deler.

Første del beskriver hva et UAS er og hva som kreves for å operere droner. Det er beskrevet hvilke tillatelser som kreves og klassifisering av ulike UAS. AeroVision sitt system presenteres.

Andre del beskriver nødvendig teori som kreves for å forstå beregninger som er gjort. Det er forutsatt at man har kjennskap til grunnleggende fotogrammetriske begreper som sentralprojeksjon og kolinearitetsprinsippet.

I tredje del evalueres den eksisterende georeferansen i AeroVision sitt system. Det er etablert et testfelt med CPOS nøyaktighet, beregnet indre orientering (IO) for kamera, gjennomført fotografering fra AeroVision sin drone og med tilbakeskjæring i rommet beregnet ytre orientering (YO) til bildene. Beregnet YO er sammenlignet med AeroVision sin oppgitte YO, og det er forsøkt å komme frem til en konklusjon om hvorvidt AeroVision sitt system, i nåværende form, er egnet for nærfotogrammetriske formål.

Den avsluttende delen gir forslag til hvordan en drone bør designes for å oppnå direkte ytre orientering av enkeltbilder, god nok for bruk i nærfotogrammetri.

## 1.2 Terminologi

Å bruke bilder tatt fra små, lavtflyvende, ubemannede droner til fotogrammetriske formål er en relativt ny disiplin. Under følger derfor forklaring på noen aktuelle begreper og forkortelser som brukes. Disse begrepene og forkortelsene har utbredt anvendelse og brukes i oppgaven uten videre forklaring.

<b>Drone</b>	Førerløst, fjernstyrt fartøy. Begrepet drone er utbredt både i Norge og internasjonalt når man prater om førerløse fly, men brukes også om ubemannede fartøy på land eller i vann. I denne oppgaven brukes begrepet drone om små førerløse fly. Organisasjonen <i>UVS International</i> kjemper for å benytte det engelske begrepet vehicle. Grunnen til at det er valgt å bruke drone i denne oppgaven er at det er utbredt både i faglitteratur og i media.
<b>UAV</b> <b>Unmanned aerial vehicle</b>	Betegner alle typer ubemannede flygende fartøy, uavhengig av størrelse. Se klassifisering for detaljer. I denne oppgaven benyttes som sagt begrepet drone.
<b>UAS</b> <b>Unmanned aircraft system</b>	Refererer til dronen, kontrollenhet på bakken og kommunikasjonen til/fra dronen.
<b>UVS</b> <b>Unmanned vehicle system</b>	Refererer til hele systemet, uavhengig av om selve fartøyet beveger seg i vann, på bakke eller i luften.
<b>Pilot</b>	Person som opererer dronen. <sup>1</sup>
<b>GNSS</b>	Global navigation satellite system. I denne oppgaven benyttes GPS, men andre satellittbaserte stedfestingstjenester, som GALILEO eller GLONASS, har liknende funksjonalitet.
<b>INS</b>	IMU + beregningsrutiner for akselerasjon, fart, posisjon og vinkelhastigheter og rotasjoner.
<b>Payload</b>	Maksimal vekt en drone kan løfte, i tillegg til sin egen kropp.

Tabell 1: Terminologi.

Årsaken til at begrepene UAV og UAS ikke er oversatt til norsk er at det er disse begrepene som brukes i alle tidsskrifter og i faglitteratur. Å benytte fjernstyrt førerløst fartøy (FFF) og fjernstyrt førerløst system (FFS) ble vurdert, men å finne opp egne begreper følte unødvendig.

Små, lavtflyvende droner, slik AeroVision opererer i dag, har stort potensial for fotogrammetribransjen. Det kommer til å skje en utvikling de neste årene, og det blir interessant å se om det utvikler seg noen norske faguttrykk. Den norske foreningen for førerløse fly heter UAS Norway.<sup>2</sup>

En liste med forkortelser og begreper følger:

<sup>1</sup> UVS International presiserer at personen som styrer en drone er en pilot, ikke operatør.

<sup>2</sup> [www.uasnorway.org](http://www.uasnorway.org).

### 1.3 Forkortelser

MTOM = Maximum take of mass

AGL = above ground level

VLOS = Visual line of sight

BLOS = Beyond line of sight

OTF = On-the-fly

ATM = Air traffic control

NOTAM = Notify to air-man

RPV = Remote piloted vehicle

AGL = Above ground level

VRS = Virtuell referansestasjon

CAA = Civil Aviation Authority

EASA = European Air Safety Agency

EUROCAE = European Organization for Civil Aviation Equipment

EUROcontrol = The European Organization for the Safety of Air Navigation

EDA = European Defence Agency

JARUS = Joint authorities for rulemaking on unmanned systems

## 1.4 Rambøll Mapping og AeroVision AS

### 1.4.1 Rambøll Mapping

Rambøll ble etablert i København i 1945. I dag har Rambøll nesten 9000 ansatte i totalt 20 land. Rambøll leverer rådgivningstjenester innen plan, design og teknikk, og har prosjekter i over 100 land. I Norge har Rambøll 1100 ansatte fordelt på 27 kontorer.<sup>1</sup>

Rambøll Mapping er en avdeling i Norge med kontor i Kristiansand. Rambøll Mapping har spesialisert seg innen visuell kommunikasjon og 3D-løsninger til bedrifter, kommuner og statlige organ. Oppgavens problemstilling og avgrensing ble utformet i samarbeid med Rambøll Mapping. Det er ønskelig å utforske mulighetene for å bruke bilder fra UAV til drapering av såkalte "gråbokser", 3D-modeller uten fototekstur. Det finnes måter å gjøre dette manuelt, men om man kan gjøre det automatisk eller semiautomatisk åpner det for nye bruksområder innen 3D-visualisering.

Les mer om Rambøll Mapping på [visualisering.ramboll.no](http://visualisering.ramboll.no).

### 1.4.2 AeroVision AS

AeroVision AS ble etablert seg i 2009 med kontorer på Fornebu i Bærum. AeroVision spesialisere seg på tjenester basert på ulike sensorer fra UAV. AeroVision tilstreber samarbeid med kompetansemiljøer innen ulike fagfelt.<sup>2</sup>

AeroVision stilte sitt UAS, MD4-200, tilgjengelig for fotografering og de ga fri tilgang til dataene. Målet var å estimere nøyaktigheten til dataene og vurdere om dataene kunne benyttes som ytre orienteringselement for bildene. Det har vært veldig spennende å få være med på hele prosessen fra å avtale flyvning, selve flyvningen av dronen og å få tilgang til dataene.

Les mer om AeroVision på [www.aerovision.no](http://www.aerovision.no)

---

<sup>1</sup> [www.ramboll.no](http://www.ramboll.no)

<sup>2</sup> [www.aerovision.no](http://www.aerovision.no)

## 2. Droner – fremtidens plattform for nærfotogrammetri

Bruken av droner, førerløse fly, har fått stor utbredelse det siste tiåret. Både det militære og sivile er pådrivere i en industri som mange mener kommer til å revolusjonere luftfarten de nærmeste årene. Droner har uten tvil en rolle å spille innen geomatikk i fremtiden, men det er spesielle hensyn å ta for å kunne utnytte mulighetene til det fulle. Norsk luftrom er regulert av Luftfartstilsynet gjennom bestemmelser for sivil luftfart (BSL), og det er ikke fritt frem å fly hvor man vil. I tillegg er det store forskjeller mellom ulike droner i forhold til skikkethet til å bære ulike sensorer. Generelt kan man si at droner er ustabile plattformer og det stilles høye krav til posisjoneringsteknologi og behandling av data.

Organisasjonen *UVS International* ble stiftet i 1995 og har siden da jobbet for å fremme bruk av UAS for både sivil og militær bruk. De er den fremste pådriver for å koordinere dette arbeidet og er internasjonalt anerkjent. Mange land og internasjonale organer forsøker å påvirke fremtiden til UAS der det meste av arbeidet går gjennom *UVS International*. Organisasjonen har 147 medlemmer fra 33 land og inkluderer medlemmer som NATO, EUROCAE, EUROcontrol, flere universiteter, Boeing Company og nasjonale luftfartsmyndigheter fra de fleste store land (bl.a. USA, UK, Frankrike, Tyskland etc.), for å nevne noen.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Komplette oppdaterte liste finnes på [www.uvs-international.org](http://www.uvs-international.org).

## 2.1 Klassifikasjon

Luftfartstilsynet klassifiserer bemannede fly med vekt fra 500kg til over 500tonn. Det finnes totalt 10 klasser der alle fly under 500kg klassifiseres i kategori 1. Luftfartstilsynet har ingen klassifisering av droner.

EuroSDR skrev i 2009 en rapport om ukonvensjonelle plattformer for fotogrammetriske formål. I denne rapporten ble det laget en klassifisering av forskjellige UAS. I tabell 1 er denne klassifiseringen oversatt til norsk og de forskjellige systemene er rangert etter operasjonsrekkevidde.

Kategori	Akronym	Rekkevidde (km)	Fly høyde (km)	Flytid (time)	MTOM (kg)
Nano	η	<1	100	<1	< 0,025
Micro	μ	<10	250	1	<5
Mini	Mini	<10	150-300	<2	<30
Close Range	CR	10-30	3000	2-4	150
Short Range	SR	30-70	3000	3-6	200
Medium Range	MR	70-200	5000	6-10	1250
Medium Range Endurance	MRE	>500	8000	10-18	1250
<i>Militære Droner:</i>					
Low Altitude, Deep Penetration	LADP	>250	50-9000	0,5-1	350
Low Altitude, Long Endurance	LALE	>500	3000	>24	<30
Medium Altitude, Long Endurance	MALE	>500	14km	24-48	1500
High Altitude, Long Endurance	HALE	>2000	200km	24-48	4500-12000
Unmanned Combat Aerial Vehicle	UCAV	<1500	10km	<2	10000
Lethal	LETH	300	4000	3-4	250
Decoy	DEC	>500	5000	<4	250
Stratospheric	STRATO	>2000	20-30km	>48	30-?

Tabell 2: Klassifisering av ulike UAS. Kilde: J. Everaerts, 2009.

Denne masteroppgaven skal videre handle om mikrodroner. Mikrodroner er store nok til at de kan løfte digitalkamera og andre små sensorer, men er små nok til at de flyr uten

restriksjoner og kan fotografere objekter på kloss hold. Større droner som Close Range UAS opererer under strengere restriksjoner enn de mindre mikrodronene.

AeroVision sitt UAS klassifiseres som et mikrosystem, og det tekniske navnet er passende nok MD4-200: Mikro Drone 4, med payload på 200gram. AeroVision opererer 2 droner MD4-200 og MD4-1000. Begge disse klassifiseres som mikrodroner, men det sistnevnte er noe tyngre, kan løfte tyngre utstyr og fly lengre perioder. I denne oppgaven er det benyttet den minste modellen, UAS MD4-200.

## 2.2 Anvendelser av UAS

UAS benyttes innenfor mange fagområder. Alle innebærer en eller annen form for fjernmåling, og det vanligste er å benytte et kamera for video eller stillbilder. Bortsett fra militære formål som overvåking og kontroll finnes det en rekke sivile anvendelsesområder. Under er en liste over områder der droner er blitt brukt til sivile formål.

---

<b>Statlige</b>	Grensekontroll, Kystvakten og politi, trafikkovervåking.
<b>Brann og redningsarbeid</b>	Skogsbranner, miljøulykker, ulike redningsarbeid (for eksempel i fjellet).
<b>Olje og energisektoren</b>	Infrastrukturovervåking.
<b>Jordbruk, skog- og fiskerieringen</b>	Miljø- og avlingsovervåking og analyser, beskyttelse av anlegg.
<b>Jordobservasjoner</b>	Klimaovervåking, flyfoto og landmåling, jordskjelv observasjoner.
<b>Kommunikasjon og media</b>	Droner benyttes som kommunikasjonsplattform, VHALE droner fungerer som nærsatellitter og ulike droner fungerer som kamera plattform for ulike oppdrag for filmindustri og TV-sendinger.
<b>Arkeologi</b>	Dokumentasjon

Tabell 3: Anvendelser av UAS.

## 2.3 UAS – Unmanned Aerial Systems

Et UAS består av 3 segmenter:

- Bakkestasjon.
- Kommunikasjon.
- Drone.

### 2.3.1 Bakkestasjon

Dette er kontrollenheten. Bakkestasjonen er som regel en koffert med batteri, PC og radiokommunikasjon. Herfra manøvrerer piloten dronen og kommuniserer med den for fotografering, eller annen fjernmåling.

Bakkesegmentet muliggjør:



**Planlegging av oppdraget.** Avhengig av målsetningen med oppdraget bestemmes flyruten. Noen UAS tilbyr å programmere flyrute og fotografering på forhånd og deretter la dronen operere autonomt gjennom hele oppdraget. Eventuelt kan UAS gjennomføre halvautonome oppdrag eller manuell styring av dronen.

**Manøvrering/fotografering.** En pilot kontrollerer/navigerer dronen manuelt med en kontrollenhet. Kontrollenheten har styrespaker for å kontrollere dronens bevegelser, samt kameravinkel og utløserknapp for å ta bilder.

**Datahåndtering og datalagring.** Via PC får man informasjon fra avionikk og kamera. Via skjermen kan man "se det dronen ser", og man får tilgang til instrumenter og status rapporter. Dataprosessering og håndtering av bilder og datafiler håndteres også i bakkestasjonen.

### 2.3.2 Kommunikasjon

En form for kommunikasjon med dronen er nødvendig. Selv om mange systemer tilbyr autonom flyving er det viktig å ta hensyn til sikkerheten og ha mulighet til å manøvrere dronen. Fra lengst til kortest rekkevidde er kommunikasjonsalternativene satellitt link, telekommunikasjon, radiolink eller WiFi. For mikro UAS er radiolink mest utbredt og AeroVision benytter radiolink med en rekkevidde på opptil 2000meter.

### 2.3.3 Dronen

En drone består av mekaniske komponenter, avionikk og sensorer.

De mekaniske komponentene er det som får dronen til å fly. Motor, vinger, propeller, batteri, kropp osv. Design av en drone avhenger av følgende faktorer/ønsker: MTOM, vingespenn, lengde, ønsket fart og flytid, vekt på drivstoff/batteri, avionikk, motor, flyskrog og pris.

Avionikk er en fellesbetegnelse på dronens elektroniske komponenter og inkluderer flyinstrumenter, navigasjons- og kommunikasjonsutstyr. For et UAS er mesteparten av dette flyttet ned i bakkestasjonen, der piloten opererer. Avionikk i dronen bør inkludere GPS posisjonering, INS, altimeter og kompass, og kan ha andre sensorer som trykk- og termometer.

Sensorer for fjernmåling monteres på dronen etter ønske. Hvilke hensyn man må ta for å integrere disse på en måte som tillater fotogrammetrisk bruk av sensorene er beskrevet videre i oppgaven. Under er en liste med aktuelle sensorer:

- Digitalkamera
- Videokamera
- Laserskanner
- IR-sensor
- Termografi

## 2.4 Sikkerhet og tillatelser

I Norge er det Luftfartstilsynet som kontrollerer regler for luftfart i Norsk luftrom. Regelverket for sivil luftfart dekkes av luftfartsloven og Bestemmelser for Sivil Luftfart (BSL). EU jobber i 2010 med å utarbeide nye regler for sivil luftfart og det er European Air Safety Agency (EASA) som har ansvaret for denne jobben. Når denne jobben er ferdig vil reglene bli tatt inn i EØS-avtalen og med det bli gjeldende i Norge gjennom Luftfartstilsynet. Luftfartstilsynet skriver på sine nettsider at alle aktører i norsk luftfart vil bli berørt.<sup>1</sup> Om det vil komme spesifikke bestemmelser som berører flyving av mikrodroner gjenstår å se.

EASA skrev i 2005 om UAS:

*“Regulatory airworthiness standards should be set to be no less demanding than those currently applied to comparable manned aircraft, nor should they penalize UAS systems by requiring compliance with high standards simply because technology permits”.*<sup>2</sup>

Dette betyr at UAS skal fly under de samme reglene som for tradisjonell flyving. Dette gjelder for droner som flyr i kontrollert luftrom, men for droner som flyr lavere gjelder ikke slike regler. I Norge er kontrollert luftrom definert som alt over 150 meter over bakken, men denne grensen er forskjellig fra land til land.

For mikrodroner er det kun 3 hensyn å ta når man opererer i Norge:

- Dronen må fly lavere enn 150 meter over bakken. Dette er luftrom uten restriksjoner.
- Fri sikt til dronen (VLOS).
- Ikke fly over menneskemasser.

Etter søk i Lovdata er det ikke funnet noe spesifikt om droner eller førerløse fly. Det står kun beskrevet regler for ubemannet friballong.<sup>3</sup>

Bortsett fra at det er vanskelig å finne formelle lover for å fly UAS har allikevel bransjen retningslinjer man bør ta hensyn til:

- Mulighet for å bestemme dronens posisjon gjennom kommunikasjon fra drone til bakkestasjon.
- Dronen må kunne “se” og unnvike andre fly (*sense and avoid*). Dette tilfredstilles i praksis ved VLOS. For droner som flyr i kontrollert luftrom (i Norge over

---

<sup>1</sup> [www.luftfartstilsynet.no](http://www.luftfartstilsynet.no)

<sup>2</sup> EASA, 2005

<sup>3</sup> [www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20030207-0252.html](http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20030207-0252.html)

150meter over bakken) har European Defence Agency (EDA) satt i gang forskningsprosjektet MidCas.<sup>1</sup>

- Reaksjon ved kommunikasjonssvikt. Dronen må ha en reaksjonsprosedyre dersom kommunikasjonen mellom dronen og piloten forsvinner. En slik reaksjon kan være en lagret posisjon eller sone som dronen autonomt flyr til.

### 2.4.1 AeroVision i praksis

Etter kommunikasjon med daglig leder i AeroVision, Gunnar K. Rokseth, har jeg lært at AeroVision opererer under følgende regler (høst 2010):

- Skriftlig tillatelse fra Luftfartstilsynet til å fly mikro UAS.
- AeroVision som selskap har skriftlig tillatelse fra Nasjonal Sikkerhets Myndighet (NSM) til å fotografere og filme fra luften.
- Lars J. Norberg (pilot) har i regi av AeroVision AS lisens fra NSM til å fotografere og filme fra luften.
- AeroVision unngår å fly over folkemasser da dette i henhold til Luftfartsloven / BSL er forbudt.
- UAS er forsikret, herunder ansvarsforsikring som dekker skade på tredje part.
- AeroVision utfører alle oppdrag i overensstemmelse med oppdragsgivere og informerer grunneier.

### 2.4.2 Radiofrekvensområde

Radiofrekvenser er en begrenset ressurs som danner grunnlaget for produksjon av ulike typer tjenester.<sup>2</sup> Kommunikasjon med dronen skjer for de fleste UAS via radiolink. I Norge er det Post og Teletilsynet som har ansvaret for tildelingen av frekvensområder og antall frekvensområder er begrenset. Bruksområdene varierer fra astronomi, satellittkommunikasjon, kringkasting, telefoni, RFID mm.<sup>3</sup>

AeroVision opererer innenfor frekvensområdene 35/40/72MHz som i Norge er allokert til mobile applikasjoner. Det er verdt å merke seg at frekvenstildelingen kan være forskjellig fra land til land.

## 2.5 AeroVision sitt system: MD4-200

AeroVision eier og opererer et UAS som heter MD4-200. Det er det tyske selskapet Mikrodrone som utvikler og selger disse systemene til bedriftskunder og private i hele Europa.

---

<sup>1</sup> EDA har startet et 50M € forskningsprogram som heter MidCas (Mid-air collision avoidance system) med målsetning å utvikle sensorer og programvare for tilfredsstillende "sens-and-avoid" håndtering i ubemannede droner. Se: [www.eda.europa.eu](http://www.eda.europa.eu)

<sup>2</sup> SNF-prosjekt nr. 2245, 2000.

<sup>3</sup> [www.npt.no](http://www.npt.no)

Fra Microdrones sin nettside:

*“Our company objective is the development and production of rotary wing based VTOL AUMAV’s. (VTOL = Vertical Take Off and Landing, AUMAV = Autonomous Unmanned Micro Aerial Vehicle). Our first product, the md4-200 has been available since April 2006. Within the first 16 month more than 250 units have been sold - mainly inside of Europe”.*<sup>1</sup>



Bilde 1: UAS MD4 – 200. Foto: [www.microdrones.com](http://www.microdrones.com).

