

Maa-57.270 Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen seminaari

**Automaattinen 3D - mallinnus
kalibroimattomilta kuvasekvensseiltä**

Terhi Ahola

2005

Sisällysluettelo

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Johdanto | 2 |
| 2 | Perusteoriaa | 2 |
| 2.1 | Kohteen rekonstruointi..... | 2 |
| 2.1.1 | Projektiivinen rekonstruointi..... | 4 |
| 2.1.2 | Metriinen rekonstruointi | 4 |
| 2.2 | Epipolaarigeometriaa..... | 4 |
| 3 | Yleiskatsaus menetelmään | 5 |
| 4 | Vaihe 1: Projektiivinen rekonstruointi | 7 |
| 4.1 | Kuvien yhteensovitus | 7 |
| 4.1.1 | Vastinpisteiden etsiminen..... | 7 |
| 4.1.2 | Epipolaarigeometrian määrittäminen | 7 |
| 4.2 | Projektiomatriisien laskeminen ja rekonstruointi | 8 |
| 4.2.1 | Alustava rekonstruointi | 8 |
| 4.2.2 | Kuvien lisääminen..... | 9 |
| 4.3 | Sädekimpputasoitus | 9 |
| 5 | Vaihe 2: Itsekalibrointi | 10 |
| 6 | Vaihe 3: Syvyyskarttojen estimointi | 11 |
| 6.1 | Stereokuvaparin yhteensovitus | 12 |
| 6.2 | Useiden kuvien linkittäminen..... | 12 |
| 7 | Vaihe 4: 3D-mallin muodostaminen | 13 |
| 8 | Menetelmän tarkkuus ja luotettavuus | 14 |
| 9 | Yhteenveto | 16 |

1 Johdanto

3D-objektien mallintaminen kuvasekvensseiltä on haastava ongelma ja se on ollut tärkeä tutkimuksen aihe fotogrammetrian ja tietokonenäön alalla useita vuosia. Tietokonegrafiikka, virtuaaliodellisuus ja viestintä ovat uusia sovellus-alueita joiden myötä 3D-mallien visuaalisen laadun ja tarkkuuden kehittäminen on saanut merkittävimmän aseman tällä tutkimusalalla. (Pollefeys *et al.* 2004: 207)

Monet perinteiset ratkaisut 3D-mallien luomiseen ovat aikaa vieviä ja niihin käytettävät laitteet, kuten 3D-digitointilaitteet, laserskannerit ja stereokojeet vaativat huolellista käsittelyä ja tarkkaa kalibroitua. Lisäksi nämä kojeet on suunniteltu ainoastaan rajatulle syvyysasteelle eli mallinnettava kohde ei voi olla miten suuri tahansa. Perinteiset kojeet 3D-mallien luomiseen ovat usein myös hyvin kalliita. (Koch *et al.* 2000: 115)

Uudet sovellusalueet 3D-mallinnuksessa, kuten 3D-kaupunkimallinnus, arkeologiset sovellukset sekä maisemamallinnus vaativat yksinkertaisen, halvan ja kenttäolosuhteita hyvin kestävä järjestelmän. Tämä nostaa esille ajatuksen käyttää tavallisia kuluttajamarkkinoiden kuva- sekä videokameroita kohteiden 3D-mallien muodostamisessa. (Pollefeys *et al.* 2000: 251)

Tässä työssä esitellään menetelmä, jonka avulla voidaan automaattisesti luoda 3D-malleja kalibroimattomilta kuvasekvensseiltä, jotka on otettu tavallisella digitaali- tai videokameralla. Tämän järjestelmän avulla voidaan välttää useimmat edellä mainituista ongelmista. Järjestelmä ei aseta rajoituksia mallinnettavan kohteen koolle. Pienen objektin tai kokonaisen maiseman mallintaminen on yhtä helppoa. Lisäksi kuva-aineiston hankkiminen on vaivatonta. Käyttäjä ottaa kuvat liikuttamalla kameraa vapaasti kohteen ympärillä. Järjestelmä ei vaadi mitään etukäteistietoa kohteesta tai kamerasta ja näin ollen raskaita kalibrointitoimenpiteitä ei tarvita lainkaan. Kameran suhteellinen asema ja orientointi saadaan suoraan kuva-aineistosta. Muodostettu 3D-malli on skaalattu versio alkuperäisestä objektista eli rekonstruointi on metrinen. Lisäksi tekstuuri malliin saadaan kuvasekvenssistä. (Pollefeys *et al.* 2000: 251, Koch *et al.* 2000: 115)

2 Perusteoriaa

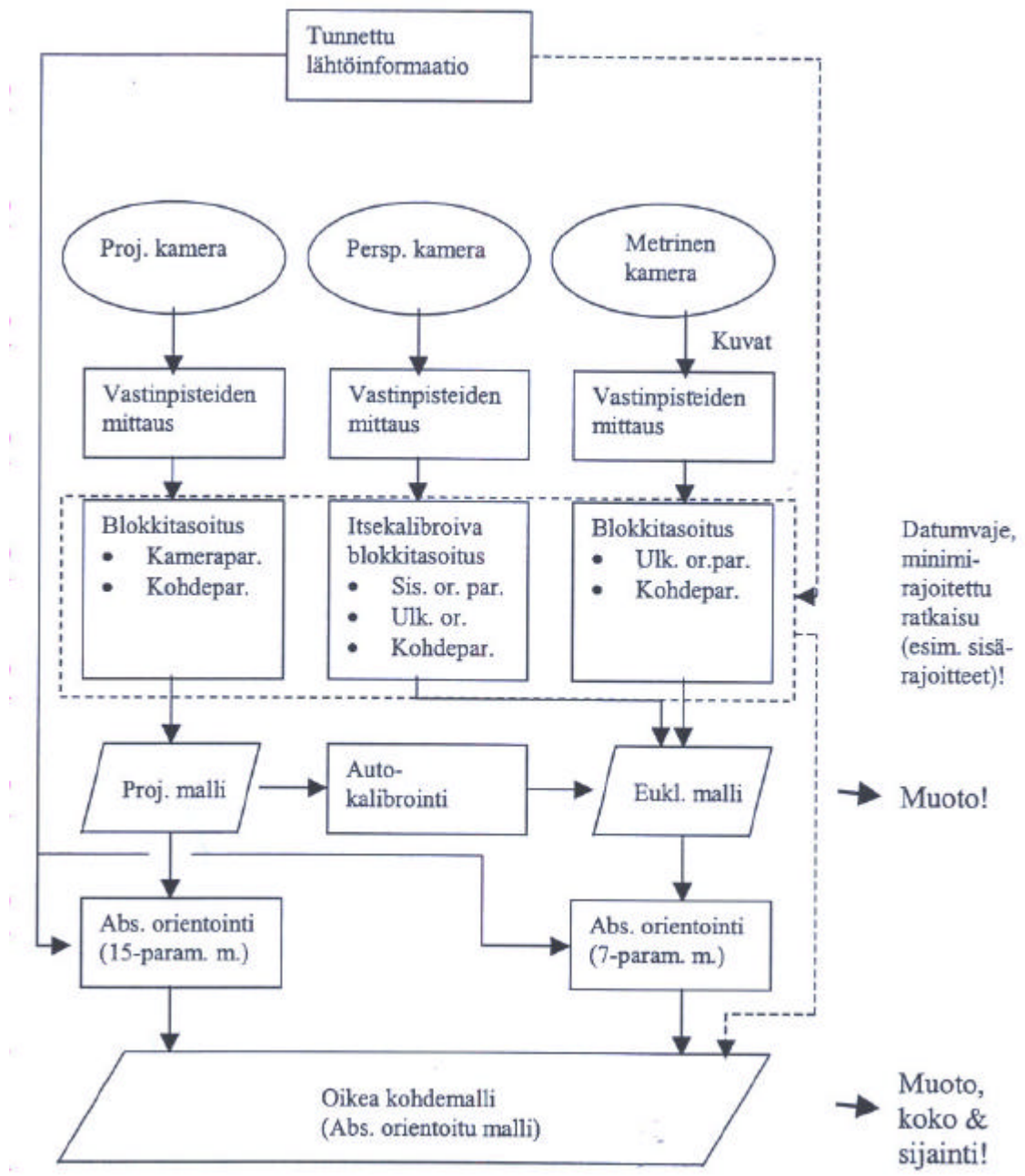
Perusteoriaa kappale pohjautuu pääosin lähteeseen Inkilä 2002.

