

Juuso Ala-Outinen

Sisätilojen mallintaminen fotogrammetrisin keinoin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

26.5.2017

Tekijä Otsikko	Juuso Ala-Outinen Sisätilojen mallintaminen fotogrammetrisin keinoin
Sivumäärä Aika	38 sivua 26.5.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	mallinnusinsinööri Pekka Wilska lehtori Jussi Laari
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tutkia, kuinka rakennuksen kellarihuoneiston fotogrammetrisin keinoin tuotettua pistepilven soveltuvuutta voitaisiin käyttää inventointimallin mittaussaineistona. Työn keskeisenä tavoitteena on luoda valokuvilla ja syvyyskameralla tehty 3D-malli. Työprosessi selostetaan alkuvalmisteluista aina kolmiulotteisen mallin luomiseen asti.</p> <p>Opinnäytetyön toteutus tapahtui Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa. Kuvauksessa käytettiin Sony α7R -kameraa ja Mitta Oy:ltä käyttöön saatua DPI-8-skanneria, joista saatuja pistepilviaineistoja verrataan Leica ScanStation P16 -laserkeilaimella saatuun pistepilveen. Tähykset mitattiin Trimble S7 -takymetrillä. Ohjelmistoina käytettiin pistepilvien prosessointiin Leica Cyclonea ja Autodesk ReCap 360:tä.</p> <p>Fotogrammetrisin keinoin ja laserkeilaimella saaduista pistepilvistä tehtyjä inventointimalleja vertailtiin toisiinsa tulkitsemalla rakennuksen nurkkapisteitä. Lopuksi saatuja tuloksia verrattiin kansallisen Yleiset tietomallivaatimukset YTV 2012 -ohjeistuksen tarkkuusvaatimuksiin. Todettiin, että DPI-8-skannerilla päästään suurimmalta osin YTV 2012 -ohjeistuksen tarkkuusvaatimuksiin, mutta järjestelmäkameralla luotu pistepilvi ei onnistunut tutkimuksen aikana.</p> <p>Fotogrammetrisin keinoin tuotetun pistepilven laatuun vaikuttavat erityisesti ympäristölliset seikat. Tasaiset ja yksiväriset pinnat ilman selkeitä vastinpisteitä ovat ongelmallisia valokuvamallinnuksessa, kuten myös kiiltävät ja läpinäkyvät pinnat, jotka aiheuttavat heijastuksia. Laitteen teknologiassa on silti paljon jatkotutkimuksen varaa, sillä esimerkkikohteen mallinnus onnistui kuitenkin varsin hyvin. Menetelmällä mahdollistetaan sisätilojen helppo, nopea ja turvallinen mittaaminen.</p>	
Avainsanat	fotogrammetria, laserkeilaus, mallintaminen

Author Title	Juuso Ala-Outinen Indoor modeling by photogrammetric methods
Number of Pages Date	38 pages 26 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Pekka Wilska, Modelling Engineer Jussi Laari, Principal Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to explore how point clouds produced through photogrammetric methods are applicable to 3D surveying of a building basement. The core objective of the project was to create a 3D model elaborated through a depth sensor camera and photographs. The thesis described the work process from the initial preparations to the creation of a three-dimensional model.</p> <p>The thesis project was implemented in the premises of Metropolia University of Applied Sciences. Two point clouds were taken using a Sony α7R digital camera and Dpi-8 scanner lent from Mitta Oy. Then, these two point clouds were compared to a third point cloud obtained through a Leica ScanStation P16 laser scanner. The targets were measured with a Trimble T7 total station. The programmes used for the processing of the point clouds were Leica Cyclone and Autodesk ReCap 360.</p> <p>The inventory models produced through photogrammetric methods and through laser scanner were compared to each other by interpreting the building's corner points. Finally, the results obtained were compared to the precision requirements of the Finnish Building Information Model YTV 2012. It was found that most of the precision requirements could be met by using the DPI-8 scanner. However, the creation of a 3D model did not succeed by using a digital camera.</p> <p>Environmental factors were determining for the quality of the point cloud created through photogrammetric methods. Even, monochrome surfaces without corresponding points are challenging to photogrammetric modelling, as well as glossy and transparent surfaces causing reflections. Nonetheless, the technology in the device could offer good possibilities for further research, as the modelling of the example target succeeded fairly well. The method facilitates an easy, fast and safe measurement of indoor spaces.</p>	
Keywords	photogrammetry, laser scanning, modelling

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laserkeilaaminen	2
2.1	Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät	3
2.2	Laserkeilauksen edut ja heikkoudet	4
2.3	Laserkeilauksen eri vaiheet	6
2.4	Laserkeilauksen hyödyntäminen Arkkitehtuoriosastolla	7
3	Rakennusten tietomallintaminen	8
3.1	Tietomallinnuksen päätavoitteet	9
3.2	Yleiset tietomallivaatimukset 2012	10
4	Fotogrammetria	11
4.1	Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät fotogrammetriassa	12
4.2	Valokuvaus	15
5	Työn toteutus esimerkkikohteessa	17
5.1	Kalusto	17
5.1.1	DPI-8 -käsiskanneri	17
5.1.2	Sony α7R -kamera	19
5.1.3	Laserkeilain	19
5.1.4	Laserkeilauksen suorittaminen	19
5.1.5	Takymetri	20
5.2	Valokuvauksen suorittaminen	22
5.3	Keilatun materiaalin siirto tietokoneelle ja pistepilven rekisteröinti	23
5.3.1	Koordinaattitietojen purku	25
5.3.2	Keilatun aineiston purku, rekisteröinti ja suodatus	26
6	Tulosten vertailu	28
6.1	Nurkkapisteiden tarkkuudet	30
6.2	Visuaalinen tarkastelu	31
7	Yhteenveto ja pohdinta	33
	Lähteet	37

Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
BIM	Building Information Model
YTV	Yleiset tietomallivaatimukset

1 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Helsingin kaupungin Rakennusvirasto. Rakennusviraston Arkkitehtuuriosastolla tuotetaan tilojen uudis- ja peruskorjaus-, sisustus- ja ammatti-keittiösuunnittelua sekä rakennesuunnittelua kaupungin omiin tarpeisiin. Tämän lisäksi asiakkaiden tarpeita varten osastolla laaditaan kunto- ja rakennekartoituksia sekä mitaus- ja mallinnuspalveluita. (1)

Rakennusvirastolla on käytössä Leica ScanStation P20 -laserkeilain, jota hyödynnetään mittaus- ja mallinnuspalveluita toteutettaessa. Laserkeilauksella tarkoitetaan sitä, että ympäristöstä muodostetaan suuri joukko mittapisteitä lasersäteellä. Lasermittauksen nollapisteestä lähetetään lasersäteitä haluttuun kohteeseen ja takaisin. Mitattavista pisteistä voidaan laskea koordinaatit (x,y,z), kun tiedetään lasersäteen lähtökulmat ja matka. Teollisuuslaserkeilaimet ovat tarkkoja ja luotettavia laitteita sisätilojen mallintamiseen, koska mittaustarkkuus on jopa yhden millimetrin luokkaa. (2, s. 16–17.)

Laserkeilaimella mitattaessa etuina voidaan pitää myös tarkkuuden lisäksi laitteen nopeutta, turvallisuutta ja aineistojen nopeaa siirtoa lähtöaineistoksi. Laitteiston avulla voidaan kohteesta mitata miljoonia pisteitä, jotka yhdessä muodostavat kolmiulotteisen pistepilven. Kolmiulotteisesta pistepilvestä pystytään mallintamaan 3D-malleja erilaisten ohjelmien avulla. (3, s. 19-20.) Vaikka laserkeilaimesta saa erittäin tarkkaa ja luotettavaa mittaustulosta, liittyy laserkeilausmittaukseen erilaisia ongelmia. Sisätiloja mallinnettaessa rakennuksen sisältä on otettava useita keilauksia, ja painavaa laitetta on hankala kantaa kojeasemalta toiselle. Keilauksen esivalmisteluihin liittyy myös tarvittavan koordinaatiston määrittäminen ja tähysmerkkien mitaus, jotka mitataan takymetrin avulla. (4, s. 5–6.) Takymetrin ja laserkeilaimen yhtäaikainen liikuttaminen työkohteessa vie aikaa. Lisäksi mittauskohde voi olla välillä hankalissa paikoissa, joihin laserkeilainta ja takymetriä ei aina pysty helposti viemään.

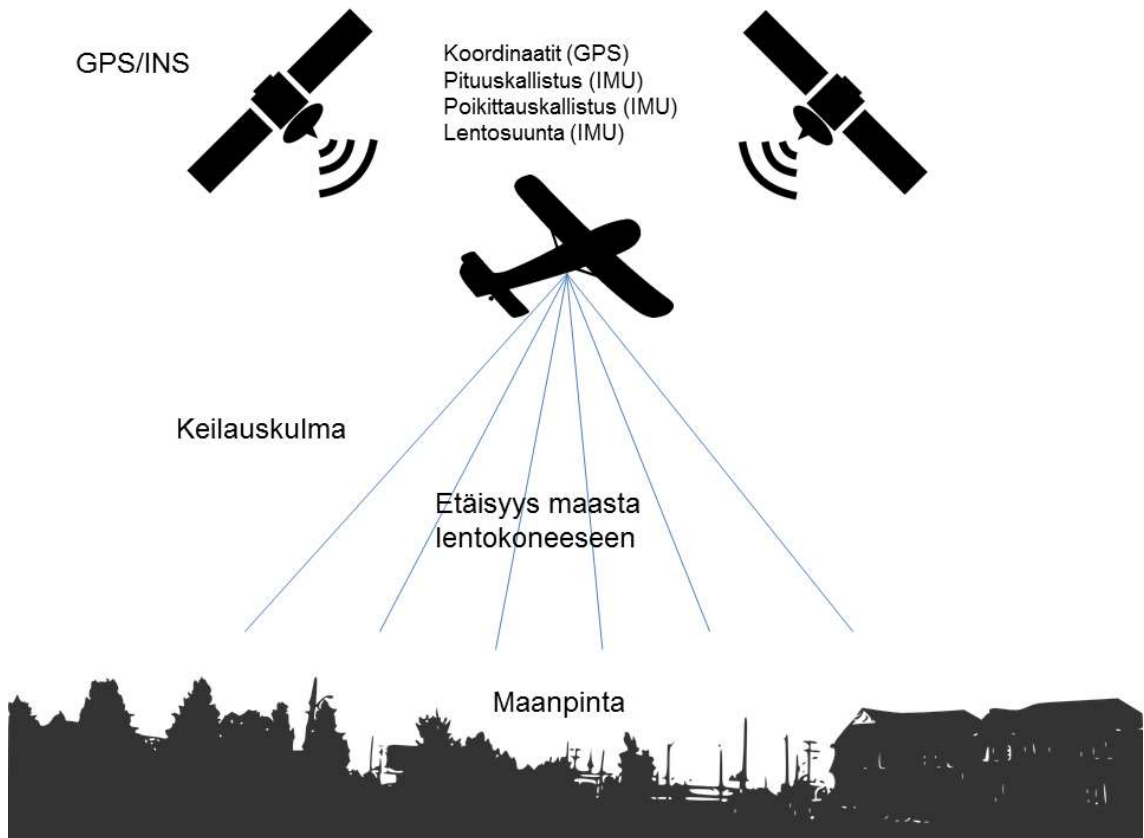
Tässä työssä tutkitaan vaihtoehtoisten menetelmien käyttöä rakennuksien sisätiloja mallinnettaessa. Tarkoituksena on keskittyä fotogrammetrisin keinoin suoritettaviin sisätilamallinnustapoihin ja samalla tarkastellaan riittävätkö tulokset kansallisen YTV 2012 -ohjeistuksen suositustarkkuuksiin. Työssä käytetään järjestelmäkameraa ja DPI-8-skanneria, joiden avulla tutkitaan niiden käyttömahdollisuutta sisätiloja mallinnettaessa. Valokuvamallintaminen on osoittautunut tehokkaaksi tavaksi ilmakuvauksissa, kun on haluttu

muodostaa esimerkiksi digitaalinen pintamalli. Laserkeilaus on varmasti jatkossakin tehokas ja luotettava keino, kun halutaan mittatarkkaa 3D-mallinnusta. Erilaisilla mittaus-tavoilla voidaan kuitenkin helpottaa mallinnustyötä.

2 Laserkeilaaminen

Laserkeilaamisella tarkoitetaan mittausmenetelmää, jolla kerätään ympäröivästä maailmasta tietoa monipuolisesti ja nopeasti luomalla kolmiulotteinen pistepilvi. Mittalaitteesta lähtee liikkeelle laitteen nollapisteestä lasersäde, jonka avulla pystytään mittaamaan kohteen etäisyys mittalaitteesta. Valosignaali kulkee mittalaitteesta kohteeseen ja takaisin, jolloin koordinaatit yksittäiselle mitatulle pisteelle pystytään laskemaan valosignaalin (lasersäteen) lähtökulman ja matkan avulla. Järjestelmän avulla jokaiselle pisteelle voidaan myös koordinaattien lisäksi tallentaa intensiteettiarvo paluusignaalin voimakkuuden pohjalta. (4, s. 1.)