AeroVision tilbyr autonome oppdrag ved å programmere flyrute før oppdrag. Dronen kan utstyres med videokamera, digitalkamera og IR-opptak (termografering). I denne oppgaven er det fotografert med et digitalkamera av merket, Sigma DP1.

### 2.5.1 Dronen

AeroVision sin drone er rotorbasert, som et helikopter, og har flere fordeler i forhold til vingebaserte droner. Dronen har vertikal start og landing, kan programmeres til å holde seg i ro i luften og kan fotografere objekter på kloss hold.

Dronen er avhengig av GPS-signal for å kunne fly og egner seg derfor ikke til bruk innendørs.

Spesifikasjon for MD4-200:

- Vekt uten kamera: 585g.
- Maks payload: 200g.
- Størrelse: <70cm rotor til rotor.
- Flytid: < 30 min.
- Flyhøyde: <150m.
- Operasjonell distanse: <2000 meter.
- Batteri: LiPo 2300mAh (Lithium Polymer).
- Luftfuktighet <80 %, temperatur 0-40 °C, vindstyrke <4m/s for klare bilder.
- Starthøyde < 3000moh. (pga. GPS-initialisering).
- GPS for posisjonering.
- IMU for orientering.
- Kompass for nord-retning.

---

<sup>1</sup> [www.microdrones.com](http://www.microdrones.com)

## 2.5.2 Kamera: Sigma DP1

Montert under dronen er et ombygd Sigma DP1 digitalkamera. Kameraet er en modifisert modell slik at kommunikasjon med dronen via downlink/radiokommunikasjon er mulig. Mikrodrones leverer kameraet ferdig ombygd og klar til bruk med UAS'et.

Hva krever et kamera for nærfotogrammetri? Det avhenger selvsagt av formålet. Som regel har man et ønske om hvor stort område på bakken en piksel skal representere, dvs. bakkeoppløsning. Om man har dette som utgangspunkt og vet oppløsningen til kamera kan man regne seg frem til nødvendig flyhøyde. Det stilles krav til et stabilt linsesystem, et godt kalibrert kamera og til kameraets fysiske montering på dronen. Alt dette er ting som påvirker nøyaktigheten til fotogrammetriprosjektet.

Noen fordelaktige spesifikasjoner for Sigma DP1<sup>1</sup>:

- Sensor: 14 megapiksel Foveon X3 (2652 x 1768 x 3 layers)
- RGB sensor (3 sensorer som hver måler 100 % rød, 100 % grønn, 100 % blå, til forskjell fra hhv 25 %, 50 %, 25 % som er vanlig i kompaktkameraer)
- Fast kamerakonstant (16,6mm oppgitt fra produsent)
- Bildestabilisering
- Stor bildebrikke (21,3449x14,2286mm)

Kameraet er montert på en såkalt "*Tilt controlled mount*". Med en servo som kan kontrolleres av pilot roteres kameraet trinnløst fra å ta bilde parallelt med dronens x-akse (0°) til parallelt med dronen z-akse (90°). Denne vinkelen heter *Cam.Servo* i flyrapporten og må betraktes som en offset til dronens pitch. Det må legges til at denne verdien oppleves som unøyaktig. Opphenget kameraet er festet i henger løst under dronen og stabiliseres kun av tyngdekraften. Begge disse forholdene er problematiske ved beregning av kameraets ytre orientering.



Bilde 2: Sigma DP1 montert på en såkalt *tilt controlled mount*. Foto: [www.microdrones.com](http://www.microdrones.com).

---

<sup>1</sup> [www.sigma-dp1.com](http://www.sigma-dp1.com)

### 2.5.3 Bakkestasjon

Bakkestasjonen er kontrollenheten til dronen og erstatter cockpiten i bemannede fly.

MD4-200 sin bakkestasjon består av:

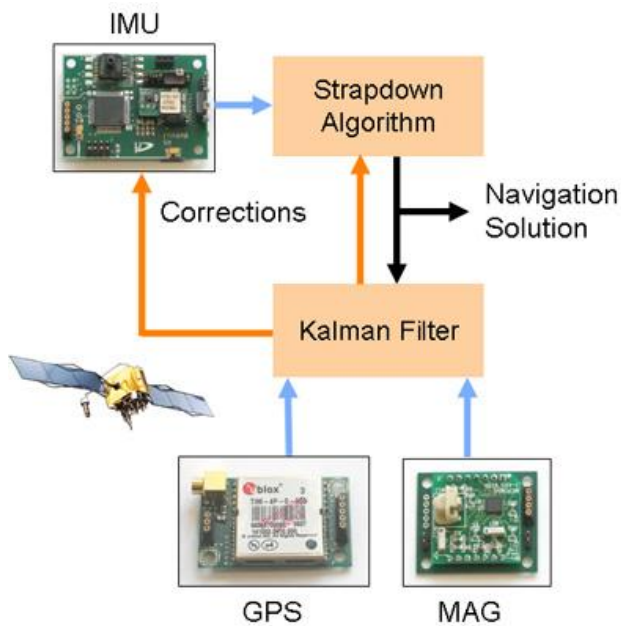
- 2.4 GHz 4-fold antenne.
- Li-Po batterier 4s, 14.8V, 2300mAh
- Pelicase: størrelse 486 x 392 x 192mm
- PC med software "*mdCockpit*" installert.
- Downlink dekodeer inkl. status om: batteri, mottaker kvalitet, RC-signal, retning, høyde, GPS-posisjon, flytid.
- 1.4 megapiksel video briller.



Bilde 3: AeroVision sin MD4 – 200 bakkestasjon. Foto: [www.microdrones.com](http://www.microdrones.com).

### 2.5.4 Dataprosessering

MD4-200 leverer georefererte bilder. Denne georefereringen er direkte beregnet med GPS og IMU. Her må det med en gang legges til at det ikke er oppgitt noen spesifikasjon for AeroVision sine beregninger. Det er brukt en IMU for vinkelmålinger, men integreringen av denne IMU'en er ukjent utover at man vet GPS og IMU er integrert i en felles beregningsrutine ved bruk av et Kalmanfilter (figur 1). Det er ikke tatt hensyn til eksentrisitet til kamera.



Figur 1: GPS/INS struktur for MD4-200. Kilde: [www.microdrones.com](http://www.microdrones.com).

## 2.6 Andre systemer

I 2009 var det 418 sivile, kommersielle UAS i verden, uavhengig av klassifisering.<sup>1</sup> Antall droner klassifisert som nano var 5, antall mikro var 61 og antall klassifisert som mini var 172.

I Norge er det organisasjonen *UAS Norway* som representerer UAS industrien. I 2010 hadde de 15 medlemmer:

- Vinghøg
- Prox Dynamics
- Robot Aviation
- Aranica
- Norut
- Alfatroll
- Scandicraft
- Odin Aero
- SiMiCon
- Maritim Robotics
- Jepcon
- Kolibri Geoservice
- Nordic UAS
- UAS Radar
- Sensair

<sup>1</sup> Ifølge Peter van Blyenburgh, president UVS International, 2009.

## 3. Teori

I denne delen presenteres det teoretiske grunnlaget for beregning av ytre orienteringselementer (YOE) i fotogrammetri. I tillegg presenteres nødvendige koordinatsystemer og transformasjoner mellom komponentene ombord i en drone.

### 3.1 Forskjeller mellom tradisjonell flyfotogrammetri og nærfotogrammetri ved fotografering fra mikroplattformer

I tradisjonell flyfotogrammetri blir bilder tatt fra et fly med hastighet på typisk 200km/t og en høyde på rundt 1000meter. Disse bildene er tatt tilnærmet vertikalt, og med systematisk overlapp på ca. 60 %. Bildenes ytre orientering (YO) beregnes nøyaktig med kontrollpunkter på bakken og blokkutjevning, og med 60 % overlapp har man stereosyn og kan generere høydemodeller. Bildenes dekningsområde er også kjent. Denne typen bilder brukes for eksempel som grunnlag for fremstilling av ortofoto og forskjellige typer kart.

I nærfotogrammetri med bilder tatt fra mikrodroner er det ikke system i geometrien mellom bildene. Bilder blir tatt i alle mulige vinkler og fra forskjellige flyhøyder, både nedenifra og ovenifra. Rotorbaserte mikrodroner kan holdes tilnærmet stille i luften ved fotografering. Man måler ofte i enkeltbilde, selv om det er mulig å ta bilder med overlapp.

I det teoretiske formelverket er det allikevel mange likheter mellom tradisjonell fotogrammetri og denne typen nærfotogrammetri. Felles prinsipper er sentralprojeksjonen og kolinearitetsprinsippet.

Samtidig har fotografering fra droner både utfordringer og fordeler man må kjenne til.

Utfordringer:

- Det er ingen systematisk bildeoverlapping og det er derfor vanskelig å benytte blokkutjevning for å forbedre YO.
- Det er vanskelig å benytte kontrollpunkter for å beregne YO fordi bilder ofte tas av bygninger eller prosjektet dekker små områder.
- Stiller høye krav til direkte bestemmelse av YOE.
- Plattformen er ustabil og beveger seg usystematisk.
- Det er ofte et diskret objekt som skal modelleres, eller et begrenset område.
- Praktiske hensyn som vær og omgivelser påvirker flyving.

Fordeler:

- Fotografering fra en mikrodrone er fleksibelt, billig og miljøvennlig.
- Droner kan fly i farlige eller utilgjengelige miljøer.
- Droner kan være plattform for mange typer fjernmålings sensorer.



- Målinger i bilder tatt fra mikrodroner behøver ikke korrigeres for bildevandring, jordkrumning, atmosfærisk refraksjon eller andre systematiske feil som kommer fra bilder tatt fra store høyder.

Utfordringen blir altså å bestemme YO til kameraet i opptaksøyeblikket. Klarer man dette, med god nøyaktighet og presisjon, vil man kunne bruke bildene og tilhørende YOE som direkte input i en rekke applikasjoner. For Rambøll Mapping vil det kunne være interessant å bruke bildene som tekstur til eksisterende 3D-modeller, såkalte gråbokser. Om dette kan gjøres i en helautomatisert prosess ville det vært økonomisk gunstig.

### 3.2 Fotogrammetri

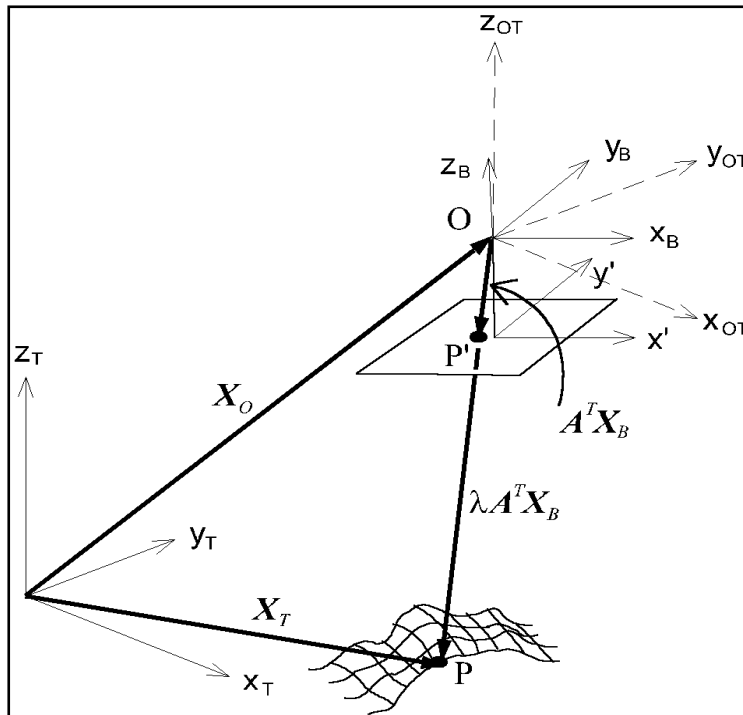
Når vi skal måle i bilder er det nødvendig å rekonstruere fotograferingssituasjonen. Ved fotografering fra droner kan dette som sagt være mer komplisert enn ved tradisjonell flyfotografering fordi man i utgangspunktet ikke vet noe om posisjonen og rotasjonene til kameraet i fotograferingsøyeblikket. For eksempel der tradisjonell flyfotografering tar bilder tilnærmet loddrett ned mot jorda, kan bilder fra droner tas i alle mulige vinkler.

Når fotograferingssituasjonen rekonstrueres er det den ytre orienteringen (YO) til bildet som bestemmes. I tillegg er det nødvendig å rekonstruere strålebuntens form ved å bestemme kameraets indre orientering (IO). Dette er spesielt viktig i prosjekter med høy krav til nøyaktighet i bildemålinger, som nærfotogrammetri.

AeroVision leverer såkalte georefererte bilder som er direkte beregnet med GPS/INS. Metoden er meget fleksibel, da man ikke behøver kontrollpunkter på bakken, og muliggjør derfor fotografering av forskjellig type objekter uten tidkrevende feltarbeid.

En annen metode er å beregne YO ved bruk av kontrollpunkter på bakken. YO i enkeltbilde gjøres med tilbakeskjæring i rommet. Dette er en manuell metode som krever kjente kontrollpunkter i terrenget og bildemålinger i bildet for å få løsning.

Det forutsettes at man er kjent med kolinearitetsprinsippet og sentralprojeksjon. Kolinearitetsprinsippet sier at objektpunkt (P), bildepunkt (P') og projeksjonssenter (O) skal ligge på samme linje. Sentralprojeksjonen er avbildning der alle lysstråler går fra terrenget, gjennom et felles punkt (projeksjonssenteret) og avbilder seg på bildebrikken, i motsetning til ortofoto.



Figur 2: Kolinearitetsprinsippet. Kilde: Ø. Andersen 2003.

### 3.2.1 Indre orientering (IO)

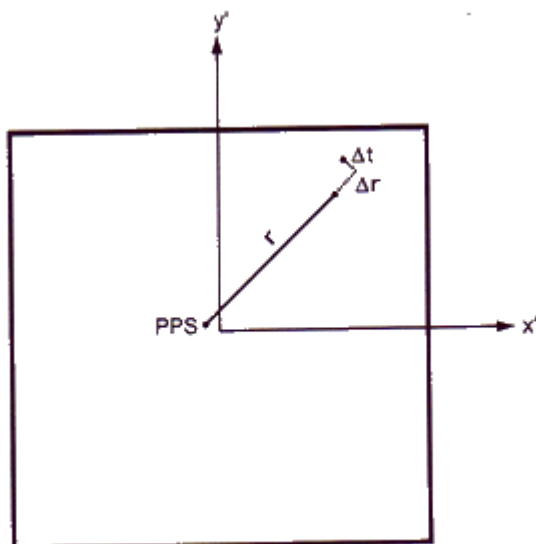
“Med indre orienteringselementer forstås de størrelser, vedrørende kameraets indre geometri o.a., som må være kjent for at den strålebunten som danner bildet, skal kunne rekonstrueres”. Ø. Andersen (2003).

Den indre geometrien bestemmes av de indre orienteringselementene (IOE) som estimeres ved å gjøre en kamerakalibrering.

IOE for digitale bilder er:

- **Hovedbildepunkt, PPS.** Punktet normalt ned på bildeplanet fra projeksjonscenteret. Må ikke forveksles med bildesenter (FC) som er punktet midt i den fysiske bildebrikka.
- **Kamerakonstanten, c.** Distanse fra projeksjonscenter normalt ned på bildebrikka, gjennom PPS.
- **Størrelsen på bildebrikka.** For digitale bilder er dette oppgitt presist fra produsenten, og det er mest historisk ved fremkalling av analoge bilder at det var viktig å estimere denne størrelsen.
- **P1 og P2.** P1 og P2 korrigerer for desentrering av linsesystemet. I en matematisk perfekt linse går lysstrålen parallelt både inn og ut av linsesystemet, men dette er i praksis aldri tilfellet. Hovedårsaken er bevegelige linsesystemer og det er derfor fordel med fast linse/fast kamerakonstant for få et stabilt linsesystem.
- **K1, K2 og K3.** K1, K2 og K3 korrigerer for radiell fortegnings, r. På grunn av sentralprojeksjonen blir objekter i utkanten av bildebrikka fortegnet i forhold til

rett posisjon. Den radielle fortegningen er større lenger vekk fra PPS og symmetrisk rundt PPS. Radiell fortegning deles i to komponenter: radiell ( $\Delta r$ ) og tangentiell ( $\Delta t$ ) fortegning. Radiell fortegningen kan komme opp i 300  $\mu\text{m}$  i utkanten av bildebrikka og er vanligvis 10 ganger så stor som effekten av et desentrert linsesystem.<sup>1</sup>



Figur 3: Radiell og tangentiell fortegning. Bildekoordinater  $x'$  og  $y'$ .

Det finnes ulike måter å kalibrere digitalkamera. Man kan velge mellom å gjøre det i laboratorium eller såkalt "on-the-job"-kalibrering. Sistnevnte kan være bra om man har ustabile keralinser som forandres raskt ved f.eks. temperaturforskjeller, men er ikke like nøyaktig som om man gjør kalibreringen på et laboratorium. Før nærfotogrammetriske prosjekter er det anbefalt å gjøre kalibrering i laboratorium.

Det er 3 ulike typer labkalibreringer:

- Software: for eksempel PhotoModeler. Tar bilder av kalibreringsfelt med mange kalibreringspunkter og beregner IOE med tilbakeskjæring i rommet og MKM.
- Goniometer: Måler vinkler og med kjent avstand til kalibreringsflaten kan man beregne IOE.
- Collimator: Benytter collimator for å sende lys parallelt inn i kameraet. Lysstrålene blir så avbildet på bildebrikken og avvikene brukes til å bestemme IOE.

---

<sup>1</sup> J.G. Fryer, 1986.

### 3.2.2 Ytre Orientering (YO)

Ytre orienteringselement (YOE) består av 6 parametere. 3 parametere som beskriver kameraets posisjon ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) og 3 parametere som beskriver kameraet orientering ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) i rommet.

YO i enkeltbilde kan gjøres på to måter:

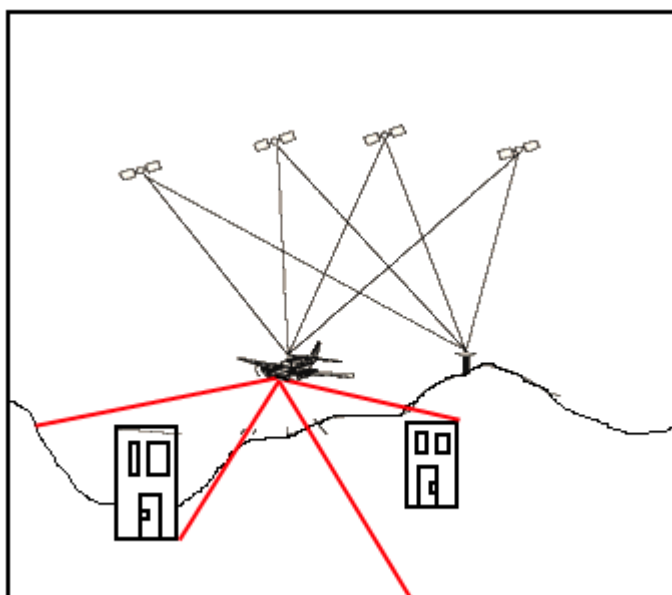
- **Direkte bestemmelse av YO:** benytter satellittbasert radionavigasjonssystem (GNSS) for å beregne posisjon og treghetsnavigasjonssystem (INS) for å beregne orienteringen til dronen.
- **YO i enkeltbilde ved tilbakeskjæring i rommet:** benytter flere koordinatbestemte kontrollpunkter på bakken og fotogrammetri for å beregne både posisjon og rotasjon. Her er det viktig å ha gjort en kamerakalibrering (IO) på forhånd slik at strålebuntens form blir korrekt estimert.

Om man tar flere, overlappende bilder finnes det andre metoder, men disse er ikke like aktuelle for fotografering fra droner. Denne oppgaven begrenses til YO av enkeltbilder.

#### 3.2.2.1 Direkte bestemmelse av YO

For å bestemme YO direkte er det nødvendig å utstyre dronen med både et satellittbasert navigasjonssystem, som regel GPS, og inertielt navigasjonssystem (INS). Med GPS og INS er det mulig å komme utenom kontrollpunkter på bakken, om man ser bort fra behovet for en GPS-referansestasjon.