2.1 Kohteen rekonstruointi

Kohteen rekonstruointi kuvilta on tämän esitelmän pääaihe. Riippuen siitä, kuinka paljon on saatavilla etukäteistietoa kohteesta tai kamerasta saadaan tehtyä erilaisia rekonstruointeja. Projektiivinen ja metrinen rekonstruointi ovat tämän järjestelmän kannalta keskeisimmät. Kuvassa 1 on esitetty erilaisten lähtötietojen ja kalibrointien vaikutusta lopulliseen rekonstruktioon. Esiteltävä menetelmä ei sisällä mitään tunnettua lähtöinformaatiota tai kalibroitua.

Lähtökohtana on projektiivinen kamera ja lopputuloksena kohteen metrinen rekonstruointi. Projektiivisen kamerasen lisäksi kuvassa on esitetty rekonstruointimenettelyt perspektiivisen ja metrisen eli kalibroidun kamerasen tapauksissa. Kuvasta käy ilmi selkeästi se tosiseikka, että mallin absoluuttiseen orientointiin tarvitaan aina jotain tunnettua lähtöinformaatiota.

Tietokonenäön ja fotogrammetrian lähestymistavat kohteen rekonstruointiin ovat erilaiset. Fotogrammetriassa estimoidaan kulmia, jotka kuvataan kiertomatriisin avulla. Tietokonenäössä sen sijaan estimoidaan suoraan matriisin alkiota. Tämä esitelmä pohjautuu jälkimmäisen tavan käyttöön.



Kuva 1. Kohteen rekonstruointi erilaisten lähtötietojen avulla (Inkilä 2002).

2.1.1 Projektiivinen rekonstruointi

Kohde voidaan rekonstruoida kalibroimattomilta kameroilta pelkkiä vastinpisteiden kuvakoordinaattihavaintoja hyväksi käyttäen ainoastaan 15-parametriseen projektiiviseen avaruusmuunnokseen asti. Tällaista rekonstruointia kutsutaan projektiiviseksi.

Projektiivinen rekonstruointi kohteesta on projektiivisesti vääristynyt. Jotta alkuperäinen kohde saataisiin tästä mallista, vaatisi se yhteensä 15 parametrin ratkaisemista. Projektiivisessä muunnoksessa sekä kulmat että etäisyydet muuttuvat. Suorat kuvautuvat suoriksi ja tasot tasoiksi. Lisäksi kaksoisuhteen arvo säilyy muuttumattomana. Kaksoissuhde on etäisyyksien suhteiden suhde.

2.1.2 Metrinen rekonstruointi

Kohteen rekonstruointia kutsutaan metriseksi kun kohde pystytään määrittämään 7-parametriseen 3D-yhdenmuotoismuunnokseen asti. Metrissä rekonstruoinnissa kohteen muoto pystytään määrittämään. Yhdensuuntaiset suorat säilyvät yhdensuuntaisina ja kulmat eivät muutu. Tuntemattomina säilyvät kohteen sijainti, kiertoasema sekä koko eli mittakaavaa ei tunneta.

2.2 Epipolaarigeometriaa

Epipolaarigeometrialla tarkoitetaan kuvatasojen leikkaamista suorilla ja tasolla. Kyse on kuvaparin teoriasta, jossa saman kohdepisteen kahdella eri kuvalla näkyvät kuvapisteen eli vastinpisteet kytketään toisiinsa.

Seuraavassa joitakin peruskäsitteitä (Kuva 2):

Kannalla (b) tarkoitetaan kahden kuvan välisten projektiokeskusten välistä yhdysuoraa.

Epipolaaritaso on mielivaltainen taso, joka sisältää kannan.

Epipolaaripiste (e_{ij}) on kuvatason ja kannan leikkauspiste ja se saadaan projisoimalla kameran i projektiokeskus kuvalle j .

Epipolaarisuora (l) on kuvatason ja epipolaaritason leikkaussuora ja kaikki kuvan epipolaarisuorat leikkaavat epipolaaripisteessä.

Näistä määrittelyistä voidaan johtaa seuraavat kahta kuvaa koskevat ehdot:

Koplanariteettiehdon mukaan projektiokeskukset ja kuvapisteen, jotka vastaavat samaa kohdepistettä sijaitsevat samassa tasossa, epipolaaritasossa eli seuraava yhtälö toteutuu:

$$m_1 F m_2 = 0 \quad (1)$$

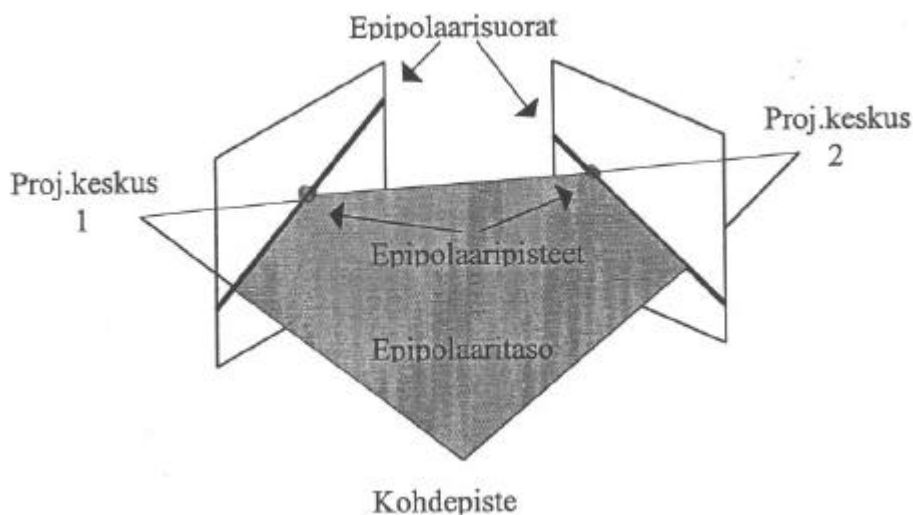
jossa F on epipolaarimatriisi (fundamental matrix), $m_2 = [x_2 \ y_2 \ 1]^T$ annettu kuvapiste ja $m_1 = [x_1 \ y_1 \ 1]^T$ sen vastinpiste toisella kuvalla.

