

**Ari Lehtiniemi**

**LÄHIFOTOGRAMMETRIAN KÄYTTÖ  
3D-SKANNAUSTEKNIKKANA**

**Prototyypijärjestelmien toteuttaminen ja testaus**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU  
Mediatekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2013**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Yksikkö</b> Ylivieskan yksikkö	<b>Aika</b> Toukokuu 2013	<b>Tekijä/tekijät</b> Ari Lehtiniemi
<b>Koulutusohjelma</b> Mediatekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> LÄHIFOTOGRAMMETRIAN KÄYTTÖ 3D-SKANNAUSTEKNIKKANA: Prototyypijärjestelmien toteuttaminen ja testaus		
<b>Työn ohjaaja</b> Lehtori Mikko Himanka		<b>Sivumäärä</b> 57
<b>Työelämäohjaaja</b>		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä fotogrammetriaan 3d-skannaustekniikkana, ja tuottaa toimivia prototyypijärjestelmiä tekniikan testaamista varten. Lisäksi pyrittiin määrittämään fotogrammetrisen skannausjärjestelmän minimivaatimuksia. Työssä tutkittiin ensin fotogrammetrian teoreettisia perusteita, sekä perehdyttiin lopputulosten laatuun vaikuttaviin asioihin, jotta prototyypit voitaisiin näiden perusteella rakentaa toimiviksi.</p> <p>Työssä toteutettiin kolme erilaista prototyyppiä: ensimmäinen prototyyppi yhdellä järjestelmäkameralla, toinen yhdellä web-kameralla ja viimeinen usealla järjestelmäkameralla. Kuvien prosessointiin käytettiin kaupallista, fotogrammetriaan erikoistunutta Agisoft Photoscan - sovellusta. Eri prototyypeillä suoritettiin sarja testejä, ja näiden testien pohjalta pyrittiin selvittämään kameran laadun, kuvien määrän sekä kameroiden määrän vaikutusta tuloksena saatavan 3d-mallin laatuun.</p> <p>Prototyypit ja testit saatiin suoritettua yhtä poikkeusta lukuun ottamatta suunnitellusti. Jokaisella prototyypillä saatiin tuotettua vähintään kohtuullinen 3d-malli kuvatusta kohteesta. Pääasiallinen tavoite eli prototyypijärjestelmien tuottaminen saatiin tavoitettua. Järjestelmän minimivaatimukseen liittyviin kysymyksiin saatiin myös vastaukset, vaikkakin tarkkojen numeeristen arvojen määrittäminen osoittautuikin käytännössä mahdottomaksi.</p>		
<b>Asiasanat</b> 3d-skannaus, Digitointi, Fotogrammetria, Järjestelmäkamera, Kaukokartoitus, Photoscan, Web-kamera		

**ABSTRACT**

<b>CENTRIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b>	<b>Date</b> May 2013	<b>Author</b> Ari Lehtiniemi
<b>Degree programme</b> Mediatechnology		
<b>Name of thesis</b> PHOTOGRAMMETRY AS A 3D SCANNING TECHNIQUE: Implementation and testing of prototype systems		
<b>Instructor</b> Mikko Himanka		<b>Pages</b> 57
<b>Supervisor</b>		
<p>The goal of this thesis was to study photogrammetry as a 3d-scanning technique, and to create and test functional prototypes of different scanning setups. The project aimed at researching the minimum requirements for a functional scanning set-up. First a theoretical basis was founded, followed by studying things that would affect the attainable scanning results.</p> <p>Three prototypes were built: the first one using a single digital single-lens reflex camera, the second one using a single webcam, and the third one using multiple single-lens reflex cameras. Photogrammetric processing of the data was done with Agisoft's Photoscan software. Testing was carried out with all three prototypes to find out how the technical quality of cameras, the amount of pictures taken and the number of cameras used affects the results.</p> <p>Each of the prototypes managed to produce at least a decent 3d model of the scanned subject. Thus, the main goal of the thesis - creating and testing functional prototypes - was fulfilled. Also the project came to a conclusion regarding the minimum requirements of a setup, although it proved to be impossible to define precise numeric values for a minimum setup.</p>		
<b>Key words</b> 3d scanning, Digital single-lens reflex camera, Digitizing Photogrammetry, Photoscan, Remote sensing, Webcam		

## ESIPUHE

Mielenkiintoni fotogrammetriaa kohtaan heräsi vuoden 2012 kesällä, kun kuulin tekniikasta ensimmäisen kerran sattumalta opiskelijakaverini kautta. Jo pikaisen pintaraapaisun jälkeen valkeni, että asian tutkimisesta voisi riittää ainesta opinnäytetyöhön asti. Tosissaan tuulta alleen idea otti hieman myöhemmin Mikko Himangan kannustaessa tarttumaan härkää sarvista.

Allekirjoittaneen näkökulmasta fotogrammetria yhdistääkin kätevästi kaksi henkilökohtaisen mielenkiinnon kohdetta : 3d-mallintamisen sekä valokuvauksen. Aiheen kiinnostavuus, työn käytännönläheisyys sekä mahdollisuus perehtyä uuteen, itselle suhteellisen tuntemattomaan teknologiaan olivatkin tarpeeksi hyviä perusteluita työhön ryhtymiselle, ja olenkin erittäin tyytyväinen että tartuin haasteeseen.

Haluaisin tässä lausua kiitoksen sanat henkilöille, jotka ovat mahdollistaneet tämän työn valmistumisen. Haluan erityisesti kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa ja opettajaani, lehtori Mikko Himankaa, jonka 3D-grafiikan ja valokuvauksen kursseilla syttyi kipinä noita molempia aloja kohtaan, ja jonka ohjauksen ansiosta opinnäytetyöni ei levinnyt käsiin kuin pannukakku. Lisäksi haluaisin kittää opiskelijakavereitani Anttoni Porria, Jesse Uusitaloa, Vesa Koutosta sekä Konsta Mäkikangasta kutakin käytännön testeissä auttamisesta ja kärsivällisestä testikohteena poseeraamisesta.

**TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
ESIPUHE  
SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 3D-SKANNAUKSEN PERUSTEET</b>	<b>2</b>
2.1 3D-skannaus yleisesti	2
2.2 Fotogrammetria	3
2.2.1 Historia	4
2.2.2 Hyvät ja huonot puolet	5
2.2.3 Käyttökohteet	7
<b>3 FOTOGRAMMETRIAN TOIMINTAPERIAATE</b>	<b>9</b>
3.1 Kuvien tallentaminen	9
3.2 Kuvien analysointi	10
3.2.1 Keskusprojektio	10
3.2.2 Pisteiden mittaaminen	12
3.2.3 Blokkitasoitus	15
3.3 Datan prosessointi	16
3.4 Käytännön työvaiheet	17
3.4.1 Valmistelu	17
3.4.2 Kuvaaminen	19
3.4.3 Prosessointi ja jälkityöstö	20
<b>4 LOPPUTULOKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT</b>	<b>25</b>
4.1 Valokuvien laatu	25
4.2 Kuvattava kohde ja ympäristö	28
4.3 Valaisu	30
4.4 Kuvaaminen	33
4.5 Käytettävä kalusto	35
<b>5 SUORITETUT TESTIT</b>	<b>37</b>
5.1 Prototyyppi 1: yksi järjestelmäkamera	38
5.1.1 Toteutettu järjestelmä	39
5.1.2 Testaus	39
5.1.3 Huomiot	40
5.2 Prototyyppi 2: web-kamera	41
5.2.1 Toteutettu järjestelmä	41
5.2.2 Testaus	41
5.2.3 Huomiot	43
5.3 Prototyyppi 3: usean kameran käyttö	43
5.3.1 Toteutettu järjestelmä	45
5.3.2 Testaus	46
5.3.3 Huomiot	48
<b>6 TULOKSET JA POHDINTA</b>	<b>50</b>
6.1 Kohdatut ongelmat	51
6.2 Saavutetut tulokset	52

<b>6.3 Jatkokehitys</b>	<b>54</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>56</b>
<b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Neulanreikäkameran periaate	11
KUVIO 2. Stereofotogrammetrian periaate	13
KUVIO 3. Kameran kuusi vapausastetta kohdekoordinaatistossa	14
KUVIO 4. Esimerkki kohteen pinnalle kiinnitetyistä kohdemerkeistä	18
KUVIO 5. Kameroiden orientaatio sekä harva pistepilvi Agisoft Photoscanissa	21
KUVIO 6. Harva pistepilvi, kolmioverkkomalli sekä teksturoitu malli	23
KUVIO 7. Aukon vaikutus syvyysterävyYTEEN	27
KUVIO 8. Valaisun vaikutus kolmioverkkomallin pinnan tarkkuuteen	31
KUVIO 9. Ensimmäisen prototyypin ensimmäisen testin kamerapositionit	40
KUVIO 10. Järjestelmäkameralla ja web-kameralla muodostetut mallit	42
KUVIO 11. 360 asteen kuvausprototyypin kamerapositionit	47
KUVIO 12. Kokovartalokuvauksen järjestelmän kamerapositionit	48
<b>TAULUKOT</b>	
TAULUKKO 1. Testeissä käytetyt kamerat	38

## 1 JOHDANTO

Fotogrammetria on eräs 3d-skannauksen alalaji, ja se onkin aiheena kiehtova. Tekniikan varhaisimmat sovellutukset ovat lähes yhtä vanhoja kuin valokuvaus itsessään, mutta nykymuodossaan fotogrammetria on silti ihmisille suhteellisen tuntematon käsite. Tässä opinnäytetyössä perehdytäänkin asiaan lähinnä digitaalisen fotogrammetrian näkökulmasta, sillä digitaaliset tekniikat ovat nykyään hyvin pitkälti syrjäyttäneet fotogrammetrian perinteiset, analogiset menetelmät.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä fotogrammetrian käyttöön 3d-skannausmenetelmänä. Tarkoituksena oli rakentaa muutamia toimivia prototyyppiversioita erilaisista käytännön toteutuksista, ja niiden avulla kartoittaa tekniikan soveltuvuutta lähinnä 3d-mallien tuottamiseen ihmiskohteista.

Tarkoituksena oli lisäksi näiden testien avulla tutkia, onko määriteltävissä joitakin selkeitä minimivaatimuksia fotogrammetriajärjestelmän toteutukseen. Haettuja raja-arvoja olivat esimerkiksi käytettävän kameran tarkkuus, kameroiden lukumäärä sekä kohteesta otettavien kuvien lukumäärä. Yhtenä sivutavoitteena oli lisäksi tekijänsä tietämyksen ja osaamisen syventäminen fotogrammetriaan liittyen erityisesti aiheen teorian osalta.

Opinnäytetyössä käydään kattavasti läpi fotogrammetrian teoria ja toimintaperiaate sekä perehdytään tekniikalla saatavien tulosten laatuun vaikuttaviin tekijöihin. Teoriaosuus on pyritty selittämään helppotajuisesti, syventymättä sen tarkemmin taustalla oleviin matemaattisiin kaavoihin. Teorian matemaattiset kaavat löytyvät kuitenkin lähteistä, ja näistä ehkä tärkeimpänä yksittäisenä lähteenä toimi Thomas Luhmannin, Stuart Robsonin, Stephen Kylen sekä Ian Harleyn kirja "Close Range Photogrammetry - Principles, techniques and applications". Teos käsittelee lähifotogrammetriaa erittäin selkeästi ja todella kattavasti, perusteista aivan algoritmitasolle asti. Suosittelenkin kaikkia asiasta enemmän kiinnostuneita perehtymään kyseiseen kirjaan.

## **2 3D-SKANNAUKSEN PERUSTEET**

3D-skannaus on tieteen ja teknologian ala, joka kattaa useita erilaisia tekniikoita. Yhteistä näille eri tekniikoille kuitenkin on, että niillä mitataan kohteen muodosta fyysisiä mittaustuloksia (3D Scan Company 2012). Kun kohteen muoto kolmiulotteisessa koordinaatistossa on saatu selvitettyä, tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi objektin tarkkojen fyysisten mittojen selvittämisessä tai digitaalisen mallin esittämisessä. 3D-skannauksen sovellutukset ovat laajat, ja teknologiaa hyödynnetäänkin muun muassa teollisessa tuotannossa, viihdeteollisuudessa sekä lääketieteessä (Luhmann, Robson, Kyle, Harley 2011, 13-15).

### **2.1 3D-skannaus yleisesti**

3D-skannerit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: kontaktiin perustuviin skannereihin sekä kontaktittomiin skannereihin.

Kontaktiin perustuvat skannerit hyödyntävät fyysistä kontaktia kohteen mittojen määrittämiseen. Tyypillisesti tällaisissa laitteissa mittauskärki on kiinnitettynä tukivarteen, jonka avulla voidaan määrittää mittauskärjen sijainti kolmiulotteisessa koordinaatistossa. Kun mittauskärkeä sitten kuljetetaan skannattavan kohteen pintaa pitkin, saadaan siitä mittauspisteitä koordinaatistoon sijoitettavaksi. (3D Scan Company 2012.)

Kontaktittomassa skannauksessa kohteeseen ei muodosteta fyysistä kontaktia skannausprosessin aikana, vaan skannaus perustuu ympäristön säteilyn havaitsemiseen. Kontaktiton skannaus voidaan vielä jakaa kahteen alaluokkaan, aktiiviseen sekä passiiviseen skannaukseen.

Aktiivisessa kontaktittomassa skannauksessa lähetetään jonkinlaista säteilyä skannauskohdetta kohti ja analysoidaan sitten kohteesta takaisin heijastuvaa säteilyä. Useimmiten tällaiset skannerit hyödyntävät laseria tai erilaisia kohteen



pinnalle projektorilla heijastettavia rasterikuvioita, mutta myös muunlaista säteilyä kuten ultraääntä voidaan käyttää. Laserskanneri on tyypillinen esimerkki aktiivista säteilyä käyttävästä 3d-skannerista. (Luhmann ym. 2011, 4-5; Rämö 2010, 27).

Passiivista kontaktitonta skannausta käytettäessä kohteeseen ei aktiivisesti lähetetä säteilyä. Sen sijaan havaitaan ympäristöstä tulevaa säteilyä, käytännössä yleensä joko näkyvän valon tai infrapunavalon aallonpituuksia (Rämö 2010, 27). Valokuvaukseen perustuvana tekniikkana fotogrammetria hyödyntää ympäristöstä heijastuvaa säteilyä, joten se luokitellaan passiiviseksi 3d-skannausmetodiksi.

## 2.2 Fotogrammetria

Termi fotogrammetria tulee englannin kielen sanasta photogrammetry, joka taas on saanut alkunsa kreikan kielen sanoista *photo* (valo), *gramma* (tallennus tai kirjoittaminen) sekä *metrein* (mittaaminen) (Agisoft LLC 2012b). Kuten jo sanasta itsestään voidaan päätellä, fotogrammetriassa on kyse valoon tai valokuvaan perustuvasta mittaamisesta. Lähtökohtaisesti fotogrammetrian avulla pyritään selvittämään kohteen kolmiulotteinen muoto tai fyysiset mitat kaksikulotteisen datan - eli esimerkiksi valokuvien - avulla.

Fotogrammetria jaetaan yleensä kameran sijainnin perusteella kahteen pääluokkaan: ilmasta käsin suoritettava fotogrammetria (aerial photogrammetry) sekä lähifotogrammetria tai lyhyen matkan fotogrammetria (close range photogrammetry) (Agisoft LLC 2012b). Ilmasta käsin kuvattaessa kamera on useimmiten kiinnitettynä lentokoneeseen. Ilmafotogrammetriaa hyödynnetään laajasti maanmittauksen alalla, ja lopputuloksena onkin usein kartta, korkeuskäyrä tai maaston 3d-malli. Lähifotogrammetriassa, johon tämäkin opinnäytetyö perehtyy, kamera on nimensä mukaisesti suhteellisen lähellä kohdetta. Kamera on yleensä kiinteässä telineessä tai kolmijalalla, mutta kuvat voidaan ottaa myös käsivaralta. Lähifotogrammetrian lopputuote on useimmiten digitaalinen 3d-malli kuvattavasta kohteesta, kuten ihmisestä, rakennuksesta tai jostakin pienestä esineestä.

### 2.2.1 Historia

Ehkä hieman yllättäväkin fakta on, että fotogrammetria juontaa juurensa lähes yhtä kauas historiaan kuin valokuvaaminen itse. Jo varhain daguerrotyypin - jota voidaan pitää valokuvauksen esiasteena - keksimisen jälkeen suoritettiin ensimmäiset fotogrammetriset mittaukset. Ranskalainen upseeri Aime Laussedat aloitti kokeilunsa alkeellisilla välineillä jo vuonna 1849, ja termiä fotogrammetria käytti tiettävästi ensimmäisenä Saksalainen arkkitehti Albrecht Meydenbauer, joka käytti valokuvia katedraalin piirustusten tekemiseen vuonna 1858. Fotogrammetrian alkutaipaleella käyttökohteet olivatkin lähinnä arkkitehtuurillisia – tekniikkaa alettiin hyödyntämään karttojen tekemiseen sekä muihin tarkoituksiin vasta myöhemmin. (Albertz 2001; Luhmann ym. 2011, 15-23.)

1900-luvun puolelle päästäessä sekä valokuvaustekniikat että koko fotogrammetrian ala olivat kehittyneet tasaista tahtia. Vuosisadan alkupuoliskolla tapahtunut lentokoneiden nopea kehitys auttoi osaltaan fotogrammetrian yleistymistä, ja lentokoneista suoritettu kuvaaminen osoittautuikin menestyksekkääksi tekniikaksi. Imakuvien avulla saatiin luotua ajankohtaan nähden huomattavan tarkkoja maastomalleja esimerkiksi karttoja varten. 1950-luvun aikana digitaalinen fotogrammetria alkoi kunnolla nostaa päätään. Vaikka kuvaaminen suoritettiin vielä tuolloin filmille, tietokoneiden avulla suoritettu datan analysointi alkoi syrjäyttää pitkään analogisena säilyneitä manuaalisia metodeja. Suuret läpimurrot lähifotogrammetrian tekniikoissa, kuten kolmiomittauksen käyttö sekä usean valokuvan keskinäisen orientaation tarkka selvittäminen (blokkitasoitus) olivat kriittisiä tekijöitä mittaustulosten tarkkuuden parantamisen osalta. (Luhmann ym. 2011, 15-22.)

Nykymuotoinen fotogrammetria hyödyntää pitkälti samoja peruseriaatteita kuin tekniikan alkutaipaleella, mutta käytettävät laitteet ovat kehittyneet radikaalisti. Erittäin tarkat digitaaliset kamerat sekä tietokoneiden valjastaminen suurten datamäärien prosessointiin yhdessä kehittyneempien algoritmien kanssa ovat mahdollistaneet aivan uuden tason fotogrammetrialla tuotettujen mallien tarkkuuteen.

Aikaisemmin fotogrammetria oli vain asiaan vihkiytyneiden erikoistekniikka vaatien kalliita erikoiskameroita ja pitkällistä asiaan perehtymistä. Kuitenkin nykyään käytännössä kuka tahansa voi ottaa vaikkapa älypuhelimensa kameralla sarjan kuvia ja syöttää ne tietokoneen ohjelmistolle, joka hoitaa prosessin lähes automaattisesti. Fotogrammetristen tekniikoiden kehittyminen, tietokoneiden laskentatehon hurja kasvu sekä laadukkaiden kameroiden yleistyminen ovatkin tehneet fotogrammetriasta ehkäpä helpoiten lähestyttävän 3d-skannauksen alalajin.