$X_0, Y_0, Z_0$  beregnes med GPS. For bruk av grove målinger, som ved navigasjon, kan en GPS benyttes alene. Nøyaktige målinger krever differensierte GPS-målinger (dGPS), der man måler differensierte avstander mellom GPS og en referansestasjon på bakken.



Figur 4: Prinsippskisse for differensiel GPS.

Bildets orientering,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ , fastsettes ved hjelp av INS. INS er et system som består av en såkalt *Inertial Measuring Unit* (IMU) og en beregningsdel (som regel et Kalmanfilter). Systemet måler akselerasjon og vinkelhastigheter i forhold til et inertielt koordinatsystem (ECI). Akselerasjoner måles av akselerometer i tre retninger og vinkelhastigheten måles rundt tre ortogonale akser ved hjelp av tre gyroer, der vinkelmålingenes nøyaktighet kan bli så bra som  $10^{-3}$  grad.<sup>1</sup> Integrasjon av akselerasjonene gir fart og posisjon og integrasjon av vinkelhastighetene gir rotasjoner. Sammen gir disse en såkalt *initial position*.

Integrasjon vil føre til at det over tid blir drift i de relative målingene, dvs. at beregnede posisjoner og rotasjoner vil degenerere. Initial posisjonen vil ha høy relativ nøyaktighet, men pga. driften kreves det at den absolutte posisjonen må bestemmes. Det håndteres med GPS.

Man sier at bidragene fra GPS og INS er komplementære.<sup>2</sup> Mens GPS har god absolutt nøyaktighet i forhold til en jordfast ramme, gir INS en god relativ nøyaktighet. Ved å kombinere disse to målingene vil man kunne eliminere drift i INS, samtidig som man vil kunne få mye mer nøyaktig posisjonsbestemmelse. GPS har en konstant nøyaktighet på meter-nivå, mens INS gir en relativ nøyaktighet på mm-nivå. INS leverer rotasjoner, noe som er umulig for GPS.

GPS	INS
Pseudorange/Tid	Akselerasjon/Vinkelhastighet
God langtidsnøyaktighet	God korttidsnøyaktighet
Avhengig av satellittgeometri	Avhengig av initial orientering
Lav oppdateringsrate (1-10Hz)	Høy oppdateringsrate (100-500Hz)

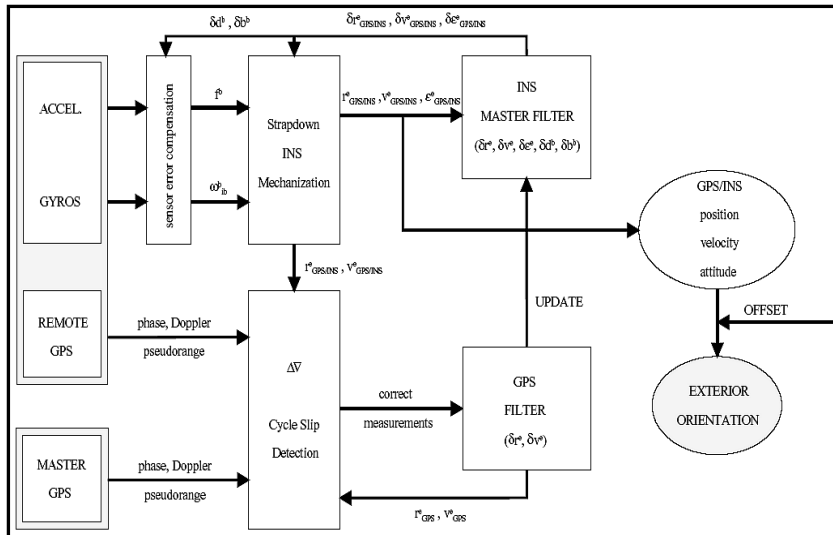
Tabell 4: GPS og INS med komplementære egenskaper. Kilde: J.G. Gjevestad.

Ved å utstyre en drone med GPS/INS kan man beregne dronens YO direkte. Fordelene da er at man slipper kontrollpunkter på bakken.

Integrering av GPS/INS gjøres med et Kalmanfilter. Et Kalmanfilter beregner oppdatert verdi for bl.a. posisjon, fart, akselerasjon, rotasjon og vinkelhastighet ved å beregne et vektet gjennomsnitt av beregnede verdier og forventede verdier. En prinsippskisse for et Kalmanfilter for GPS/INS vises i (figur 5).

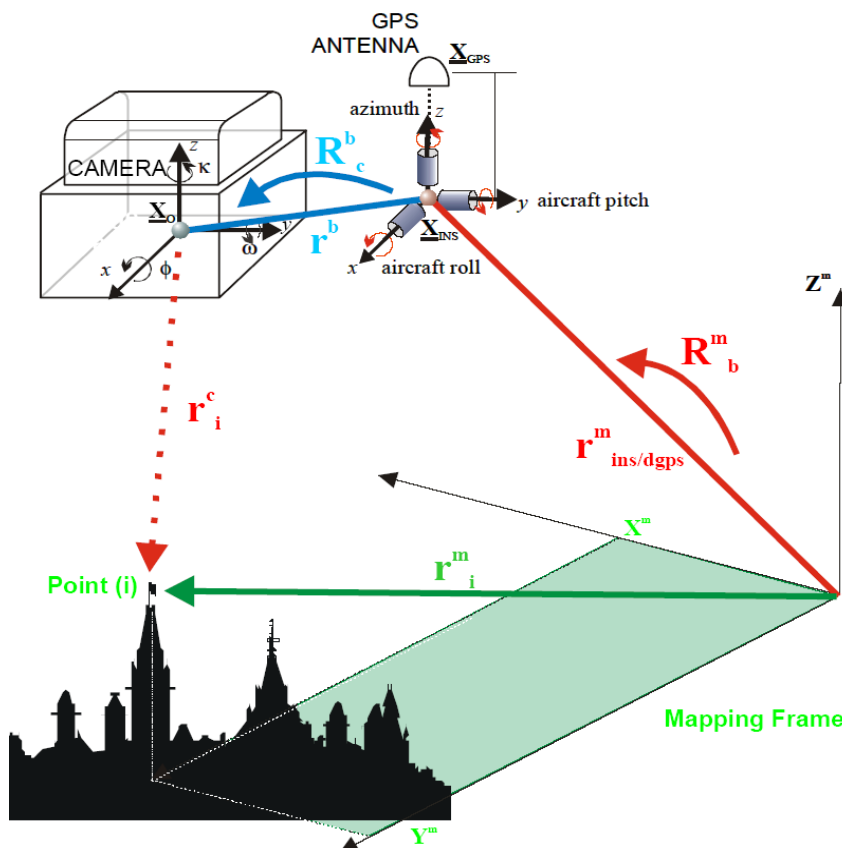
<sup>1</sup> Forelesning i fotogrammetri, UMB 2008.

<sup>2</sup> J.G. Gjevestad, 2008.



Figur 5: Kalmanfilter for GPS/INS integrasjon. Kilde: Forelesning i fotogrammetri (GMFO205) 2008.

Når man benytter GPS/INS må man samtidig ta hensyn til eksentrisiteten mellom kamera, GPS og INS. Disse eksentrisitetene består av vektorer mellom projeksjonscenteret til kameraet, IMU og fasesenteret til GPS-antennen. I tillegg må dronens og sensorenes aksesystemer måles inn, slik at de kan korrigeres om de ikke er parallelle. Den såkalte *boresight alignment* er vinkelen mellom dronens x-akse og sensorenes x-akse.



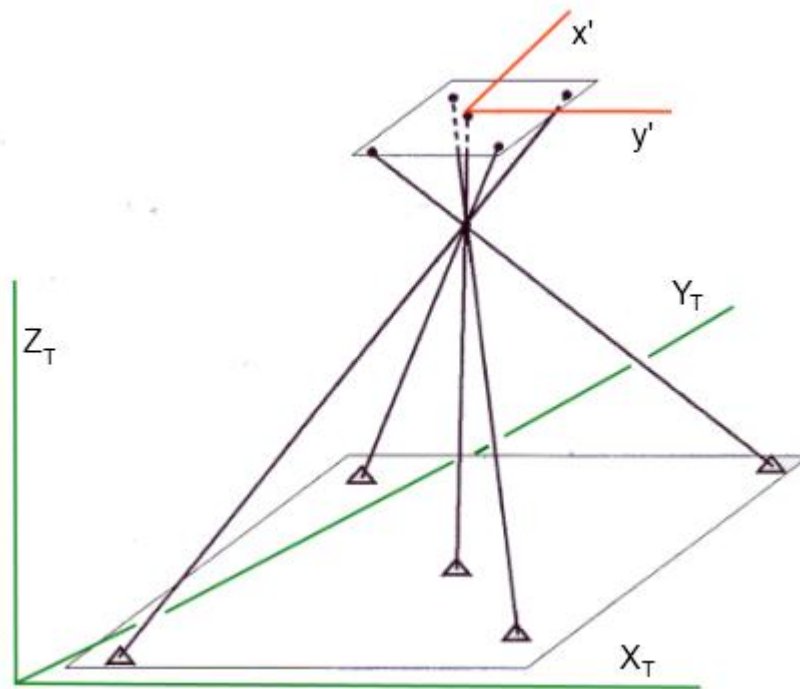
Figur 6: Eksentrisitet mellom kamera, GPS, INS og terrengkoordinater. Kilde: Jan Skaloud, 1999.

Beregning av eksentrisiteten må gjøres i en kalibreringsprosess på bakken, gjerne i laboratorium. Ved tradisjonell flyfotografering gjøres dette med landmålingsmetoder og fungerer godt fordi kamera er fastmontert i en stiv ramme i flyet. Samme prinsippet gjelder for droner der kamera bør monteres i samme ramme som GPS/INS. Dette er ikke tilfellet for AeroVision sitt MD4-200, der kamera henger fritt under dronen.

### 3.2.2.2 Tilbakeskjæring i rommet

Tilbakeskjæring i rommet benytter seg av sentralprojeksjon og ved å måle minst 3 punkter både i terrenget ( $X_T, Y_T, Z_T$ ) og i bilde ( $x', y'$ ) kan det teoretisk løses for de 6 ukjente YOE.

Proessen med å beregne posisjonen ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) og rotasjonene ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) gjøres ved elementutjevning med minste kvadraters metode (MKM).



Figur 7: Prinsippkisse for tilbakeskjæring i rommet.

Teoretiske betingelser:

- Minst 3 punkter målt i både bilde og terreng (kontrollpunkt).
- De 3 punktene må ikke ligge langs samme linje.
- Pass opp for *det farlige sylinder*.

Det er gjort tester på hvor mange kontrollpunkter som gir god orientering av bilder. Det viser seg at godt resultat krever minst 5 kontrollpunkter med god geometri punktene imellom (se figur 7).

Tilbakeskjæring i rommet gjøres slik:

1. Man måler inn kontrollpunkter på bakken ( $X_T, Y_T, Z_T$ ). Disse bør være godt markert, så man lett kan finne dem igjen i bildet man skal orientere. Det er viktig at man velger punkter slik at de får en god fordeling i bildet som skal tas. Punktene kan ikke ligge langs same linje, eller danne et såkalt "farlig sylinder" i rommet. Om man har kontrollpunkter i de fire hjørnene av det avbildete området, i tillegg til ett eller to punkter i midten, vil dette være ok. Det er viktig med god planlegging. Da kan man unngå å måtte dra ut å supplere med nye, tidkrevende og dyre målinger.
2. Hjemme "på kontoret" finner man kontrollpunktene igjen i bildet og markerer bildekoordinatene til punktet ( $x', y'$ ).
3. Med MKM søker man å finne det punktet i rommet ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) og rotasjoner ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) som oppfyller kolinearitet mellom projeksjonssenter ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) bildekoordinater ( $x', y'$ ) og terrengkoordinater ( $X_T, Y_T, Z_T$ ). Dette er en iterativ prosess som burde ha startverdier/foreløpige verdier for de søkte parameterne. Ved tradisjonell flyfoto bruker man  $\omega = 0$  og  $\varphi = 0$ , og  $\kappa =$  flyretning, men for bilder fra droner er disse vinkelen å betrakte som ukjente. Med ukjente foreløpige verdier kreves flere iterasjoner før tilleggene blir små.

Orienteringselementene bestemmes etter minste kvadraters metode slik at:

$$\sum_{i=1}^n (v_x^2 + v_y^2) = \min$$

Der  $v_x$  og  $v_y$  er feilvektorer.

### 3.3 Om vinkler:

Her presenteres tre typer vinkler/rotasjoner og hvilke symboler som benyttes. Eulervinkler beskriver dronens rotasjon og fotogrammetriske vinkler definerer kameraets orientering i forhold til terrengkoordinater. Geodetiske vinkler, eller geodetiske koordinater, beskriver et punkt på referanseellipsoiden.

#### 3.3.1 Eulervinkler

Eulervinkler beskriver forskjellen mellom to referanserammer. I denne oppgaven beskriver Eulervinkler rotasjonen mellom et fast koordinatsystem (ENU) og dronens såkalte Body Frame.

	Roll	Pitch	Yaw/heading
Rotasjon rundt akse:	N	E	U
Symbol	$\alpha$	$\theta$	$\psi$

Tabell 5: Eulervinkler.

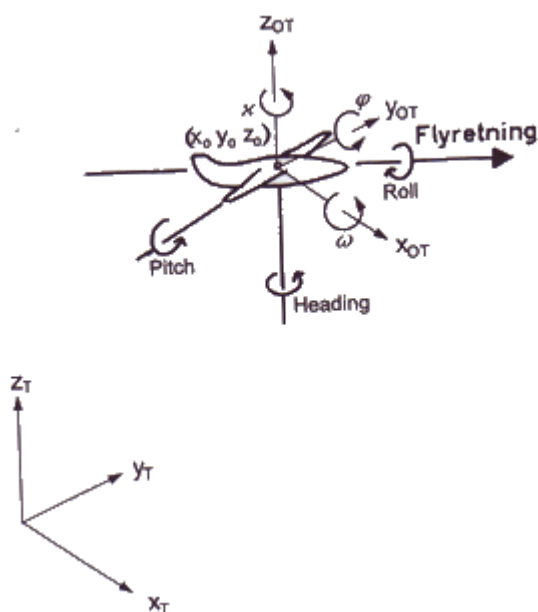


### 3.3.2 Fotogrammetriske vinkler

Fotogrammetriske vinkler defineres som rotasjoner rundt aksene i et terrengkoordinatsystem. Dette er tre av seks parametere for YO, og benyttes til å beskrive kameraets orientering i rommet da bildet ble tatt.

	omega	phi	Kappa
Rotasjon rundt akse:	$X_T$	$Y_T$	$Z_T$
Symbol	$\omega$	$\varphi$	$\kappa$

Tabell 6: Fotogrammetriske vinkler.



Figur 8: Euler- og fotogrammetriske vinkler. Kilde: Ø. Andersen (2003).

### 3.3.3 Geodetiske vinkler:

Vinklene som definerer et punkt, p, på referanseellipsoiden.

	Latitude/ Breddegrad	Longitude/ Lengdegrad
Vinkel mellom punktet p og...	Ekvatorplanet	Greenwich meridianen
Symbol	$\phi$	$\lambda$

Tabell 7: Geodetiske vinkler.

## 3.4 Koordinatsystemer

All geografisk informasjon beskrives i forhold til et koordinatsystem. Et koordinatsystem defineres av et datum som beskriver blant annet systemets origo og aksenes orientering. Høyder refereres i forhold til et høydedatum, ofte en ellipsoide eller geoidmodell.

Når man jobber med bilder tatt fra droner og skal bruke bildene samme med objekter på bakken<sup>1</sup> og i lufta<sup>2</sup> må det tas hensyn til at man jobber med koordinater i forskjellige koordinatsystem. Å kunne transformere mellom disse koordinatsystemene er viktig.

Grovt deler man inn i kartesiske og geodetiske koordinatsystem. Kartesiske koordinatsystem har 3 akser som står ortogonalt på hverandre. Geodetisk koordinatsystem er laget for å beskrive et punkt på jorda og koordinatene består av geodetiske vinkler ( $\phi$  og  $\lambda$ ) og høyde.

Først beskrives datum og alle nødvendige koordinatsystem og i neste avsnitt presenteres formelverk for å gjøre transformasjoner.

Et datum er som sagt parametere som definerer en modell av jordas form. Interessant for denne oppgaven er definisjonen av referanseellipsoiden i WGS84. WGS84 er koordinatsystemet benyttes av GPS, og alle GPS-målinger er i forhold til denne ellipsoiden. Det finnes forskjellige referanseellipsoider rundt om i verden, og mange land har referanseellipsoider som er tilpasset spesifikt for sitt geografiske område.

Høydedatum definerer høydesystemer. I Norge har vi et nasjonalt høydesystem, NN1958.

### 3.4.1 WGS84

GPS benytter koordinatsystemet WGS84 som defineres slik: Origo er i jordas massemiddepunkt, X-aksen mot Greenwich medianen, Z-aksen mot IERS<sup>3</sup> nordpol og Y-aksen fullfører et HHS. WGS84 sin referanseellipsoide defineres av parametere for store halvakse, ellipsoidens flattrykning, jordrotasjonens vinkelhastighet og gravitasjonskonstanten GM.

Referanse ellipsoide	Store halvakse	Lille halvakse	Flattrykning	Første eksentrisitet
	a	b	f	e
<b>WGS84</b>	6378137.0 m	6356752.314245m	1/298.25722563	$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$

Tabell 8: Noen datumparametere for WGS84 ellipsoiden.

Koordinater i WGS84 kan uttrykkes som geoidiske koordinater i forhold til WGS84 referanseellipsoiden eller med kartesiske koordinater XYZ med aksenes origo i jordas massemiddepunkt.

<sup>1</sup> Kontrollpunkter og 3D-modeller.

<sup>2</sup> GPS/INS, projeksjonssenter, bildekoordinater.

<sup>3</sup> International Earth Rotation and Reference Systems Service. Se [www.iers.org](http://www.iers.org).

### 3.4.2 Høydesystem

Høyder er ikke trivielt. Høyder måles i forhold til en referansehøyde. En slik referanse kan være en referanseellipsoide, for eksempel ellipsoidiske høyder ( $h$ ) i WGS84, men brukes sjeldent i praktiske anvendelser på grunn av den alt for grove tilnærmingen til jordas form. Høyder vi kjenner igjen fra topografiske kart er meter over havet (moh). Dette er ortometrisk høyde ( $H$ ) til punkt  $P$  over en beregnet geoide, langs en loddrett linje gjennom punkt  $P$ . En geoide er en nær gjengiving av jordens fysiske form. Den sammenfaller med havoverflatens gjennomsnittsnivå og gjenspeiler jordens gravitasjonsfelt.

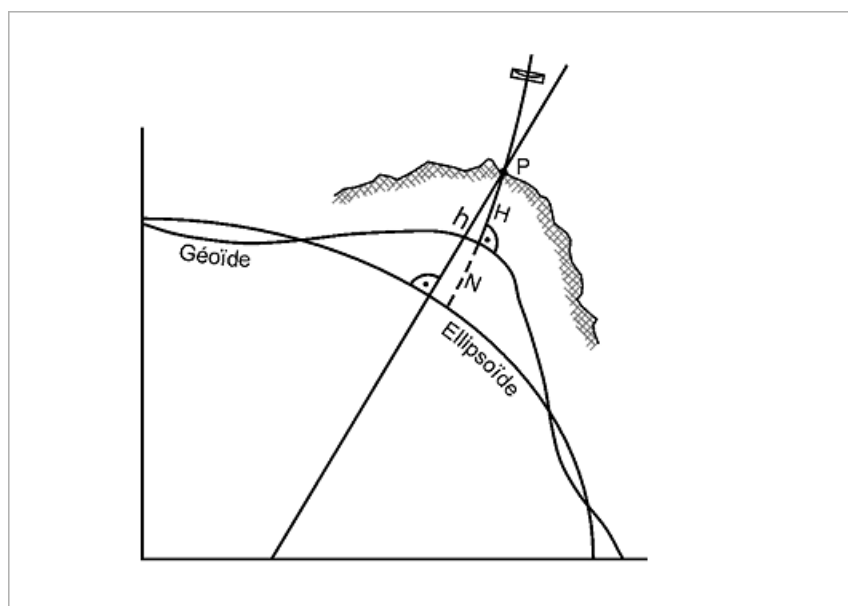
I Norge ligger geoiden mellom 18 og 48 meter over WGS84 ellipsoiden. Det største avviket ligger inne i Sognefjorden.<sup>1</sup> På Ås er forskjellen ca. 39 meter.