Epipolaariehto sanoo, että annetun kuvapisteen $m_2 = [x_2 \ y_2 \ 1]^T$ vastinpiste $m_1 = [x_1 \ y_1 \ 1]^T$ sijaitsee epipolaarisuoralla

$$l = Fm_2 \quad (2)$$

Jokaiselle kuvapisteelle on siis olemassa toisella kuvalla suora, jolla kyseisen pisteen vastinpiste sijaitsee.

Epipolaariehto on erityisen tärkeä kuvien yhteensovittamisessa, jossa epipolaariehdon avulla voidaan huomattavasti pienentää etsintäavaruuden suuruutta kuvien välisten vastinpisteiden etsinnässä.



Kuva 2. Kahden kuvan geometriaa (Inkilä 2002).

3 Yleiskatsaus menetelmään

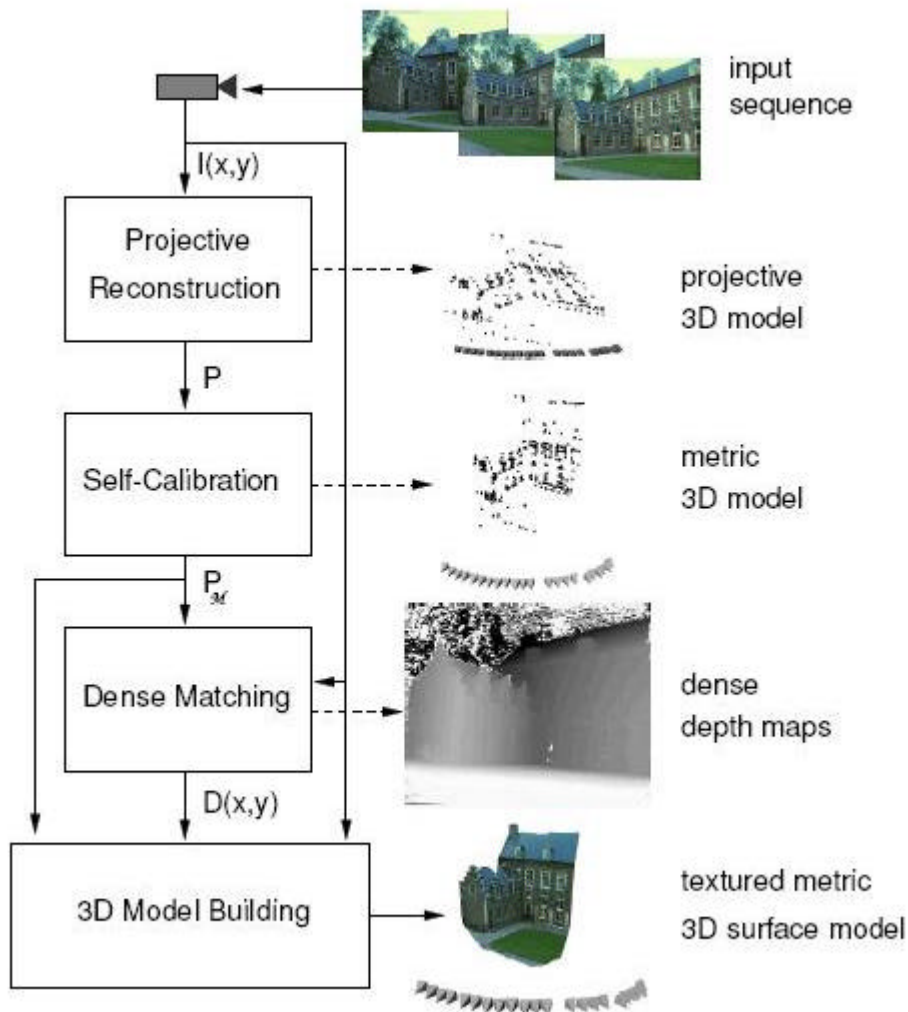
Esiteltävä menetelmä sisältää neljä päävaihetta, jotka ovat projektiivinen rekonstruointi, itsekalibrointi, syvyyskarttojen estimointi ja 3D-mallin muodostaminen (Kuva 3). Vaiheiden edetessä saadaan vähitellen lisää tietoa kohteesta ja kamerasta. (Pollefeys *et al.* 2000: 253-254)

Kahdessa ensimmäisessä vaiheessa, jotka ovat projektiivinen rekonstruointi ja itsekalibrointi, suoritetaan vastinpisteiden etsintä kuvien välillä sekä järjestelmän kalibrointi. Kuvasekvenssin kalibroimiseen tarvitaan muutamia luotettavia vastinpisteitä. Ensimmäisestä vaiheesta saadaan tuloksena kohteen projektiivinen malli ja kameroiden paikat. Itsekalibroinnin avulla projektiivinen malli päivitetään metriseksi. Molempien vaiheiden jälkeen rekonstruointia parannetaan sädekimpputasoituksen avulla. Tässä vaiheessa rekonstruointi on harva eli vai muutamia vastinpisteitä tunnetaan. (Pollefeys *et al.* 2000: 253-254, Koch *et al.* 1998: 56-57)

Seuraavassa vaiheessa, joka on syvyyskarttojen estimointi, löydetään vastinpisteet suurimmalle osalle kuvan pisteistä. Tuloksena saadaan jokaiselle kameralle tiheät syvyyskartat, joissa on kuvattuna jokaisen kohdepisteen etäisyys kameran projektiokeskuksesta. (Pollefeys *et al.* 2000: 254)

Viimeinen vaihe on 3D-mallin muodostaminen, jossa tiheistä syvyyskartoista tehdään 3D-pintamalli ja kuvilta projisoidaan tekstuuri mallin pinnalle. (Pollefeys *et al.* 2000: 254)

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan jokaista näistä vaiheista yksityiskohtaisemmin.



Kuva 3. Menetelmän päävaiheet (Pollefeys *et al.* 2000: 253).