### **2.2.2 Hyvät ja huonot puolet**

Digitaalisen fotogrammetrian suurimmat vahvuudet ovat tekniikan skaalautuvuudessa. Yksinkertaisimmillaan lopputulokseen päästään yhdellä digitaalikameralla sekä tietokoneella, jossa on ohjelmisto prosessoinnin suorittamista varten. Erik Kjellman korostaakin diplomityössään fotogrammetrian minimivaatimusten merkitystä erityisesti arkkitehtuurillisia kohteita skannattaessa: suuren ja kömpelön takymetrin tai laserskannerin sijaan skannaus voidaan suorittaa esimerkiksi juuri yksittäisellä kameralla. Ratkaisu onkin moniin muihin menetelmiin verrattuna huomattavan mobiili ja joustava - digitaalinen fotogrammetria ei periaatteessa aseta rajoituksia käytettävän kameran suhteen. Luhmann ym. toisaalta muistuttavat, että vaikka kuvien ottamiseen voidaan periaatteessa käyttää mitä tahansa kameraa, nousevat laatuksymykset esille varsinkin edullisempia kameroita käytettäessä. Fotogrammetristen mittakameroiden, laserkeilainten ja muiden ammattilaislaitteiden sisäiset parametrit ja virhemarginaalit tunnetaan yleensä erittäin tarkasti ja tästä onkin hyötyä tavoiteltaessa mahdollisimman suurta tarkkuutta mittaustuloksissa. Vaikka tavallisenkin kameran kalibrointi voidaan hoitaa korkealla tarkkuudella prosessoinnin yhteydessä, luo useamman tuntemattoman muuttujan läsnäolo prosessiin vääjäämättä enemmän tilaa virheille. Fotogrammetrian kykyä mukautua hyvinkin erilaisiin kalustoihin voidaankin pitää tämän vuoksi hieman kaksiteräisenä miekkana. (Kjellman 2012, 74-76; Luhmann ym. 2011.)

Käytettävän kaluston yksinkertaisuudesta johtuen fotogrammetria voi olla hyvinkin edullinen ja helposti lähestyttävä 3d-skannaustekniikka. Hintaero laadukkaankin järjestelmäkameran, ja esimerkiksi laserskannerin välillä voi olla tuhansia, jopa kymmeniä tuhansia euroja. Varsinkin pienemmille projekteille kustannustehokkuus voi olla ratkaiseva tekijä eri käytännön ratkaisujen välillä valittaessa. Hinta-laatusuhteeltaan fotogrammetria voikin parhaimmillaan olla kirkkaasti muita tekniikoita parempi.

Kameroiden käyttö skannausvälineenä tuo mukanaan myös muita hyviä puolia. Fotogrammetria on luonnostaan kontaktiton tekniikka, joten herkät esineet kuten historialliset artefaktit tai pehmeät pinnat eivät kärsi kontaktista (Rämö 2010). Fotogrammetria myös soveltuu erittäin hyvin liikkuvien kohteiden havainnointiin. Maailmalta löytyy joitakin esimerkkejä melkoisen vaikuttavista järjestelmistä, joilla saadaan kohde kuvattua 360 asteen peitolla niin, että sekunnin murto-osien mittainen hetki voidaan ikuistaa joka suunnalta useaa synkronoitua kameraa käyttäen. Tällaisella ratkaisulla voidaan tuottaa esimerkiksi 3d-malli ilmaan hyppäävästä urheilijasta, joka ei muilla skannaustekniikoilla olisi käytännössä mahdollista. Lisäksi kameran käyttö mahdollistaa kohteen pinnan ulkomuodon määrittämisen ilman ylimääräisiä mittauksia: samoista kuvista saadaan sekä kohteen muoto (3d-malli) sekä väritieto (tekstuuri). Erikoisuutena mainittakoon vielä kyky mallintaa esimerkiksi historiallisia kohteita joita ei enää ole olemassa - edellyttäen luonnollisesti kuitenkin, että kohteesta on saatavilla riittävästi valokuvia. (Agisoft LLC 2012a; Agisoft LLC 2012b).

Fotogrammetrialla on luonnollisesti myös omat haasteensa ja ongelmakohtansa. Tietyntyyppiset pinnat aiheuttavat ongelmia kohteen muodon määrittämisessä: tasaiset, yksiväriset pinnat ilman selkeitä kiintopisteitä ovat hankalia, joskus jopa mahdottomia käsiteltäviä, samoin kiiltävät tai läpinäkyvät pinnat sekä selkeät heijastukset. Esimerkiksi kontaktiin perustuvilla skannereilla tällaista ongelmaa ei luonnollisesti ole, sillä pinta havaitaan fyysisen kontaktin avulla samanlaisena riippumatta siitä, kuinka heijastava se on. Myös laserskannerit sietävät heijastavia pintoja huomattavasti fotogrammetriaa paremmin. (Agisoft LLC 2012a; Kjellman 2012, 22-23).

Eri skannaustekniikoita ei siis välttämättä olekaan tarpeen pyrkiä vertaamaan suoraan toisiinsa, sillä jokaisella niistä on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Vaihtoehdot eivät ole toisiansa poissulkevia, vaan ne täydentävät toisiaan.

### **2.2.3 Käyttökohteet**

Fotogrammetrian käyttökohteet ovat moninaiset. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että alasta riippumatta tilanteessa, jossa on selvitettävä fyysisen kohteen muoto tai mitat, tulisi harkita fotogrammetriaa tai jotain muuta 3d-skannaustekniikkaa. Tekniikan joustavuuden sekä jatkuvasti keksittävien uusien käyttötarkoitusten vuoksi on likipitäen mahdotonta luetella kaikkia mahdollisia sovellutuksia. Yleisin esimerkki olisi kuitenkin luultavasti kartoitus eri alalajeineen - vielä tänäkin päivänä monien maastokartoitusten tietolähteenä käytetään ilmakehuvausta ja fotogrammetriaa. Alempana on lisäksi esiteltynä joitakin lähifotogrammetrian tärkeimmistä käyttökohteista.

Eräs klassinen esimerkki palaa tekniikan juurille: jo fotogrammetrian alkutaipaleelta lähtien sitä on hyödynnetty arkkitehtuurillisiin sekä arkeologisiin tarkoituksiin. Historiallisten kohteiden dokumentointi, arkeologisten kaivausten kartoitus, sekä rakennusten skannaaminen esimerkiksi restauroimista varten ovat vain joitakin esimerkkejä tämän alan käyttökohteista. Myös monenlaiset teollisen tuotannon alat hyödyntävät fotogrammetriaa eri tavoin - sen avulla saatetaan esimerkiksi laivanrakennuksessa tarkistaa että valmistettu rungon kappale vastaa mitoiltaan suunnitelmaa. Fotogrammetrian avulla voidaan myös takaisinmallintaa jokin tuotettu kappale jonka alkuperäiset mittapiirustukset ovat kadonneet. Reaaliaikaisen, niin sanotun "on-line"-fotogrammetrian sovellukset liittyvät yleensä myös teolliseen tuotantoon, ja niissä tekniikkaa hyödynnetäänkin usein konenäön muodossa. Tuotantolinjalla oleva teollisuusrobotti voi esimerkiksi korjata asentoaan konenäkölaitteiston avulla. (Luhmann ym. 2011, 13-14; Vinni 2003).

Hieman uudempaa aluevaltausta edustaa lääketiede, jossa fotogrammetriaa voidaan hyödyntää vaikkapa ihmisen kehon rakenteen mittaamisessa ja tutkimisessa, tai konenäköavusteisessa kirurgiassa (Luhmann ym. 2011, 13-14).

Vaikka sekä Vinni että Luhmann ym. esittelevät monia hyviä käyttökohteita, kumpikaan ei mainitse erästä (myöskin uudempaa) mielestäni merkittävää fotogrammetriaa hyödyntävää alaa: viihdeteollisuutta. Erityisesti ihmishahmoja esittäviä 3d-malleja tuotetaan esimerkiksi tietokonepelien tai elokuvien tarpeisiin fotogrammetrian avulla nykyään laajalti. Esimerkiksi urheilupeleissä eri pelaajien kasvonpiirteet saadaan helposti peliin mukaan oikean näköisinä kasvojen muodon tallentavan fotogrammetrisen skannausjärjestelmän avulla. Näin säästetään perinteisiin manuaalisiin mallinnusmetodeihin verrattuna huomattavasti aikaa ja vaivaa, vaikka skannattuja malleja pitäisikin jälkiprosessoida hieman. Kuten edellisessä luvussa mainittiin, fotogrammetrian avulla saadaan muista tekniikoista poiketen tekstuuridata tallennettua samoista kuvista, joista itse mallinnus suoritetaan. Esimerkiksi tekstuurikartan muokkaaminen voikin jälkeempänä olla tarpeen, sillä automaattisesti generoidut tekstuurit voivat olla laadultaan vaihtelevia.

### 3 FOTOGRAMMETRIAN TOIMINTAPERIAATE

Fotogrammetrian perimmäisen tarkoituksen voisi periaatteessa tiivistää yhdellä lauseella. Luhmann ym. toteavat kirjassaan, että fotogrammetrisen mittauksen pääasiallinen funktio on kohteen kolmiulotteinen rekonstruktio digitaalisessa tai graafisessa muodossa valokuvien avulla. Ongelmaksi muodostuu se, että kolmiulotteista kohdetta valokuvalla esittäessä prosessissa häviää informaatiota. Emme esimerkiksi näe kuvattavan kohteen taakse, emmekä voi yhden kuvan perusteella luotettavasti määrittää kohteiden skaalaa toisiinsa nähden. Siinä missä fyysisen kohteen jokaisen pisteen sijainti voidaan esittää kolmella koordinaatilla, valokuvassa vastaavat pisteet voidaan määrittää vain kahdessa ulottuvuudessa. (Luhmann ym. 2011.)

Fotogrammetria pyrkii ratkaisemaan tämän edellä mainitun ongelman liittyen informaation häviämiseen. Jotta kohteen kolmiulotteinen muoto saadaan selvitettyä kaksiulotteisen datan avulla, joudutaan käymään läpi tiettyjä työvaiheita. Nykymuotoisessa fotogrammetriassa tämä prosessi on suhteellisen vakiintunut, ja se voidaan jakaa kolmeen eri päävaiheeseen: kuvien tallentaminen, kuvien analysointi sekä datan prosessointi.

#### 3.1 Kuvien tallentaminen

Fotogrammetrisen prosessin lähtökohtana on luonnollisesti kohteesta tallennetut valokuvat. Prosessin ensimmäinen vaihe onkin suhteellisen yksiselitteinen: siinä suoritetaan seuraavien vaiheiden kannalta oleellinen askel eli kuvien ottaminen. Kuvien tallentamiseen voidaan käyttää joko erityisesti tarkoitukseen tehtyä mittakameraa (metric camera), tai "amatöörkameraa". Amatöörkameralla viitataan kuluttajatasen kameroihin, joita ei ole lähtökohtaisesti suunniteltu fotogrammetriaa silmälläpitäen. Nykypäivänä tyypillinen esimerkki tällaisesta kamerasta olisi digitaalinen järjestelmäkamera, mutta fotogrammetria onnistuu myös tietyin rajoittein esimerkiksi webbikameralla. Mittakamera ei toiminnallisuudeltaan eroa tavallisesta kamerasta käytännössä ollenkaan. Mittakamera onkin määritelmältään

kamera, jonka sisäinen rakenne on tarkoin tiedossa, ja sen sisäisten parametrien voidaan luottaa pysyvän hyvin pitkälti muuttumattomana jopa vuosikausia (Luhmann ym. 2011). Mittakamerat ovatkin yleensä valmistusprosessin tarkkuudesta sekä korkealuokkaisista materiaaleista johtuen huomattavan kalliita. Kameroiden ominaisuuksiin, eri kameratyyppeihin sekä näiden vaikutukseen lopputuloksen laadun kannalta perehdytään tarkemmin luvussa 4.

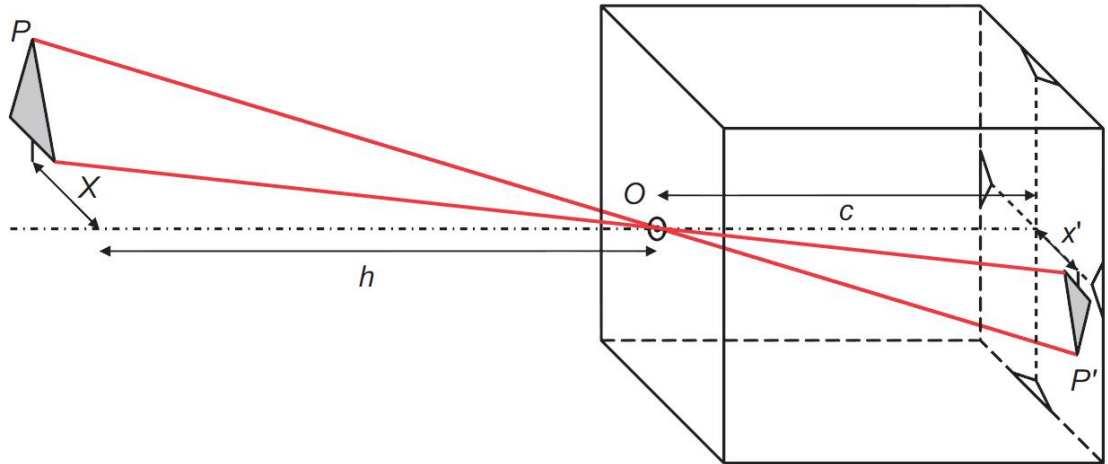
## **3.2 Kuvien analysointi**

Kuvien tallentamisen jälkeen ne on analysoitava, jotta itse mallintaminen voidaan suorittaa. Käytännössä kuvista etsitään selkeitä kiintopisteitä, joiden sijainti kolmiulotteisessa koordinaatistossa määritetään kolmiomittauksen avulla. Analysointivaiheen jälkeen tiedetään kameroiden sijainti kohteeseen nähden kuvanottohetkellä, sekä muodostetaan tämän tiedon perusteella pistepilvi jonka pohjalta malli kohteesta tullaan rakentamaan. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tärkeimpiä käsitteitä ja sääntöjä joihin tämä prosessi perustuu.

### **3.2.1 Keskusprojektiio**

Yksi fotogrammetrian tärkeimmistä olettamuksista on käsite nimeltään keskusprojektiio. Keskusprojektiiossa kuva syntyy yhden pisteen eli projektiokeskuksen kautta kulkevien valonsäteiden ansiosta. Esimerkki keskusprojektiioon perustuvasta mallista on neulanreikäkameran toimintaperiaate (KUVIO 1). Kuvioista 1 näemme, että yhdistämällä fyysisen kohteen pisteet (vasemmassa reunassa) sekä kameraan projisoituneen kuvan vastaavat pisteet (oikeassa reunassa) punaisilla viivoilla, viivat leikkaavat projektiokeskuksessa  $O$ .





KUVIO 1. Neulanreikäkameran periaate (mukaillen Luhmann ym. 2011)

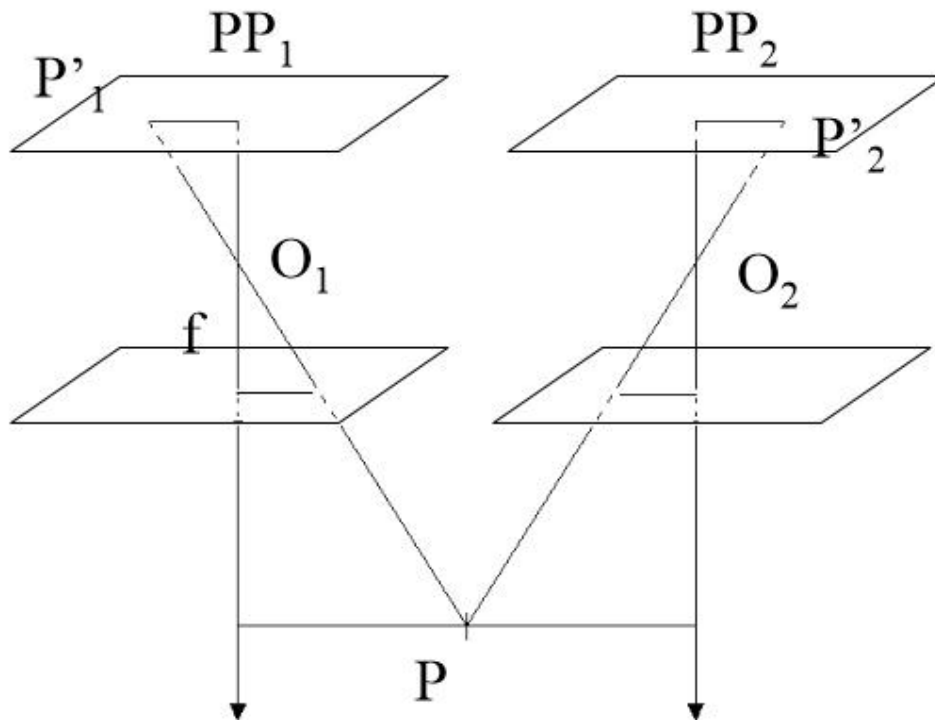
Toinen hyvin tärkeä, keskusprojektiosta johdettu käsite on kollineaarisuusehto. Kollineaarisuusehdon mukaan oletetaan että kameran projektiokeskus  $O$ , kuvattava kohde  $P$  sekä kohteen kuva valokuvalla  $P'$  sijaitsevat keskenään samalla suoralla, kuvion 1 osoittamalla tavalla. Tämä on ideaalinen oletamus joka perustuu keskusprojektion periaatteeseen siitä, että kaikki valonsäteet kulkevat vain yhden pisteen kautta. Tosielämässä näin ei kuitenkaan ole, sillä kameran aukko ei ole koskaan pistemäinen vaan se voi olla objektiivin polttoväliin suhteutettuna huomattavankin suuri. Lisäksi kameran linssisysteemi muodostuu monesta elementistä, ja valo taittuu useita kertoja matkallaan eri elementtien läpi. (Vinni 2003.)

Tällaisen ideaalitalanteen olettaminen kuitenkin helpottaa asian ymmärtämistä sekä käsittelyä. Monet fotogrammetrian perussäännöistä pohjautuvatkin keskusprojektiioon sekä kollineaarisuusehtoon. Ideaalitalanteesta tapahtuvat poikkeamat voidaan kuitenkin kompensoida laskutoimituksissa, joten olettamuksista poikkeaminen ei aiheuta ongelmia.

### 3.2.2 Pisteiden mittaaminen

Ihmisten kyky hahmottaa ympäristöään kolmiulotteisesti perustuu stereoskooppiseen näkemiseen. Koska meillä on kaksi silmää jotka ovat erillään toisistaan, kumpikin silmä näkee kohteen hieman eri kulmasta kuin toinen, ja molemmille silmille muodostuu erilainen näkymä. Näiden näkymien keskinäisten eroavaisuuksien avulla muodostamme käsityksen kohteen kolmiulotteisesta muodosta. (Vinni 2003.)

Fotogrammetrinen mittaus perustuu silmien tavoin stereonäköön ja siihen että pystymme määrittämään kuvassa näkyvän kiintopisteen sijainnin 3d-koordinaatistossa. Tämän saavuttamiseksi hyödynnetään aikaisemmin mainittuja olettamia keskusprojektiosta sekä kollineaarisuusehdosta. Jos tiedämme projektiokeskuksen eli kameran sijainnin, sen orientaation suhteessa johonkin koordinaatistoon, sekä kuvassa olevan pisteen  $P'$  etäisyyden pääpisteeseen  $PP$  (pääpiste on kuvan koordinaatistossa se piste, jossa kameran optinen akseli kohtaa kuvatason), saamme suoran jolla piste  $P$  sijaitsee (ITEE 2009; Luhmann ym. 2011). Yhden kuvan perusteella on kuitenkin mahdotonta tietää, mihin kohtaa suoraa piste sijoittuu. Pisteen tarkan sijainnin määrittämiseksi tarvitsemme vähintään kaksi suoraa (KUVIO 2). Pisteen  $P$  sijainti voidaan ratkaista kolmiomittauksen avulla, ja sen tiedetään siis sijaitsevan tarkalleen näiden suorien leikkauspisteessä.



