

Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik

Kapitel 13-15



Version 2013-10-28



Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik
by [Lantmäteriet m.fl.](http://lantmateriet.m.fl.) is licensed under a
[Creative Commons Erkännande-Ickekommersiell-IngaBearbetningar 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).

Detta kompendium har tagits fram i samarbete mellan Lantmäteriet (LM), Kungliga tekniska högskolan (KTH), Lunds universitet (LU) och Högskolan i Gävle (HiG). Kompendiet är avsett för grundläggande kurser inom geodetisk och fotogrammetrisk mätningsteknik (sambällsmätning) samt ingå i en revidering av Handbok till Mätningkungörelsen (HMK).

Framtagandet av kompendiet har skett genom finansiering från författarnas arbetsgivare, samt via ett ekonomiskt bidrag från Kartografiska Sällskapet (KS; se www.kartografiska.se).

I slutet av flera kapitel finns lästips för vidare läsning. Vidare finns referenser, sakordsregister och förkortningsregister i slutet av kompendiet.

Vissa kapitel är helt nyskrivna medan andra är sammanställningar/justeringar av andras texter. Bakgrunden till varje kapitel framgår i kapitlets slut under rubriken "Tack".

Kompendiet är skyddat med licensen creative commons by-nc-nd. Det innebär att det är fritt att sprida kompendiet, men endast i icke-kommersiella sammanhang. Vidare får verket inte bearbetas och den som använder verket måste ange upphovsmannen; upphovsmannen i detta fall är "Lantmäteriet m.fl.". Det är tillåtet att kopiera upp kompendiet och sälja det för självkostnadspris (=tryckkostnad plus eventuell fraktkostnad). Mer information om licensfrågor finns på: <http://www.creativecommons.se/>.

Kapitelansvariga:

Kap 1-5: Lars Harrie (LU)

Kap 6: Bengt Andersson (LM)

Kap 7-10: Clas-Göran Persson (LM)

Kap 11-12: Milan Horemuz (KTH)

Kap 13-15: Anders Boberg (Tyréns)

Kap 16: Perola Olsson (LU), Helen Rost (Blom) och Yuriy Reshetyuk (HiG)

Till kompendiet finns en formelsamling i ett separat dokument.

1	INTRODUKTION	1
1.1	GEOGRAFISK INFORMATION.....	1
1.2	INMÄTNING AV GEOGRAFISK INFORMATION	2
1.3	AKTÖRER VID INMÄTNING AV GEOGRAFISK INFORMATION.....	3
1.4	KOMPETENSKRAV FÖR INMÄTNING AV GEOGRAFISK INFORMATION.....	5
1.5	UPPLÄGG AV KOMPENDIET	5
1.5.1	<i>Del 1: Koordinatsystem</i>	5
1.5.2	<i>Del 2: Grundläggande mätningsteknik</i>	5
1.5.3	<i>Del 3: Satellitmätning</i>	6
1.5.4	<i>Del 4: Fotogrammetri</i>	6
1.6	MÅLGRUPP.....	6
2	JORDMODELLER.....	9
2.1	JORDELLIPSOIDER	9
2.2	KOORDINATSYSTEM	11
2.2.1	<i>Koordinatsystem på en sfärisk jordmodell</i>	11
2.2.2	<i>Koordinatsystem på en jordellipsoid</i>	14
2.2.3	<i>Gradnät</i>	17
2.3	AVSTÅNDSBERÄKNINGAR PÅ SFÄR OCH JORDELLIPSOID.....	17
3	KARTPROJEKTIONER	21
3.1	PRINCIPIELL UPPBYGGNAD.....	22
3.2	EGENSKAPER OCH GEOMETRISKA DISTORTIONER.....	25
3.3	BESKRIVNING AV NÅGRA VANLIGA KARTPROJEKTIONER OCH DESS PARAMETRAR	27
3.3.1	<i>Några vanliga kartprojektioner</i>	27
3.3.2	<i>Kartprojektionsparametrar</i>	29
3.3.3	<i>Val av kartprojektion och kartprojektionsparametrar</i>	29
3.3.4	<i>Universal Transversal Mercator (UTM)</i>	30
3.4	FORMLER FÖR KARTPROJEKTIONER.....	31
3.4.1	<i>Matematisk bakgrund</i>	31
3.4.2	<i>Härledning av Mercator-projektionen</i>	32
3.4.3	<i>Formler för transversal Mercator-projektion</i>	34
3.5	KARTPROJEKTIONSKORRIGERINGAR AV MÄTNINGAR	35
4	HÖJDSYSTEM	37
4.1	INTRODUKTION.....	37
4.2	JORDENS FUNDAMENTALYTOR	37
4.2.1	<i>Geoidhöjder</i>	37
4.3	HÖJDSYSTEM.....	38
4.3.1	<i>Höjder över geoiden</i>	38
4.3.2	<i>Höjd över ellipsoiden</i>	40
5	GEODETISKA REFERENSSYSTEM	41
5.1	INTRODUKTION.....	41
5.2	TREDIMENSIONELLA REFERENSSYSTEM.....	42
5.2.1	<i>Globala referenssystem</i>	42
5.2.2	<i>SWEREF 99</i>	44
5.2.3	<i>SWEREF 99 TM</i>	46
5.2.4	<i>SWEREF 99 med lokala kartprojektioner</i>	48
5.2.5	<i>SWEREF 99 TM indexsystem</i>	49
5.3	PLANA REGIONALA REFERENSSYSTEM	50
5.3.1	<i>RT 90</i>	51
5.3.2	<i>Kommunala referenssystem</i>	52
5.4	HÖJDSYSTEM.....	52
5.4.1	<i>Definition av höjdsystem</i>	52

5.4.2	<i>RH2000</i>	53
5.4.3	<i>RH 00, RH 70 och kommunala system</i>	54
5.5	GEOIDHÖJDSYSTEM	55
5.5.1	<i>SWEN08_RH2000</i>	55
5.6	KOORDINATTRANSFORMATIONER	57
5.6.1	<i>Analytiska transformationer</i>	57
5.6.2	<i>Empiriska transformationer i två dimensioner</i>	58
5.6.3	<i>Empiriska transformationer i tre dimensioner</i>	62
5.6.4	<i>Transformation mellan RT 90 2,5 gon väst och SWEREF 99 TM</i>	63
6	MÄTINSTRUMENT	65
6.1	VINKELMÄTNINGSINSTRUMENT	65
6.1.1	<i>Teodoliten</i>	65
6.1.2	<i>Kontroll och justering av teodoliter</i>	73
6.2	LÄNGDMÄTNINGSINSTRUMENT	75
6.2.1	<i>EDM-instrument</i>	75
6.2.2	<i>Kontroll av EDM-instrument</i>	79
6.3	KOMBINERADE VINKEL- OCH LÄNGDMÄTNINGSINSTRUMENT	81
6.3.1	<i>Totalstation</i>	81
6.3.2	<i>Terrester laserskanner</i>	81
6.4	INSTRUMENT FÖR HÖJDMÄTNING	82
6.4.1	<i>Avvägningsinstrument</i>	82
6.4.2	<i>Kontroll och justering av avvägningsinstrument</i>	87
6.4.3	<i>Laserinstrument</i>	88
7	TERRESTRA MÄTMETODER	89
7.1	GRUNDLÄGGANDE MÄTSTORHETER.....	89
7.1.1	<i>Koordinatsystem</i>	89
7.1.2	<i>Orienterade riktningar och avstånd</i>	90
7.1.3	<i>Horisontalvinkelmätning</i>	92
7.1.4	<i>Vertikalvinkelmätning och dess tillämpning</i>	93
7.2	PLANMÄTNING	94
7.2.1	<i>De elementära punktbestämningsmetoderna</i>	94
7.2.2	<i>Plana geodetiska nät</i>	95
7.2.3	<i>Beräkning av polygontåg</i>	96
7.3	HÖJDMÄTNING	100
7.3.1	<i>Geodetiska höjdnät</i>	100
7.3.2	<i>Avvägning</i>	101
7.3.3	<i>Trigonometrisk höjdmätning</i>	104
8	DETALJMÄTNING	109
8.1	TILLÄMPNINGAR	109
8.2	DETALJMÄTNINGSPROCESSEN	111
8.2.1	<i>Grundläggande principer</i>	111
8.2.2	<i>Traditionell stationsetablering</i>	112
8.2.3	<i>Fri station</i>	113
8.2.4	<i>Inmätning</i>	115
8.2.5	<i>Utsättning</i>	116
8.2.6	<i>Kontroll</i>	117
8.2.7	<i>Markering</i>	118
8.2.8	<i>Dokumentation</i>	118
8.2.9	<i>Beräkning av arean av en polygon</i>	119
8.3	DETALJMÄTNINGENS UTVECKLING.....	120
9	MÄTOSÄKERHET	123
9.1	GUM	123
9.1.1	<i>Historik</i>	123

9.1.2	Grundfilosofi	123
9.2	STANDARDOSÄKERHET	124
9.3	VAD ÄR EN MÄTNING?	125
9.4	SAMMANLAGD STANDARDOSÄKERHET	125
9.5	MÄTNINGAR MED OLIKA VIKT	127
9.6	UTVIDGAD MÄTOSÄKERHET	129
9.7	EN ENKEL GUM-KOKBOK	131
9.8	TERMINOLOGISKA JÄMFÖRELSE	131
9.8.1	Svensk-engelsk GUM-ordlista	131
9.8.2	Jämförelse med äldre svensk terminologi.....	132
9.8.3	Jämförelse med terminologi i matematisk statistik.....	132
9.9	TOLERANSER OCH HMK	133
10	MINSTA-KVADRATBERÄKNINGAR MED MATRISER	137
10.1	GRUNDLÄGGANDE MATRISALGEBRA OCH NOTATIONER.....	137
10.2	ELEMENTUTJÄMNING ENLIGT MK-METODEN	138
10.2.1	Samma vikt på observationerna	138
10.2.2	Olika vikter på observationerna.....	141
10.2.3	Korrelation och analys av funktioner av obekanta	143
10.3	LINJÄR REGRESSION.....	144
10.4	EXEMPEL PÅ MK-SKATTNING: DUBBEL KNUTPUNKT I ETT HÖJDNÄT.....	148
10.5	NÄRMEVÄRDEN OCH LINJARISERING	151
10.5.1	Närmevärden	151
10.5.2	Ett alternativ till viktsmatris.....	152
10.5.3	Linjarisering.....	155
11	GRUNDLÄGGANDE TEORI OM GNSS	161
11.1	ORDLISTA	161
11.2	INTRODUKTION	162
11.3	UPPBYGGNAD AV GPS	163
11.3.1	Rymdsegmentet	164
11.3.2	Kontrollsegmentet	164
11.3.3	Användarsegmentet.....	165
11.4	AVSIKTLIGA STÖRNINGAR I SATELLITSIGNALEN	167
11.5	OBSERVATIONSEKVATIONER	167
11.5.1	Observationsekvation för kodmätning	167
11.5.2	Observationsekvation för fasmätning.....	168
11.6	FELKÄLLOR	168
11.6.1	Satellitrelaterade felkällor	169
11.6.2	Atmosfärsrelaterade fel och flervägsfel.....	169
11.6.3	Mottagarrelaterade fel.....	170
11.6.4	Observationsekvationer med felkällor	170
11.7	MATEMATISK MODELL FÖR POSITIONSBESTÄMNING	171
11.7.1	Absolutpositionering	171
11.7.2	Relativpositionering	172
11.8	SAMMANFATTNING	174
12	GNSS-MÄTNING.....	175
12.1	ABSOLUTMÄTNING	176
12.2	STATISK RELATIVMÄTNING.....	177
12.3	KINEMATISK RELATIVMÄTNING	178
12.4	DIFFERENTIELLA METODER	179
13	FOTOGRAMMETRI OCH FLYGBILDER.....	181
13.1	BEGREPPET FOTOGRAMMETRI.....	181
13.2	DIGITALA KAMEROR OCH BILDER.....	183
13.2.1	Kameran.....	183

13.2.2	<i>Den digitala bilden</i>	185
13.2.3	<i>Bildskanning</i>	186
13.3	ENKELBILDENS GEOMETRI.....	186
13.3.1	<i>Centralprojektion och bildskala</i>	186
13.3.2	<i>Radiell höjddeplacering</i>	188
13.3.3	<i>Mätkameran</i>	190
13.3.4	<i>Inre och yttre orientering. Kalibrering</i>	193
13.3.5	<i>Kolinearit</i>	197
14	FOTOGRAMMETRISKA METODER	201
14.1	ENKELBILDSMETODER.....	201
14.1.1	<i>Fotokarta</i>	201
14.1.2	<i>Rektifiering</i>	201
14.1.3	<i>Ortofoto</i>	201
14.1.4	<i>Snedperspektiv</i>	204
14.2	STEREOFOTOGRAMMETRI.....	204
14.2.1	<i>Stereoskopisk mätning</i>	204
14.2.2	<i>Stereofotogrammetrins normalfall</i>	209
14.2.3	<i>Stereofotogrammetrins allmänna fall</i>	213
14.2.4	<i>Blocktriangulering</i>	219
14.2.5	<i>Digital fotogrammetri</i>	220
14.2.6	<i>Instrument för mätning i fotografiska bilder</i>	223
14.3	FOTOGRAMMETRISK MÄTOSÄKERHET	225
14.3.1	<i>Kvalitetsbegrepp</i>	225
14.3.2	<i>Normalfallets mätosäkerhet</i>	226
14.3.3	<i>Övriga felkällor. Tumregler</i>	228
15	FOTOGRAMMETRISKA TILLÄMPNINGAR	231
15.1	STORSKALIG KARTFRAMSTÄLLNING.....	231
15.1.1	<i>Primärkartverk och kartprogram</i>	231
15.1.2	<i>Den fotogrammetriska kartprocessen</i>	233
15.1.3	<i>Planering av flygfotografering. HMK</i>	233
15.1.4	<i>Planering av stödpunkter</i>	239
15.1.5	<i>Fotogrammetrisk detaljmätning</i>	241
15.2	DIGITALA HÖJDMODELLER	243
15.2.1	<i>Fotogrammetrisk mätning av höjdmodeller</i>	243
15.2.2	<i>Höjdmodellens kvalitet och användning</i>	245
15.3	SMÅSKALIG KARTFRAMSTÄLLNING.....	246
15.3.1	<i>Omdrevsfotografering</i>	246
15.3.2	<i>Framställningsteknik. Fotokartor</i>	246
15.4	MARKFOTOGRAMMETRI	248
15.4.1	<i>Kameratyper</i>	248
15.4.2	<i>Markfotogrammetrins normalfall</i>	249
15.4.3	<i>Markfotogrammetrins allmänna fall</i>	250
15.4.4	<i>Markfotogrammetrins mätosäkerhet</i>	251
15.4.5	<i>Tillämpningsområden</i>	251
15.4.6	<i>Planering av markfotogrammetri med "3x3-metoden"</i>	253
16	LASERSKANNING	257
16.1	INTRODUKTION	257
16.2	PRINCIPEN FÖR FLYGBUREN LASERSKANNING.....	257
16.3	TEKNIKEN BAKOM FLYGBURNA LASERSKANNINGSSYSTEM	258
16.3.1	<i>Bestämning av skanningsenhetens position</i>	259
16.3.2	<i>Bestämning av laserpulsens riktning</i>	260
16.3.3	<i>Bestämning av avståndet till reflektionspunkten</i>	261
16.3.4	<i>Felkällor</i>	261
16.4	VIKTIGA BEGREPP VID FLYGBUREN LASERSKANNING	262

16.5	PRAKTISK MÄTNING MED FLYGBUREN LASERSKANNING.....	264
16.5.1	<i>Tillämpningar av flygburen laserskanning.....</i>	264
16.5.2	<i>Planering vid flygburen laserskanning.....</i>	266
16.5.3	<i>Beräkningar vid flygburen laserskanning.....</i>	268
16.6	PRINCIPEN FÖR TERRESTER LASERSKANNING.....	270
16.7	FUNKTION AV EN TERRESTER LASERSKANNER.....	272
16.8	DATABEARBETNING I TERRESTER LASERSKANNING.....	274
16.8.1	<i>Registrering och georeferering.....</i>	274
16.8.2	<i>Modellering.....</i>	280

Referenser

Sakordsregister

Ordförklaringar fotogrammetri

Förkortningsregister

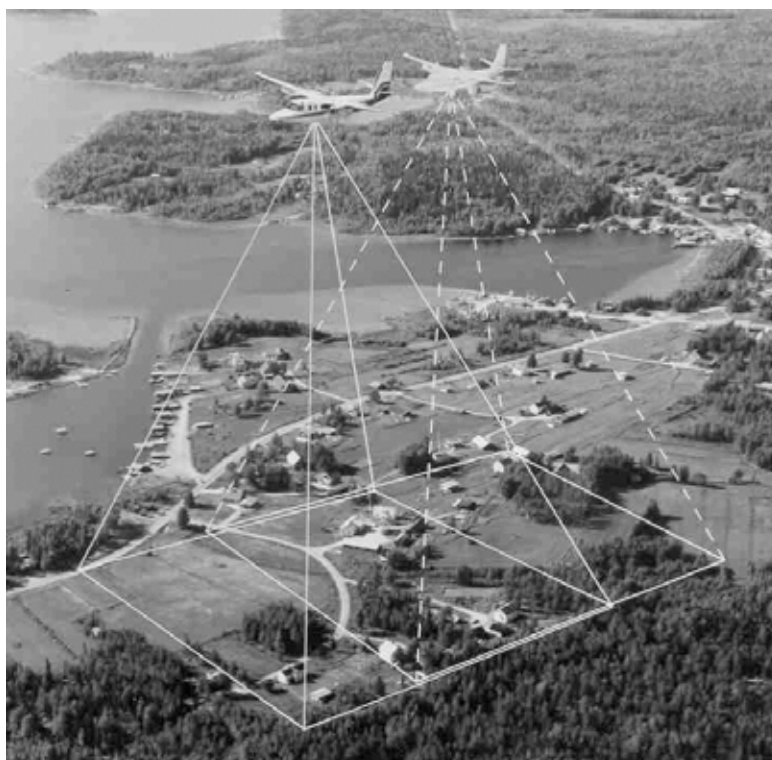
13 Fotogrammetri och flygbilder

13.1 Begreppet fotogrammetri

Ordet fotogrammetri betyder språkligt sett “mätning i fotografisk bild” och kan översättas med bildmätning. Internationella sällskapet för fotogrammetri och fjärranalys (ISPRS) beslutade vid kongressen i Wien 1996 om följande definition av fotogrammetri och fjärranalys: (Ämnesområdena anses så närliggande varandra, att man inte vill skilja dem.)

Fotogrammetri och fjärranalys är konsten, vetenskapen och tekniken att framställa tillförlitlig information ur icke berörande, avbildande och andra, sensorsystem, om jorden och dess miljö, och om andra fysiska objekt och processer, genom anskaffning, mätning, analys och representation av data.

Med hjälp av fotogrammetri kan man bestämma storlek, form och läge hos avbildade objekt genom mätning i bilder. Såväl bilder som tillämpningar kan ha olika karaktär. Fotogrammetrisk mätning kan utföras i enkelbild, i bildpar eller i förband (block) av många bilder. Bilderna föreligger i dag så gott som uteslutande i digital form.



Figur 13.1. Stereoskopisk flygfotografering för fotogrammetrisk kartframställning

Fotogrammetrisk mätning utförs i stereoskopiskt visade bildpar på en datorskärm eller med automatisk digital bildmatchning i förband av bilder. Bilderna visar objektet från olika riktningar. Ur mätningarna beräknas tredimensionella lägeskoordinater för punkter på ytan av det avbildade objektet. Dessa koordinater utgör tillsammans en numerisk **modell** av objektet.

För manuell mätning utnyttjas en operatörs stereoseende. Objektens lägen i bilderna mäts som tvådimensionella *bildkoordinater* x' , y' i ena bilden, x'' , y'' i den andra. Den numeriska modellen av objektet skapas genom att ljusstrålarna vid fotograferingen rekonstrueras analytiskt (matematiskt) som vektorer. Tredimensionella *modellkoordi-*

nater x , y , z beräknas för vektorernas skärningspunkter, som tillsammans skapar objektets yta, modellen.

Automatisk bildmätning med digital bildmatchning är en datorbaserad process för mönsterigenkänning, som efterliknar stereoseendet. För bildmatchning utnyttjas ofta ett förband (block) av många bilder av objektet.



Figur 13.2. En flygbild över Malmö registrerad med digital flygmätkamera Vexcel Xp. Originalformat 104 x 69 mm. (Bild Blom Sweden AB. Godkänd för spridning)

För fotogrammetri erfordras en kraftfull dator med stor minneskapacitet, effektiv mjukvara och god skärmpresentation.

Den klassiska tillämpningen av fotogrammetri är framställning av digitala kartdatabaser, lämpade för geografisk informationsteknik. Vi talar då om flygfotogrammetri. Flygfotografering för kartframställning utförs utefter raka flygstråk (fotostråk). Bilderna exponeras så, att de delvis överlappar varandra. Områden av större bredd täcks med flera parallella stråk. Dessa bildar tillsammans ett block av bilder. Bilderna utvärderas parvis eller flera samtidigt, med stereoskopisk mätning eller bildmatchning.

Produkter som framställs är kartor, dels storskaliga (ca 1:1000) primärkartverk, som utgör underlag för kommunal detaljplanering eller infrastrukturplanering, dels småskaliga (1:5000 – 1:100 000) allmänna kartor och orienteringskartor. Andra produkter är digitala höjdmodeller, kartmässiga s.k. ortofoton och animationer. Dessa finner användning inom projektering och som del i geografiska informationssystem.

Digitala bilder i mindre format, tagna med handhållna eller fordons- eller stativburna kameror, är vanliga vid tillämpningar inom t.ex. arkitektur och kulturvård, för visuali-

Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

sering av urbana miljöer eller inom bilindustrin. Då talar vi om markfotogrammetri (terrester fotogrammetri) för icke-topografiska tillämpningar. När satellitbilder utnyttjas för fotogrammetrisk mätning talar man om satellitfotogrammetri.

Rekonstruktion av tredimensionella stadsmodeller är ett exempel på gemensamt utnyttjande av flyg- och markbilder, liksom de internetbaserade presentationerna av flyg- och gatubilder som vägleder oss i sökande efter adresser.

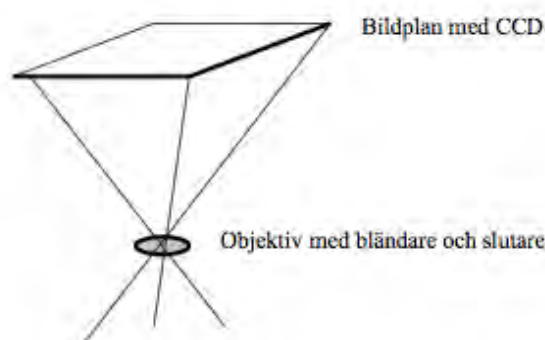
Forskningen inom fotogrammetri behandlar automatisering av fotogrammetriska mätningmoment med utnyttjande av digital bildbehandling, rekonstruktion av två- och tredimensionella strukturer i bilder, t.ex. vägar och byggnader i flyg- och satellitbilder, samt integrerade navigations- och sensorsystem för rörliga kamerabärare och samutnyttjande av laserskanning och bilder. Även analys och prediktion av kvalitet i bilder, data, metoder och resultat är av central betydelse. Forskning och utveckling bedrivs vid högskolor och myndigheter, inte minst Lantmäteriet, och av konsulter och industriföretag. Kartografiska Sällskapet (KS) är ett facksällskap med ändamål bl.a. att främja forskning och utveckling även inom fotogrammetriområdet. Man ger ut en tidskrift (Kart- och Bildteknik), delar ut resestipendier och medverkar i arrangemang av årliga Kartdagar. Internationellt är sällskapet anslutet bl.a. till ISPRS (se inledningen ovan), som organiserar internationella arbetsgrupper, symposier och kongresser. På motsvarande vis främjar Svenska Sällskapet för Automatiserad Bildanalys (SSBA) utvecklingen av digital bildanalys för olika, främst icke-topografiska tillämpningar. Sådan bildanalys utvecklas vid flera universitet och högskolor, bl.a. KTH, Uppsala, Linköping och Lund.

13.2 Digitala kameror och bilder

13.2.1 Kameran

En bild skapas genom att ljusstrålar från ett motiv projiceras genom en kameras objektiv till ett bildplan, där de registreras av en digital bildsensor (tidigare av en ljuskänslig emulsion i en fotografisk film).

Kamerans funktioner är att projicera en skarp optisk bild av det man vill avbilda på ett bildplan, att avpassa belysningen på bildplanet till bildsensorns känslighet och att utlösa exponeringen vid vald tidpunkt (Figur 13.3). Objektivets linser projicerar strålkärvar från varje del av det avbildade objektet till skarpa bildpunkter på bildplanet. Objektivöppningens storlek kan anpassas till rådande ljusförhållanden med en bländare, och exponeringen utlöses med en slutare, som öppnar objektivet en vald, ofta mycket kort tidrymd.

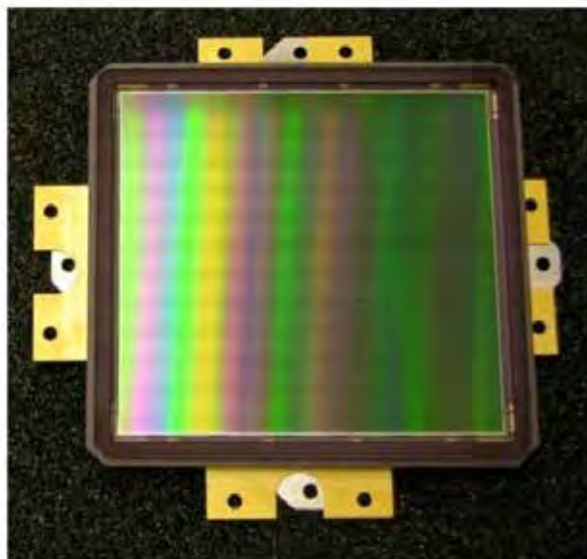


Figur 13.3. Principen för en kamera

Den digitala bildsensorn ger en digital bild i form av ett tätt nät av bildpunkter, en bildmatris. Den digitala bilden kan överföras till en dator, lagras i ett bildminne, bearbetas, visas på bildskärm och – om man så vill – skrivas ut på papper.

CCD-sensorn (figur 13.4) består av en rad eller matris av tätt liggande ljuskänsliga element (detektorer) på en tunn kiselskiva. De elektriska signalerna (laddningarna) från dessa läses ut i sekvens, förstärks och lagras, därav namnet (Charge-Coupled Device eller Detectors). En enskild detektorrad avsöker (skannar) objektet eller originalbilden radvis och skapar bilden successivt, medan en detektormatris registrerar en hel bild simultant. Sensorer i form av detektorrader är vanliga för satellitfjärranalys men förekommer även i flygkameror.

Digitala flygkameror har CCD-matriser (eller rader) med mycket höga prestanda vad avser detaljupplösning, kontraståtergivning, bildformat och geometrisk noggrannhet.



Figur 13.4. CCD-sensor i form av detektormatris med format 90 x 84 mm för flygmätkameran Z/I DMC II. Matrisen rymmer 250 miljoner detektorelement.

Ett detektorelement (som skapar ett bildelement, en pixel) är normalt ca 5x5 till 50x50 μm stort. En till formatet större CCD-sensor medger, att de enskilda detektorerna görs större. De ger därigenom ett högre signal/brus-förhållande, dvs. bättre bildkontrast och lägre brus. Digitalkameror i handeln kan erhållas med CCD-format från ca 6x9 mm till småbilsformatet 24x36 mm. Digitala bakstycken till mellanformatskameror kan ha format ca 4x6 cm och digitala flygmätkameror upp till 9x9 cm – om de nu inte består av flera mindre kameror, vars bilder räknas ihop till större format, eller är konstruerade som kontinuerliga CCD-skannrar med detektorrader.

Digitala bilder i färg erhålls normalt genom registrering med en CCD, vars detektorelement filtrerats för de tre grundfärgerna blått (B), grönt (G) och rött (R) och placerats blandade med varandra. Större flygkameror består däremot av flera parallella kameror, filtrerade var och en för en av de tre grundfärgerna och för infrarött (IR), förutom en pankromatisk (svart-vit) huvudkamera. (Med pankromatisk menas känslig för alla färger.) Svartvita bilder (SV Pan), färgbilder (F) och IR-färgbilder (IRF) skapas genom sambearbetning av olika kombinationer av dessa bilder. Svartvita pankromatiska bilder och färgbilder karakteriseras av en spektral känslighet, som omfattar samma våglängdsområde som ögats. Avsikten är, att de återgivna gråtonerna resp. färgerna ska upplevas naturliga. IR-färgbilderna däremot är

främst anpassade för att tydligt återge levande vegetation, vattenföroreningar, markfuktighet m.m.

13.2.2 Den digitala bilden

En digitalt lagrad bild (en digital bild) består av en matris av bildelement (pixel, av engelskans picture element. Se figur 13.5). Varje bildelement utgörs av ett digitalt gråvärde, ett numeriskt värde på den registrerade strålningsintensiteten i elementet. Gråvärdet lagras i minst 256 nivåer, dvs. som 8 eller fler (upp till 14) bitars digital information. Den radiometriska upplösningen (gråvärdesupplösningen) i varje enskilt CCD-element är därför hög. Elementets läge återfinns med hjälp av sitt rad- och kolumnvärde (r, k) i bildmatrisen.



Figur 13.5. En digital bild och dess uppbyggnad av bildelement (pixlar).

Digitalkamerors upplösning brukar anges som CCD-sensorns totala antal bildelement. En megapixel (MP) utgör 10^6 bildelement. Som jämförelse kan anges, att för att kunna förstora en digital bild till A4-format med god kvalitet fordras att originalbilden består av ca 4 MP.

En flygbilds upplösning kan anges som dess pixelstorlek, i μm eller förstora med bildskalfaktorn ("0,1 m markupplösning"). Måttet kan dock vara vilseledande och måste användas med försiktighet. Ett annat vanligt mått på bildupplösning är ppi ("pixels per inch"). Omräkning mellan ppi och pixelstorlek ($\mu\text{m}/\text{px}$) kan göras med formeln

$$25\,000 / \text{ppi} = \mu\text{m}/\text{px}$$

Exempelvis motsvaras 1000 ppi av 25 $\mu\text{m}/\text{px}$, eller 10 $\mu\text{m}/\text{px}$ av 2500 ppi. (Motsvarande mått inom grafisk teknik är dpi, "dots per inch".)

Digital lagring av bilder kräver stort datorutrymme, om bilden avses få hög geometrisk och radiometrisk upplösning (detalj- och gråtonsupplösning). För att bilden ska få en detaljupplösning som motsvarar en högklassig optiks upplösning förmåga om ca 90 linjepar/mm, måste ett linjepar *sampling* (registreras) av mer än två bildpunktsrader. Pixelstorleken blir då mindre än $1/180$ mm eller 5-6 μm . En flygkamera med bildformat 9x8 cm måste därför överföras till mer än $(90 \times 80 \times 1802) = 230$ miljoner bildelement, 230 megapixel (MP).