4 Vaihe 1: Projektiivinen rekonstruointi

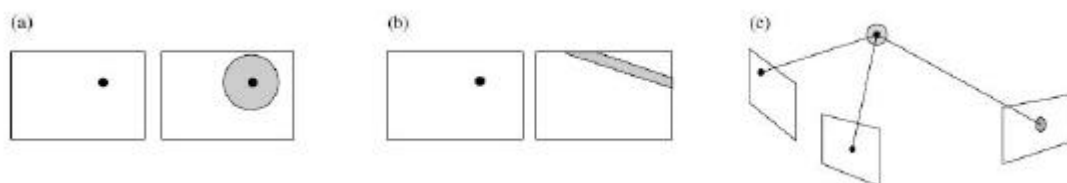
Projektiivinen rekonstruointi on järjestelmän kalibroinnin ja kuvien yhteensovittamisen ensimmäinen vaihe (Pollefeys *et al.* 2000: 255). Kalibroinnilla tässä tapauksessa tarkoitetaan kameran sisäisen kalibroinnin määrittämistä sekä kameran suhteellisen paikan ja orientoinnin määrittämistä kaikille kuville (Koch *et al.* 1998: 57). Itsekalibrointia, jolla projektiivinen rekonstruointi päivitetään metriseksi, tarkastellaan seuraavassa luvussa.

4.1 Kuvien yhteensovitus

4.1.1 Vastinpisteiden etsiminen

Aluksi sekvenssin kuvat ovat täysin erillisiä. Ainoa oletus on, että kuva-sekvenssin vierekkäiset kuvat eivät eroa toisistaan liian paljon. Tällöin samaa kohdepistettä kuvaavien kuvapisteen paikallisen ympäristön tulisi olla samanlainen, jos kuvat ovat lähekkäin toisiaan sekvenssissä. Tämä oletus mahdollistaa automaattisten yhteensovitusalgoritmien käyttämisen. (Pollefeys *et al.* 2000: 255)

Kuvien yhteensovittamista varten on kuvilta löydettävä muutamia erittäin luotettavia vastinpisteitä. Pisteet, joilla on paikallisessa ympäristössä suuri intensiteettivaihtelu, ovat sopivia vastinpisteiksi. Tällaiset pisteet löydetään käyttäen jotain kulmantunnistinta, kuten Harrisin kulmatunnistinta. Kulmien tunnistamiseksi on sekä x- että y-suunnassa oltava riittävä määritysvoima. Tämä tarkoittaa sitä, että gradientti on suuri eli muutos kuvalla olevissa harmaasävyarvoissa on suuri. Vastinpisteet löydetyille kulmapisteille saadaan yhteensovitusmenettelyn avulla, jossa pientä ikkunaa (esim. 7x7 pikseliä) liikutetaan pisteen ympäristössä ja lasketaan intensiteettiarvojen ristikorrelaatiokertoimen arvo. Etsintäalue voidaan rajata samalle alueelle millä kyseessä oleva piste on toisella kuvalla, sillä kuvat oletetaan otetuiksi siten, etteivät ne eroa paljon toisistaan (Kuva 4(a)). Piste, jolle saadaan suurin ristikorrelaatiokertoimen arvo, oletetaan vastinpisteeksi. (Koch *et al.* 1998: 57, Pollefeys *et al.* 2000: 255)



Kuva 4. Vastinpisteiden etsinnässä käytetty a) alkuperäinen etsintäalue, b) epipolaariehtoon perustuva etsintäalue ja c) pisteen ennustetun paikan ympärillä oleva etsintäalue (Pollefeys *et al.* 2000: 256).

4.1.2 Epipolaarigeometrian määrittäminen

Muutamien luotettavien vastinpisteiden löytymisen jälkeen, voidaan kuvarille laskea epipolaarigeometria. Epipolaarigeometria kuvaa kahden kuvan

välisen geometrian täydellisesti. Lisäksi sen avulla voidaan poistaa yhteensovituksessa saatuja vääriä vastinpestepareja ja helpottaa uusien vastinpesteidien etsimistä. Epipolaarigeometriä lasketaan pareittain kuvasekvenssin kuville löydettyjen vastinpesteidien perusteella. Epipolaarigeometrian laskeminen tarkoittaa epipolaarimatriisin F laskemista, joka sisältää kaiken informaation epipolaarigeometriasta. Epipolaarimatriisi voidaan laskea pelkistä vastinpestehavainnoista seuraavan kaavan avulla:

$$[xx' \ yx' \ x'y' \ yy' \ y'x' \ y'1]f = 0 \quad (3)$$

jossa $m = [x \ y \ 1]$ ja $m' = [x' \ y' \ 1]$ ovat vastinpesteidien homogeeniset koordinaatit ja f on vektori, joka sisältää epipolaarimatriisin alkiot. (Pollefeys *et al.* 2000: 255, Pollefeys *et al.* 2004: 210, Inkilä 2002)

Epipolaarigeometrian laskemisen jälkeen etsitään lisää vastinpesteitä geometrian parantamiseksi. Epipolaarimatriisin avulla voidaan laskea epipolaarisuorat kuvan kaikille pisteille (Kaava 2). Etsintäalue voidaan näin rajata epipolaarisuoran ympärille muutama pikseliin (Kuva 4(b)). Epipolaarimatriisin laskeminen suoraan vastinpesteparien avulla käyttäen perinteistä pienimmän neliösumman (PNS) menetelmää on epävarmaa, sillä väärien vastinpesteparien eli karkeiden virheiden havaitseminen on vaikeaa PNS-menetelmässä, jossa virhe jakautuu tasaisesti (riippuen geometriasta) useisiin havaintoihin. Sen tähden tarvitaan tällaista vankempaa (robust) menetelmää, jossa ensin lasketaan alustava geometria muutamien luotettavien vastinpesteidien avulla ja sen jälkeen parannetaan geometriaa uusilla vastinpestepareilla. (Pollefeys *et al.* 2000: 255, 2004: 209-211)

4.2 Projektimatriisien laskeminen ja rekonstruointi

4.2.1 Alustava rekonstruointi

Yhteensovitus tehdään ensin kahdelle ensimmäiselle kuvalle, joille määritetty kalibrointi toimii referenssinä muita kuvia lisättäessä. Edellä kuvatun yhteensovitusmenettelyn jälkeen voidaan laskea kameroiden projektimatriisit, jotka kuvaavat objektin projisoitumista kuvalle. Projektimatriiseilla luodaan projektiivinen mallikoordinaatisto ja ne voidaan laskea saaduista epipolaarimatriiseista seuraavien kaavojen avulla:

$$P_1 = I | 0 \quad \text{ja} \quad P_i = TF_i | e_{ii} \quad (4)$$

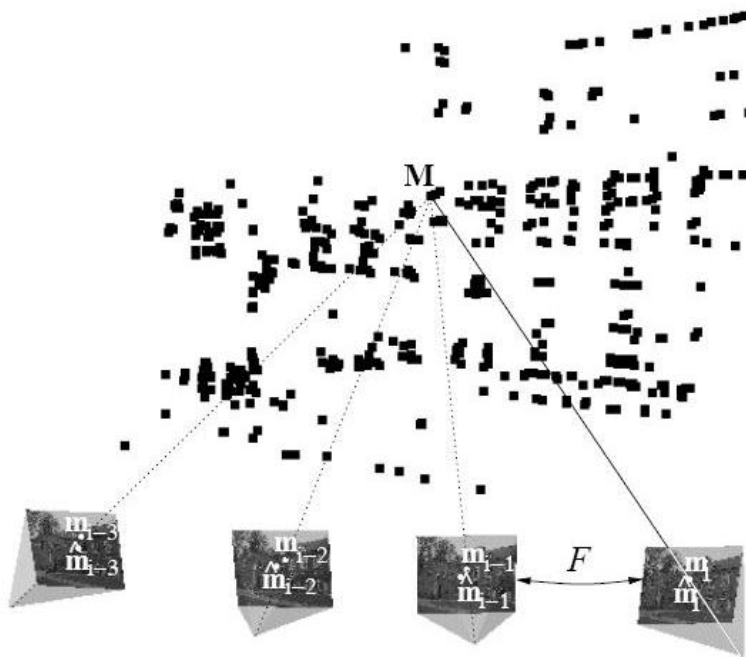
jossa T on mielivaltainen vastasymmetrinen (antisymmetric) matriisi, F_{ii} epipolaarimatriisi kuvan 1 ja i välillä sekä e_{ii} vastaava epipolaaripiste. (Koch *et al.* 1998: 58, Inkilä 2002, Pollefeys *et al.* 2000: 253)

Tämän jälkeen on mahdollista tehdä alustava rekonstruointi näillä kahdella kuvalla kolmiointin avulla. Kolmiointi tietokonenäössä on sama asia kuin avaruuseteenpäinleikkaus fotogrammetriassa. Kameraparametrit ovat tunnettuja (tässä tapauksessa projektiiviset kameraparametrit eli projektimatriisin

alkiot), kuvakoordinaatit on mitattu ja kohdekoordinaatit ratkaistaan. Kahden pisteen kuvaussäteet eivät leikkaa toisiaan täydellisesti ja 3D-pisteen paikka joudutaan laskemaan tasoittamalla. Yleensä käytetään pienimmän neliösumman (PNS) menetelmää. (Pollefeys *et al.* 2000: 255, 2004: 212, Inkilä 2002)

4.2.2 Kuvien lisääminen

Jokaiselle uudelle kuvalle, joka lisätään kalibroiin ja rekonstruointiin määritetään sen epipolaarigeometria ja projektiomatriisit (Kaava 4) suhteessa alustavaan rekonstruointiin ja tämän jälkeen rekonstruointi päivitetään. Päivitys sisältää aikaisemmin rekonstruoitujen pisteiden kohdekoordinaattien likiarvojen parantamisen sekä kuvalta löydettyjen uusien kulmapisteiden valmistamisen seuraavaa sovitusta varten. Pisteiden parantamisessa voidaan etsintäalue rajata jo rekonstruoidun pisteen projektion lähelle toisella kuvalla (Kuva 4(c)). Tällainen päivitysmenettely mahdollistaa sen, että alkuperäisten liitospisteiden ei tarvitse pysyä näkyvillä koko ajan, sillä kalibroiinipistejoukko laajenee jokaisen uuden kuvan mukana (Kuva 5). (Pollefeys *et al.* 2000: 255-256)



Kuva 5. Kuvien yhteensovitus ja uusien kuvien lisääminen kalibroiin ja rekonstruointiin (Pollefeys *et al.* 2004: 213).

4.3 Sädekimpputasoitus

Kun kalibroiin ja rekonstruointi on laskettu koko kuvasekvenssille, sitä parannetaan globaalin minimoinnin eli sädekimpputasoituksen avulla. Aiemmin saadut kameroiden kalibroiiniparametrit P_i ja kohdepisteiden paikat M_i toimivat likiarvoina sädekimpputasoituksessa. Tavoitteena on määrittää

tarkat kameroiden, P_k , parametrit ja kohdepisteiden 3D-paikat, M_j . Tämä tehdään minimoimalla havaittujen kuvapisteen m_{ij} ja takaisin projisoitujen kohdepisteiden P_i, M_j välisten etäisyyksien neliöitä. Kuvasekvenssille, jossa on m kuvaa ja n pistettä seuraava kriteeri tulisi minimoida:

$$\min_{P_i, M_j} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d(m_{ij}, P_i, M_j)^2 \quad (5)$$

Minimointiongelma on valtavan suuri, sillä kuvia saattaa olla useita kymmeniä ja pisteitä jokaisella kuvalla lähes sata, mikä johtaa useiden tuhansien muuttujien ratkaisuun. Yhtälöryhmät ovat kuitenkin tyypillisesti hyvin harvoja eli suurin osa alkioista on nolliä, jolloin ongelman ratkaisu helpottuu. Yhtälöryhmien harva rakenne johtuu siitä, että kukin havaintoyhtälö sisältää vain pienen osan tuntemattomista. (Pollefeys *et al.* 2004: 212,214)

5 Vaihe 2: Itsekalibrointi

Itsekalibroinnin avulla projektiivinen rekonstruointi päivitetään automaattisesti metriseksi eli kohteen muoto saadaan selville. Tämä itsekalibroinnin määrittelmä eroaa fotogrammetriassa perinteisesti käytetystä määrittelmästä, jossa itsekalibrointi koostuu kamerakalibrointiparametrien määrittämisestä ainoastaan vastinpisteiden perusteella. Jotta projektiivinen rekonstruointi saataisiin rajattua metriseksi, tarvitaan vähintään kahdeksan rajoitetta. Tämä johtuu siitä, että projektiivinen rekonstruointi on määritelty ainoastaan 15-parametriseen projektiiviseen muunnokseen asti ja metrinen rekonstruointi 7-parametriseen 3D-yhdenmuotoismuunnokseen asti, jolloin näiden muunnosten välille jää kahdeksan tuntematonta parametria. (Koch *et al.* 2000: 118, Pollefeys *et al.* 1998: 9, 2000: 252)

Metrisen rekonstruoinnin tapauksessa kameran projektiomatriisit näyttävät seuraavalta:

$$P_i = K_i R_i | R_i t_i, \text{ jossa } K_i = \begin{pmatrix} f_x & s & u_x \\ 0 & f_y & u_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

jossa R_i on kiertomatriisi ja t_i siirtovektori, jotka yhdessä määrittävät kameran ulkoisen orientoinnin kuvalla i . K_i sisältää sisäiset kameraparametrit. f_x ja f_y kuvaavat horisontaalista ja vertikaalista polttoväliä pikseleissä, $u = (u_x, u_y)$ on kameran pääpiste ja s määrittää kuvan vääristymän. Tekemällä oletuksia sisäisissä kameraparametreissa, voidaan projektiivinen rekonstruointi päivittää metriseksi. (Koch *et al.* 2000: 118)

Teoriassa metrisen rekonstruoinnin saavuttaminen on mahdollista ainoastaan oletuksella, että kuvassa ei ole vääristymiä eli pikselit ovat ortogonaalisia.