KUVIO 2. Stereofotogrammetrian periaate (ITEE 2009)

Stereofotogrammetriassa pisteen sijainti kolmiulotteisessa koordinaatistossa saadaankin selvitettyä kahden kuvan avulla. Jos kohteen sama piste näkyy useammassa kuin kahdessa kuvassa, voidaan jokaista kuvaa hyödyntää sijainnin tarkempaan laskemiseen. Tällaisissa useaan kuvaan perustuvissa järjestelmissä käytettävien kuvien lukumäärä on teoriassa rajoittamaton.

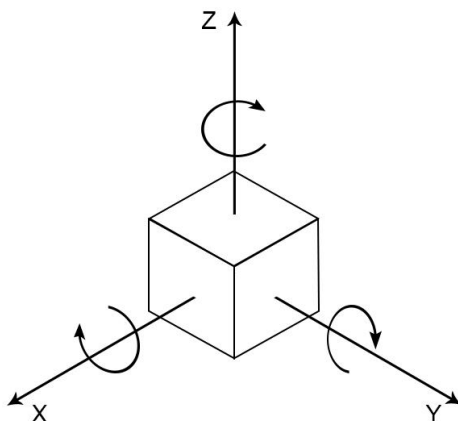
Kuitenkin jotta keskusprojektiota ja kollineaarisuusehtoa voidaan hyödyntää pisteiden laskemiseen, tulee ensin selvittää kaksi oleellista tietoa: kameran sisäinen sekä ulkoinen orientaatio.

Kameran sisäinen orientaatio kuvaa joukon muuttujia, jotka riippuvat kameran fyysisistä ominaisuuksista. Käytännössä se koostuu kameran projektiokeskuksen sijainnista, pääpisteen sijainnista sekä kameravakiosta. Kameravakio  $c$  (KUVIO 1) kertoo projektiokeskuksen etäisyyden kuvatasoon, eli kameran kennon tai filmiin, nähden (Haggrén, Koistinen 2003). Lisäksi sisäisessä orientaatiossa otetaan

huomioon funktioita jotka kuvaavat aikaisemmin mainittuja poikkeamia keskusprojektion ideaalilanteesta, kuten linssijärjestelmästä johtuvia vääristymiä.

Sisäisen orientaation parametrien määrittämistä kutsutaan yleensä termillä kameran kalibrointi. Mittakameroiden tapauksessa kalibrointi saattaa olla kertaluontoinen, valmistajan laboratorio-olosuhteissa suorittama tarkkuusoperaatio. Kalibrointi voidaan myös suorittaa kenttäkalibrointina skannaustilanteen yhteydessä. Kuluttajataso kameroiden kalibrointi taas tapahtuu yleensä jokaiselle kuvalle erikseen kuvia analysoivan ohjelmiston toimesta. (Luhmann ym. 2011.)

Kameran ulkoinen orientaatio niin ikään kuvaa joukon muuttujia, joiden avulla voidaan määrittää kameran sijainti sekä suunta kohteeseen nähden. Toisin sanoen ulkoisen orientoinnin avulla määritetään kamerakoordinaatiston suhde kohteen koordinaatistoon. Kameran koordinaatistolla tarkoitetaan sitä koordinaatistoa, joka määritettiin edellisessä vaiheessa sisäisen orientaation avulla. Kohdekoordinaatisto puolestaan on se lopullinen kolmiulotteinen koordinaatisto, johon määritetyt pisteet sijoitetaan. Ulkoisessa orientaatioissa muuttujia on kuusi, kuten kuvio 3 havainnollistaa: kameran projektiokeskuksen sijainti kohdekoordinaatistossa määritettynä kolmella akselilla ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) sekä kiertokulmat näiden kolmen akselin ympäri (Haggrén, Koistinen 2003).



KUVIO 3. Kameran kuusi vapausastetta kohdekoordinaatistossa

Kiintopisteiden sijainnin määrittäminen edellyttää tietenkin sitä, kuvista saadaan ensin selvitettyä juuri nämä pisteet, joiden perusteella orientaatiot lasketaan. Ilman esimääritettyjä kiintopisteitä pisteiden etsiminen onkin analyyttinen matemaattinen prosessi: ohjelma etsii valokuvista yhteneviä ominaisuuksia kuten selkeitä reunoja, kuvioita, pisteitä joilla on korkea kontrasti ympäristöönsä nähden jne. Tässäkin tapauksessa erilaisia algoritmeja on useita, mutta ne perustuvat samaan periaatteeseen: pikselitasolla etsitään potentiaalisia kiintopisteitä jotka ovat mahdollisimman uniikkeja tietyn etsintäetäisyyden sisällä, ja näitä kuvioita etsitään muista kuvista. (Luhmann ym. 2011, 378-392.) Koska prosessi perustuu tarkimmillaan yksittäisten kuvapisteen väriarvojen analysointiin, on kuvien tarkkuudella ja laadulla suora vaikutus prosessin onnistumiseen. Huonolaatuisista tai keskenään laadullisesti kovin erilaisista kuvista on hankala määrittää keskenään yhteneviä kiintopisteitä.

### 3.2.3 Blokkitasoitus

Selkeästi eräs tärkeimmistä yksittäisistä tekijöistä fotogrammetrisessä prosessissa on matemaattinen prosessi jota kutsutaan nimellä blokkitasoitus (englanniksi bundle adjustment, bundle block adjustment tai bundle triangulation). Blokkitasoituksen teoreettinen perusta luotiin 1950-luvun loppupuolella ja erilaisia siihen perustuvia käytännön ratkaisuja on nykyään olemassa useita. Vaikka eri blokkitasoitusjärjestelmät saattavat erota toisistaan käytettyjen algoritmien perusteella, ovat ne toimintaperiaatteeltaan ja tarkoitukseltaan keskenään samankaltaisia. (Luhmann ym. 2011, 20-21).

Yksinkertaistettuna blokkitasoitus on matemaattinen prosessi, jossa (joko esisyötettyjen tai aikaisemmin arvioitujen) alkuparametrien perusteella lasketaan kameroiden positio ja orientaatio kuvanottohetkellä. Toisin sanoen siis blokkitasoitus hyödyntää luvussa 3.2.1 esiteltyjä teoreettisia perusteita keskusprojektiosta ja kollineaarisuusehdosta, ratkaisee kameroiden orientaatiot sekä tarjoaa lopputuloksenaan kolmiulotteisen pistepilven. Blokkitasoituksesta tekee niin tehokkaan työkalun se, että sen avulla saadaan ratkaistua sekä kameran sisäinen että ulkoinen orientaatio usealle kuvalle yhtä aikaa. Luhmann

ym. mukaan blokkitasoituksen tärkeyttä lähifotogrammetriassa ei voikaan korostaa liiaksi: metodi ei aseta minkäänlaisia rajoituksia kameroiden positioille tai orientaatioille. Lisäksi kameroiden sisäinen orientaatio voidaan sijoittaa tuntemattomaksi muuttujaksi. (Hartley, Zisserman 2004; Luhmann ym. 2011, 21.) Hyvin pitkälti tämän faktan ansiosta siis lähifotogrammetriassa voidaan nykyään käyttää lähes mitä tahansa kameraa kömpelöiden ja kalliiden mittakameroiden sijasta.

Blokkitasoitus onkin noussut moneen kuvaan perustuvan lähifotogrammetrian käytetyimmäksi ongelmanratkaisumetodiksi, eikä suotta. Prosessi on joustava, tehokas ja sillä saadaan tarkkoja tuloksia. Blokkitasoituksen haittapuoleksi voidaan toisaalta lukea sen monimutkaisuus: kun kuvamäärän lisääntyessä tuntemattomien muuttujien määrä yhtälössä lisääntyy, samalla kasvaa ongelman ratkaisuun vaadittava prosessointitehon määrä (Sibley, Mei, Reid, Newman 2009). Kovin suurilla kuvamäärillä prosessointiajat voivat kasvaa suhteellisen pitkiksi, mutta nykyaikaisten tietokoneiden suuri laskentateho auttaa lievittämään tätä ongelmaa.

### **3.3 Datan prosessointi**

Kun pistepilvi on saatu muodostettua blokkitasoituksen avulla, seuraava vaihe on pinnan muodostaminen - tiheänkään pistepilven tarkastelu ei tarjoa täydellistä kuvaa kohteen pinnasta. Koska monimutkaisempia kappaleita kuten ihmisen kasvoja ei voida esittää pelkästään perinteisten geometrinen kappaleiden kuten kuutioiden, sylintereiden ja vastaavien avulla, tulee luoda kolmiulotteinen pinta joka mukaillee kohteen muotoja. Yksinkertaisin geometrinen kappale jota toistamalla voidaan muodostaa yhtenäinen pinta, on kolmio, ja se toimiikin yleisesti ottaen yhtenä 3d-grafiikan perusosana (Finney 2006, 112-114). Tällaista kolmionmuotoisista monikulmioista eli polygoneista (kuten niitä 3d-grafiikassa yleisesti kutsutaan) muodostuvaa pintaa kutsutaan kolmioverkoksi (mesh).

Eryityisesti lähifotogrammetriassa lopullinen tuotos onkin lähes poikkeuksetta juuri tällainen ylempänä mainittu kolmioverkko. Pistepilvestä muodostetaan ohjelmallisesti kolmiomittauksen avulla kolmioverkko, jolla pyritään esittämään kohteen pinnan muoto mahdollisimman tarkasti (Luhmann ym. 2011, 91-94). Näin saatu kolmiulotteinen esitys skannatusta kohteesta voidaan sitten vaikkapa tallentaa tarkastelua varten, tai sen työstämistä voidaan jatkaa käyttötilanteesta riippuen sopivampaan muotoon.

### **3.4 Käytännön työvaiheet**

Itse skannausprosessin käytännön toteutus voidaan myöskin jakaa kolmeen eri vaiheeseen, jotka ovat valmistelu, kuvaaminen sekä prosessointi ja jälkityöstö. Nämä vaiheet ovat periaatteessa toisistaan erillisiä, mutta koska myöhempien työvaiheiden onnistuminen riippuu sitä edeltävistä vaiheista, tulisi erityisesti valmistelu- sekä kuvausvaiheisiin kiinnittää huomiota. Vaikka jälkityöstössä eri parametrien muuttamisella voi olla suurikin vaikutus lopputuloksen laatuun, on huomionarvoista se, että joissakin tilanteissa kohteen pariin ei ole mahdollista tai käytännöllistä palata takaisin tallentamaan uusia kuvia. Siksi tulisikin aina pyrkiä mahdollisimman hyvälaatuisen lähdemateriaalin hankkimiseen.

#### **3.4.1 Valmistelu**

Valmisteluvaihe kattaa kaiken sen työn, joka suoritetaan ennen varsinaista kuvaamista. Kuvauskulmien suunnittelu, käytettävän kaluston, skannattavan kohteen sekä ympäristön valmistelu ovat esimerkkejä toimenpiteistä jotka suoritetaan tavalla tai toisella käytännössä ennen jokaista skannausta. Joidenkin ratkaisujen tapauksessa järjestelmälle ennen jokaista skannauskertaa suoritettava kalibrointi kuuluu myös valmisteluvaiheeseen.

Joissakin tapauksissa ympäristöön saatetaan määrittää erinäisiä apupisteitä, joiden tarkoituksena on auttaa fotogrammetrisen prosessin onnistumisessa. Esimerkiksi ilmafotogrammetriassa maastoon voidaan asettaa fyysisiä

kiintopisteitä, joiden tarkka sijainti on etukäteen määritetty GPS-paikannuksen avulla, tai on muutoin tarkasti määritettävissä. Tällaisia pisteitä kutsutaan runkopisteiksi. Näiden runkopisteiden sijainnin tietämisestä on hyötyä kameroiden orientaatiota määrittäessä.

Myös lähifotogrammetriassa voidaan käyttää apuna kuvion 4 kaltaisia kohdemerkkejä. Tarve tällaisille merkeille voi ilmetä jos kuvattavan kohteen pinta on väritykseltään kovin tasainen eikä siten luonnostaan tarjoa tarpeeksi kiintopisteitä pinnan muodon määrittämiseen (Luhmann ym. 2011). Tällaisten pisteiden sijaintia koordinaatistossa ei yleensä ole tarve selvittää etukäteen, sillä niiden tarkoitus onkin lähinnä rikkoa monotonisia, tasaisia pintoja ja toimia kiintopisteinä mittausta varten. Kohteet voivat myös olla koodattuja, jolloin jokainen kohdemerkki on yksilöllinen ja tällä eliminoidaan virhetilanne jossa ohjelmisto tulkitsee kaksi eri merkkiä samaksi niiden samankaltaisen ulkonäön perusteella.



KUVIO 4. Esimerkki kohteen pinnalle kiinnitetyistä kohdemerkeistä



Muita lähifotogrammetriassa käytettäviä apuvälineitä voivat olla esimerkiksi erilaiset mitta-asteikot, jotka asetetaan kohteen lähelle, niin että asteikko näkyy kuvattavan kohteen kanssa kuvissa. Kun mitta-asteikon fyysiset mitat ovat etukäteen tiedossa, voidaan sen avulla kohteen skaala suhteuttaa oikeisiin mittoihin. Tästä on hyötyä jos halutaan suorittaa mittauksia kohteen pinta-alasta tai tilavuudesta, tai saada malli valmiiksi mittasuhteiltaan oikean kokoisena. Valmiin mallin skaalaus voidaan kuitenkin myös suorittaa jälkeinpäin erillisellä ohjelmistolla.

### 3.4.2 Kuvaaminen

Kuvaamisprosessin tarkoitus on tuottaa mahdollisimman korkealaatuista dataa, jotta kohteen rekonstruoiminen onnistuisi varmasti ja jotta tulokset olisivat tarkkuudeltaan halutun tasoisia.

Kohteesta otettavien kuvien määrä, kuvauskulmat, käytettävä kamera asetuksineen sekä muut tekijät voivat vaihdella suurestikin eri tilanteissa. Nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää, että kuvia tulisi ottaa mieluummin liian paljon kuin liian vähän (Agisoft LLC 2012a, 4). Mahdollinen ylimääräinen kuvamateriaali on helppo vain jättää prosessoimatta, mutta jos kuvia ei ole tarpeeksi, koko prosessi voi epäonnistua. Lisäksi tulisi aina pyrkiä tallentamaan mahdollisimman korkealaatuisia kuvia.

Muita kuvausprosessiin kuuluvia asioita ovatkin esimerkiksi kameran asetusten säätäminen kohdalleen sekä kuvien tallentaminen tallennusmedialle kuten muistikortille tai suoraan tietokoneelle. Jos kuvaustilanteen ympäristö ei valmisteluista huolimatta esimerkiksi valotuksen kannalta ole optimaalinen, tulee sitä pyrkiä korjaamaan itse kuvaamisen aikana, sillä kuvia jälkikäteen kuvankäsittelyohjelmalla korjaamalla ei yleensä päästä yhtä hyvään lopputulokseen. Lisäksi, kuten Kjellman mainitsee, olisi erittäin hyödyllistä jos kuvaustilanteessa olisi mukana esimerkiksi kannettava tietokone, jonka avulla otetut kuvat voidaan tarpeen tullen tarkastaa saman tien kuvien ottamisen jälkeen (Kjellman 2012, 20). Näin voidaan varmistaa kuvien laatu jo ennen prosessoinnin

aloittamista, ja vaikkapa valotukseen vaikuttavia asioita voidaan tarvittaessa säätää heti tällaisen välittömän laadunvarmistuksen jälkeen. Monissa tapauksissa, varsinkin usean kameran järjestelmissä, kamerat ovatkin jo valmiiksi kytkettyinä tietokoneeseen esimerkiksi etähallintaohjelmiston käytön vuoksi.

### 3.4.3 Prosessointi ja jälkityöstö

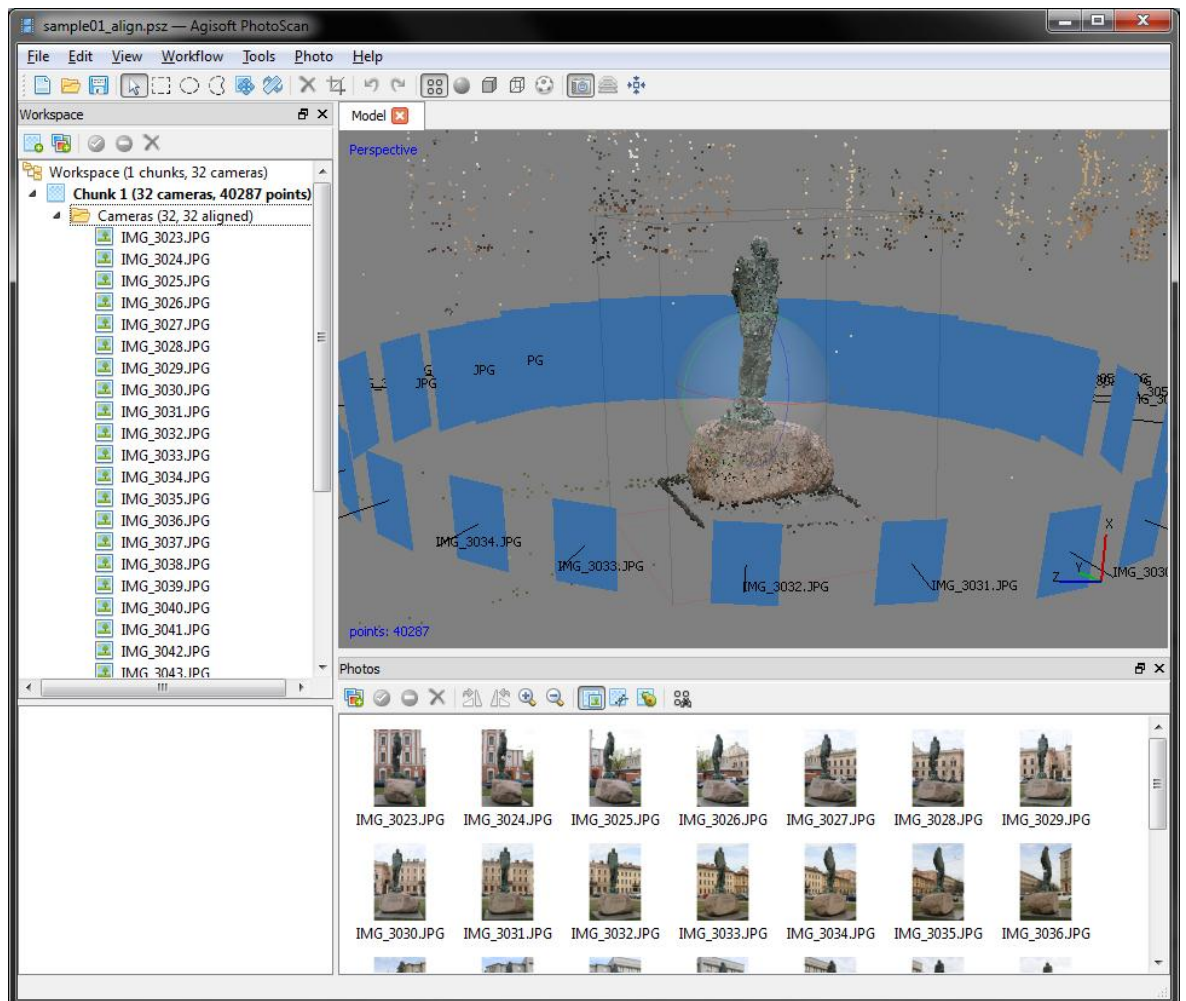
Prosessointi käsittää työvaiheet joiden aikana tallennetusta datasta saadaan muodostettua haluttu lopputulos. Digitaalisessa fotogrammetriassa tämä yleensä tarkoittaa käytännössä sitä, että otetut valokuvat syötetään ohjelmistolle, joka hoitaa prosessoinnin lähes automaattisesti. Käyttäjän puuttumista asiaan ei joissakin tapauksissa vaadita käytännössä lainkaan.