För att få tillräcklig gråtonsupplösning *kvantiseras* (digitaliseras) bilden i minst 256 grånivåer, dvs. som 8 bitars (en byte) digital information. För att erhålla god kontrast såväl i motivets skuggpartier som i dess högdagrar erfordras kvantisering i ännu fler nivåer, och det förekommer upp till 14 bitars kvantisering i flygmätkameror. Till detta

kommer registrering i flera våglängdsområden för att kunna återskapa färg- och IR-färgbilder.

En flygbild erfordrar därför över 0,5 gigabyte (GB) datorminne. Om metoder för datakomprimering utnyttjas, minskas lagringsbehovet, men risken för försämrad bildkvalitet vid dekomprimering måste då beaktas. Ett års flygfotoproduktion i Sverige kan omfatta upp till 20 000 bilder...

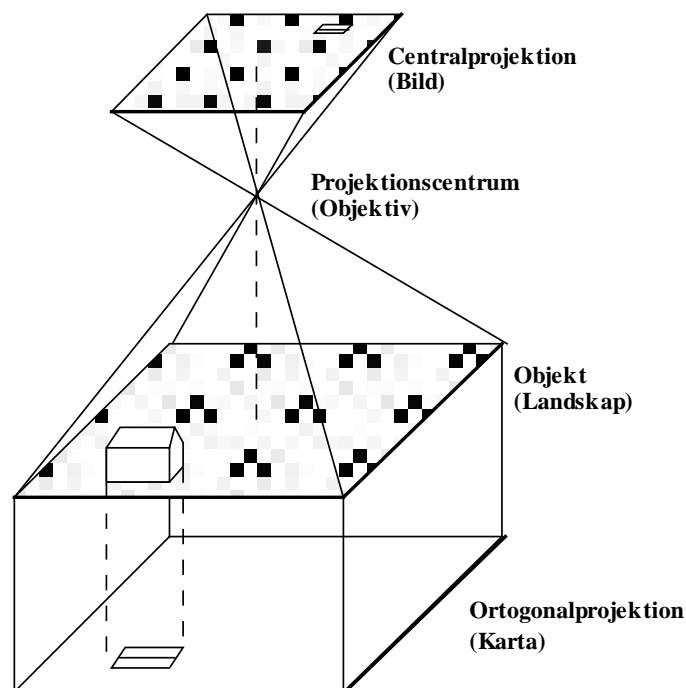
13.2.3 Bildskanning

För skanning av äldre fotografiska bilder och kartor används en bildskanner, normalt en planskanner (eng. flatbed scanner), som mekaniskt fungerar (och ser ut) ungefär som en vanlig kopianator med en detektorrad. För fotogrammetriskt bruk finns sådana utvecklade med mycket hög geometrisk kvalitet, men även enklare skannrar för grafiska ändamål (s.k. desktop publishing) kan användas efter geometrisk kalibrering. Det innebär särskilda kvalitetsproblem att anpassa digitalisering av en fotografisk bild till originalbildens egenskaper.

13.3 Enkelbildens geometri

13.3.1 Centralprojektion och bildskala

Eftersom fotogrammetri innebär mätningar i bilder och omräkning till mått i det avbildade objektet, så måste avbildningens geometri och därmed kamerans geometriska egenskaper kunna beskrivas. Avbildningsgeometrin i en kamera betecknas *centralprojektion* (figur 13.6). Den karakteriseras av, att alla ljusstrålar skär varandra i en punkt i objektivet innan de projiceras på bildplanet. Skärningspunkten betecknas projektionscentrum. Centralprojektionens geometri kan beskrivas matematiskt. Dess egenskaper är av stor betydelse för fotogrammetrin.



Figur 13.6. Central- och ortogonalprojektion

Centralprojektion kan jämföras med kartans projektion. En karta är en *ortogonal* projektion av landskapet till ett projektionsplan i vald skala, se figur 13.6. Projek-

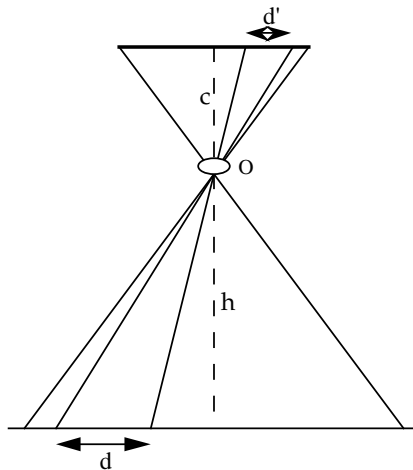
Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

tionsplanet är ett utsnitt ur den valda kartprojektion. (Om kartprojektioner, se kapitel 3.) Varje terrängdetaljs läge projiceras vinkelrätt mot detta projektionsplan. Alla tänkta projektionsstrålar är sålunda parallella. (En sådan projektion skulle teoretiskt uppnås i bilden, om den centralprojicerande kameran befann sig oändligt långt bort.) En huvuduppgift för fotogrammetrin är att omvandla avbildningens centralprojektion till en kartmässig orthogonal projektion.

Fotograferingsriktningen definieras av *kameraaxeln* (streckad i figur 13.6), dvs. den stråle (vektor) genom projektionscentrum, vilken träffar bildplanet under rät vinkel. I flygfotosammanhang talar man om *lodbild*, då kameraaxeln är (nära) lodrät, och om *sträng lodbild*, då den är absolut lodrät. En sträng lodbild över plan och horisontell terräng (eller över ett annat plant och horisontellt objekt) är geometriskt identisk med en orthogonalprojektion av terrängen. Det enda som geometriskt skiljer objekt och bild åt är då *bildskalan*. Med bildskala menar man relationen mellan mått i bilden (d') och i objektet (landskapet, d). Se Figur 13.7. Bildskalan uttrycks som 1:m, där m är skalfaktorn ("förstoringsfaktorn") från bild till verklighet:

$$1 : m = 1 : \left(\frac{d}{d'}\right)$$

$$m = \left(\frac{d}{d'}\right)$$



Figur 13.7. Sträng lodbild över plan terräng. Sträckan d avbildas som d' . O är projektionscentrum, h är flyghöjden och c är kamerakonstanten. Den streckade linjen betecknar kameraaxeln.

Observera alltså, att i en sträng lodbild över plan terräng är bildskalan konstant över hela bildytan. Approximativt gäller detta även för icke stränga lodbilder över måttligt kuperad terräng (se nedan).

Avståndet från projektionscentrum O till bildplanet kallas *kamerakonstanten* c . Ur likformiga trianglar i figur 13.7 framgår, att bildskalan kan uttryckas som förhållandet mellan kamerakonstant (c) och flyghöjd (h) över mark:

$$1 : m = 1 : \left(\frac{h}{c}\right)$$

dvs. skalfaktorn (m) kan också beräknas som

$$m = \frac{h}{c}$$

Detta är ett mycket användbart uttryck, främst för ungefärlig skalbestämning av flygbilder eller för beräkning av ungefärlig flyghöjd, om bildskalan är känd:

$$h = mc$$

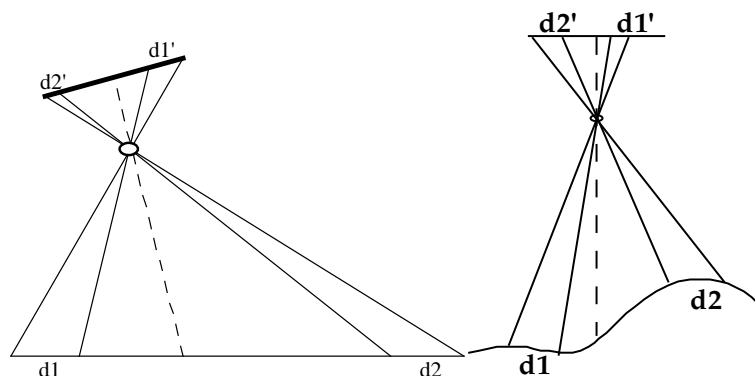
En centralprojektion av ett landskap blir således likformig med en ortogonalprojektion endast om fotograferingsriktningen är strängt lodrät, dvs. bildplanet är parallellt med landskapets plan, och om landskapet är plant och horisontellt. I verkligheten hanterar fotogrammetrin normalt lodbilder (icke stränga) över kuperad terräng. I dessa uppträder måttliga variationer i bildskalan till följd av att kameraaxeln lutar något, och av att terrängen inte är plan.

Skalvariationer till följd av lutande kameraaxel

Lutande kameraaxel (Figur 13.8a) medför att bildskalan gradvis förändras över bildytan. De i terrängen lika långa sträckorna d_1 och d_2 avbildas olika långa (d_1' resp. d_2'). Detta är särskilt märkbart vid snedbilder, som fotograferas med kraftigt lutande kameraaxel.

Skalvariationer till följd av objektets topografi

I kuperad terräng (Figur 13.8b) varierar flyghöjden över mark med markens höjdvariationer i olika delar av landskapet. Därigenom varierar också bildskalan. Högre (närmare) liggande terrängdetaljer avbildas i större bildskala än lägre (längre bort) liggande detaljer, och bildskalan kommer att variera kontinuerligt med landskapets topografi.



Figur 13.8. Skalvariationer i en flygbild till följd av a) lutande kameraaxel, b) terrängens topografi. De i terrängen lika långa sträckorna d_1 och d_2 avbildas olika långa som d_1' resp. d_2' .

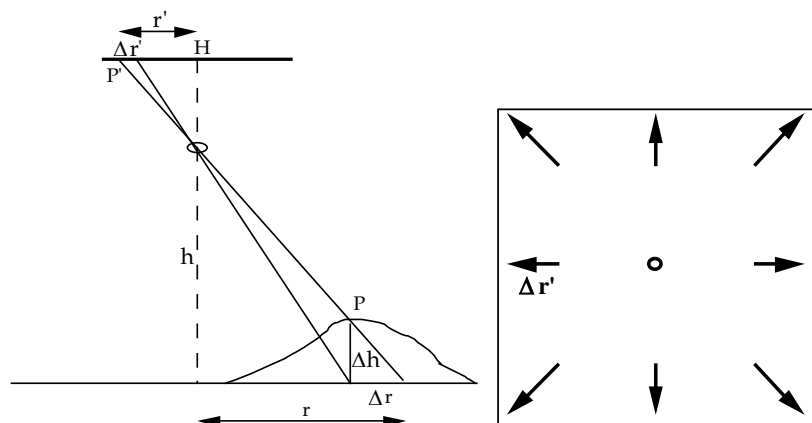
Genom att fotograferingsriktningen i flygbilder inte är strängt lodrät, och terrängen innehåller höjdskillnader, förvanskas även längder, vinklar och arealer något i centralprojektion. En enkelbild går därför i princip inte att använda för att åstadkomma en ortogonal projektion, dvs. för att framställa en geometriskt noggrann karta. Genom parvis fotografering av landskapet med stereoövertäckning och stereoskopisk utvärdering av bildparet, eller genom omprojicering av en flygbild till ett ortofoto, kan detta problem lösas. Teknik för detta kommer att behandlas i fortsättningen (avsnitt 14.1 och 14.2).

13.3.2 Radiell höjddeplacering

Höjdskillnader i terrängen (eller i andra avbildade objekt) medför som nämnts skalvariationer i bilden. Dessutom medför de, att avbildade objekt kommer att förskjutas från de lägen i bilden de skulle ha fått, om terrängen varit plan. I en (sträng) lodbild är

Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

dessa deplaceringar radiella, dvs. riktade från eller mot bildens centrum. I Figur 13.9 avbildas ett objekt med höjden Δh i en lodbild. Objektet kan vara exempelvis ett träd, en byggnad eller en bergshöjd, dvs. terrängens topografi. Dess topp P avbildas i punkten P' på avståndet r' från bildcentrum H. Bildpunkten P' blir förskjutet sträckan $\Delta r'$ på grund av att objektpunkten P ligger höjden Δh över markplanet.



Figur 13.9. Radiell höjddeplacering $\Delta r'$. Högra figuren visar nio höga objekt avbildade med radiell deplacering i en lodbild. Det centrala objektet deplaceras inte ($r'=0$ ger $\Delta r'=0$). Observera hur r' mäts!

Förskjutningens storlek kan beräknas. Ur likformiga trianglar erhålls

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta r'}{r'} \quad \text{och} \quad \frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta h}{h}$$

som kan kombineras till

$$\frac{\Delta r'}{r'} = \frac{\Delta h}{h}$$

Om formeln skrivs

$$\Delta r' = r' \left(\frac{\Delta h}{h} \right)$$

kan höjddeplaceringens storlek $\Delta r'$ beräknas, om objektets höjd är känd. Om exempelvis höjden på ett berg över angränsande terräng avläses via nivåkurvor på en karta, så kan bergshöjdens deplacering beräknas.

Skrivs samma formel i stället

$$\Delta h = h \left(\frac{\Delta r'}{r'} \right)$$

kan objektets (ett hus, ett träd) höjd beräknas, om dess höjddeplacering $\Delta r'$ mäts i bilden. Men då fordras, att läget även för objektets bas kan ses i bilden. En flack bergshöjd kan alltså inte höjdmätas på detta sätt, men däremot en brant bergskärning.

Deplaceringens storlek $\Delta r'$ varierar alltså med flyghöjden h , med höjdskillnadens storlek Δh och med bildpunktens avstånd r' från bildcentrum. (Deplaceringen varierar också med kamerakonstanten c , men eftersom även radien r' gör det i samma mån, blir relationen $\Delta r'/r'$ oberoende av c .) Högre liggande terrängpunkter (bergshöjder, byggnader, träd) förskjuts mot bildens kanter, medan lägre punkter (dalgångar, raviner, gruvhål) förskjuts mot bildens mitt. Se Figur 13.9. I hörnen av en vidvinklig flygbild är deplaceringen ungefär lika stor som höjdskillnaden Δh omräknad till bildens skala (ty där är $r' \approx c$, vilket ger $\Delta r' \approx \Delta h/m$).

Radiell höjddeplacering är egentligen samma sak som variationer i bildskala på grund av terrängens höjdvariationer. Höjer sig terrängen närmare kameran, så ökar avbildningsskalan och bilddetaljer vandrar radiellt utåt från bildcentrum.

Höjddeplaceringen gör det möjligt att stereobetrakta par av bilder och är en förutsättning för stereoskopisk höjdmätning (som kommer att behandlas i avsnitt 14.2).

13.3.3 Mätkameran

En fotogrammetrisk mätkamera karakteriseras av att den har en stabil och noggrant uppmätt inre geometri. Man säger att kameran är kalibrerad. Objektivet är antingen fast monterat i kameran eller fokuserbart i ett antal fasta, väldefinierade lägen. Eftersom flygkameror används vid mycket långa avstånd, kan deras objektiv inställas för detta och monteras fast. Objektivet har ett fast läge i förhållande till bildplanet genom att även CCD-sensorn är fast monterad. Den s.k. bildhuvudpunkten H definieras som läget av den tänkta punkt, där kameraaxeln skär bildplanet. Bildhuvudpunktens läge ges av rad- och kolumnvärdet (r, k) för motsvarande bildelement i bildmatrisen.

(Fotografiska kamerors objektiv är sammanbyggda med en stödring, mot vilken filmen trycks vid exponeringen. Stödringen innehåller distinkta rammärken, som därigenom avbildas i alla bilders kanter. Med hjälp av rammärkena kan bildhuvudpunktens läge bestämmas.)

Kamerans kalibrering utförs av tillverkaren och dokumenteras i ett kalibreringsprotokoll. Där anges bildhuvudpunktens läge och kamerakonstanten c , dvs. avståndet från bildhuvudpunkten till projektionscentrum i objektivet (Figur 13.10). Dessutom uppmäts objektivets avvikelser från den ideala centralprojektion, den s.k. optiska felteckningen. (Mer om detta senare.) De kalibrerade måtten utnyttjas vid fotogrammetrisk mätning i bilder. Kameran kan även kalibreras matematiskt genom s.k. självkalibrering i samband med blocktriangulering, se avsnitt 14.2. Bilder som tas med en kalibrerad mätkamera kallas mätbilder.

Flygmätkameran (Figur 13.10) är en seriekamera, vilket innebär att den automatiskt kan exponera en serie bilder med ett visst tidsintervall mellan varje exponering. Den monteras upphängd i en vibrationsdämpande ring, som monteras över ett hål i flygplanets golv. Flygmätkameror tillverkas med objektiv med olika kamerakonstanter och med olika bildformat. De får därigenom olika öppningsvinklar, och CCD:n kan ha olika pixelstorlek och olika antal pixlar. Se tabell 13.1.



Figur 13.10. Principskiss och bild av flygmätkamera (Vexcel UltraCam X).

Rörelseoskärpa på grund av flygplanets hastighet under exponeringen kan motverkas med bildrörelsekompensation, antingen med en kort förflyttning av CCD-sensorn i flygriktningen under själva exponeringen eller digitalt med en form av fördröjning av

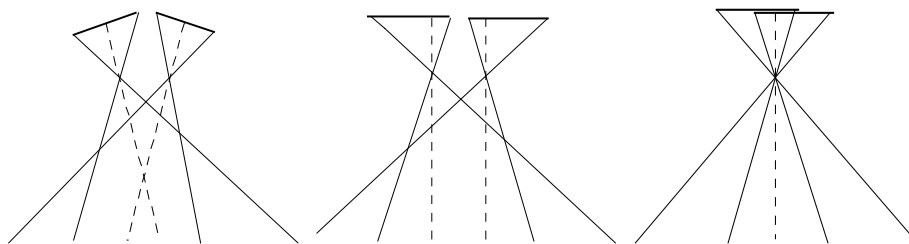
Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

utläsningen av bildelementen i CCDn. Detta är särskilt viktigt vid flygfotografering från låga flyghöjder.

*Tabell 13.1. Karakteristiska data för några exempel på digitala flygkameror. c är kamerakonstanten, FoV (Field of View) betyder objektivets öppningsvinkel (tvärs x längs stråket), Pix är bildelementets storlek, MP är bildstorleken i megapixel. b/h avser bas/höjdförhållandet, som förklaras i avsnitt 14.3. Data avser den pankromatiska bilden. Kvantisering, se avsnitt 13.2. (*Pix/rad)*

	Z/I DMC (2000)	Z/I DMC II 250 (2011)	Vexcel UltraCamXp	Vexcel UltraCamE	Leica ADS80
CCD-typ	Matris	Matris	Matris	Matris	Rad
Bildformat mm	166x92	90x84	104x69	104x68	156x0
c mm	120	112	100	80	65
FoV°	69x42	46x39	55x37	66x46	46x0
Pix μm	12	5,6	6,0	5,2	6,5
MP	106	250	196	260	24000*
b/h (60%)	0,32	0,28	0,27	0,34	
Kvantisering (bit)		14	>12	>12	

En CCD-matris ger en hel bild simultant. Men svårigheter föreligger att tillverka CCD-matriser i de stora bildformat, som ger tillräcklig bildupplösning för flygfotogrammetri. Därför har några tillverkare tagit fram kamerapaketer med flera parallella, något snedställda kameror, vardera med en mindre CCD-matris. De digitala delbilderna räknas i efterhand ihop till en stor bild. Se Figur 13.11. I samband med sammansättningen av delbilderna till en gemensam centralprojektion justeras de för radiell felteckning och andra systematiska fel. Därigenom blir den slutliga bilden en så gott som perfekt centralprojektion.

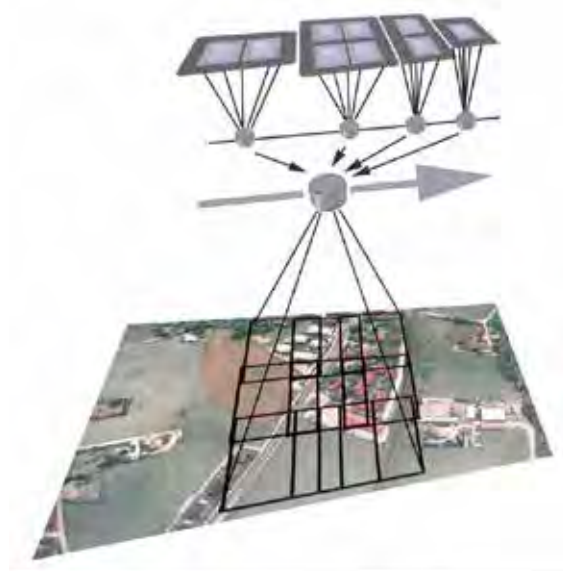


Figur 13.11. Principen för sammanräkning av delbilder till en gemensam centralprojektion. Snedbilderna rektifieras till lodbilder med parallella kameraaxlar och translernas sedan tills kameraaxlarna sammanfaller. Snedbildernas lutningar är här överdrivna.

Kamerapaketer innehåller dessutom fyra färgkameror med något lägre detaljupplösning, filtrerade för att registrera i B, G, R respektive IR. I en efterföljande digital process, s.k. panskärpning, kan dessa delbilder räknas samman med den högupplösta svart-vita bilden (Pan) till högupplösta färgbilder (B, G, R och Pan) eller IR-färgbilder (G, R, IR och Pan).

Exempel på flygkameror

Vexcel Corp. marknadsför kameror UltraCam (Figur 13.12) med vardera fyra kameror, som exponeras så, att de ger nio delbilder. Dessa räknas samman till en högupplöst pankromatisk bild, se Figur 13.12. Kameran har dessutom fyra lågupplösta färgkameror, filtrerade för att registrera i B, G, R respektive IR. De pankromatiska bildelementen är 5,2 - 6 μm stora och den sammanräknade bilden blir 200-260 MP stor med bildformatet 104 x 68 mm. Den kan kombineras med de fyra färgkanalerna till en färgbild eller en IR-färgbild.

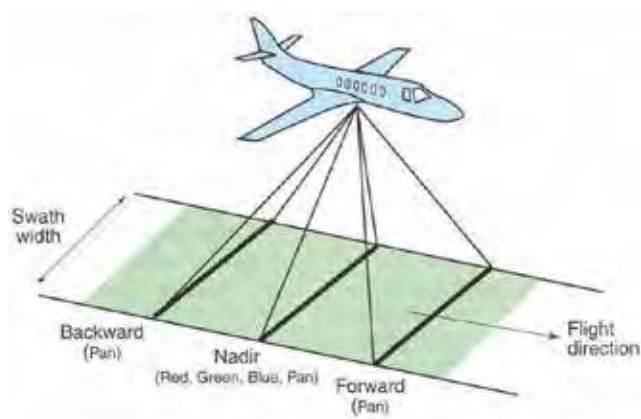


Figur 13.12. Den pankromatisk bilden sammansätts av delbilder från flera CCD-matriser. (Vexcel UltraCam).

Intergraphs äldre kamera DMC från år 2000 används fortfarande. Även i den räknas fyra delbilder, dvs. fyra separata centralprojektioner, ihop till en bild, en nära nog perfekt centralprojektion med kamerakonstant 120,00 mm och bildformat 166x92 mm. Den sammansatta pankromatiska (svart-vita) bilden består av 106 x 106 bildelement (dvs. 106 MP), vardera med storleken 12x12 μm . Den kan kombineras med fyra lågupplösta färgkanaler (B, G, R, IR) till en färgbild eller en IR-färgbild. Öppningsvinkeln tvärs flygstråket är 69°, längs flygriktningen 42°.

Hexagon/Intergraphs senaste kamera DMC II, har den hittills största CCD som tillverkats om 90 x 84 mm och med bildstorleken 250 MP med 5,6 μm bildelement (Figur 13.4). Den har även fyra färgkameror i lägre upplösning. Med s.k. panskärpning kan delbilderna i B, G, R och IR räknas samman med den högupplösta svart-vita bilden till högupplösta färg- eller IR-färgbilder.

CCD-rader är lättare att tillverka än CCD-matriser. Leica Geosystems, gör därför en kamera i form av en skanner med långa, tvärställda CCD-rader (Figur 13.13), som avsöker landskapet kontinuerligt under flygningen. Skannern har tre CCD-rader, en lodrätt nedåt, en snett framåt och en snett bakåt, och kallas därför trelinjeskanner. Genom att kombinera bilder från de tre CCD-raderna kan stereomodeller rekonstrueras. Den lodrätt riktade används för att skapa ett ortofoto (en bildkarta). I Leicas kamera omfattar varje CCD-rad 24 000 bildelement om vardera 6,5 μm , och öppningsvinkeln (tvärs stråket) är 46°. Dessutom har kameran särskilda CCD-rader för de tre grundfärgerna (B, G, R) och för närinfrarött (IR). Därigenom kan färg- och IR-färgbilder skapas.



Figur 13.13. En trelinjeskanner (Leica Geosystems ADS 80) monterad i flygplanet, och dess marktäckning.

Varje skannad rad av bildelement utgör en egen centralprojektion och måste knytas geometriskt till de föregående och efterföljande raderna, för att den resulterande, kontinuerliga bilden ska kunna geometriskt rektifieras och utvärderas fotogrammetriskt. Trelinjeskannern är därför helt beroende av ett navigeringssystem, som kontinuerligt registrerar kamerans läge och kameraaxelns riktning. Systemet är baserat på GPS och tröghetsnavigering. Utvärderingsprocessen utnyttjar en speciell programvara och är starkt automatiserad.

För mark- och fordonsbunden fotogrammetri används *terrestra mätkameror* med CCD-matriser för mindre bildformat. Se avsnitt 15.4.

13.3.4 Inre och yttre orientering. Kalibrering

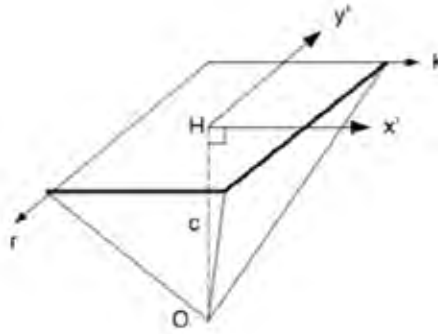
Strålkärven

I exponeringsögonblicket förbinds varje punkt i objektet (på marken) med sin motsvarande bildpunkt via en rät ljusstråle genom objektivets projektionscentrum. Tillsammans bildar alla dessa ljusstrålar en strålkärve (se Figur 13.6). Strålkärven kan tänkas delad i två, en yttre, utanför kameran, och en inre, i kameran. Fotogrammetrisk mätning baseras på, att den yttre strålkärven kan rekonstrueras optiskt eller matematiskt med hjälp av den inre. Utgångspunkter för rekonstruktionen är dels att kamerans inre geometri är känd, dvs. att kameran är kalibrerad, dels att bilddetaljens lägen i bilden kan mätas.

Mätkamerans (och därmed mätbildens) inre och yttre orientering är de grundläggande data, som beskriver kamerans inre geometri och dess läge och riktning när bilden togs. Den inre orienteringen beskriver bildplanets läge i förhållande till projektionscentrum, medan den yttre orienteringen beskriver kamerans läge i ett yttre koordinatsystem och kameraaxelns riktning i detta system. Tillsammans beskriver de relationen mellan bilden och objektet.

Inre orientering

Mätkamerans inre geometri, dess inre orientering, bestäms som nämnts genom kalibrering av mätkameran vid tillverkningen. Då mäts de storheter som fordras för att den yttre strålkärven ska kunna rekonstrueras matematiskt ur mätningar i bilden. Observera alltså, att bestämning av den inre orienteringen syftar till att kunna rekonstruera den yttre strålkärvens form!



Figur 13.14. En mätkameras inre orienteringsdata. H är bildhuvudpunkten, som utgör origo för bildkoordinatsystemet $(x' y')$. Läget för H definieras genom läget $(r, k)_H$ för motsvarande digitala bildelement. O är projektionscentrum i objektivet och c är kamerakonstanten.

För att rekonstruera den yttre strålkärven, dvs. alla strålar som den består av, måste läget av projektionscentrum (O) vara bestämt i förhållande till bildplanet. Se Figur 13.14 (och jämför Figur 13.6!). Därigenom kan de mätta punkternas lägen i bildplanet räknas om till riktningar hos motsvarande inre bildstrålar. Tänker man sig dessa förlängda ut genom objektivet, kan samtidigt de yttre bildstrålarnas riktningar (dvs. den yttre strålkärven) rekonstrueras.

Läget av O definieras med hjälp av kamerans inre orientering, dvs. av

- bildhuvudpunkten (H), dvs. läget av fotpunkten (!!) för normalen från projektionscentrum (O) mot bildplanet, och
- kamerakonstanten (c), dvs. normalens längd eller avståndet OH från projektionscentrum till bildplanet.

Bildhuvudpunkten H sammanfaller (nära) med bildcentrum, och dess läge anges av motsvarande bildelement $(r, k)_H$ i CCD-matrisen med origo i bildhörnet. Värdet på $(r, k)_H$ hämtas ur kamerans kalibreringsprotokoll. Sträckan HO och dess förlängning kallas *kameraaxel* och anger kamerans fotograferingsriktning.

Bilddetaljernas lägen i bilden mäts på datorskärm som koordinater (r, k) i bildmatrisen med origo i övre vänstra bildhörnet. *Bildkoordinatsystemet* $(x' y')$ definieras emellertid med origo i bildhuvudpunkten H och x' -axeln i flygriktningen. Bilddetaljernas lägen räknas därför om från de mätta koordinaterna (r, k) till bildkoordinater $(x' y')$ via läget $(r, k)_H$ för bildhuvudpunkten.

Sammanfattning

En mätkameras inre orientering bestäms genom kalibrering av kameran. Bilder som tas med en mätkamera kallas mätbilder. Den yttre strålkärven vid exponeringen kan återskapas ur mätbilden genom rekonstruktion av den inre orienteringen. Det görs genom att

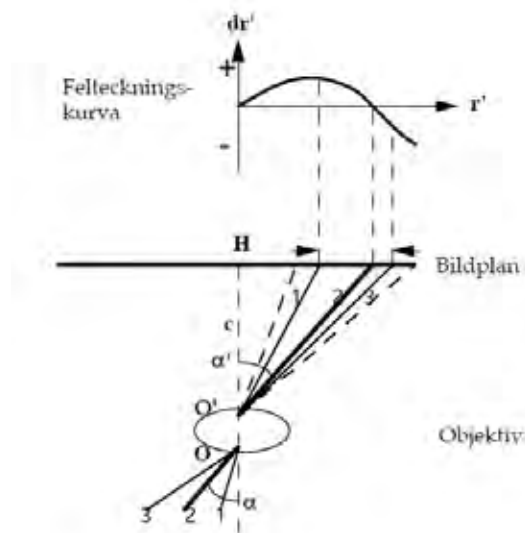
- ange bildens kamerakonstant,
- ange bildhuvudpunktens läge i bildmatrisen,
- mäta bildkoordinater för önskade bildpunkter, och
- korrigera mätta bildkoordinater för avvikelser från centralprojektion, främst radiell felteckning (se nedan).