Det er viktig å ha et bevist forhold til ellipsoidiske og ortometriske høyder og forskjellene mellom disse. Det mest anvendte koordinatsystemet i Norge, EUREF89, benytter ortometriske høyder.

Ortometrisk høyde,  $H$ , er gitt ved:

$$H = h - N$$

Der  $N$  er gitt ved en geoidmodell<sup>2</sup>.



Figur 9: Høyder: forskjell mellom  $h$ ,  $H$  og  $N$ . Kilde: [www.swisstopo.ch](http://www.swisstopo.ch)

<sup>1</sup> Man kan tenke seg at Jotunheimen trekker vannet oppover. Mer korrekt er å se for seg hele jorda som en bevegelig masse. Der det er høye fjell vil geoideshøyden være stor og det blir større avvik mellom ellipsoidisk høyde og ortometrisk høyde. Kilde: [www.milvang.no/gps/datum/datum.html](http://www.milvang.no/gps/datum/datum.html)

<sup>2</sup> I Norge kan geoidmodellen kjøpes av Statens Kartverk, se [www.statenskartverk.no](http://www.statenskartverk.no).

### 3.4.3 Geodetiske koordinater

Geodetiske koordinater ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) også kalt LLH, beskriver et punkt P i forhold til en referanseellipsoide.

- **Geodetisk breddegrad/latitude,  $\phi$** : vinkelen mellom ekvatorplanet og ellipsoidenormalen gjennom P.
- **Geodetisk lengdegrad/longitude,  $\lambda$** : vinkelen mellom meridianplanet til Greenwich og meridianplanet til P.
- **Ellipsoidisk høyde,  $h$** : høyden til punktet P over referanseellipsoiden langs ellipsoidenormalen gjennom P.

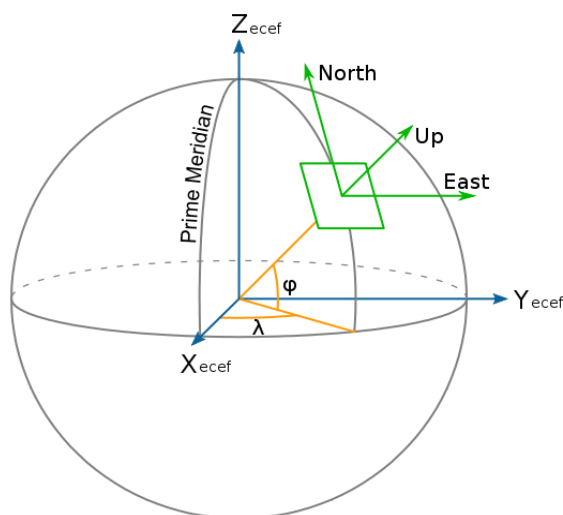
### 3.4.4 ECEF og ECI

ECEF er et kartesisk koordinatsystem som er låst fast til jordas bevegelser. For alle anvendelser på, eller i forhold til noe på, jorda er det hensiktsmessig å tenke seg et slikt system låst fast i jorda for å slippe å ta hensyn til jordas bevegelse i rommet. WGS84 er et slikt koordinatsystem. ECEF systemet roterer rundt et såkalt *Earth Centered Inertial System* (ECI) som ligger fast i forhold til stjernene. Et INS observerer vinkler i forhold til ECI. ECEF rammen benevnes med indeks  $e$ . ECI rammen benevnes med indeks  $i$ .

Forholdet mellom ECI og ECEF er gitt av jordrotasjonen da Z-aksen i ECEF sammenfaller med Z-aksen i ECI.<sup>1</sup> WGS84 defineres av jordrotasjonen  $\omega_i = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ .<sup>2</sup>

### 3.4.5 NEU:

NEU er et lokalt, toposentrisk koordinatsystem med origo i et punkt på referanseellipsoiden. NEU står for North, East, Up og beskriver aksenes retninger der Up sammenfaller med ellipsoidenormalen. NEU rammen benevnes med indeks  $g$ .



Figur 10: ECEF, NEU og geodetiske koordinater.

<sup>1</sup> J.G. Gjevestad, 2008.

<sup>2</sup> G. Seeber, 2003.

### 3.4.6 Body Frame

Koordinatsystem som ligger fast i dronen. X-aksen i flyretning, Z-aksen peker nedover og Y-aksen fullfører et HHS. Eulervinklene roll, pitch og yaw er Body Frame rotert rundt et fast system definert av nord, øst og ellipsenormalen. Eksentrisitet mellom kamera, GPS-antenne og andre sensorer er i forhold til Body Frame. Body Frame koordinater benevnes  $b$ .



Figur 11: Body Frame tegnet på AeroVision sin drone MD4-200.

### 3.4.7 Lokalt

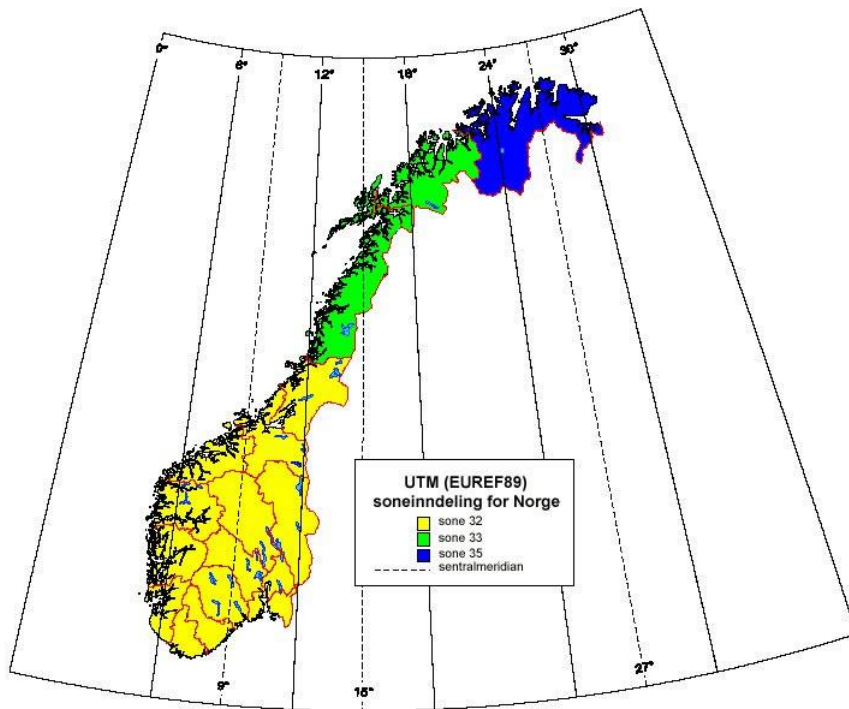
Lokale rettvinklede 3D koordinatsystem brukes for eksempel ved 3D-modellering. Disse systemene er modell koordinatsystem og trenger ikke å ha noen forankring i terrengfaste koordinater. 3D-modellering software arbeider ofte i slike modellkoordinatsystemer. De fleste 3D-modelleringsprogrammer tillater import av terrengfaste koordinater.

### 3.4.8 EUREF89

EUREF89 benytter *Universal Transverse Mercator* (UTM) projeksjonen som er et rettvinklet koordinatsystem. I Norge benyttes UTM-sone 32, 33 og 35. UTM EUREF89 har fordeler ved forvaltning av data over store områder og benyttes derfor av alle norske kommuner.<sup>1</sup> UTM EUREF89 koordinater defineres med northing (N), easting (E) og ortometrisk høyde (H). For lokale anvendelser er UTM et rettvinklet koordinatsystem som NEU.

---

<sup>1</sup> Statens Kartverk bestemte i 2008 at kartdata i alle kommuner skulle transformeres til UTM EUREF89. Kilde: [www.statkart.no](http://www.statkart.no).



Figur 12: UTM EUREF89 soneinndeling for Norge.

### 3.5 Transformasjoner

Under følger transformasjoner fra geodetiske koordinater til kartesiske koordinater og omvendt. Formlene er hentet fra *Theoretical Geodesy, Han Faan, KTH august 2007*.

Overføring av informasjon mellom de forskjellige rammene (ECEF, ECI, NEU og Body Frame) gjøres med retningscosinus matriser (Directional Cosinus Matrices, DCM).<sup>1</sup> Disse matrisene er generert som et produkt av basisrotasjoner om de ulike aksene med egenskap:  $\det(C_a^b) = 1$ , noe som gjør at de kan transponeres.

#### 3.5.1 Geodetiske til kartesiske koordinater

Det er trivielt å transformere fra geodetiske til kartesiske koordinater.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ [N(1 - e^2) + h] \sin \phi \end{pmatrix}$$

, der

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi}}$$

<sup>1</sup> J.G. Gjevestad, 2008.

### 3.5.2 Kartesiske til geodetiske koordinater

Om punktet P er på referanseellipsoiden finnes transformasjonen fra  $(x, y, z)$  til  $(\phi, \lambda, h)$  enkelt:

$$h = 0$$
$$\tan \phi = \frac{1}{1 - e^2} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$
$$\tan \lambda = \frac{y}{x}$$

Om  $h \neq 0$  kan man få en god tilnærming ved å benytte en lukket formel:

$$\tan \lambda = \frac{y}{x}$$
$$\tan \phi = \frac{z + \frac{a \cdot e^2}{\sqrt{1 - e^2}} \cdot \sin^3 \theta}{p - a \cdot e^2 \cdot \cos^3 \theta}$$
$$h = \frac{p}{\cos \phi} - N$$

der  $p, \theta, N$  beregnes,

$$p = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \tan \theta = \frac{z}{p\sqrt{1 - e^2}}, \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \phi}}$$

Et annet alternativ til denne tilnærmingen er å bruke iterativ metode.

### 3.5.3 Body Frame til NEU

Denne rotasjonen har dronens rotasjoner, Eulervinklene roll ( $\alpha$ ), pitch ( $\theta$ ) og yaw ( $\psi$ ), som input.

$$C_b^g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### 3.5.4 ECEF til NEU

Denne rotasjonsmatrisen er posisjonsavhengig med latitude ( $\phi$ ) og longitude ( $\lambda$ ) som input.

$$C_e^g = \begin{pmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) & 0 \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

### 3.5.5 Body Frame til ECEF

For å rotere fra dronens Body Frame til ECEF kombineres disse rotasjonene. Da roteres dronens GPS/INS bestemte koordinater, koordinater beregnet av sensorene ombord i dronen i Body Frame, til ECEF.

$$C_b^e = C_g^e \cdot C_b^g$$

, der

$$C_g^e = [C_e^g]^{-1}$$

### 3.5.6 Transformasjon mellom to kartesiske koordinatsystemer

For å transformere mellom to kartesiske koordinatsystem benyttes Helmert-transformasjon. Dette er en såkalt konform transformasjon der sammenhengen mellom de to systemene finnes ved tre translasjoner ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ), 3 rotasjoner ( $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ) og en skalering (s), totalt 7 parametere.

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + s \cdot R(\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3) \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}$$

$R(\psi_1 \psi_2 \psi_3)$

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi_2 \cos \psi_3 & \cos \psi_1 \sin \psi_3 + \sin \psi_1 \sin \psi_2 \cos \psi_3 & \sin \psi_1 \sin \psi_3 - \cos \psi_1 \sin \psi_2 \cos \psi_3 \\ -\cos \psi_2 \sin \psi_3 & \cos \psi_1 \cos \psi_3 - \sin \psi_1 \sin \psi_2 \sin \psi_3 & \sin \psi_1 \cos \psi_3 + \cos \psi_1 \sin \psi_2 \sin \psi_3 \\ \sin \psi_2 & -\sin \psi_1 \cos \psi_2 & \cos \psi_1 \cos \psi_2 \end{bmatrix}$$



## 4. Test av eksisterende system

Den praktiske delen av oppgaven består i å undersøke kvaliteten på georefereringen til bildene levert av AeroVision og vurdere om dataene kan benyttes som YOE for bildene.

Bildene er tatt fra UAS MD4-200 med kameraet Sigma DP1.

AeroVision leverer posisjonene som geodetiske koordinater med ellipsoidisk høyde i koordinatsystemet WGS84.

Rotasjonene leveres som Eulervinkler i enheten grader med  $10^{-1}$  grad presisjon.

### 4.1 Antagelser

- Posisjonene fra AeroVision er antennekoordinater, og ikke korrigert for eksentrisitet til kamera/prosjeksjonscenter.
- GPS og IMU beregner data med et ukjent Kalmanfilter.
- GPS posisjoneringsfrekvens på 2Hz, men det er ingen interpolasjonsrutine mellom eksponering og beregning av posisjon. Dette kan resultere i en usikkerhet på ca. 14cm i flyretning.<sup>1</sup>
- Rotasjoner er målt av en enkel IMU med  $10^{-1}$  grad presisjon. Rotasjon viser Body Frame rotasjoner i forhold til en fast ramme definert av øst, nord og opp.
- Eulervinkelen heading ( $\psi$ ) måles av et magnetisk kompass der flyretning mot magnetisk nord gir  $\kappa = 0^\circ$ . Misvisning i forhold til magnetisk nord på IMT-testfelt er  $0,8^\circ$ .<sup>2</sup>
- Det er ikke gjort noen kalibrering av komponentenes eksentrisitet.

### 4.2 Kalibrering av Sigma DP1

Før fotografering ble kameraet kalibrert for å finne den indre geometrien til kameraet. Kalibreringen ble gjort i dataprogrammet PhotoModeler som har egne rutiner for kalibreringen. PhotoModeler genererer kalibreringsrapport med IOE (vedlegg) og en kalibreringsfil for videre arbeid med samme kamera.

Det er viktig å huske på at et kamera må kalibreres på nytt om man endrer den indre geometrien til kameraet etter kalibrering. Den indre geometrien endres ved bytte av linser, om man benytter ulik zoom eller ved fysisk skade. Kameraet Sigma DP1 har som sagt fast linsesystem og kan derfor ikke zoome. Dette er en fordel da et slikt linsesystem er mer stabilt enn et kamera med zoom.

---

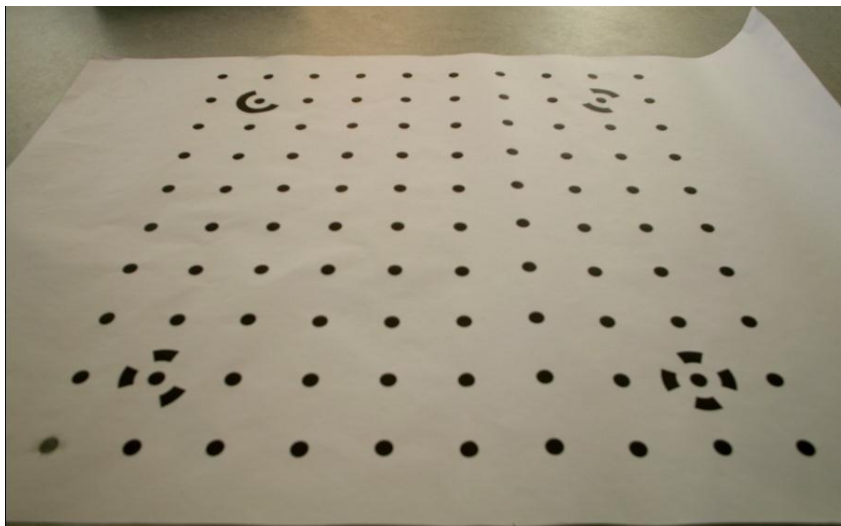
<sup>1</sup> Det tar tid å beregne en GPS posisjon. Oppdateringsfrekvensen antas å være 2Hz. På 0,5sek kan en drone med hastighet på 10km/t bevege seg 1,4meter. Denne usikkerheten kan kompenseres for ved å interpolere eksponeringstidspunkt mellom GPS-målingene.

<sup>2</sup> På Statens Kartverk sine nettsider ligger program for å beregne misvisning med årstall, lengde- og breddegrad som input. Misvisningen endrer seg med ca.  $10^{-1}$  grad pr. år.

Kameraet ble som sagt kalibrert i PhotoModeler. Dette er en automatisert prosess der man benytter et kalibreringsark levert av PhotoModeler. Kalibreringsarket består av 100 sorte kalibreringspunkter som danner et ruteneett, der 4 hjørnepunkter har en kjent form.

Kalibreringsprosessen er rask og enkel: Ta 12 bilder av kalibreringsarket. 3 bilder fra hver kant, der de 3 bildene er tatt med 90° rotasjon på kameraet.<sup>1</sup> Importer deretter bildene i til PhotoModeler med et *Calibration Project*. Velg deretter *Execute Calibration* og så gjøres kalibreringen automatisk. Selve kalibreringen tar ca. 2,5 minutter.

PhotoModeler gjennomfører kalibreringsprosessen med tilbakeskjæring i rommet og minste kvadraters metode og estimerer feilvektorer for hvert respektive punkt. På grunn av radiell fortegnning, skjevheter i linsesystem, feil i bildebrikka og den relative orienteringen til alle 12 bildene vil et punkt på kalibreringsarket bli avbildet forskjellig i alle bildene. Siden PhotoModeler kjenner igjen og refererer alle de 100 kalibreringspunktene klarer programmet og beregne alle IOE.



Bilde 4: Kalibreringsark i PhotoModeler.

Praktiske hensyn:

- Fotografer flest mulig av de 100 kalibreringspunktene i hvert bilde. Det gjør ingenting om ikke alle punktene er med i hvert bilde, men det er en fordel for stabiliteten til resultatet at så mange som mulig er med.
- Fyll bilderammen med kalibreringspunkt. Kun områder av bildebrikken som dekkes av kalibreringspunkt kan kalibreres. Verdien *Photo Coverage* sier noe om hvor mye av bildebrikken som er kalibrert. Høyere er bedre.
- Det anbefales å ha like stort kalibreringsfelt som det objektet man skal modellere, selv om dette i praksis er vanskelig å få til.

---

<sup>1</sup> Se bilde 7.

## 4.2.1 Kalibreringsresultat for Sigma DP1

Resultatet for kalibrering av AeroVision sitt kamera, Sigma DP1, presenteres under.

The screenshot shows a software interface for camera calibration. On the left, a list titled 'Cameras in Project' contains 'SIGMA DP1 [16.60] [Default]'. Below this list are buttons for 'New', 'Delete', 'Copy', 'Set as Default', 'Load from disk...', and 'Library...'. The main area is divided into several sections:

- Name:** SIGMA DP1 [16.60]
- Calibration Type:** Calibrator
- Focal Length:** 17.3466
- Format Size:** W: 21.3449, H: 14.2286
- Principal Point:** X: 10.7956, Y: 7.2949
- Lens Distortion:** K1: 2.503e-004, P1: -4.845e-005, K2: -7.242e-007, P2: 9.896e-005, K3: 0.000e+000
- Calibration Quality Values:** Overall Residual RMS: 0.1702, Maximum Residual: 0.8501, Photo Coverage (%): 88
- Used by Photos:** 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
- Image Size:** W: 2640, H: 1760
- Fiducials:** Type: No Fiducials, Fiducials: mm, Modify...
- EXIF Fields:** Make: SIGMA, Model: SIGMA DP1, Focal Length: 16.6000, Format Size: W: 21.3429, H: 14.2286

At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Bilde 5: Kalibrering, resultat.

## 4.2.2 Kommentarer til kalibrering

Kamerakonstansen ble beregnet til 17,3466mm og avviker fra produsentens verdi på 16,6mm.  $\Delta c = 0,7\text{mm}$ .

K1, K2 og K3 gir korreksjoner for radiell fortegning. Vidvinkel kamera behøver K3 for å korrigere for radiell fortegning. Gode kamera med stabile linsesystem behøves ikke K2 og K3.<sup>1</sup> I denne kalibreringen er K3 = 0 og det er som forventet.

P1 og P2 er korreksjoner til desentrering av linsesystem.