Tässä kappaleessa on lyhyesti esitelty erään markkinoilla olevan kaupallisen ohjelmiston käyttöä. Venäläisen yrityksen Agisoft LLC:n Photoscan - ohjelmiston käytännön työvaiheet käydään pikaisesti läpi ohjelmistossa tapahtuvan prosessoinnin osalta. Vaikka työvaiheet ovatkin tässä muodossaan sovellettavissa vain juuri tähän ohjelmistoon, tarjoaa vaiheiden läpikäynti katsauksen ohjelmiston puolella tapahtuvaan työstämiseen yleisellä tasolla. Lisäksi vaikka ohjelmistojen välillä voi olla eroja työvaiheiden nimeämisessä, käytettävissä työkaluissa ja muissakin ominaisuuksissa, perustuvat ne kuitenkin kaikki periaatteeltaan samaan, aikaisemmin esiteltyyn teoriapohjaan.

Photoscanissa työn kulku on hyvin yksinkertainen ja suoraviivainen - prosessin automaattisen luonteen vuoksi käyttäjä selviää yleensä muutamalla klikkauksella ja joidenkin parametrien syöttämisellä. Photoscan tarjoaa kuitenkin myös joitakin manuaalisia työkaluja, joita voidaan tarvittaessa hyödyntää jos automaattinen prosessi jostain syystä epäonnistuu. Työstön päävaiheet ovat selkeästi loogisesti toisistaan erotettuja kokonaisuuksia.

Photoscanin dokumentaatioissa ohjelmiston ylläpitäjät jakavatkin työnkulun neljään tärkeimpään vaiheeseen: kuvien lataaminen, kuvien orientointi, geometrian rakentaminen ja mallin teksturointi (load photos, align photos, build geometry,

build texture) (Agisoft LLC 2012a, 7-10). Kuvien lataamisen yhteydessä on kannattavaa vielä käydä kuvat läpi, ja jättää selkeästi epäonnistuneet otokset kuten tärähtäneet tai yli/alivalottuneet kuvat kokonaan käyttämättä. Kuvien lataamisen jälkeen käyttäjä voi halutessaan rajata kuvista ei-haluttuja ominaisuuksia, kuten häiritsevän taustan tai vaikkapa kuva-alalle eksyneen objektin kuten jalankulkijan pois rajaustyökalujen avulla (masking).

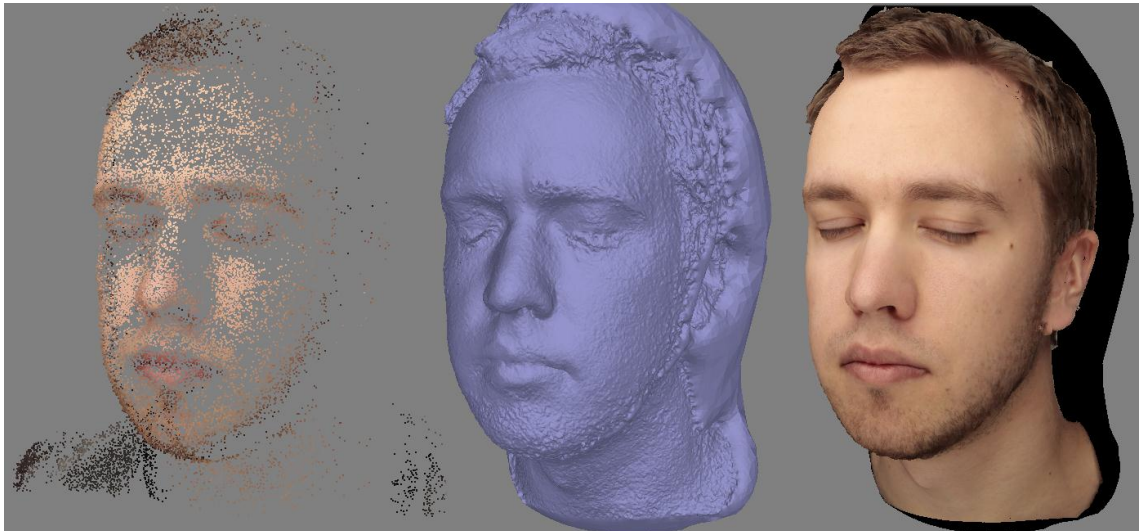


KUVIO 5. Kameroiden orientaatio sekä harva pistepilvi Agisoft Photoscanissa

Seuraava työvaihe on kuvia vastaavien kameroiden orientoinnin määrittäminen (align photos) jossa Photoscan etsii kuvista kiintopisteitä ja blokkitasoituksella määrittää kameroiden sijainnin kohteeseen sekä toisiinsa nähden. Tämän työvaiheen päätteeksi ohjelman graafinen käyttöliittymä tarjoaa kuvion 5 kaltaisen näkymän, jossa näkyvillä on kameroiden sijainnit esitettyinä sinisillä

suorakulmioilla, sekä kuvista löytyneet tärkeimmät kiintopisteet esitettynä harvan pistepilven muodossa. Jo tässä vaiheessa voidaan muodostaa hyvä käsitys siitä, kuinka hyvin prosessi tulee onnistumaan: kuvion 5 esimerkkitapauksessa kaikkien kameroiden sijaintien voidaan silmämääräisesti havaita olevan loogisia ja pistepilvi näyttää etäältä hyvin yhtenäiseltä. Jos joidenkin kuvien orientointi kuitenkin epäonnistuisi, ja ne olisivat tässä näkyvässä selkeästi väärässä paikassa (kuten kuvan kohteeseen suhteutettuna esimerkiksi maan alla) ne voidaan joko jättää kokonaan pois seuraavista vaiheista, tai niiden orientaatio voidaan pyrkiä määrittämään uudestaan (Agisoft LLC 2012a; Agisoft LLC 2012b).

Seuraava vaihe on itse geometrian rakentaminen, jonka tuloksena Photoscan muodostaa harvan pistepilven pohjalta tiheämmän pisteverkon, ja siitä edelleen kolmiomittauksen avulla kolmioverkon. Tämä vaihe on prosessointivaiheen monimutkaisin ja vie eri vaiheista yleensä eniten aikaa. Työstöaika riippuu kohteen monimutkaisuudesta, käytettävien kuvien määrästä sekä kuvien resoluutiosta. Koska useimmissa tapauksissa haluttu lopputulos on teksturoitu 3d-malli, suoritetaan yleensä viimeisenä vaiheena mallin teksturointi. Photoscan osaa generoida otettujen kuvien perusteella myös pinnan väriarvot ja tekee niistä kuvatiedoston joka sitten liitetään tekstuurina 3d-mallin päälle. (Agisoft LLC 2012a). Tekstuurin liittämiseksi mallin pinnalle täytyy 3d-kappale ensin levittää kaksiuotteiseksi pinnaksi - hieman kuin jos pahvilaatikko ratkottaisiin saumoistaan auki niin, että se saadaan levitettyä yhdeksi tasoksi. Tätä prosessia kutsutaan UVW-kartan luomiseksi (UVW mapping). Sen avulla kolmiuotteisen pinnan jokaiselle pisteelle voidaan osoittaa sitä vastaava väriarvo kuvatiedoston eli tekstuurin avulla (Finney 2006, 353-354). Haluttaessa tämä vaihe voidaan myös jättää Photoscanissa tekemättä ja suorittaa sekä UVW-mappaus että tekstuuriin generointi itse jälkepäin. Photoscanin luomat tekstuurit yleensä hyödyntävätkin tekstuurikartan kuvatiedoston pinta-alan heikosti pirstaleisesta UVW-kartasta johtuen, joten parhaisiin tuloksiin päästään suorittamalla teksturointi itse.



KUVIO 6. Harva pistepilvi, kolmioverkkomalli ja teksturoitu malli

Kuvio 6 havainnollistaa hyvin Photoscanin kolme tärkeintä vaihetta. Ensimmäisenä vasemmalta on harva pistepilvi. Tässä vaiheessa tiedossa on kameroiden orientaatiot, ja harva pistepilvi toimii hyvänä indikaattorina tulevan mallin onnistumisesta. Kesimmäisessä mallissa pistepilven pohjalta on rakennettu jo selkeästi kasvonpiirteet paremmin ilmentävä kolmioverkkomalli, ja oikeanpuoleiseen malliin on vielä lisätty korkean resoluution tekstuurikartta. Kuvion 6 kahdessa viimeisessä kohdassa on selkeästi havaittavissa mallin reunalueilla esiintyvää epätarkkuutta. Tämä johtuu siitä, että kyseinen skannaus suoritettiin vain kasvojen etuosille - pään sivuja kohti mentäessä tarkkuus alkaa laskea ja ilmentyä epätasaisempana pintana, ja pään takana olevat mustat alueet ovat taustasta johtuvia häiriöitä.

Fotogrammetriaohjelmistossa suoritettavan työstön jälkeen näille työvaiheille on yleensä looginen jatkumo se, että tuotettu 3d-malli tallennetaan johonkin yleiseen 3d-tiedostoformaattiin ja viedään toiseen ohjelmaan työstettäväksi. Suoritettavia jatkotoimenpiteitä voisivat olla esimerkiksi mallin pintaan tulleiden epätasaisuuksien siistiminen, yksityiskohtien lisääminen entisestään tai kolmioverkon siistiminen ja optimointi esimerkiksi pelikäyttöä varten. Usein tällaisia toimenpiteitä suoritetaan ohjelmistoissa, jotka ovat erikoistuneet orgaanisten pintojen muokkaamiseen "digitaalisen veistämisellä" avulla, kuten Autodeskin Mudbox tai Pixologicin Zbrush. Useimmissa tapauksissa lähifotogrammetrialla

tuotettu malli vaatiikin vähintään jonkinlaista jatkotyöstöä, ja esimerkiksi Photoscanista saatavaa mallia voidaankin pitää vasta hyvänä lähtökohtana, ei niinkään lopullista laatua vastaavana tuotoksena.

## 4 LOPPUTULOKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että skannauksen huolellisella suunnittelulla sekä kuvausympäristön valmistelulla minimoidaan ulkoisten tekijöiden negatiivinen vaikutus lopputulokseen. Lisäksi käytettävän kaluston valitsemisella voidaan vaikuttaa suuresti tulosten laatuun. Koska huonolaatuisesta lähdemateriaalista voi olla hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta luoda käyttökelpoista lopputulosta, on ensiarvoisen tärkeää pyrkiä tuottamaan mahdollisimman hyvälaatuisia kuvia kohteesta.

Tässä luvussa käydään läpi asioita jotka vaikuttavat fotogrammetrialla saatavan lopputuloksen laatuun sekä ylipäättään koko prosessin onnistumiseen.

### 4.1 Valokuvien laatu

Jo useaan otteeseen on ehditty mainita, että valokuvien tulisi olla mahdollisimman hyvälaatuisia. Koska pelkästään laadukkaiden valokuvien tuottamisesta voisi kirjoittaa parikin väitöskirjaa tai opinnäytetyötä, tässä ei paneuduta asiaan pohjiamyöten, jo senkin vuoksi että "laadukas valokuva" voi joissakin yhteyksissä tarkoittaa lähinnä valokuvan taiteellisia meriittejä. Kuitenkin fotogrammetrian ymmärtämisen näkökulmasta on hyvä tietää joitakin lähinnä teknisiä tekijöitä valokuvien laatuun liittyen, sillä niillä on kriittisen tärkeä rooli koko prosessin kannalta. Tämä perustuu siihen, että fotogrammetrinen prosessi vaatii dataa - ei taidetta - ja haluamme luonnollisesti tuottaa mahdollisimman korkealaatuista dataa prosessin tarpeisiin.

Yksittäisen kuvan näkökulmasta laatuksymykset keskittyvät muutamaan yksittäiseen tekijään, joiden takana on kuitenkin useita asiaan vaikuttavia muuttujia. Näiden taustalla ovat samat tekniset tekijät kuin valokuvauksessa yleensä - jotta voimme tavoitella mahdollisimman korkealaatuisia tuloksia, yksittäisten kuvien tulisi olla riittävän tarkkoja, teräviä sekä selkeitä.

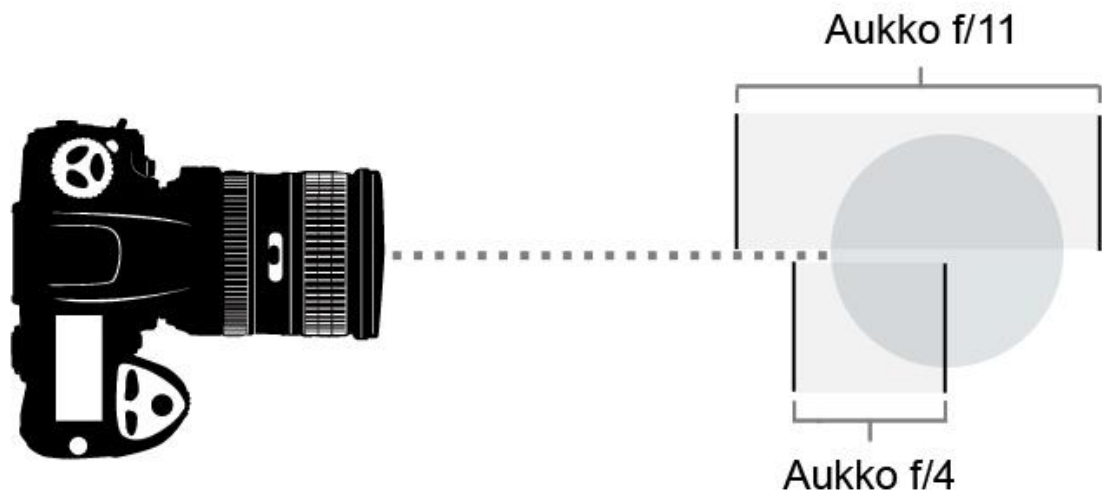
Tarkkuus viittaa digitaalikameroiden tapauksessa käytännössä kameran kennon pikselimäärään. Digitaalinen kenno koostuu hyvin suuresta määrästä pienen pieniä valoherkkiä sensoreita. Mitä suurempi kameran kennon pikselimäärä on, sitä suurempi voidaan sanoa olevan sen teoreettinen erottelutarkkuus. Suuri erottelutarkkuus on tässä tapauksessa eduksi, sillä korkeampaan tarkkuuteen kykenevällä kameralla pystytään tallentamaan pienempiä yksityiskohtia yksittäisen pikselin ollessa fyysiseltä kooltaan pienempi (Long 2009, 93-100). Tämä taas korreloi suoraan fotogrammetriseen tarkkuuteen - kuten luvussa 3.2.3 mainittiin, kuvien orientoinnissa kuvia tarkastellaan yksittäisten kuvapisteen tasolla. Onkin helppo siis ymmärtää, miksi esimerkiksi järjestelmäkameralla päästään tarkempiin mittaustuloksiin kuin web-kameralla.

Suurestakaan erottelutarkkuudesta ei ole hyötyä, jos kuva on muutoin epäterävä tai kuvassa olevista kohteista ei saa selvää. Kuvien epäterävyys voi johtua monesta asiasta. Koska valo joutuu kulkemaan ennen kennolle osumistaan kameran optiikan eli linssielementtien läpi, voi optiikan laatu vaikuttaa kuvanlaatuun, varsinkin terävyyteen hyvinkin dramaattisesti (ISPRS 2008). Epäterävyys voi olla myös liikkeestä johtuvaa - joko kohde tai kamera liikkuu kuvanottohetkellä sen verran, että kohde piirtyy kameralle epäterävänä. Liike-epäterävyydeltä voidaan yleensä helposti välttää kiinnittämällä kamera tukevasti jalustalle, ja erityisesti liikkuvaa kohdetta kuvatessa lyhentämällä kameran suljinaikaa jotta liike saadaan pysäytettyä.

Fotogrammetrian kannalta hyvin tärkeä kuvanlaadullinen elementti on syvyysterävyys (depth of field). Syvyysterävyydellä tarkoitetaan sitä kameran kuvatasosta syvyysuuntaan ulottuvaa aluetta, jonka sisällä kuvan kohteet ovat tarkentuneita. Syvyysterävyyteen vaikuttavat kameran aukon koko, etäisyys kohteeseen sekä linssin polttoväli (Long 2009). Sen hallitseminen onkin tärkeää tavoiteltaessa laadukkaita tuloksia. Tavallisen valokuvauksen ilmaisukeinona hyvin lyhyt syvyysterävyysarvo voi olla tavoiteltu tilanne, mutta fotogrammetrian tarkoituksiin kohteen tulisi näkyä mahdollisimman terävänä koko kuva-alalla jotta yksityiskohdat eivät häviä näkyvistä. Kuviossa 7 on visualisoituna kahden eri aukon koon eli f-luvun vaikutus syvyysterävyyteen. Molemmissa tapauksissa kamera on tarkennettuna kohteen virkaa toimittavan harmaan ympyrän



etureunaan. Ylemmässä tapauksessa aukon ollessa pieni,  $f/11$ , syvyysterävyysalue kattaa koko kohteen, ja tällöin saadaan koko kohde tallennettua terävänä. Kun aukkoa suurennetaan arvoon  $f/4$ , syvyysterävyysalue kapenee, ja osa kappaleesta jääkin alueen ulkopuolelle. Tuloksena on se, että kohteen taaempi puolisko jää sumeaksi eikä siitä voida helposti havaita yksityiskohtia, joka taas vaikeuttaa fotogrammetrista prosessia.



KUVIO 7. Aukon vaikutus syvyysterävyysalueeseen

Aukkoa pienentämällä saadaan siis helposti lisättyä syvyysterävyyttä, mutta pelkkään aukon koon muuttamiseen ei voida turvautua. Koska  $f$ -luku määrää kameran objektiivissa olevan fyysisen aukon koon, pienentämällä sitä vähennämme kennolle pääsevän valon määrää. Vähentynyttä valon määrää pitää kompensoida, esimerkiksi valotusaikaa tai itse kohteen valaisua muuttamalla. Lisäksi ongelmaksi muodostuu pienemmillä aukoilla ilmiö nimeltä diffraktio. Diffraktio on käsite, joka kuvaa aaltomuotoisen säteilyn (tässä tapauksessa valon) käyttäytymistä sen kohdatessa kappaleen, kuten kameran aukon. Aallot muuttavat muotoaan ja suuntaansa aukon kohdalla, ja tästä johtuen ne eivät kohdistukaan kennolle enää oikeille paikoilleen. Valokuvauksen näkökulmasta tämä vaikuttaa käytännön tasolla siten, että tiettyyn pisteeseen asti aukkoa pienentämällä saavutetaan terävyyden osalta positiivisia vaikutuksia syvyysterävyyden kasvaessa, mutta vähitellen koko kuva alkaa sumentua hieman diffraktion vuoksi. (Long 2009; Rockwell 2012.)

Syvyysterävyyden ja kuvanlaadun kannalta tulisikin harkita käytettäviä asetuksia tilannekohtaisesti. Jos kohde on kovin tasainen, esimerkiksi rakennuksen seinä, syvyysterävyys ei ole niin suuri ongelma kuin ihmisen kasvoja suhteellisen läheltä kuvattaessa. Yleisenä ohjenuorana voidaan pitää kuitenkin sitä, että useimmissa tilanteissa lähifotogrammetrian tarpeisiin parhaat tulokset saadaan käyttämällä mahdollisimman suurta aukkoa, mutta kuitenkin arvoa jolla saavutetaan tilanteeseen riittävä syvyysterävyys. Optimaalisen aukon löytäminen voi vaatia hieman kokeilua, mutta yleensä se asettu arvojen  $f/8$  ja  $f/11$  välille (Rockwell 2006).