Tällainen menettely vaatisi vähintään kahdeksan kuvan sekvenssin, jolloin jokainen kuva toisi yhden uuden rajoitteen. Käytännössä rajoitteita on kuitenkin tarjolla enemmän. Sisäisistä kameraparametreista leveyden ja korkeuden suhteen oletetaan usein olevan yksi eli polttoväliksi tulee ainoastaan f . Tarvittaessa myös pääpisteen voidaan olettaa olevan keskellä kuvaa. (Pollefeys *et al.* 1998: 9-11)

Käytännön tapa saada kalibrointiparametrit sisäisten kameraparametrien rajoitteista on käyttää absoluuttisen kartion (conic) käsitettä. Tämä virtuaalinen kartio on olemassa jokaisella kuvalla. Se voidaan löytää ainoastaan sisäisissä kameraparametreissa olevien rajoitteiden avulla. Kun kartio on löydetty, se sallii metristen mittausten tekemisen ja näin rekonstruoinnin päivittämisen projektiivisesta metriseksi. Kun metrinen rekonstruointi ja kalibrointi on saavutettu, parannetaan sitä sädekimpputasoituksen avulla, kuten tehtiin projektiivisessä tapauksessa (kohta 4.2.3). (Pollefeys *et al.* 1998: 10)

Kuvassa 6 on esitetty itsekalibroinnin vaikutus rekonstruointiin eli kuvat kohteesta ennen ja jälkeen itsekalibroinnin.



Kuva 6. Rekonstruointi ennen (yllä) ja jälkeen (alla) itsekalibroinnin (Pollefeys *et al.* 2000: 257).

6 Vaihe 3: Syvyyskarttojen estimointi

Järjestelmän kalibroinnin tuloksena saadaan ainoastaan harva rekonstruointi kohteesta. Tämä ei kuitenkaan vielä ole riittävä tuottamaan geometrisesti oikeita ja visuaalisesti tyydyttäviä kohdemalleja. Vastinpisteet täytyykin löytää lähes kaikille pisteille kuvilla tyydyttävän mallin aikaansaamiseksi. Koska edellisessä vaiheessa on saatu kamerakalibrointi kaikille kuville, voidaan käyttää

algoritmeja, jotka on kehitetty kalibroiduille stereokuvapareille. (Koch *et al.* 1998: 59, 2000: 118)

Seuraavassa esitely menetelmä koostuu kahdesta vaiheesta. Aluksi yhteensovitus tehdään stereokuvapareille ja lasketaan syvyyskartat jokaiselle kuvalle. Tämän jälkeen eri kuvien syvyyskartat linkitetään yhteiseksi malliksi globaalin ja tarkemman syvyysestimaatin aikaansaamiseksi.

6.1 Stereokuvaparin yhteensovitus

Yhteensovitusprosessi helpottuu huomattavasti, kun kuvat oikaistaan stereokuvauksen normaalitapaukseen (Kuva 7). Tällöin kuvausakselit ovat yhdensuuntaiset ja kohtisuorassa kuvakantaa vasten. Oikaistut kuvat voidaan orientoida siten, että epipolaarisuorat yhtyvät kuvan rivien kanssa. (Koch *et al.* 1998: 60)



Kuva 7. Kaksi esimerkkikuvaa linnasekvenssistä sekä vastaavat stereokuvauksen normaalitapaukseen oikaistut kuvat (Pollefeys *et al.* 2004: 217).

Vastinpistettä etsitään stereokuvan riveiltä liikuttamalla pientä ikkunaa (5x5 tai 7x7 pikseliä) pitkin tätä linjaa etsien ristikorrelaatiofunktion maksimiarvoa. Vastinpisteiden löytymisen jälkeen voidaan laskea pisteiden väliset parallaksit. Parallaksilla tarkoitetaan kuvilla olevaa eroa pisteen x-koordinaatissa eli kannan suunnassa. Koska kuvat on oikaistu stereokuvauksen normaalitapaukseen, voidaan kuvaparin pisteille estimoida itsenäiset syvyysestimaatit suoraan parallaksihavainnoista kaavalla:

$$Z = Bf / p_x, \text{ jossa } p_x = x_2 - x_1 \quad (7)$$

B on kanta eli projektiokeskusten välinen etäisyys, f on polttoväli ja p_x vastinpisteiden välinen parallaksi. Syvyysestimaatilla tarkoitetaan siis kohdepisteen etäisyyttä kameras projektiokeskuksesta. (Koch *et al.* 1998: 60-61, Haggrén 2003)

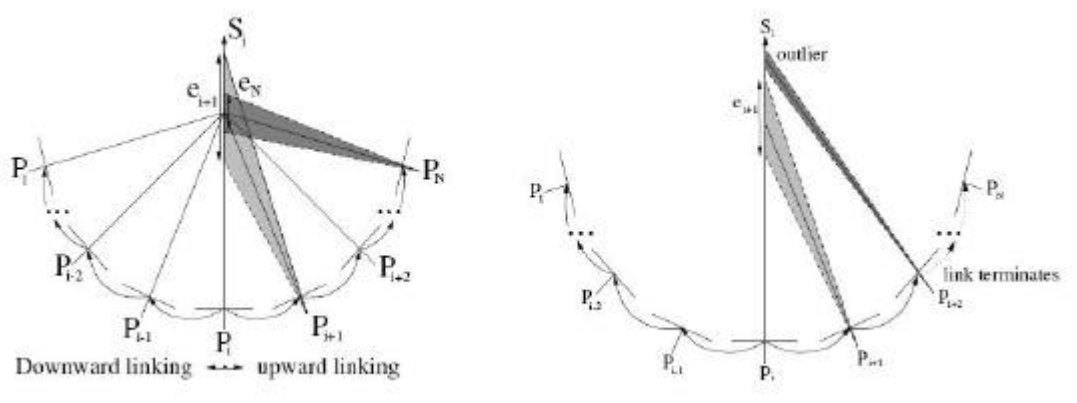
6.2 Useiden kuvien linkittäminen

Stereopareittain suoritettu vastinpisteiden etsintä mahdollistaa itsenäisten syvyysestimaattien laskemisen jokaiselle kuvalle eli kameralle. Optimaalinen ja tarkempi syvyysestimaatti saadaan yhdistämällä eri kuvien estimaatit yhteiseksi malliksi. Tämä voidaan suorittaa vastinpisteiden linkitysalgoritmin

avulla yhdistämällä useat kuvat toisiinsa. Menettely hyödyntää sekä suuri- että pienikantaisen stereokuvauksen hyviä puolia. (Koch *et al.* 1998: 61)