Varje bildpunktsläge som mäts, resulterar i en rekonstruerad stråle i den yttre strålkärven.

Radiell felteckning

I praktiken blir en bild inte en sträng centralprojektion. Ljusrefraktion i atmosfären och ofullkomligheter i kamerans optik och i CCDn är exempel på orsaker till små avvikelser från centralprojektion. I den mån sådana s.k. systematiska fel kan beskrivas matematiskt, så kan de korrigeras efter bildmätningen. Här kommer radiell optisk felteckning att beskrivas, eftersom den bestäms vid kamerans kalibrering.

Ett flygkameraobjektiv består av ett sammansatt system av glaslinser, konstruerat för att ge en så skarp bild som möjligt. Däri kan två projektionscentra, ett yttre och ett inre, definieras. (Vi har i tidigare resonemang förenklats detta till ett gemensamt projektionscentrum.) De bildalstrande strålarna löper vid exponeringen samman i yttre projektionscentrum och lämnar objektivet från inre projektionscentrum.



Figur 13.15. Radiell felteckning. Underst visas ett tvärsnitt av kameran med tre infallande ljusstrålar. Stråle 2 (fet) representerar en felteckningsfri stråle ($\alpha' = \alpha$). Stråle 1 har positiv felteckning, medan stråle 3 har negativ. Överst visas motsvarande felteckningskurva.

Från inre projektionscentrum definieras kamerakonstanten. I ett felteckningsfritt objektivet är de inre strålarna parallella med de yttre (Figur 13.15, stråle 2).

Om däremot felteckning föreligger, fortsätter inte strålarna i samma riktning efter att ha passerat objektivet utan bryts något från eller mot bildhuvudpunkten H (Figur 13.15, stråle 1 resp. 3). Ljusbrytning från bildhuvudpunkten (stråle 1) betecknas positiv, brytning mot denna (stråle 3) negativ.

Av den felteckningsfria strålen 2 framgår, att radien r' från bildhuvudpunkten till bildpunkten är en funktion av den infallande strålens vinkel α mot kameraaxeln:

$$r' = c \tan \alpha$$

Föreligger felteckning dr' modifieras radiens funktion till

$$r' = c \tan \alpha + dr'$$

där dr' kan vara positiv eller negativ.

Felteckningen är i stort sett symmetrisk kring bildhuvudpunkten. Den är alltså konstant för varje given radie (dvs. radiell) och kan därför uttryckas som funktion av radien. Den radiella felteckningsfunktionen, dvs. felteckningen som funktion av radien, uttryckt som

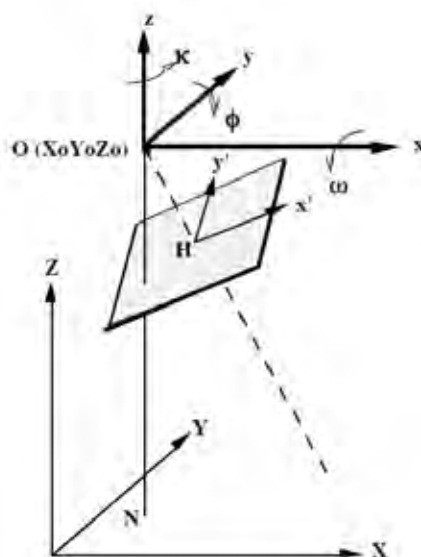
$$dr' = f(r') = r' - c \tan \alpha$$

mäts upp vid kamerakalibreringen och redovisas numeriskt och grafiskt i en felteckningskurva, som visar felteckningens storlek och riktning som funktion av bildens radie r' . En felteckningskurva redovisas överst i Figur 13.15.

I moderna flygkameror uppgår felteckningen till högst ett par μm och kan därför i många fall negligeras, medan den i andra kameratyper kan uppgå till $\pm 50 \mu\text{m}$. De mätta bildkoordinaterna kan korrigeras numeriskt för felteckningen. En digital bild kan omsamplas, dvs. "ritas om" bildelement för bildelement, till en felteckningsfri bild, sedan bildelementens korrigerade lägen beräknats. Detta utförs normalt vid sammanräkningen av delbilder till en gemensam centralprojektion, se Figur 13.11.

Yttre orientering

De *yttre orienteringselementen* definierar kamerans och den yttre strålkärvens läge och riktning vid exponeringen. De utgörs av tre markkoordinatvärden ($X_0 Y_0 Z_0$) för läget av kamerans yttre projektiionscentrum (exponeringsorten) och tre vinklar (ω, ϕ, κ , omega, fi och kappa) för kameraaxelns riktning. Vinklarna är definierade kring ett rätvinkligt, treaxligt koordinatsystem med origo i projektiionscentrum O och axlarna parallella med det markkoordinatsystemets. Se figur 13.16, där bilden dock tecknats i s.k. positivläge, dvs. rättvänd och framför projektiionscentrum. Detta är en vanlig representationsform i fotogrammetrin (jämför Figur 13.6, där bilden ligger i spegelvänt negativläge).



Figur 13.16. Bildens (eller kamerans) yttre orientering. Bilden är ritad i positivläge, dvs. framför projektiionscentrum O . H betecknar bildhuvudpunkten och $x' y'$ bildkoordinater. N är nadirpunkten. Kameraaxeln är streckad.

Geografiska koordinatsystem (avsnitt 2.2) är ju egentligen inte strikt rätvinkligt tredimensionella. Plankoordinaterna definieras utifrån ellipsoiden via en vald kartprojektion, medan höjdkoordinaten definieras vinkelrät mot geoiden. Lokalt kan dock i praktiken ett tredimensionellt markkoordinatsystem användas. I denna framställning (och i all lokal mätning) betraktas markkoordinatsystemet som ett rätvinkligt högerhandssystem och betecknas ($X Y Z$).

Punkten N i Figur 13.16 kallas *nadirpunkt* och är den terrängpunkt som ligger lodrätt under projektiionscentrum. Sträng lodbild innebär att kameraaxeln pekar mot nadir-

Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

punkten. Då gäller $\omega = \phi = 0$, medan κ då betecknar kamerans (dvs. bildens) vridning runt kameraaxeln. Stränga lodbilder kan i praktiken aldrig uppnås vid flygfotografering. För normala lodbilder gäller $(\omega, \phi) \leq 5$ gon. Är vinklarna (väsentligt) större, talar man om *snedbilder*.

De yttre orienteringselementen för en flygbild kan bestämmas på olika sätt. Redan under flygfotograferingen kan de bestämmas med integrerade navigationssystem, se nedan. De kan också bestämmas med fotogrammetriska metoder. Ur en enkelbild bestäms de med enkelpunktsinskränning, med hjälp av minst tre signalerade *stödpunkter* på marken med kända markkoordinater (berörs i avsnitt 14.2 och 15.1 nedan). Indirekt kan de bestämmas genom blocktriangulering eller stereoskopisk orientering och mätning av bildpar (se 14.2 nedan).

Integrerade navigationssystem

Flygplanet kan förses med mottagarantenn för satellitpositionering (GNSS). Därigenom erhålls värden på kamerans (egentligen yttre projektionscentrums) läge vid varje exponering. Kameran förses med gyron för tröghetsnavigering (TN eller eng. INS, Inertial Navigation System) för att bestämma kameraaxelns riktning i fotograferingsögonblicket, dvs. vinklarna $(\omega \phi \kappa)$. I ett integrerat navigationssystem stöttar dessa system varandra, och de yttre orienteringselementen kan bestämmas med relativt god noggrannhet redan under flygningen.

Systemet för tröghetsnavigering består av tre accelerometrar, som mäter linjära accelerationer utefter tre ortogonala axlar, och tre gyron som mäter vinkelhastigheter runt dessa axlar. Vinkelhastighet är vinkelförändring per tidsenhet. Om man känner till axlarnas utgångsbäringar kan man stegvis beräkna nya bäringar framåt i tiden. Dessa vinklar kan användas för att bestämma vinklarna $(\omega \phi \kappa)$. Vissa tröghetssystem är kardanskt upphängda för att ständigt vara orienterade i ett yttre koordinatsystem. Andra sitter fast monterade på plattformen, s.k. "strapdown"-system. De senare är vanligast för orientering av flygkameror och laserskannrar, eftersom de direkt mäter utrustningens rörelser.

Tröghetssystem mäter under korta tidsintervall med hög noggrannhet, men med kraftig avdrift med tiden. GNSS-teknik lämpar sig mycket väl för att korrigera för denna avdrift. Å andra sidan riskerar man att förlora kontakten med satelliterna vid GNSS-mätning, t.ex. när flygplanet svänger kraftigt och antennen skymms för satelliterna. Med TN kan fortsatt positionsbestämning utföras, till dess kontakt med satelliterna åter etablerats. Mycket arbete har därför lagts ned på att ta fram effektiva navigationssystem som integrerar GNSS och TN. Resultatet blir 1) ett effektivt stöd för piloten att navigera de planerade flygstråken, 2) automatisk utlösning av kameran i förvalda lägen, och 3) relativt bra värden på kamerans yttre orientering vid varje exponering. Standardosäkerheten för projektionscentrums läge i rymden blir under en dm. Dessa yttre orienteringsvärden räcker tyvärr ändå inte för fotogrammetrisk stereoskopisk mätning. Som vi ska se senare (avsnitt 14.2), utgör de emellertid utmärkta utgångsvärden för beräkning av noggranna yttre orienteringsdata ur bildmätningar med hjälp av blocktriangulering.

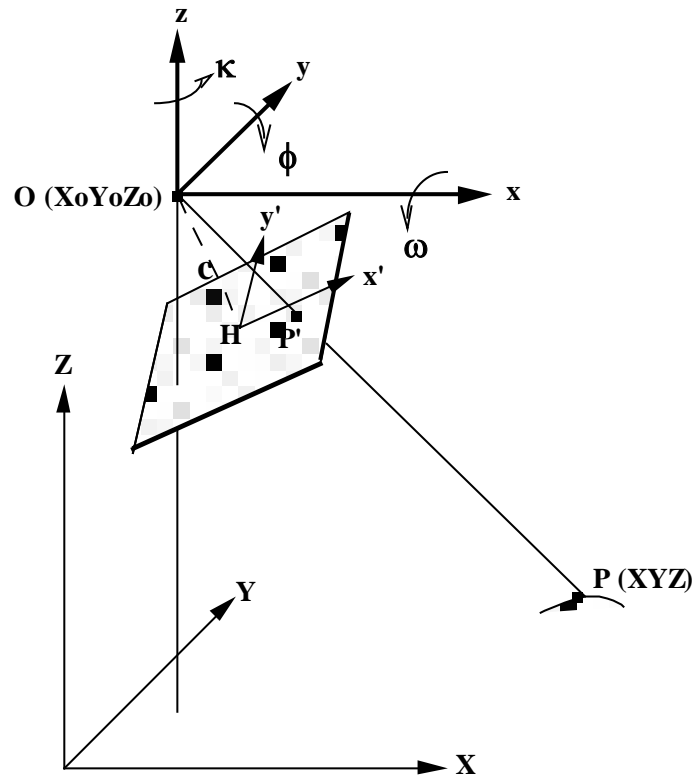
13.3.5 Kolinearit

Kolinearit är en matematisk beskrivning av en centralprojicerad ljusstråle. Den inkluderar kamerans (dvs. bildens) inre och yttre orientering.

Varje ljusstråle från ett objekt i landskapet till bildplanet bär information om objektet

och dess läge. Informationen lagras i bildplanet i den digitala bildens centralprojektion. För att återskapa det avbildade objektets storlek, form och läge fordras att ljusstrålen kan rekonstrueras utifrån bildpunktens läge i bilden.

I exponeringsögonblicket ligger en objektpunkt P , objektivets projektionscentrum O och motsvarande bildpunkt P' på rät linje uteslutande en ljusstråle. Se Figur 13.17, där liksom i Figur 13.16 bilden tecknats i positivläge.



Figur 13.17. Kolinariet. Vektorena (strålarna) OP och OP' är kolineära. Bilden är ritad i positivläge, dvs. framför projektionscentrum O .

Begreppet kolinariet avser den matematiska beskrivningen av detta förhållande. Strålarna (vektorena) OP' och OP sägs vara kolineära. (Latinets ko- betyder gemensam, jfr Kooperationen.) Vektorn OP' kan beskrivas om den *inre* orienteringen är känd, riktningen för OP kan beräknas om även den *yttre* orienteringen är känd.

Begreppet kolinariet är centralt i analytisk fotogrammetri och ska här illustreras med sitt grundläggande formelsamband. Den matematiska utvecklingen och den analytiska tillämpningen av sambandet anges dock här endast skissartat.

Det s.k. kolinarietetsvillkoret uttrycker, att objektvektorn OP kan återskapas som bildvektorn OP' multiplicerad (förlängd) med en skalfaktor m , dvs.

$$OP = m \cdot OP'$$

eller i vektorform

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} = m R \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{pmatrix}$$

$(X Y Z)$ är koordinaterna för objektpunkten P , och $(X_0 Y_0 Z_0)$ för projektionscentrum O , båda i det *yttre* markkoordinatsystemet. Differensen $(X Y Z) - (X_0 Y_0 Z_0)$ utgör

Kapitel 13: Fotogrammetri och flygbilder

alltså längden av vektorn OP .

$(x' y' -c)$ är de tredimensionella bildkoordinaterna för bildpunkten P' . "Höjd"-koordinaten $(-c)$ i bildkoordinatsystemet är konstant och lika med kamerakonstanten för alla bildpunkter. (Att den är negativ beror på definitionen av z-axeln i det lokala koordinatsystemet med origo i projektiionscentrum O .) Differensen $(x' y' -c) - (0 0 0)$ utgör alltså längden av vektorn OP' .

Skalfaktorn $m = OP/OP'$ är på grund av markens topografi unik för varje enskild bildstråle och därför okänd. (Om den vore känd eller kunde bestämmas, skulle bara en bild behövas för fotogrammetrisk mätning, men så är nu tyvärr inte fallet.)

R är en rotationsmatris, dvs. en matris som roterar ett koordinatsystem runt dess tre axlar. Matrisen beskriver bildkoordinatsystemets $(x' y' -c)$ vridning runt axlarna $(x y z)$ (överst i figur 13.17) eftersom bilden inte kan antas vara en sträng lodbild. Axlarna $(x y z)$ är parallella med de yttre koordinataxlarna $(X Y Z)$. Vridningens storlek anges av kamerans yttre orienteringsvinklar $(\omega \phi \kappa)$. Rotationsmatrisen innehåller 3×3 st trigonometriska uttryck $(r_{11} - r_{33})$ av rotationsvinklarna $(\omega \phi \kappa)$ runt x-, y- resp. z-axeln:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

Utveckling av villkoret

Kolinearitetsvillkoret kan utvecklas till samband mellan mark- och bildkoordinater. Med dessa samband kan omräkning göras mellan bildkoordinatsystemet $(x' y')$ och markkoordinatsystemet $(X Y Z)$. Förutsättningen är emellertid, att såväl de inre orienteringselementen (c, H, dr') som de sex yttre orienteringselementen $(X_0 Y_0 Z_0 \omega \phi \kappa)$ är kända. Den okända skalfaktorn (m) kan däremot elimineras i formelhanteringen. Utvecklas villkoret så, att bildkoordinater $(x' y')$ uttrycks som funktioner av markkoordinater $(X Y Z)$, talar man om *fotograferingsfallet*:

$$x' = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y' = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Om man känner objektpunktens P läge och bildens inre och yttre orientering kan alltså bildpunktens P' läge $(x' y')$ i bildmatrisen bestämmas. Att det faktiskt kan vara av intresse, bl.a. för framställning av ortofoto, ska senare visas.

Uttrycks i stället objektkoordinater som funktioner av bildkoordinater, talar man om *projektionsfallet*:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{x'r_{11} + y'r_{12} - cr_{13}}{x'r_{31} + y'r_{32} - cr_{33}}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{x'r_{21} + y'r_{22} - cr_{23}}{x'r_{31} + y'r_{32} - cr_{33}}$$

Här syns tydligt, att markkoordinaterna $(X Y Z)$ inte kan bestämmas ur en enkelbild. Punktens höjd Z i landskapet ingår i högerledet och måste alltså vara känd, för att dess läge i plan $(X Y)$ ska kunna bestämmas. Orsaken är (indirekt) den okända skalfaktorn

(m).

Tillämpningar

Kolineariteten ligger till grund för flera fotogrammetriska operationer:

- 1) Med *enkelpunktsinskränning i rymden* kan man bestämma den yttre orienteringen för en lod- eller snedbild med känd inre orientering. Minst tre stödpunkter fordras. Med stödpunkter menas identifierbara punkter i objektet med kända markkoordinater ($X Y Z$). Stödpunkterna kan behöva signaleras så, att de blir synliga i bilden, och deras bildkoordinater ($x' y'$) mäts. Kolinearitetsvillkor ställs upp för dessa punkter. Ett ekvationssystem erhålls, med minst tre par kolinearitetskvationer i fotograferingsfallet. Ekvationssystemet lineariseras runt närmevärden och löses med avseende på de sex yttre orienteringselementen ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$). Är systemet överbestämt, dvs. fler än tre stödpunkter används, utjämnas det med minsta kvadratmetoden. Detta är en tredimensionell fotogrammetrisk motsvarighet till geodetisk stationsetablering (inskränning, fri station).
- 2) Beräkning av tredimensionella modellkoordinater ($x y z$) med hjälp av *stereofotogrammetri* görs som en skärning i rymden av två strålar, en från vardera bilden. Strålarnas riktningar uttrycks som kolineariteter, och skärningspunkten utgör objektpunktens P läge. Stereofotogrammetri kommer att behandlas i kapitel 14.
- 3) Med *blocktriangulering* kan den yttre orienteringen bestämmas samtidigt för ett stort antal flygbilder (ett block) över ett större, flygfotograferat område. Metoden kan formuleras som en samtidig, gemensam lösning av kolinearitetskvationer för ett stort antal mätta bildpunkter i många flygbilder. Blocktriangulering kommer att behandlas i avsnitt 14.2.
- 4) Vid *framställning av ortofoto* skall bilddetaljernas radiella höjddeplacering korrigeras bort. Korrektionen utförs pixelvis i bilden. Varje enskilt bildelement tilldelas ett nytt läge, fritt från höjddeplacering. Det nya läget beräknas med hjälp av kolinearitetskvationerna i fotograferingsfallet. Höjdvärdet Z för motsvarande objekt punkt måste därvid vara känt och hämtas därför ur en digital höjdmodell. Ortofototeknik kommer att behandlas i avsnitt 14.1 och digitala höjdmodeller i avsnitt 15.2.

14 Fotogrammetriska metoder

14.1 Enkelbildsmetoder

14.1.1 Fotokarta

En karta som kombinerar ritad kartinformation med en fotobild kallas fotokarta eller bildkarta. Exempel är Lantmäteriets fastighetskarta och skogskartor. Vanligt skalområde är 1:5000 – 1:20 000. Fotobilden i kartan är ett ortofoto, dvs. en flygbild, i vilken effekterna av bildlutningen och av markytans topografi har eliminerats (egentligen har de reducerats till acceptabel nivå). Ortofotot är därmed en (approximativ) ortogonalprojektion av terrängen, och kombinerar den ritade kartans (kartdatabasens) geometriska egenskaper med flygbildens informationsinnehåll. Fotokartor behandlas även i avsnitt 15.3.

14.1.2 Rektifiering

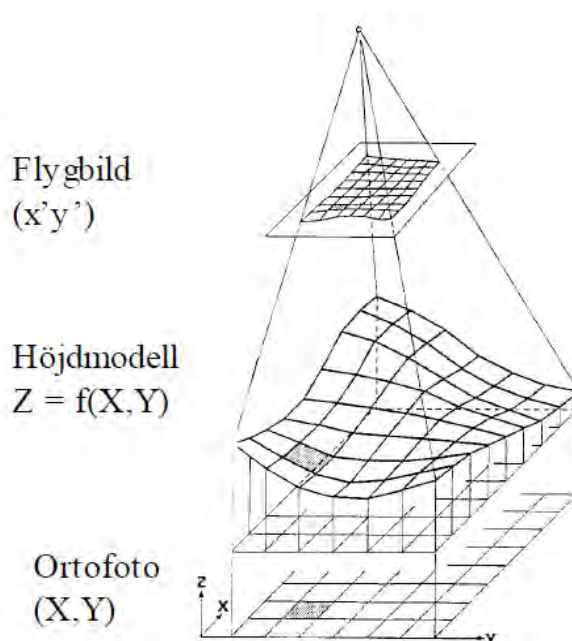
Det går att visa, att om terrängen (objektet) är plan(t), kan ett matematiskt, s.k. projektivt samband ställas upp mellan objektets plan och bildens. Se Figur 13.8a. Detta utnyttjas vid rektifiering av bilden. Med rektifiering omprojiceras en lodbild eller snedbild till sträng lodbild. Samtidigt kan bilden förstöras till förvald skala. Genom rektifiering elimineras geometriska fel orsakade av kameraaxelns lutning (se avsnitt 13.3). Den rektifierade bilden motsvarar således en sträng lodbild i en förvald medelskala, men om landskapet inte är helt plant innehåller bilden fortfarande radiella höjddeplaceringar och (måttliga) skalvariationer beroende på topografin.

Rektifierade och skalbestämda bilder har använts – ofta tillsammans med viss ritad kartinformation och text – som enkla fotokartor. Vanliga användningsområden var för skogliga ändamål och för presentation av fysiska planer, t.ex. utbyggnadsområden och vägprojekt. Den gamla Ekonomiska kartan var baserad på en rektifierad bildmosaik. Enkla fotokartor har numera i stort sett ersatts av digitala ortofoton, ortofotokartor och 3D snedperspektiv.

14.1.3 Ortofoto

Princip och framställning

Ett ortofoto är en flygbild, i vilken förutom bildlutningen även markytans radiella höjddeplaceringar $\Delta r'$ (se avsnitt 13.3) eliminerats (egentligen har de reducerats till acceptabel nivå). Ortofotot är därmed en (approximativ) ortogonalprojektion av terrängen, och kombinerar den ritade kartans (eller kartdatabasens) geometriska egenskaper med flygbildens informationsinnehåll.



Figur 14.1. Principen för ortofototeknik

Vid framställning av ett ortofoto utgår man från en digital flygbild och en digital höjdmodell och genererar ortofotot i en digital arbetsstation. Det digitala ortofotot får samma uppbyggnad som flygbilden: en matris av bildelement (r, k) med var sina gråvärden eller färger. Skillnaden är, att ortofotots bildelement ligger i kartmässigt rätta lägen (X, Y) , se Figur 14.1). Att omvandla flygbilden till ett ortofoto medför alltså, att bildelementen ges nya lägen (eller ges nya gråvärden i givna lägen, om man så vill). Ordet "gråvärde" kan ersättas med "färg" om ortofoto i färg ska framställas.

Man utgår från en tom bildmatris utan gråvärden, dvs. ett blivande ortofoto utan bilddetaljer men med ett givet geografiskt läge. Bildelementen i denna ska tilldelas gråvärden, ett i taget. För att ta reda på vilket gråvärde ett av ortofotots bildelement $(r, k)_O$ ska få, utgår vi från det bildelementets kartkoordinater (X, Y) , som ju är desamma som den avbildade objekt detaljens markkoordinater. Höjdkoordinaten (Z) för detta läge i landskapet erhålls med hjälp av en digital höjdmodell av landskapet, dvs. ett tätt raster av höjdpunkter $Z = f(X, Y)$. Den digitala höjdmodellen måste tidigare ha mätts in med fotogrammetriska eller geodetiska metoder eller med flygburen laserskanning och lagrats i en databas.

Nu kan läget i flygbilden för motsvarande bildelement $(r, k)_B$ med bildkoordinaterna (x', y') beräknas utifrån det valda ortofotoelementet med kartkoordinaterna (X, Y) och höjdvärdet (Z) . Läget beräknas med kolinearitetsvillkoret i flygfotofallet. Vi modellerar helt enkelt flygfotograferingssituationen matematiskt, se avsnitt 13.3:

$$x' = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y' = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

För att lösa ekvationerna måste bildens yttre orientering (dvs. projektiionscentrums läge (X_0, Y_0, Z_0) och kameraaxelns riktning ω, ϕ, κ) först bestämmas. Det görs med integrerad GNSS-teknik och tröghetsnavigering vid flygfotograferingen, följd av

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

blocktriangulering (se nedan, avsnitt 14.2). Elementen ($r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$) i ekvationerna ovan återfinns i rotationsmatrisen \mathbf{R} , och kan beräknas ur vinklarna ($\omega \phi \kappa$). Även den inre orienteringen (c och H , som ger origo för bildkoordinaterna ($x' y'$), se avsnitt 13.3) måste vara känd.

Nu har vi beräknat läget ($x' y'$) för det bildelement i den inskannade, digitala flygbilden, som motsvarar läget av objektpunkten ($X Y Z$) i landskapet och läget ($X Y$) i ortofotot. Via den inre orienteringen beräknar vi bildelements läge (r, k)_B i bildmatrisen ur ($x' y'$). Därefter kan vi "hämta" det bildelementets färgvärde och tilldela det till det valda läget ($X Y$) i ortofotot, dvs. till bildelementet (r, k)_O i den tomma ortofotomatrisen. Det första bildelementet är därigenom inlagt i det blivande ortofotot.

Proceduren upprepas för nästa bildelement. Så byggs ortofotot upp, bildelement för bildelement. Proceduren måste alltså upprepas lika många gånger som antalet bildelement i det blivande ortofotot. Resultatet blir en ny flygbild med homogen skala och kartmässig ortogonalprojektion, ett ortofoto. Se Figur 14.2.



Figur 14.2. En flygbild (till vänster) och motsvarande ortofoto (till höger). Tydligt ligger en bergshöjd i bildens övre högra hörn. Bergshöjdens radiella deplacering i bilden har korrigerats i ortofotot.

Ortofotots geometriska kvalitet

Ett ortofotos geometriska kvalitet är beroende dels av noggrannheten i ursprungsbildens yttre orientering, dels av den digitala höjddatabasens noggrannhet och täthet.

Fel i yttre orienteringens vinklar inverkar på noggrannheten i plan ungefär lika starkt över hela bildytan. Som riktvärde kan anges, att vinklarna måste bestämmas med ett medelfel under en bågminut.

Fel i höjddatabasen inverkar på mätosäkerheten i plan kraftigast runt ortofotots kanter. (Inte alls i nadir, dvs. nära bildcentrum! Jämför avsnitt 13.3 om radiell höjddeplacering.) Lägesfelen i plan i ortofotot kan bli av samma storleksordning som mätosäkerheten i höjd i höjddatabasen. Lantmäteriets nya höjddatamodell NNH (Ny Nationell Höjddatamodell), som baseras på flygburen laserskanning, har i praktiken en mätosäkerhet i höjd på 0,2-0,5 m, medan den nuvarande rikstäckande höjddatabasen har en mätosäkerhet i höjd om ca 2,5 m. Ortofoton från lägre flyghöjder fordrar mer detaljerade digitala höjddatamodeller för att få tillräcklig geometrisk kvalitet.

Eftersom varje bildelement i den digitala bilden är väsentligt mindre än höjdmodellens punktavstånd, måste höjdmodellen interpoleras (omräknas) till samma täthet som bildmatrisen. En flygbild från 1500 m höjd kan ha ca 0,1 x 0,1 m bildelement i markens skala, medan Lantmäteriets hittillsvarande höjddatabas har punkttätheten 50 m, och NNH får punkttätheten 2 m. Interpolationen av höjdvärdena kan medföra geometriska fel i ortofotot, särskilt om inte höjdmodellen försetts med topografiska brytlinjer, som förhindrar, att tvära höjdskillnader interpoleras till mjuka sluttningar. Detta blir särskilt märkbart vid t.ex. raviner, skärningar, broar, viadukter och vägkanter. Med flygburen laserskanning från lägre höjd (se kapitel 16) eller digital bildmatchning (som kommer att behandlas i avsnitt 14.2) kan mycket detaljerade höjdmodeller skapas. Därigenom minskar inverkan av interpolation.

Ett särskilt problem innebär byggnader, som inte alltid ingår i modellen eller är ofullständigt återgivna. Deras radiella deplacering kvarstår. Ett annat problemområde är tät skog, som reducerar antalet mätbara höjdpunkter väsentligt och därigenom lokalt sänker kvalitén på ortofotot.

Lägesfelen i ortofotot kan begränsas, om objektiv med längre kamerakonstant, dvs. med smalare öppningsvinkel, används, och om övertäckningen planeras så, att endast centrala delar av bilderna behöver användas i den bildmosaik, som sammansätts av de enskilda ortofotona.

Praktiska aspekter på ortofoton och deras användbarhet behandlas i avsnitt 15.3.

14.1.4 Snedperspektiv

Ett alternativt sätt att presentera flygbilder är som snedperspektiv. Därvid omräknas lodbilden till en snedbilds perspektiv, med fritt vald yttre orientering (dvs. fritt valt läge för projektionscentrum och fritt vald riktning på kameraaxeln). Omräkning och omsampling görs med stöd av en digital höjdmodell enligt samma princip som för digitalt ortofoto. Man kallar tekniken att ”draperas” flygbilden på den digitala höjdmodellen. Upprepas sådan omräkning från en serie perspektivpunkter i rad efter varandra, kan realistiska videosekvenser av ”genomflygningar” över ett landskap eller genom en stad genereras.

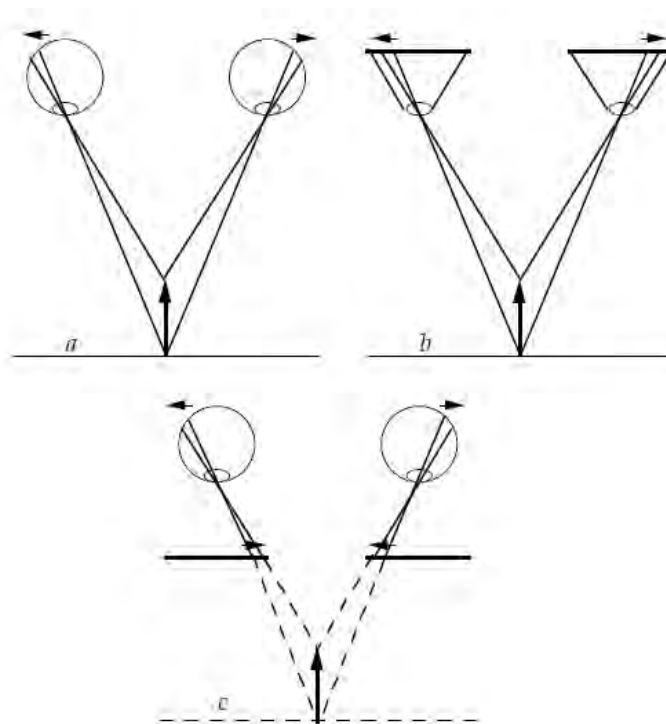
Ett snedperspektiv eller en genomflygning kan kombineras med ritad information, som omritats eller kontinuerligt omritas i samma perspektiv, t.ex. för att åskådliggöra resultatet av planerade byggprojekt. Tekniken kallas ofta VR (eng. Virtual Reality), visualisering eller något oegentligt 3D-presentation. Tekniken används även av kommersiella webb-applikationer, t.ex. Google Earth.