Yksittäisten kuvien teknisen laadun lisäksi tulee huomioida, että koska kuvia verrataan keskenään, on tärkeää että kuvat ovat tasalaatuisia. Kameran asetusten, valaistuksen, etäisyyden kohteeseen ja muiden muuttujien tulisi säilyä eri kuvien välillä mieluiten mahdollisimman samankaltaisina, jotta vertailu olisi helpompaa suorittaa.

## **4.2 Kuvattava kohde ja ympäristö**

Kuten luvussa 2.2.2 mainittiin, skannattavalla kohteella voi olla suuri merkitys mittaamisen onnistumisen kannalta. Huonoimmassa tapauksessa kohde voi olla sellainen, että sen tallentaminen fotogrammetrian keinoin ei ole lainkaan mahdollista.

Tietynlaiset pinnat ovat haasteellisia: tasaiset, yksiväriset pinnat joissa on vähän (tai ei lainkaan) pinnan muodon tai kuvioinnin vaihteluita ovat yleensä hyvin hankalia käsiteltäviä, sillä niistä ei löydy kiintopisteitä joihin kuvia analysoivat algoritmit voisivat "tarttua". Tällaisissa tilanteissa apua voidaan hakea kohdemerkeistä joilla rikotaan monotonista pintaa, mutta yleisesti ottaen kovin tasaisia, tekstuurittomia pintoja tulisi välttää. Läpinäkyvät tai voimakkaasti heijastavat kohteet ovat vaikeimpien mahdollisten kohteiden joukossa, sillä ne voivat näyttää eri katselukulmista täysin erilaisilta. Heijastavat tai kiiltävät pinnat luonnollisesti siksi, että pinnalla näkyvän heijastuksen kirkkaus, koko ja muoto vaihtelee pinnan sekä valolähteen välisen kulman mukaan. Läpinäkyvät pinnat

kuten ikkunalasit puolestaan sekä heijastavat, että näyttävät lävitseen taustalla olevat kohteet. Luonnollisesti myös tällaiset kohteet kuuluvat vältettävien listalle - tyydyttäviäkään tuloksia kovin kiiltävistä tai läpinäkyvistä kohteista voi olla erittäin vaikeaa saada. (Kjellman 2012, 22-23; Luhmann ym. 2011.)

Ainakin ikkunalasien mallintaminen olisi huomattavasti helpompaa hoitaa jälkeinpäin, kuin taistella niin sanotusti tuulimyllyjä vastaan. Yksi ratkaisu olisi esimerkiksi rakennuksen julkisivun tapauksessa peittää ikkunat jollain mattapintaisella materiaalilla kuten pahvilla, jolloin eliminoidaisiin täysin heijastuksen aiheuttamat ongelmat. Lisäksi tällaiseen pintaan olisi helppo merkitä käsin kiintopisteitä. Joidenkin heijastavien pintojen, kuten ihmisen silmien, tapauksessa tulee kuitenkin vain pyrkiä minimoimaan heijastusten määrä esimerkiksi valaistuksen avulla kompensoimalla.

Myös kohteen muodolla on vaikutusta käytettäviin työskentelymetodeihin ja mahdollisesti prosessin onnistumiseen. Tämän projektin aikana suoritettujen käytännön testien aikana havaittiin, että orgaaniset, pehmeät muodot kuten ihmisen kasvot tallentuvat paremmin alkuperäiskohteelle uskollisena kuin kovat, geometriset pinnat. Terävät reunat yleensä ovat 3d-mallissa hieman pyörityneitä fyysiseen kohteeseen verrattuna. Lisäksi erityisesti katvealueita aiheuttavat päällekkäiset rakenteet tuottavat päänsäryä. Esimerkiksi rakennuksen katon rajassa joka suuntaan risteilevät ilmastointiputket vaativat ylimääräistä työtä, koska sitä mitä emme voi nähdä, emme voi myöskään mallintaa. Tällaisessa tilanteessa täytyy vain pyrkiä ottamaan riittävästi kuvia eri kuvakulmista, jotta kohteen muoto saadaan tallennettua mahdollisimman yksityiskohtaisesti joka suunnalta. Kompromisseja voidaan joutua kuitenkin tekemään, sillä joskus kohdetta ei vain ole mahdollista kuvata joka suunnalta - silloin täytyy hyväksyä se, että katvealueet jäävät mallintamatta.

Kuvattavan kohteen ympäristöllä on myös merkitystä. Yleisesti ottaen olisi eduksi, jos kuvattava kohde erottuisi selkeästi taustastaan ja tausta olisi mahdollisuuksien mukaan yksinkertainen ja "siisti" - monivärinen ja liikkuvia kohteita täynnä oleva tausta aiheuttaa lisää työtä prosessointivaiheeseen (Kjellman 2012, 22). Kaikissa tilanteissa tämä ei kuitenkaan onnistu, ja joskus kuvattava kohde voikin olla

ympäristö itse, kuten jokin suhteellisen iso ulkoilmakohde, vaikkapa toriaukio patsaineen ja suihkulähteineen. Yksittäisen kohteen tapauksessa taustasta löytyvistä kiintopisteistä voi olla hyötyä kameroiden orientaation määrittämisessä, sillä tärkeällä ehdolla että taustan kohteet pysyvät muuttumattomana kuvien ottamisen ajan (Agisoft 2012a). Siksi olisikin hyvä aina pyrkiä mahdollisuuksien puitteissa tuomaan kohde sellaiseen ympäristöön, jossa olosuhteet ovat kontrolloidut - esimerkiksi valokuvausstudio soveltuu tällaisen käyttöön paremmin kuin hyvin.

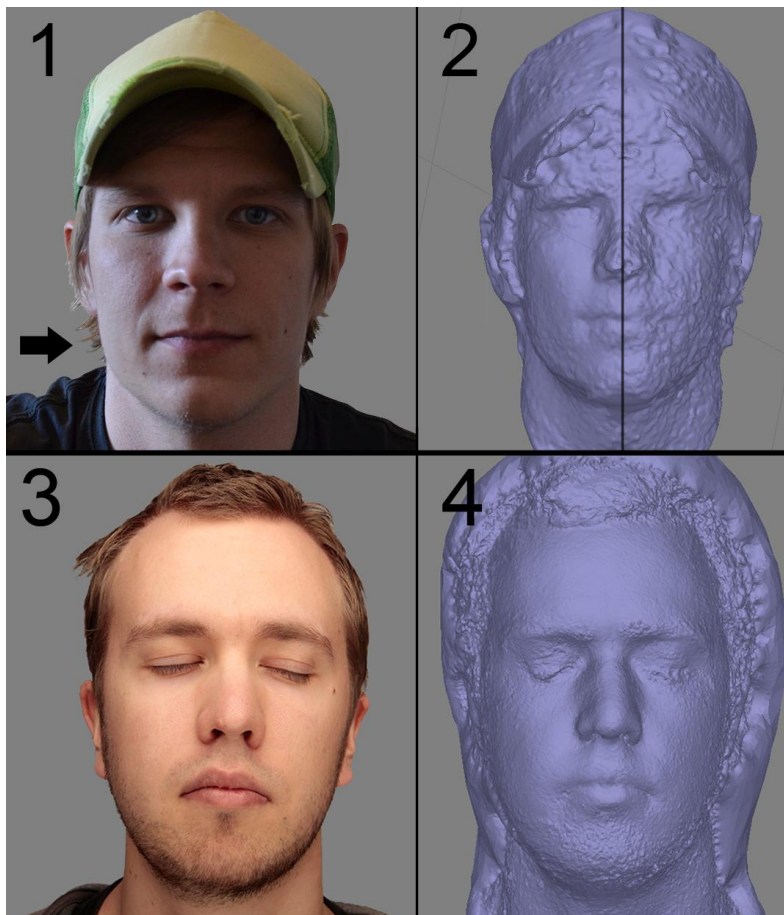
### 4.3 Valaisu

Kontrolloidun ympäristön vahvuuksiin kuuluu se, että valaistuksesta on helpompi saada halutun mukainen. Valaistus onkin hyvin tärkeässä roolissa kuvausympäristöstä puhuttaessa. On tietenkin itsestään selvää, että valoa tulee olla riittävästi, mutta valon laadulla on lähes yhtä suuri rooli kuin valon määrällä. Lähifotogrammetriassa olisi siksi hyvin suotavaa, että valaistus hoidettaisiin mahdollisimman tasaisesti, toisin sanoen hyödynnettäisiin diffuusia eli hajotettua valoa terävän valaistuksen sijaan.

Valon voidaan sanoa olevan terävää, silloin kun valonlähde lähenee pistemäistä kohdetta. Esimerkiksi tyypillisen taskulampun pienen polttimon valo nimenomaan halutaan kohdistaa pienelle alueelle, ja lamppu tuottaakin selkeästi rajatun, terävän valokeilan. Terävälle valolle ominaista on pinnan pientenkin epätasaisuuksien korostuminen, sekä selkeiden, tummien varjojen syntyminen. Diffuusista valosta malliesimerkkin tarjoaa luonto - pilvisenä päivänä auringon normaalisti terävä valo pehmenee ja hajoaa valaisten kohteet tasaisesti. Valo ei näytä tulevan mistään yksittäisestä suunnasta, eikä selkeitä varjoja synny. Tällaista valaistusta voidaan jäljitellä studio-olosuhteissa käyttämällä erinäisiä tekniikoita valon pehmentämiseen. Yleisesti ottaen valoa hajotetaan heijastamalla se jonkin suuren pinnan, kuten katon, seinien tai erillisten reflektoreiden kautta. Lisäksi kohdevalojen tai salamoiden valoa voidaan entisestään pehmentää käyttämällä erityisesti tarkoitukseen valmistettuja valon hajottajia eli diffuusoreita, esimerkiksi niin sanottuja softboxeja tai sateenvarjon muotoisia hajottajia (Busch

2006, 211-214). Usean diffuusin valonlähteen yhteistyöllä saadaankin sitten aikaan valaisutilanne, jossa kohde on tasaisesti valaistu joka puolelta eikä kohteen pinnalle synny selkeitä varjoja.

Tasaisen valaistuksen edut lähifotogrammetriassa ovat ilmeiset. Tasainen valaistus ei siis aiheuta varjoja kohteen pinnalle. Tästä on hyötyä, koska varjostetuilla alueilla yksityiskohtien erottuminen heikkenee, joka vaikuttaa suoraan tuloksien laatuun, kuten ilmenee kuviosta 8. Ylemmässä kuvaparissa valaistustilanne on vähintäänkin huono. Vaikka toinen puoli kasvoista on kohtalaisen hyvin valaistu, suurin osa valosta tulee kohdassa 1 olevan nuolen osoittamasta suunnasta. Tämä heittää kasvojen toiselle puoliskolle selkeän varjon, ja tämän varjon aiheuttama toispuoleinen epätarkkuus mallissa on selkeästi nähtävissä kohdassa 2. Lisäksi kuvattavan kohteen päässä oleva lippalakki varjostaa kasvoja entisestään, vaikeuttaen valaisua.



KUVIO 8. Valaisun vaikutus kolmioverkkomallin pinnan tarkkuuteen

Kuvion 8 alemmassa kuvaparissa valaistuksesta on saatu ylempiä kuvia huomattavasti tasaisempi hajottamalla usean studiosalaman valoa softboxeilla. Kasvoille ei muodostu yhtä selkeitä varjopaikkoja, ja tasaisen valon vaikutus näkyikin huomattavasti tasalaatuisempuna kolmioverkkona kohdassa 4. Lisäksi vertaamalla kohtia 2 ja 4 keskenään, huomataan että oikeanlaisella valaistuksella on positiivinen vaikutus koko mallin yleiseen tarkkuuteen ja laatuun - tasaisesti valaistussa mallissa erottuu huomattavasti hienojakoisempia yksityiskohtia kuin ylemmässä mallissa.

Valaisun tasaisuudella on myös muita laatuun vaikuttavia tekijöitä. Valon tasaisen leviämisen vuoksi se auttaa vähentämään heijastuksia tekemällä niistä pehmeämpiä. Diffuusikaan valo ei kuitenkaan poista heijastusten kieltämättä suurta ongelmallisuutta kokonaan, mutta se lievittää ongelmaa hieman. Koska koko prosessissa peräänkuulutetaan kuvien keskinäistä samankaltaisuutta, on tasainen valo tässäkin suhteessa hyödyksi. Esimerkiksi yksittäisellä terävää valoa tuottavalla, kamerassa kiinni olevalla salamalla valaistaessa kohteen pinnalle ja ympäristöön piirtyisi selkeitä varjoja. Nämä varjot näyttäisivät erilaiselta joka kuvakulmasta (koska valonlähde liikkuu kameran mukana). Tämä taas vaikeuttaisi analysointiprosessia huomattavasti, sillä kuvasta toiseen muuttuvat varjot taistelevat yhtä fotogrammetrian perussäännöistä vastaan: kohteen tulee näyttää samalta jokaisessa kuvassa.

Varjojen eliminoinnista hyödytään myös siten, että valmiin 3d-mallin valaistus voidaan hoitaa jälkikäteen 3d-mallinnusohjelmiston avulla. Jos oletetaan, että hyödynnetään luvussa 3.4.3 mainittua automaattista tekstuurien generointia epätasaisesti valaistuun malliin, varjot tallentuvat myös tekstuurikarttaan. Tällaista mallia jälkeenpäin keinotekoisesti valaistaessa olisivat tekstuuriin tallentuneet varjot sekä mallinnusohjelmistossa generoidut varjot keskenään ristiriidassa ja tulos näyttäisi kaikin puolin sekavalta.

#### 4.4 Kuvaaminen

Kuvausprosessin vaikutus lopputulosten laatuun näkyy muutenkin kuin vain kuvien teknisen laadun puolesta. Lähes yhtä tärkeää kuin mitä kuvataan, on se miten kuvataan. Käytännön ratkaisut kuvaamisessa kaluston ja työskentelyn suhteen vaikuttavat sekä saataviin tuloksiin että koko prosessin sujuvuuteen.

Vaikka kaikki kuvat olisivat laadultaan aivan huippuluokkaa, fotogrammetrinen prosessi voi jäädä alkutekijöihinsä ja tulokset saamatta, ellei kuvia ole tarpeeksi ja niiden välillä ole riittävästi keskinäistä peittoa (overlap). Kuvien peitto tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että vierekkäisten kuvien kuva-alojen tulisi mennä hieman "päällekkäin" eli kohteen samojen kiintopisteiden tulisi näkyä useammassa kuin yhdessä kuvassa. Peiton kattavuutta voidaan kuvata prosentuaalisella suureella: oletetaan että kuvasta 1 mitataan 100 kiintopistettä, ja näistä kiintopisteistä 89 näkyy myös kuvassa 2, joka on otettu hieman eri kulmasta. Tällöin voidaan sanoa, että näiden kahden kuvan keskinäinen peitto on 89%, joka on varsin hyvä lukema. Ei ole olemassa yksittäistä standardilukemaa riittävälle peitolle, mutta jonkinlaisena alarajana voidaan pitää ilmafotogrammetriassa usein sovellettua 60% sääntöä: vierekkäisten kuvien peiton suositellaan olevan vähintään sen verran. (ISPRS 2008, Vinni 2003). Luonnollisesti kuitenkin mitä enemmän peittoa kuvaparien välillä on ja mitä useammassa kuvassa kohteen piste näkyy, sitä enemmän pisteitä voidaan mitata ja sitä tarkempiin tuloksiin on mahdollista yltää.

Lähifotogrammetriassa kohteen kuvaaminen joka suunnalta edellyttää käytännössä jonkin näistä kolmesta perusskenaariosta: kamera liikkuu kohteeseen nähden, kohde pyörii kameran pysyessä paikoillaan, tai käytetään useaa kameraa. Eri keinoja voidaan tietenkin yhdistää, esimerkiksi rakentamalla usean kameran järjestelmä jolla saadaan 45 asteen peitto kerrallaan kuvattua, ja joko kameroita tai kohdetta sitten pyöritetään toisen ympäri. Eri kuvausmetodien valinta riippuu kuvattavasta kohteesta, sekä tietyissä määrin käytettävissä olevista resursseista.

Staattisen kohteen, kuten ulkona olevan patsaan, kuvaamiseen yksittäinen kamera riittää varsin hyvin. Kohteen voidaan luottaa pysyvän visusti paikoillaan ja

mahdollisesti taustalla tapahtuvat muutokset (kuten liikkuvat autot tai pilvet taivaalla) voidaan helposti rajata kuvista pois prosessointivaiheessa. Hyvin toteutettuna tällainen järjestely on nopea, tarkka ja kustannustehokas vaihtoehto. Yksittäisellä kameralla voidaankin saada staattisista kohteista hyvinkin korkealaatuista mittausdataa, olettaen että kuvien tekninen laatu sekä peitto ovat kunnossa.

Kuvattaessa elollista objektia, kuten ihmistä, työskentely monimutkaistuu hieman. Tämänkin projektin testeissä on kohtalaisen hyvällä menestyksellä skannattu ihmiskasvoja vain yhtä kameraa käyttämällä, joten tulosten saaminen vain yhdellä kameralla toki on mahdollista. Ongelmalliseksi tilanteen tekee kuitenkin kohteen elollisuus, sillä kovista pinnistelyistäkin huolimatta mallina poseeraava henkilö luultavasti liikkuu eri kuvien välillä hieman. Suuret muutokset asennossa voivat johtaa täydelliseen epäonnistumiseen, pientenkin muutosten jo vaikuttaessa laatuun negatiivisesti. Kohtuullisen hyviin tuloksiin voidaan päästä käyttämällä pyörivää alustaa, ja yhtä tai useampaa staattista kameraa. Kohteesta otetaan kuvat yhdestä kuvakulmasta, alustaa pyöräytetään hieman ja otetaan seuraavat kuvat. Tätä toistetaan kunnes ollaan saavutettu 360 asteen peitto. Tällaisen niin sanotun "turntable" - järjestelmän kanssa tulee kuitenkin kiinnittää vielä tavallista suurempaa huomiota kohteen liikkumattomuuteen, sekä tausta tulee poikkeuksetta rajata kuvista pois.

Monimutkaisin toteutustapa esimerkiksi juuri ihmisen skannaamiseen on järjestelmä, jossa hyödynnetään niin montaa kameraa että kohde saadaan kuvattua kerralla joka suunnasta. Tavoitellusta laadusta riippuen kameroiden määrä voi nousta kovinkin suureksi (useista kymmenistä jopa sataan kameraan). Tällaisen järjestelmän edut ovat kuitenkin selkeät: kunhan kamerat synkronoidaan ottamaan kuvat yhtä aikaa, eliminoidaan täysin elollisen kohteen liikkumisen aiheuttamat ongelmat ja laatu paranee sen johdosta. Tämän kaltaisella 360 asteen järjestelmällä voidaankin toteuttaa eräs 3d-skannauksen erikoistapaus, eli kohteen liike saadaan pysäytettyä vaikkapa kesken ilmaan hyppäämisen. Muilla tekniikoilla tällainen ei ole käytännössä mahdollista. Jo pelkästään vaadittavan kalustomäärän vuoksi näin ison järjestelmän hankkiminen on kuitenkin suhteellisen hintavaa sekä



vaatii käytön puolesta osaamista, mutta oikein hyödynnettynä sillä päästään pienellä vaivalla erittäin tarkkoihin tuloksiin.