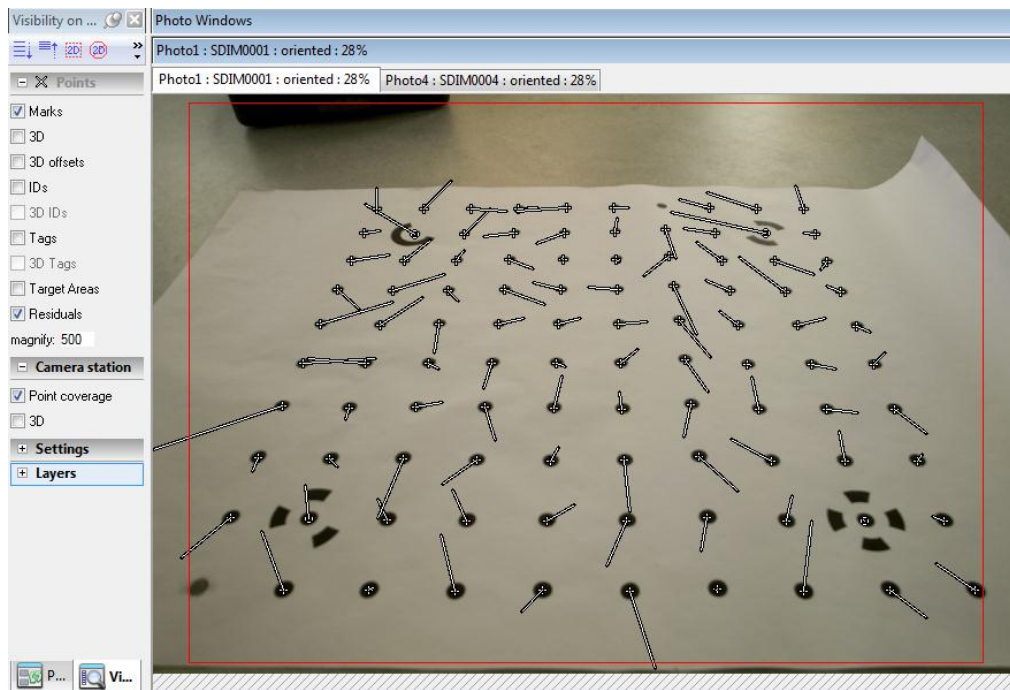
Legg merke til at Format Size, størrelsen på bildebrikka i mm, er praktisk talt identisk med oppgitt fra produsent (=EXIF Fields).

Photo Coverage = 88 %. Dette viser hvor stor andel av bildebrikka i kameraet som er dekket av kalibreringspunkter og visualiseres med den røde rammen i (bilde 6).

Vi kan også få et grafisk uttrykk for feil i bildebrikka og for å se korrelasjonen mellom feilene (se bilde 6). Fordi feilene er på  $\mu\text{m}$ -nivå er de forstørret med en faktor på 500 for å kunne visualiseres. Som vi ser er det ingen opplagt sammenheng mellom

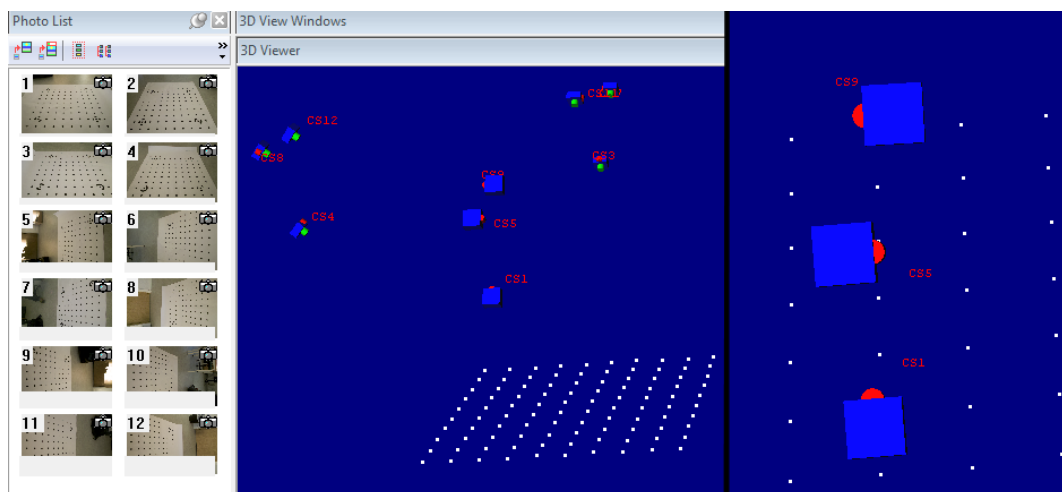
<sup>1</sup> PhotoModeler 6, Help Topics: Choosing Camera Parameters to Calibrate.

feilvektorene, og dette er positivt. Hadde mange vektorer dradd i samme retning hadde det indikert systematiske feil i linsa.



Bilde 6: Kalibrering, feilvektorer for hvert punkt.

I kamerakalibreringsprosessen beregner PhotoModeler en 3D-modell av testflaten med relative kameraposisjoner. Dette er vist i (bilde 7) med 3D-modellen t.v. og hvordan bildene er tatt med 90° rotasjon i forhold til hverandre innfelt t.h..



Bilde 7: Kalibrering, visualisert.

### 4.2.3 Effekt av ukalibrert kamerakonstant

Et ukalibrert kamera gir feil i kamerakonstanten,  $c$ , og vil forplante seg som feil målt verdi i terrengkoordinat. Generelt kan vi si at å benytte for liten  $c$  gir målinger i terrenget

som vil "ligge for høy". For dette kameraet, Sigma DP1, ville en ukalibrert kamerakonstant ( $c = 16,6$ ) føre til at målte terrengkoordinater vil ligge høyere enn den sanne verdien. En for stor  $c$  gjør at terrengkoordinater får verdier som ligger for lavt i terrenget.<sup>1</sup>

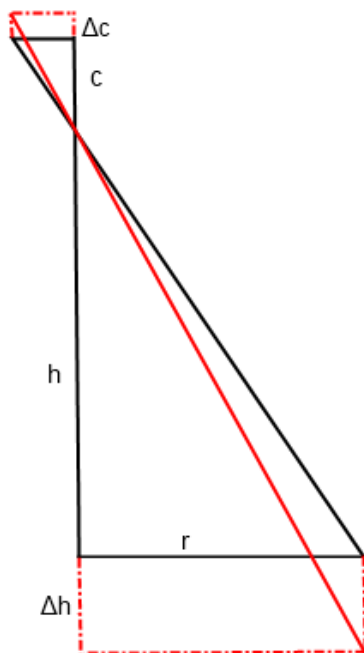
For å beregne en numerisk verdi for effekten av å benytte kameraet ukalibrert ( $\Delta c = 0,7\text{mm}$ ), antas det at det er loddrett fotografering av en flate. Dette er sjeldent tilfellet, men det visualiserer effekten av feilkalibrert kamerakonstant. Vi antar at flyhøyde  $h = 20\text{meter}$ .

Den samme effekten vil påvirke høydekoordinat ved bruk av feilkalibrert kamera og tilbakeskjæring i rommet med kontrollpunkter.

Feil i høyde som følge av ukalibrert  $c$ :

$$\frac{c}{\Delta c} = \frac{h}{\Delta h} \Rightarrow \Delta h = \frac{h \cdot \Delta c}{c} = \frac{20\text{m} \cdot 0,7\text{mm}}{16,6\text{mm}} = 0,8434\text{m}$$

I figuren under beskriver sort det ukalibrerte kameraet. Rødt er kalibrerte kamera Sigma DP1.



Figur 13: Effekt av ukalibrert kamera.

<sup>1</sup> Ø. Andersen 2002.

## 4.3 Etablering av IMT-testfelt

Testfeltets funksjon er å etablere kontrollpunkter som skal benyttes for beregning av YO med tilbakeskjæring i rommet. Testfeltet ble etablert på taket av Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi (IMT), og er tildelt navnet IMT-testfelt. Punktmarkeringene er ikke permanente.

Det er flere forhold som må tas hensyn til ved etablering av et slikt testfelt:

### 4.3.1 Praktiske hensyn

- Koordinatsystem: Testfeltet, dronen og PhotoModeler opererer alle i ulike miljøer med ulike koordinatsystem. Hva er mest hensiktsmessig for videre bruk?
- Innmålingsutstyr: GPS eller landmålingsmetoder? Hvor nøyaktig må kontrollpunktene måles?
- Hvor mange kontrollpunkter på etableres og hvordan skal de fordeles geometrisk.
- Praktiske hensyn som logistikk og punktmarkering.

For å få en oversikt over området og planlegge punktmarkering ble karttjenesten på [kart.finn.no](http://kart.finn.no) benyttet (vedlagt). Valg av koordinatsystem ble bestemt med valg av innmålingsutstyr.

Punktene ble målt inn med håndholdt GPS-mottaker med CPOS-nøyaktighet.<sup>1</sup> GPS-mottakeren var av merket TOPCON PG-AI med målebok FC-250. Stativhøyde: 2,000meter.

For å gjøre YO i enkeltbilde kreves teoretisk kun 3 punkter, men for å kontrollere mot feil og få stabil løsning må man ha flere. Det interessante er at det holder med 5-6 punkter om disse er godt fordelt i bildet. Det er også viktig å huske på *det farlige sylinder*.<sup>2</sup> For å være sikker på god løsning ble kontrollpunkter etablert på 3 forskjellige nivåer slik at de horisontale og vertikale koordinatene får forskjellig numerisk verdi.

Punktene ble markert med hvit sportstape. 6cm lange og 2cm brede biter av tape ble lagt i kryss. Det ble god kontrast mot det grå taket.

Det var trapp opp til taket, så adkomst var relativt enkelt.

### 4.3.2 Utstyr

- GPS TOPCON PG-AI
- Målebok FC-250.
- Stativhøyde: 2,000meter.
- Nøyaktighet: CPOS.

---

<sup>1</sup> CPOS er en tjeneste som kjøpes av Statens Kartverk og inneholder korreksjoner på GPS målinger slik at koordinatene får cm-nøyaktighet. DPOS og MPOS er søstertjenester med dm- og m-nøyaktighet.

<sup>2</sup> Ø. Andersen, 2003.

### 4.3.3 Innmåling

Selve innmålingen ble gjort med statiske målinger over hvert punkt, lenge nok til at nøyaktigheten på posisjonsbestemmelsen ble mellom 1-3cm.

Overføring av data fra målebok til PC ble gjort ved å eksportere dataene til KOF fil og overføre fila fra filsystemet på måleboka over til PC.



Bilde 8: IMT-testfelt, inkl. punktmarkeringer.

### 4.3.4 Høydedifferanse IMT-testfelt, Ås.

Kontrollpunktet HKP1, på taket av IMT fløy-3, kun hundre meter fra IMT-testfelt, har kjent ellipsoidisk høyde og kjent ortometrisk høyde. Dette punktet ble brukt for å beregne differansen N:

$$N = h - H$$

$$N = 156,220 \text{ meter} - 117,141 \text{ meter} = 39,079 \text{ meter}$$

Der  $h=156,220\text{m}$  og  $H = 117,141\text{m}$  for HKP1.<sup>1</sup>

Ved å korrigere alle ellipsoidiske høyder for 39,079 meter beregnes ortometriske høyder. Ved import i PhotoModeler er Z-aksen satt lik ortometrisk høyde.

Det er viktig å legge merke til at om man skal etablere et testfelt et annet sted må man benytte en geoidmodell for å beregne ortometriske høyder for dette området. Fra

---

<sup>1</sup> Bekreftet av Jon Glenn Gjevstad, oktober 2010.

1.april 2010 har man kunnet kjøpe denne høydereferansemodellen sammen med CPOS-korreksjonene fra Statens Kartverk. Denne høydemodellen gir ortometriske høyder med 2 cm nøyaktighet i vårt nasjonale høydesystem NN1954.<sup>1</sup>

#### 4.3.5 Testfeltdata

Dette er rådataene, geodetiske koordinater, for IMT-testfelt. Enhet er gra.min.sek (dms) for latitude og longitude, og meter for ellipsoidisk høyde.

Punkt ID	Latitude ( $\phi$ )	Longitude ( $\lambda$ )	Ell. Høyde (h)
100	59.395576012	10.463946752	134.819
101	59.395540393	10.463357144	147.838
102	59.395540995	10.463375537	147.757
103	59.395527399	10.463359224	147.572
104	59.395528986	10.463377794	147.619
105	59.395529657	10.463396712	147.624
106	59.395513465	10.463361538	147.355
107	59.395513842	10.463380382	147.340
108	59.395512831	10.463401313	147.315
109	59.395507422	10.463416786	146.110
110	59.395504248	10.463400807	146.145
111	59.395504379	10.463381201	146.151
112	59.395503952	10.463358991	146.223
113	59.395499563	10.463365775	146.209
114	59.395498138	10.463391043	146.238
115	59.395492510	10.463417957	146.316
116	59.395480015	10.463396897	146.143
117	59.395478962	10.463360808	146.271
118	59.395491326	10.463349667	146.339
119	59.395516006	10.463343804	144.813
120	59.395527440	10.463343680	144.730
121	59.395539776	10.463344523	144.669
122	59.395543308	10.463335383	144.680

Tabell 9: IMT-testfelt rådata: punktnummer, latitude, longitude, ellipsoidisk høyde.

<sup>1</sup> [www.statkart.no](http://www.statkart.no), 2010.



## 4.4 Fotografering

Selve fotograferingen ble gjennomført raskt. AeroVision sitt system er meget fleksibelt med tanke på oppsett og initialisering. Dronen krever noen minutter på å finne nok GPS satellitter til posisjonering, og når det er gjort går fotograferingen raskt. Hele operasjonen, inkl. 22 bilder tok under 30 minutter.

For å unngå mørke skyggepartier i bildene er det lurt å fotografere når det er et homogent lysbilde. Ved sterk sol vil kameraets eksponering føre til at skyggeområder kan oppfattes nesten sorte, og for eksempel kontrollpunkt i disse områdene kan bli vanskelig å registrere. Dette er noe man må ta hensyn til i planleggingen av fotografering og vurderes i forhold til bruken av bildene.

Bilder ble overført fra kamera i ettertid og overlevert sammen med flyrapporten via e-post. Se vedlegg for hele flyrapporten og mosaikk med alle bilder.



Bilde 9: Fotografering fra taket av IMT med Lars Nordberg fra AeroVision og Ivar Maalen-Johansen fra UMB.

### 4.4.1 AeroVision sin flyrapport

Flyrapporten er en tekstfil og består av en header og en datadel. Header oppgir generell informasjon om oppdraget: Flight #, dato og tidspunkt for flyvningen.

Datadelen er en tabell med 11 kolonner. Hvert bilde får hver sin rad. Under er en beskrivelse av hver kolonne, inkludert eksempel for bilde nr. 003 = Photo id 1.

	Eksempel:	Enhet:	Beskrivelse:
<b>Photo id:</b>	1	Tall	
<b>GPS time:</b>	11:07:43	Klokkeslett	GPS-tid.
<b>Timecode:</b>	70,873	Sekund	Relativ tid fra systemet initieres/GPS-fix.
<b>Latitude, <math>\phi</math>:</b>	59,66518313	Desimalgrader	Geodetisk koordinatsystem i WGS84.
<b>Longitude, <math>\lambda</math>:</b>	10,7759456	Desimalgrader	Geodetisk koordinatsystem i WGS84.
<b>GPS-A:</b>	155,6	Meter	Ellipsoidisk høyde over WGS84-ellipsoiden.
<b>Height:</b>	18,9	Meter	Relativ høyde over der systemet initieres/GPS-fix.
<b>Roll:</b>	-0,1	Desimalgrader	Rotasjon rundt nord-aksen.
<b>Pitch:</b>	1,3	Desimalgrader	Rotasjon rundt øst aksen.
<b>Yaw:</b>	14,1	Desimalgrader	Dronens retning i forhold til magnetisk nord.
<b>Cam.Servo:</b>	34,2	Desimalgrader	Kameraets vinkel i forhold til dronen. Forplanter seg i flyets Pitch.

Tabell 10: Beskrivelse av AeroVision sin flyrapport.

Det er ikke mulig å få annen informasjon eller data med høyere presisjon.

Kompasset har ukjent nøyaktighet. Typisk nøyaktighet er +/- 5°.

Spesifisering ang. rotasjoner: Roll er positiv ved krengetninger mot høyre. Pitch er positiv når dronens nese peker oppover. Yaw er positiv når dronen flyr mot øst.

#### 4.4.2 Kompensere for Cam.Servo

Verdien *Cam.Servo* i flyrapporten forplanter seg i pitch da *Cam.Servo* sin akse er montert parallelt med dronens y-akse. Det er kameraets orientering som er interessant og for å komme frem til kameraets orientering i Body Frame må *Cam.Servo* kompenseres for. For ikke å forveksle dronens pitch med kameraets orientering i Body Frame innføres en ny beregnet vinkel, *Tilt*:

$$Tilt = Pitch - Cam.servo$$

<b>Tilt</b>	<b>-32,9</b>	<b>Desimalgrader</b>	<b>Kameraets vinkel i Body Frame</b>
-------------	--------------	----------------------	--------------------------------------

Tabell 11: Beregnet vinkel: *Tilt*.

*Tilt* er senere sammenlignet med den beregnede fotogrammetriske vinkelen  $\phi$ .

### 4.4.3 Kompensere for misvisning

Misvisning er geografisk avhengig. Magnetisk misvisning i forhold til sann nord for området IMT-testfelt i 2010 er 0,8°. Meridiankonvergenen er vinkel mellom sann nord og rutenett-nord (UTM). Meridiankonvergenen for området IMT-testfelt er 1,5°. Når det kompenseres for begge beregnes misvisning fra UTM-nord. For området IMT-testfelt blir derfor misvisningen i forhold til UTM = -0,7°.

AeroVision sin yaw ( $\psi$ ) må derfor kompenseres for misvisning for å finne yaw i UTM EUREF89.

$$yaw^{\circ} = yaw^{\circ} - 0.7^{\circ}$$

### 4.4.4 Eksempel på flyrapport

Utsnitt av flyrapporten for fotografering av IMT-testfelt presenteres under. Den viser data for de 3 første bildene. Komplette flyrapport for fotografering av IMT-testfelt er vedlagt. Totalt ble det fotografert 22 bilder.

Header	Flight #337	2010-10-01	11:06								
	Photo	GPS Time	Timecode	Latitude	Longitude	GPS-A.	Height	Roll	Pitch	Yaw	Cam.Servo
Data:	001	11:07:43	70.873	+59.66518313	+10.77594560	155.6	18.9	-0.1	+1.3	+14.1	+34.2
	002	11:08:05	93.629	+59.66518531	+10.77594874	161.5	24.6	-0.7	+1.1	+14.6	+45.0
	003	11:08:13	101.627	+59.66518627	+10.77595067	161.4	24.5	-0.3	+1.5	+13.6	+45.0

Tabell 12: Utdrag fra flyrapporten.

### 4.4.5 Bakkeoppløsning – geometrisk oppløsning

Detaljgraden på bakken et kamera kan registrere måles i hvor stor utstrekning en piksel har på bakken, vanligvis kalt *ground sample distance* (GSD), men på norsk bakkeoppløsning. Bakkeoppløsning er avhengig av antall piksler bildebrikken kan registrere og distanse fra projeksjonscenter til avbildet objekt. For skråbilder er det stor forskjell på bakkeoppløsningen til objektene i bildet.

For å beregne bakkeoppløsning for Sigma DP1 er det målt kontrollengder i terreng og telt antall piksler i bilde nr. 003. Dette er gjort ved 4 kontrollpunkter i bildet for å kunne beregne distanse fra kamera til den aktuelle målingen.

Kontrollpunkt	Distanse	Kontroll lengde	Antall piksel	Bakkeoppløsning
Nr. 001	25,1 meter	15 cm	7 piksel	2,14 cm/piksel
Nr. 009	20,0 meter	13 cm	11 piksel	0,85 cm/piksel
Nr. 006	17,5 meter	15 cm	18 piksel	0,83 cm/piksel
Nr. 018	11,5 meter	25 cm	37 piksel	0,68 cm/piksel

Tabell 13: Bakkeoppløsning målt i bilde nr. 003.

Dette er kun estimeringer. Med et 4,67 megapiksel kamera får bilder tatt på 25 meter avstand en geometrisk oppløsning på ca. 2 cm/piksel. På 10 meters avstand oppnår man en nøyaktighets grad på ca. 0,6cm/piksel.