Laserkeilausta käytettiin alun perin kaukokartoituksessa mittausmenetelmänä, jolloin keilain oli kiinnitettynä lentokoneeseen tai helikopteriin. Nykyään laserkeilaukset ovat yleistyneet maanpinnalla tehtävissä mittauksissa. Laserkeilausmenetelmät voidaan jakaa ilma- ja maalaserkeilaukseen. Ilmalaserkeilaus tapahtuu ilmasta käsin, jolloin laser-tykki lähettää laserpulsseja ympäristöön. Laserpulssit osuvat ja kimpoavat takaisin kohteesta. Pulssin kulkuajan perusteella pystytään laskemaan kohteen etäisyys laserkeilaimesta. Keilaimella on mahdollista mitata myös paluusignaalin intensiteetti. Pisteiden koordinaatit saadaan selville, kun tiedetään etäisyyden lisäksi lasertykin paikka ja asento. Paikka on mahdollista saada selville satelliittipaikannuksella (GPS/GNSS) ja asento inertiamittausjärjestelmällä (IMU). Ilmalaserkeilauksen lopputuotteena saadaan pistepilvi, jonka pisteet muodostavat digitaalisen pintamallin. Sijaintitarkkuus vaihtelee ilmalaserkeilauksessa lentokorkeuden mukaan, mikä on parhaimmillaan senttimetriluokkaa. Kuvassa 1 esitellään ilmalaserkeilaukseen liittyvää keilaustapahtumaa. (5, s. 269.)



Kuva 1. Ilmalaserkeilauksen laitteisto ja keilaustapahtuma (IMU = Inertial measurement unit, GPS = Global Positioning System) (5).

Maalaserkeilauksella tarkoitetaan maanpinnalla tapahtuvaa laserkeilausta. Maalaserkeilain on nopea etäisyyksiä ja suuntia mittaava koje, joka sopii erityisesti erilaisten rakenteiden sekä maaston kohteiden mittaamiseen ja mallintamiseen. Mittausten perusteella lopputuloksena saadaan mittauspisteiden koordinaatit ja kolmiulotteinen pistepilvi, joka voidaan jälkeinpäin mallintaa tietokoneohjelmalla. Pistepilvi orientoidaan tähyksinä käytettävien liitospisteiden avulla, joita mittauskohdeessa pitää olla riittävästi. Orientoinnissa on oltava näkyvillä vähintään kolme taso- ja korkeussijainniltaan tunnettua liitospistettä. Orientoinnin tarkkuutta voidaan parantaa vielä tätäkin useammilla liitospisteillä. (5, s. 217.)

2.1 Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät

Laserkeilauksen tuloksena saadaan pistepilvi. Laserkeilausprojektin laatuun vaikuttaa kolme tärkeää mittauslaadun kriteeriä: yksittäisen mitatun pisteen laatu, pistepilven tiheys ja pistepilvien yhdistämisen laatu. Yksi pistepilvien mittauksen laatuun vaikuttavista

tekijöistä on mitattujen pisteiden hajonta, johon vaikuttaa erityisesti kohteen mittaussäteen osumiskulma. Tämän takia kohteiden mallintamisessa on tärkeää seurata mittauksien jäännösvirheitä. Kohteelta mittalaitteeseen palaava signaali heikkenee mittausmatkan kasvaessa. Esimerkiksi kohteiden kaarevuus sekä seinien pintojen muoto vaikuttavat intensiteettiin (palautuvan signaalin voimakkuuteen). Paluusäteen voimakkuus pysytään visuaalisesti esittämään jokaisen pisteen kohdalla väri- tai harmaasävyeronä. Värieröjen käyttäminen intensiteetin voimakkuuden havainnoinnissa on osoittautunut monipuoliseksi ja miellyttäväksi tavaksi.

Kohteen mallintamisen laatuun vaikuttaa pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka. Mitä tiheämmin pistepilvi on mitattu, sitä tarkemmin pystytään mallintamaan erilaisia yksityiskohtia mallista. Toisaalta on hyvä myös muistaa, että laserkeilaimen asetusten mukaisesti erittäin tiheästi mitattu pistepilvi lisää mittausaikaa ja kasvattaa tiedostokokoa. Myöskään tiheästä pistepilvestä ei ole apua, jos mitatun pistepilven tarkkuus on huono. Pistepilven tiheys heikkenee matkan funktiona. Parhaimmillaan laserkeilaimet kykenevät mittaamaan pistepilviä 50 metrin matkalta 8 mm:n ruutuun.

Mittauksia otetaan laserkeilaimella yleensä useista eri kojeasemista. Pistepilvien yhdistämismenetelmänä voidaan käyttää tähyksiä ja yhteisiä mallinnettuja kohteita. Tarkimpana yhdistämismenetelmänä pidetään kuitenkin yhteisten tähyksien käyttöä. Jokaisesta mitatusta pistepilvestä on löydyttävä vähintään kolme yhteisesti koodattua tahystä, joiden avulla pistepilvet saadaan samaan koordinaatistoon. Tähykset voivat olla joko tasomaisia, pallomaisia tai puolipalloja. Tähyksien keskipisteet voidaan mitata takymetrillä, jolloin ympäröivässä koordinaatistossa yhdistetyt pistepilvet on mahdollista siirtää tarvittavaan koordinaattijärjestelmään. Pistepilviä pystytään yhdistämään myös käyttäen yhteisiä mallinnettuja kohteita esimerkiksi esineitä tai rakennelmia, joille annetaan tietty koodi. Yhteisiä kohteita käytetään lopuksi pistepilvien yhdistämisessä. Tämä tapa ei ole usein yhtä tarkka kuin tähyksien keskipisteiden määrittäminen, eikä siksi tätä tapaa ole suositeltavaa käyttää. (4, s. 3–4.)

2.2 Laserkeilauksen edut ja heikkoudet

Laserkeilauksen etuina voidaan pitää laitteen tarkkuutta, nopeutta ja turvallisuutta. 3D-laserkeilaimen perusideana on saada mittatarkkaa tietoa havaittavasta ympäristöstä, vaikka mitattava kohde olisi minkälainen tahansa. Keilain mittaa kaikki näkyvät kohteet

ympäristöstään, mutta ei kohteen takana katveeseen jääviä alueita. Laserkeilain ottaa ympäristöstään nopeasti jopa muutamassa minuutissa miljoonia pisteitä. Nopealla mittauksella saadaan ajallista ja taloudellista säästöä verrattuna perinteisiin takymetri- tai lähi- ja fotogrammetrian menetelmiin. Lopputulosta laserkeilaimesta saadusta datasta voidaan tarkastella mittauksen jälkeen tietokoneella tai pistepilven tarkastelemiseen tarkoitettulla laitteella.

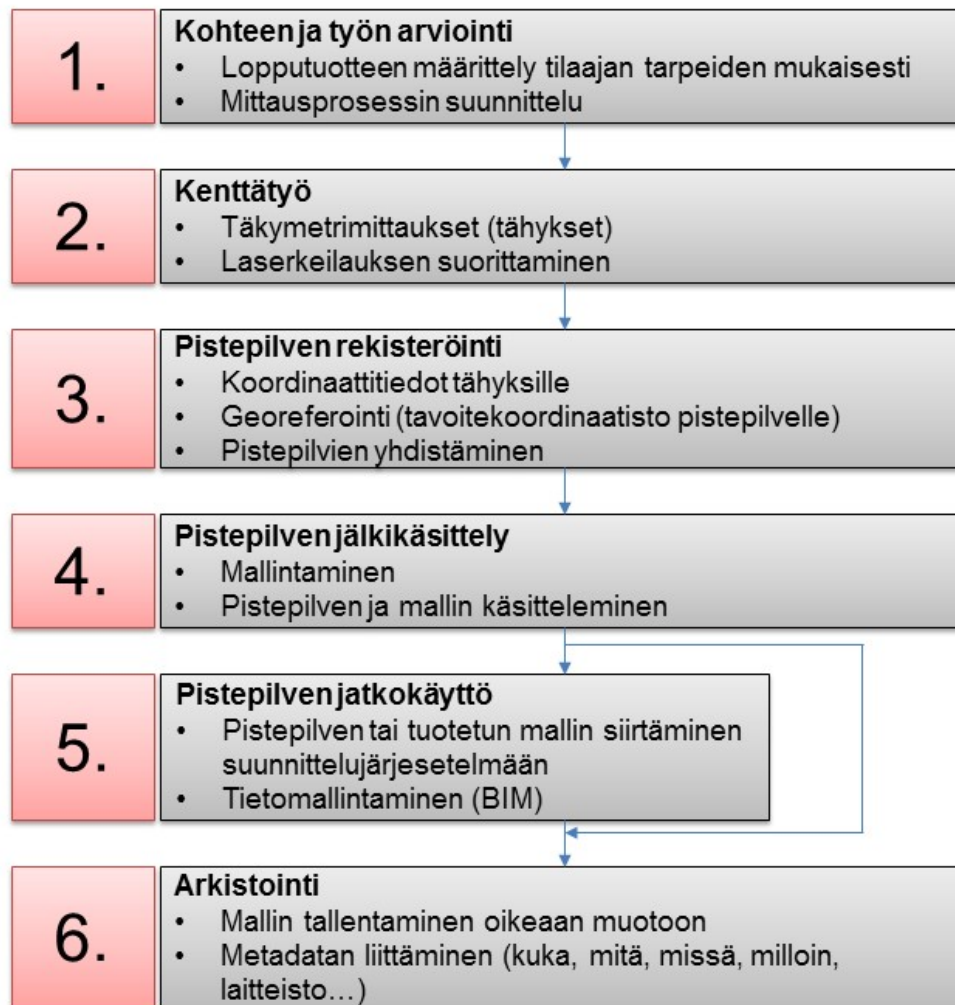
Laserkeilauksella voidaan turvallisesti mitata kohteita, jotka sijaitsevat vaarallisissa ja vaikeasti tavoiteltavissa paikoissa. Mittaus on mahdollista suorittaa kirkkaassa päivänvalossa tai pimeissä kohteissa heikentämättä mittaustuloksen tarkkuutta. (6) Laserkeilauksen suurimpana etuna inventointimalleja tehtäessä on mahdollisuus mitata ja dokumentoida olemassa oleva kohde tarkemmin kuin manuaalisilla menetelmillä. Tietomalleja on mahdollista tarkastella ja analysoida tarkemmin, jolloin tietomallin pohjainen laadunvarmistusprosessi antaa rakennuksen tiedoista paremman kokonaiskuvan jo varhaisessa vaiheessa. (7, s. 453.)

Laserkeilain on kallis investointi. Markkinoilla olevat laserkeilaimet maksavat usein kymmeniätuhansia euroja, ja siksi laitteen hankintaan on järkevää käyttää hyvää harkintaa. Pienemmille maanmittausyrityksille laserkeilaimen hankkiminen voi olla usein liian kallis investointi. Lisäksi laserkeilauksen heikkona puolena sisätiloja laserkeilatessa voidaan pitää suurta kalustomäärää. Mittauksen aikana on laserkeilaimen lisäksi käytettävä tähyksiä ja takymetriä, jos pistepilvet halutaan omaan koordinaattijärjestelmään. Tähykset ovat yleensä pyöreitä ja tasomaisia. Tähyksiä sijoitetaan mitattavalle alueelle useita, jolloin eri mittauksilla on mahdollista saada tuloksia muutamasta samasta tähyksestä. Tähyksen keskipiste mitataan takymetrillä, jolloin pistepilvet on mahdollista muuttaa haluttuun koordinaatistoon. (8 s. 12) Takymetrin ja laserkeilaimen yhtäaikainen kantaminen sisätiloissa voi olla joskus hankalaa laitteiden painon ja koon takia. Sisätiloja laserkeilatessa ongelmia tuottavat varsinkin kohteet, joihin voi olla hankalaa päästä. Näitä kohteita ovat esimerkiksi ahtaat ilmanvaihtohuoneet ja katolla tai korkeissa paikoissa olevat tilat. Ulkotiloissa laserkeilaimen käyttöä rajoittavat lämpötila, pölyinen ilma ja vesisade, jolloin pölyinen ilma hankaloittaa lasersäteen kulkua ja vesisade taittaa lasersädettä. Laserkeilaimen toimintakyky rajoittuu noin 0 celsiusasteesta 40 celsiusasteeseen. Katvealueita luovat esimerkiksi ihmiset, tavarat ja kasvusto, jotka sijaitsevat kohteen välissä. (9, s. 42.)