#### 4.5 Käytettävä kalusto

Kuten monessa muussakin asiassa, on fotogrammetriassa käytettävien työkalujen valinnalla suuri vaikutus laatuun. Monesti kuulee sanottavan valokuvaukseen liittyen, että "ei se kamera vaan se kuvaaja" - tällä viitataan siihen, että hyvä valokuvaaja saa huonollakin kameralla aikaan näyttävän otoksen. Fotogrammetrian kannalta ikävä kyllä kuvien taiteellinen arvo ei merkitse mitään, vaan tarvitaan kylmän teknisesti laadukkaita kuvia. Jos yhtälöstä poistetaan muut laatuun vaikuttavat tekijät kuten ympäristön vaikutus, kuvaajan ammattitaito sekä kohteen ominaisuudet - jäljelle jää enää käytettävän kaluston vaikutus lopputuloksen laatuun. Käytännössä tämä tarkoittaa siis datantallennusvälineenä toimivan kameran teknisiä ominaisuuksia.

Vaikka fotogrammetria itsessään ei asetakaan rajoituksia käytettävän kameran suhteen, on tiettyjä asioita jotka tulisi huomioida kameroita valittaessa. Optimaalisissa olosuhteissa kameran laatu onkin pohjimmiltaan laadun kannalta tärkein rajoittava tekijä, sillä rautainenkaan ammattitaito ei pysty lisäämään heikkotasaisen kameran kuviin lisää tarkkuutta eikä poistamaan huonon optiikan aiheuttamia vääristymiä kuvissa. Yleisesti ottaen tulisikin siis pyrkiä käyttämään korkealaatuisia kameroita.

Ehkäpä parhaan hinta-laatusuhteen fotogrammetriseen käyttöön tarjoavat digitaaliset järjestelmäkamerat. Nykyään jo edullisemmatkin mallit ovat erottelukyvyltään ja ominaisuuksiltaan riittävän hyviä tarkkojen tuloksien saamiseksi. Järjestelmäkameroiden vahvuuksiin voidaan lukea kennon korkea resoluutio (kuten luvussa 4.1 todettiin, korkealla resoluutiolla on suuri vaikutus tarkkuuteen), monipuoliset säätöominaisuudet sekä mahdollisuus käyttää korkeatasoista optiikkaa. Luonnollisestikin myös edullisempia ja yksinkertaisempia kameroita voidaan käyttää, mutta heikompi kuvanlaatu sekä huonommat

hallintamahdollisuudet asettavat rajan niillä saatavien tulosten laadulle. (ISPRS 2008.)

Kameran resoluution sekä korkealaatuisen optiikan lisäksi rekonstruktion laatuun vaikuttaa se, mitä polttoväliä kuvatessa käytetään. Laajakuvaisella objektiivilla (lyhyt polttoväli) kuvatessa kolmiomittauksen tulokset ovat yleensä hieman parempia kuin tele-objektiiveilla (suuri polttoväli), sillä lyhyt polttoväli korostaa kohteen pisteiden välisiä mittasuhteita. ISPRS kuitenkin suosittelee, että alle 20mm polttovälejä tulisi välttää, sillä liian laajalla kuvatessa objektiivin vääristymät haittaavat mittaamista liiaksi (ISPRS 2008). Lisäksi suositellaan, että polttoväliä ei muutettaisi lainkaan eri kuvien välillä - tämä luonnollisesti pätee myös usean kameran käyttöön, jossa kameroiden asetusten tulisi olla keskenään samanlaisia, polttoväliä myöten. Olisi myös eduksi jos voitaisiin käyttää kiinteän polttovälin, niin sanottuja prime-objektiiveja, sillä niiden optinen laatu on yleensä vaihtuvapolttovälisiä (zoom-objektiiveja) parempi, ja niiden vääristymämallit on helpompaa laskea.

Kompaktikameroiden tai esimerkiksi web-kameroiden tapauksessa näihin asioihin vaikuttaminen on yleensä paljon hankalampaa, jopa mahdotonta. Ainakin web-kameroiden tapauksessa säätömahdollisuudet ovat yleensä erittäin rajalliset. Edullisemmissä kompaktikameroissa polttoväliä kyllä voidaan muuttaa, mutta muutoin säätömahdollisuudet ovat vähäiset. Järjestelmäkameroiden puolesta puhuu myös se, että erityisesti useaa kameraa käytettäessä etähallintaohjelmistojen käyttö luonnistuu hyvin, sillä erilaiset ohjelmointirajapinnat tukevat nykyaikaisia järjestelmäkameroita hyvin. Joitakin kompaktikameroita voidaan myös käyttää etähallintaohjelmiston kautta kohtuullisen hyvin, mutta usean web-kameran hallinta on vaikeaa, jopa turhauttavissa määrin, kuten luvussa 5.3 tullaan toteamaan.

## 5 SUORITETUT TESTIT

Työn käytännön osuudessa suoritettiin erinäisiä testejä, joiden avulla pyrittiin vastaamaan tutkimusongelmiin. Tavoitteena olikin testata prototyyppien avulla muutamaa erilaista käytännön järjestelyä, ja näiden testien perusteella selvittää mahdollisia ongelmakohtia sekä tutkia, löytyykö joitakin selkeitä minimipuitteita fotogrammetrisen skannausjärjestelmän toteuttamiselle.

Käytännön toteutuksessa päädyttiin prototyyppilähtöiseen, iteratiiviseen työskentelytapaan, jossa aloitettiin yksinkertaisilla prototyypeilla ja siirryttiin vähitellen monimutkaisempiin testeihin. Jo ennen tätä projektia suoritettujen kokeilujen perusteella voitiin todeta, että yksittäisellä järjestelmäkameralla saadaan pienellä vaivalla lupaavia tuloksia aikaan. Yhden järjestelmäkameran käyttö olikin luonnollinen valinta ensimmäisen prototyyppijärjestelmän toteutukseen. Tällaisen askel kerrallaan etenevän työskentelyn luontainen etu on se, että mahdolliset ongelmakohdat havaitaan jo aikaisessa vaiheessa ja seuraavien prototyyppien suunnitelmaa voidaan jalostaa näiden havaintojen perusteella (Dogson, Gann, Salter 2005). Kuten John R. Schott toteaa kirjassaan, kaukokartoituksen alalla - kuten muutenkin - monimutkaisen prosessin voidaan sanoa olevan heikoimman lenkkinsä veroinen ja siksi tulisikin aina pyrkiä parantamaan heikoimman lenkin suoritusta (Schott 2007, 557). Yhtenä tärkeimmistä tavoitteista suoritetuissa testeissä olikin selvittää niitä tekijöitä järjestelmässä, jotka vaikuttavat negatiivisesti prosessin onnistumiseen, sekä etsiä järjestelmistä heikkouksia, jotta niihin voitaisiin puuttua.

Eri prototyyppien testit suoritettiin Centria AMK:n Ylivieskan yksikön valokuvausstudion tiloissa. Studio oli luonnollinen vaihtoehto testien suorittamisen kannalta, sillä se tarjosi luvuissa 4.2 ja 4.3 mainitun kaltaiset kontrolloidut olosuhteet, ja näin voitiin vähentää ulkoisten häiriötekijöiden vaikutusta testeihin. Lisäksi studiossa oli valmiiksi saatavilla testeihin tarvittavaa kalustoa, kuten studiovaloja ja kameratelineitä.

Taulukossa 1 on lueteltuna testaamiseen käytetyt eri kamerat. Neljä ensimmäistä kameraa ovat digitaalisia järjestelmäkameroita, ja Microsoftin valmistama Lifecam HD5000 on automaattitarkenteinen web-kamera. Kameroista on taulukossa lisäksi kerrottu kennon tarkkuus megapikseleinä, sekä käytetyn objektiivin tiedot. Järjestelmäkameroiden osalta kaikissa testeissä käytettiin käsitarkennusta, sekä mahdolliset kuvanvakautusjärjestelmät poistettiin käytöstä.

TAULUKKO 1. Testeissä käytetyt kamerat

Kamera	Mpix	Objektiivi
Canon 7D	18	18-135mm
Canon 600D	18	18-135mm
Canon 1000D	10,1	18-55mm
Microsoft Lifecam HD5000	0,9	-

Ohjelmistoratkaisuissa päädyttiin datan prosessointiin käyttämään kaupallisen Agisoft Photoscan - ohjelmiston perusversiota (Standard Edition). Järjestelmäkameroiden etähallintaan käytettiin Smart Shooter - ohjelmistoa, jolla onnistui usean järjestelmäkameran etähallinta yhtä aikaa sekä kuvien automaattinen lataaminen tietokoneelle. Kuvien tarkasteluun sekä Photoscan - ja Smart Shooter - ohjelmistojen suorittamiseen käytettiin Asuksen N56VJ-mallista kannettavaa tietokonetta, jossa on Intelin neliytiminen i7-3630QM - prosessori sekä 8Gb DDR3-muistia.

### 5.1 Prototyyppi 1: yksi järjestelmäkamera

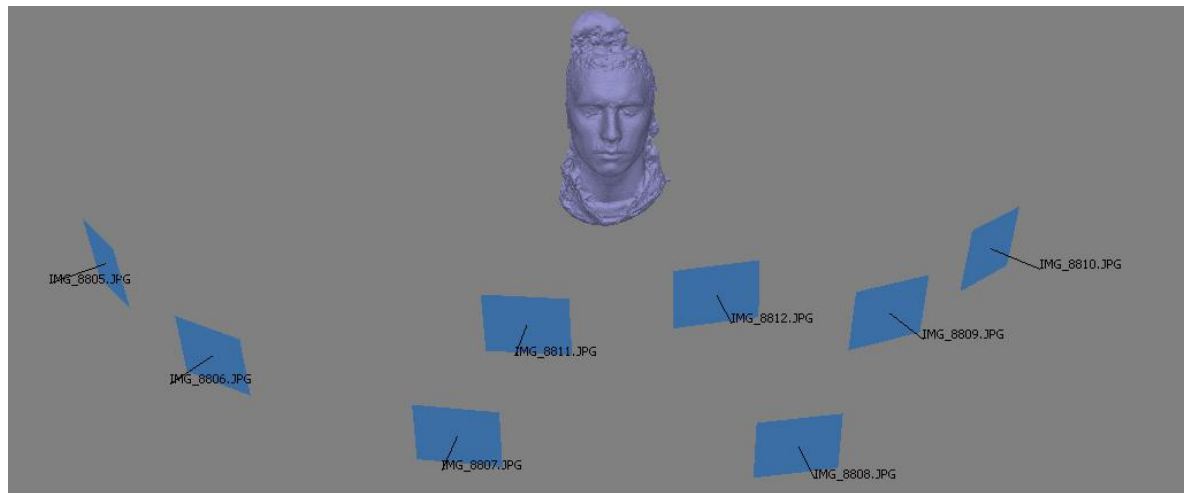
Ensimmäisen prototyypin tarkoitus oli toimia tietynlaisena kontrollituloksena muita testejä varten. Aikaisemmat kokemukset olivat osoittaneet, että yhdellä järjestelmäkameralla saadaan hyvissä olosuhteissa tuotettua kasvoista kohtuullisia malleja. Suunnitelmana oli, että kuvataan kohteen kasvojen etuosa, pyrkimyksenä saada mahdollisimman korkealaatuinen malli. Tämän testin tuloksena haettiin kontrollidatan lisäksi tietämystä siitä, montako kuvaa kasvojen mallintaminen käytännössä minimissään vaatii.

### 5.1.1 Toteutettu järjestelmä

Tämän prototyypin testeissä toteutettu kuvausjärjestelmä oli hyvin yksinkertainen. Ensimmäisessä testissä kuvat otettiin Canonin 600D-järjestelmäkameralla ja 18-135mm zoom-objektiivilla, toisessa testissä vastaavasti käytettiin 7D:tä ja samaa objektiivia. Valaistus hoidettiin kahdella studiosalamalla, joiden valo pehmennettiin softboxien avulla. Kamera kytkettiin salamoihin kameran salamakenkään sopivan adapterin ja kaapelin avulla. Testauksissa ei käytetty kameralle jalustaa, sillä salamoiden käytön vuoksi suljinnopeus voitiin käyttää nopeaa valotusaikaa, joten vaaraa kuvien tärähtämisestä ei käytännössä ollut.

### 5.1.2 Testaus

Ensimmäisessä testissä kohteesta otettiin yhteensä 8 kuvaa kasvojen etuosasta Canonin 600D-kameralla, polttoväli kaikissa kuvissa oli 33mm. Kuvat otettiin käsivaralla kohteen silmien tasalta, silmämääräisesti pyrkien pitämään kuvien välisen etäisyyden keskenään samanlaisena jotta saavutettaisiin tasainen peitto. Otetut kuvat syötettiin sellaisenaan Photoscanille prosessoitavaksi. Kuviossa 9 näkyy Photoscanin laskemat positiot kameroille, sekä kasvoista muodostettu teksturoimaton malli. Mallista tuli suhteellisen onnistunut, mutta kasvojen sivuja kohti mentäessä tarkkuus alkoi tippua ja esimerkiksi korvat jäivät kokonaan onnistuneesti mallinnetun alueen ulkopuolelle, vaikka reunimmaiseta kuvata olivatkin olivatkin aika viistosti kohteen sivuilta.



KUVIO 9. Ensimmäisen prototyypin ensimmäisen testin kamerapositionit

Seuraavaan yhden kameran testiin kuvien keskinäistä väliä pienennettiin, ja kuvia otettiin vain 6 kappaletta. Tällä kertaa käytettiin Canonin 7D-kameraa ja polttoväliä 60mm. Tulokset olivat hyvin samankaltaisia ensimmäisen testin kanssa, mutta tällä kertaa onnistuneesti mallinnettu osio päästä ulottui hieman pidemmälle pään sivuille.

### 5.1.3 Huomiot

Oli mielenkiintoista havaita kuinka ensimmäisen prototyypin kaksi testiä poikkesivat toisistaan mallin onnistumisen suhteen. Ensimmäisen testin kameroiden positioista olisi voinut luulla, että Photoscan osaa tulkita kasvojen sivut suhteellisen hyvin. Ilmeisesti kuitenkin sivuille mentäessä kuvien keskinäinen peitto ei ollut tarpeeksi suuri. Toisessa testissä vaikka kuvamäärä oli pienempi, suuremmasta peitosta oli huomattavaa hyötyä. Photoscan löysi enemmän kiintopisteitä kuudesta hyvin päällekkäin asettuvasta kuvasta kuin kahdeksasta vähän huonommin toisiinsa täsmäävästä kuvasta, ja malli ulottui hyvälaatuisena korvien tasalle. Kuutta kuvaa pienemmällä määrällä tulosten laatu alkoi kuitenkin kärsiä, joten pelkästään kasvojen etuosaa koskevan skannauksen minimimääränä voidaan ensimmäisen prototyypin tapauksessa pitää kuutta kuvaa. Lisäksi kuten kuvioista 9 voidaan havaita, huolimatta pyrkimyksestä pitää kuvien

väläinen etäisyys toisiinsa sekä kameran etäisyys kohteeseen koko ajan vakiona, eivät kameroiden positiot kuitenkaan ole toisiinsa nähden kovin symmetrisesti linjassa. Käsivaralta kuvia otettaessa on siis suhteellisen hankalaa arvioida kameran sijaintia kuvitteellisella ideaalilinjalla.

## **5.2 Prototyyppi 2: web-kamera**

Jos ensimmäisen prototyypin tarkoitus oli kartoittaa kuvien minimimäärää, toisessa prototyypissa keskityttiin sitten tarkastelemaan sitä, kuinka paljon huomattavasti huonolaatuisemman kameran käyttö käytännössä vaikuttaa prosessin onnistumiseen sekä lopputuloksen laatuun. Ensimmäisen ja toisen prototyypin välillä on valtava ero jo pelkästään kameran resoluutiossa: ensimmäisen prototyypin kameroiden resoluutio on 20-kertainen verrattuna tämän prototyypin testeissä käytettyyn web-kameraan (18 Mp järjestelmäkamera ja 0.9 Mp web-kamera).

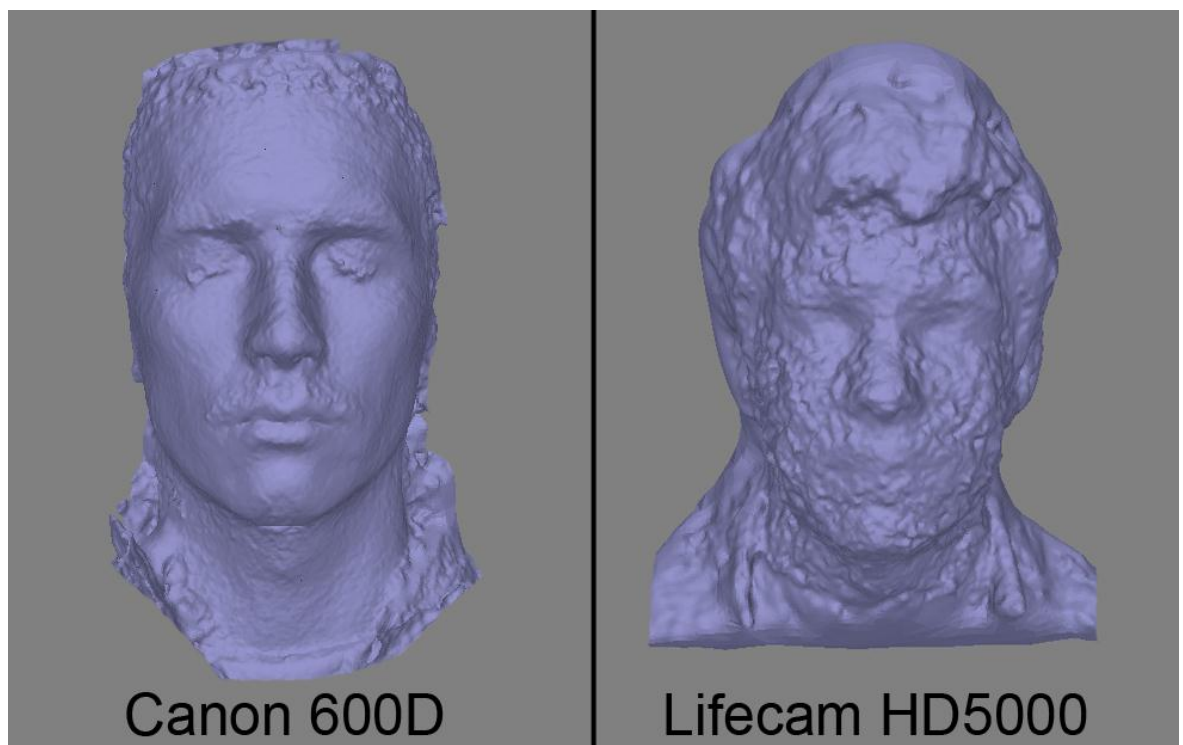
### **5.2.1 Toteutettu järjestelmä**

Toisen prototyypin järjestelmän toteutus seurasi hyvin pitkälti ensimmäisen prototyypin jalanjäljissä. Valaistuksen suhteen piti tehdä hieman muutoksia, sillä web-kameraa ei ollut mahdollista synkronoida salamoiden kanssa. Valaistuksesta saatiin kuitenkin riittävä, ja se saatiin pidettyä tarpeeksi tasaisena jotta muuttuneet valaistusolosuhteet eivät vääristäisi tuloksia. Tässäkin tapauksessa kuvaus suoritettiin käsivaralta kohteen pysyessä paikoillaan. Kamerana käytettiin Microsoftin HD-5000 - web-kameraa, ja kuvien ottaminen suoritettiin kannettavalla tietokoneella Microsoftin oman web-kamerasovelluksen kautta.