14.2 Stereofotogrammetri

14.2.1 Stereoskopisk mätning

Stereoseendet och stereomodellen

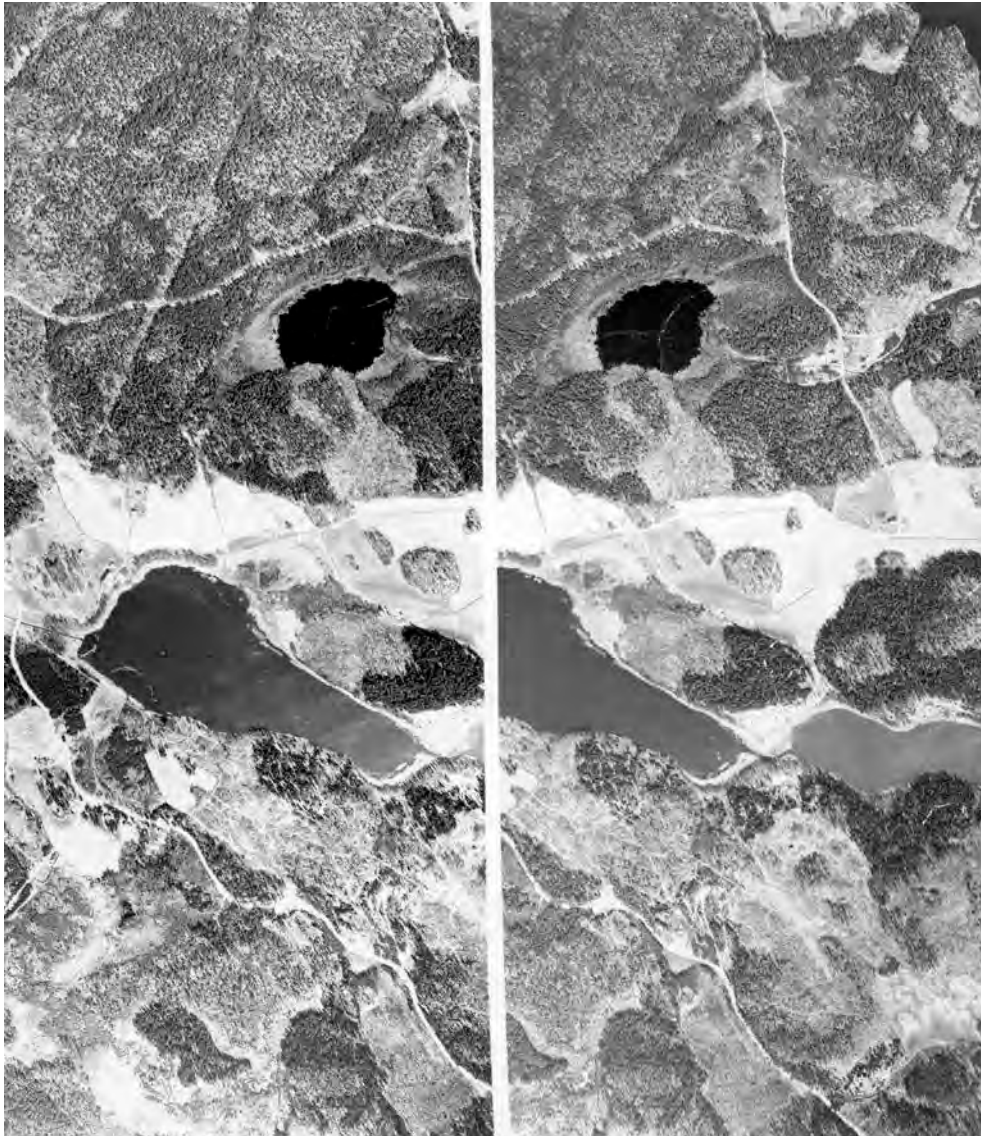
Stereoseende, dvs. stereoskopiskt djupseende (”3D-seende”), är en viktig förutsättning för manuell fotogrammetrisk mätning. Det möjliggör en tredimensionell upplevelse av det objekt som skall mätas och ger en noggrannare definition av resp. mätpunkt. Fysiologiska och psykologiska synegenskaper såsom detaljupplösning och förmåga att koncentrera sig på detaljer påverkar stereoseendet.



Figur 14.3. Stereoseendet. a) Direkt stereoseende. b) Stereofotografering. c) Stereoskopisk betraktning av bildkopiorna eller bildpresentationen.

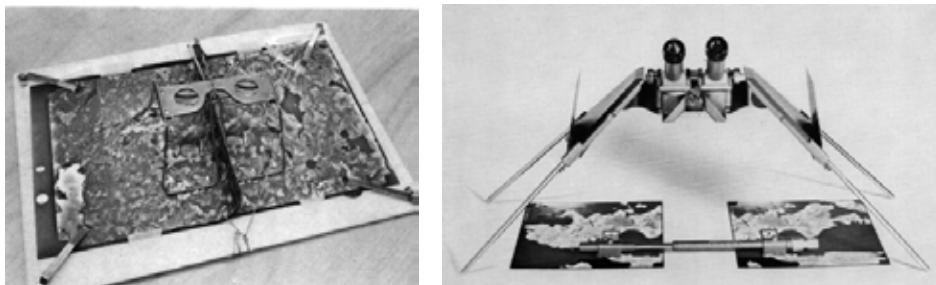
Stereoseendet är ögonens och främst hjärnans förmåga att uppfatta omvärlden tredimensionellt. Denna förmåga beror på, att våra två ögon uppfattar scenen i något olika perspektiv (se Figur 14.3). Föremål på olika avstånd från betraktaren förskjuts i sidled i förhållande till varandra vid projektion på ögonbottarna. Sidoförskjutningarna kallas i fysiologiska sammanhang visuell disparitet, bland fotogrammetriker horisontal- eller *x-parallax*. De två geometriskt något olika synintrycken sammanmälts i hjärnan till ett djupintryck.

Stereoseendet kan utnyttjas för att återskapa djupintryck med hjälp av ett stereoskopiskt bildpar. Fotografering eller annan avbildning med stereoskopisk övertäckning mellan bilderna (se Figur 13.1 och Figur 14.3) medger att de parvis kan betraktas med var sitt öga. Eftersom såväl kameran som ögat avbildar via centralprojektion, kommer horisontalparallaxer att uppträda även i ett stereoskopiskt fotograferat bildpar. Figur 14.4 visar ett stereogram, dvs. ett monterat utsnitt ur ett stereobildpar.



Figur 14.4. Ett stereogram, dvs. ett monterat utsnitt ur ett stereobildpar. Bilden kan ses i stereo med hjälp av ett linsstereoskop. Försök betrakta figuren utan stereoskop med parallella ögonaxlar genom att se "genom" papperet. (Bild Lantmäteriet/Metria. Bilderna godkända för spridning)

Om bildparet med sina horisontalparallaxer projiceras till ögonbottenarna, vänster bild till vänster öga och höger bild till höger öga, "luras" hjärnan att uppleva det avbildade objektet tredimensionellt. Utskrivna bilder kan efter viss träning betraktas utan hjälpmedel eller med linsstereoskop. Om större utskrivna bilder ska betraktas, används spegelstereoskop (Figur 14.5), vars speglar medger att bilderna placeras längre från varandra.



Figur 14.5. Linsstereoskop (Zeiss) med bildpar monterat på fältbräde samt spegelstereoskop med stereomikrometer (Leica)

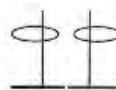
Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

För att erhålla stereoseende på en datorskärm måste de båda bilderna i stereoparet presenteras på skärmen så, att vardera ögat ser en bild. Detta kan åstadkommas med tudelad skärmbild och monterat stereoskop eller med bilderna på var sin skärm och en halvgenomskinlig spegel. Men vanligen projiceras de två bilderna på varandra. Då föreligger några olika möjligheter, se Figur 14.6:

- Bilderna infärgas i rött och blått, och operatören bär glasögon, som är färgade på samma sätt (anaglyfmetoden),
- med polariserande skärm, som polariserar bilderna vinkelrätt mot varandra, och glasögon som polariserats på samma sätt,
- ”blinkmetoden” utnyttjar glasögon med flytande kristaller, så bilderna visas omväxlande med hög frekvens eller
- med lentikulär ("tvättbrädsformad") skärm.

Dessa metoder medger att flera personer kan se i stereo på skärmen samtidigt. Mätning kan alternativt göras separat i vardera enkelbilden. Detta kan vara fördelaktigt i vissa fall, t.ex. vid mätning i industrimiljöer.

Delad skärm och optiskt stereoskop



Anaglyfprojektion



Polariserad projektion



Högfrekvent blinkmetod

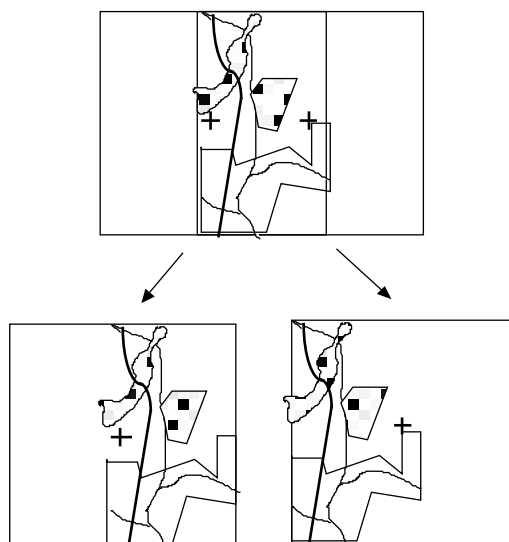


Lentikulär skärm



Figur 14.6. Fem sätt att presentera stereobilder på datorskärm.

I fotogrammetriska arbetsstationer utnyttjas stereoseendet för mätning. Fotografering för fotogrammetrisk mätning genomförs därför genomgående med minst 60 % övertäckning mellan bilderna (Figur 14.7). Avståndet mellan exponeringsorterna (projektionscentra) kallas *fotograferingsbasen* eller enbart *basen*. Motsvarande sträcka avbildad i vardera bilden kallas *bildbasen*.



Figur 14.7. Ett tecknat stereobildpar som visar resultatet av flygfotografering med ca 60 % stereövertäckning. Sträckan mellan bildernas centrumkryss i den övre figuren motsvarar fotograferingsbasen. I bilderna kallas den bildbasen.

Begreppet *stereomodell* avser att åskådliggöra den tredimensionella upplevelsen av ett avbildat objekt eller landskap, som stereobetraktning kan ge. I fotogrammetrisk vokabulär avser det även den mätbara modell, som kan rekonstrueras ur bilder. Stereomodellen är då en likformig rekonstruktion av objektet i ett lokalt, fristående koordinatsystem, som normalt är knutet till projektionscentra och basen. Modellen behöver inte ha skalbestämts. Dess form är alltså bestämd, men inte alltid dess storlek och läge. Denna modell kan i efterhand skalbestämmas och transformeras till ett yttre markkoordinatsystem.

Bild- och modellkoordinater

Läget hos ett avbildat objekt i ett stereoskopiskt bildpar kan mätas och uttryckas som *bildkoordinater* $(x' y')$ i vänster bild och $(x'' y'')$ i höger bild. Bildkoordinatsystemens origo ligger i resp. bildhuvudpunkt H (se Figur 13.14). Digitalt kan de uttryckas som rad och kolumn (r, k) i resp. bildmatris med origo i bildens hörn. X-axlarna pekar i bildbasens riktning, dvs. i flygriktningen. Ur de mätta bildkoordinaterna och den inre orienteringen rekonstrueras de yttre strålkärvarna, dvs. ljusstrålarna vid fotograferingen, matematiskt (analytiskt) som vektorer. Villkor kan beräknas för att vektorerna från motsvarande bilddetaljer i vardera bilden (s.k. homologa punkter) ska skäras parvis.

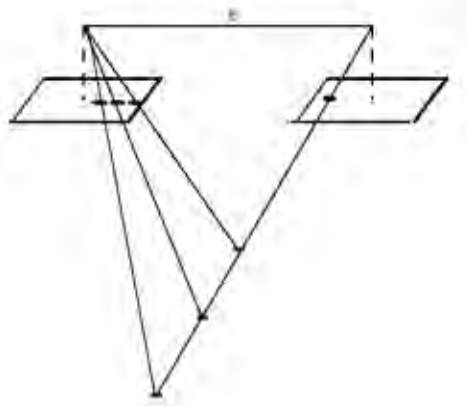
Därefter kan tredimensionella *modellkoordinater* $(x y z)$ beräknas för strålprens skärningspunkter. Denna samlade mängd av beräknade modellkoordinater för det avbildade objektet kan också betraktas som en stereomodell. Modellkoordinaterna transformeras till ett givet, yttre koordinatsystem, och utgör därefter *objektkoordinater* $(X Y Z)$, dvs. de sökta markkoordinaterna. Detta är stereofotogrammetris huvuduppgift. Mätningen utförs under stereoseende i digitala arbetsstationer.

Principerna för dessa mätningar och beräkningar ska beskrivas i det följande.

Mätmarke och parallax

På dataskärmen finns inprojicerat ett s.k. *mätmarke*, en tydlig mätpunkt, en markör, vars läge i den stereoskopiska modellen kan regleras i tre dimensioner. Med mätmärket markeras de bilddetaljer, som ska mätas i båda bilderna. Mätmärket består

därför i princip av två märken, ett för vardera bilden, vilka stereoskopiskt samman-smälter till ett rymdmätmarke, som kan förflyttas i tre dimensioner. Se Figur 14.8. I princip är det alltså justering av avståndet mellan mätmärkena som ger intryck av dess rörelse i djupled. På en datorskärm utgörs dock mätmärket ofta av en markör, och de två bilderna ligger på varandra på skärmen. Förflyttas bilderna parallellt över skärmen, förskjuts modellen horisontellt relativt mätmärket. Ändras avståndet mellan bilderna, ger det intryck av att modellen rör sig i djupled relativt mätmärket.



Figur 14.8. Det fotogrammetriska mätmärkets princip. Mätmärkenas (eller bildernas) förflyttning relativt varandra i bildplanet ger ett intryck av tredimensionell förflyttning i modellrymden.

Parallaxen p i ett bildpar definieras som skillnaden i bildkoordinater (dvs. i läge) i vänster och i höger bild för en detalj, som avbildats i båda bilderna. Den kan uppdelas i en horisontal- eller x -parallax px och en vertikal- eller y -parallax py . Bildkoordinaternas x -axlar pekar i bildbasens riktning, dvs. i flygriktningen. X -parallaxer uppträder därför i fotograferings- eller ögonbasens riktning, och definieras som

$$px = x' - x''$$

där x' är bildkoordinat för en viss bilddetalj i vänster bild och x'' för samma detalj i höger bild. Varje "djupnivå" i den upplevda stereomodellen motsvaras av ett värde på x -parallaxen. X -parallaxerna är sålunda bärare av höjdinformationen i flygbildspar och en förutsättning för stereoseende.

14.2.2 Stereofotogrammetrins normalfall

Den analytiska principen

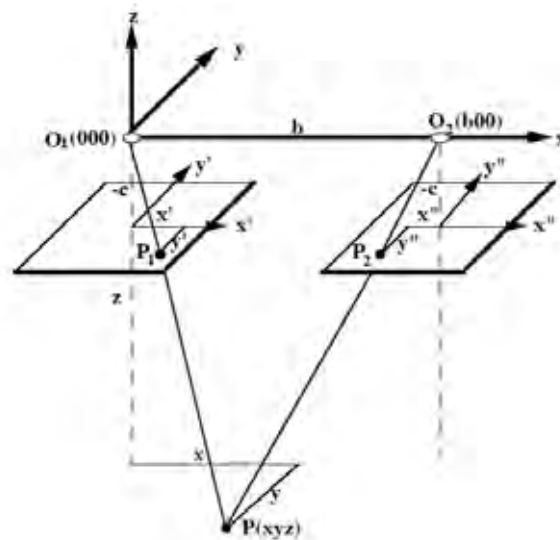
De analytiska beräkningsformlerna beskriver den geometri, som uppstår vid avbildning genom centralprojektion, och som utnyttjas vid rekonstruktion av en stereomodell ur två centralprojektioner. Formlerna är relativt komplexa genom att icke-linjära samband ingår, främst trigonometriska uttryck för bildernas och stereomodellens lutningar (se yttre orientering, avsnitt 13.3). Tekniken ger möjlighet till mycket noggrann fotogrammetrisk mätning genom bildpresentationen på skärm, genom stereoseendet och genom att systematiska felkällor i fotograferings- och mätprocessen kan formuleras matematiskt och korrigeras. Dessa analytiska metoder tillämpas på digitala bilder på dator. Man talar då om digital fotogrammetri.

Normalfallet

Den analytiska tekniken kan illustreras med parallaxformlerna vid flygfotogrammetrins normalfall, se figur 14.9. Med hjälp av enkla formler kan modellkoordinater för ett objekt bestämmas ur mätta bildkoordinater i ett bildpar. Stereo-

fotogrammetriens normalfall innebär emellertid en ideal fotograferingssituation, där kameraaxlarna (fotograferingsriktningarna) är *parallella och vinkelräta mot fotograferingsbasen*. Ordet "normal" betyder här vinkelrät. Y-parallaxen är då noll, dvs. parvisa bildpunkter har samma y-koordinat ($y' = y''$ i Figur 14.9). Vid flygfotogrammetri föreligger detta förhållande endast approximativt (normalfallet är absolut inget "normalt fall"!), men i markfotogrammetri, med stereokamera med fast bas (som kommer att behandlas i avsnitt 15.4), kan normalfallet föreligga med hög noggrannhet. Observera, att normalfallet *inte* fordrar stränga lodbilder, men att kameraaxlarnas riktning styr modellkoordinatsystemets axelriktningar.

Orsaken till att normalfallet, detta specialfall, behandlas är tvåfaldig. Dels utgör det en god illustration till den analytiska fotogrammetriens annars ganska komplicerade teori, dels kan tekniken användas för att härleda fortplantningen av mätosäkerhet i den fotogrammetriska processen.



Figur 14.9. Flygfotogrammetriens bild- och modellkoordinatsystem. Bilderna har förlagts i s.k. positivläge, dvs. rättvända och framför (under) resp. projektionscentrum. Bild- och modellkoordinatsystemen blir då likriktade.

$x' y' x'' y''$ är bildkoordinater med origo i resp bildhuvudpunkt

$x y z$ är modellkoordinater med origo i vänster projektionscentrum

b är basen

c är kamerakonstanten (här negativ p.g.a. z-axelns definition)

O_1 och O_2 är projektionscentra. O_1 är origo för modellkoordinaterna

P_1 och P_2 är bildpunkter, P är motsvarande modellpunkt.

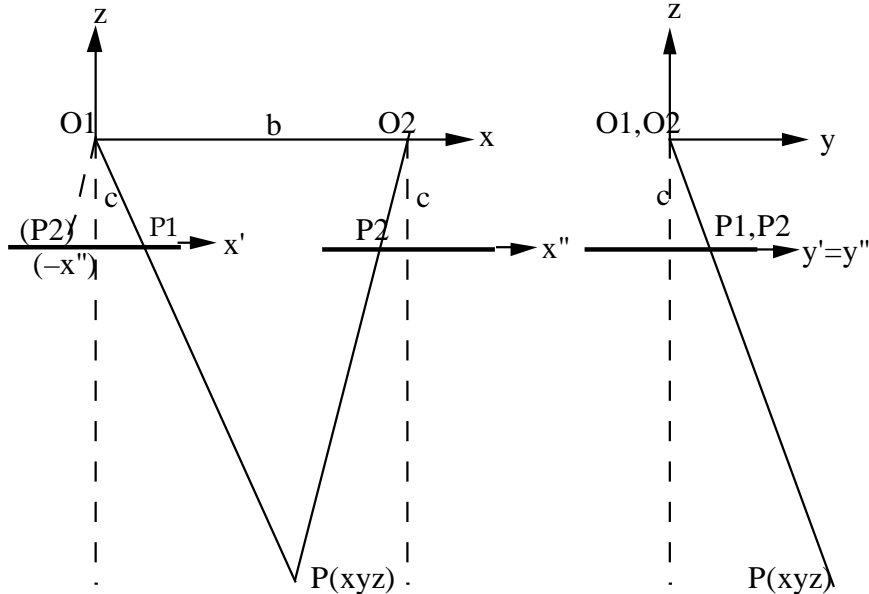
Parallaxformlerna i normalfallet

Parallaxformlerna ska här härledas för flygfotogrammetriens normalfall. För enkelhetens skull förutsätter vi då även stränga lodbilder. (Markfotogrammetriens normalfall behandlas i avsnitt 15.4.)

I bildparet i Figur 14.9 har bildkoordinaterna $(x' y')$ och $(x'' y'')$ för bildpunkterna P_1 resp. P_2 markerats. I normalfallet är som nämnts $y' = y''$, dvs. y-parallaxerna är noll. Projektionscentra O_1 och O_2 och objektpunkten P spänner upp ett plan, som då även innehåller bildpunkterna P_1 och P_2 .

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

Samma situation har i figur 14.10 tecknats ur två perspektiv för att underlätta härledningen av parallaxformlerna. I högra perspektivet ligger strålarna O_1P och O_2P bakom varandra, eftersom punkterna P_1 och P_2 i normalfallet har samma y -koordinat ($y' = y''$). Planet O_1O_2P i den vänstra figuren representeras alltså av linjen $(O_1, O_2)(P_1, P_2)P$ i den högra.



Figur 14.10. Flygfotogrammetris normalfall, sett ur två perspektiv (jfr Figur 14.9).

$x' y' x'' y''$ är bildkoordinater

$x y z$ är modellkoordinater

b är basen

c är kamerakonstanten

O_1 och O_2 är projektionscentra, P_1 och P_2 är bildpunkter

Strålen $O_1(P_2)$ har konstruerats parallell med O_2P_2 för att underlätta härledningen av parallaxformlerna. Sträckan $P_1(P_2)$ utgör då parallaxen $p_x = x' - x''$

Parallaxformlerna i normalfallet kan med hjälp av likformiga trianglar i Figur 14.10 härledas enligt följande. Observera att kamerakonstanten c (dvs. bildernas z' -koordinat) alltid är negativ i flygfotofallet, och att $y' = y''$ i normalfallet.

$$x: \frac{x}{x'} = \frac{z}{-c} \quad \text{ger} \quad x = x' \frac{z}{-c}$$

$$y: \frac{y}{y'} = \frac{y}{y''} = \frac{z}{-c} \quad \text{ger} \quad y = y' \frac{z}{-c} = y'' \frac{z}{-c}$$

z -koordinaten härleds ur de likformiga trianglarna O_1O_2P och den konstruerade $P_1(P_2)O_1$, där strålen $(P_2)O_1$ har konstruerats parallell med P_2O_2 för att underlätta härledningen:

$$z: \frac{z}{-c} = \frac{b}{x' - x''} \quad \text{ger} \quad z = -c \frac{b}{x' - x''}$$

Sträckan $P_1(P_2)$ utgör x-parallaxen p_x , som definieras som

$$px = x' - x''$$

Alltså gäller

$$\frac{z}{-c} = \frac{b}{p_x} \quad \text{och} \quad z = -c \frac{b}{p_x}$$

Substitueras i formlerna för x och y

$$\frac{z}{-c} = \frac{b}{p_x}$$

erhålls *parallaxformlerna i flygfotogrammetrins normalfall*:

$$x = x' \frac{b}{p_x} \quad y = y' \frac{b}{p_x} \quad z = -c \frac{b}{p_x}$$

Teoretiskt är ju $y' = y''$, men för att minimera effekten av små mätfel kan medelvärdet av dem användas i formeln.

Modellkoordinaterna x y z blir bestämda i ett lokalt system, vars *origo ligger i vänster projektionscentrum* (O_1 i Figur 14.9 och Figur 14.10). Systemets x-axel sammanfaller med basen och z-axeln är uppåtriktad från O_1 , dvs. motriktad vänster kameraaxel. Modellens z-koordinater blir därför alltid negativa!

Modellens skala $1:m$ kan (precis som kart- eller bildskalan) bestämmas ur en sträcka d på marken och motsvarande sträcka d' i modellen. Skalfaktorn m blir

$$m = \frac{d}{d'}$$

Av parallaxformlerna framgår emellertid, att modellens skala (i alla tre dimensionerna) bestäms av valt värde på basen b , eftersom b förekommer i täljaren i alla tre. Om fotograferingsbasen b_f kan bestämmas, så ger parallaxformlerna modellkoordinater i skala 1:1, dvs. i objektets (landskapets) skala. Om modellbasen väljs till ett annat värde b blir modellens skalfaktor m

$$m = \frac{b_f}{b}$$

Fotograferingsbasen kan bestämmas med hjälp av två kända punkter (s.k. *stödpunkter*) i objektet. Stödpunkternas bildkoordinater mäts och deras modellkoordinater beräknas med parallaxformlerna, men med basen b_f som okänd parameter. Sträckan mellan stödpunkterna beräknas därefter på två sätt, båda med Pythagoras' sats:

- 1) som sträckan d ur stödpunkternas modellkoordinater (x y z). Uttrycket för d kommer då att innehålla den okända basen b_f ,
- 2) som sträckan D ur stödpunkternas kända markkoordinater (X Y Z).

Sätts ($d = D$) så kan fotograferingsbasen b_f beräknas. Detta är ett moment i s.k. absolutorientering (som kommer att behandlas längre fram i detta avsnitt), nämligen skalbestämning av modellen.

Även origos läge (X_o Y_o Z_o) och modellkoordinatsystemets axelriktningar i det yttre markkoordinatsystemet (X Y Z) är okända. Modellkoordinatsystemet är således ett helt

lokalt system. Med absolutorienteringens övriga moment kan det emellertid horisonteras och inpassas i markkoordinatsystemet.

Eftersom kraven på normalfall och stränga lodbilder sällan är uppfyllda, ger dessa enkla parallaxformler resultat av begränsad noggrannhet. De är emellertid en god illustration till den analytiska fotogrammetrins princip. Dessutom kan de som sagt användas som utgångspunkt för en analys av mätningars mätosäkerhet, vilket kommer att utvecklas i avsnitt 14.3.

Höjdskillnadsformeln

En närbesläktad, enkel tillämpning av stereoskopisk mätning är bestämning av lokala höjdskillnader ur stereobildpar genom mätning med stereomikrometer under spegelstereoskop. Mätningen görs i utskriften av digitala bilder eller i äldre, fotografiska bilder. Tekniken tillämpas ofta som stöd vid flygbildstolkning, och utvecklas därför närmare i kompendier i bildtolkning, se t.ex. (Boberg 1995). Tekniken är praktiskt användbar, trots att den tillämpas på lodbilder, som inte kan anses stränga, varför normalfallet endast föreligger approximativt. Resultatet är därför behäftat med en inte försumbar mätosäkerhet.

Stereomikrometern (Figur 14.5) består av två glasplattor med ingraverade mätmärken, förbundna med en mikrometerskruv. Stereomikrometern inpassas på ett utskrivet bildpar så, att mätmärkena sammanfaller med samhörande bilddetaljer. Mätmärkena sammansmälter då till ett stereoskopiskt rymdmätmarke enligt principen i Figur 14.8.

Punkter på olika höjdnivå i objektet avbildas med olika stor parallax i bildparet. En höjdskillnad Δh mellan två punkter motsvaras sålunda av en skillnad i parallax mellan bildpunkterna. Parallaxskillnaden Δp_x , dvs. skillnaden i parallax mellan punkterna 1 och 2, är alltså

$$\Delta p_x = p_{x1} - p_{x2}$$

Parallaxskillnaden motsvarar summan (!) av det avbildade objektets höjddeplaceringar i de två bilderna. Parallaxskillnaden (men inte parallaxerna!) kan mätas med stereomikrometern. Därur kan höjdskillnaden beräknas som:

$$\Delta h = \frac{h \Delta p_x}{b' + \Delta p_x}$$

där h är flyghöjden och b' är bildbasen, dvs. flygfotobasens längd mätt i flygbildens skala. Denna formel är känd som *höjdskillnadsformeln*. Metoden förutsätter i princip flygfotografering enligt normalfallet och stränga lodbilder. Eftersom det verkliga fotograferingsfallet avviker något från detta, riskerar mätosäkerheten att bli stor, om höjdskillnader bestäms för punkter på längre avstånd från varandra. Endast höjdskillnader mellan näraliggande objekt kan därför bestämmas med denna metod. Dessutom behöver flyghöjd och bildbas bestämmas med så låg mätosäkerhet som möjligt.

14.2.3 Stereofotogrammetrins allmänna fall

Bild- och modellorientering

I verkligheten, speciellt i flygfotosammanhang, föreligger normalfallet med stränga lodbilder endast approximativt, och centralprojektion kan vara behäftad med fel, främst radiell felteckning. Förfarandet att bestämma och absolutorientera modellkoordinater blir då mer komplicerat, och måste utföras med datorstöd. I fortsättningen

ska därför den analytiska tekniken vid ett allmänt flygbildsfall visas.

De moment som utförs syftar till att

- rekonstruera de yttre strålkärvarna (genom *inre orientering*),
- rekonstruera en stereomodell ur parvisa strålkärvar (genom *relativ orientering* och beräkning av modellkoordinater) och
- skalbestämma och orientera stereomodellen i ett yttre geografiskt koordinatsystem (genom *absolut orientering*).

Den principiella funktionen hos dessa orienteringsmoment ska här beskrivas. Framställningen är dock översiktlig, detaljlösningarna behandlas i större läroböcker eller kompendier (se litteraturlistan). Det praktiska utförandet varierar dessutom med de program, som marknadsförs för ändamålet.

Ett numera vanligare alternativ till relativ och absolut orientering av bildpar är att bestämma de enskilda bildernas yttre orienteringselement med hjälp av *block-triangulering*, som behandlas senare i detta avsnitt.

Inre orientering

Tidigare (i avsnitt 13.3) har redogjorts för hur kamerans inre orientering bestäms genom kalibrering. Kamerakonstanten, huvudpunktens läge och ev. felteckningsfunktion hämtas ur kamerans kalibreringsprotokoll. Här ska behandlas hur den inre orienteringen för en bild kan rekonstrueras i datorn ur kamerans kalibreringsdata och mätta bildkoordinater.

Med hjälp av programmets meny för inre orientering introduceras kamerakonstanten och bildhuvudpunktens läge $(r, k)_H$ för den kamera som använts vid flygfotograferingen. Felteckningsfunktionen, som korrigerar för radiell optisk felteckning (se avsnitt 13.3) och ev. en funktion som kompenserar för geometriska fel i kamerans CCD-sensor, aktiveras också med programmenyn.