Merkittävänä ongelmana laserkeilausaineiston hyödyntämisessä voidaan pitää myös valtavaa tietomäärää, joka asettaa rajoituksia tietokoneiden kapasiteettien osalta. Aineiston koko aiheuttaa ongelmia pistepilvitiedoston käsittelyssä. Kuitenkin pistepilvien käsittelyyn tarkoitetuissa ohjelmistoissa on mahdollista harventaa pisteistöä, jolloin tietokoneen suorituskyvystä riippuen pistepilveä on mahdollista hyödyntää paremmin. Koska pistepilvet ovat tiedostokooltaan valtavia, ohjelmistoilla kestää kauan käsitellä pistepilveä. Ohjelmistojen hitaus viivästyttää entisestään mallinnusprosessia sekä valtava datamäärä hankaloittaa pistepilviaineiston arkistoinista ja datan siirtämistä eri osapuolille. (8, s. 39.)

2.3 Laserkeilauksen eri vaiheet

Laserkeilauksessa tulee huomioida hyvän ja taloudellisen mittauksen mukaisesti tilaajan toiveet huomioon ottaen projektin tyyppi, laatuvaatimukset ja mittauslaatuun vaikuttavat tekijät. Tilaajan kanssa on sovittava pistepilven käyttötarkoitus ja formaatti, jossa aineisto tallennetaan. Myös kohteen ominaisuudet ja erityispiirteet on aina käytävä läpi tapauskohtaisesti. Laserkeilaukseen sisältyy eri vaiheita, joihin edellä mainittuja tilaajan vaatimuksia ja sovittuja käytäntöjä vaaditaan, jotta pistepilvestä saataisiin tilaajan tarpeiden mukainen laadukas lopputulos. Työn eri vaiheilla on usein omat osaajansa. Laserkeilauksen ja saadun aineiston käsittelyyn vaaditaan yleensä eri ammattilaisten tiivistä yhteistyötä. (10, s. 16.) Keilausprosessin vaiheet esitetään kuvassa 2.



Kuva 2. Laserkeilausprosessin vaiheet (10).

2.4 Laserkeilauksen hyödyntäminen Arkkitehtuuriosastolla

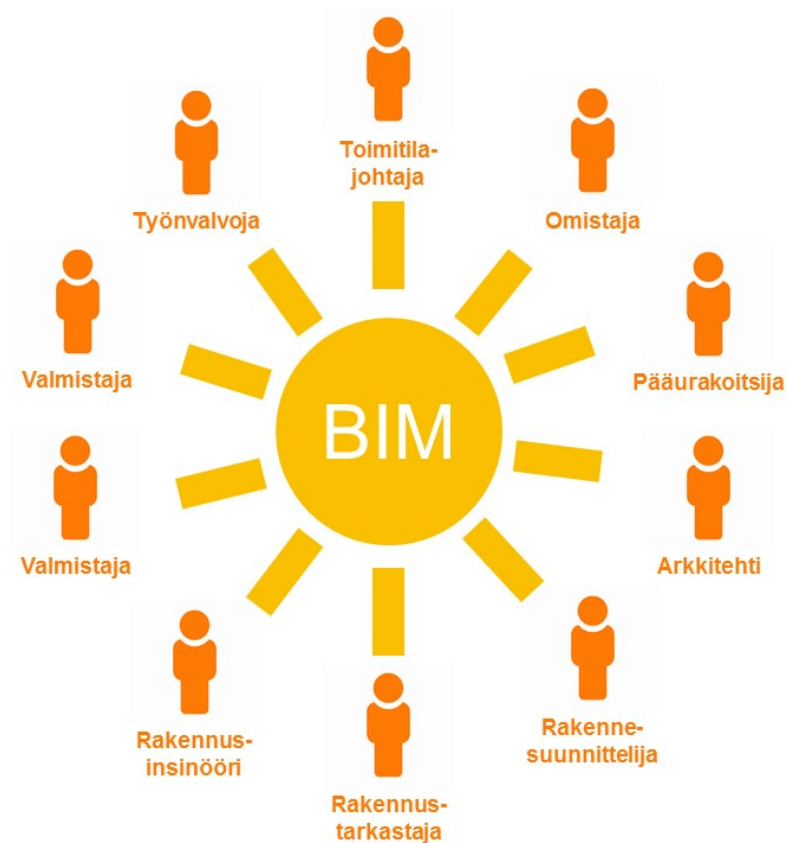
Helsingin kaupungin Rakennusviraston Arkkitehtuuriosastolla tuotetaan pääasiallisesti omiin tarpeisiin tilojen suunnittelu- ja asiantuntijapalveluita. Osastolla laaditaan myös kunto- ja rakennekartoituksia sekä mittaus- ja mallinnuspalveluita. (1) Arkkitehtuuriosastolla on kehittämiskohteeksi kirjattu mm. laserkeilauksen prosessien kehittäminen ja mitaustyövälineiden hyödyntäminen osana 3D-suunnittelua.

Arkkitehtuuriosaston teknisen toimiston mittausryhmä tuottaa laserkeilaustöitä kaupungin omistuksissa oleviin julkisiin rakennuksiin mm. kouluihin, sairaaloihin ja päiväkodeihin. Tekniseen toimistoon vuonna 2009 hankittiin maalaserkeilain. Sisätilakartoitukset ja julkisivumittaukset tehtiin ennen laserkeilaimen hankintaa pääosin takymetrimittauksena. Laserkeilauksessa tuotetusta pistepilvestä tehdään rakennuksen inventointimalli, jossa esitetään yksityiskohtaisesti korjausrakentamisen suunnittelussa vaadittavat rakenteet. Laserkeilauksen käyttö on nopeuttanut huomattavasti mittaus- ja mallinnustyötä mitattavissa kohteissa sekä lisännyt työvaiheiden tarkkuutta. Informaation määrän kasvu on helpottanut 3D-mallinnusta, ja mittauksien täydentäminen jälkikäteen on vähentynyt. Myös TruView-aineiston hyödyntämistä tarjouspyyntöjä laatiessa on käytetty apuna monipuolisesti. TruView-sovelluksella pystyy tarkastelemaan, mittaamaan ja merkitsemään pistepilviaineistoa verkkoselaimeen ladattavan liitännäisen avulla. (11, s. 24.)

3 Rakennusten tietomallintaminen

Rakennuksen tietomallintamisella (BIM, engl. Building Information Model) tarkoitetaan rakennuksen tai infrakohteen ja rakennusprosessin digitaalisessa muodossa olevaa koko elinkaaren aikaisten tietojen kokonaisuutta. Kolmiulotteisella tietomallilla voidaan koota kaikki tarvittava tieto yhteen. Mallilla mahdollistetaan erilaisten analyysien ja simuloitien tekeminen jo hankkeen alkuvaiheissa, jolloin edesautetaan samalla vaatimukset ja suunnittelunormit täyttävien kohteiden suunnittelua. (12)

Tietomallinnus helpottaa yhteistyötä suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden sekä muiden projektissa mukana olevien jäsenten kanssa (kuva 3). Tietomallia hyödynnetään läpi rakennuksen elinkaaren ajan palvelevana tietopankkina, joka sisältää rakennuksen elinkaaren aikaisten tietojen kokonaisuuden digitaalisessa muodossa. Kaikki hankkeen tiedot ovat mahdollista etsiä mallista eivätkä ne ole levällään eri piirustuksissa ja raporteissa. Tietomalli tarjoaa 2D-piirustusta tarkemman ja kattavamman kuvan projektin osapuolten välille. Myös törmäystarkastusten tarkastelu on mahdollista jo suunnitteluvaiheessa, joten suunnitelmien toimivuus ehditään tarkistamaan ja testaamaan jo ennen kuin rakennustyöt ja asennukset ovat aloitettu. (13, s. 7.)



Kuva 3. Avoin tietomalli (14).

3.1 Tietomallinnuksen päätavoitteet

Tietomalleja on mahdollista hyödyntää muun muassa

- investointipäätöksiä tukemisessä vertailemalla ratkaisujen toimivuutta, laajuutta ja kustannuksia
- ratkaisujen vertailua, suunnittelua ja ylläpidon tavoiteseurantaa varten tehtävissä energia-, ympäristö- ja elinkaarianalyseissä
- analysoidessa rakennettavuutta ja havainnollistaessa suunnitelmia
- tehostettaessa suunnitteluprosessia ja parantamalla laadunvarmistusta sekä tiedonsiirtoa

- rakennushankkeiden tietojen hyödyntämisen käytön ja ylläpidon aikaisissa toiminnoissa.

Mallinnukselle on asetettava hankekohtaiset tavoitteet ja painopistealueet, jotta mallinnus onnistuisi mahdollisimman laadukkaasti ja mallinnusta pystytäisiin hyödyntämään monipuolisesti. Mallinnukselle asetettuja yleisiä tavoitteita ovat muun muassa

- hankkeen tukeminen helpottamalla päätöksentekoprosessia
- osapuolten sitouttaminen hankkeen tavoitteisiin mallin avulla
- suunnitteluratkaisujen havainnollistaminen
- suunnitelmien yhteensovittaminen auttamalla suunnittelua
- lopputuotteen ja rakennusprosessin laadun parantaminen ja varmistaminen
- rakentamisaikaisten prosessien tehostaminen
- elinkaaren ja rakentamisen aikaisen turvallisuuden parantaminen
- tukeminen hankkeen kustannus- ja elinkaarianalyysin sekä hankkeen tietojen siirtämisen käytönaikaiseen tiedonhallintaan

Julkaisusarjassa ”Tietomallivaatimukset 2012” on kirjoitettu tarkemmin yleisistä tietomallinnukset päätavoitteista, ja vaatimukset tarkoitettu uudis- ja korjausrakentamiskohteille sekä rakennusten käyttöä ja ylläpitoa varten. (15, s. 5.)

3.2 Yleiset tietomallivaatimukset 2012

”Yleiset tietomallivaatimukset 2012” -julkaisusarjassa käsitellään vaatimuksia tietomallinpohjaiselle suunnittelulle arkkitehtimallin tietosisällöllä projektin eri vaiheissa (16). YTV 2012 -julkaisusarjan toisessa osassa mainitaan inventointimallin mallinnustarkkuuksien sallituista mittapoikkeamista, jotka ovat

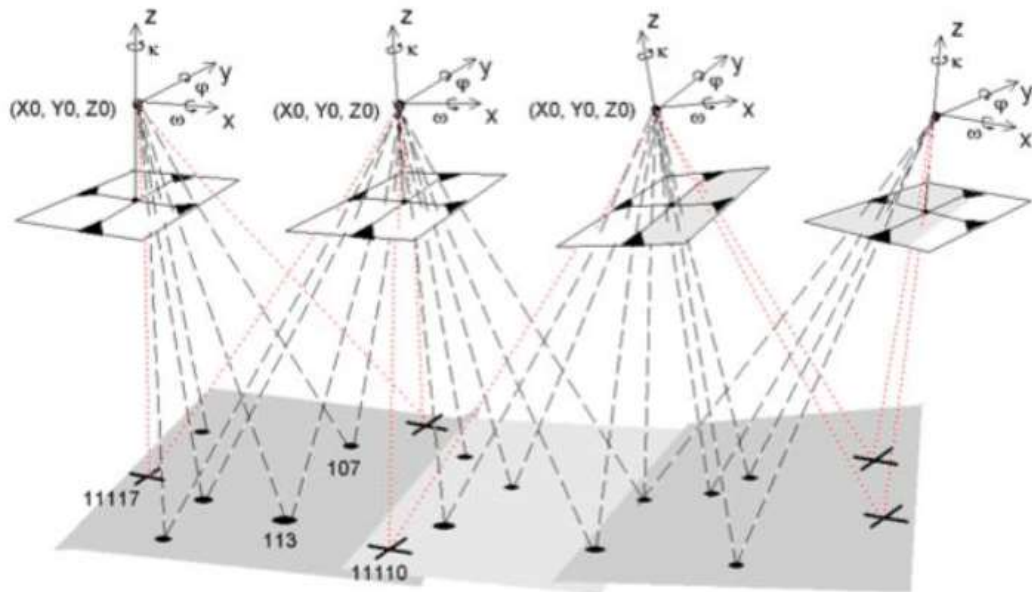
- rakennusosien nurkkapisteissä 10 mm
- pinnoilla, esim. seinissä ja lattioissa 25 mm
- vanhojen epäsäännöllisten rakenteiden osalta 50 mm.

Mallinnustarkkuus käytettävästä mittapoikkeamasta sovitaan projektikohtaisesti. (17, s. 13.)