Pienikantaisessa stereokuvauksessa kanta on huomattavasti pienempi kuin keskimääräinen maiseman syvyys. Kuvat on tällöin otettu sekvenssinä useista hieman toisistaan poikkeavista paikoista. Etuja tällaisessa menettelyssä ovat helppo vastinpisteiden etsiminen ja suurin osa kuvapisteistä löytyy myös viereisiltä kuvilta. Haittana ovat pieni kolmionikulma ja tästä johtuva huono syvyystarkkuus. Suurikantaisessa stereokuvauksessa otetaan muutamia kuvia siten, että kanta on suuri. Tällöin kolmionikulma on suuri ja syvyystarkkuus hyvä, mutta vastinpisteiden etsiminen on vaikeaa ja kuvapisteet ovat erilaisia viereisillä kuvilla. Nyt esiteltävä menettely yhdistää molempien tapojen hyvät puolet ja mahdollistaa tarkkojen syvyyskarttojen tuottamisen jokaiselle kuvalle. (Koch *et al.* 1998: 61-62)

Valitaan yksi kuva referenssikuvaksi ja linkitetään vastinpisteet ketjuiksi eteen- ja taaksepäin referenssikuvasta. Jokaiselle vastinpisteelle suhteessa referenssikuvaan lasketaan syvyysestimaatti, joka tarkoittaa kameran projektiokeskuksen etäisyyttä kohdepisteestä, kolmionikulman eli eteenpäinleikkauksen avulla (Kuva 8). Syvyysvirhe vähenee kolmionikulman kasvaessa. Kaikki syvyysestimaatit, jotka pysyvät määritetyn epävarmuusrajan sisällä, otetaan mukaan lopullisen estimaatin laskemiseen. Jos laskettu syvyysestimaatti menee epävarmuusrajan ulkopuolelle, linkitys loppuu ja siihen asti saadut estimaatit muodostavat lopullisen syvyysestimaatin kyseiselle pisteelle (Kuva 8). Syvyysestimaatit yhdistetään käyttäen 1-D kalmansuodatinta. Menetelmä toistetaan kuvan kaikille pisteille ja sekvenssin kaikille kuville. Tuloksena saadaan tiheät ja tarkat syvyyskartat jokaiselle kuvalle. (Koch *et al.* 1998: 62-64)



Kuva 8. Kolmionikulman vaikutus syvyysvirheeseen (vasemmalla) ja linkityksen loppuminen johtuen epävarmasta vastinpisteestä (Pollefeys *et al.* 2004: 219).

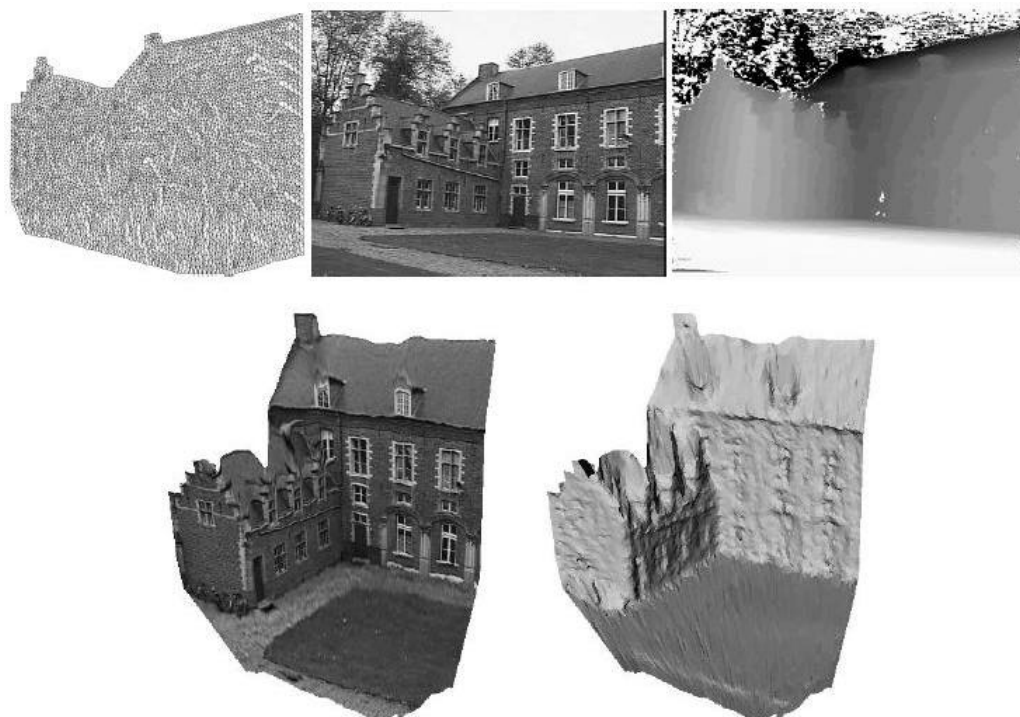
7 Vaihe 4: 3D-mallin muodostaminen

Edellisen vaiheen tuloksena saadut syvyyskartat kuvaavat jokaiselle pisteelle ja kuvalle saatua omaa syvyysestimaattia. 3D-mallin muodostamista varten syvyyskartoista tehdään pintamalli, jota approksimoidaan pisteiden avulla

muodostetun pintakolmioverkon avulla (Kuva 9). Pintamallia käyttäen vähennetään mallissa olevien pisteiden määrää oleellisiin ja geometria yksinkertaistuu. Varsinainen pintamalli saadaan projisoimalla kolmioverkon kulmapisteet takaisin avaruuteen syvyysarvojen mukaan (Kuva 9). (Pollefeys *et al.* 2004: 220)

Pintamallin muodostamisen jälkeen tekstuuri projisoidaan kuvilta mallin päälle ja näin saadaan realistisempi ja visuaalisempi kuva kohteesta (Kuva 9). (Pollefeys *et al.* 2004: 221)

Edellä kuvatun menettelyn avulla saadaan erilliset mallit jokaiselle kuvalle. Monimutkaisempien muotojen rekonstruoimisessa on välttämätöntä yhdistää useiden syvyyskarttojen tulokset. Tämä voidaan tehdä yksinkertaisesti luomalla ensin erilliset mallit ja sitten lataamalla ne yhdessä grafiikkajärjestelmään. Vaihtoehtoisesti voidaan yhdistää eri kuvilta tehdyt pintakolmioverkot ja muodostaa siten yhteinen 3D-malli. Yhdistämismenettelyjen tarkempi tarkastelu menee tämän esitelmän ulkopuolelle. (Pollefeys *et al.* 2004: 221)



Kuva 9. Ylhäällä vasemmalla syvyyskartasta muodostettu pintakolmioverkko, keskellä eräs sekvenssin kuvista ja oikealla syvyyskartta. Alhaalla vasemmalla teksturoitu 3D-malli ja oikealla pintakolmioverkon ja syvyysarvojen avulla muodostettu pintamalli. (Pollefeys *et al.* 2004: 221)