Resultatet av den inre orienteringen är transformationsparametrar. Med dessa kan alla senare mätta bildpunkter (r, k) omräknas till korrigerade bildkoordinater $(x' y')$ i kamerans koordinatsystem (se Figur 13.14). Genom att även kamerakonstanten är känd, kan därefter varje mätt bildpunkt generera en stråle (en vektor) OP' i den inre strålkärven, och därmed en stråle med riktning OP i den yttre (se Figur 13.16).

Relativ orientering

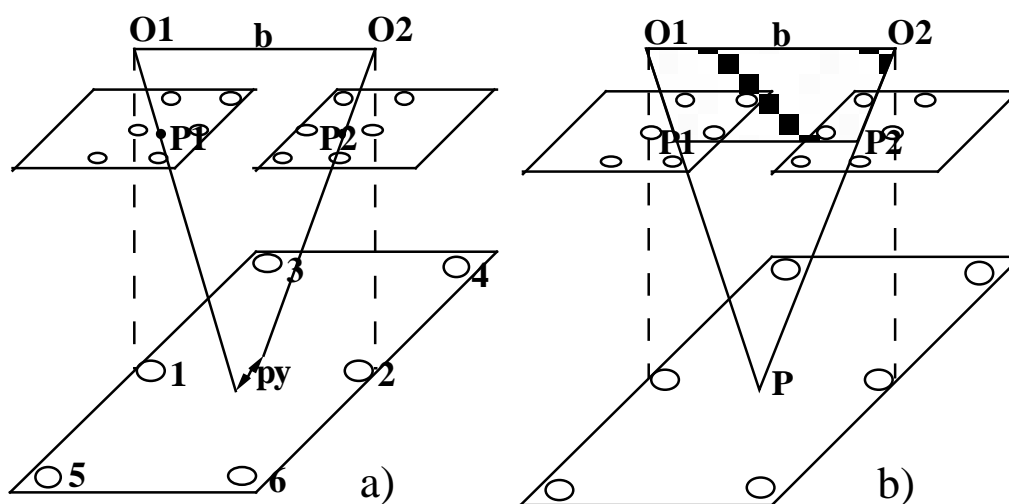
Som anas av Figur 14.9 är i ett orienterat flygbildspar bildkoordinaterna $y' = y''$, dvs. vertikal- eller y-parallaxer ($py = y' - y''$) ska inte förekomma. De försvårar eller omöjliggör stereoseende. Om de förekommer indikerar de, att bilderna i bildparet inte är orienterade i förhållande till varandra, så att en störningsfri stereomodell kan betraktas.

Relativorienteringen syftar till, att orientera de två strålkärvarna från bildparets två bilder till varandra så, att alla strålpär från samma bilddetaljer i höger respektive vänster bild parvis skär varandra och därmed skapar modellpunkter. Detta är ett försök till visuell presentation av vad som sker; i datorn beräknas skärningspunkter mellan vektorer.

I exponeringsögonblicket uppspänns ett plan av fotograferingsbasen (O_1O_2) och de två bildstrålar, som härrör från en och samma objektpunkt P . Detta framgår av Figur 14.8. Alla punkter P i objektet ger upphov till var sitt sådant plan (som kallas

epipolarplan). Detta förhållande måste återskapas, för att man ska kunna se i stereo och rekonstruera en tredimensionell stereomodell ur bildparet. Med hjälp av relativ orientering skall därför de två bildkoordinatsystemen roteras så, att detta förhållande återuppstår. (I de äldre, analoga stereoinstrumenten vreds bildhållarna rent fysiskt tills strålarna skar varandra parvis.) Därefter kan modellpunktens koordinater beräknas ur vektorernas (strålarnas) skärningspunkter.

Ett allmänt flygfotofall innebär, att kameraaxlarna avviker något från normalfallet. Försöker man ändå att rekonstruera en stereomodell enligt normalfallet, uppträder vertikal-(y-)parallaxer, som medför, att de yttre strålarna inte skär varandra parvis. Se Figur 14.11a. Därigenom försvåras eller omöjliggörs stereoseendet. Relativorienteringens uppgift är att bestämma hur mycket de tredimensionella bildkoordinatsystemen $(x' y' -c)$ och $(x'' y'' -c)$ analytiskt ska "vridas" runt sina koordinataxlar, för att alla y-parallaxer i bildparet ska elimineras. Resultatet är en stereomodell.



Figur 14.11. Principen för relativ orientering. a) Bristande relativ orientering ger y-parallax p_y i stereomodellen. Motsvarande y-parallaxer $p_y = (y' - y'')$ kan uppmätas i bildparet. Läget för de s.k. von Gruber-lägena är markerade i bilderna och i modellen. b) Koplanaritetsvillkoret är uppfyllt när $p_y = 0$, dvs. när bildkoordinatsystemen vridits tills (O_1, O_2, P_2, P_1) utgör ett plan (skrafferat i figuren).

Modellpunktens P läge går ju ännu inte att bestämma. Det matematiska kravet på att ett plan har återskapats uttrycks därför så, att ett och samma plan ska spännas upp av tre vektorer, nämligen basvektorn $(O_1 O_2)$ och de två bildvektorerna $(O_1 P_1)$ och $(O_2 P_2)$. De tre vektorerna ska vara *koplanara*. Detta plan (O_1, O_2, P_2, P_1) är skrafferat i figur 14.11b.

Om sidorna $(O_1 P_1)$ och $(O_2 P_2)$ i detta plan förlängs, kommer de att mötas i och skapa modellpunkten P .

Analytisk relativorientering baseras således på det s.k. *koplanaritetsvillkoret*. Detta villkor kan uttryckas matematiskt i form av en determinant, som innehåller de tre vektorerna. Basvektorn tecknas

$$(O_1 O_2) = \begin{pmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

och de två (roterade) bildvektorerna

$$(O_1P_1) = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = R_1 \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{pmatrix} \quad \text{och} \quad (O_2P_2) = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = R_2 \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ -c \end{pmatrix}$$

Rotationsmatriserna \mathbf{R}_1 och \mathbf{R}_2 (jämför kolinearitets, avsnitt 13.3!) anger att de två bildvektorerna (dvs. bildkoordinatsystemen) $(x' y' -c)$ och $(x'' y'' -c)$ roteras kring sina axlar vinklarna $(\omega_1 \phi_1 \kappa_1)$ resp. $(\omega_2 \phi_2 \kappa_2)$ till dess villkoret om koplanaritet uppfyllts. Att villkoret är uppfyllt, kan matematiskt formuleras som att en determinant, bestående av de tre vektorerna, ska vara lika med noll:

$$\begin{vmatrix} b & 0 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} = 0$$

Determinanten kan utvecklas till

$$b (y_1 z_2 - y_2 z_1) = 0, \text{ dvs. (eftersom basen } b \neq 0)$$

$$y_1 z_2 - y_2 z_1 = 0$$

De fyra termerna $(y_1 y_2 z_1 z_2)$ i koplanaritetsvillkoret innehåller trigonometriska funktioner ur rotationsmatriserna \mathbf{R}_1 och \mathbf{R}_2 . Eftersom de är icke-linjära, serieutvecklas de kring närmevärden på rotationsvinklarna. (Lodbilder medför att närmevärdena kan sättas till noll.) Serieutvecklingen resulterar i, att y-parallaxer kan uttryckas som funktioner f av de fem relativorienteringselementen, dvs.

$$p_y = y' - y'' = f(\kappa_1, \kappa_2, \phi_1, \phi_2 \text{ samt } \omega_1 \text{ eller } \omega_2)$$

”Eller” i parentesens beror på, att ω -rotationen kan utföras med samma resultat antingen i höger eller i vänster bildkoordinatsystem, eftersom de roteras kring samma axel (x-axeln, dvs. basen, se Figur 14.9). Fem orienteringselement ($\kappa_1, \kappa_2, \phi_1, \phi_2$ samt ω_1 eller ω_2) kan alltså bestämmas genom relativ orientering. Det går därför att visa, att det räcker med att fem strålpar orienteras till skärning, för att alla tusentals strålpar ska skäras. Relativorienteringen är då fullbordad och modellen återskapad. De optimala (bästa) lägena för dessa fem par bildpunkter (som motsvarar fem skärningspunkter) och för ett (sjätte) par kontrollpunkter, de s.k. von Gruber-lägena, är angivna i Figur 14.11.

Hur genomförs nu detta? Ur mätta bildkoordinater i minst fem punktpar beräknas vertikal-(y-) parallaxer p_y , och ett ekvationssystem om lika många ekvationer (koplanaritetsvillkor) ställs upp. Ur det kan de fem relativorienteringselementen lösas. Mät punkterna som används för detta utgörs av tydliga terrängdetaljer, spridda i sådana lägen i bilderna (de sex von Gruberlägena), som medför effektivaste lösning av ekvationssystemet. Operatören (eller dataprogrammet, med digital bildmatchning av bilddetaljer med god kontrast) väljer lämpliga mätpunkter i dessa lägen, och det erfordras alltså inga signalerade eller inmätta stödpunkter i fält för detta moment. Med bildmatchning av många punktpar kan ekvationssystemet överbestämmas rejält.

Ur de fem beräknade relativorienteringselementen beräknas elementen $(r_{11} - r_{33})$ i rotationsmatriserna \mathbf{R}_1 och \mathbf{R}_2 för vänster resp. höger bildkoordinatsystem (jfr kolinearitets i avsnitt 13.3). Därigenom ges möjlighet att rotera bildkoordinatsystemen (dvs. omsampla bilderna) och erhålla (teoretisk) skärning mellan alla bildstrålpar, dvs.

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

en numerisk stereomodell. På datorskärmen upplever man, att stereoseendet fungerar.

Brister i relativorienteringen (sådana uppträder alltid, ingenting är perfekt!) medför små restparallaxer också i x-led. Dessa gör att stereomodellen blir svagt deformerad i höjd, och att mätningar i modellen blir behäftade med viss systematisk mätosäkerhet.

Beräkning av modellkoordinater

En modellpunkts läge erhålls som skärningspunkten mellan två strålar, en från vardera bildpunkten genom respektive projektionscentrum. Vardera strålens riktning är bestämd av de mätta bildkoordinaterna, av kamerans inre orientering och av rotationsmatriserna. Formlerna för beräkning av modellkoordinater i ett allmänt flygfotofall påminner om motsvarande formler i normalfallet, men som bildkoordinater används de roterade bildkoordinaterna $(x_1 y_1 z_1)$ och $(x_2 y_2 z_2)$.

Resultatet av beräkningen är en uppsättning modellkoordinater $(x y z)$ för alla de detaljer i bilderna, som mätts för att de avses ingå i en kartdatabas. Detta kallas en numerisk stereomodell (till skillnad mot den optiska stereomodell, som kunde rekonstrueras i spegelstereoskopet och i de gamla analoga stereoinstrumenten). Observera dock, att denna modell än så länge ”svävar fritt”. Den har ju sitt origo i vänster projektionscentrum O_1 , den är inte horisonterad, dvs. vattenytan kan luta, och den är inte skalbestämd. Däremot har den rätt form, jämfört med landskapet, och en enhetlig (men ännu okänd) modellskala.

Absolut orientering

Fullständig orientering av två bilder till en stereomodell fordrar tolv yttre orienteringselement. Fem av dem bestäms i den relativa orienteringen. Sju orienteringselement återstår, och de bestäms genom absolut orientering (eller genom blocktriangulering, se 14.2.4).

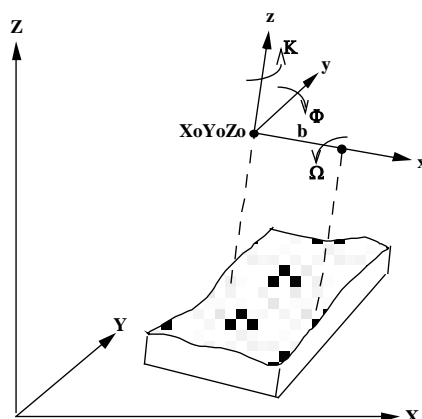
Absolut orientering innebär att den numeriska stereomodellen skalbestäms, horisonteras och inpassas i markkoordinatsystemet. Modellkoordinaterna ska alltså transformeras till markkoordinater. Transformationen styrs av sju element, dvs. sju transformationsparametrar. Elementen (se Figur 14.12) utgörs av:

- modellens *läge* i markkoordinatsystemet. Läget definieras av de tre markkoordinaterna $(X_O Y_O Z_O)$ för modellsystemets origo O_1 , dvs. för vänster projektionscentrum,
- modellens *axelriktningar* i detta system. Axelriktningarna definieras av tre vinklar $(\Omega \Phi K)$ mellan modellkoordinatsystemets axlar $(x y z)$ och det yttre markkoordinatsystemets $(X Y Z)$. (På motsvarande sätt definierades den enskilda bildens rotationsvinklar $(\omega \phi \kappa)$, se yttre orientering.), och
- modellens *skala*. Skalan definieras av en skalfaktor (m) . Att skalfaktorn (m) är beroende av basens längd (b) , konstaterade vi redan i avsnittet om normalfallet.

För att lösa sju okända transformationsparametrar (dvs. orienteringselement) erfordras ett ekvationssystem om minst sju ekvationer. Dessa kan ställas upp med utnyttjande av ett antal stödpunkter, som inmätts geodetiskt och därigenom erhållit kända markkoordinater $(X Y Z)$. Stödpunkternas bildkoordinater mäts och därur beräknas deras modellkoordinater $(x y z)$. Därefter kan ett ekvationssystem med ekvationer av typ

$$(X Y Z) = f(x y z)$$

ställas upp och lösas med avseende på transformationsparametrarna i f .



Figur 14.12. Absolutorientering av en stereomodell. Koordinataxlar och orienteringselement är angivna. (Skalfaktorn representeras av basen b .)

Funktionen f utgör en tredimensionell likformig (Helmert-) transformation av modellkoordinatsystemet $(x \ y \ z)$ till markkoordinatsystemet $(X \ Y \ Z)$, se avsnitt 5.6. I matrisform skrivs transformationen

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

(Javisst liknar formeln kolinearitetskvationerna i avsnitt 13.3, men här är det modellkoordinater som transformeras!) R utgör modellens rotationsmatris, vars nio rotationselement är trigonometriska funktioner av modellens rotationsvinklar (betecknade med stora $(\Omega \ \Phi \ K)$ för att skilja dem från bildens rotationsvinklar). Eftersom rotationsmatrisen är olinjär, serietutvecklas ekvationssystemet kring närmevärden på orienteringselementen. Dessa erhålls ur det integrerade navigationsystemet i flygplanet och på kameran.

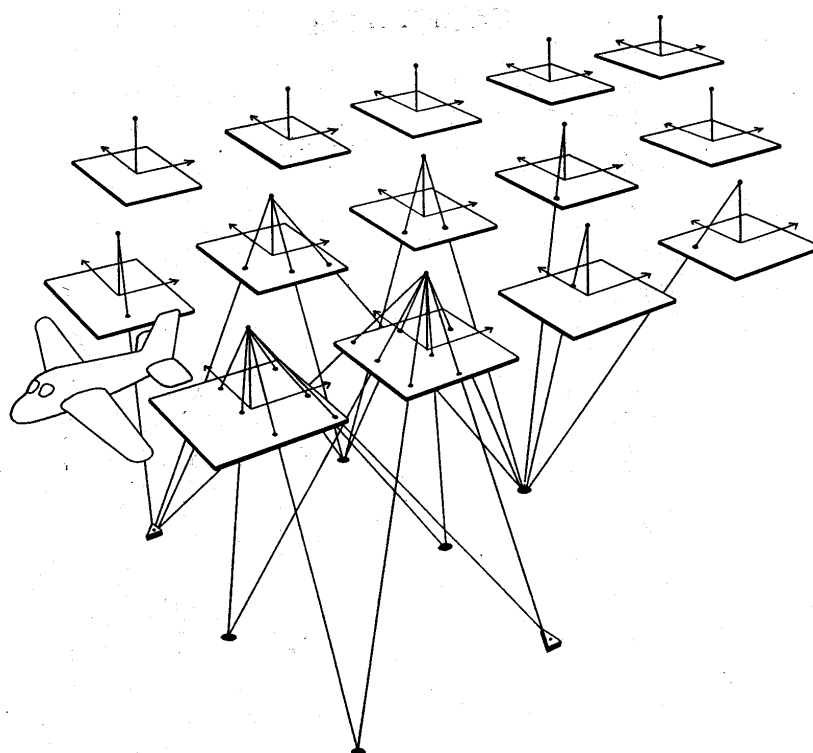
Stödpunkterna kan vara naturliga, väldefinierade detaljer eller så signaleras de med vita skivor för att synas och bli mätbara i flygbilderna. För att bestämma de sju okända orienteringselementen (parametrarna) erfordras minst två stödpunkter i plan och tre i höjd, vilkas $2 \times 2 = 4$ respektive $3 \times 1 = 3$ koordinatvärden ger sju ekvationer i ekvationssystemet. Normalt utnyttjas betydligt fler stödpunkter, som ger fler ekvationer. Det sålunda överbestämda ekvationssystemet löses genom utjämning med minsta kvadratmetoden.

När parametrarna är kända, kan modellkoordinaterna $(x \ y \ z)$ för samtliga mätta objekt punkter omräknas till objektkoordinater $(X \ Y \ Z)$ i markkoordinatsystemet. Resultatet av absolutorienteringen är alltså en uppsättning transformationsparametrar, med vilka samtliga modellkoordinater kan transformeras till markkoordinater. Dessa kan lagras i en (kart)datas. Därmed har den fotogrammetriska mätprocessen fullbordats.

14.2.4 Blocktriangulering

I praktiska tillämpningar har relativ och absolut orientering av enskilda stereomodeller ersatts av blocktriangulering. Förenklat kan blocktriangulering ses som en kombinerad relativ och absolut orientering av många modeller samtidigt.

Kartdatainsamling över större områden utförs genom successiv fotogrammetrisk mätning i många stereomodeller i flera bildstråk. Området har då flygfotograferats med stereoövertäckning i ett antal parallella flygstråk, se Figur 14.13 och 15.2. Absolutorientering av varje enskild stereomodell i ett sådant s.k. *block* av bilder skulle kräva ett stort antal stödpunkter med kända markkoordinater. Ett alternativ till detta är, att varje bild i blocket kan ges känd yttre orientering. Då kan orienterade stereomodeller lätt skapas ur parvisa bilder. *Blocktriangulering* är en teknik att beräkna de enskilda bildernas yttre orientering utifrån ett begränsat antal kända stödpunkter.



Figur 14.13. Blocktriangulering som strålkärveutjämnning. Trianglar symboliserar de få kända stödpunkterna, övriga är konnektionspunkter. (Torlegård)

I en första fotogrammetrisk operation orienteras bilderna parvis i en digital arbetsstation med hjälp av inre och relativ orientering, och bildkoordinater mäts för de få stödpunkterna. Stödpunkterna kan utgöras av naturliga, väldefinierade detaljer eller vid behov signaleras för att synas i flygbilderna. Planering av stödpunkter behandlas i avsnitt 15.1 nedan. Dessutom mäts ett stort antal s.k. konnektionspunkter. Konnektionspunkterna utgörs av tydliga terrängdetaljer, som väljs så, att de blir gemensamma för flera angränsande bilder. På grund av övertäckningen inom och mellan stråk kan stöd- och konnektionspunkter ses och mätas i mellan två och sex bilder vardera, se Figur 14.13. Konnektionspunkterna utnyttjas för att bättre ”knyta ihop” bilderna vid blockutjämnningen, den matematisk-statistiska beräkningen av bildernas yttre orientering. Bildmätningarna sparas i form av bildkoordinater.

Kolinearitetskvationer i fotograferingsfallet (se avsnitt 13.3) kan nu formuleras för

varje enskild bildstråle från samtliga stöd- och konnektionspunkter till motsvarande bildpunkter i samtliga bilder. För vissa bildstrålar är således markkoordinater ($X Y Z$) kända. De flesta bildstrålar härrör dock från okända konnektionspunkter, som saknar kända markkoordinater. Konnektionspunkter kan sökas och mätas automatiskt med digital bildmatchning, se avsnitt 14.2 nedan. Därigenom kan ett mycket stort antal av dem ge ett överbestämt och matematiskt stabilt ekvationssystem.

Flygplanets och kamerans integrerade navigationssystem (se avsnitt 13.3) ger värden på bildernas yttre orienteringselement, dvs. projektiionscentrums läge ($X_o Y_o Z_o$) och kameraaxelns riktning ($\omega \phi \kappa$) vid varje exponering. Dessa värden är inte tillräckligt noggranna för att användas för yttre orienteringen, och ingår därför som närmevärden i alla kolinearitetskvationer.

Hela ekvationssystemet, bestående av alla dessa kolinearitetskvationer, blir mycket stort. Det är olinjärt på grund av rotationsmatriserna och måste därför lineariseras runt närmevärdena. Det löses med minsta kvadratmetoden i en s.k. blockutjämning och ger därvid yttre orienteringselement ($X_o Y_o Z_o \omega \phi \kappa$) med hög noggrannhet för samtliga bilder som ingår i blocket. (Dessutom erhålls markkoordinater ($X Y Z$) för samtliga konnektionspunkter, men de sparas normalt inte.)

Resultatet av blockutjämningen är alltså noggranna yttre orienteringsdata för samtliga bilder i blocket. Med hjälp av dessa orienteringsdata kan bilderna inför den efterföljande kartframställningen parvis direkt orienteras till stereomodeller utan att relativ eller absolut orientering behöver utföras. Bilderna med sina orienteringsdata hämtas upp ur databasen, varvid stereomodellen orienteras automatiskt.

Den stora överbestämningen av ekvationssystemet medger, att även de inre orienteringsparametrarna kan betraktas som okända och ingå i beräkningen som närmevärden. Blockutjämningen ger då förbättrade värden på kamerans kalibrering, s.k. självkalibrering.

Blocktriangulering är en del av den fotogrammetriska kartdatainsamlingen, som kommer att behandlas i kapitel 15. Där kommer även behovet av stödpunkter att behandlas. Tekniken används även för icke-topografiska ändamål, vilket berörs i avsnitt 15.4.

14.2.5 Digital fotogrammetri

Princip

Med digital fotogrammetri avses att de analytiska principerna tillämpas på digitala bilder. Digital fotogrammetri utförs helt och hållet i dator (dvs. utan de klassiska stereoinstrumenten) och är i dag allena rådande fotogrammetrisk teknik. Tekniken medger att vissa moment automatiseras. Viss fotogrammetrisk stereomätning kan således utföras automatiskt med digital bildmatchning.

Digitala bilder och anskaffning av sådana avhandlades i kapitel 13. En av den digitala bildens fördelar är, att den kan behandlas interaktivt, dvs. i realtid, för att ge bättre läsbarhet på datorskärmen eller för att kunna extrahera intressant information. Därvid tillämpas metoder för digital bildbehandling, t.ex. kontraststräckning, filtrering av brus, detektering av kanter och segmentering av bilden i homogena områden.

Digital fotogrammetrisk mätning

Digital fotogrammetrisk mätning utförs med hjälp av dator, antingen en PC eller en grafisk arbetsstation, med stora bildminnen, snabb processor och stereoskopisk

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

bildpresentation på skärm. Man talar om digital fotogrammetrisk arbetsstation (Figur 14.14). Mätning görs med pekdon (mus), som styr en markör på skärmen eller flyttar bilderna i förhållande till en stationär markör. Markören utgör mätmärke.

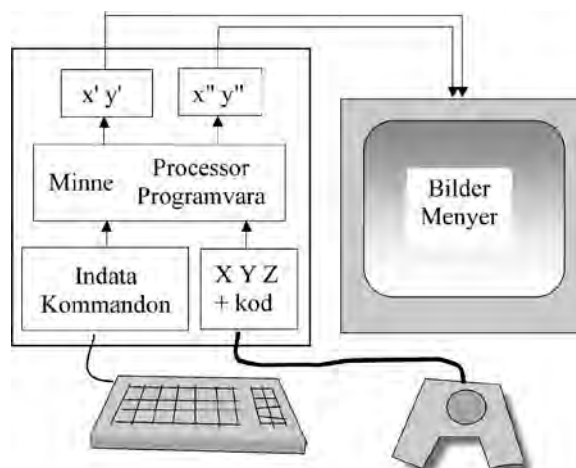


Figur 14.14. Fotogrammetriska arbetsstationer Zeiss Phodis ST resp. Leica DVP. Stereoseende åstadkoms här med "blinkmetoden" respektive med stereoskop och delad skärm.

Separation av bilderna för att erhålla stereoseende kan åstadkommas med olika metoder (separata skärmar, anaglyfmetoden, polarisation, "blinkmetoden", eller lentikulär skärm), se avsnitt 14.2.

När blocktriangulering genomförts, lagras de yttre orienteringsparametrarna för alla bilder i arbetsstationens datafiler. Operatören hämtar upp aktuellt bildpar och tillhörande geometrifil, som innehåller orienteringsparametrarna, varvid relativ och absolut orientering av bildparet utförs momentant.

Bildmätning i arbetsstation kan sägas fungera "bakvänt", se Figur 14.15. Operatören genererar hela tiden objektkoordinater med den handhållna markören. Ur dessa beräknas hela tiden bildkoordinater med kolinearitetsformlerna i det s.k. fotograferingsfallet (se avsnitt 13.3). Dessa bildkoordinater "hämtar" kontinuerligt motsvarande bilddata ur bildminnet, så skärmen visar stereoskopiska bildutsnitt, som omger det läge, som anges av de beräknade bildkoordinaterna. När operatören placerat mätmärket på den bilddetalj, som han avser mäta, kan han trycka på registreringsknappen, varvid de aktuella objektkoordinaterna lagras. Beräkningarna och styrningen går så snabbt, att operatören tycker sig direkt styra mätningen. Därigenom kan en kontinuerligt orienterad stereomodell betraktas och mätas på skärmen.

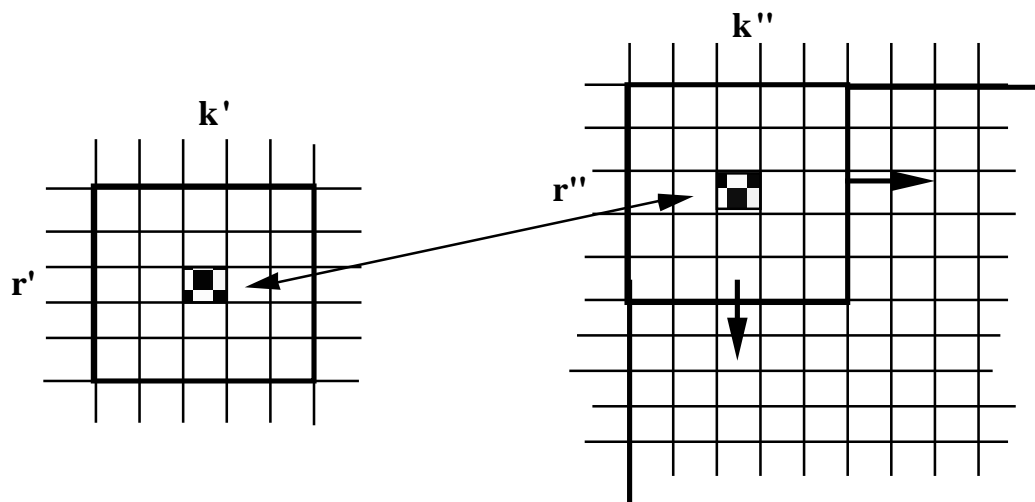


Figur 14.15. Principen för en fotogrammetrisk arbetsstation.

Manuell mätning med datorstöd används vid stödpunktsmätning vid block-triangulering, och vid kartdatainsamling. Vid kartdatainsamling kan befintliga vektordata, t.ex. äldre kartdata, och nymätta data överlagras skärmbilden. Operatören ser då tydligt vad som skall revideras och vad som har mätts.

Digital bildmatchning

Digital bildkoordinat- och parallaxmätning kan emellertid även utföras automatiskt, dvs. utan operatör. Tekniken kallas *digital bildmatchning*. Därvid beräknas maximal korrelation (likhet) mellan ett litet *målfönster* (t , eng. target window) i den ena bilden, och ett motsvarande fönster ur den andra bilden, se Figur 14.16. Målfönstret (t) får stegvis, delyta för delyta, avsöka en större *sökyta* (s , eng. search space) i den andra bilden. Ett likhetsmått beräknas mellan bildmönstret i målfönstret och bildmönstret i motsvarande fönster ur sökytan. När största likhet uppnåtts, har det fönster ur sökytan återfunnits, som stereoskopiskt motsvarar målfönstret.



Figur 14.16. Principen för digital bildmatchning. Målfönstret (t) till vänster jämförs pixel för pixel med motsvarande utsnitt ur den större sökytan (s) till höger. Given respektive sökt bildpunkt är skrafferad. Rader i bildmatrisen betecknas r , kolumner betecknas k .

Fönstrens centrala bildpunkter motsvarar då samma objektpunkt. Dessa bildpunkter utgör de s.k. *homologa punkterna* med läget $(r' k')$ resp. $(r'' k'')$ i de två bilderna. (Jämför punkterna P_1 resp. P_2 i Figur 14.9!). Deras motsvarande bildkoordinater $(x' y')$ resp. $(x'' y'')$ beräknas med hjälp av pixelläget $(r, k)_H$ för bildhuvudpunkten. Motsvarande modell- och objektkoordinatvärde kan därefter beräknas med hjälp av de analytiska sambanden tidigare i detta avsnitt.

Målfönstret kan vara storleksordningen 30x30 bildpunkter stort, medan sökytan i princip utgörs av hela den andra bilden. För att spara söktid reduceras dock sökytan med hjälp av kännedom om, var den sökta bildpunkten förväntas ligga. Ofta utnyttjas skärningslinjen mellan bildplanet och det s.k. epipolarplanet, dvs. planet $O1O2P$ i Figur 14.11b (se även Figur 14.8), som sökområde.

Som likhetsmått mellan fönstren används statistisk korskorrelation eller minsta kvadratmetoden.

Vid korrelationsmatchning anger maximal korrelationskoefficient läget för de homologa punkterna. Noggrannheten kan ökas till en andel av pixelstorleken (s.k. subpixel-noggrannhet), om läget $(r'' k'')$ interpoleras ur lägena för de högsta korrelationsvärdena.

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

Vid *minsta-kvadratmetods-matchning* (MK-matchning) minimeras i stället gråtonskillnaderna mellan målfönstret och fönstret i sökytan enligt minsta kvadratmetoden. MK-matchning fordrar goda närmevärden, så förflyttningarna i sökytan blir små. Närmevärdena kan erhållas med hjälp av en föregående korrelationsmatchning. Metoden har i stället högre noggrannhet, 1/20 pixel vid goda bildkontraster.