## 4.5 Transformasjon til ønsket koordinatsystem: UTM EUREF89

Det ble gjort noen forsøk på å arbeide med koordinater og rotasjoner i ECEF, men det viste seg at det var vanskelig å sammenligne rotasjoner i dette systemet. Valget falt på å transformere både koordinatene for IMT-testfelt og oppgitte koordinater fra AeroVision til UTM EUREF89. Det er som sagt antatt at AeroVision sine rotasjoner er rundt de samme aksene som UTM EUREF89.

Samtidig er det hensiktsmessig å jobbe med UTM EUREF89 koordinater da dette er standard for kartbransjen i Norge.

Transformasjon fra geodetiske koordinater til UTM EUREF89 er posisjonsavhengige og har lengde og breddegrad som input.

Arbeid i PhotoModeler krever koordinater oppgitt i et høyrehånd system (HHS), så NEU ble gjort om til ENU ved å bytte om på nord og øst koordinater. I PhotoModeler gav dette X-akse mot øst, Y-akse mot nord og Z-akse lik ortometrisk høyde.

Bytte av akser medførte at en viktig korleksjon måtte gjøres på AeroVision sin oppgitte rotasjon kappa. Kappa fikk feil fortegn i forhold til koordinater i EUREF89 og ble endret slik:

$$\text{yaw} = (-1) \cdot \text{yaw}$$

UTM EUREF89 koordinater for IMT-testfelt og for AeroVision sin flyrapport er vedlagt.

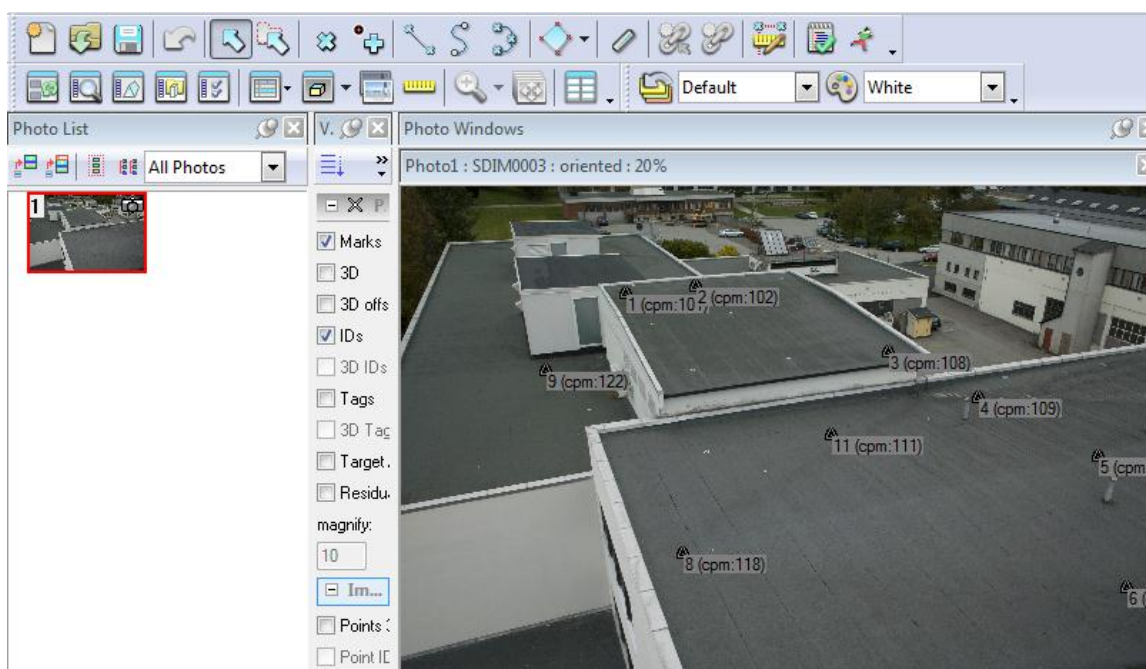
## 4.6 Bestemmelse av YO

### 4.6.1 PhotoModeler

Ytre orientering i PhotoModeler gjøres med tilbakeskjæring i rommet.

Under er fremgangsmåten beskrevet:

1. Åpne nytt *point-based* prosjekt. Kameraets IO hentes fra kamerakalibreringsfila som ble lagret etter kalibreringen.
2. Velg hvilket bilde som skal orienteres.
3. Importerer IMT-testfelt kontrollpunkter fra fil, totalt 22 stk. Prosjektets akser (ENU) og enhet (meter) defineres av disse kontrollpunktene.
4. Mål bildekoordinater ( $x'y'$ ) ved å markere kontrollpunkter i bildet. Marker først et kontrollpunkt i kontrollpunktlisten og marker deretter dette punktet i bildet. Forstsett å markere 5-10 kontrollpunkter godt fordelt i bildet.



Bilde 10: Markering av kontrollpunkter i PhotoModeler.

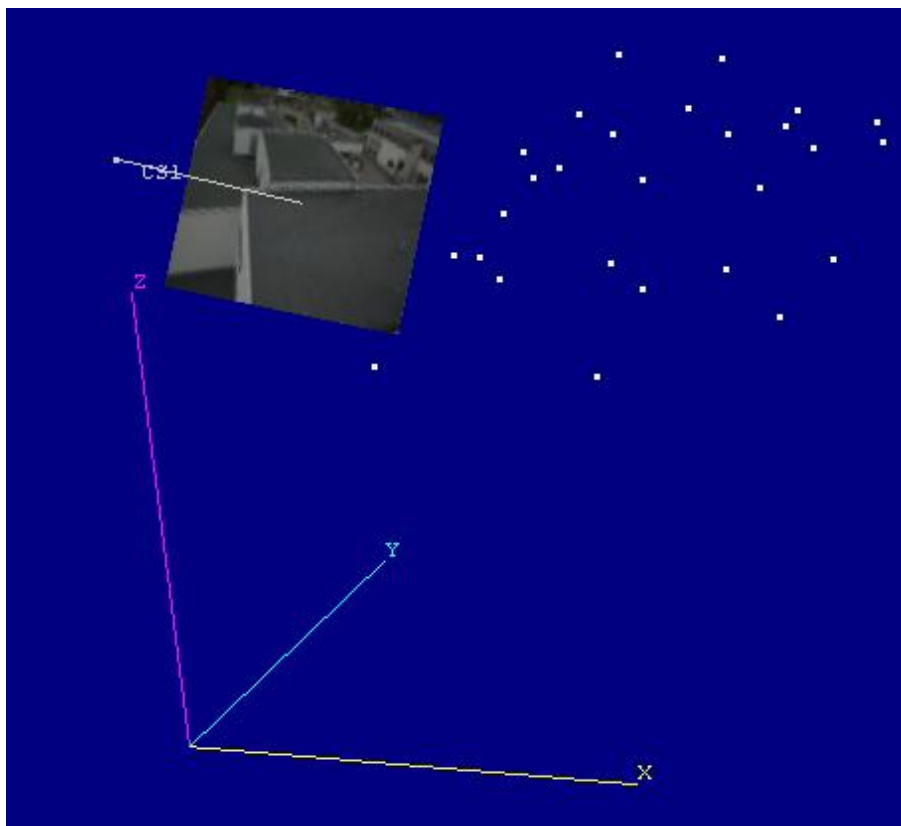
5. Velg *process*. PhotoModeler beregner YO for kameraet iterativt med tilbakeskjæring i rommet.

Resultatet gir projeksjonssenterets posisjon ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) i kontrollpunktens koordinatsystem (UTM EUREF89).

Rotasjonene i PhotoModeler (*Camera Station Angles*) må korrigeres før de kan betraktes som fotogrammetriske vinkler. Rotasjoner oppgitt som *Camera Station Angles* i PhotoModeler er i et modellkoordinatsystem. For å finne de fotogrammetriske vinklene må det påføres enkle korreksjoner som beskrevet i 4.6.2.

[-] Photograph/Camera station (1)	
Photo Number	1
Camera	SIGMA DP1 [16.60]
Processing action	Use and adjust
Photo Texture quality	0
Rotation	No rotation
+ Inverse camera solves for	[]
Description	SDIM0003
Image file name	C:\Users\Anders\Documents\My Dr...
Mask image file name	
[-] Camera station position	600049.186, 6615461.499, 114.264
X	600049.185874
Y	6615461.498944
Z	114.264091
[-] Camera station angles (degrees)	60.477, -17.993, -7.564
Omega (deg.)	60.477393
Phi (deg.)	-17.993276
Kappa (deg.)	-7.564420
Oriented	<input checked="" type="checkbox"/>

Bilde 11: Resultat av tilbakeskjæring i rommet i PhotoModeler for bilde 003.



Bilde 12: 3D visualisering av projeksjonssenter (CS1), bilde, kontrollpunkter og koordinatsystemets akser.

#### 4.6.2 Korreksjon av rotasjoner

*Camera Station Angles* i PhotoModeler må påføres korreksjoner for å kunne betraktes som fotogrammetriske vinkler. Grunnen er at PhotoModeler håndterer vinkler i et modellkoordinatsystem.

- Phi må korrigeres  $90^\circ$ , slik at  $\varphi = \varphi - 90^\circ$ .
- Oppgitt Omega er av ukjent karakter. For å finne fotogrammetrisk omega ( $\omega$ ) må man i PhotoModeler gå inn i *Photo Table All* og benytte verdien *Roll Angle (deg)*.
- Kappa er korrekt.

## 4.7 Resultater

Under presenteres utsnitt av resultater for YO. Fullstendige resultater er vedlagt.

### 4.7.1 Beregnede YO ved tilbakeskjæring i PhotoModeler.

bilde nr:	E	N	Orto. H	$\varphi$	$\omega$	$\kappa$
3	600 049,1859	6 615 461,4989	114,264	-29,522607	-2,358	-7,56442
4	600 049,1944	6 615 461,7302	119,830	-41,908699	-3,2931	-9,96666
5	600 049,0405	6 615 461,7922	119,712	-41,29526	-2,8951	-9,318521
6	600 068,8520	6 615 464,6767	119,779	-50,257241	-2,0061	35,32611
7	600 069,2681	6 615 465,5933	119,460	-51,05867	-2,0288	35,907724
8	600 068,6380	6 615 465,3579	122,459	-50,092504	-2,5628	35,610819
9	600 068,8065	6 615 465,1194	122,456	-50,400352	-2,4744	36,085229

Tabell 14: Beregnede YO ved tilbakeskjæring i PhotoModeler.

### 4.7.2 Oppgitte YO fra AeroVision:

Dataene er transformert til UTM EUREF89, samt korrigert for fortegnseffekt i yaw.

Bilde nr:	E	N	Orto. H	Tilt	roll	yaw
3	600049,497	6615462,797	116,551	-32,9	-0,1	-13,4
4	600049,667	6615463,044	122,451	-43,9	-0,7	-13,9
5	600049,773	6615463,154	122,351	-43,5	-0,3	-12,9
6	600069,192	6615465,618	122,051	-44	-1,7	50,8
7	600069,366	6615465,855	120,051	-43,9	-1,4	50,8
8	600069,209	6615465,517	122,951	-43,1	-2,1	51,6
9	600068,847	6615465,886	123,651	-43,1	-2	51,9

Tabell 15: Oppgitte YO fra AeroVision, transformert til UTM EUREF89.

### 4.7.3 Beregnet posisjon i 3ds Max:

Rambøll gjør mye av sin 3D visualisering i Autodesk programvare 3ds-Max. De gjorde en YO av bilde nr. 003 i 3ds-Max.

Bilde	E	N	Orto. H	pitch	roll	heading
3	600049.287	6615461,067	114,441	63,597	-0,467	-18,903

Tabell 16: Rambøll beregnet YO for bilde nr. 003 i 3ds-Max.



#### 4.7.4 Feilvektorer, vinkelfeil og RMS-error.

Ved å sammenligne oppgitte og beregnede YOE beregnes feilvektorer. Feilvektor og distanse i rommet mellom disse to posisjonene er beregnet med euklidisk avstand.

Under presenteres et utvalg av data. Fullstendige resultater er vedlagt.

Bilde nr.	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta \text{Ortho. H}$	$\Delta \text{phi}$	$\Delta \text{omega}$	$\Delta \text{kappa}$
3	-0,3111	-1,2981	-2,2869	3,4	-2,3	5,8
4	-0,4726	-1,3138	-2,6214	2,0	-2,6	3,9
5	-0,7325	-1,3618	-2,6391	2,2	-2,6	3,6
6	-0,3400	-0,9413	-2,2717	-6,3	-0,3	-15,5
7	-0,0979	-0,2617	-0,5911	-7,2	-0,6	-14,9
8	-0,5710	-0,1591	-0,4920	-7,0	-0,5	-16,0
9	-0,0405	-0,7666	-1,1949	-7,3	-0,5	-15,8

Tabell 17: Feilvektorer for AeroVision sin oppgitte posisjon.

	Euklidisk distanse fra kamera til IMT-testfelt (m)	Euklidisk distanse fra beregnet til oppgitt kameraposisjon (m)	% feil i AeroVision sin posisjonsbestemmelse
3	12,970	2,647	20,4
4	16,631	2,970	17,9
5	16,604	3,058	18,4
6	16,803	2,482	14,8
7	16,709	0,654	3,9
8	18,707	0,770	4,1
9	18,827	1,420	7,5

Tabell 18: Euklidiske distanser: distanse fra testfelt, feildistanse og % feil.

Fordi feil i posisjonering er absolutt, uansett hvor langt fra objektet fotograferingen er gjort, er det greit å merke seg hvor stor prosentvis feilen blir ved nærfotogrammetri. Legg merke til at feilen blir så stor som 20 % ved fotografering fra 13 meter, som er tilfellet for bilde nr. 003.

Ved å benytte *root mean square* (RMS) på feilvektorene til alle de 22 bildene ble numerisk verdi for kvaliteten på AeroVision sin posisjonsbestemmelse, fordelt i hver akse, beregnet.

E	N	U
0,409m	0,688m	1,454m

Tabell 19: RMS for posisjonsbestemmelse fra MD4-200.

#### 4.7.5 Effekt av feil i rotasjoner

Feil i phi og omega viser seg å være på noen grader, mens feilen i kappa er så stor som 4 – 19 grader. Om det stemmer at kappa er beregnet med magnetisk kompass kan det være en av hovedårsakene.

For å beregne effekten av feil i rotasjoner på terrengekordinater antas loddrett fotografering av et flatt terreng og beregning av feil ut fra punktet direkte under dronen. Generelt kan man si at effekten vil bli større i utkant av bildet og ved lengre distanser mellom kamera og fotografert objekt. Numeriske eksempler er hentet fra bilde nr. 003.

Feil i øst-kordinat som følge av feil i phi ( $\Delta\varphi$ ):

$$\Delta E = \sin \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\varphi)$$

Feil i nord-kordinat som følge av feil i phi ( $\Delta\varphi$ ):

$$\Delta N = \cos \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\varphi)$$

Feil i øst-kordinat som følge av feil i omega ( $\Delta\omega$ ):

$$\Delta E = \sin \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\omega)$$

Feil i nord-kordinat som følge av feil i omega ( $\Delta\omega$ ):

$$\Delta N = \cos \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\omega)$$

#### Slått sammen:

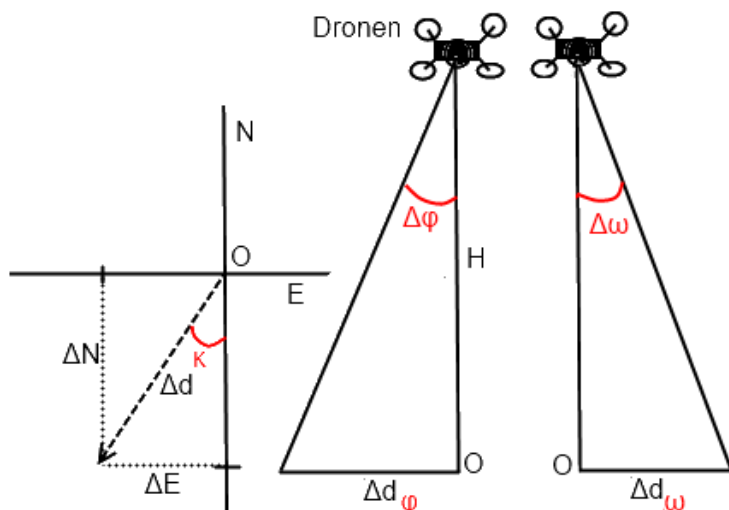
Feil i øst-kordinat som følge av feil i phi ( $\Delta\varphi$ ) og omega ( $\Delta\omega$ ):

$$\Delta E = \sin \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\varphi) + \sin \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\omega)$$

Feil i nord-kordinat som følge av feil i phi ( $\Delta\varphi$ ) og omega ( $\Delta\omega$ ):

$$\Delta N = \cos \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\varphi) + \cos \kappa \cdot (H \cdot \tan \Delta\omega)$$

Der H er flyhøyde.



Figur 14: Effekt av feil i rotasjoner.

Feil for bilde 003 med  $\Delta\varphi = 3,4$  og  $\Delta\omega = -2,3$ :

$$\Delta E = \sin -7,56^\circ \cdot (13m \cdot \tan 3,4^\circ) + \sin -7,56 \cdot (H \cdot \tan -2,3) = 3,3\text{cm}$$

$$\Delta N = \cos -7,56^\circ \cdot (13m \cdot \tan 3,4^\circ) + \cos -7,56 \cdot (H \cdot \tan -2,3) = 24,8\text{cm}$$

Selv om vi ser at feilene i terrengkoordinat blir relativt små, er det viktig ikke å la seg lure av den meget forenklete situasjonen som er beskrevet.

## 4.8 Diskusjon:

For alle nærfotogrammetriske anvendelser av bilder tatt fra bevegelige plattformer er det viktig å kunne beregne YO for bildet i opptaksøyeblikket. Som nevnt finnes det manuelle metoder som beregner YO (tilbakeskjæring i rommet), men med GPS/INS kan YO beregnes direkte "on-the-fly". Om denne muligheten utforskes vil det åpne for nye, spennende bruksområder for nærfotogrammetri.

For å kunne gjøre en direkte YO av bilder tatt fra droner må man ta hensyn til at en drone er en ustabil plattform. Dette påvirker GPS-posisjoneringen en del, men det kan se ut som den store utfordringen er å integrere retningssensorer på en god måte. Dette er ikke dokumentert for AeroVision sitt system.

Det er to hensyn å ta:

Nøyaktigheten til systemet, som er avhengig av bl.a. hvor god posisjonsbestemmelse GPS beregner og hvor ofte. Må det interpoleres mellom flere målinger, eller klarer man å styre dronen slik at den er "i ro" i lufta når bildet blir tatt? GPS har som nevnt en lav samplingsfrekvens. Det bør gjøres en integrering av GPS/INS og da vil man kunne få relative målinger med en frekvens opptil 500Hz. Jeg vil ikke tro at det da fortsatt er nødvendig med interpolering mellom posisjonsbestemmelse og eksponering. Ved

tradisjonell flyfotografering, med en flyhastighet på mange m/s, er dette nødvendig, men en drone kan styres så den holdes "i ro" i lufta ved fotografering. Den absolutte posisjonsbestemmelsen med GPS kan forbedres med differensierte målinger eller etterprosessering som PPP. Presisjonen til dataene, spesielt rotasjon, må forbedres.

Kontroll på systemet: eksentrisiteten mellom alle sensorer ombord i dronen må være kjent. Generelt har en drone 3 sensorer: en GPS-antenne, en IMU med akselerometer og gyro og et kamera. Både de relative posisjonene og relative vinkler mellom disse sensorene må være kjent og korrigeres for, slik at alle målingene er i Body Frame for videre bruk. Alle sensorene må monteres fast i en stiv ramme. Hvordan dette skal løses med ønske om å benytte ulike kameravinkler blir en utfordring for designet av dronen.

Ved manuell 3D-modellering, for eksempel i software fra 3ds-max<sup>1</sup> eller PhotoModeler<sup>2</sup> er droner meget egnet som plattform for fotografering. Da stilles det ingen krav til YO. For eksempel kan AeroVision gjennomføre autonome oppdrag, og fotografering av en bygning eller kvartal tar typisk 30minutter.

## 4.9 Konklusjon

Data levert av AeroVision kan ikke benyttes direkte som ytre orienteringselement. Bildene kan derfor ikke draperes på eksisterende 3D-modeller automatisk, uten manuelt arbeid.