4 Fotogrammetria

Fotogrammetrialla tarkoitetaan ympäristön kohteiden kolmiulotteista mittaamista valokuvien avulla. Ilmasta käsin tapahtuvalla helikopterimittausta on voitu hyödyntää varsinkin maastokarttojen tuotannossa ja rakennustekniseen suunnitteluun liittyviä maastomalleja mitattaessa. Tietoja voidaan myös kerätä esimerkiksi satelliittien ja lentokoneen havaintolaitteilla. (5, s. 1.)

Fotogrammetrinen mittaus perustuu vastinpisteiden, eli samojen kohtien tunnistamiseen eri kulmista otetuilta kuvilta. Kun kuvataan mitattavista kohteista useita valokuvia eri suunnista ja kulmista, pystytään fotogrammetrisilla ohjelmistoilla tuottamaan tarkkaa 3D-mittausdataa. Vastinpisteistä lasketaan sädekimpputasoitus kameran sisäisellä orientoinnilla, jolloin laskennassa ratkaistaan tekijät (polttoväli, linssivääristymät). Lisäksi kuvien ulkoinen orientointi, eli kameran asento ja sijainti 3D-avaruudessa, määritetään laskeutavaiheessa (kuva 4). Tämän jälkeen kuvauskohteesta pystytään laskemaan geometrisesti eteenpäinleikkaamalla useita pisteitä XYZ-koordinaatistoon. Tunnettuja vastinpisteitä merkitsemällä sidotaan kuvattava kohde haluttuun paikalliskoordinaatistoon. (18, s. 9.)



Kuva 4. Sädekimppujen avulla voidaan määrittää kuvien ulkoiset orientoinnit, kun tiedetään projektiokeskusten sijainnit (X_0, Y_0, Z_0) ja kameras kallistukset $(\omega, \varphi, \kappa)$ (18).

Fotogrammetria voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: ilmafotogrammetriaan (aerial photogrammetry) ja lähifotogrammetriaan (close range photogrammetry). Ilmakuvausta hyödynnetään ilmasta käsin tapahtuvalla fotogrammetrialla ja kamera on useimmiten kiinnitettyä lentokoneeseen.

Ilmafotogrammetriaa on hyödynnetty paljon maanmittausalalla. Lopputuloksena voidaan saada esimerkiksi kartta, korkeuskäyrä tai maaston 3D-malli. Lähifotogrammetriassa otetaan kameralla kuvia suhteellisen lähellä kohdetta. Kameralla voidaan kuvata käsivaralta, mutta laadukkaamman ja tasaisemman kuvauslaadun takaamiseksi valokuvaus on parasta suorittaa kiinteässä telineessä tai kolmijalalla. Lähifotogrammetrian lopputuotteenä on usein digitaalinen 3D-malli kuvattavasta kohteesta. (19, s. 3.)

4.1 Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät fotogrammetriassa

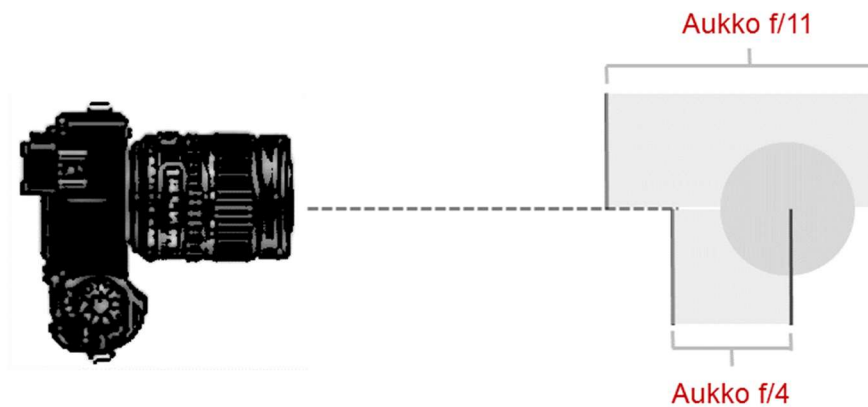
Digitaalinen fotogrammetria on kehittynyt yksinkertaiseksi ja nopeaksi skannaustekniikaksi tietokoneohjelmien kehityksen ansiosta. 3D-skannaukseen tarvitaan yksinkertaisimmillaan vain digitaalikamera ja tietokone, jossa on ohjelmisto valokuvien prosessoin-

nin suorittamista varten. Tietokoneella suurten datamäärien prosessoinnilla yhdessä kehittyneiden algoritmien kanssa on mahdollista päästä tarkkoihin lopputuloksiin. Digitaalinen fotogrammetria ei enää vaadi pitkäaikaista asiaan perehtymistä tai monimutkaista erikoistekniikkaa. Nykyään kuka tahansa voi ottaa sarjan valokuvia digikamerallaan ja antaa tietokoneen prosessoida valokuvat 3D-malliksi automaattisesti. Fotogrammetriasta on tullut siksi helpoimmin lähestyttävä 3D-skannauksen alalaji tekniikan kehityksen ansiosta. Laatuksymykset nousevat kuitenkin esiin fotogrammetrisessä mallintamisessa käytettävän kameran suhteen. Edulliset kamerat kuvanlaadun suhteen eivät välttämättä sovellu parhaiten 3D-skannaukseen. Hintaero laserskannerin ja tavallinen järjestelmäkameran välillä voi olla jopa kymmeniä tuhansia euroja. Varsinkin pienille projekteille fotogrammetria voi ollakin parhaimmillaan muita tekniikoita parempi hinta-laatusuhteeltaan. (19, s. 5.) Fotogrammetrisiin mittauksiin vaikuttavat kaluston lisäksi valaistus ja ympäristö. Skannauksen huolellisella suunnittelulla vähennetään ulkoisten tekijöiden vaikutus lopputulokseen. Hyvälaatuisilla valokuvilla voidaan vaikuttaa oleellisesti tuloksen laatuun, jolloin on mahdollista luoda yleisten tietomallivaatimusten mukainen lopputulos. Fotogrammetrisissä mittauksissa pääosassa on luonnollisesti kamera ja kamerasta saatujen valokuvien laatu.

Fotogrammetrinen prosessi vaatii paljon dataa. Valokuvista halutaan tuottaa mahdollisimman korkealaatuista tietoa mallinnusprosessin tarpeisiin. Korkealaatuisten tulosten aikaansaamiseksi yksittäisten kuvien tulisi olla tarkkoja, teräviä sekä selkeitä. Käytännössä mitä suuremman pikselimäärän kamera pystyy ottamaan, sitä paremmin kamera soveltuu fotogrammetrian tarkoituksiin. Kameran suuri pikselimäärä vaikuttaa teoreettiseen erottelutarkkuuteen, jolloin korkeamman tarkkuuden mahdollistava kamera pystyy tallentamaan pienempiä yksityiskohtia tarkemmin, koska yksittäinen pikseli on fyysiseltä kooltaan pienempi. Kuitenkaan suuresta erottelutarkkuudesta ei ole hyötyä, jos kuva ei ole tarpeeksi terävä. Kuvien epäterävyyteen vaikuttavat mm. optiikan laatu ja kohteen tai kameran liike kuvanottohetkellä. Liike-epäterävyyteen voidaan vaikuttaa helposti kiinnittämällä kamera kuvanottohetkellä jalustaan. (19, s. 26.)

Syvyysterävyydellä on fotogrammetrian kannalta huomioonotettava elementti. Syvyysterävyydellä tarkoitetaan aluetta, joka toistuu kameran edessä tarkennettuna molemmiin puolin olevana syvyyssuuntaisena alueena. Syvyysterävyyteen vaikuttavat kolme tekijää: kameran aukon koko, etäisyys kohteeseen ja linssin polttoväli. Fotogrammetrisissä tarkoituksissa otettujen kuvien tulisi olla mahdollisimman terävänä koko kuva-alalla, että

yksityiskohdat eivät häviä näkyvistä. Syvyysterävyyttä saadaan helposti lisättyä kameran aukon kokoa pienentämällä. Kuvassa 5 visualisoidaan kahden eri aukon koon vaikutusta syvyysterävyyteen. Kameran aukon ollessa kooltaan pieni, $f/11$, syvyysterävyysalue kattaa kohteen kokonaan, jolloin saadaan koko kohde tallennettuna terävänä. Kun aukon koko on $f/4$, kapea syvyysterävyyssalue kattaa vain osan kappaleesta. Tällöin kohteen taaemmasta puoliskosta ei voida havaita helposti yksityiskohteita ja taaempi puolisko jää sumeaksi. Tämä vaikeuttaa taas fotogrammetrista prosessia. Optimaalisen aukon löytäminen vaatii hieman opettelua, mutta parhain mittaustulos saadaan käyttämällä mahdollisimman suurta aukkoa ja yleensä aukko asetetaan arvojen $f/8$ ja $f/11$ välille. (Kuva 5.) (19, s. 26.)



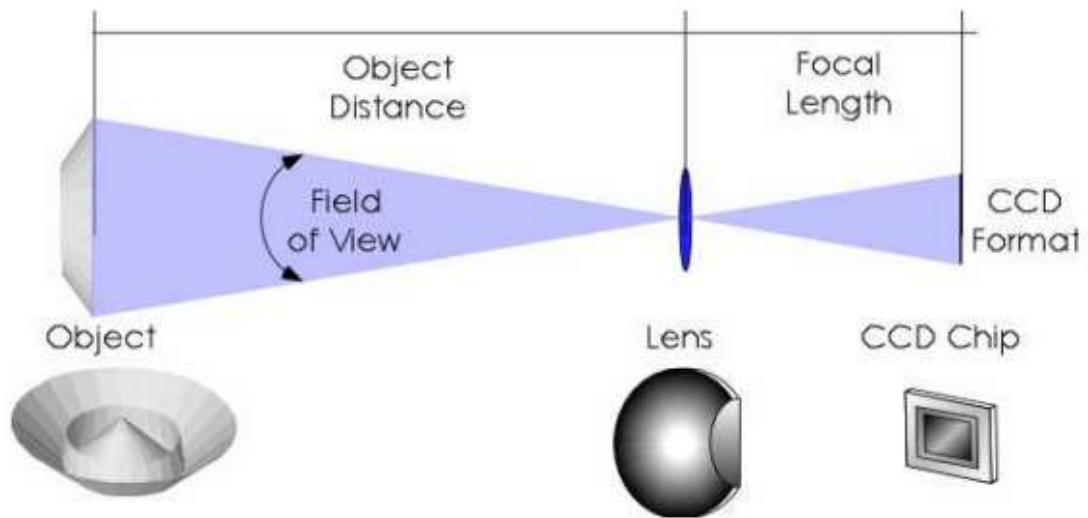
Kuva 5. Kameran aukon koon vaikutus syvyysterävyyteen (19).

Ympäristölliset seikat aiheuttavat haasteita fotogrammetrisella mittaustavalla mallinnettaessa. Tasaiset ja yksiväriset pinnat ilman selkeitä kiintopisteitä ovat ongelmallisia valokuvamallinnuksessa, kuten myös kiiltävät ja läpinäkyvät pinnat, jotka aiheuttavat selkeitä heijastuksia. Muun muassa laserskannerit sietävät huomattavasti paremmin heijastavia pintoja kuin fotogrammetrisin keinoin mallinnettaessa. (19, s. 6.) Valoa tulee olla

luonnollisesti riittävästi, että valokuvaaminen onnistuu. Valon laadullakin on merkitystä, ja olisikin suotavaa, että valaistus olisi mahdollisimman tasaista. Ideaaltilanne olisikin, että valo ei aiheuttaisi selkeitä varjoja tai kohteen epätasaisuuksien korostumista. Parasta valaisua tuottaakin luonnonvalo, jolloin etenkin pilvisenä päivänä auringosta tuleva terävä valo pehmenee ja valaisee kohteen tasaisesti. (19, s. 30.) Sisätilamittauksissa luonnonvaloa ei ole välttämättä saatavilla kovinkaan helposti, joten erilaiset valonlähteet on mietittävä tarkasti. Tavallinen taskulamppu tuottaa terävää valoa, mutta ongelmana on valon jakautuminen tasaisesti ympäri mitattavaa kohdetta tai huonetta. Valonlähteen tuominen mitattavaan kohteeseen onkin yksi isoimmista ongelmista, sillä kalustoa täytyisi mielellään olla mahdollisimman vähän.

4.2 Valokuvaus

Fotogrammetrisessä mallinnuksessa tulee ottaa huomioon valokuvien korkealaatuisuus, jotta mallista tulee tarvittavan tarkka ja luotettava. Valokuvien hyvään laatuun vaikuttavat kameran näkökenttä, linssin fokuointi ja valotus. Kameran näkökentällä tarkoitetaan, kuinka suuren alueen kamera näkee. Tähän vaikuttavat linssin polttopisteen (focal length) ja digitaalisen sensorin (CCD format) koko (kuva 6). Polttopisteen ollessa mahdollisimman lyhyt sitä laajempi näkökenttä saavutetaan. Digitaalisen sensorin vaikutus on päinvastainen, sillä laajempi näkökenttä saavutetaan isommalla digitaalisella sensorilla. On hyvä ottaa kuitenkin huomioon, että mitä laajempi näkökenttä on, sitä epätarkempia ovat myös kuvat.