### **5.2.2 Testaus**

Kuvien ottaminen pyrittiin pitämään samankaltaisena kuin edellisessä prototyypissa jotta tulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Kuvia otettiin

siis 8 kappaletta kohteen silmien tasolta, jälleen silmämääräisesti pyrkien pitämään kuvien välisen etäisyyden keskenään vakiona. Kuvat syötettiin Photoscanille sellaisenaan prosessoitavaksi. Kuvista kiintopisteitä löytyi kohtuullinen määrä, ja mallin geometrian rakentaminen onnistuikin ilman ongelmia. Kuten oli etukäteen oletettavissa, web-kameralla otettujen kuvien pohjalta muodostettu malli oli huomattavasti aikaisempia huonolaatuisempi. Tämä vahvistaa osaltaan luvussa 4.1 mainitun resoluution erittäin suuren merkityksen tulosten kannalta. Kuvista 10 onkin erittäin helppo päätellä kuinka paljon kuvien korkeampi tarkkuus vaikuttaa mallin pinnan tarkkuuteen. Huomionarvoista tässä on myös se, että vaikka kuvattu kohde olikin eri henkilö, otettiin kohteista saman verran kuvia ja kuvien peitto sekä valaistus oli molemmissa sarjoissa likipitään sama. Vertailu näin kahta ääripäätä edustavan kameran välillä ei luonnollisesti ole kovinkaan reilu, mutta se ainakin korostaa onnistuneesti laadukkaan kameran merkitystä lähifotogrammetriassa.



KUVIO 10. Järjestelmäkameralla ja web-kameralla muodostetut mallit



### 5.2.3 Huomiot

Vaikka web-kameralla saatiin muodostettua jollakin mittapuulla lähes kohtuullinen malli, oli sen käyttö erittäin kömpelöä verrattuna järjestelmäkameraan. Web-kameran automaattitarkennuksella oli jatkuvasti vaikeuksia tarkentaa oikeaan kohtaan. Koska kameran säädöt olivat erittäin niukat (esimerkiksi valotusaikaan tai aukon kokoon ei päässyt vaikuttamaan ollenkaan), oltiin asetusten suhteen automatiikan armoilla, joka osaltaan aiheutti tärähtäneitä kuvia. Lisäksi oli erittäin hankalaa normaaliin kameraan verrattuna yrittää saada kohde pysymään kuva-alalla suunnilleen saman kokoisena, sillä kohteen osuminen kuva-alalle piti tarkistaa tietokoneen ruudulta. Kuvaukset jouduttiinkin suorittamaan useita kertoja uudestaan jotta saatiin tyydyttävä kuvasarja. Näitä ongelmia lievittäisi hieman web-kameran kiinnittäminen jonkinlaiseen jalustaan tai telineeseen, mutta silti käytettävyyden sekä sujuvuuden kannalta web-kamera saa ainakin käsivaralta kuvattaessa ala-arvoiset pisteet.

Tästä kaikesta epäkäytännöllisyydestä oli hyvin havaittavissa se, että web-kameroita ei ylipäätään ole suunniteltu valokuvien ottamista silmälläpitäen, ja useimmissa web-kameroissa valokuvien ottaminen on vain toissijainen toiminto videopuheluiden ja videon tallentamisen ohella. Välijohtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta, että web-kameran tasoisella kameralla kyllä pystytään tuottamaan fotogrammetrian avulla malleja, mutta teknisistä rajoitteista johtuen tuotosten laatu jää ikävän alhaiseksi.

### 5.3 Prototyyppi 3: usean kameran käyttö

Kolmannessa prototyypissä tarkoituksena oli soveltaa aikaisemmista prototyypeistä hankittua tietämystä, ja toteuttaa usean kameran järjestelmä. Alkuperäisen suunnitelman mukaan aikomus oli ensin kokeilla useaa web-kameraa, ja siirtyä sen jälkeen vasta järeämpiin laitteisiin. Kantavana ajatuksena tässä oli se, että yksinkertaisuutensa vuoksi web-kameroita olisi helpompi hallita isona joukkona kuin esimerkiksi järjestelmäkameroita.

Ongelmat kuitenkin alkoivat siinä vaiheessa, kun suoritettiin alustavia testejä kahdella keskenään samanlaisella web-kameralla. Web-kameran valmistajan oma hallintaohjelmisto ei osannut hallita kuin yhtä kameraa kerrallaan. Molemmat kamerat kyllä tunnistuivat, mutta vain yksi niistä pystyi olemaan aktiivisena. Kun asiaa alettiin tutkimaan hieman pintaa syvemältä, selvisi että ongelma juontaa juurensa kameroiden laiteajurien kautta laitetason protokolliin asti. Ongelman ydin on siinä, että web-kameroita ei nykyisellään ole tosiaan suunniteltu still-kuvien tallentamista ajatellen. Useimmista web-kameroista uupuu dedikoitu kuvien tallentamisominaisuus kokonaan, ja monissa kameroissa ratkaisu onkin tehty hieman kiertäen: kameran videovirrasta kaapataan yksittäinen ruutu joka tallennetaan sitten kuvatiedostona.

Tämä itsessään on sinällään toimiva ratkaisu, mutta koska laitevalmistajan oma hallintaohjelmisto ei tässä tapauksessa tukenut usean kameran yhtäaikaista hallintaa, käännyttiin kolmannen osapuolen sovellusten puoleen. Pitkällisenkään etsinnän ja tutkimustyön jälkeen ei kuitenkaan löytynyt valmista ratkaisua, joka olisi mahdollistanut usean web-kameran (joko identtisten tai keskenään erilaisten) yhtäaikaisen hallitsemisen. Monia lupaavia, avoimen lähdekoodin projekteja verkosta kyllä löytyi, mutta ne kaikki kuitenkin kaatuivat omiin ongelmiinsa. Ilmeisesti suurin syytä on laitetasolla selkeän standardoinnin puute: Windows-ympäristössä on vuosien saatossa ollut monta erilaista rajapintaa, joilla web-kameroiden kaltaisten laitteiden kanssa kommunikointi on hoidettu. Vuosien kuluessa ja tekniikan kehittyessä, vanhojen rajapintojen tuki on jätetty voimaan, mutta on samalla esitelty uusia, parempia rajapintoja. Tällä hetkellä tilanne onkin se, että osa web-kameroista käyttää eri rajapintoja ja protokollia kuin toiset.

Ongelman todettiin tässä vaiheessa paisuvan liian suureksi tämän projektin puitteissa ratkaistavaksi, joten suunnitelmiin jouduttiin tekemään muutos. Usean web-kameran järjestelmän rakentaminen haudattiin toistaiseksi ja siirryttiin suoraan usean järjestelmäkameran käyttöön.

### 5.3.1 Toteutettu järjestelmä

Web-kameroilla kohdattujen ongelmien jälkeen olikin positiivista huomata, että järjestelmäkameroiden etähallinta on web-kameroihin verrattuna hyvin helppoa. Markkinoilta löytyy kourallinen kaupallisia etähallintaohjelmistoja jotka tukevat nykyaikaisia järjestelmäkameroita kattavasti. Pikaisen vertailun jälkeen sopiva ohjelmisto löytyikin, ja alustavien testien jälkeen voitiin aloittaa prototyypin varsinaiset kokeilut. Ohjelmistolla onnistui usean kameran hallinta, esikatselu, sekä yhdellä komennolla toteutettava usean kameran laukaisu. USB-protokollan teknisistä rajoitteista johtuen aivan yhtäaikaiseen laukaisuun ei voida USB-yhteyttä hyödyntäen päästä, mutta tämän prototyypin tarkoituksiin kameroiden laukaisun pieni keskinäinen viive oli hyväksyttävissä.

Kokeiluja suoritettiin enimmillään neljällä järjestelmäkameralla yhtä aikaisesti kuvaten. Neljän kameran järjestelmässä käytössä oli 2 kappaletta Canonin 1000D-kameroita, yksi 7D sekä yksi 600D. Ensimmäiset testit suoritettiin vain kolmella kameralla, ilman 7D:tä. Kaikkien kameroiden polttovälit asetettiin testien ajaksi keskenään samaan arvoon, Valaisun kannalta käytettiin edellisestä prototyypistä hyväksi havaittua valoratkaisua, jossa erinäisiä kohdevaloja heijastamalla ja diffuusorein pehmentämällä saatiin aikaseksi tasainen valaistus. Salamoiden sijaan päädyttiinkin käyttämään jatkuvaa valaistusta kameroiden laukaisussa olevan pienen viiveen vuoksi.

Koska kolmella tai neljällä kameralla ei saada aikaan riittävää peittoa jos ne asetellaan tasaisesti kohteen ympärille, päädyttiin kamerat asemoimaan staattiseen muodostelmaan. Jotta kohteesta sitten saatiin kuvat joka puolelta, kohde pyöri oman akselinsa ympäri luvussa 4.4 mainitun periaatteen mukaisesti. Tässäkin suunnitelmana oli edetä iteratiivisesti: ensin kokeiltiin osittaista pään skannausta, sitten vähitellen edettiin kokonaisen ihmisen 360 asteen skannaukseen.

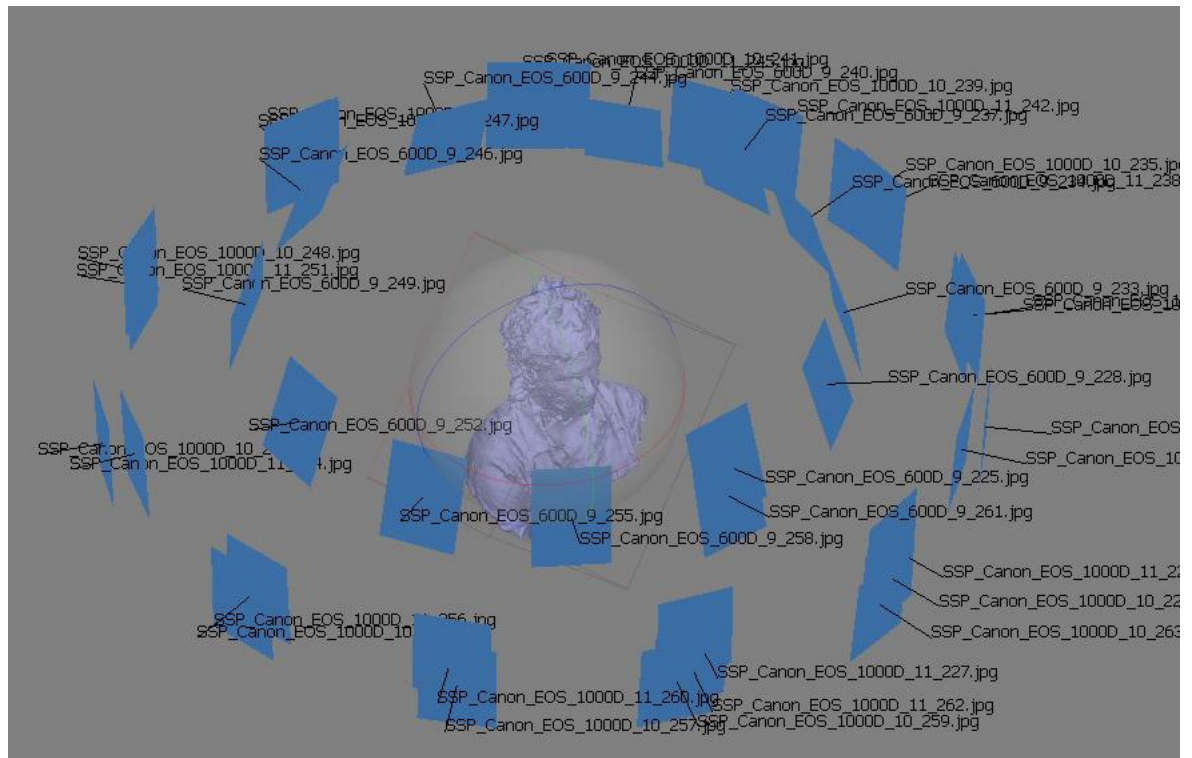
Viimeisen prototyypin tavoitteena oli lähinnä selvittää niin sanotusti "vajaan" monikamerajärjestelmän soveltuvuutta ihmisen skannaamiseen, erityisesti tilanteessa jossa kaikki kamerat eivät ole keskenään samanlaisia. Lisäksi pyrittiin

tutkimaan, löytyisikö kameroiden keskinäisille sijainneille jotain selkeästi parhaiten toimivaa järjestelyä.

### 5.3.2 Testaus

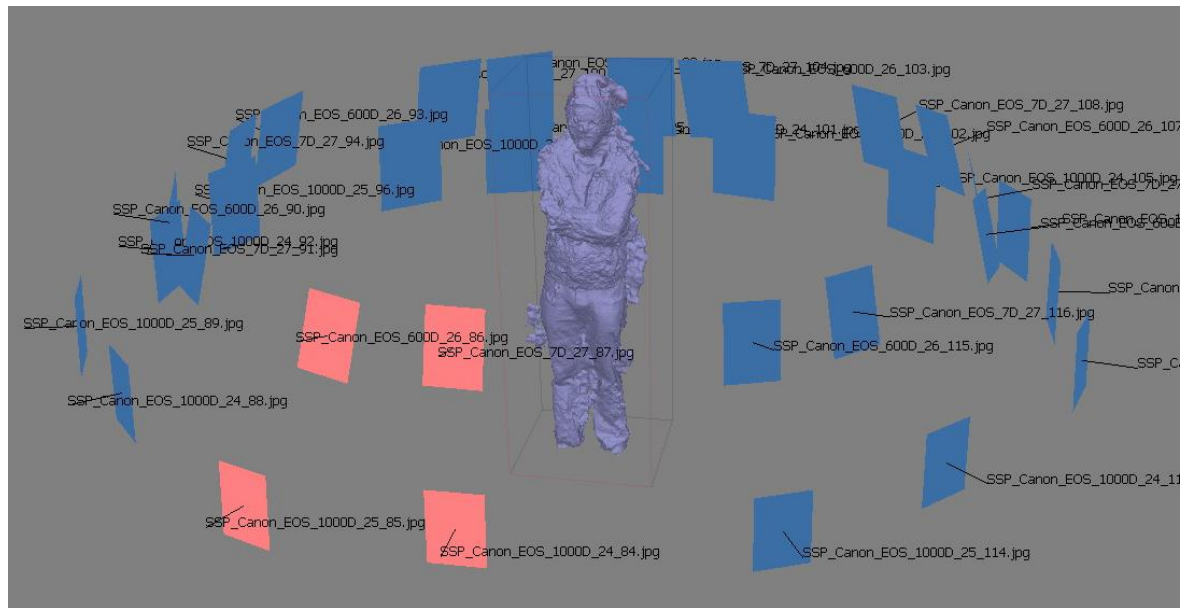
Ensimmäisessä testissä kolme kameraa asetoitiin samalle pystyakselille, niin että keskimäinen kamera on kohteen silmien tasalla, ja ylempänä ja alempana olevat kamerat olivat noin puolen metrin päässä keskimäisestä kamerasta, kaikkien kolmen kameran ollessa kohdistettuna keskelle kohdetta. Näin ylemmän ja alemman kameran kulma keskimäiseen nähden oli jotakuinkin 40 astetta. Kohteesta otettiin kolme kuvasarjaa kahdella käännöksellä, eli yhteensä yhdeksän kuvaa. Näiden kuvien pohjalta saatiin luotua kohtuullisen hyvä malli kasvojen etuosasta. Tämän testin jälkeen huomattiin, että kuvien värityksessä oli hieman eroavaisuuksia - kahden keskenään samanlaisen kameran eli 1000D:n värisävyt täsmäsivät toisiinsa, mutta 600D:n värimaailma oli muihin nähden hieman erilainen. Kameroiden valkotasapainot säädettiin manuaalisesti kohdalleen, mutta värit eivät siltikään vastanneet toisiaan täysin. Jo tässä vaiheessa siis huomattiin, minkälaisiin ongelmiin voidaan törmätä jos käytetään toisistaan eroavia kameroita saman kohteen kuvaamisessa.

Ensimmäisestä testistä rohkaistuneena päätettiin kokeilla koko pään kuvaamista. Kameroiden "muodostelmaan" tehtiin pieni muutos: ne asetettiin kolmion muotoon niin, että kaksi kameraa olivat rinnakkain alemmassa rivissä hieman kohteen silmien tason alapuolella, ja yksi kamera asetoitiin näiden väliin ja yläpuolelle, kuvaamaan kohdetta hieman yläviistosta, kuvion 11 osoittamalla tavalla. Kohteesta otettiin 13 kuvasarjaa, eli yhteensä 39 kuvaa. Photoscanilla prosessoinnin jälkeen oli jälleen aika tarkastella tuloksia, ja kuten kuvioista 11 huomataan, tämän testin järjestelmä onnistui suhteellisen hyvin. Kaikkien kameroiden positiot ovat järkevillä paikoilla, mutta mallin geometriassa on jonkin verran häiriöitä.



KUVIO 11. 360 asteen kuvausprototyypin kamerapositionit

Kolmannen prototyypin viimeiseen testiin lisättiin neljäs kamera, ja kameroiden muodostelmaa muokattiin vain hieman, sillä edellisen testin järjestely osoittautui toimivaksi. Neljäs kamera lisättiinkin ylempään riviin toisen kameran rinnalle, siten että kamerat muodostivat kolmion sijaan neliön. Lisäksi kameroita siirrettiin hieman kauemmaksi, jotta koko henkilö mahtuisi kuvaan. Kuviossa 12 näkyy tämän viimeisen testin kameroiden sijainnit kohteeseen nähden, ja siinä on punaisella korostettuna käytetty neljän kameran muodostelma, joka toistuu kohteen ympärillä. Yhteensä kohteesta otettiin 32 kuvaa, eli kahdeksan neljän kuvan settiä. Kuvioista huomataan myös, että varsinkin etualalla joidenkin kuvasarjojen väliin pääsi muodostumaan suhteellisen suuri väli, joten keskinäinen peitto jäi hieman huonoksi.



KUVIO 12. Kokovartalokuvauksen järjestelmän kamerapositiot

Viimeisessäkin testissä kameroiden orientointi onnistui hyvin, mutta 3d-malli jäi geometrialtaan käytännössä käyttökelttomaksi. Tähän syynä oli hyvin suurella todennäköisyydellä muita testejä suurempi muutos mallin asennossa eri kuvien välillä (seisaallaan olevan henkilön täytyi itse kääntyä, sillä pyöritettävää alustaa ei ollut käytettävissä), sekä liian yksiväriset vaatteet. Lisäksi kuvamäärä olisi voinut olla hieman suurempi, esimerkiksi 40 kuvaa, jolloin eri kuvasarjojen väliin jäävää alue oltaisiin saatu pienemmäksi ja kuvien keskinäistä peittoa näin parannettua. Testistä saatiin kuitenkin arvokkaita testituloksia, joten siinä mielessä lopullisen mallin epäonnistumisesta huolimatta testi itsessään oli menestyksekkäs.

### 5.3.3 Huomiot

Vaikka lähes kaikissa usean kameran testeissä tuotettujen mallien laatu jäikin etukäteen toivottua huonommaksi, saavutettiin testeillä kuitenkin halutut tavoitteet. Lisäksi testien tulokset olivat siinä mielessä rohkaisevia, että järjestelmän kovasti lisääntyneestä monimutkaisuudesta huolimatta testit onnistuivat noinkin hyvin.

Tärkeimmät huomiot tästä prototyypista liittyvät asioihin, joitten tiedettiin mahdollisesti aiheuttavan ongelmia jo ennen testien suorittamista. Kuten teoriaosuudessa todettiin, on ensiarvoisen tärkeää, että kohde pysyy muuttumattomana eri kuvien välillä. Tämän säännön kanssa kokeiltiin tahtomattakin hieman kepillä jäätä, ja se lopulta alkoikin vaikuttamaan tuloksiin negatiivisesti. Mallien kääntymisen yhteydessä pääsi mitä luultavimmin tapahtumaan hieman liikaa muutosta asennoissa, ja kameroiden värisäädöissä olisi voinut olla parantamisen varaa. Nämä ovat kuitenkin asioita, joihin on helppo vaikuttaa olemalla huolellisempi.