Droner er en egnet plattform for nærfotogrammetri da de er enkle å operere og kan gjennomføre autonome oppdrag på kort varsel og kan fotografere fra utilgjengelige posisjoner.

### 4.9.1 Posisjoner

Nøyaktigheten til AeroVision sine posisjonsdata er på meter-nivå, noe som karakteriseres som ok for udifferensierte målinger. Eksentrisiteten mellom GPS-antenne og projeksjonssenter er ikke målt inn, og dette kunne korrigeres for noe av feilen. AeroVision sitt system benytter ikke differensiel GPS eller annen databehandling (CPOS eller PPP), noe som ville forbedret posisjonsnøyaktigheten.

AeroVision sin posisjonering nøyaktighet er meget egnet til autonome flyvninger og for å programmere inn såkalte *points of interest* (POI). Slike POI kan være et fotograferingspunkt, men det går ikke å benytte dette fotograferingspunktet direkte som fotogrammetrisk YO om man vil gjøre nøyaktige målinger i enkeltbilde. Posisjoneringen kan benyttes som en god startverdi ved utjevning mellom flere bilder.

AeroVision sine data er som sagt for grove til å benyttes som YO. Det finnes metoder som gjør at AeroVision sine bilder kan benyttes for kartlegging, for eksempel

---

<sup>1</sup> [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)

<sup>2</sup> [www.photomodeler.com](http://www.photomodeler.com)

bildematching. Om man ønsker å forbedre systemet må dronen bygges med spesielle hensyn som beskrives i siste del av oppgaven.

#### **4.9.2 Rotasjoner:**

Rotasjonene oppgitt av AeroVision er grove og kvaliteten er mangelfullt dokumentert. Spesielt kappa har feil helt opp mot 20 grader, noe som sannsynligvis kan forklares med at magnetisk kompass ikke egner seg for å beregne vinkelen kappa.

Rotasjoner i flyrapporten har en presisjon på bare  $10^{-1}$  grad.

Kameraet henger i en løs ramme under dronen og det gjør at man ikke kan kontrollere feilene og derfor heller ikke si noe om systematiske feil som kunne blitt korrigert for i etterprosessering.

Oppgitte rotasjoner kan benyttes til navigering, men ikke til fotogrammetriske formål.

## 5 Forbedring av eksisterende system

Det er ingen tvil om at UAV som plattform for ulike sensorer vil ha betydning for en rekke ulike applikasjoner i fremtiden. Allerede de siste årene har det vært en eksplosjon av antall UAS til både sivil og militær bruk. De ulike systemene spenner fra flere tonn tunge UAS med rekkevidde på flere kilometer, til UAS med droner på bare 15 gram. Felles for alle er at de ikke er bemannet og derfor kan bygges og manøvreres på en helt annen måte enn om man måtte ha en pilot i dronen.

For nærfotogrammetrisk bruk er det mikrodroner som er mest anvendelige. De har en rekke fordeler.

- Små og fleksible, kommer til over alt, selv i farlige miljøer.
- Flyr under få restriksjoner. Kun krav om flyhøyde lavere enn 150meter over bakken og VLOS.
- Kan løfte kamera og andre lette sensorer.
- Kan fly autonomt via forhåndsdefinerte punkter.
- Kan ta bilder fra alle vinkler og holdes "i ro" i luften.

### 5.1 Tekniske forbedringer

Mikrodronen til AeroVision er meget flyvedyktig, men beregningen av kameraets ytre orienteringselementer må integreres i designet av selve dronen om bildene skal kunne benyttes til fjernmålinger. Slik systemet er i dag er bildene gode for oversiktsbilder og visualisering, men ikke for fotogrammetriske formål som fremstilling av kart, ortofoto eller 3D-modellering. Hovedårsakene er at kameraet henger løst under dronen, at eksentrisiteter ikke er målt inn og at integrering av GPS/INS er ukjent.

Det er mange paralleller til tradisjonell flyfotografering, men fordi droner er ustabile plattformer som beveger seg raskt i alle retninger stilles det høyere krav til beregning av YO. Etterprosessering som aerotriangulering eller blokkutjevning kan ikke benyttes i enkeltbilde, og i de fleste nærfotogrammetriske prosjekter er det komplisert å benytte kontrollpunkter.

Målsetningen her er å skissere hva som kreves av et UAS for å kunne beregne YO direkte og med så god nøyaktighet at dataene kan benyttes til automatiserte fotogrammetriske prosesser.

#### 5.1.1 Montering: Innmåling av eksentrisitet

For direkte beregning av YO kreves det at dronen er utstyrt med posisjoneringsutstyr og IMU, i tillegg til kameraet. Disse tre komponentene kan nødvendigvis ikke være montert på samme sted i dronen, noe som innebærer en eksentrisitet mellom komponentene. Denne eksentrisiteten må være kjent. Kalibrering av eksentrisiteter kan gjøres med landmålingsmetoder. Det er viktig at alle tre komponentene er fastmonterte i en felles,

stiv ramme. Det finnes firmaer som spesialisere seg på innmåling av slike komponenter.<sup>1</sup>

Om man velger å bytte kamera i ettertid er man nødt til å måle inn eksentrisitet på nytt. Dette gjøres gjennom en ny kalibrering i laboratorium etter montering av det nye kameraet.

For å kunne ta skråbilder fra dronen må kameravinkelen bestemmes. Et forslag kan være å konstruere en ramme som gir mulighet til å montere kamera i forhåndsbestemte vinkler, for eksempel i 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° og 90°. Her tilsvarer 90° et bilde tatt parallelt med dronens x-akse. Ønsker man derimot å benytte en servo må man vite at slike vinkler kan være unøyaktige. Det er en fordel å benytte en servo med diskrete vinkler. Å ha en servo man kan styre fra bakken har dog noen opplagte fordeler.

### 5.1.2 Nøyaktighet på GPS

Som målingene viste er nøyaktigheten på GPS målingene typisk på meter-nivå i X- og Y-koordinat og det dobbelte i Z-koordinat. Dette er ikke godt nok for nærfotogrammetriske prosjekter der man ønsker cm-nøyaktighet både horisontalt og vertikalt.

Et forslag er å benytte *real time kinematic* (RTK) GPS. RTK GPS benytter differensierte GPS-målinger. For UAS vil da bakkestasjonen benyttes som kjent referansestasjon og dronen som en såkalt rover. Bakkestasjonen må da stedfestes med cm-nøyaktighet (CPOS eller landmåling) og korreksjonene på dronens posisjon må kunne sendes til dronen via radiolink.

Et enda mer fleksibelt alternativ er å benytte Statens Kartverk sin CPOS tjeneste direkte i dronen. Da opprettes en lokal, *virtuell referansestasjon* (VRS) på bakgrunn av permanente geodetiske stasjoner. Ved å benytte CPOS-tjenesten vil man kunne oppnå posisjonsnøyaktighet >5cm horisontalt og >8cm vertikalt *on-the-fly* (OTF).<sup>2</sup> Om man vil benytte CPOS direkte med en VRS kreves det at dronen er utstyrt med et modem for å kunne motta korreksjonene og at GPS-mottakeren har mulighet for å benytte korreksjonene.

Som nevnt selger Statens Kartverk høydereferansemodell (HREF) sammen med CPOS, slik at man kan få ortometriske høyder direkte. For store deler av landet gir dette nøyaktighet bedre enn 2cm.<sup>3</sup>

Et annet forslag er å benytte en form for etterprosessering av data. Her kan man for eksempel benytte *precise-point-positioning* (PPP) for å oppnå cm-nøyaktighet.

---

<sup>1</sup> Metronor er en slik bedrift. De spesialisere seg på innmåling av koordinatsystemer. Se [www.metronor.com](http://www.metronor.com)

<sup>2</sup> [www.statkart.no](http://www.statkart.no)

<sup>3</sup> [www.statkart.no](http://www.statkart.no)

### 5.1.3 Nøyaktighet på INS

INS består av en *Inertial Measurement Unit* (IMU) og beregningsrutiner for IMU dataene. En IMU består av akselerometer som måler akselerasjonen i tre retninger og gyro som måler vinkelhastighet rundt de tre aksene. Ved å integrere data fra IMU beregnes fart, posisjon, og rotasjon. Den relative nøyaktigheten til disse dataene beregnet av INS er på mm-nivå og med oppdateringsfrekvens på 100-500Hz.

For å finne posisjon og rotasjon integreres altså IMU-data. Effekten av integrasjon er at den relative nøyaktigheten degenerer. Ved å benytte absolutt posisjonering fra GPS vil man kunne håndtere denne degenereringen. Man kan si at de to systemene komplimenterer hverandre: god relativ nøyaktighet og oppdateringsfrekvens fra INS og god absolutt posisjonering med GPS. Resultatet blir mm-nøyaktighet på absolutt posisjonering, og rotasjoner med presisjon bedre enn  $10^{-3}$ .

### 5.1.4 Kamera

Kamera må monteres på den samme stive rammen som GPS og IMU (Body Frame) og projeksjonscenteret må måles inn. Den indre geometrien til kameraet må kalibreres så IOE er kjente størrelser. Etter kalibrering må den indre geometrien til kamera holdes fast.

Kameraet må være ombygd slik at det kan kommunisere med dronen og med bakkestasjonen.

Kvaliteten på bildene avhenger av antall piksler, linsesystem, størrelse på bildebrikka og hvordan bildebrikka lagrer verdier i pikslene. AeroVision sitt kamera Sigma DP1 har en full-skala bildebrikke og fast linsesystem og egner seg derfor godt for nærfotogrammetri.

### 5.1.5 Dataprosessering

For å dra full nytte av de komplementære egenskapene til GPS og INS må det implementeres beregningsrutiner som håndterer rådataene fra sensorene.

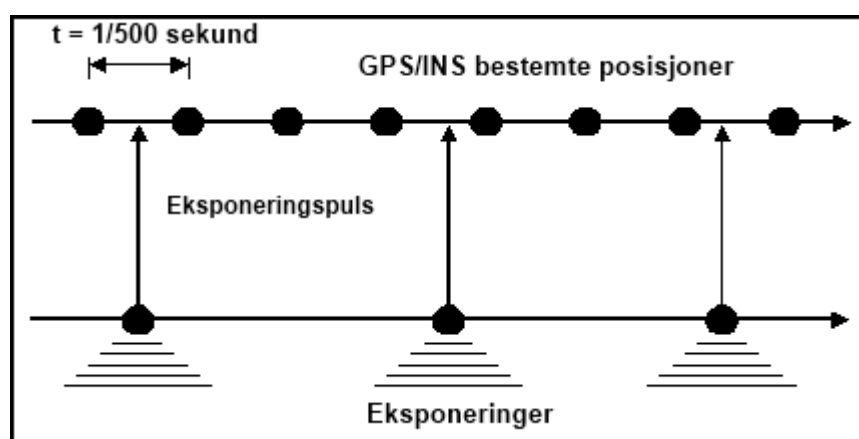
De endelige verdiene GPS/INS leverer bør beregnes med et Kalmanfilter. Kalmanfilter er en rutine for å oppdatere foreløpige verdier basert på allerede beregnede og forventede data.

Et Kalmanfilter for GPS/INS beregner en forventet neste posisjon og rotasjon ut fra GPS/INS målinger og beregnet posisjon/rotasjon. Deretter beregnes usikkerheten til den forventede verdien. Denne usikkerheten benyttes som vektning når det beregnes et vektet gjennomsnitt mellom forventet og beregnet verdi. Dette vektete gjennomsnittet for posisjon og rotasjon er ofte nærmere sann verdi enn verdiene fra målingene alene. Kvaliteten på Kalmanfilteret avhenger i stor grad av om input er beregnede verdier eller rådata fra sensorene.



Kalmanfilter er en anerkjent data algoritme for prosessering av geografisk data og benyttes bl.a. i de fleste navigasjonsløsninger.

Når GPS/INS har beregnet dronens posisjoner og orientering ved kjente tidspunkt kan kameraets posisjon ved eksponering interpoleres mellom GPS/INS-målingene. Bildet blir tatt med en tidsoffset i forhold til GPS/INS og denne offseten fører til feil i YO (se figur 15). INS støttet posisjonsbestemmelse kan gi oppdateringsfrekvens på opptil 500Hz. Om plattformen (mikrodronen) kan "stå stille" i luften vil denne feilen bli ubetydelig og en slik interpolering unødvendig.<sup>1</sup> Det må legges til at ved så raske beregninger stilles det også høye krav til klokken som beregner tidsstempelet for hver måling.



Figur 15: Interpolering av GPS/INS data for posisjonsbestemmelse ved eksponering.

## 5.2 Bildematching og blokkutjevning

Ved å benytte bildematching kan man lage ortofoto og overflatemodeller med høy nøyaktighet, selv med bilder fotografert fra droner med grov ytre orientering. Dette krever fotografering av flere overlappende bilder og er utenfor denne oppgavens begrensning, men tas med for å vise muligheter for andre anvendelser med drone som plattform for fjernmåling.

Ved å ta mange, overlappende bilder med grov YO som startverdi, og benytte bildematching, klarer man å lage sømløse mosaikker av bildene. Med blokkutjevning lages georefererte mosaikker og med etterprosessering genereres digitale overflatemodeller (DSM). Smartplanes AB har selv utviklet programvare de kaller Personal Aerial Mapping Software (PAMS) og sier de oppnår DSM med høydenøyaktighet bedre enn 10cm og ortofoto nøyaktighet bedre enn 5cm uten bruk av YO.<sup>2</sup> Teoretisk kan AeroVision sin drone fungere som en plattform for slike oppdrag.

<sup>1</sup> Anta en bevegelse på 1km/t og INS oppdateringsfrekvens på 500Hz. Da vil dronen bevege seg 0,5mm mellom hver posisjonsbestemmelse.

<sup>2</sup> [www.smartplanes.se](http://www.smartplanes.se)

Bildematching kan også benyttes til å lage såkalte 3D-Views. Da blir mosaikker av bilder presentert slik at man får en følelse av dybde i bildet, men det er en lang vei å gå til 3D-modeller av for eksempel bygninger.<sup>1</sup> Google StreetView er et populært eksempel der det er benyttet gode matchingsalgoritmer sammen med vanlig satellittnavigasjon.<sup>2</sup>

### 5.3 Andre sensorer: Laserskanning

Det kan være interessant å montere laserskanningsutstyr på droner. De samme kravene for montering av sensor gjelder for laserskanner som for kamera. Laserskanner må være montert fast i en stiv ramme, sammen med GPS/INS og eksentrisitetene må kalibreres i laboratorium.

En laserskanner genererer enorme mengder data. Med flere tusen registreringer per sekund skal det beregnes nye YO like mange ganger. Dette stiller enda høyere krav til integreringsrutiner og interpolering av registreringer mellom GPS/INS og lasermålinger.

Laserskanning fra fly krever kontrollpunkter for å kunne utjevne feil. Dette vil i større grad være nødvendig ved bruk av drone som plattform.

Rent praktisk er laserskanneren en tung sensor fordi den krever mye batteri. AeroVision sin drone, MD4-200, har en maksimum payload på 200gram. Det er ikke funnet informasjon om så lette laserskannersystemer tilgjengelig. Det minste systemet jeg har funnet leveres av Laseroptronix. Juni 2010 lanserte de sin Mini Laser Radar med en vekt på 1kg og skannfrekvens på 36KHz.<sup>3</sup> En slik laserskanner vil teoretisk kunne bæres av et MD4-1000 UAS som har payload = 1,2kg.<sup>4</sup> Det vil være interessant å teste dette om man får på plass en god montering og prosessering av data.

### 5.4 3x3 regler for nærfotogrammetri

For nærfotogrammetriske prosjekter, som 3Dmodellering av bygninger og dokumentasjon av arkitektur finnes det et sett med 3x3 regler som er skrevet, testet og publisert av (Waldhäusl & Ogleby, 1994). Disse reglene gir retningslinjer for dokumentasjon før, under og etter fotografering.

3x3 regler for enkel dokumentasjon av bygninger har denne strukturen:

#### 3 Geometriske regler:

- Forbered kontrollinformasjon. Mål inn kontrolldistanser, både vertikalt og horisontalt, og sørg for at kontrollpunktene er synelige i bildene.

---

<sup>1</sup> Microsoft har et prosjekt der de matcher bilder tatt av brukere, og genererer 3D-view. Se: [www.photosynth.net](http://www.photosynth.net).

<sup>2</sup> Les om Google StreetView: [maps.google.com/help/maps/streetview](http://maps.google.com/help/maps/streetview)

<sup>3</sup> Oppgitt på UAV Nordic conference, Oslo 24.novemver 2010.

<sup>4</sup> [www.microdrones.com/en\\_md4-1000\\_tech\\_data.php](http://www.microdrones.com/en_md4-1000_tech_data.php)

- 360° dekning. Ta bilder rundt hele bygningen med minst 50 % overlapp mellom hvert bilde.
- Ta stereobilder. Ta bilder med forskjellig vinkel fra samme sted.

### 3 Fotograferings regler:

- Hold IO konstant. Ikke zoom eller bytt linser underveis i oppdraget. Bruk originalbilder, ikke klipp i bildene.
- Velg homogen belysning. Unngå sterk sol eller mørke skyggeområder. Ta bilder på riktig tidspunkt av dagen.
- Benytt stabilt og storformat kamera. Vidvinkel linse er best. Kalibrer kameraet.

### 3 organiserings regler:

- Tegn skisser. Benytt et bakgrunnskart og tegn inn viktige objekter. Marker fotograferingspunkt. Marker kontrollpunkt og inkluder id. Marker nord-retning og andre ting av interesse.
- Skriv protokoll. Skriv ned bygningsnavn, eier og adresse. Skriv ned dato, kameramodell, optikk, kalibreringsrapport, tillatelser og annet.
- Ikke glem den siste sjekken! Skriv ned alt og med en gang. Sjekk at alle bilder er tatt før du forlater stedet. Skriv ferdig rapporten mens du husker alle detaljer. Husk tidligere feil og finn ut hva du skal forbedre til neste prosjekt. Lær.

## 5.5 Konklusjon

I denne delen er det beskrevet kjente metoder og krav til sensorer for å kunne beregne YO direkte i enkeltbilde. Om disse metodene implementeres vil en drone kunne fungere utmerket som plattform for fotografering for nærfotogrammetriske prosjekter.

Det er mulig å bygge UAS for nærfotogrammetri. Utfordringen er å integrere GNSS, INS og kamera. Jeg har gått gjennom kriterier for å kunne oppnå høy nøyaktighet i direkte bestemmelse av YO.

Nøyaktigheten er avhengig:

- Sensorenes oppdateringsfrekvens og presisjon
- Montering av sensorer
- Kalibrering av sensorer
- Kalibrering av eksentrisiteten mellom sensorene
- Dataprosessering og implementering av f.eks. Kalmanfilter.

Denne oppgaven beskriver kun de grunnleggende kravene. Det vil være interessant å gjennomføre praktiske forsøk med tilpassede UAS. Kun da kan man se det nærfotogrammetriske potensialet i et slikt system.

## 6 Litteraturliste

Andersen, Øystein (2003) – Orientering i stereoinstrument. Institutt for kartfag, NLH.

Seeber, Günter (2003) – Satellite Geodesy. ISBN 3-11.017549-5

Fan, Huaan (2007) – Theoretical Geodesy. ISBN 91-7170-646-1

Gjevestad, Jon Glenn (2008) – Integrering av GPS/INS, notat.

Fryer, John G. (1986) – Camera calibration in non-topographic photogrammetry.

Waldhaus, Peter and Ogleby, Cliff (1992) – 3x3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture.

Andersen, Øystein (2002) – Ytre orientering. Nye Muligheter og gamle fallgruver, notat.

Everaerts, Jurgen (2009) – New platforms, unconventional Platforms for remote sensing. Publisert i EuroSDR Official Publication no.56.

UVS-International (2010) – UAS, The Global Perspective 8<sup>th</sup> edition.

UAS Nordic Conference 2010, Oslo Kongressenter 24<sup>th</sup> November 2010.

PhotoModeler 6 Software (1997 – 2007) – Help Topics.