Kuva 6. Polttopisteen ja digitaalisen sensorin vaikutus kuvausalaan (20).

Linssin fokuosoinnilla tarkoitetaan linssin kohdistusta, jolla saadaan kuva tarpeeksi teräväksi. Terävyysalueella tarkoitetaan kantomatkaa, jolla hyväksyttävä terävyys saavutetaan. Terävyysalueen ollessa mahdollisimman hyvä näyttää kuva katsojan silmään syvyyssuunnassa terävältä tarkennusetäisyyden etu- ja takapuolelta. Terävyysalueen laatuun vaikuttavat eniten linssin polttopiste, digitaalisen sensorin koko, kuvausetäisyys kohteesta, kohteen koko ja kameran linssin f-numero.

Pääperiaatteena kuitenkin fotogrammetrisissä kuvauksissa on, että valotus on säädetty kuvattavassa kohteessa mahdollisimman kirkkaaksi. Taustan valotusta voidaan kontrolloida kameran sulkimen aikaa säätämällä. Taustan valotuksen minimoiminen helpottaa kohteitten paikannuksessa ja mittaamisessa. (20, s. 14-15.)

5 Työn toteutus esimerkkikohteessa

5.1 Kalusto

Mittauksissa käytettävät kuvaus- ja mittausvälineet, sekä kerätyn datan käsitteleminen ja analysointi esitetään tässä luvussa. Fotogrammetrisin keinoin mallinnetaan Metropolia Ammattikorkeakoulussa sijaitsevat kellaritilat, johon käytetään DotProduct LLC:n valmistamaa DPI-8-skanneria sekä Sonyn $\alpha 7R$ -järjestelmäkameraa. Näiden tuottamaa pistepilviaineistoa verrataan Leica ScanStation P16 -laserkeilaimen tuottamaan pistepilviaineistoon. Pistepilviaineistot käsitellään Autodeskin Recap- ja Leica Cyclone -ohjelmilla.

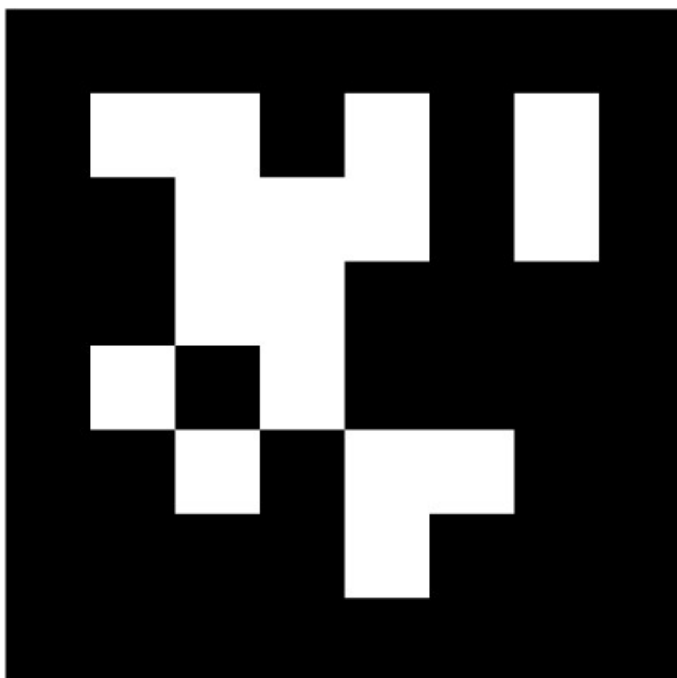
5.1.1 DPI-8-käsiskanneri

Yhdysvaltalaisen yrityksen DotProduct LLC:n valmistama DPI-8-skanneri (kuva 7) mahdollistaa 3D-mallintamisen kädestä pidettävällä laitteella. Laitteen PrimeSense Carmine -sensori ottaa ympäristöstään syvyys- ja väritietoa, josta saadaan kolmiulotteista syvyystietoa aikaiseksi. Syvyyden mittaamisen menetelmänä käytetään laitteessa infrapunavalon ja CMOS-kennon yhteisvaikutusta, josta saadaan VGA-tason syvyyskuva. (21)



Kuva 7. DPI-8-skanneri.

Sensori syöttää tablet-tietokoneelle USB-kaapelilla sensorin välittämää mittaustietoa, josta on myös mahdollista samanaikaisesti tarkastella mittaustulosta. Koordinaatiston määrittäminen ja useiden mittauskohteiden rekisteröiminen on mahdollista määrittää laitteella mittauksen jälkeen. Myös useiden pistepilviaineistojen rekisteröimistä ja tarkastelamista voi suorittaa suoraan tablet-laitteessa. Mittausdatan tarkkuuteen vaikuttavat mittaukseltaisyys, lämpötila, valaistus, kohdealueen heijastavuus ja käyttöaidot. Mittaustulosta voi parantaa valmistajan internetsivuilta ladattavilta AprilTags-viivakoodeilla (kuvasssa 8), joiden avulla laite tunnistaa paremmin sijaintinsa mittauksen aikana. (22)



ID: 0
Tag family: 36h11

Kuva 8. Esimerkkikuva AprilTagista (22)

5.1.2 Sony α7R -kamera

Työssä käytettiin Sony α7R -järjestelmäkameraa valokuvien ottamiseen. Kamerassa on 35 mm:n täysikokoinen (35,9 × 24mm) CMOS-sensori. Kameran maksimiresoluutio laajakuva-asetuksessa (16:9-kuvasuhde) on 7360 x 4144 (30 megapikseliä). Kameran aukoksi asetettiin mittauksessa f/8, jolloin oletettavasti syvyysterävyysalue saadaan mahdollisimman tehokkaaksi optiikan näkökulmasta. Kamerarungon hinnaksi mainitaan 2 270 euroa valmistajan internetsivuston mukaan. (23)

5.1.3 Laserkeilain

Leica ScanStation P16 on korkealaatuinen ja suorituskykyinen kolmiulotteista pistetietoa keräävä keilain. Laitetta ohjataan kosketusnäytöllä, jonka avulla on myös mahdollista tarkastella mittaustietoa nopeasti maastossa. Laitteessa on myös langattomalla wlan-yhteydellä toimiva kauko-ohjaus, joka mahdollistaa laitteen ohjaimen mobiililaitteilla, kuten puhelimesta tai tabletista käsin. Laitteen sisäisellä kameralla voidaan mittaussympäristöstä ottaa värikuvia, jolloin pistepilvet voidaan esittää alkuperäisillä väreillä. Laserkeilaimen tiedonkeruunopeudeksi mainitaan miljoona pistettä sekunnissa ja maksimitoimintaetäisyys 40 metriä (minimietäisyys 0,4 m).

5.1.4 Laserkeilauksen suorittaminen

Laserkeilain pystytetään kolmijalalle pakkokeskitysalustan päälle, jonka jälkeen keilain tasataan. Tähykset kiinnitetään mittausalueelle ennen laserkeilauksen aloitusta. Tässä työssä käytetään samoja tähyksiä, mitä valokuvaskannauksessa käytetään. Tämän takia skannauslaatua on helppo vertailla keskenään. Kuvassa 9 esitellään laserkeilausta mitattavassa kohteessa.

Laserkeilaus on hyvin nopea ja yksinkertainen vaihe projektissa. Skanneri pystytettiin vapaalle asemapisteelle. Asetuksista täytyy huomioida resoluution tarkkuus, jonka jälkeen suoritettiin itse skannaus. Asetuksista valittiin myös skannaus ilman valokuvia, jolloin skannaus kestää vain alle kolme minuuttia ja säästetään aikaa. Kun skannaus on suoritettu onnistuneesti, jatketaan mallinnusta seuraavalta asemapisteeltä. Jokainen eri asemapisteeltä otettu skannaus jälkikäsitellään erikseen mallinnusohjelmassa.



Kuva 9. Laserkeilain pystytettynä kolmijaloille.

5.1.5 Takymetri

Työssä käytettiin takymetrinä Trimble S7 -takymetriä (kuva 10). Takymetriä käytetään laserkeilauksessa mittauksessa käytettyjen tähysten mittaamiseen. Tähyksiä käytetään laserkeilausten georeformointiin eli kuvan liittäminen sijaintia koskevaan tietoon. (24) Tähyksien mittaamiseen tarvitaan tarkkaa takymetriä, koska etäisyysmittausten tarkkuus heikentyy ilman prismalla mitattaessa. Ilman prismamittausta etäisyysmittausten tarkkuus on usein 2 mm + 2 ppm -luokkaa. (25, s. 2.)



Kuva 10. Takymetri mittaa tähyksen koordinaatit, joiden avulla pistepilven rekisteröinti suoritetaan.

Työssä käytettiin tähyksinä DPI-8:n valmistajan DotProduct LLC:n valmistamia mustavalkotähyksiä. Nämä tähykset tulostettiin tavallisella tulostimella A4-paperille. Laserkeilaimella mallintaessa suositellaan tavallisesti 1–15 metrin etäisyyttä asemoidessa laserkeilainta tähyksiin nähden. DPI-8-laitteella mallintaessa tällaista suositusta ei ole. Tähyksiä kiinnitettiin seinään mahdollisimman paljon rekisteröinnin laadun parantamisen takia, jotta vastinpisteitä oli mahdollista kerätä enemmän. Suositeltavaa olisi ainakin viiden yhteisen tähyksen käyttö.

Skannaustulosten optimaalisuutta lisää myös tähyksien sijoittuminen tasaisesti skannerin ympärille eikä vain toiselle puolelle skanneria. Laserkeilauksessa suositellaan myös tähyksien sijoittamisesta eri korkeuksille ja sijainneille, mutta kuitenkin mahdollisimman

kohtisuoraan laserkeilaimen nähden. Näin taataan parempi mittausgeometria, johon vaikuttavat samat periaatteet kuin muussakin mittaamisessa, vaikka jonkun tähyksen näkyvyys estyisikin hetkellisesti. Tähysten näkyvyys tulee varmistaa eri keilausasemilta, jos skannausten rekisteröinti tapahtuu tähysten avulla. (26, s. 17.) Tähyksien tarkoituksena on yhdistää muut keilaukset ja valokuvat asemapisteidensä välillä sekä rekisteröidä pistepilvet koordinaatistoon. Tähykset ovat yleensä tasomaisia, pallomaisia tai puolipalloja. Normaalisti laserkeilauksen aikana olisi suotavaa suunnitella tähysten sijoittaminen mitattavassa kohteessa, koska mittausalueet voivat olla hyvinkin isoja. Tässä työssä ei kuitenkaan pienen tilan johdosta synny liian suuria etäisyyseroja tähyksiin nähden. (3, s. 30.)

Mustavalkotähykset yksilöidään pistepilviin juoksevana numerona takymetrimittausten mukaan. Mikäli kyseistä mustavalkotähystä ei ole mitattu takymetrillä, numerointi voidaan aloittaa juoksevana selkeästi erottuvalla numeroilla esim: 1000, 1001, 1002 jne. Kun tähykset on saatu sijoitettua mitattavaan kohteeseen, niiden keskipisteet mitataan XYZ-koordinaatein takymetrillä. Mittaukset tehdään mielivaltaiseen koordinaatistoon, jossa jokaiselle tähykselle annetaan tunnus.

5.2 Valokuvauksen suorittaminen

Valokuvaus suoritettiin käsivaralta ympäri mitattavaa kohdetta. Vaikka kuvista voisi saada tarkempia kolmijalan päälle kiinnitettynä, se olisi luultavasti hankaloittanut vain valokuvaamista, sillä valokuvia pitäisi ottaa tilasta monista eri etäisyyksistä ja paikoista ympäri tilaa. Valokuvaamisessa pyrittiin saavuttamaan kuvaussijaintien keskinäinen sijoittuminen (kuvausgeometria) riittävän pieneksi, jolloin yksittäiset elementit näkyvät riittävän monella eri kuvalla. Kuvia tämän takia on myös tärkeää ottaa riittävästi eri kuvakulmista ja etäisyyksistä, jolloin kuvien keskinäinen rekisteröiminen helpottuu. Valittu tila sisältää monia eri elementtejä, jotka Autodeskin Recap-ohjelma tunnistaa todennäköisesti helposti. Tilan seinät ovat taas täysin valkoisia ja pintamateriaaliltaan tasaisia, joten mallintaminen voi tuottaa suuria haasteita näillä yksivärisillä pinnoilla.