Ett alternativ till matchning av förvalda punkter eller punkter i regelbundna rutnät är att söka upp bilddetaljer med goda egenskaper för matchning, och sedan matcha dessa. Man söker t.ex. markerade kanter eller tydliga detaljer (eng. interest points) med hjälp av en särskild bildbehandlingsrutin. Då talar man om *egenskapsmatchning*.

Vissa fotogrammetriska mätmoment kan automatiseras med digital bildmatchning. Tekniken kan tillämpas

- vid mätning av y-parallaxer vid relativorientering, i de sex von Gruberlägena. I praktiken matchas ett stort antal punkter med egenskapsmatchning,
- vid mätning av ett stort antal konnektionspunkter vid blocktriangulering, också med egenskapsmatchning, och
- vid mätning av ett nät av markpunkter för att skapa en digital höjdmodell (kommer att behandlas i avsnitt 15.2).

Mätosäkerheten kan t.o.m. vara lägre än vid manuell mätning.

Relativ orientering kan alltså genomföras i princip utan medverkan av operatör, liksom delar av blocktriangulering, generering av digitalt ortofoto och mätning av digitala höjdmodeller. Vid mätning av digitala höjdmodeller stegar datorn fram i ett förvalt rutnät, eller så söks tydliga punkter upp och matchas med egenskapsmatchning i ett oregelbundet punktnät.

Digitala fotogrammetriska arbetsstationer är spridda inte bara till kartproducenter utan även till kartdataanvändare, t.ex. kommunala kartmyndigheter och skogsbolag. Kartdatainsamling och revidering kommer att behandlas i avsnitt 15.1.

Forskning och utveckling inom digital fotogrammetri går mot allt högre grad av automatisering med hjälp av digital bildbehandling, s.k. datorseende. Metoder utvecklas sålunda för automatisk mätning av exempelvis byggnader genom extrahering av kanter och hörn. Hörnen mäts in med digital matchning ur flera bilder och byggnadskroppens form rekonstrueras tredimensionellt, yta för yta. Digitala höjdmodeller har visats kunna mätas på pixelnivå med digital matchning (s.k. semi-global matching), dvs. höjdvärdena kan beräknas och redovisas pixel för pixel. Med denna nya form av digital bildmatchning kan varje bildelement få ett eget höjdvärde i den digitala höjdmodellen. Därigenom skulle interpolationsmomentet i höjdmodellen bortfalla vid framställning av ortofoton eller 3D-visualisering. En ytterligare förbättring av matchningsnoggrannheten kan erhållas med samtidig matchning av alla bildpar, som innehåller de homologa punkterna.

Den digitala fotogrammetrin integreras alltmer med geografiska informationssystem (GIS). En utveckling pågår från digital karta till visualisering med digitala stads- och landskapsmodeller.

14.2.6 Instrument för mätning i fotografiska bilder

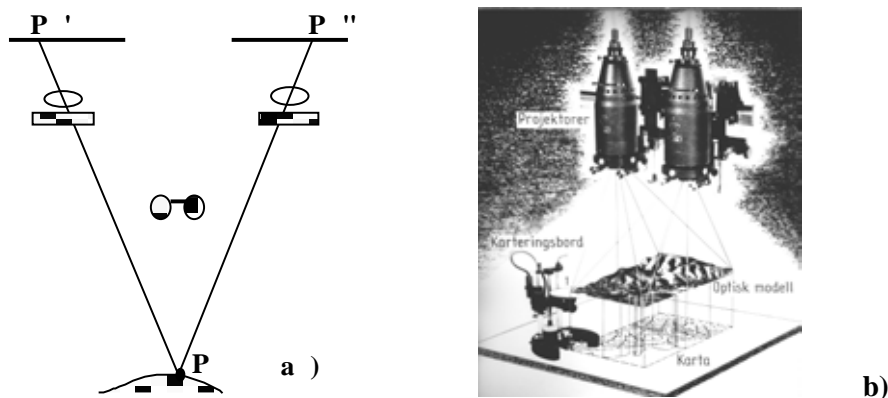
I och med att de digitala kamerornas kvalitet och effektivitet gjort, att de fotografiska kamerorna försvunnit från marknaden, så har också de analoga och analytiska

stereoinstrumenten försvunnit. Här ska de bara kort behandlas, och då av rent pedagogiska skäl. Den analytiska teorin med vektorer och rotationsmatriser kan i analoga instrument åskådliggöras med ljusstrålar och mekanisk vridning av projektorena.

Stereokomparatorn har under mer än ett sekel använts för manuell punktvis bildmätning med mycket hög noggrannhet (mätosäkerhet ca 1 μm). Ett mätmärke i vardera bilden placeras under stereoseende på den bilddetalj, som ska mätas in. Koordinater i komparatorns koordinatsystem registreras till dator via digitala givare och transformeras analytiskt till bildkoordinater. Det *analytiska stereoinstrumentet*, som utvecklades med datatekniken på 1970-talet, var i princip en datorstödd stereokomparator med återkoppling från datorn via servomotorer till komparatorns bildvagnar. Bild- och modellorientering och mätning genomfördes även här med analytiska metoder på samma sätt som i digital arbetsstation. Instrumentet förlorade sin betydelse med den digitala bildens inträde.

Analogi betyder inbördes likhet. För att kringgå de tidsödande beräkningar för hand, som stereokomparatorn medförde, utvecklades tidigt (1909!) *analog stereoinstrument*. I dessa återskapades optiskt eller mekaniskt flygfotograferingssituationen inklusive en modell av det avbildade landskapet. Kartering och andra mätningar utfördes direkt i denna stereomodell. För att återskapa modellen bringades bilderna i samma fysiska läge relativt varandra som de hade vid fotograferingstillfället. Instrumentens projektorer kunde roteras och förskjutas för relativ och absolut orientering av strålkärvarna. När man projicerade motsvarande bilddetalj i vänster och höger bild via sina resp. projektionscentra, erhöles parvisa strålar, som skar varandra. Strålarnas skärningspunkter kunde fångas upp och utgjorde modellpunkter, som gemensamt skapade modellytan. Avancerade analoga stereoinstrument användes fram till 1980-talet.

Balplex Plotter är ett enkelt analogt stereoinstrument med optisk projektion (Figur 14.17), som ger en synlig, optisk stereomodell projicerad på en yta. Stereoseende åstadkoms med anaglyfprincipen, dvs. genom att med färgade filter och glasögon separera vänster och höger strålgång. Mätmärket är en lysande punkt P på en rörlig mätvagn. Kartering sker i modellens skala på projektionsbordet med ett ritstift på mätvagnen. På grund av instrumentets överskådlighet används det för undervisning.



Figur 14.17. Analogt instrument med optisk projektion. a) Princip. Stereoseende med anaglyfprincipen (färgfilter). Ett mätmärke i modellytan. b) Balplex Plotter (egentligen den tyska föregångaren Multiplex)

Den inre orienteringen rekonstrueras genom att bilderna centreras på bildhållare med bildhuvudpunkten på kamerakonstantens avstånd från projektionscentrum. Relativ orientering genomförs i form av fysisk rotation av projektorerna tills fem olika strålpar (se Figur 14.11) skär varandra utan vertikal-(y-)parallaxer. Det resulterar i en optisk modell av terrängen, vilken kan betraktas i stereo. Vid absolut orientering hanteras modellen och de två projektorerna som en enhet (jämför Figur 14.12). Önskad modellskala justeras mekaniskt med basens längd b som $m = b_f/b$ (jämför parallaxformlerna i normalfallet!). Därtill erfordras två stödpunkter i plan ($X Y$), så att ett avstånd kan mätas. För horisontering krävs minst tre höjdstöd (Z), dvs. stödpunkter med kända höjdvärden. Ur dessa beräknas modellens lutning, som justeras mekaniskt. Slutligen inpassas modellen i plan på de två planstödpunkterna och i höjd genom att ställa mätmärket på en höjdstödpunkt och ställa in stödpunktens höjdvärde på ett höjdräkneverk.

Resultatet är en modell, som är likformig med objektet (landskapet) och i känd skala. Mättnings- eller karteringsarbetet kan därefter påbörjas.

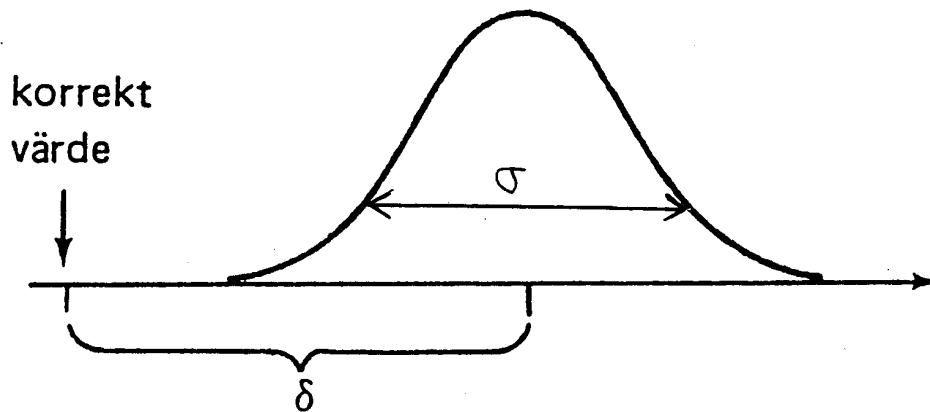
14.3 Fotogrammetrisk mätosäkerhet

14.3.1 Kvalitetsbegrepp

Att ha kontroll över mätningars kvalitet är av stor ekonomisk betydelse. Genom att planera och genomföra mätning så, att önskad kvalitet, varken mer eller mindre, uppnås, minimeras mättningskostnaden. Mättningsresultat måste alltid åtföljas av en specifikation av dess kvalitet.

Kvalitet i vid bemärkelse omfattar *fullständighet* (att allt finns med), *riktighet* (t.ex. att det är rätt tolkat och kodat) och *noggrannhet* (dvs. rätt läge). Noggrannhet kan i sin tur uttryckas som *tillförlitlighet* (frihet från grova fel), som *modellriktighet* (frihet från systematiska avvikelser) och som *mätosäkerhet* (omfattningen av tillfälliga avvikelser). Se figur 14.18.

De systematiska avvikelserna kan beskrivas matematiskt och därmed korrigeras. Det enklaste fallet av systematiska avvikelser är en konstant avvikelse. Ett enstaka mätvärde (långt) utanför de tillfälliga avvikelsernas fördelningskurva betecknas som ett *grovt fel*. Resterande (små) avvikelser utgör de *tillfälliga avvikelserna* och kan uppskattas statistiskt som *standardosäkerhet*.



Figur 14.18. Fördelningskurva som visar mätresultatets spridning kring ett medelvärde. Spridningen beror på tillfälliga avvikelser och mäts som standardosäkerhet (σ). Figuren illustrerar även begreppet systematisk avvikelse (δ).

Mätningar måste utföras med tillräcklig grad av överbestämning. Därigenom ges möjlighet att

- isolera grova fel,
- konstatera systematiska avvikelser och korrigera dem genom en lämplig analytisk (matematisk) modell, och
- utjämna de tillfälliga avvikelserna och erhålla ett mått på mätosäkerheten.

Mätosäkerhet uppträder i alla led i den fotogrammetriska mätprocessen. Vissa tillfälliga avvikelser i ett led kan i efterföljande led ge upphov till systematiska avvikelser, som påverkar hela stereomodellens geometri. Exempelvis kan en dålig inre eller relativ orientering medföra systematiska deformationer av stereomodellen.

Här ska endast en förenklad bild ges av den samlade effekten av källorna till avvikelser i den flygfotogrammetriska mätprocessen. Inledningsvis härleds uttryck för mätosäkerhet i plan och höjd utifrån parallaxformlerna i normalfallet. Markfotogrammetrins mätosäkerhet kommer att behandlas i kapitel 8.

14.3.2 Normalfallets mätosäkerhet

Mätosäkerheten i de modellkoordinater ($x y z$), som bestäms med parallaxformlerna i normalfallet, kan härledas utifrån mätosäkerheten s i de mätta bildkoordinaterna ($x' y' x'' y''$). Den senare mätosäkerheten kan bedömas utifrån aktuell flygkamera, CCD-sensor, flyghöjd och mätprogramvara. Visserligen är normalfallet bara approximativt uppfyllt i praktisk flygfotogrammetri, men som underlag för uppskattning av mätningarnas kvalitet duger det.

Ett centralt begrepp när man bedömer fotogrammetrins mätosäkerhet är *bas/höjdförhållandet* b/h , dvs. förhållandet mellan flygfotograferingsbasens längd och flyghöjden. För några vanliga digitala flygkameror och 60 % bildövertäckning finns förhållandet angivet i tabell 13.1.

Parallaxformlerna kan enligt avsnitt 5.2.3 skrivas

$$x = x' \frac{z}{-c} \quad y = y' \frac{z}{-c} \quad z = -c \frac{b}{p_x}$$

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

Derivering av dem med avseende på x' , y' resp. p_x (med substitution $dx = s_x$, $dy = s_y$, $dz = s_z$ och $dp_x = s_p$) ger standardosäkerheterna (egentligen absolutbeloppen)

$$s_x = s_{x'} \frac{z}{-c} \quad s_y = s_{y'} \frac{z}{-c} \quad s_z = s_p \frac{cb}{p_x^2}$$

Men eftersom

$-z \approx h$ (modellens negativa z-koordinater motsvaras av flyghöjden) och

$$\frac{-z}{c} = \frac{h}{c} = m \quad \text{är lika med bildskalfaktorn,}$$

så gäller efter substitutioner

$$s_x = m s_{x'} \quad \text{och} \quad s_y = m s_{y'}$$

Vi kan förutsätta att $s_{y'} = s_{x'}$

För standardosäkerheten i plan gäller därför

$$s_{xy} = m \cdot s_{x'} \sqrt{2}$$

För standardosäkerheten i höjd gäller

$$p_x = \frac{-cb}{z} \quad (\text{ur parallaxformeln}),$$

dvs.

$$s_z = s_p \frac{z^2}{cb} = s_p \frac{z}{c} \frac{z}{b} = s_p m \frac{z}{b}$$

Dessutom gäller att

$$\frac{b}{-z} = b/h \quad \text{är bas/höjdförhållandet.}$$

Således kan standardosäkerheten i z skrivas

$$s_z = s_p \frac{m}{b/h}$$

Parallaxen $p_x = x' - x''$ bestäms i princip ur två bildkoordinatmätningar, men mäts i praktiken i ett moment, en stereoskopisk placering av mätmärket på upplevt höjdvärde i objektet. Parallaxmätningen bör därför kunna betraktas som en bildkoordinatmätning, dvs.

$$s_p = s_{x'}$$

Standardosäkerheten i plan och höjd kan därför slutligen skrivas

$$s_{xy} = m s_{x'} \sqrt{2}$$

$$s_z = m s_{x'} l / (b/h)$$

Mätosäkerheten i plan (s_{xy}) är således lika med mätosäkerheten i bildkoordinaterna (s_x, s_y) ”uppförstorade” med bildskalfaktorn (m) (och med $\sqrt{2}$ enligt Pythagoras’ sats), medan mätosäkerheten i höjd (s_z) dessutom är omvänt proportionell mot bas/höjdförhållandet (b/h). Det senare kan vid 60 % övertäckning och typisk digital kamera beräknas till $b/h \approx 0,3$ (se tabell 13.1), vilket antyder att mätosäkerheten i höjd teoretiskt sett är drygt dubbelt så stor som i plan, ty

$$s_z / s_{xy} = (1 / b/h) / \sqrt{2} = 1 / (0,3 \times 1,4) = 2,4.$$

Som framgår nedan, är skillnaden i praktiken något mindre.

Man kan uttrycka samma sak så här: Mätosäkerheten i såväl plan som höjd är direkt proportionellt mot flyghöjden. Mätosäkerheten i höjd är dessutom omvänt proportionellt mot bas/höjdförhållandet. Det blir därigenom proportionellt mot kvadraten på flyghöjden! Kravet på noggrannhet i höjd sätter därför ofta gränsen för maximal flyghöjd.

Digital fotogrammetri ger goda möjligheter till modellering och korrektion av systematiska avvikelser och möjligheter till överbestämda mätningar. Standardosäkerheten i mätta bildkoordinater (s_x, s_y) ligger i digitala arbetsstationer på pixelnivå vid manuell mätning, på delar av pixeln vid bildmatchning.

14.3.3 Övriga felkällor. Tumregler

Den teoretiska fortplantningen av mätosäkerhet ovan beskriver emellertid bara den ursprungliga mätosäkerhetens inverkan. Till detta kommer bidrag från signalering, bilder, inmätning av stöd- och konnektionspunkter, blocktriangulering, bild- och modellorientering m.m. Vid planering av fotogrammetrisk kartdatainsamling har man länge utgått från rekommendationerna i Handbok i mät- och kartfrågor (HMK). Tas hänsyn även till dessa källor, erhålls större mätosäkerhet, och relationen mellan mätosäkerhet i höjd och plan blir i praktiken inte så stor. Den förväntade mätosäkerhet som tabellerats i HMK-Fotogrammetri (HMK-Fo) för olika flyghöjder är tyvärr inte tillämplig på digitala flygkameror. Ur en hittills begränsad erfarenhet kan man utgå från, att

*den fotogrammetriska mätosäkerheten i plan motsvarar
bildelementets storlek, förstord med aktuell bildskalfaktor.
Mätosäkerheten i höjd är ca 1,5 gånger större.*

Detta gäller signalerade eller väldefinierade punkter. I likhet med HMK-Fo kan man förvänta sig högre mätosäkerhet för mindre väldefinierade punkter.

Det är viktigt att beakta riskerna för att även systematiska, dvs. matematiskt modellerbara avvikelser och grova fel uppträder i mätningarna. Exempelvis ger radiell felfelteckning och atmosfärens refraktion upphov till systematiska avvikelser i stereomodellen. Bristande noggrannhet i relativ och absolut orientering resp. i blocktriangulering, särskilt brister i stödpointsfördelningen, medför också deformationer av modellen, vilka ger systematiska avvikelser i bildmätningarna. Även

mätobjektet, t.ex. kraftig vegetation i form av gräs- eller buskmark eller åkerfält kan ge upphov till systematiska höjdavvikelser.

Grova fel av typ inställning på fel punkt, felavläsning mm. kan ge upphov till systematiska effekter eller stora motsättningar i överbestämda mätningar. Genom lämplig fördelning av stödpunkterna och genom kontroll av restavvikelser i bild- och

Kapitel 14: Fotogrammetriska metoder

modellkoordinater efter varje orienteringsmoment kan systematiska avvikelser och grova fel minimeras.

Fortplantningen av mätosäkerhet i fotogrammetriska processer har studerats ingående. Exempelvis har resultatet av blocktriangulering med olika antal och fördelning av stödpunkter, effekten av att använda integrerade navigationssystem, noggrannheten i kartor (se avsnitt 15.1), i digitala höjdmodeller (kommer att beröras i avsnitt 15.2) och i ortofoton (behandlades i avsnitt 14.1) studerats. Resultatet av detta tillsammans med praktiska erfarenheter ligger till grund för anvisningarna i HMK Bild- och laserdata, som f.n. är under utgivande. För närmare analys av fotogrammetrisk mätosäkerhet hänvisas till litteraturen, i första hand Torlegård (1999). Se litteraturlistan

15 Fotogrammetriska tillämpningar

15.1 Storskalig kartframställning

15.1.1 Primärkartverk och kartprogram

Framställning av digitala kartdatabaser är den volymmässigt största tillämpningen av fotogrammetri. Jämfört med terrester mätning (kapitel 8) är fotogrammetrin en mycket effektiv metod att framställa kartor över större områden. Här ska planering och praktiskt utförande av sådan mätning behandlas.

Storskalig kartframställning för kommunala ändamål resulterar i s.k. *primär- eller baskartverk*, digitalt lagrade i en databas. Från denna digitala grundinformation kan primär- eller baskartor i skalområdet 1:400 – 1:1 500 framställas. Primärkartverket redovisar förutom topografiska kartobjekt (byggnader, infrastruktur, anläggningar, vegetation, hydrografi, höjdförhållanden) bl.a. fastigheter och tekniska anläggningar, t.ex. ledningar. De karterade objekten representerar stora ekonomiska värden. Kartdata kan också knytas till andra register av olika slag, t.ex. ledningsdata.

Kartdata lagras digitalt, med kodning beroende på objektstyp. Primärkartverket kan därigenom utgöra underlag för framställning av en rad kartprodukter i olika skalor och utföranden. De kan utgöra underlag för fysisk planering och projektering av byggnader, parker och infrastrukturanläggningar, för köp, förvaltning och försäljning av fastigheter, för kommunal detaljplanering, fastighetsbildning och –registrering, för bygglovshandläggning och nybyggnadskartor och för redovisning av t.ex. geotekniska förhållanden. Figur 15.1 visar ett exempel på utskrift av en kommunal primärkarta.

Beställare och nyttjare av dessa typer av kartprodukter är kommuner, verk, myndigheter, entreprenörer och bolag som planerar, bygger och underhåller vår fysiska miljö. Förutom byggnader och anläggningar gäller det infrastrukturen, dvs. vägar, järnvägar, el-, tele-, gas- och bredbandsnät, basstationer för mobiltelefoni m.m.

Kostnaden för att upprätta och underhålla ett storskaligt kartverk är betydande, men bör ställas i relation till de värden som kartan redovisar och den betydelse kartan har för planering. Eftersom kostnaden i hög grad är beroende av kartans kvalitet, bör kvalitetsbehovet noga övervägas vid planering av kartverket. Med kvalitet avses då såväl fullständighet och riktighet som noggrannhet.

Många kommuner har egen mättningsorganisation, som samverkar med kommunala bolag för VA, energi och fjärrvärme, med ledningsdragande verk av typ Vattenfall och Scanova och med Trafikverket. Vissa kommuner har s.k. ramavtal med konsulter om motsvarande tjänster. Ramavtalet sätter som namnet antyder ramar för kommunens upphandling av mättnings- och karttjänster, vilket underlättar den efterföljande upphandlingen av specifika uppdrag.

Som nämnts tidigare har vissa kartanvändare investerat i egna fotogrammetriska arbetsstationer, främst för revidering av sina kartdatabaser. Detta gäller även ett antal kommuner. De flesta kommuner saknar dock fotogrammetriska mättningsresurser. Flygfotografering upphandlas regelmässigt, blocktriangulering, ortofotoframställning och fotogrammetrisk detaljmätning ofta. En stor del av kartframställningen upphandlas sålunda via anbud från konsultföretag. Geodetisk mätning utförs dock ofta i egen regi. Motsvarande typ av upphandling görs av Trafikverket, kraftbolag, IT-

bolag, skogsbolag etc.



Figur 15.1. Exempel på kommunal primär- eller baskarta, här återgiven i skala ca 1:2000. (Stockholms stadsbyggnadskontor)

Som underlag för kartarbetet upprättas ett detaljerat *kartprogram*, innehållande

- Område, kartskala, bladindelning
- Kartinnehåll, kvalitetskrav
- Arbetsfördelning mellan egna och upphandlade tjänster
- Stomnät; tillgång och förtätningsbehov
- Signalering och flygfotografering
- Teknikval för stommätning i plan och höjd, för blocktriangulering och för fotogrammetrisk detaljmätning
- Tidplan och ev. etappindelning
- Val av databas, två- eller tredimensionellt lagringsformat
- Datatransferering, karteditering och utskrift

Det fotogrammetriska uppdraget kan vara kombinerat med ett uppdrag att laserskanna landskapet och skapa en digital höjdmödel. Programmet läggs till grund för anbudsfrågan och används som underlag för en kostnadskalkyl för projektet. Efter anbudsutvärdering skrivs kontrakt med vald(a) konsult(er). Kontraktet reglerar upphandlingens omfattning, specificerade kostnader, kraven på fältkontroll, kvalitet,

Kapitel 15: Fotogrammetriska tillämpningar

leveranstider och format på levererade data, samverkan mellan konsult och upphandlare samt ev. förseningsklausuler. ABK 09 är en överenskommen samling paragrafer, som reglerar relationen mellan beställare och konsult. I kontrakt avseende upphandling av konsulttjänster refereras regelmässigt till denna.

15.1.2 Den fotogrammetriska kartprocessen

Fotogrammetrisk kartframställning (dvs. fotogrammetrisk mätning för framställning eller revidering av kartdatabas) utförs som en process, vars olika led är beroende av varandra. Tidsmässigt är processen bunden framför allt av flygfotograferingen, som för bästa ljusförhållanden och insyn mot marken bör utföras i perioden mellan snösmältning och lövsprickning. (Perioden efter lövfällning är också tänkbar, men då är skuggorna väl långa.) Undantag är flygfotografering för ortofotoframställning, som ofta görs sommartid, för att vegetationen ska framgå. Den punktvisa förteckningen nedan ger normala tidpunkter för momenten i en process för framställning eller revidering av en kartdatabas med fotogrammetri. Vissa av momenten utvecklas närmare i de därpå följande avsnitten.

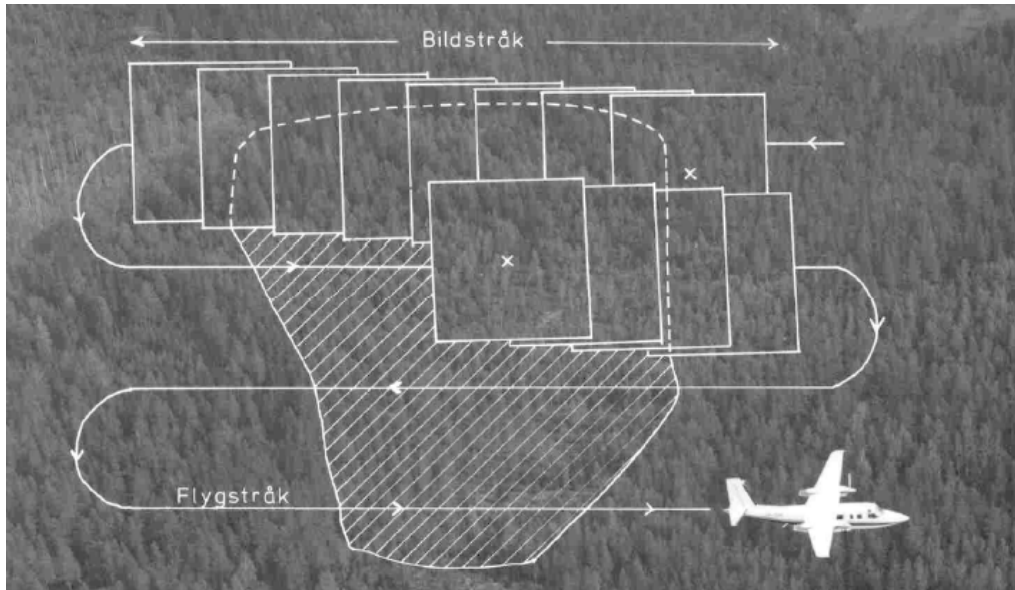
År 1 – 2	Hösten – vintern	Planering, kartprogram, upphandling.
År 2	Mars – april	Flygsignalering och inmätning av stödpunkter.
	April – maj	Flygfotografering för kartdatainsamling.
	Maj – augusti	Flygfotografering för ortofoto.
		Bildinventering.
	Blocktriangulering.	
	Ev. flygburen laserskanning.	
År 2-3	(Ev. etappindelad)	Fotogrammetrisk detaljmätning.
		Mätning av digital höjdmodell.
		Ortofotoframställning.
		Kontroll av kartkvalitet.
		Geodetisk kartkomplettering.
		Transferering av kartdata och kardeditering.

Stora kartprojekt är ofta indelade i etapper. Flygfotografering och blocktriangulering genomförs i ett sammanhang, ibland i stora samordnade projekt, som täcker flera kommuner, medan den fotogrammetriska detaljmätningen kan utföras etappvis eller upphandlas separat för de ingående kommunerna. Ju längre tid som förflyter mellan flygfotografering och leverans av kartdata, desto större blir emellertid behovet av geodetisk kartkomplettering.

15.1.3 Planering av flygfotografering. HMK

Flygfotografering för mätändamål utförs med övertäckning mellan bilderna, som exponeras utefter raka flygstråk (fotostråk, se figur 15.2). Även stråken övertäcker varandra. Vid planering av fotogrammetrisk kartdatainsamling har man länge utgått från rekommendationerna i Handbok i mätnings- och kartfrågor (HMK), som utgavs 1994, se litteraturlistan. Den behandlar därför analytisk och analog fotogrammetri,

digital bara antydningssvis. Flygfotografering med digital flygmätkamera planeras på i princip samma sätt som med fotografisk mätkamera, men digitalkamerornas varierande bildformat medför, att överslagsformler för övertäckning mm måste anpassas till vald kamera. HMK Bild- och laserdata (HMK-BiLa) är under utgivning.



Figur 15.2. Flygfotografering av ett område i flera stråk, med övertäckning mellan bilder och stråk.

För planering och genomförande av fotogrammetrisk kartdatainsamling, bl.a. blocktriangulering och ortofotoframställning, är det ibland av betydelse att exponeringsorterna, dvs. kamerans läge i exponeringsögonblicken, kan förväljas, t.ex. i förhållande till ett kartbladssystem. Detta är möjligt med GPS-styrning av exponeringen. Att ha samma exponeringsort vid upprepade (omdrevs)fotograferingar ger möjlighet att ha fasta signaler. Vidare kan man återanvända sömlinjer för ortofotomosaiker, vilket annars kan vara problematiskt i stadsmiljöer. Å andra sidan medger digitala kartdatabaser, att flygstråken planeras helt oberoende av kartbladsindelningen.

Val av flyghöjd

Planeringen inleds med val av flyghöjd för flygfotografering. Flyghöjden avgör den möjliga mätnoggrannheten, styr den följande stråkplaneringen och inverkar starkt på projektets ekonomi. Man beräknar därför den flyghöjd som krävs för att uppnå de noggrannhetskrav, som specificerats i kartprogrammet. Erfarenhetsmässigt (se avsnitt 14.3) är mätosäkerheten i *plan* för väldefinierade objekt och måttliga flyghöjder av samma storleksordning som den digitala flygkamerans markupplösning, dvs. bildelementets projicerade storlek på marken. Mätosäkerheten i *höjd* är ca 1,5 gånger högre. Välj alltså flyghöjden h så, att bildupplösningen på marken blir densamma som kravet på mätosäkerhet i plan, eller att 1,5 gånger den motsvarar förväntad mätosäkerhet i höjd. Följande relationer ska alltså uppfyllas, eftersom $m = h/c$ ger bildskalfaktorn:

$$s_{xy} = Pix (h/c) \text{ och/eller } s_h = 1,5 Pix (h/c).$$

Det innebär att

$$h = s_{xy} c / Pix \text{ och/eller } h = s_h c / 1,5 Pix$$

s_{xy} och s_h är kraven på mätosäkerhet i plan resp. höjd. Pixelstorlekar (Pix) för några

Kapitel 15: Fotogrammetriska tillämpningar

flygkameror framgår ur tabell 13.1. Uttryck allt i meter vid beräkningen.