8 Menetelmän tarkkuus ja luotettavuus

Menetelmän tarkkuutta ja rekonstruoinnin luotettavuutta voidaan arvioida käyttäen muutamia erilaisia laatumittareita. Eräs mittari kuvaa vastinpisteiden ylimääritystä eli laskee kuinka monella kuvalla sama kohdepiste näkyy. Tähän liittyen on määritetty näkyvyyttä kuvaava mittari, joka tarkoittaa referenssi-

kuvaan linkitettyjen kuvien lukumäärää. Toinen tärkeä ominaisuus menetelmän tarkkuutta arvioitaessa on syvyyskarttojen tiheys ja tarkkuus. Syvyyskarttojen tiheyttä kuvaa täyttöaste F ja tarkkuutta syvyysvirhe E. Alla olevat esimerkit ovat tässä esitelmässä esimerkkinä käytetystä linnasekvenssistä laskettuja lukuja. Sekvenssi koostuu 22 kuvasta, jotka on otettu 720x576 pikseliresoluutiolla. (Koch *et al.* 1998: 65-66)

Laatumittarien määritelmät:

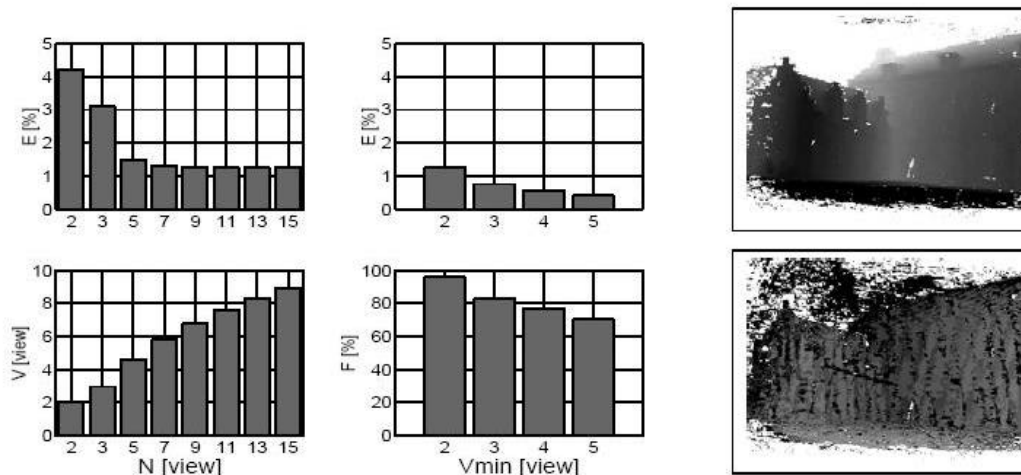
Näkyvyys V[kuvat]: keskimääräinen kuvien lukumäärä, jotka on linkitetty referenssikuvaan

Täyttöaste F[%]: rekonstruoitujen pikseleiden määrä / pikseleiden kokonaismäärä

Syvyysvirhe E[%]: suhteellinen syvyysvirhe e kaikille rekonstruoiduille pikseleille

Kuvassa 10 on vertailtu sekvenssinpituuden vaikutusta suhteelliseen syvyysvirheeseen ja näkyvyyteen 2-15 kuvan sekvensseillä. Tuloksista huomataan, että keskimäärin 5 kuvan sekvensseissä kaikkia kuvia vielä hyödynnetään. Linkityksen määrän tulee esiin suhteellisen syvyysvirheen arvoissa, joka 2 kuvan sekvenssissä on yli 4% ja vähenee n. 1,2%:n 15 kuvan sekvenssissä. (Pollefeys *et al.* 2004: 220)

Kolmiointiin vaaditaan vähintään kahden kuvan pisteiden linkittämistä toisiinsa. Syvyysestimaatin luotettavuuden parantamiseksi tulisi piste havaita useammalla kuin kahdella kuvalla. Voimme näin määrittää minimi näkyvyyden V_{min} syvyysestimaatille eli minimimäärän kuvia, joilla pisteen tulee näkyä. Tällainen rajoite mahdollistaa epäluotettavien syvyysestimaattien karsimisen eli karkeiden virheiden määrä pienenee, mutta samalla se vähentää syvyyskartan täyttöastetta. Kuvasta 10 nähdään miten miniminäkyvyyden lisääminen vaikuttaa suhteelliseen syvyysvirheeseen ja täyttöasteeseen kuvasekvenssin pituudella $N=11$. Kuvista nähdään, että täyttöaste putoaa 92%:sta 70%:n, mutta samalla syvyysvirhe putoaa 0,5%:n epävarmojen syvyysestimaattien karsimisen johdosta. (Pollefeys *et al.* 2004: 220)



Kuva 10. Vasemmalla: Sekvenssin pituuden N vaikutus näkyvyyteen V ja suhteelliseen syvyysvirheeseen E . Keskellä: Miniminäkyvyyden V_{min} vaikutus täyttöasteeseen F ja syvyysvirheeseen E , kun $N=11$. Oikealla: Syvyyskartta (yllä) ja virhekartta (alla), kun $N=11$ ja $V_{min}=3$. (Pollefeys *et al.* 2004: 220)

9 Yhteenveto

Edellä on esitelty täysin automaattinen menetelmä, jonka avulla voidaan muodostaa metrisiä 3D-malleja kalibroimattomilta kuvasekvensseiltä käyttäen tavallista digitaali- tai videokameraa. Menetelmä sopii käytettäväksi useisiin sovellusalueisiin, sillä se on joustava, nopea ja tarkka. Erialaisten automaattisten yhteensovitus- ja rekonstruointialgoritmien käyttö varmistaa menetelmän nopeuden ja vankan yhteensovitusalgoritmin ja sädekimpputasoituksen käyttö tarkkuuden. Saadut 3D-mallit ovat metrisiä eli muoto on tunnettu. Mallin absoluuttiseen orientointiin vaadittaisiin seitsemän parametrin ratkaisu eli vähintään kaksi koordinaateiltaan tunnettua kohdepistettä sekä yksi tunnettu korkeus.

Lähdeluettelo

Haggrén H., 2003. Fotogrammetrian perusteet, luentomoniste. Teknillinen Korkeakoulu, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio.

Inkilä K., 2002. Analyyttinen fotogrammetria, opetusmoniste. Teknillinen Korkeakoulu, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio.

Koch R., Pollefeys M., Van Gool L., 1998. Multi Viewpoint stereo from uncalibrated video sequences. Computer Vision - ECCV'98, Vol I, Lecture Notes Computer Science 1406, 55-71.

Koch R., Pollefeys M., Van Gool L., 2000. Realistic surface reconstruction of 3D scenes from uncalibrated image sequences. The Journal of Visualization and Computer Animation 2000, 11, 115-127. John Wiley & Sons, Ltd.

Pollefeys M., Koch R., Van Gool L., 1999. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters. International Journal of Computer Vision 32(1), 7-25. Kluwer Academic Publishers.

Pollefeys M., Koch R., Vergauwen M., Van Gool L., 2000. Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote sensing 55, 251-267. Elsevier Science 2000.

Pollefeys M., Koch R., Van Gool L., Vergauwen M., Verbiest F., Cornelis K., Tops J, 2004. Visual Modelling with a Hand-Held Camera. In International Journal of Computer Vision 59(3), 207-232. Kluwer Academic Publishers.