Kohteen kuvaamiseen ei mene kauan aikaa. Valokuvia otettiin ympäri tilaa automaatti-asetuksilla eri kuvakulmista ja etäisyyksistä siten, että kameran kanssa otettiin kuvia pyörimällä kierros ympäri. Kuvia pyrittiin ottamaan eri kuvauspisteeltä useita eri korkeuksista. Työssä otetut valokuvat vietiin vielä VisualSFM-ohjelmaan, josta saa käsityksen

valokuvauksen kuvausgeometriasta (kuva 11). Kuvassa esitetään visuaalinen esitys kameran sijainneista ja kuvaussuunnista valokuvauksen aikana.



Kuva 11. Keilatun materiaalin siirto tietokoneelle ja pistepilven rekisteröinti. Kuva: VisualSFM

Valokuvien ja DPI-8-laitteen materiaalin yhdistämiseen käytettiin aluksi Autodeskin Recap 360 -ohjelmistoa. Autodeskin Recap-ohjelmalla voidaan käsitellä laserkeilaimista tuotettua pistepilviaineistoa. Recapin avulla onnistuu pistepilvien tarkastelu, rekisteröinti, editointi ja vieminen (import) muihin ohjelmistomuotoihin. Pistepilviaineistot voivat olla tiedostokooltaan valtavia, mutta niiden tarkastelu onnistuu tietokoneen suorituskyvystä riippuen Recapilta sulavasti. Myös pistepilviaineiston siivoaminen ja käsitteleminen ylimääräisiltä aineistoilta on mahdollista, jolloin tiedoston kokoa saadaan pienennettyä. Tietomallinnuksen avuksi pistepilviaineisto voidaan sen käsittelyn jälkeen viedä muihin tiedostomuotoihin, jolloin esimerkiksi Autodeskin Revit-ohjelmistolla voi pistepilviaineistoa hyödyntää suunnitelmien tarkassa mallintamisessa.

Recap-ohjelmisto on hyvin käyttäjäystävällinen ja yksinkertainen käyttää. Työssä vietiin valokuvat ja DPI-8-laitteen materiaali Recapiin. Aluksi valokuvista otetaan kaikki tärähäneet kuvat pois ja sen jälkeen kuvat siirrettiin ohjelmistoon. Recapissa on mahdollista

viellä samanaikaisesti 250 kuvaa, joten tässäkin mielessä oli hyvä valita silmämääräisesti parhaat kuvat vietäväksi ohjelmistoon. DPI-8-laitteessa oli jo mahdollista kuvauksen aikana yhdistää pistepilvet yhteen ja sijoittaa kuvauksen aikana tehty 3D-malli myös koordinaatistoon, joten varsinaista rekisteröintiä ei tarvinnut vielä tässä vaiheessa tehdä.

Valokuvia yhdistäessä Recapilla on kirjauduttava verkko-osoitteeseen <https://recap360.autodesk.com> ja sivustolla luodaan uusi kuvaprojekti. Projekti nimetään ja valitaan halutut asetukset (kuva 11). Tiedostomuotona voidaan käyttää mm. Autodeskin pistepilvimuotoa RCS (Reality Capture Scan), TIN-muoto RCM (Reality Capture Mesh) tai ortokuva. Asetusten valinnan jälkeen siirrytään lataamaan kuvat sovellukseen.

Kuvien rekisteröinti tapahtuu kuvien latauksen jälkeen. ”Advanced tools” -painikkeen alta aukeaa rekisteröintivälilehti, jossa verrataan kahta kuvaa toisiinsa. Signaalipiste merkitään ensimmäiseen kuvaan ja toiseen kuvaan valitaan sama signaalipiste eri kuvakulmasta otetun kuvan perusteella. Näiden kahden kuvan välillä samaa signaalipistettä hyödyntäen annetaan koordinaatit XYZ (X = itä, Y = pohjoinen, Z = korkeus). Samalla menetelmällä sama signaalipiste voidaan merkitä neljään eri kuvaan.

DPI-8-laitteessa pistepilvien yhdistäminen olisi jo mittausvaiheessa pitänyt olla hyvin automatisoitua. Näin ei kuitenkaan ollut, sillä tarkastaessa mallinnustuloksia Recap-ohjelmassa, mallinnus ei sijoittunut koordinaatistoon oikein vaan lopputulos näytti enimmäkseen sekavalta. Työssä loppujen lopuksi päädyttiin käyttämään Leica Cyclone -ohjelmaa, jossa pistepilvi oli vielä kertaalleen rekisteröitävä koordinaatistoon. Valokuvien mallinnukseen ei tehty varsinaista rekisteröintiä mallin epäonnistumisen takia. Kameralla kuvatun mallin lopputulos ei vastannut tarvittavan hyvää laatua, jotta siitä olisi pystynyt tehdä sisätilamallinnusta (kuva 12).



Kuva 12. Epäonnistunut valokuvamallinnus. Kuva: Autodesk Recap.

5.2.1 Koordinaattitietojen purku

Tahyksien XYZ-arvot mitattiin takymetrillä, josta saatiin lopputuloksena tahysten keski-kohtien tarkat sijainnit. Sijaintien arvot ovat listattu kuviossa 1. Trimble S7 -takymetrissä mukana oleva CU-ohjain vietiin telakalle, josta tiedot purettiin .xyz-tiedostoksi tietokoneelle. Tahysten saamia arvoja voidaan viedä .txt-tiedostomuodossa Leican Cyclone-ohjelmistoon.

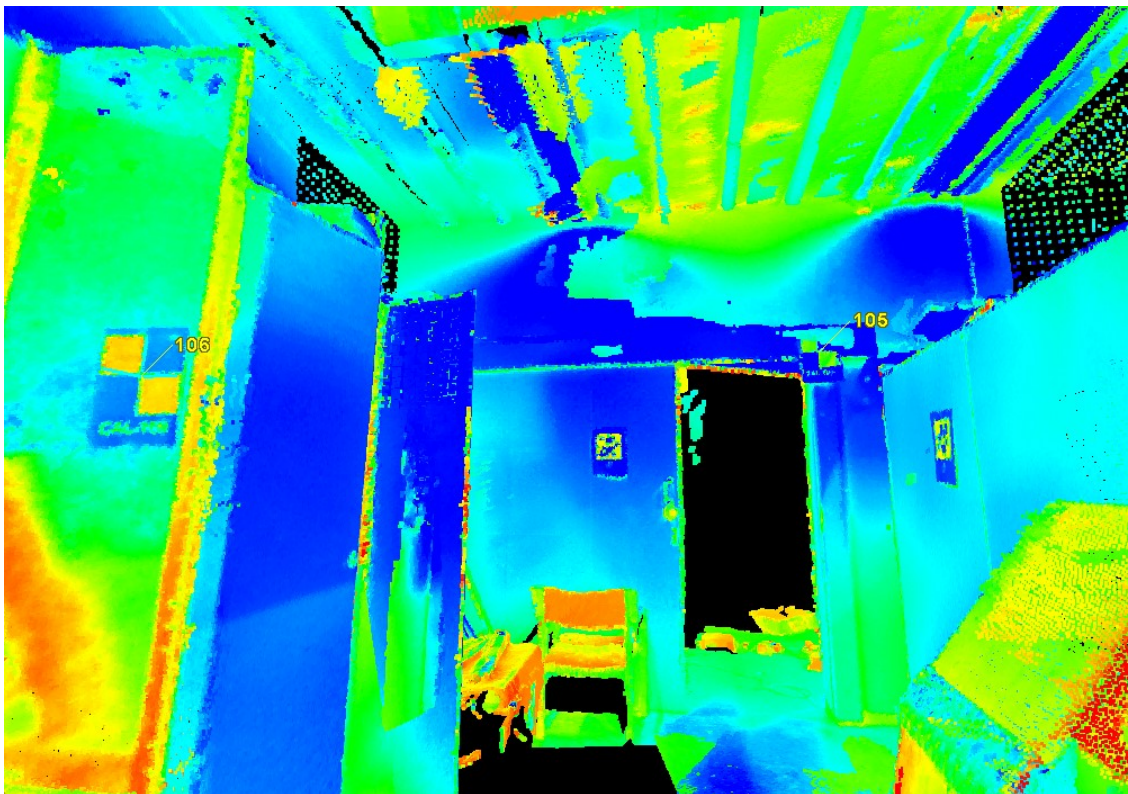
Tähys	X	Y	Z
105	200.000	143.878	82.202;
116	200.594	147.170	81.538;
119	199.990	151.157	81.730;
120	197.845	147.604	81.557;
106	198.029	146.481	81.649;
108	203.109	144.058	81.674;
112	203.683	146.040	81.711;
111	206.081	146.658	80.552;
103	201.239	148.998	81.704;

Kuvio 1. Tähyksen XYZ-arvot

5.2.2 Keilatun aineiston purku, rekisteröinti ja suodatus

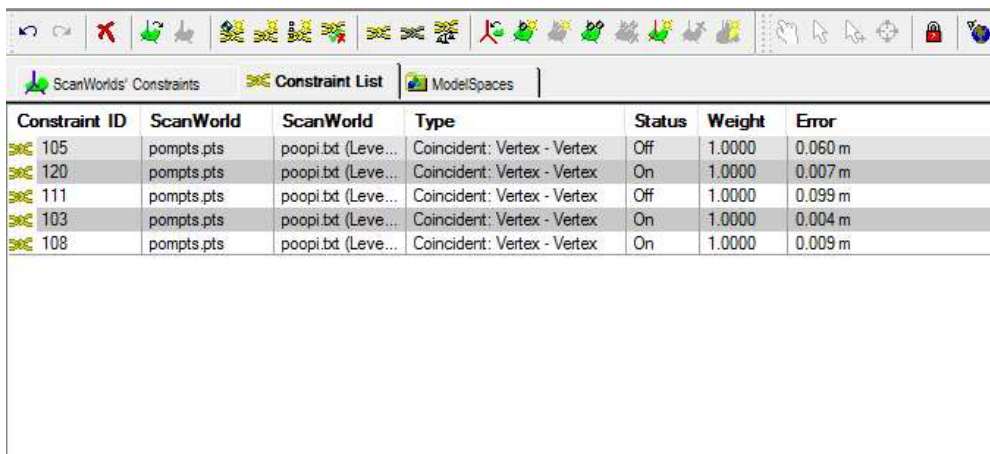
Kaikki pistepilvet vietiin lopulta Leica Cyclone -ohjelmaan, sillä Autodeskin Recap-ohjelmistossa ei ollut mahdollista käsitellä ja rekisteröidä DPI-8-laitteesta saatuja skannauksia. DPI-8-laitteella tehdyt pistepilvet oli vietävä erikseen laserkeilaimen tuottaman pistepilven tavoin Cyclone-ohjelmaan, eikä jo skannausvaiheessa tehty rekisteröiminen toiminut halutulla tavalla, koska mallinnus ei ollut oikeassa koordinaatistossa. DPI-8:n pistepilvi voitiin kuitenkin yhdistää laitteessa ilman koordinaattitietoja. Valokuvista saatua mallia Recap-ohjelmalla ei viety Cyclone-ohjelmistoon sen heikon lopputuloksen takia.

DPI-8-laitteessa yhdistetty pistepilvitiedosto vietiin Leica Cyclone -ohjelmistoon ja yhdistettyä pistepilveä oli helppo käsitellä ohjelmassa. Tiedostojen viennin jälkeen pistepilvet rekisteröitiin. Cyclone-ohjelmassa jokainen käytetty tähys numeroitiin takymetrissä sille määritetyllä numerolla. (Kuva 13.)



Kuva 13. Pistepilvessä olevien tähysten numerointia. Kuva: Leica Cyclone.

Pistepilvi oli joidenkin tähysten kohdalla sotkuinen eikä jokaista tähystä voinut näin ollen käyttää. Lopulta tilasta saatiin vain viisi tähystä otettua mukaan rekisteröintiin. Kun jokainen tähys oli saatu numeroitua oikein, tehtiin mallille rekisteröinti koordinaatistoon. Kaikille virheellisille tähyksille, jotka eivät olleet YTV 2012:n tarkkuusvaatimusten mukaisia, laitettiin off-status, jolloin tähystä ei otettu mukaan rekisteröintiin. Näistä viidestä vain kolme täytti tarkkuusvaatimukset (kuva 14), mikä vielä riittää pistepilven rekisteröimiselle. Tällä samalla tavalla tehtiin myös laserkeilausten rekisteröinti.