Flyghöjden måste emellertid väljas även med hänsyn till möjligheten att tolka olika kartobjekt i bilderna. Även här kommer ledning att ges i HMK-BiLa. Observera dock, att även val av kameratyp samt aktuell vädersituation (främst solstånd och atmosfärslinje) och vegetationen inverkar på bildernas tolkbarhet. Det slutliga valet av flyghöjd måste tillgodose såväl noggrannhets- som tolkningskriteriet.

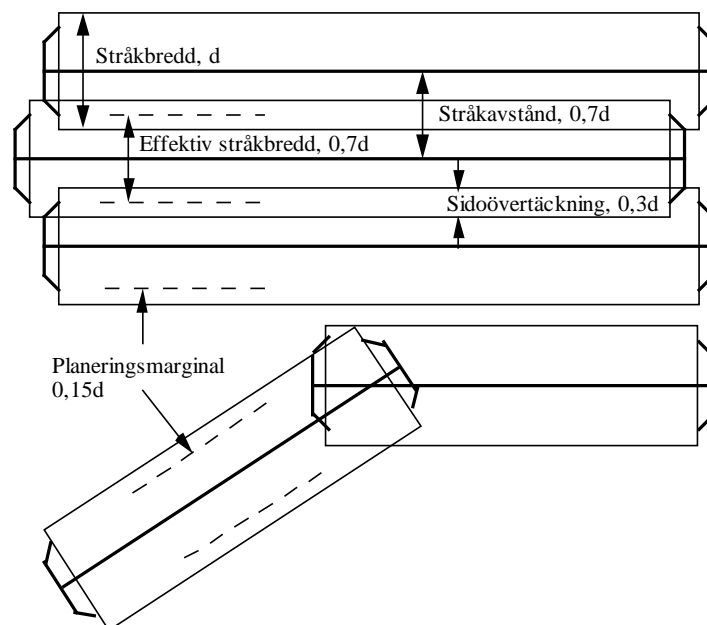
Stråkplanering

Flygfotografering för mätändamål utförs som sagt utefter raka flygstråk (fotostråk) med övertäckning mellan bilderna. Resultatet, de överlappande bilderna, utgör tillsammans ett eller flera *bildstråk*. Hela bildstråket kan utvärderas stereoskopiskt ur parvisa bilder. Stråkplanering utförs med målet att med minsta antal stråk och bilder från given flyghöjd täcka det aktuella området. Nedan ges anvisningar för sådan planering med hänsyn till vald kamera.

För att täcka områden av större bredd än ett stråk planeras parallella stråk, som överlappar varandra. Bilder i flera parallella stråk bildar tillsammans ett *block* av bilder. Normal övertäckning mellan stråk är omkring 30 %, men ibland används mer, ända upp till 60 % av stråkbredden, dvs. bildsidan. Större övertäckning, såväl mellan bilder i stråk som mellan stråk, ger en mer överbestämd blocktriangulering och därigenom noggrannare yttre orienteringsdata, och en noggrannare bildmatchad digital höjdmodell – men flygfotograferingen blir förstås dyrare.

Det är praktiskt att börja med att planera in stråkens lägen i det område, som ska karteras. Den planeringen kan som nämnts göras utan hänsyn till den planerade kartbladsindelningen. Man eftersträvar få och långa stråk, men föredrar om möjligt öst-västliga ur tolkningssynpunkt.

Flygstråken skall tillsammans täcka det aktuella karteringsområdet med en marginal om ca 15 % av stråkbredden från aktuell flyghöjd. Se figur 15.3. Med stöd av figur 15.4, men med 30 % sidoövertäckning mellan flygstråken, kan för stråkplaneringen av blocket följande samband härledas avseende stråkets bredd och avståndet mellan stråken:



Figur 15.3. Stråkplaner för kartdatainsamling, dels i ett block av tre parallella stråk, dels i två enkelstråk för

infrastrukturprojektering. Flygstråkens ändrar markeras med klamrar.

$$d_1 = d'(h/c) = (d'/c) h$$

$$s\ddot{o} = 0,3 d_1$$

$$sa = (d - s\ddot{o}) = 0,7 d_1$$

där

d_1 = bildsida på marken tvärs stråket, dvs. stråkbredd

d' = bildsida tvärs stråket i aktuell kamera

c = kamerakonstant

h = flyghöjd (bestämd utifrån kraven på mätosäkerhet)

$s\ddot{o}$ = sidoövertäckning mellan stråk

sa = stråkavstånd samt effektiv stråkbredd (jfr b i figur 15.4)

Dessa samband används för planering, *inte för fotogrammetriska beräkningar*. Därför kan alla värden avrundas till jämna tal. Exempel på data för några aktuella flygkameror finns i tabell 13.1 i avsnitt 13.3. Om vi ett ögonblick förutsätter att en flygkamera med 8 cm kamerakonstant och bildformat 11x7 cm används, och att 30 % stråk- och 60 % längsövertäckning planeras, så erhålls vid vald flyghöjd h :

$$d_1 = (d'/c) h = (11/8) h = 1,4 h$$

$$s\ddot{o} = 0,3 d_1 \text{ och}$$

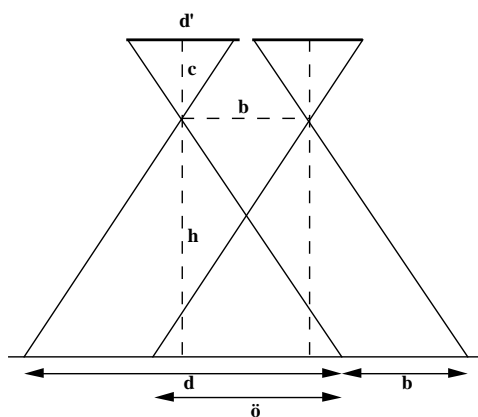
$$sa = 0,7 d_1 = 0,7 \times 1,4 h = h$$

Figur 15.3 illustrerar sambanden och visar, att den effektiva (dvs. för stereokartering användbara) stråkbredden blir lika stor som avståndet mellan flygstråken. Vid planering av enkelstråk över långsträckta objekt, t.ex. järnvägar, vägar, älvar eller kraftledningar, planeras raka stråk med överlappning i stråkändarna och marginaler om 15 % av stråkbredden, som figuren visar.

Planering av de enskilda modellerna

När stråken lagts ut, kan de enskilda modellerna och därur bildcentras lägen planeras utifrån motsvarande samband. Bilderna i ett stråk exponeras med sådana intervall, att de kommer att överlappa varandra med vanligtvis 60 %, ibland 80 %, av bildsidan (se Figur 14.7 och Figur 15.4). Teoretiskt sett skulle 50 % övertäckning räcka för att hela stråket ska bli stereoskopiskt avbildat. Avvikelser i flygfotobasens längd, i flyghöjd, i vridning och lutning av kameran samt radiella höjddeplaceringar medför emellertid risk för bristande stereotäckning i modellskarvarna. Därför används normalt minst 60 % stereoövertäckning.

80 % övertäckning medför att varannan bild övertäcker varandra med 60 %. Det ger möjlighet att välja lämpligaste bilder att ingå i resp. stereopar, där annars bildorienteringen eller mätningen kan bli problematisk, t.ex. över vattenytor.



Figur 15.4. Stereoövertäckning (\ddot{o}) i ett flygbildspar. Övriga beteckningar, se löptexten.

Avståndet mellan exponeringarna i stråken, dvs. mellan parvisa bildcentra, utgör flygfotograferingsbasen b_f . Se Figur 15.4. För planeringen av modellerna inom respektive stråk kan följande samband härledas:

$$d_2 = d'(h/c) = (d'/c)h$$

$$\ddot{o} = 0,6 d_2$$

$$b_f = (d_2 - \ddot{o}) = (d_2 - 0,6 d_2) = 0,4 d_2$$

där

d_2 = bildsida på marken längs stråket

d' = bildsida längs stråket i aktuell kamera

c = kamerakonstant

h = flyghöjd

\ddot{o} = övertäckning, dvs. stereoövertäckt andel av bilden

b_f = flygfotograferingsbas

Med samma antaganden som ovan om vald flygkamera erhålls som funktion av flyghöjden

$$d_2 = d'(h/c) = (d'/c) h = (7/8) h = 0,9 h$$

$$\ddot{o} = 0,6 d_2 = 0,6 \times 0,9 h = 0,54 h$$

$$b_f = 0,4 d_2 = 0,4 \times 0,9 h = 0,36 h$$

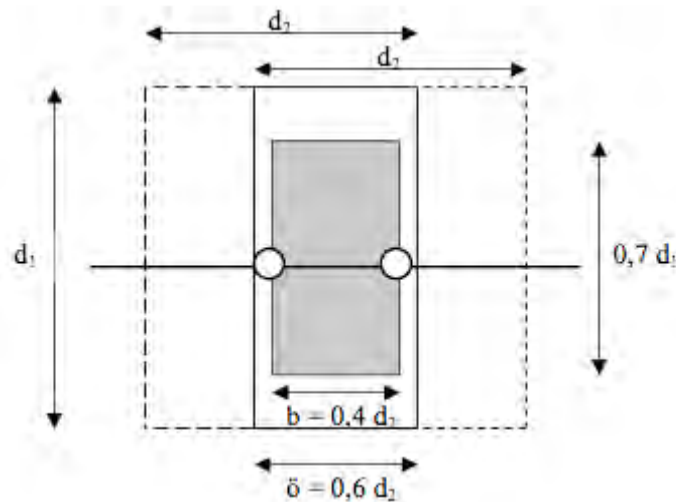
Observera alltså, att bildformatet sällan är kvadratisk. Det är inte säkert, att samma värde på d kan användas för sidoövertäckning och stråkavstånd (d_1), som för längsövertäckning och baslängd (d_2)! Om annan övertäckning, objektiv med annan kamerakonstant eller annat bildformat används, blir de numeriska exemplen annorlunda. Som framgår av avsnitt 13.3 är digitala flygkameror (till skillnad från de fotografiska flygkamerorna) inte alls standardiserade till bildformat eller kamerakonstant.

Nettomodellen

För att underlätta planering av modellernas och stråkens lägen kan den s.k. nettomodellen användas. Hela det stereoövertäckta området i ett bildpar (figur 15.5) täcker ytan

$$d \times \ddot{o} = d_1 \times 0,6 d_2$$

om övertäckningen är 60 % och om bildformatet är rektangulärt ($d_1 \times d_2$).

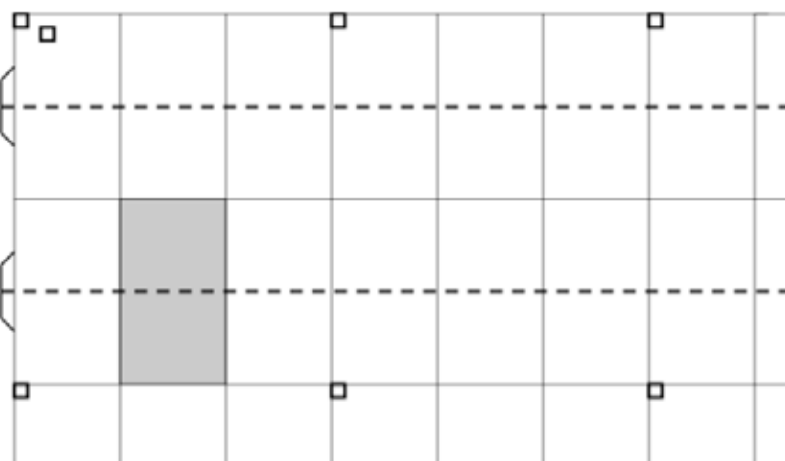


Figur 15.5. Den stereoövertäckta ytan begränsas av heldragen linje, medan nettomodellen är rasterad. Flygstråkets riktning är markerad, med bildcentra som cirklar, och de två flygbildernas hela utsträckning ($d_1 \times d_2$) i stereoparet har streckats. b = basen, \ddot{o} = övertäckningen.

Med nettomodell avses den del av det stereoövertäckta området, som tvärs stråket är lika med den effektiva stråkbredden och i stråklöd utgör området mellan bildcentra, dvs. basens längd. Se Figur 15.5. Nettomodellen omfattar därför ytan (effektiva stråkbredden \times basen), dvs. vid 30 % sidoövertäckning mellan stråken och 60 % längsövertäckning ytan

$$sa \ x \ b = 0,7 \ d_1 \times 0,4 \ d_2 \text{ om bildformatet är } d_1 \times d_2.$$

Fördelen med nettomodeller är, att de kan planeras kant i kant utan övertäckning. Hela blocket kan då planeras som ett rutnät, där varje ruta är en nettomodell, och där exponeringslägena ligger mitt på skarven mellan varje nettomodell. Se Figur 15.6.



Figur 15.6. Ena (nordvästra) hörnet av ett block. De rektangulära rutorna betecknar nettomodeller. En av dem är rasterad (jämför Figur 15.5). De streckade linjerna med klamrar anger flygstråkens lägen. Lämplig fördelning av geodetiskt inmätta stödpunkter i plan och höjd vid GPS-stödd blocktriangulering är markerad med små kvadrater.

Sambanden ovan gällde som sagt vid flygfotografering med 60/30 % övertäckning. Används t.ex. 80 % övertäckning och/eller 60 % sidoövertäckning, blir sambanden annorlunda, och nettomodellen får annan storlek.

15.1.4 Planering av stödpunkter

Flygstråkens lägen utgör utgångspunkt för den fortsatta planeringen av

- stödpunkter för blocktriangulering,
- signalering och inmätning av dessa samt
- den stommätning, som kan bli nödvändig för kartframställningen eller för projekteringen.

Genom att blocktrianguleringen (se avsnitt 14.2) ger de yttre orienteringselementen för bilderna, är behovet av stödpunkter och därmed signalering mycket begränsat. I stället erfordras, att ett stort antal konnektionspunkter mäts i alla övertäckningszoner, helst med digital bildmatchning (se avsnitt 14.2). Stödpunkter och konnektionspunkter bör därför förläggas nära nettomodellens kanter för att bli gemensamma för angränsande modeller. Om tydliga objekt, t.ex. taknockar, brunnslock och målade detaljer på vägbanan, väljs som konnektionspunkter kan de, om deras koordinater sparas, vid behov senare användas som naturliga stödpunkter. Därigenom bortfaller även en stor del av det framtida behovet av signalering.

Det integrerade navigationssystemet (se avsnitt 13.3 och 14.2) medför, att goda närmevärden på den yttre orienteringen för varje exponering (dvs. yttre projektionscentrums läge och kameraaxelns riktning) kan beräknas och användas som indata i blocktrianguleringen. Planstödpunkter behövs då i princip bara i blockets hörn, och höjdstödpunkter i kedjor tvärs stråken. Man talar om GPS-stödd blocktriangulering. (Flygs även tvärstråk över de ordinarie stråkens ändar, räcker det i princip med ett plan- och höjdstöd i varje hörn av blocket, dvs. kanske bara fyra stödpunkter!) För säkerhets skull (bl.a. tillförlitligheten, se avsnitt 14.3!) mäts emellertid fler stöd geodetiskt än det teoretiska minimum. Stödpunkter i plan och höjd bör därför spridas jämnt över blocket, särskilt runt dess periferi, med 3 - 5 baslängders avstånd från varandra. Stödpunkterna i blockets hörn är särskilt viktiga och bör därför dubbleras eller tredubblas för tillförlitlighetens skull. Se Figur 15.6.

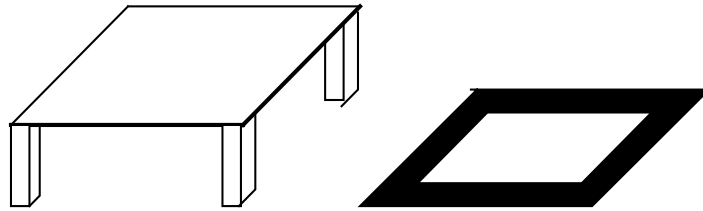
Stödpunkter placeras bara i undantagsfall utanför det område, som ska kartläggas. Stöden i blockets ytterkanter kan därför behöva förskjutas från det fotograferade blockets hörn och kanter enligt Figur 15.6 till karteringsområdets gräns.

Uppdraget att ta fram eller revidera ett primärkartverk kan medföra behov av att samtidigt planera en förtätning av det geodetiska stomnätet. GPS-teknik för inmätning av stom- och stödpunkter och för kompletterande detaljmätning har medfört större frihet i denna planering.

I framtiden kan man kanske förvänta sig blocktriangulering helt utan stödpunkter. Med tillräckligt noggrann integrerad navigering kan den yttre orienteringen av varje enskild bild bestämmas med tillräcklig noggrannhet redan under flygningen. Då kanske inte heller blocktriangulering behövs.

Signalering

GPS-stödd blocktriangulering medför, att endast ett fåtal stödpunkter behöver mätas in geodetiskt enligt Figur 15.6. *Stödpunkter i plan* måste normalt *signaleras*. Signalering innebär, att punkterna görs synliga i flygbilderna genom att vita skivor läggs ut eller vita rutor målas runt punkterna (Figur 15.7). Signalernas storlek anpassas till den valda flyghöjden, så de får en lagom, mätbar storlek i flygbilderna. Tabell för lämplig signalstorlek i HMK-Fo kan tjäna till ledning.



Figur 15.7. Exempel på flygsignaler i form av skiva resp. målad kvadrat med kontrastbård.

Lyckade försök har gjorts med enbart naturliga stödpunkter i plan. Som naturliga stöd har då kantstenar, brunnslock, målade övergångsställen och takhörn använts. Särskilt på landsbygden kan det emellertid vara svårt att hitta tillräckligt bra definierade planstödpunkter.

Som *stödpunkter i höjd* utnyttjas normalt *naturliga*, plana ytor, som inte behöver signaleras. Rekommendationer om val av lämpliga lägen återfinns i HMK-Fo. För att stereoooperatören ska kunna återfinna stödpunkterna i bilderna upprättas punktskisser för samtliga punkter, både signalerade och naturliga.

Flygfotografering

Flygfotografering för storskalig kartdatainsamling utförs normalt på våren, mellan snösmältning och lövsprickning, för att ge bästa möjliga insyn mot marken. Fotograferingen upphandlas enligt anbud och utförs helt enligt resp. kunds önskemål. Merparten av uppdragen utgörs av låghöjdsfotografering för framställning av primärkarta från flyghöjder mellan 1 000 och 1 500 m, dvs. i bildskalor – beroende även på kamerakonstanten – ca 1:8 000 – 1:20 000.

Flygfotografering för ortofotoframställning, för Lantmäteriets kartproduktion, för skogliga ändamål och för orienteringskartor utförs ofta från högre flyghöjder, ca 2-5 000 m eller högre, och (med undantag för orienteringskartorna) senare på året.

Stråknavigering för flygfotografering utförs med hjälp av kontinuerlig GPS/INS-stödd lägesbestämning av flygplanet. Vid planering av flygfotouppdraget introduceras de önskade bildlägenas koordinater i kamerans styrdator. Denna utlöser kameran i de förvalda lägena, och bildernas lägesdata kan i efterhand användas för uppritning av stråköversikter för bildarkivet. Flygföraren ser på en skärm kontinuerligt flygplanets läge i plan och höjd jämfört med det planerade flygstråket. Flygfotooperatören bearbetar i efterhand lagrade kameradata till bilddata i svart-vitt, färg och/eller IR-färg, beräknar preliminära yttre orienteringsdata ur det integrerade navigations-systemet och levererar bild- och orienteringsdata i önskat format till beställaren (om inte blocktriangulering ingår i beställningen).

I mån av att *bildinventering* genomförs efter flygfotograferingen, utgör den underlag för blocktrianguleringen och den fotogrammetriska kartdatainsamlingen ("stereokarteringen"). De utlagda flygsignalerna i det aktuella området inventeras i bilderna, och man kontrollerar med stöd av signaleringsplanen att de syns. Samtidigt väljs lämpliga lägen för naturliga stödpunkter, dvs. plana ytor för höjdstöd och tydliga detaljer för planstöd, och höjdstödsskisser ritas för dessa. Bildinventeringen utgör underlag, dels för geodetisk inmätning av stödpunkterna, dels för fotogrammetrisk mätning av dem för blocktrianguleringen.

Därefter vidtar den geodetiska inmätningen av stödpunkterna. Med dessa data givna kan blocktriangulering utföras enligt beskrivningen i avsnitt 14.2.

15.1.5 Fotogrammetrisk detaljmätning

Efter blocktrianguleringen kan de enskilda modellerna orienteras var för sig. Bildernas yttre orienteringselement, som ju erhålls ur blocktrianguleringen, hämtas ur databasen för varje enskild bild i blocket. Därefter kan bilderna parvis bilda stereomodeller utan föregående orientering. Normalt kontrolleras dock särskilt relativorienteringen innan detaljmätningen påbörjas.

Vid den fotogrammetriska inmätningen av plandetaljer knyts digitala koder för resp. objekttyp till de mätta kartobjekten, och de lagras punkt-, linje- eller ytvis i kartdatabaser.

Systematisk organisation av mätarbetet är viktigt för kartans fullständighet och kodningens riktighet. Ett sätt att organisera mätningen är, att kartera ett kvarter i taget i följande ordning:

- Vägar, gator och infarter
- Vegetations-, ev. fastighets- och andra gränser
- Byggnader
- Övriga anläggningar (murar, trappor, stolpar, staket, diken, brunnar m.m.)

En annan tillämpad mätordning är

- Sjöar och vattendrag
- Byggnader
- Vägsystem, järnvägar m.m.
- Ägoslag (skog, åker, äng m.m.)
- Skogsområden med osäker höjdmätning, punkthöjder
- Brytlinjer

Detaljmätningen utförs med hänsyn till hur den tredimensionella kartdatabasen avses bli uppbyggd. Man eftersträvar topologi, dvs. logisk samhörighet mellan objekt-detaljerna. Exempel på detta är att beskrivningspunkter eller linjer definieras och att alla plandetaljer tilldelas objekt-koder, t.ex. hus (takhörn, taknockar etc.), vägar (vägbanekanter, slänkrön, kantsten etc.) och hägnader (plank, stenmur, stödmur etc.). Anvisningar för detta återfinns i HMK-BiLa, hos Trafikverket, i kommuner m.fl.

Linje- och ytformiga objekt mäts i flera punkter, som sammanbinds med datorgrafik. Höjdförhållanden inmäts med digital bildmatchning, som skapar en digital höjdmodell. I svärmätta bildpartier, t.ex. i tät bebyggelse eller skog, kan terränghöjder kompletteras punktvis. Alternativt kan höjddata hämtas ur en separat laserskanning av området. Resultatet kan presenteras kartografiskt som höjdkurvor.

Detalj- och höjdmätningen resulterar i en *kartdatabas*, kodad för olika typer av kartobjekt. Resultatet, kartan, presenteras på datorskärm och editeras, dvs. justeras i sina detaljer, korrigeras och kompletteras där så behövs. Editeringen utförs i ett grafik- eller CAD-program vid en grafisk arbetsstation. Det blivande kartverkets bladindelning behöver inte beaktas vid flygfotoplaneringen eller mätningen utan hanteras först vid editeringen.

Kartutskrift utgör ett fristående moment efter det att kartdata editerats. Vid utskriften kan skala, bladindelning, kartinnehåll och ritmanér väljas tämligen fritt för olika ändamål. Innehållet styrs genom val av vilka objektstyper som ska ingå i utskriften.

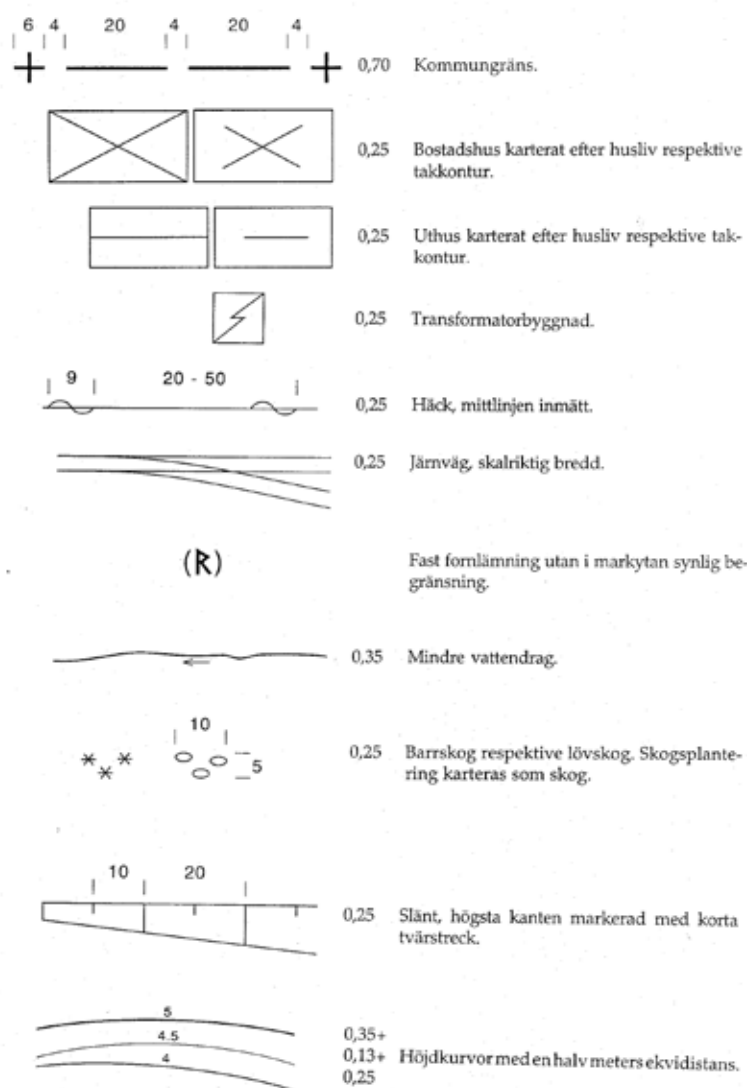
Olika karttyper kan sålunda framställas ur samma grundmaterial. Ritmanér för storskaliga kartor väljs normalt enligt anvisningarna i HMK-Kartografi (HMK-Ka), se figur 15.8. En fördel med standardiserat utförande av kartan är, att vid komplettering eller revidering av en befintlig kartdatabas kan beställaren fritt välja konsult för arbetet, och resultatet får samma utseende oberoende av konsult. Ett exempel på en kommunal primärkarta (baskarta) i standardiserat utförande återfinns i Figur 15.1.

Den framställda *kartans kvalitet* fältkontrolleras med avseende på fullständighet, riktighet och noggrannhet. Eftersom vissa objekt varit skymda i bilderna, och viss tid förflutit sedan flygfotograferingen, kan kartans fullständighet och aktualitet fordra geodetisk kompletteringsmätning av tillkomna kartobjekt. Kontrollen av noggrannhet genomförs som stickprovsvis geodetisk inmätning av karterade detaljer. Noggrannheten (avsnitt 14.3) beräknas i form av standardosäkerhet, dvs. kvadratisk medelvärde av motsägelserna i plan och höjd mellan fotogrammetrisk och geodetisk inmätning av punkterna. Enligt HMK-Fo bör resultatet inte överstiga dubbla de värden som gäller för signalerade objekt. Det bör kunna jämföras med begreppet utökad mätosäkerhet, dvs. resultatet bör inte överstiga två gånger den erfarenhetsmässigt förväntade mätosäkerheten.

Kontroll av höjdkurvor genomförs med avvägning eller trigonometrisk höjdmätning av profiler i terrängen. Kurvans planläge bör inte avvika från det rätta läget mer än $1/3$ av avståndet till närmast intilliggande kurva. Det innebär, att dess mätosäkerhet i höjd bör motsvara en tredjedel av ekvidistansen. Med modern teknik och om erfarenhetsgrundade rekommendationer följs, är dessa krav normalt inte svåra att uppfylla.

Revidering av befintliga kartdatabaser genomförs på i princip samma sätt som vid nymätning. Som stödpunkter vid blocktriangulering och ev. absolutorientering kan ofta befintliga kartdetaljer väljas, vilket minskar behovet av signalering och geodetisk stödpunktsmätning. Vid revideringsarbetet kan den befintliga kartbilden visas på separat bildskärm eller läggas som överlägg till stereomodellen på arbetsstationens bildskärm. Överläggsteknik effektiviserar stereoarbetet väsentligt, även vid nymätning av kartdata.

KARTBETECKNINGAR



Figur 15.8. Några exempel på standardiserade karttecken för storskaliga kartor. Ur HMK-Ka.

15.2 Digitala höjdm modeller

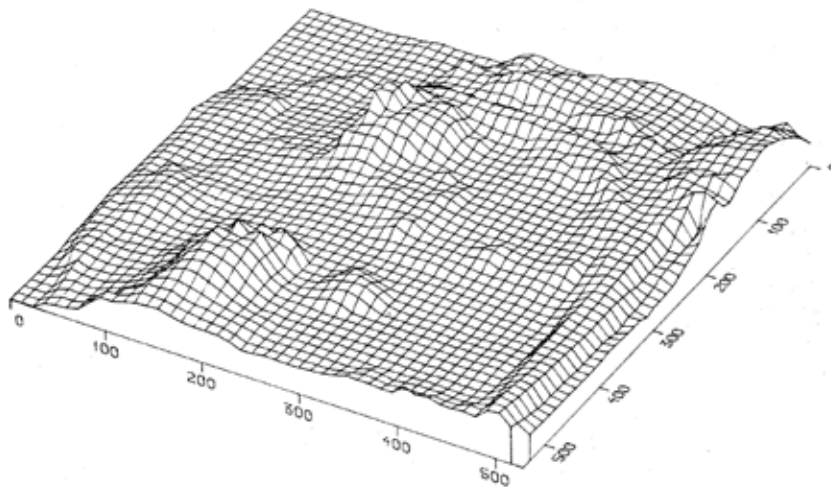
15.2.1 Fotogrammetrisk mätning av höjdm modeller

En *digital höjdm modell* (DEM, Digital Elevation Model, Figur 15.9), ibland betecknad markmodell eller något missvisande terrängmodell, är ett tätt nät av höjdpunkter, som beskriver terrängytans form. Fotogrammetri (liksom flygburen laserskanning, kapitel 16) är en effektiv metod att mäta de många punkter, som tillsammans utgör höjdm modellen.

I digitala arbetsstationer kan mätning av digitala höjdm modeller automatiseras. Programmet stegar fram till varje förvald mätpunkt, och operatören ställer bara in

mätmärket i höjd. Med s.k. progressiv mätning kan även valet av punktnätets täthet automatiseras beroende på terrängens branthet. Ett glest punktnät förtätas då successivt med hjälp av kriterier för maximalt tillåten höjdskillnad mellan intilliggande punkter. Resultatet blir höjdmätta punkter i tätare nät vid brantare eller mer kuperade terrängpartier, glesare nät vid jämnare mark.