Lisäksi huomioitiin, että käytettyjen järjestelmäkameroiden välillä ollut suurehko resoluutioero ei tuntunut aiheuttavan suurempia ongelmia. Luultavasti parempiin lopputuloksiin oltaisiin kuitenkin päästy, jos kaikki käytetyt kamerat sekä objektiivit olisivat olleet keskenään samanlaisia.

## 6 TULOKSET JA POHDINTA

Ennen tämän opinnäytetyön aloittamista allekirjoittaneella ei juurikaan ollut kokemusta eikä tietämystä 3d-skannauksesta, puhumattakaan fotogrammetriasta. Fotogrammetria olikin vielä hyvin tuore tuttavuus tätä tähän työhön ryhdyttäessä. Kokemuksen puute ei kuitenkaan haitannut, sillä projektin mielenkiintoisuudesta sekä kirjoittajan loppumattomasta tiedonjanosta ja kokeilunhalusta johtuen työskentely tuntui mielekkäältä läpi projektin. Näin jälkeinpäin asiaa tarkastellessa olisi ehkä koko prosessin sujuvuuden sekä oppimisen kannalta ollut tehokkaampaa, jos tekniikan teoriaosuuteen olisi tullut tutustuttua ennen ensimmäisiä käytännön kokeiluja. Ennen tämän opinnäytetyön prototyyppeihin liittyneitä testejä tehdyt kokeilut menivätkin aika pitkälti "ensin hutkitaan ja sitten tutkitaan" - mentaliteetilla. Projektin alkupäässä ongelmiin törmätessä iski ensi turhautuminen, ja vasta epäonnistumisia seuranneen ongelmanratkontaprosessin kautta tuli perehdyttyä teoriaan, ja sitä kautta ymmärrettyä koko tekniikkaa paremmin. Monet asiat, jotka tuli opittua kantapään kautta, olisivatkin olleet paljon vaivattomampia jos olisi ensin malttanut tutkia asiaa hieman.

Kokisin projektin kokonaisuutena olleen menestyksekkäs. Vaikka matkalla kohdattiin välillä suuriakin ongelmia ja joidenkin vaikeuksien kohdalla seinä tuntui nousevan vastaan, saatiin projekti suoritettua kunnialla loppuun asti ja asetetut tavoitteet saavutettiin. Lisäksi vaikka jotkin matkan varrella ilmenneet ongelmat jäivätkin vaille välitöntä ratkaisua, se vain osoittaa jatkokehityksen ja -tutkimuksen tarpeen.

En voi kutsua itseni missään nimessä tämän työn päätteeksi fotogrammetrian ammattilaiseksi, mutta arvioin kuitenkin, että tiedän ja osaan asian tiimoilta nyt huomattavasti enemmän kuin ennen tämän opinnäytetyön aloittamista. Tästä projektista käteen jäikin valtavasti uutta tietoa ja osaamista, käytännön kokemuksia sekä myös arvokasta testidataa. Vaikka huippulaatuiset 3d-skannaukset jäivätkin vielä odottamaan itseään, herätti projekti kuitenkin sen



verran syvän kiinnostuksen alaa kohtaan, että näkisin itseni vielä tulevaisuudessakin touhuamassa fotogrammetrian parissa.

Oppimisen kannalta tämä oli myöskin hyvin arvokas kokemus. Projekti oli jo pelkästään dokumentoinnin laajuuden puolesta huomattavasti kattavampi kokonaisuus kuin mikään aikaisemmin eteen sattunut vastaava hanke. Koenkin oppineeni kuluneiden kuukausien aikana paljon tiedonhakuun, tekniseen kirjoittamiseen sekä aikataulutukseen liittyviä asioita. Lisäksi opin projektin aikana arvostamaan helposti löytyviä ja erityisesti hyviä lähteitä - niitä ei tulisi pitää itsestäänselvyytenä.

## 6.1 Kohdatut ongelmat

Mielestäni yllättävää kyllä, työssä kohdatut suurimmat ongelmat liittyivät toissijaisiin ohjelmistoihin eivätkä niinkään itse käytännön toteutukseen tai fotogrammetrian rajoitteisiin. Tarkemmin ottaen pahimmat vaikeudet liittyivät kameroiden etähallintaan. Kuten luvussa 5.3 nostettiin esille, erityisesti usean web-kameran hallinta osoittautui lähes suhteettoman vaikeaksi toteuttaa. Osasyynä tähän on varmasti web-kameroiden suosion hiipuminen, joka on johtanut siihen että ajuritasolla kokonaiskuva on rikkonainen. Osa valmistajista käyttää hyvinkin vanhoja (joskin käyttöjärjestelmätasolla edelleen tuettuja) rajapintoja ja protokollia ajureidensa pohjana, eikä yhtä selkeää, standardia tapaa hallita web-kameroita tunnu löytyvän. Tämä johtikin yhden prototyyppijärjestelmän hylkäämiseen kokonaan, sillä etukäteen ei oltu otettu huomioon sitä, että web-kameroiden hallinta voisi osoittautua noinkin vaikeaksi. Tilanteen pulmallisuus kuitenkin osoittaa sen, että tällä saralla jatkokehitykselle olisi tarvetta.

Muut ongelmat liittyivät oikeastaan erinäisiin käytettävyysoongelmiin prototyyppijärjestelmien yhteydessä. Resurssien rajallisuuden vuoksi jouduttiin usean kameran järjestelmä rakentamaan "vajaana" järjestelmänä, jossa täysi peitto kohteesta voitiin saavuttaa vain kohdetta kääntelemällä. Kunnollisen pyörivän alustan puutteen vuoksi tämä johti kohteena toimineen henkilön asennon muuttumiseen kuvasarjojen välillä, joka puolestaan vaikutti tulosten laatuun. Tämä

kuitenkin toisaalta vahvistaa työn teoriaosuudessa esitettyjen fotogrammetrian perussääntöjen paikkansapitävyyden, joten tuloksia voidaan pitää siltä osin hyödyllisinä ongelmista huolimatta. Lisäksi kohteen silmämääräisestä kääntelystä johtuen oli välillä vaikea hahmottaa otettujen kuvien sijaintia toisiinsa nähden, varsinkin kuvamäärän kasvaessa hieman suuremmaksi. Tämän vuoksi joissakin testeissä kohteesta saatu kuvapeitto oli hajanainen eikä kovin symmetrinen, joka vaikutti jälleen saataviin tuloksiin.

## 6.2 Saavutetut tulokset

Vaikka yksi testausvaihe joudutiinkin jättämään välistä kohdattujen ongelmien vuoksi, esitettyihin tutkimusongelmiin saatiin vastaukset, ja työn oleelliset tavoitteet saavutettiin. Iteratiivinen prototyyppeihin perustuva työskentelytapa osoittautui hyväksi valinnaksi, sillä työskentelymetodeja voitiin jalostaa askel kerrallaan edellisissä vaiheissa tehtyjen havaintojen perusteella. Tällä olikin positiivinen vaikutus suoritettujen testien onnistumisen kannalta.

Yhtenä työn tärkeimmistä tavoitteista voidaan pitää toimivien prototyyppien rakentamista. Tämän osalta tavoitteet saavutettiin: prototyypit yhdestä kolmeen olivat toimivia kokonaisuuksia joilla saatiin järjestelmästä riippuen kohtalaisesta erittäin hyvään laatuun yltäneitä tuloksia. Vaikka jotkin tulokset jäivätkin toivottua heikommiksi, saatiin jokaisesta prototyypistä tärkeää kokemusta ja tietoa, jonka perusteella järjestelmiä voidaan lähteä parantamaan seuraavia versioita silmällä pitäen.

Toinen kantava teema oli erilaisten lähifotogrammetriaan liittyvien raja-arvojen ja minimivaatimusten etsiminen. Käytännössä tämä tarkoitti perehtymistä esimerkiksi siihen, onko web-kameran resoluutio ja huonohko optinen laatu esteenä sen käytölle. Lisäksi pyrittiin selvittämään erilaisia vähimmäismääriä kameroiden lukumäärän ja otettujen kuvien kannalta.

Testien perusteella voitiin yksiselitteisesti todeta, että vaikka selkeää alarajaa kameran resoluutiolle tai optiselle laadulle ei voida määrittää, on käytettävän

kuvauskaluston laadulla erittäin suuri merkitys. Hyvinkin huonolaatuisista tai matalan resoluution kuvista malleja pystyttiin tuottamaan, mutta käytetyn kameran laatu oli suoraan verrannollinen saatavissa olevien tulosten laatuun. Varsinkaan suurempaa tarkkuutta vaativissa käyttökohteissa siis esimerkiksi web-kameroiden käyttöä ei voida suositella.

Kuvien määrään liittyen on mahdotonta todeta joka tapaukseen toimivia minimivaatimuksia. Kuten prototyyppi 1 osoitti, yksittäisellä kameralla ja suhteellisen pienellä kuvamäärällä voidaan saavuttaa hyvinkin korkealaatuisia tuloksia. Kyseisen prototyypin tapauksessa 6 kuvaa oli juuri sillä kalustolla ja niissä olosuhteissa käytännössä alaraja kasvojen etuosasta saatavan tarkan mallin tuottamiselle. Jotain toista kohdetta eri kameralla kuvattaessa vaadittavien kuvien määrä voi taas olla suurempi tai pienempi - käytännön minimi riippuu niin monesta tekijästä, että raja-arvot vaihtelevat hyvin suuresti eri kuvaustilanteiden välillä. Otettujen kuvien lukumäärää tärkeämpi suure onkin kuvien keskinäisen peiton riittävyys. Lisäksi ei ole kovinkaan perusteltua pyrkiä työskentelemään aivan minimiarvojen rajamailla, sillä yleensä jo muutaman lisäkuvan ottamisella parannetaan prosessin onnistumisen todennäköisyyttä, saadaan parempilaatuinen lopputulos, mutta silti vaaditaan vain marginaalisesti enemmän työtä sekä prosessointitehoa. Minimivaatimuksien voidaankin katsoa lähtevän halutusta laadusta: tiettyyn rajaan asti kuvamäärän lisääminen nostaa saatavien tulosten tarkkuutta.

Kameroiden vaadittava vähimmäismäärä on yhtä lailla ongelmallinen suure: käytännön vaatimukset riippuvat kuvauskohteesta. Staattisen kohteen kuvaamiseen yksittäinen kamera voi olla paras vaihtoehto, sillä yhdellä kameralla suoritettava skannaus tapahtuu parhaimmillaan nopeasti, helposti ja edullisesti, eikä useamman kameran mukaan tuominen toisi prosessiin välttämättä lisäarvoa. Tämän opinnäytetyön prototyyppien perusteella on myös hankalaa todeta minimivaatimuksia turntable-tyyliselle ratkaisulle, jossa kohde pyörii staattisiin kameroihin nähden. Jonkinlaisena lähtöarvona voidaan esimerkiksi kokonaisen ihmisen skannaamiselle kuitenkin pitää kolmea tai neljää samalle pystyakselille asetettua kameraa, joista ylimmäinen kuvaa tarpeeksi yläviistosta jotta pään yläpuoli saadaan kuvattua. Pienemmällä kameramäärällä pystypeitto voi jäädä

liian pieneksi. Tällaisessa tilanteessa, toisin kuin staattisen kohteen kanssa, kameroiden lukumäärän lisäämisestä on selkeästi hyötyä. Useammalla kameralla kohde saadaan kuvattua vähemmällä kääntökerroilla, jolloin riski kohteen asennon muuttumiselle kuvien välillä pienenee. Kuitenkin, tässäkin tapauksessa minimi riippuu kuvauskohteesta sekä tavoiteltavasta laadusta.

Voidaankin todeta, että tutkimustavoitteissa esitettyihin kysymyksiin saatiin vastaukset, vaikkakin minimiarvoihin liittyen tarkkojen numeeristen arvojen esittäminen on erittäin hankalaa. Tulosten perusteella voitiin kuitenkin todeta tiettyihin tilanteisiin sopivia ohjearvoja, joita voidaan käyttää jonkinlaisina lähtöarvoina kuvaustilannekohtaisen käytännön järjestelmän toteuttamiseen.

### **6.3 Jatkokehitys**

Saatujen tulosten pohjalta lienee turvallista sanoa, että tarvetta jatkotutkimukselle ja -kehitykselle olisi, sekä tämän projektin tulosten pohjalta että muutoinkin. Tässä työssä esiteltyjä prototyyppejä tulisi tutkia ja kehittää entisestään. Prototyypit osoittivat, että ne toimivat konseptitasolla, joten niiden lisätestaamisella ja jalostamisella niistä saataisiin varmasti suhteellisen pienellä vaivalla vieläkin toimivampia ratkaisuja.

Kustannustehokkaita kuluttajatason kameroihin perustuvia järjestelmiä haettaessa voisi olla aiheellista perehtyä myös kompaktikameroiden käyttöön tällaisen järjestelmän toteuttamisessa. Tässä työssä niiden mukaan ottaminen ei kuitenkaan ollut mahdollista rajallisten resurssien vuoksi, sillä se olisi vaatinut lisää henkilökohtaisia investointeja. Kompaktikameroissa voisi kuitenkin olla valtavasti potentiaalia, sillä niiden etähallinta onnistuu joissakin tapauksissa lähes yhtä hyvin kuin järjestelmäkameroiden kontrollointi. Kuvanlaadultaan ne olisivat huomattavasti web-kameroita edellä, kustannusten kuitenkin pysyessä järjestelmäkameroita edullisemmalla tasolla.

Lisäksi tulisi tutkia, olisiko käytännöllistä toteuttaa jonkinlainen automatisoitu järjestelmä. Tällaisessa järjestelmässä kuvattava kohde asetettaisiin motoroidulle

pyörivälle alustalle, ja Arduinolla tai vastaavalla ratkaisulla ohjattaisiin kameroita sekä alustan moottoria. Tämä voisi olla looginen jatkumo tässä työssä tehdyn prototyypin 3 kaltaiselle ratkaisulle. Kohtuullisella määrällä kameroita (esimerkiksi 6 tai 8) ja synkronoidulla kääntö/kuvaus - järjestelmällä saataisiin eliminoitua monia tämän työn aikana kohdattuja ongelmia liittyen kääntyvään kohteeseen.

Markkinoilla olisi selkeästi kysyntää ohjelmistoratkaisulle, joka kykenee hallitsemaan useita nykyaikaisia web-kameroita yhtäaikaisesti. Tällaisten kameroiden potentiaali erittäin kustannustehokkaan fotogrammetriajärjestelmän toteuttamiseen saataisiin paremmin kartoitettua, kun ensin löytyisi keino testata helposti ja vaivattomasti useaa web-kameraa. Internetistä löytyy lukuisia keskustelupalstoja ja viestejä joissa ihmiset kyselevät tällaisen ratkaisun perään - mutta useimmille on tarjottu pelkkää ei-oota. Tässä voisi olla pätevälle ohjelmointiosaajalle jopa markkinaraon paikka.

Joka tapauksessa ehkä tärkeintä olisi, että testaamista ja erilaisten prototyyppien rakentamista jatkettaisiin. Jo näidenkin muutamien prototyyppien perusteella voidaan todeta, että tässäkin asiassa työ opettaa. Käytännössä tekemällä, eri vaihtoehtoja tutkimalla ja itse kokeilemalla kerätään kokemusta, jonka pohjalta järjestelmiä saadaan parannettua ja vaikutettua siten lopputulosten laatuun.

## LÄHTEET

3D Scan Company 2012. 3D Scanning technical information. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.3dscanco.com/about/3d-scanning/index.cfm>. Luettu 2.5.2013.

Agisoft LLC 2012a. Agisoft PhotoScan user manual: standard edition, version 0.9.0. Ohjelmiston käyttäjän opas. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan\\_0\\_9\\_0\\_en.pdf](http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan_0_9_0_en.pdf). Luettu: 10.3.2013.

Agisoft LLC 2012b. Agisoft Wiki: Photogrammetry. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.agisoft.ru/wiki/Photogrammetry>. Luettu: 10.3.2013.

Albertz, J. 2001. Albrecht Meydenbauer - Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.hasler.net/Meydenb.pdf>. Luettu 14.4.2013.

Busch, D. 2006. Mastering Digital Photography. 2. painos. Boston (MA): Cengage Learning.

Dogson, M., Gann, D., Salter, A. 2005. Think, Play, Do: Innovation, Technology, and Organization. Oxford: Oxford University Press.

Finney, K. 2006. 3D Game Programming All in One. 2. painos. Boston (MA): Cengage Learning.

Geodetic Systems Inc. 2013. What is photogrammetry? Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>. Luettu 20.4.2013.

Haggrén, H., Koistinen, K. 2003. Fotogrammetrian perusteet, luento 7 : fotogrammetrinen mittausprosessi. Aalto-yliopiston rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutin luentomateriaali. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://foto.hut.fi/opetus/300/luennot/7/7.html>. Muutettu 2005. Luettu 29.4.2013.

Hartley, R., Zisserman, A. 2004. Multiple View Geometry in Computer Vision. West Nyack (NY): Cambridge University Press.

ISPRS 2008. Tips for the effective use of close range digital photogrammetry for the Earth sciences. Www-dokumentti. Saatavilla: <http://isprsv6.lboro.ac.uk/tips/photogrammetry.doc>. Muutettu 2010. Luettu 2.5.2013.

ITEE 2009. Photogrammetry. Lecture 1: Introduction. Mathematical foundations. Queenslandin yliopiston kurssimateriaali. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://itee.uq.edu.au/~elec4600/elec4600\\_lectures/1perpage/uq1.pdf](http://itee.uq.edu.au/~elec4600/elec4600_lectures/1perpage/uq1.pdf). Luettu: 28.4.2013.

Kjellman, E. 2012. From 2D to 3D - A photogrammetric revolution in archeology? Tromssan yliopiston arkeologian ja sosiaalisen antropologian laitos, arkeologian diplomityö. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://www.academia.edu/1771011/From\\_2D\\_to\\_3D\\_a\\_photogrammetric\\_revolution\\_in\\_archaeology](http://www.academia.edu/1771011/From_2D_to_3D_a_photogrammetric_revolution_in_archaeology). Luettu: 2.5.2013.

Long, B. 2009. Complete Digital Photography. 5. painos. Boston (MA): Cengage Learning.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Harley, I. 2011. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath: Whittles Publishing.

Rockwell, K. 2006. Selecting the Sharpest Aperture. Www-dokumentti. Saatavilla: <http://www.kenrockwell.com/tech/focus.htm>. Luettu: 10.5.2013.

Rockwell, K. 2012. Diffraction. Www-dokumentti. Saatavilla: <http://www.kenrockwell.com/tech/diffraction.htm>. Luettu: 10.5.2013.

Rämö, T. 2010. Pikamallinnuksen sovellukset ja toiminnan kehittäminen. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaation opinnäytetyö. Www-dokumentti. Saatavissa: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/22105/Ramo\\_Tommi.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/22105/Ramo_Tommi.pdf?sequence=1). Luettu 2.5.2013.

Schott, J. 2007. Remote Sensing : The Image Chain Approach. Cary (NC): Oxford University Press.

Sibley, G., Mei, C., Reid, I., Newman, P. 2009. Adaptive Relative Bundle Adjustment. 117-184. Teoksessa J. Trinkle, Y. Matsuoka ja J. A. Castellanos (toim.) Robotics: Science and Systems V. Cambridge (MA): MIT Press.

Vinni, P. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa - mitä on fotogrammetria? Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>. Luettu 20.4.2013.