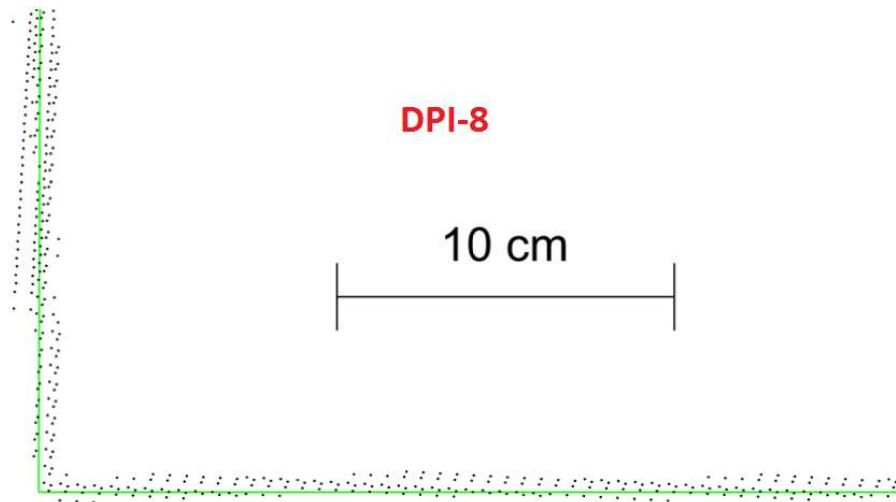
Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error
105	pompts.pts	poopi.bd (Leve...	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	0.060 m
120	pompts.pts	poopi.bd (Leve...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.007 m
111	pompts.pts	poopi.bd (Leve...	Coincident: Vertex - Vertex	Off	1.0000	0.099 m
103	pompts.pts	poopi.bd (Leve...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.004 m
108	pompts.pts	poopi.bd (Leve...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.009 m

Kuva 14. DPI-8-skannerista saadusta pistepilvestä mukaan otetut tähykset rekisteröintivaiheessa. Kuva: Leica Cyclone.

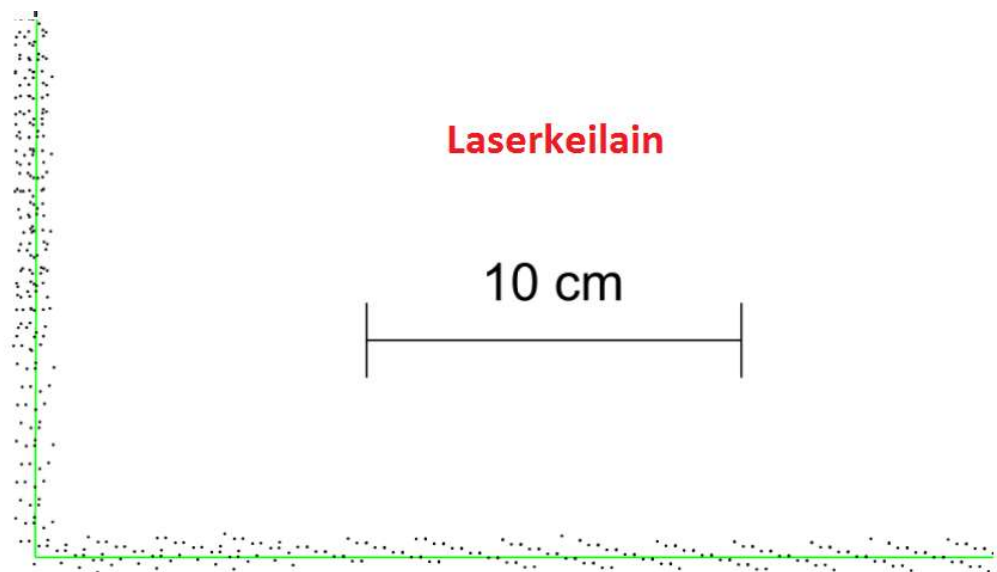
6 Tulosten vertailu

Tulosten tarkastelussa on huomioitava erityisesti merkitykselliset kohteet, mitä suunnitelutyössä vaaditaan. Tarkastuspisteinä käytetään mm. rakennuksen nurkkapisteitä. YTV 2012:n mukaisesti tarkkuusvaatimuksena nurkkapisteiden tarkkuudelle on 10 millimetriä. Korkeuden tarkastelussa tarkkuudeksi voidaan asettaa YTV: 2012:n mukaisesti vähintään 25 millimetriä.

Bentley Microstation -ohjelmassa avattiin pistepilvet tarkkuuksien tutkimista varten omalle tasolle. Pistepilvestä leikattiin seinän osuus nurkkapisteiden tarkkuuden määrittämistä varten, jolloin voitiin asettaa pistepilvi ylänäkömään seinälinjan piirtämistä varten. Keskiarvo seinälinjasta piirrettiin silmämääräisesti pistepilven seinän pistetason perusteella kuvien 15 ja 16 mukaisesti, joissa pistepilviä vertaillaan toisiinsa. Määritetyt koordinaatit tallentuivat erilliseen tiedostoon.



Kuva 15. DPI-8-skannerin tuottaman pistepilven ja seinälinjan välinen ero.



Kuva 16. Laserkeilaimen tuottaman pistepilven ja seinälinjan välinen ero.

Mallintaminen on käytännössä pistepilven tulkintaa. Esimerkiksi seinän pinta mallinetaan pistepilvitason keskiarvon mukaan. Laserkeilaimet aiheuttavat pistepilveen kohinaa ja aaltoilua eikä pistepilvi ole tavallisesti täysin tasainen. Todelliset seinät eivät usein ole aina täysin tasaisia pinnoiltaan. Siksi mallista tehdään yksinkertaistettu tasainen seinä, jolloin on tarkoituksen mukaisesti kannattavaa keskittyä pistepilviryhmästä tulkittujen rajapintojen sijaintien tarkasteluun. Voidaan ajatella, että rakennuksen nurkkapiste mallissa on leikkauskohta kahden eri seinäpinnasta tulkittujen vektorien kesken. (18, s. 23.)

6.1 Nurkkapisteiden tarkkuudet

DPI-8-laitteella mallinnetun tilan nurkkien sijaintivirheet laskettiin vertaamalla niitä laserkeilauksen pistepilvistä saatuihin tuloksiin, joita esitetään taulukossa 2. Nurkkapisteet ovat numeroitu numeroilla 1–4. (kuva 17)



Kuva 17. Vertailussa käytetyt numeroidut nurkkapisteet. Kuva: Autodesk Revit.

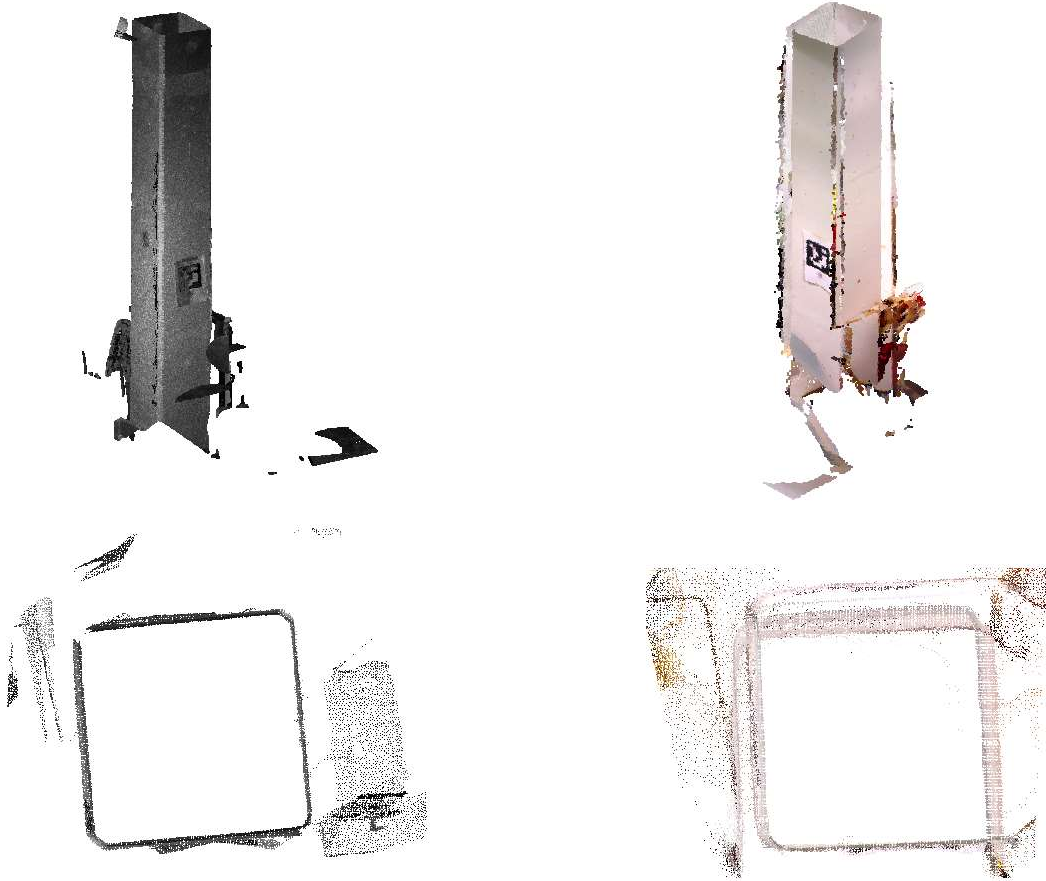
Tila	nurkka 1		nurkka 2		nurkka 3		nurkka 4	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
Laserkeilain	143,994	196,959	149,162	198,220	148,669	206,876	143,454	206,600
DPI-8	143,990	196,951	149,156	198,207	148,665	206,876	143,456	206,598
	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)	ero (X)	ero (Y)
	4 mm	8 mm	6 mm	7 mm	4 mm	0 mm	0 mm	2 mm
	nurkka 1	nurkka 2	nurkka 3	nurkka 4				
Ero yhteensä (XY)	9 mm	14 mm	4 mm	3 mm				

Kuvio 2. Laserkeilaimella ja DPI-8-skannerilla tuotettujen pistepilvien vertailu

Tuloksista (kuvio 2) huomataan, että DPI-8-laitteella tehty pistepilvi eroaa huomattavan vähän tarkkuudeltaan laserkeilaimen tarjoamasta pistepilvestä. Nurkassa 3 ja 4 kulmien yhteenlaskettu ero jää selvästi alle YTV 2012:n asettamasta tarkkuusrajasta. Nurkassa 1 päästään myös juuri alle 10 mm:n tarkkuuteen. Nurkka 2:n ero laserkeilaimen pistepilveen on 14 mm, joka osoittautui hankalaksi alueeksi DPI-8-laitteelle. Nurkan edessä sijaitsee suuri hylly, joka estää näkyvyyden nurkalle. Suuri este voi aiheuttaa tarkkuuseroja myös laserkeilaimella mitattaessa, jolloin tulokset voivat vääristyä tämänkin johdosta.

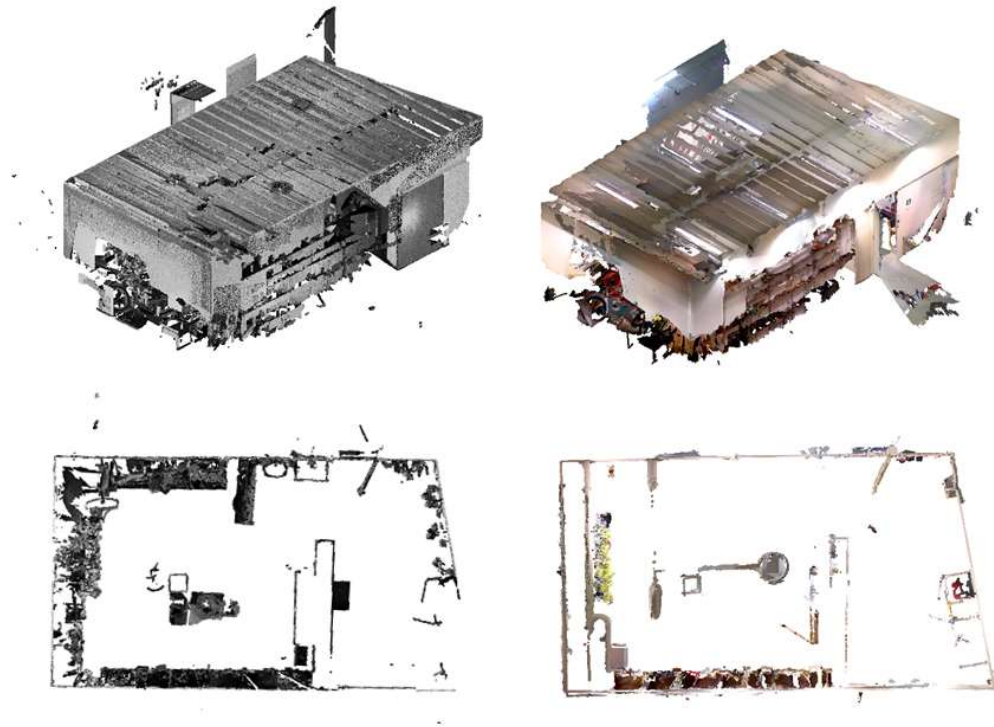
6.2 Visuaalinen tarkastelu

Kun tutkitaan kolmiulotteista mittausaineistoa, on hyvin tärkeää tarkastella lopullista pistepilveä visuaalisesti. Oleellisina asioina pistepilven visuaalisessa tarkastelussa on esimerkiksi geometrian säilyminen kohteessa tai pintamateriaalin vaikutus laskettavaan pistepilveen. Mallikohteen pistepilveä tarkastelemalla huomataan, että seinäpintojen pistepilvet ovat geometrialtaan varsin onnistuneita. Kuvassa 18 tarkastellaan vasemmalla laserkeilatun ja oikealla DPI-8:sta saadun pistepilven laatua. Huomataan, että kohteessa sijainnut pilari kadotti geometriansa ja lopputulos oli varsin epäselvä.



Kuva 18. Laserkeilaimella (vas.) ja DPI-8-skannerilla tuotetun pistepilven vertailua. Kuva: Autodesk Revit.

Malli on silti pilaria ja pieniä puutteita lukuun ottamatta varsin kelvollinen. Tietyt yksityiskohdat jäävät epäselviksi erityisesti katvealueilla, jonne DPI-8-skannerilla ei ollut näköyhteyttä. Katvealueita syntyy aluille, jossa on paljon näköyhteyttä haittaavia esteitä ja irtaimistoa. Katvealueilla olisi pitänyt vielä tarkemmin kuvata mallinnusta varten lisää ja tarkemmin, mutta välillä katvealueet voivat jäädä helposti myös huomaamatta. Siksi skannauksen suunnitteleminen on tärkeää. Kuvassa 19 verrataan laserkeilaimen ja DPI-8 laitteen malleja toisiinsa. Kuvasta huomataan, että laserkeilauksen pistepilvet ovat hie- man terävämpiä ja moniulotteisempia kuin DPI-8-skannerilla otetut pistepilvet. Myös eri- laiset yksityiskohdat (esim. hyllyt ja kaapit) näkyvät laserkeilauksesta tehdyssä mallissa selkeämmin. Sisätilamallinnuksessa on silti tärkeämpää keskittyä seinien pintoihin sekä rakennusteknisesti, jotka erottuvat hyvin myös DPI-8-skannerilla tehdyssä mallissa.



Kuva 19. Laserkeilaimella (vas.) ja DPI-8-skannerilla tuotetun pistepilven vertailua. Kuva: Autodesk Revit.

7 Yhteenveto ja pohdinta

Laserkeilaimet ovat yleistyneet sisätilojen mallintamisessa sen helppokäyttöisyyden ja tarkkuuden takia. Laserkeilain tekee ympäristöstään nopeasti kolmiulotteisen pistepilven, joka sisältää valtavan määrän tietoa. Laserkeilain voi osoittautua kalliiksi investoinniksi ja laitteen epäkäytännöllisyys tietyissä tilanteissa tai paikoissa voi haitata työskentelyä rakennuksen sisällä. Esimerkiksi ahtaat ja hankalat tilat ovat suuri haaste laitteen käyttäjälle mallinnustöissä. Pistepilveä voidaan kerätä myös fotogrammetrisin keinoin. Tälläkin hetkellä multikopterien yleistymisen johdosta ilmakuvauksessa on hyödynnetty mittauskäytössä kamerakuvausta, kun esimerkiksi on haluttu mitata maaston muotoa tai rakennuksien vesikattoja. Työssä huomattiin, että järjestelmäkameralla valokuvamallinen ei sovellu sisätilojen mallintamiseen. Valokuvilla tehty 3D-malli epäonnistui, eikä se vastannut tarvittavan hyvää laatua, jotta siitä olisi pystynyt tehdä sisätilamallinnusta. DPI-8-skannerilla saatiin kuitenkin mielenkiintoisia tuloksia aikaan.

Laserkeilaimella ja DPI-8-laitteella tuotetut sekä Leican Cyclonessa lasketetut pistepilvet eroavat parhaimmillaan vain muutamia millisenttejä toisistaan. Korkeimmillaan DPI-8-laitteella tuotettu pistepilvi eroaa 14 millimetriä, joka juuri ylittää YTV 2012:ssa määritetyt tarkkuusvaatimukset. Tämä ero voi johtua kyseisen nurkkapisteen hankalasta sijainnista, sillä nurkan edessä sijaitsee iso näkyvyyden peittävä hylly. Tulokset ovat kuitenkin mielenkiintoisia, ja laite osoittautui mittauslaadultaan varsin toimivaksi ratkaisuksi. DPI-8-laitteen Android-käyttöjärjestelmän sovellukseen pohjautuva käyttöliittymä oli silti käyttökokemuksen mukaan epäselvä ja kömpelö. Laite kadotti usein sijaintinsa mittausvaiheessa eikä mittauksen aikainen mallin rekisteröiminen sekä pistepilven vieminen koordinaatistoon onnistunut oikealla tavalla. Laitteen teknologiassa on silti paljon jatkotutkimuksen varaa, sillä esimerkkikohteen mallinnus onnistui kuitenkin varsin hyvin. Menetelmällä mahdollistetaan sisätilojen helppo, nopea ja turvallinen mittaaminen.

Markkinoille on tullut mielenkiintoisia kameroita ja laserkeilaimia, jotka toimivat käytännössä samalla tekniikalla. Esimerkiksi Matterport-kameraa (kuva 20) hyödynnetään 3D-tilaesittelyjen luomisessa. Matterport-kamera käyttää DPI-8-laitteen vastaavaa RGB-D-teknologiaa hyödyksi luomalla fotorealistic malleja. Kolme RGB-sensoria ja kolme infrapunasensoria mahdollistavat laajan näkymän mallinnettavasta alueesta. Matterportilla tehty varsinainen malli yhdistetään ja luodaan automaattisesti MyMatterport-portaalissa. (27) Mallista on saatavilla värillinen pistepilvi .xyz-formaatissa, joka voidaan viedä Autodeskin ReCap-ohjelmaan ja lopulta myös Revitiin suunnittelijoiden avuksi. Matterport-kamera maksaa valmistajan internet-sivuston mukaan 4 500 dollaria ja MyMatterport-portaalin Business-lisenssi kustantaa 1 499 dollaria vuodessa.



Kuva 20. Matterport-kamera (27).

Matterportin lisäksi Leica on tuomassa markkinoille vuoden 2017 puolella BLK360-laserkeilaimen (kuva 21). Uudessa laserkeilaimessa yhdistyy monipuolisella tavalla laserkeilaus ja fotogrammetrinen mallinnustapa. Pienikokoisessa alle 20 senttimetriä korkeassa laserkeilaimessa on vain yksi virtapainike. Muuten laitetta ohjataan iPadin avulla. Myös lopullinen malli viedään ReCap Pro 360 -sovellukseen, minkä pistepilven ohjelma rekisteröi pistepilvet automaattisesti. Pieni ja kevyt laite helpottaisi mallinnustyötä, jolloin laitetta voisi kantaa helposti hankaliin paikkoihin. Laite on suunniteltu erityisesti sisätilamallinnuksia varten ja tarkkuus vastaa laserkeilaimella tuotettua pistepilveä. (28)



Kuva 21. Leica BLK360 -skanneri.

Uusien markkinoille tulevien valokuvamallinnusta tukevien laitteiden käyttöä pitäisi tutkia vielä tarkemmin. Kehitys on hyvin pitkällä ainakin ilmakuvausissa, jossa hyödynnetään valokuvamallintamista. Sisätiloja mallinnettaessa laserkeilain on edelleen varmin valinta, jos halutaan mahdollisimman tarkkaa pistepilvitietoa. DPI-8:n kaltaiset laitteet sisätiloja mallintessa voivat silti olla hyvä lisä, jos halutaan yksittäisestä kohteesta ottaa pistepilvineistöä. Leican BLK360-laserkeilain vaikuttaa omasta mielestäni mielenkiintoisimmalta valinnalta pelkästään hinnan, nopeuden ja kokonsa puolesta. Myös sijaintitietojen puolesta, jos markkinointilupauksia on uskomisen, vaikuttaa Leican uutuustuotteessa lupaavalta. Sijaintitietojen tutkiminen tarkemmin voisi olla yksi tutkimuksen kohde, että voikaanko sillä korvata tähysten käyttäminen sisätiloja mallintaessa. Rakennusten sisätilat ovat kuitenkin alueita, joissa GPS-paikannusta ei voida tarkasti käyttää.

Lähteet

- 1 Arkkitehtuuriosasto. 2016. Verkkodokumentti. Helsingin kaupunki. <<http://www.hel.fi/www/hkr/fi/tama-on-rakennusvirasto/arkkitehtuuriosasto/arkkitehtuuriosasto>>. Luettu 8.9.2016
- 2 Roivas, Mika. 2014. Laserkeilauksen hyödyntäminen inventointimallin valmistuksessa. Insinööriyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 3 Kari, Veera. 2011. Laserkeilaus ja pistepilven käsittely ydinvoimarakentamisessa. Insinööriyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 Joala, Vahur. 2016. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Verkkodokumentti. <<http://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>>. Luettu 12.9.2016.
- 5 Laurila, Pasi. 2010. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.
- 6 Koski, Jarkko. Laserkeilaus - uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. Maankäyttö-lehti. 4/2001. Lehtiartikkeli
- 7 Rajala, Marko. 2016. Laserkeilausmittaus ja rakennuksen inventointimalli. Verkkodokumentti. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK090701.pdf>>. Luettu 12.9.2016.
- 8 Ilvonen, Katri. 2008. Laserkeilauksen hyödyntäminen infrarakentamisessa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 9 Kauppinen, Antti. 2015. 3D-laserkeilainaineiston hyödyntäminen uudisrakentamisessa. Insinööriyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 10 Ahonen, Pauli. 2015. Laserkeilaus, laserkeilausmittauksen suorittaminen ja pistepilven käsittelyohjelmien vertailu. Insinööriyö. Saimaan ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 11 Hotinen, Jari. 2012. Laserkeilauksen hyödyntäminen Helsingin kaupungin organisaatiossa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 12 Tietomallinnus. 2016. Verkkodokumentti. RIL, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. <<http://www.ril.fi/fi/alan-kehittaminen/tietomallinnus.html>>. Luettu 15.9.2016.
- 13 Oinonen, Olli-Pekka. 2015. Tietomallin hyödyntäminen elementtirakentamisessa. Insinööriyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 14 Tekla Promotes Open Approach to BIM. 2016. Verkkodokumentti. Trimble Solutions Corporation. <<https://www.tekla.com/fi/node/1167>>. Luettu 20.9.2016.
- 15 Yleiset tietomallivaatimukset 2012. osa 1. Yleinen osuus. RT-ohjekortti 10-11211. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 16 Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 3. Arkkitehtisuunnittelu. RT-ohjekortti 10-11068. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 17 Yleiset tietomallivaatimukset 2012. Osa 2. Lähtötilanteen mallinnus. RT-ohjekortti 10-11067. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- 18 Hirvonen, Janne. 2015. Rakennuksen vesikaton mittaus multikopterikuvausta käyttäen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 19 Lehtiniemi, Ari. 2013. Lähifotogrammetrian käyttö 3D-skannaustekniikkana. Insinööriyö. Centria-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 20 Siitonen, Eetu. 2011. 3D-skannaamisen ja fotogrammetria hyödyntäminen suunnittelutyössä. Insinööriyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 21 PrimeSense™ 3D Sensor. 2016. Verkkodokumentti. PrimeSense. <<http://www.i3du.gr/pdf/primesense.pdf>>. Luettu 1.11.2016.
- 22 DotProduct. 2016. Valmistajan internetsivut. LLC, DotProduct. <<https://www.dotproduct3d.com/>>. Luettu 6.11.2016.
- 23 Sony A7R -järjestelmäkameran esittelysivut. 2016. Verkkodokumentti. Sony. <<http://www.sony.fi/electronics/jarjestelmakamerat/ilce-7r>>. Luettu 8.11.2016.
- 24 Fotogrammetrian perusteet: Luento 4 Georeferointi. 2007. Luentomateriaali. Aalto-yliopisto. Saatavilla: <https://foto.aalto.fi/opetus/1030/luentokalvot/L4_2007.pdf>.
- 25 Koski, Jarkko. 2012. Maalaserkeilaimen pistepilvien georeferoinnin vertailu. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 26 Rekonen, Teemu. 2014. Riegl VZ-400 -laserskannerin ja skannausaineiston aineiston käsittelyohjelmiston käyttöohjeet Helsingin rakentamispalvelu Staralle. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 27 Säilä, Jussi. 2016. 3D-kuvaus : käyttöohje Matterport-kameran käyttäjälle. Opinäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

28 Leica BLK 360. 2017. Verkkodokumentti. Leica Geosystems. <<http://blk360.autesk.com>>. Luettu 28.2.2017.