Med digital bildmatchning, dvs. automatisk korrelationsberäkning mellan bilddata i digitala bildpar (se avsnitt 14.2), kan även höjdställningen automatiseras. Detta fordrar dock relativt öppen terräng, eftersom insynen i tät skog är begränsad. Även hustak och trädkronor kommer att matchas, varför höjdmodellen, då ofta kallad ytmodell, behöver editeras efter mätningen. Punkttätheten kan med nyare matchningsteknik, s.k. semi-global matching, bli lika hög som bildupplösningen, dvs. varje bildelement kan få ett höjdvärde.

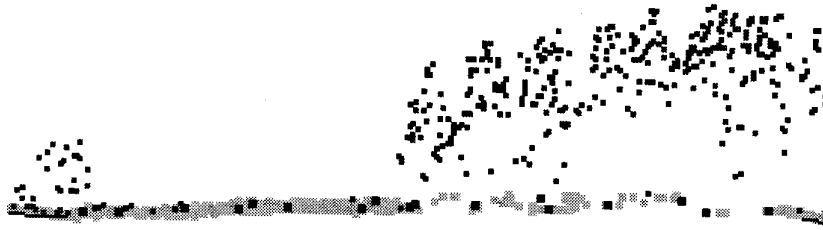


Figur 15.9. Grafisk illustration av digital höjdmodell. Varje maska representerar ett höjdvärde. (A Östman)

Digitala höjdmodeller kan mätas i oregelbundna nät, men interpoleras och lagras ofta som regelbundna rutnät av punkter. Ett vanligt sätt är annars att binda samman de oregelbundet mätta punkterna i ett triangelnät, s.k. TIN-nät (Triangular Irregular Network). När höjddata ska användas, t.ex. för ortofoto, generering av nivåkurvor eller volymbereäkning, interpoleras de ur nätet i förvalda planlägen, beroende på tillämpningen. För att representera terrängens karakteristiska ytförm bättre, kan rut- eller TIN-nätet kompletteras med brytlinjer, dvs. inmätta kanter i terrängen, över vilka höjdvärden inte interpoleras.

En alternativ teknik att insamla höjddata erbjuds med *flygburen laserskanning* av landskapet från flygplan eller helikopter. Se kapitel 16. Markens höjddata samlas in i ett tätt punktnät. Punktavståndet blir några dm från 200-400 m flyghöjd, några meter från några tusen meters flyghöjd. Mätosäkerheten är från den lägre höjden ca 10 cm i både plan och höjd, från den högre ca 0,5 m.

Den yttre orienteringen av varje enskild laserpuls måste bestämmas för att läget av den reflekterande markpunkten ska kunna beräknas. Flygburen laserskanning erfordrar därför ett integrerat navigationssystem, se avsnitt 13.3. Även stödpunkter på marken fordras dock för att förbättra det s.k. punktmolnets geografiska läge. Beräkningen har stora likheter med blocktriangulering.



Figur 15.10. Profil i landskapet, uppmätt med laserskanning. Grå mätpunkter betecknar markyta, svarta är trädkronor. (H Rost)

Resultatet av laserskanning är ett mycket tätt nät av höjdpunkter, som inkluderar alla objekt i landskapet, även detaljer och objekt av typ byggnader, träd, buskar, bilar mm. Resultatet betecknas därför digital ytmodell (DSM, eng. Digital Surface Model), se Figur 15.10. För att erhålla en höjdmmodell över enbart markytan måste laserpunkter från vegetation och byggnader filtreras bort. Det kan utföras med statistisk filtrering av data. Ytmodellen reduceras då till en höjdmmodell, medan vegetation och byggnader kan lagras separat i egna filer.

Insamlade datamängder med laserskanning blir i likhet med digitala bilder eller höjddata från digital bildmatchning mycket stora. Ett alltför tätt punktnät kan glesas ut till lämplig täthet innan den digitala höjdmmodellen räknas fram som en triangelmodell (TIN).

15.2.2 Höjdmmodellens kvalitet och användning

Den digitala höjdmmodellens kvalitet, vare sig den fångats med digital bildmatchning eller med flygburen laserskanning, blir beroende av landskapets brutenhet och av förekomsten av skog och tät bebyggelse. *Noggrannheten* beror av mätosäkerheten i varje mätt punkt, av terrängens brutenhet och vegetation, av punktnätets täthet och av interpolationsmetoden. Mätosäkerheten blir större än som anges i avsnitt 14.3, eftersom mätpunkterna ofta är mindre väl definierade. Flyghöjden får anpassas till detta och till de aktuella noggrannhetskraven. Även punkttätheten bör anpassas till noggrannhetskraven och till terrängens brutenhet, och fotogrammetriskt eller geodetiskt mätta brytlinjer bör läggas in och få styra interpolationen.

Avvikelserna i digitala höjdm modeller är till stor del av systematisk natur, och beroende av terrängtyp. Vid slät markyta, t.ex. gräsmattor och asfalt, är de små (några cm), men i "grov" terräng, t.ex. i skogsmark, kan punkthöjderna generellt bli 1-2 dm för höga, även från låg flyghöjd (800 m). Dessutom ökar de tillfälliga avvikelserna (dvs. standardosäkerheten) i grövre terräng.

Inom Lantmäteriet pågår framställning av en helt ny nationell höjdmmodell (NNH), baserad på flygburen laserskanning. Resultatet är en höjddatabank med en punkttäthet om 2 x 2 m och en standardosäkerhet i höjd om 0,2-0,5 m. Den är redan mycket användbar.

Digitala höjdm modeller används inom planering och projektering. Exempel på tillämpningsområden är

- konstruktion av höjdkurvor och terrängskuggning inom kartografi,
- val av linjeföring, massberäkning och massbalansering vid projektering av vägar och järnvägar,
- volymbestämning av upplag, grushögar och uttag ur grus- och bergtäkter,

- framställning av ortofoton (se avsnitt 14.1),
- kartering av riskområden för översvämning, samt
- visualisering, dvs. konstruktion av snedperspektiv och tredimensionella digitala stadsmodeller som underlag för fysisk detaljplanering.

Den digitala ytmodellen kan ”draperas” med en omräknad, digital flygbild eller ett ortofoto. Även uppmätta husfasader m.m. kan ”kläs” med digitala markbilder. Resultatet blir en mycket realistisk digital stads- eller landskapsmodell, som kan utgöra underlag för t.ex. planering, turistinformation eller flygsimulering.

Den digitala kartdatabasen och digitala höjdmodeller kan utnyttjas tillsammans med andra lägesbundna data, t.ex. geologiska data, vegetationsdata, fastighets- och befolkningsdata. Kartdatabasens filer utgör då tillsammans med övriga datafiler informationslager i geografiska informationssystem (GIS). Ofta utgör ett digitalt ortofoto bakgrund till sådana data. Exempel på tillämpningar av GIS är samhällsplanering, projektering av byggnader och anläggningar och planering av mobiltelefoninät.

15.3 Småskalig kartframställning

15.3.1 Omdrevsfotografering

Med småskaliga kartor avses normalt kartor i skala 1:5 000 och mindre. Lantmäteriets allmänna kartserier, orienteringskartor och skogskartor är exempel på småskaliga kartor. För framställning och revidering av allmänna kartor och för att tillgodose landets allmänna behov av flygbildsmaterial utförs flygfotografering från höga höjder enligt en långsiktig, normalt femårig, s.k. omdrevsplan. Fotograferingen benämns därför omdrevsfotografering.

Under hela senare hälften av 1900-talet användes för detta ändamål fotografiska kameror med kamerakonstanten 15 cm. Dessa gav från flyghöjden 4600 m (”normalhöjd”) bildskalan 1:30 000, och från 9200 m (”höghöjd”) bildskalan 1:60 000. Normalt användes svart-vit film, men omdrev med IR-färgfilm har genomförts. I vissa fall har flyghöjden 3000 m, som gav bildskala 1:20 000, eller 13 200 m, som med kamerakonstanten 9 cm gav bildskala 1:150 000, använts. Alla dessa bilder finns arkiverade och kan skannas till digital form.

Omdrevsfotografering görs numera med digital flygmätkamera. Planering av sådan fotografering avviker i vissa avseenden från planering med analog kamera. Använda flyghöjder är ungefär desamma som med fotografisk kamera. Exempelvis ger flyghöjden 4 800 m med DMC-kameran (avsnitt 13.3) bildskalan 1:40 000. Omdrevsfotografering planeras normalt i nord-sydliga stråk, men undantag finns.

15.3.2 Framställningsteknik. Fotokartor

Kartor i skalområdet 1:5 000 – 1:50 000 framställs normalt på samma sätt som storskaliga kartor, dvs. de stereokarteras fotogrammetriskt. Exempel på detta är fastighetskartan (f.d. ekonomiska eller Gula kartan), terrängkartan (f.d. topografiska eller Gröna kartan) och orienteringskartor. Vissa småskaliga kartor kan emellertid framställas genom förminskning, sammansättning och generalisering av storskaliga primärkartor (exempel är turistkartor och kartor för översiktsplanering) eller via tolkning i ortofoto (t.ex. skogskartor). Ortofoton från omdrevsbilder från höga flyghöjder medför behov av en icke obetydlig fältarbetsinsats för att komplettera det

Kapitel 15: Fotogrammetriska tillämpningar

tolkade kartunderlaget. Den ökade tillgängligheten av fotogrammetriska arbetsstationer har (åter) ökat användningen av stereoritning. Detta har begränsat fältarbetsinsatsen jämfört med tolkning i ortofoto, som länge var vanligast.

Ofta är det önskvärt att framställa kartor som kombinerar en ritad karta med en fotobild. En sådan karta kallas *fotokarta* eller *bildkarta*. Fotokartor framställs med stereoritade kartdetaljer, som överlagras ortofoton, ofta i skalområdet 1:5 000 – 1:20 000. Exempel är fastighetskartan och andra småskaliga fastighetsregisterkartor (Figur 15.11), skogskartor och kartor för översiktlig planering och som projekteringsunderlag i tidiga skeden, t.ex. för Trafikverket. Småskaliga bildkartor kan också framställas med utnyttjande av satellitbilder. Exempel på fotokartor ser vi varje dag i sökoperatörer på nätet (Eniro, Hitta och Google), i våra mobiltelefoner och i GPS-navigatörer.

Även storskaliga, kommunala fastighetsregisterkartor kan utformas som fotokartor, ofta i skala 1:2 000. För storskalig (större än 1:5 000) ortofotoframställning erfordras nymätning av digital höjdmödel med större punkttäthet och högre höjdnoggrannhet än Lantmäteriets hittillsvarande höjddatabank. Den nya nationella höjdmödeln NNH har emellertid ökat möjligheterna att använda tillgängliga höjddata.



Figur 15.11. Exempel på fastighetsregisterkarta i form av ortofotokarta i skala 1:10 000 (Metria).

Digitala ortofoton kan sättas samman till en skarvlös mosaik. Geometriska och radiometriska skillnader mellan ortofotona utjämnas då i skarvarna, som förläggs där de märks minst. Storskaliga ortofoton över storstadsområdena har tagits fram av bl.a. konsulter och berörda kommuner och finns tillgängliga även via Internet.

Digitala ortofoton är väl lämpade att lagras tillsammans med annan digital kartinformation i kartdatabaser. Lantmäteriet har under senare år prioriterat framställning av digitalt kartmaterial, benämnt Geografiska Sverigedata (GSD). Däri ingår bl.a. en digital version av fastighetskartan med ortofotounderlag.

15.4 Markfotogrammetri

15.4.1 Kameratyper

Markfotogrammetri (terrester fotogrammetri) är den ursprungliga formen av fotogrammetri. Tekniken praktiserades redan från mitten av 1800-talet för såväl topografiska som icke-topografiska ändamål, dvs. såväl för kartframställning från bergstoppar som för t.ex. dokumentation av byggnader. Efter flygfotogrammetriens utveckling på 1920-talet används tekniken så gott som uteslutande för icke-topografiska ändamål.



Figur 15.12. Stereokamera med fast bas (Leica/Wild P32), och exempel på uppmätt skulptur (KTH Fotogrammetri).

Kameran eller kamerorna kan monteras på stativ och kan därför mätas in geodetiskt. Det medför, att bildernas yttre orientering blir känd. I princip skulle alltså inte relativ och absolut orientering behöva genomföras. I de flesta fall genomförs ändå detta, främst för att öka mätnoggrannheten genom att små modelldeformationer kan reduceras.

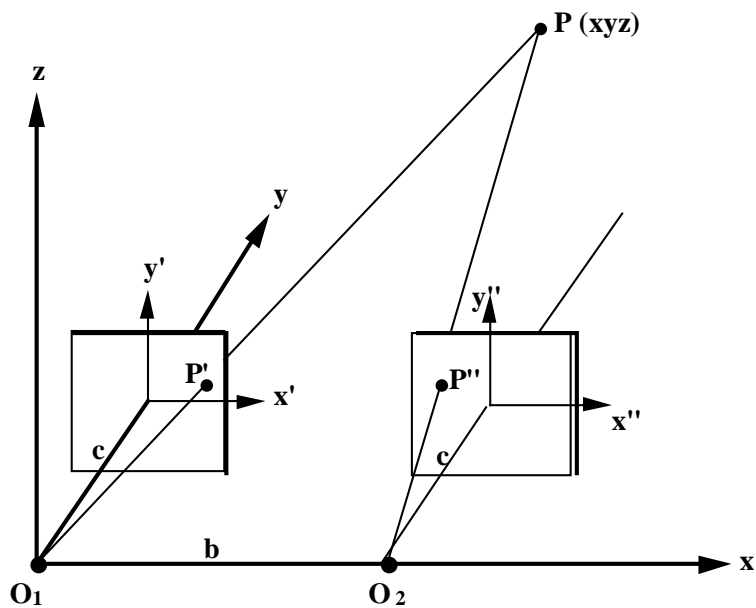
Digitala kameror (se avsnitt 13.2) eller digitala CCD-bakstycken till fotografiska kameror är numera helt dominerande inom markfotogrammetri. Bildformaten är normalt mindre än flygkamerans, från ca 10x15 mm till ca 5x5 cm. Ofta används okalibrerade, ”vanliga” kameror, vilket har medfört att kalibreringsrutiner för sådana utarbetats. Ibland används *stereokamera*, dvs. två kameror parallellt monterade på en fast bas (se Figur 15.12). Därigenom kan fotogrammetriens normalfall uppnås strängt,

och basen blir känd, vilket förenklar de fotogrammetriska beräkningarna väsentligt. Det finns även rutiner för utvärdering av filmsekvenser, tagna med rörlig videokamera.

15.4.2 Markfotogrammetrins normalfall

Markfotogrammetrins normalfall kan alltså med hjälp av stereokamera uppnås strängt, varigenom parallaxformlerna kan användas med god kvalitet. Kamerauppställningen medför normalt, att de parallella kameraaxlarna blir (ungefär) horisontella (och naturligtvis vinkelräta mot basen). Se Figur 15.12 och Figur 15.13, där bilderna liksom tidigare (Figur 14.9) ritats i positivläge.

Bild- och modellkoordinatsystemen definieras precis som i flygfotofallet (avsnitt 14.2, Figur 14.9), men fotograferingsriktningarna är nu horisontella, dvs. båda kamerorna är jämfört med flygfotofallet roterade runt x-axeln vinkeln $\omega = \pi/2$ (100 gon). Vänster kameraaxel sammanfaller därigenom med modellsystemets positiva y-axel (i stället för med flygfotofallets negativa z-axel).



Figur 15.13. Markfotogrammetrins normalfall. Bilderna i positivläge.

Bildkoordinatsystemens x-axlar (x' och x'') är fortfarande parallella med modellsystemets x-axel, men y-axlarna (y' och y'') blir parallella med modellsystemets z-axel. Parallaxformlerna i markfotogrammetrins normalfall blir därigenom något annorlunda än i flygfotogrammetrins normalfall. Modellkoordinaterna ($x y z$) beräknas enligt:

$$x = x' \frac{b}{P_x} \quad y = c \frac{b}{P_x} \quad z = y' \frac{b}{P_x}$$

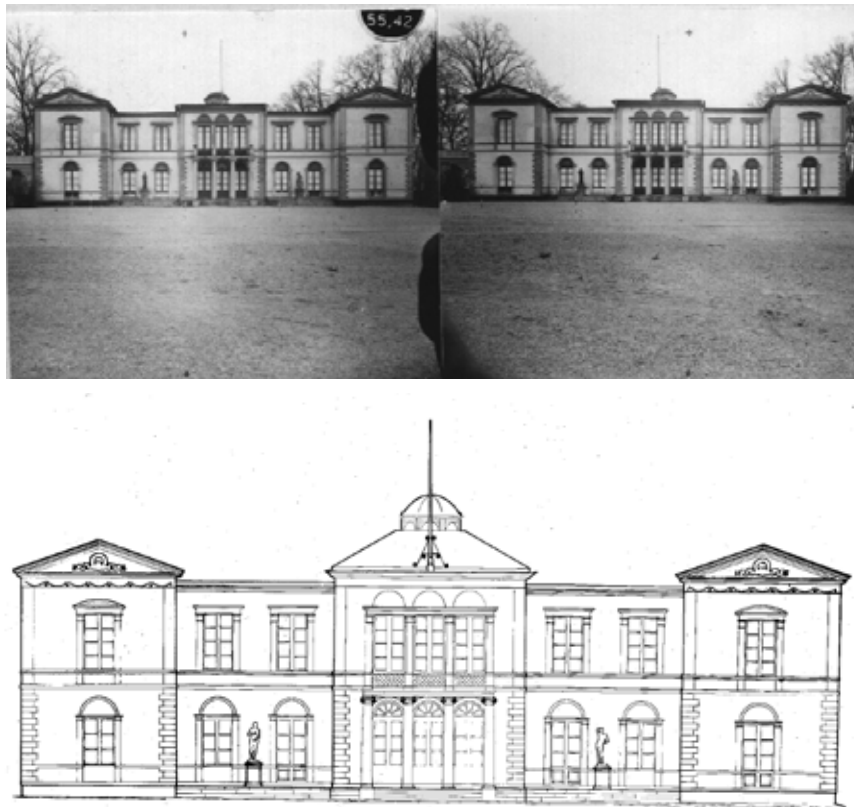
X- och y-parallaxernas benämningar horisontal- resp. vertikalparallax känns här helt naturliga. Horisontalparallaxen definieras även här

$$p_x = x' = x'',$$

medan vertikalparallaxen i normalfallet blir lika med noll. Teoretiskt är alltså $y' = y''$, men för att minimera effekten av mätosäkerhet kan medelvärdet av dem användas i

formeln. Liksom i flygfotofallet (avsnitt 13.3) definieras bildhuvudpunktens H läge av läget $(r\ k)_H$ för dess rad och kolumn i bildmatrisen, och bildkoordinaterna $(x' y')$ utgår från H .

För att skalbestämma modellen räcker det med att ange eller ställa in fotograferingsbasen (b_f). Då erhålls modellkoordinater i objektets skala (dvs. skala 1:1). Om basen är okänd, kan man mäta en känd sträcka (ev. signalerad) i objektet och i stereomodellen. Med hjälp av den kända sträckan beräknas ett värde på basen b , så att modellen får önskad skala. Metoden finns beskriven i avsnitt 14.2.



Figur 15.14. Exempel på byggnadshistorisk dokumentation av Rosendals slott med markfotogrammetri. Stereokamera med fast bas har använts (KTH Fotogrammetri).

För att erhålla objektkoordinater i ett yttre koordinatsystem måste stödpunkter inkluderas i objektet, varefter stereomodellen absolutorienteras med tredimensionell likformig transformation (se avsnitt 14.2).

15.4.3 Markfotogrammetrins allmänna fall

I markfotogrammetri tillämpas ofta fri uppställning av kamerorna, dvs. bilderna kan vara tagna i fritt valda riktningar mot objektet. Normalfallet kanske inte ens föreligger approximativt. Då måste motsvarande procedur som i flygfotogrammetri, inklusive signalering av stödpunkter samt relativ och absolut orientering tillgripas, och beräkningen av modellkoordinater blir mer komplicerad. Det är därför inte ovanligt att planera även markfotogrammetri för blocktriangulering. För att lösa det lineariserade ekvationssystemet erfordras då, att närmevärden på kamerornas yttre orienteringselement bestäms. Det kan göras geodetiskt eller genom att förse kameran med ett integrerat navigationssystem. Ett sådant block kan bestå av ett stort antal bilder, tagna runt om det avbildade objektet, eventuellt med en rörlig videokamera.

Kapitel 15: Fotogrammetriska tillämpningar

Man talar då om utvärdering av bildsekvenser. Är övertäckningen tillräckligt stor i en sådan bildsekvens, kan tillräckligt många överbestämningar erhållas för en blockutjämnning utan närmevärden. Med små kameror, lämplig mjukvara och bärbar dator kan i vissa fall hela den fotogrammetriska mätprocessen utföras på plats, ”bärbar fotogrammetri”. Inom detta område pågår en snabb utveckling.

15.4.4 Markfotogrammetrins mätosäkerhet

På samma sätt som vid flygfotogrammetri (avsnitt 14.3) kan markfotogrammetrins mätosäkerhet utvecklas genom derivering av parallaxformlerna i normalfallet. Resultatet blir förstås något annorlunda:

$$\begin{aligned}s_x &= m_b s_{x'} \\ s_y &= m_b s_{x'} \sqrt{2} / (b/y) \\ s_z &= m_b s_{y'}\end{aligned}$$

Standardosäkerheten i ett lodrätt xz-plan i objektet är således lika med mätosäkerheten i bilderna ”uppförstorade” med bildskalan (m_b). Standardosäkerheten i djupled (s_y) är dessutom omvänt proportionellt mot ”bas/djupförhållandet” (b/y , jfr bas/höjdförhållandet i avsnitt 14.3). Det innebär, att s_y blir proportionell mot kvadraten på y-koordinaten. (Sätt in $m_b = y/c$ i formeln för s_y !) En väsentlig skillnad mot flygfotogrammetrin är, att det avfotograferade objektet kan ha ett väsentligt djup i förhållande till fotograferingsavståndet (Ett landskap är förhållandevis platt i förhållande till flyghöjden!). Både bildskalan ($1:m_b$) och ”bas/djupförhållandet” (b/y) kan alltså variera kraftigt för olika delar av objektet (men modellskalan är konstant för hela modellen!). Båda faktorerna ($1:m_b$ och b/y) avtar, då avståndet (y) från kamerorna till objektets olika delar ökar. Därför ökar som sagt standardosäkerheten i modellen kvadratisk med djupet (y). Objektets största djup blir därför helt avgörande för val av lämplig bas och lämpligt fotograferingsavstånd.

15.4.5 Tillämpningsområden

Digital markfotogrammetri har funnit många nya tillämpningar. Exempel på tillämpningsområden är

- byggnadshistorisk, konsthistorisk och arkeologisk dokumentation (figur 15.12 och 15.14),
- kontrollmätning av verkstadstekniska detaljer inom bl.a. bilindustrin,
- uppmätning av industriinteriörer och industriprodukter, t.ex. i kärnkraftverk,
- deformationsmätningar av t.ex. broar,
- utredning av trafikolyckor och bilprovning
- medicinska och odontologiska undersökningar.

I flera av dessa tillämpningar utförs fotogrammetriska mätningar även i röntgenbilder, numera oftast dock med datortomografiska metoder.

Markfotogrammetriska bilder används också dels i kombination med terrester laser-skanning för att göra realistiska modeller av byggnader och interiörer, dels tillsammans med flygfotogrammetri eller flygburen laserskanning för ”drapering” av husfasader på digitala stadsmodeller. Se kapitel 16.

Bil- och spårburna stereofotogrammetriska system (s.k. *mobile mapping*, Figur 15.15)

har utvecklats för registrering av objekt på och intill vägar och järnvägar. Integrerade navigationssystem med GNSS för lägesbestämning och gyrosystem (tröghetsnavigering, TN) för riktningbestämning används då för bestämning av yttre orienteringen hos fordonet och kamerasystemet. De digitala bilderna eller bildparen, som tas med hög frekvens medan fordonet kör, utvärderas automatiskt med hjälp av objektigenkänning och digital bildmatchning. Resultatet i form av läge och utseende hos terräng, vägmärken, väglinjer och andra objekt utefter väglinjen eller motsvarande objekt utefter järnvägsspåret kan lagras i en väg- resp. järnvägsdatabas.



Figur 15.15. Fordonsburet integrerat sensorsystem (Lynx) med kameror, laserskannrar och ett integrerat navigationssystem (Terratec)

Den digitala ytmodellen, t.ex. uppmätta husfasader, kan draperas med omräknade, digitala markbilder eller ortofoton. Resultatet blir en mycket realistisk digital stads- eller landskapsmodell, som kan utgöra underlag för t.ex. planering, turistinformation eller flygsimulering.

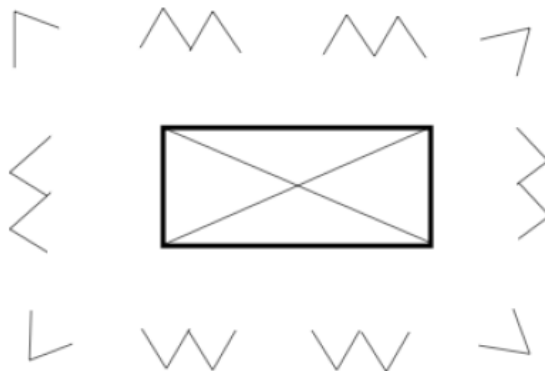
Terrester, dvs. stativ- eller fordonsburen, laserskanning har tagit över flera av de traditionellt fotogrammetriska tillämpningsområdena. Tekniken har utvecklats till ett alternativ till terrester fotogrammetri för detaljerad inmätning av komplicerade objekt och miljöer, t.ex. interiörer och exteriörer av industrimiljöer och kulturhistoriska byggnader, byggnadsinteriörer och inredningsbara vindar. Tekniken används också i miljöer med begränsad tillgänglighet, t.ex. i bergtunnlar under sprängning, bergskärningar utefter vägar och arkeologiska utgrävningar, och för ytformer hos mindre föremål, t.ex. skulpturer eller verkstadsdetaljer.

Resultaten av markfotogrammetri eller terrester laserskanning överförs till CAD-system i form av trådmodeller eller som fullständiga 3D-modeller, som kan bearbetas till ritningar, kombineras med digitala bilder av objektet till en virtuell miljö eller vidareutvecklas till fullständigt tredimensionella BIM- (eng. Building Information Modelling) eller anläggningsmodeller.

Fordonsburna system för registrering av väg- eller järnvägsmiljö (Figur 15.15) innehåller ofta såväl laserskannrar som kameror, alla styrda av det integrerade navigationssystemet. Man talar då om integrerade sensorsystem. Avsikten är, att ge en heltäckande yt- eller höjdmodell runt fordonets färdväg. Ytmodellen kan ges ytterligare realism genom drapering med kamerabilderna.

15.4.6 Planering av markfotogrammetri med "3x3-metoden"

För att kulturhistoriska byggnader och andra objekt ska kunna dokumenteras fotografiskt så, att de i en framtid kan rekonstrueras fotogrammetriskt, bör bilderna tas enligt en viss strategi. En sådan, "3x3-metoden", har utvecklats av Waldhäusl och Ogleby (se litteraturlistan), främst för fotografering av byggnader och med målet, att "vem som helst" ska kunna dokumentera ett objekt för en framtida fotogrammetrisk uppmätning. Tre huvudregler har vardera tre underrubriker, därav namnet. Viss överarbetning för digital fotografering har gjorts här. Figur 15.16 illustrerar en princip för fotograferingen.



Figur 15.16. Planering av kamerastationer (V) för dokumentation av en byggnad.

1) Tre geometriska regler

1.1) Ordna stödpunkter eller kända mått i objektet

- Mät med centimeternoggrannhet längder mellan tydliga detaljer, så långa som möjligt och minst en längd per sida av objektet. Markera med tejp.
- Sök lodlinjer i objektet, helst flera per sida, eller häng upp lodlinor.
- Alternativt markeras stödpunkter runt objektet, så de blir synliga i bilderna. Minst fyra i varje blivande stereomodell, och inte tre på rad. Mät in dem geodetiskt.

1.2) Planera fotostationerna

- Ta en serie bilder runt objektet, vinkelrätt mot fasaderna. Utefter objektets sidor ska bilderna överlappa varandra med minst 60 %.
- Vid varje hörn tas en diagonal bild.
- Ta helst bilderna på halva objektets höjd. Ta om möjligt även bilder av taket.
- Komplettera med översiktsbilder från längre håll.

1.3) Komplettera till stereopar

- Till varje fasadbild tas en stereopartner på ett basavstånd av ca 1/5–1/10 av avståndet till objektet.
- Stereopartneren tas med kameraaxeln parallell med den första eller konvergent mot samma syftpunkt på objektet
- Komplettera med sneda bilder och närbildspar, där det behövs.

2) Tre fotografiska regler

2.1) Välj en stabil kamera

- Välj objektiv av hög kvalitet. Använd helst vidvinkelobjektiv.
- Välj gärna stora bildformat.
- Kameran bör ha minst 6 MP CCD.

2.2) Håll den inre orienteringen konstant

- Använd ej zoom-optik, eller lås den i vidvinkelläget.
- Ingen autofokus! Lås fokuseringen på oändligt, och använd liten bländare för att få stort skärpedjup.
- För närbilder, lås fokuseringen på ett avstånd och behåll det.
- Se till att bildhörnen avbildas med god kontrast. (De ska definiera bildhuvudpunkten)
- Ta några av bilderna med kameran på högkant.

2.3) Ordna jämn belysning

- Fotografera gärna på morgonen eller kvällen, när ljuset är jämnast.
- Undvik skarpa skuggor. Lätt molnighet är bäst.
- Använd stativ och trådutlösare.
- Undvik blix. Om konstgjord belysning används, flytta den inte mellan exponeringarna.

3) Tre organisatoriska regler

3.1) Gör skisser

- En bra översiktsskiss är nödvändig och bör innehålla
 - Objektets benämning och adress
 - Datum och fotografens namn
 - Ungefärlig skala och norrpil
 - Mätta sträckor och deras längder
 - Fotostationer med numrering och fotoriktningar
- Gör skisser av alla objektets sidor.
 - Samma innehåll som ovan
 - Dessutom lodlinjernas lägen och lägen för närbilder

3.2) Skriv protokoll

- Beskriv objektet
 - Typ av objekt. Ålder, stil, interiör
Arkitekt eller konstnär, objektets historia
 - Ägare, adress
- Tid, plats, fotograf,
- Kameratyp, objektiv
- CCD-typ och upplösning

Kapitel 15: Fotogrammetriska tillämpningar

- Inställningar (avstånd, tid, bländare).

3.3) Efterarbete

- Spara de digitala bilderna på lämpligt dataminne. Skriv ut goda kopior
- (Genomför ev. blocktriangulering med självkalibrering)
- Överlämna materialet till lokala myndigheter, eller ordna ett eget arkiv.
- Ägaren vill säkert ha kopior.