PC World Norge (11.08.2010) – Flygende street-view droner?  
([www.idg.no/pcworld/article174773.ece](http://www.idg.no/pcworld/article174773.ece))

Swisstopo (16.09.2010) – Geoid  
([www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/topics/survey/sys/geoid.html](http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/topics/survey/sys/geoid.html))

Luftfartstilsynet – Bestemmelse for sivil luftfart  
([www.luftfartstilsynet.no/regelverk/bsl](http://www.luftfartstilsynet.no/regelverk/bsl))

Otto Milvang (ukjent dato) – Datum og posisjonsformat  
([www.milvang.no/gps/datum/datum.html](http://www.milvang.no/gps/datum/datum.html))

EUROCAE – Working Groups, WG-73  
([www.eurocae.net/workinggroups.html](http://www.eurocae.net/workinggroups.html))

EuroControl – Smooth integration of UASs in non-segregated airspace  
([www.eurocontrol.int/eec/public/standard\\_page/EEC\\_News\\_2008\\_2\\_Grants\\_4.html](http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_2_Grants_4.html))

## 7 Bilder, figurer og tabeller

### 7.1 Bilder:

Bilde 1: UAS MD4 – 200. Foto: <a href="http://www.microdrones.com">www.microdrones.com</a> .....	19
Bilde 2: Sigma DP1 montert på en såkalt <i>tilt controlled mount</i> . Foto: <a href="http://www.microdrones.com">www.microdrones.com</a> . .....	20
Bilde 3: AeroVision sin MD4 – 200 bakkestasjon. Foto: <a href="http://www.microdrones.com">www.microdrones.com</a> . .....	21
Bilde 4: Kalibreringsark i PhotoModeler. ....	41
Bilde 5: Kalibrering, resultat. ....	42
Bilde 6: Kalibrering, feilvektorer for hvert punkt.....	43
Bilde 7: Kalibrering, visualisert.....	43
Bilde 8: IMT-testfelt, inkl. punktmarkeringer. ....	46
Bilde 9: Fotografering fra taket av IMT med Lars Nordberg fra AeroVision og Ivar Maalen-Johansen fra UMB. ....	48
Bilde 10: Markering av kontrollpunkter i PhotoModeler. ....	52
Bilde 11: Resultat av tilbakeskjæring i rommet i PhotoModeler for bilde 003. ....	53
Bilde 12: 3D visualisering av projeksjonssenter (CS1), bilde, kontrollpunkter og koordinatsystemets akser. ....	53

### 7.2 Figurer:

Figur 1: GPS/INS struktur for MD4-200. Kilde: <a href="http://www.microdrones.com">www.microdrones.com</a> . ....	22
Figur 2: Kolinearitetsprinsippet. Kilde: Ø. Andersen 2003. ....	25
Figur 3: Radiell og tangentiell fortegnning. Bildekoordinater $x'$ og $y'$ . ....	26
Figur 4: Prinsippskisse for differensiell GPS.....	27
Figur 5: Kalmanfilter for GPS/INS integrasjon. Kilde: Forelesning i fotogrammetri (GMFO205) 2008.....	29
Figur 6: Eksentrisitet mellom kamera, GPS, INS og terrengkoordinater. Kilde: Jan Skaloud, 1999. ....	29
Figur 7: Prinsippskisse for tilbakeskjæring i rommet.....	30
Figur 8: Euler- og fotogrammetriske vinkler. Kilde: Ø. Andersen (2003). ....	32
Figur 9: Høyder: forskjell mellom $h$ , $H$ og $N$ . Kilde: <a href="http://www.swisstopo.ch">www.swisstopo.ch</a> .....	34
Figur 10: ECEF, NEU og geodetiske koordinater. ....	35
Figur 11: Body Frame tegnet på AeroVision sin drone MD4-200.....	36
Figur 12: UTM EUREF89 soneinndeling for Norge.....	37
Figur 13: Effekt av ukalibrert kamera. ....	44
Figur 14: Effekt av feil i rotasjoner.....	58
Figur 15: Interpolering av GPS/INS data for posisjonsbestemmelse ved eksponering. ....	64

### 7.3 Tabeller:

Tabell 1: Terminologi. ....	10
Tabell 2: Klassifisering av ulike UAS. Kilde: J. Everaerts, 2009. ....	14
Tabell 3: Anvendelser av UAS. ....	15
Tabell 4: GPS og INS med komplementære egenskaper. Kilde: J.G. Gjevestad. ....	28
Tabell 5: Eulervinkler.....	31
Tabell 6: Fotogrammetriske vinkler. ....	32
Tabell 7: Geodetiske vinkler.....	32
Tabell 8: Noen datumparametere for WGS84 ellipsoiden. ....	33
Tabell 9: IMT-testfelt rådata: punktnummer, latitude, longitude, ellipsoidisk høyde. ....	47
Tabell 10: Beskrivelse av AeroVision sin flyrapport.....	49
Tabell 11: Beregnet vinkel: <i>Tilt</i> . ....	49
Tabell 12: Utdrag fra flyrapporten.....	50
Tabell 13: Bakkeoppløsning målt i bilde nr. 003.....	50
Tabell 14: Beregnede YO ved tilbakeskjæring i PhotoModeler. ....	55
Tabell 15: Oppgitte YO fra AeroVision, transformert til UTM EUREF89.....	55
Tabell 16: Rambøll beregnet YO for bilde nr. 003 i 3ds-Max.....	55
Tabell 17: Feilvektorer for AeroVision sin oppgitte posisjon.....	56
Tabell 18: Euklidske distanser: distanse fra testfelt, feildistanse og % feil. ....	56
Tabell 19: RMS for posisjonsbestemmelse fra MD4-200. ....	57

## 8 Vedlegg

### Resultater:

#### *IMT-testfelt data WGS84:*

Punkt ID	Latitude ( $\phi$ )	Longitude ( $\lambda$ )	Ell. Høyde (h)
100	59.395576012	10.463946752	134.819
101	59.395540393	10.463357144	147.838
102	59.395540995	10.463375537	147.757
103	59.395527399	10.463359224	147.572
104	59.395528986	10.463377794	147.619
105	59.395529657	10.463396712	147.624
106	59.395513465	10.463361538	147.355
107	59.395513842	10.463380382	147.340
108	59.395512831	10.463401313	147.315
109	59.395507422	10.463416786	146.110
110	59.395504248	10.463400807	146.145
111	59.395504379	10.463381201	146.151
112	59.395503952	10.463358991	146.223
113	59.395499563	10.463365775	146.209
114	59.395498138	10.463391043	146.238
115	59.395492510	10.463417957	146.316
116	59.395480015	10.463396897	146.143
117	59.395478962	10.463360808	146.271
118	59.395491326	10.463349667	146.339
119	59.395516006	10.463343804	144.813
120	59.395527440	10.463343680	144.730
121	59.395539776	10.463344523	144.669
122	59.395543308	10.463335383	144.680

#### *IMT-testfelt data transformert til UTM EUREF89:*

Punkt ID	Northing	Easting	Ortometrisk Høyde
100	6615499.382	600143.455	95.732
101	6615485.896	600051.498	108.751
102	6615486.160	600054.371	108.67
103	6615481.887	600051.931	108.485
104	6615482.455	600054.823	108.532
105	6615482.742	600057.778	108.537
106	6615477.587	600052.408	108.268
107	6615477.782	600055.353	108.253

Punkt ID	Northing	Easting	Ortometrisk Høyde
108	6615477.557	600058.637	108.228
109	6615475.949	600061.102	107.023
110	6615474.901	600058.629	107.058
111	6615474.859	600055.560	107.064
112	6615474.634	600052.088	107.136
113	6615473.305	600053.186	107.122
114	6615472.970	600057.151	107.151
115	6615471.343	600061.409	107.229
116	6615467.390	600058.217	107.056
117	6615466.913	600052.579	107.184
118	6615470.690	600050.734	107.252
119	6615478.299	600049.612	105.726
120	6615481,834	600049,498	105,643
121	6615485,653	600049,528	105,582
122	6615486,707	600048,069	105,593

**AeroVision sin flyrapport:**

Flight #337	01.10.2010	11:06								
Photo	GPS Time	Timecode	Latitude	Longitude	GPS-A	Height	Roll	Pitch	Yaw	Cam. Servo
(id:1=bilde:003osv)										
1	11:07:43	70,873	59,66518313	10,7759456	155,6	18,9	-0,1	1,3	14,1	34,2
2	11:08:05	93,629	59,66518531	10,77594874	161,5	24,6	-0,7	1,1	14,6	45,0
3	11:08:13	101,627	59,66518627	10,77595067	161,4	24,5	-0,3	1,5	13,6	45,0
4	11:08:35	123,622	59,66520372	10,77629634	161,1	24,5	-1,7	1,0	-50,1	45,0
5	11:08:53	141,139	59,66520581	10,77629955	159,1	23,8	-1,4	1,1	-50,1	45,0
6	11:09:05	153,134	59,66520281	10,77629661	162	26,9	-2,1	1,9	-50,9	45,0
7	11:09:12	160,119	59,66520621	10,77629035	162,7	27,1	-2	1,9	-51,2	45,0
8	11:09:49	197,62	59,66505722	10,77665172	163,7	26,9	-0,3	-0,2	34,1	40,5
9	11:10:01	209,12	59,66505674	10,77664365	163,3	26,8	-0,3	0,1	0,9	46,8
10	11:10:14	222,636	59,66506034	10,77664005	164,2	26,7	-1,5	-0,1	-67,8	42,3
11	11:10:53	261,122	59,6647724	10,77661868	163,2	26,7	-0,4	0,7	-37,5	27,0
12	11:11:02	269,856	59,66477303	10,77662756	163	26,5	1,5	0,5	15,9	27,0
13	11:11:33	301,373	59,66483427	10,7765445	168,3	32,5	0,8	-1,6	6,8	28,8
14	11:11:42	310,139	59,6648323	10,77655376	168	32,5	-0,3	-0,6	-30,3	29,7
15	11:13:01	389,35	59,66513416	10,776251	160,8	26,1	-1	-0,2	-33,7	36,9
16	11:13:21	409,094	59,66516744	10,77620249	158,3	23,9	0,6	-2,9	-33,1	39,6
17	11:13:27	415,601	59,66517735	10,77620437	158,1	23,7	-1,2	-0,1	-31,5	41,4
18	11:13:56	443,849	59,6651746	10,77601859	158,8	23,6	-1	-0,9	0,0	46,8
19	11:14:11	458,869	59,6652019	10,77590077	159	23,8	-0,2	-1,4	29,8	45,9
20	11:14:25	472,856	59,66519878	10,77590403	158,7	23,7	-0,9	-1,0	31,0	46,8
21	11:14:55	502,859	59,66520234	10,77590403	158,9	23,6	1,5	-0,4	22,5	46,8



22	11:15:14	521,868	59,66520318	10,77590109	157,7	23,6	1,8	-0,6	23,5	40,5
23	11:15:29	537,629	59,66520282	10,7758956	158,5	23,7	2,2	-1,5	25,7	40,5

**AeroVision sin YO transformert til UTM EUREF89:**

Bilde nr.	E (m)	N (m)	El.h. (m)	Orto.H. (m)	Tilt (deg)	Roll (deg)	Yaw (deg)
3	600049,497	6615462,797	155,6	116,551	-32,9	-0,1	-13,4
4	600049,667	6615463,044	161,5	122,451	-43,9	-0,7	-13,9
5	600049,773	6615463,154	161,4	122,351	-43,5	-0,3	-12,9
6	600069,192	6615465,618	161,1	122,051	-44	-1,7	50,8
7	600069,366	6615465,855	159,1	120,051	-43,9	-1,4	50,8
8	600069,209	6615465,517	162	122,951	-43,1	-2,1	51,6
9	600068,847	6615465,886	162,7	123,651	-43,1	-2	51,9
10	600089,646	6615449,843	163,7	124,651	-40,7	-0,3	-33,4
11	600089,193	6615449,777	163,3	124,251	-46,7	-0,3	-0,2
12	600088,979	6615450,173	164,2	125,151	-42,4	-1,5	68,5
13	600088,634	6615418,082	163,2	124,151	-26,3	-0,4	38,2
14	600089,132	6615418,166	163	123,951	-26,5	1,5	-15,2
15	600084,271	6615424,859	168,3	129,251	-30,4	0,8	-6,1
16	600084,798	6615424,653	168	128,951	-30,3	-0,3	31
17	600066,845	6615457,805	160,8	121,751	-37,1	-1	34,4
18	600064,013	6615461,437	158,3	119,251	-42,5	0,6	33,8
19	600064,09	6615462,543	158,1	119,051	-41,5	-1,2	32,2
20	600053,633	6615461,957	158,8	119,751	-47,7	-1	0,7
21	600046,916	6615464,819	159	119,951	-47,3	-0,2	-29,1
22	600047,109	6615464,476	158,7	119,651	-47,8	-0,9	-30,3
23	600047,098	6615464,873	158,9	119,851	-47,2	1,5	-21,8
24	600046,93	6615464,962	157,7	118,651	-41,1	1,8	-22,8
25	600046,622	6615464,913	158,5	119,451	-42	2,2	-25

**Beregnete YO i PhotoModeler med tilbakeskjæring:**

Bilde nr:	E	N	Orto.H.	$\varphi$	$\omega$	$\kappa$
3	600 049,1859	6 615 461,4989	114,264	-29,522607	-2,358	-7,56442
4	600 049,1944	6 615 461,7302	119,830	-41,908699	-3,2931	-9,96666
5	600 049,0405	6 615 461,7922	119,712	-41,29526	-2,8951	-9,318521
6	600 068,8520	6 615 464,6767	119,779	-50,257241	-2,0061	35,32611
7	600 069,2681	6 615 465,5933	119,460	-51,05867	-2,0288	35,907724
8	600 068,6380	6 615 465,3579	122,459	-50,092504	-2,5628	35,610819
9	600 068,8065	6 615 465,1194	122,456	-50,400352	-2,4744	36,085229
10						
11						
12	600 088,9477	6 615 448,9051	122,861	-57,302549	-1,2879	49,088619
13	600 089,1990	6 615 417,5163	123,455	-23,137322	-1,1828	13,765165
14						
15	600 084,0565	6 615 424,6298	129,532	-23,898111	-3,0299	0,240235

Bilde nr:	E	N	Orto.H.	$\varphi$	$\omega$	$\kappa$
16	600 084,5779	6 615 424,4772	129,237	-25,207795	-2,4958	13,415173
17	600 066,0779	6 615 457,7742	121,462	-34,828451	-2,67777	18,633336
18	600 064,1246	6 615 461,4034	118,867	-40,339567	-1,4002	19,171353
19	600 064,2747	6 615 462,2136	118,566	-39,532403	-3,9917	20,117241
20	600 053,4002	6 615 462,1450	118,465	-42,409834	-4,3037	1,718163
21	600 046,6174	6 615 464,5762	118,384	-45,617114	-4,2544	-16,729586
22	600 046,8761	6 615 464,0415	118,098	-46,283378	-5,4785	-16,13313
23	600 046,2650	6 615 464,4030	118,140	-44,203656	-3,6824	-12,270442
24	600 046,8861	6 615 464,8985	118,123	-38,178592	-0,8674	-12,280124
25	600 046,2998	6 615 464,5946	118,134	-38,64422	-0,3284	-12,879362

*Feilvektorer for AeroVision sine beregnede kameraposisjoner:*

Bilde nr.	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta$ Orto.H.	$\Delta\phi$	$\Delta\omega$	$\Delta\kappa$
3	-0,3111	-1,2981	-2,2869	3,4	-2,3	5,8
4	-0,4726	-1,3138	-2,6214	2,0	-2,6	3,9
5	-0,7325	-1,3618	-2,6391	2,2	-2,6	3,6
6	-0,3400	-0,9413	-2,2717	-6,3	-0,3	-15,5
7	-0,0979	-0,2617	-0,5911	-7,2	-0,6	-14,9
8	-0,5710	-0,1591	-0,4920	-7,0	-0,5	-16,0
9	-0,0405	-0,7666	-1,1949	-7,3	-0,5	-15,8
12	-0,0313	-1,2679	-2,2897	-14,9	0,2	-19,4
13	0,5650	-0,5657	-0,6964	3,2	-0,8	-24,4
15	-0,2145	-0,2292	0,2809	6,5	-3,8	6,3
16	-0,2201	-0,1758	0,2859	5,1	-2,2	-17,6
17	-0,7671	-0,0308	-0,2887	2,3	-1,7	-15,8
18	0,1116	-0,0336	-0,3840	2,2	-2,0	-14,6
19	0,1847	-0,3294	-0,4849	2,0	-2,8	-12,1
20	-0,2328	0,1880	-1,2862	5,3	-3,3	1,0
21	-0,2986	-0,2428	-1,5674	1,7	-4,1	12,4
22	-0,2329	-0,4345	-1,5534	1,5	-4,6	14,2
23	-0,8330	-0,4700	-1,7110	3,0	-5,2	9,5
24	-0,0439	-0,0635	-0,5284	2,9	-2,7	10,5
25	-0,3222	-0,3184	-1,3174	3,4	-2,5	12,1

*RMS for GPS posisjonering med 20 bilder tatt av AeroVision:*

E	N	U
0,409m	0,688m	1,454m

## Kalibreringsrapport:

Her er kalibreringsrapporten for kamerakalibrering av AeroVision sitt kamera Sigma DP1.

### Status Report Tree

Project Name: kalibrering\_DP1.pmr

Problems and Suggestions (0)

Project Problems (0)

Problems related to most recent processing (0)

### Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Thu Dec 09 17:38:45 2010

PhotoModeler Version: 6.1.1.250 - final,full

Status: successful

#### Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

#### Total Error

Number of Processing Iterations: 3

Number of Processing Stages: 2

First Error: 1.335

Last Error: 1.335

#### Precisions / Standard Deviations

##### Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: SIGMA DP1 [16.60]

##### Focal Length

Value: 17.346562 mm

Deviation: Focal: 0.001 mm

##### Xp - principal point x

Value: 10.795687 mm

Deviation: Xp: 0.002 mm

##### Yp - principal point y

Value: 7.294836 mm

Deviation: Yp: 0.002 mm

##### Fw - format width

Value: 21.344768 mm

Deviation: Fw: 0.001 mm

##### Fh - format height

Value: 14.228571 mm

##### K1 - radial distortion 1

Value: 2.502e-004

Deviation: K1: 1.1e-006

##### K2 - radial distortion 2

Value: -7.230e-007

Deviation: K2: 6.3e-009

##### K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

##### P1 - decentering distortion 1

Value: -4.849e-005

Deviation: P1: 2.3e-006  
P2 - decentering distortion 2  
Value: 9.895e-005  
Deviation: P2: 2.4e-006

## Quality

### Photographs

Total Number: 12  
Bad Photos: 0  
Weak Photos: 0  
OK Photos: 12  
Number Oriented: 12  
Number with inverse camera flags set: 0

### Cameras

Camera1: SIGMA DP1 [16.60]  
Calibration: yes  
Number of photos using camera: 12  
Average Photo Point Coverage: 88%

### Photo Coverage

Number of referenced points outside of the Camera's calibrated coverage: 0

### Point Marking Residuals

Overall RMS: 0.170 pixels  
Maximum: 0.851 pixels  
Point 37 on Photo 1  
Minimum: 0.115 pixels  
Point 41 on Photo 9  
Maximum RMS: 0.378 pixels  
Point 3  
Minimum RMS: 0.058 pixels  
Point 41

### Point Tightness

Maximum: 0.00077 m  
Point 3  
Minimum: 0.00013 m  
Point 41

### Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 6.89e-005 m  
Maximum Vector Length: 0.000105 m  
Point 89  
Minimum Vector Length: 6.44e-005 m  
Point 93  
Maximum X: 5.46e-005 m  
Maximum Y: 6.07e-005 m  
Maximum Z: 6.57e-005 m  
Minimum X: 3.21e-005 m  
Minimum Y: 3.15e-005 m  
Minimum Z: 4.42e-005 m

## IMT-testfelt oversiktskart:



## Thumbnails av alle bilder:

Bilde nr. 003:



Bilde nr. 004:



Bilde nr. 005:



Bilde nr. 006:



Bilde nr. 007:



Bilde nr. 008:



Bilde nr. 009:



Bilde nr. 010:



Bilde nr. 011:



Bilde nr. 012:



Bilde nr. 013:



Bilde nr. 014:



Bilde nr. 015:



Bilde nr. 016:



Bilde nr. 017:



Bilde nr. 018:



Bilde nr. 019:



Bilde nr. 020:



Bilde nr. 021:



Bilde nr. 022:



Bilde nr. 023:



Bilde nr. 024:



Bilde nr. 025:

