

Rakennusten 3-d mallinnus laserkeilauksen avulla

Janne Kovanen
janne.kovanen@iki.fi
57584S



Tiivistelmä

Esitelmässä esitellään useita eri menetelmiä, joilla saadaan muodostettua 3-d malleja rakennuksista hyödyntäen laserkeilauksen antamaa pistepilveä joko yksinään tai liitettynä muihin paikkatietoaineistoihin. Menetelmiä raapaistaan vain pinnasta ja esiteltävät menetelmät edustavat vain osaa olemassa olevista ratkaisuista. Monet menetelmistä tekevät oletuksia rakennuksista sekä maastosta, eivätkä aina yksinään sovellu todelliseen monimutkaisten rakennusten mallintamiseen.

Avainsanat

Laserkeilain, LIDAR, 3-D, rakennus, mallinnus, segmentointi, rekonstruktio, pistepilvi.

Lyhenteet

CAD	Computer Aided Design
dDEM	Difference Digital Elevation Model
DEM	Digital Elevation Model
DHM	Digital Height Model
DSM	Digital Surface Model.
DTM	Digital Terrain Model.
GIS	Geographical Information System.
GPS	Global Positioning System
INS/ IMU	Inertial Navigation System / Inertial Measurement Unit
LIDAR	Light Detection And Ranging
nDSM	Normalized Digital Surface Model
NDVI	Normalised difference vegetation index
RMSE	Root Mean Square Error
TIN	Triangulated Irregular Network
VRML	Virtual Reality Modeling Language

Sisällysluettelo

1. Johdanto
2. Aineiston esikäsittely
3. Rakennusten sijaintipaikkojen määrittäminen.
 - 3.1 Pelkän laserkeilain-aineiston käyttö
 - 3.1.1 Segmentointi
 - 3.1.2 Voronoi-solujen käyttö
 - 3.1.3 Pienimmän neliön liikkuvan pinnan käyttö
 - 3.2 Ilmakuvien käyttö
 - 3.3 Monikanavakuvien käyttö
 - 3.4. Rakennusten runkolinjojen käyttö
4. Malli-pohjaiset menetelmät
5. Data-pohjaiset menetelmät
 - 5.1 Tasojen reunojen määrittäminen
 - 5.1.1 Ihmisoperaattorin matkiminen
 - 5.1.2 Suorakulmaisten kattoelementtien irrotus kolmioinnilla
 - 5.1.3 Hough-muunnoksen hyödyntäminen
 - 5.1.4 Prismaattisen algoritmin käyttö
 - 5.1.5 Ilmakuvien hyödyntäminen
 - 5.2 Rakennusten rekonstruktio
6. Julkisivun liittäminen malliin
7. Tarkkuus
8. Johtopäätökset

1. Johdanto

Yhä useammat tahot kaipaavat kaupungeista rakennusten 3-d malleja. Malleja voidaan soveltaa esimerkiksi teiden melujen ja päästöjen vaikutusten mallinnukseen, yhdyskuntasuunnitteluun, matkapuhelintukiasemien sijoitteluun, liikenteen valvontaan, turistien opastamiseen, paikannukseen (Beesley, 2003), katastrofien hallintaan (Steinle ja Vögtle, 2001; Steinle ja Bähr, 2002), 3-d katasterijärjestelmissä tai kaupunkialueiden visualisointiin VRML malleina internetissä.

Moniin sovelluksiin riittää rakennusten rautalankamalli, mutta usein on hyödyllistä liittää rakennusten visuaalinen julkisivukuva malliin kun käyttäjänä on tietokoneen sijaan ihminen. Pelkän DHM:n ja fotogrammetrisesti tuotetun kuvan yhdistäminen ei kuitenkaan vielä tuota todellista 3-mallia, vaan vain ikonisen esityksen kaupungista. (Brenner ja Haala 2000).

Lentokoneista ja helikoptereista käytettävien laserkeilaimien kautta onkin tullut mahdolliseksi suorittaa automaattista ja puoliautomaattista rakennusten rekonstruointia. Puoliautomaattiseksi prosessin tekee jollain toisella menetelmällä hankitun rakennusten 2-D sijaintiaineiston käyttö, johon on tarvittu ihmisoperaattoria. (Brenner ja Haala 2000).

Pohjan laserkeilausmenetelmille tuotti viimeisten vuosikymmenien fotogrammetrinen tutkimus. Monet menetelmät ovat peräisin fotogrammetriasta, tietokonenäöstä sekä digitaalisesta kuvankäsittelystä ja niitä on muunnettu sopimaan laserkeilauksen vaatimuksiin. Rakennusten 3-d mallinnukseen onkin viimeisten kymmenen vuoden aikana luotu iso määrä uusia ratkaisuja.

Yleisesti ottaen rakennusten mallinnus koostuu kolmesta vaiheesta: Kohteen paikannus eli rakennuksen todennäköisen sijainnin etsintä, strukturointi eli osien, kuten tasojen ja niiden keskinäisten suhteiden selvittäminen ja rekonstruktio eli rakennuksen osien geometrinen ominaisuuksien, kuten kulmien, korkeuksien ja etäisyyksien määrittäminen. (Brenner, 2001).

Seuraavana käydään läpi useita eri menetelmiä. Useimmille menetelmille on yhteisiä vaiheet, jotka esittelen. Vaiheiden toteutus eroaa riippuen siitä onko menetelmä automaattinen vai puoliautomaattinen, käytetäänkö laserkeilausdatan lisäksi muuta dataa sekä algoritmien osalta. Lisäksi lähes kaikki menetelmät voi jakaa malli-vetoisiin ja data-vetoisiin menetelmiin. Ensin mainituissa pyritään aineistoon sovittamaan jokin synteettinen malli ja jälkimmäisissä pyritään löytämään rakennuksen tasot, kuten katon osat, joista lopulta malli kasataan.

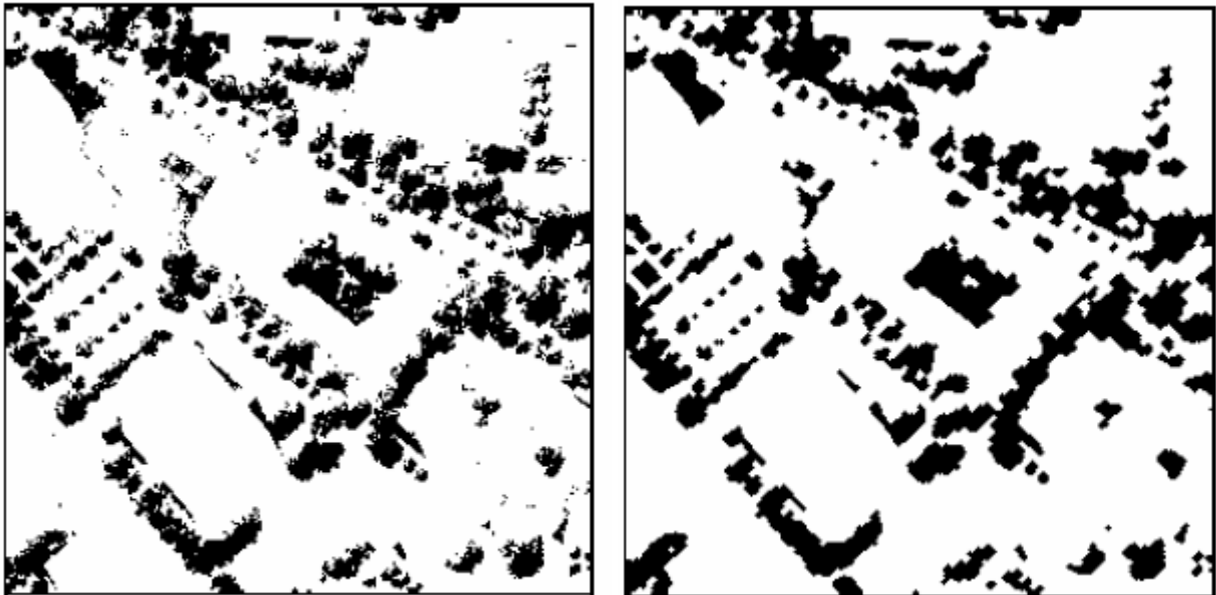
2. Aineiston esikäsittely

Laserkeilain tuottaa ison pistepilven. Ensimmäisenä mittausdata tulee korjata mahdollisten GPS:n, INS:n ja laserkeilainjärjestelmän systemaattisista ja satunnaisista virheistä. Tästä löytyy lisää mm. Vosselman ja Maas (2001b). Isoon osaan rakennusten mallinnussovelluksista korjattu data muutetaan tasasivuisiksi, esimerkiksi 1 m² rastereiksi.

Usein osa rastereista joudutaan interpoloimaan. (Hofmann et. al., 2002; Rottensteiner, et. al., 2003; Rottensteiner et. al., 2005). Tähän on olemassa useita eri menetelmiä, kuten etäisyyteen käänteisesti painotettu interpolointi, lähimmän naapurin interpolointi, kriging, polynomisen regressio, mutta useimmissa nyt tavatuissa menetelmissä hyödynnetään lineaarista ennustusta, joka on tilastollinen interpolointi-menetelmä. Menetelmästä löytyy tarkempi kuvaus Lohmann et. al. (2000). Rasteroinnin etuna on että laskentaan voidaan tällöin hyödyntää digitaalisen kuvankäsittelyn algoritmeja ja ohjelmistoja.

Laserkeilaimen ensimmäisen että viimeisen pulssin DSM:stä voidaan kummastakin tuottaa myös omat rasterihilat. (Rottensteiner et. al., 2003). Rasterikoko riippuu aina sovelluksesta sekä varsinkin siitä käytetäänkö laserkeilaimen alustana helikopteria, jolloin voidaan lentää matalammalla ja saada tiheämpi pistepilvi kuin lentokoneella. Rasteroinnin sijaan on usein mahdollista muodostaa pistepilvestä TIN-malli (Tse et. al., 2006). Aina suoritettaessa rasterointia kannattaa muistaa että tällöin yleistetään dataa, ja moniin sovelluksiin kannattaa käyttää tasajakoisen hilan sijaan epäsäännöllistä mallia.

Jotkin menetelmät vaativat myös DEM:n, joka voidaan saada mm. eroosiolla (Oda et. al., 2003) tai muilla spatiaalisen jakauman oletuksia hyödyntävillä menetelmillä. Mikäli käytetään LIDAR-datan lisäksi muita aineistoja, tulee nämä georeferoida ja siirtää aineistot samaan koordinaattijärjestelmään. Lisäksi paperikartat tulee skannata ja monikanavakuvien NDVI-indeksiä käytettäessä kannattaa kyseinen data esikäsitellä (Kuva 1). Tähän voi käyttää morfologista sulkemista ja avaamista (dilaatio+eroosio ja eroosio+dilaatio), jolloin kasvillisuutta omaavat alueet tulevat paremmin esiin. (Vögtle ja Steinle, 2000).



Kuva 1. Kumpikin kuva esittää mustalla binäärinen NDVI-indeksiin. Vasemmanpuoleinen kuva on käsittelemätön ja oikeanpuoleinen on selkiytetty sulkemisella ja avauksella. (Kuva: Vögtle ja Steinle, 2000).

3. Rakennusten sijaintipaikkojen määrittäminen.

Melkein kaikille tavatuille menetelmille on ominaista että LIDAR aineisto harvennetaan alueisiin, joilla rakennus oletettavasti sijaitsee. Mikäli mallinnuksessa käytetään jotain ulkopuolista lähdettä, kuten karttaa, joka osoittaa rakennusten sijainnit, voidaan tämä vaihe ohittaa. Tällöin ei kuitenkaan saada LIDAR DSM:n tarjoamaa hyötyä rakennusten pohjapolygonin yksityiskohdista. (Oda et. al., 2003). Schwalben et. al. (2005) mukaan segmentointi onkin eräs kriittisimpiä vaatimuksia onnistuneen 3-d mallinnuksen suorittamiseen.

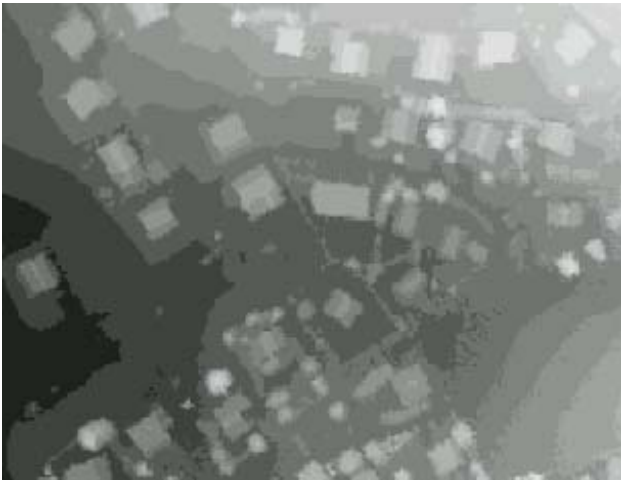
Menetelmät voivat perustua puhtaasti LIDAR:in digitaaliseen pintamalliin DSM (Oda et. al., 2003) tai ne käyttävät ulkopuolista dataa, kuten karttoja, monikanavakuvia (Rottensteiner et. al., 2003) ja ilmakuvia. Digitoitujen karttojen ja katasterikarttojen etuna onkin että niiden tekemiseen on panostanut ihmisoperaattori ja siten ne ovat melko luotettavia. Tällöin tosin karttaa ei ole saanut yleistää liikaa.

3.1 Pelkän laserkeilain-aineiston käyttö

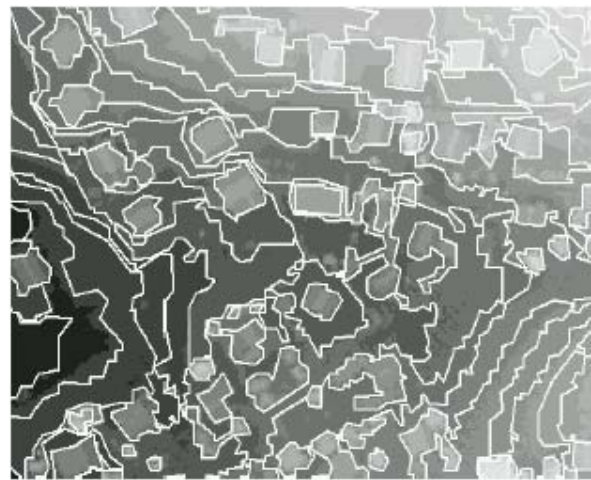
3.1.1 Segmentointi

Segmentoinnilla pyritään löytämään sisäisesti homogeeniset alueet. Tähän on olemassa useita eri menetelmiä. Monet näistä ovat peräisin fotogrammetriasta ja kaukokartoituksesta.

Yksi tällainen on esimerkiksi “bottom up region-merging”, jossa lähdetään liikkeelle yksittäisistä pikseleistä (Kuva 2), jotka liitetään vieressä oleviin homogeenisiin pikseleihin. Tätä jatketaan kunnes saavutetaan tietty etukäteen määritelty heterogeenisuusarvo. Menetelmän jälkeen kaikki lähes saman korkeuden omaavat naapuruuspikselit ovat samassa segmentissä (Kuva 3).



Kuva 2. LIDAR-dataa, jonka resoluutio on 1 m².
(Kuva: Hofmann et. al., 2002)



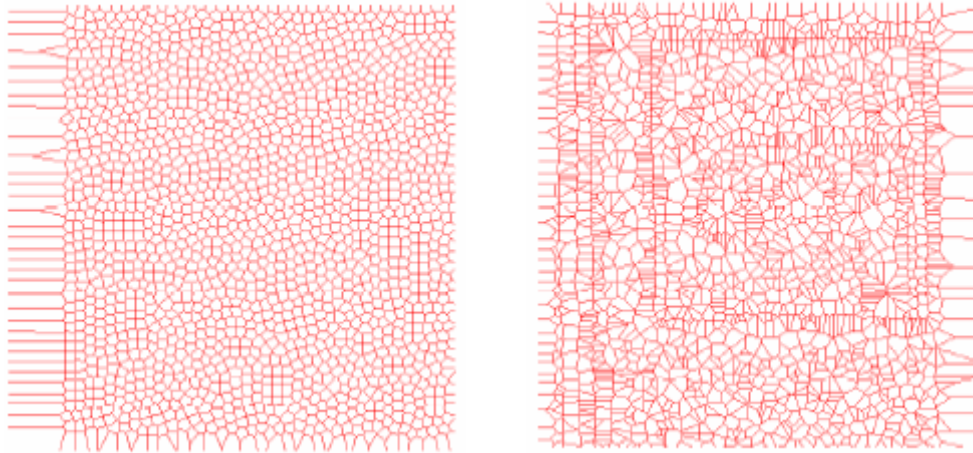
Kuva 3. Kuvan X LIDAR-data segmentoituna.
(Kuva: Hofmann et. al., 2002)

3.1.2 Voronoi-solujen käyttö

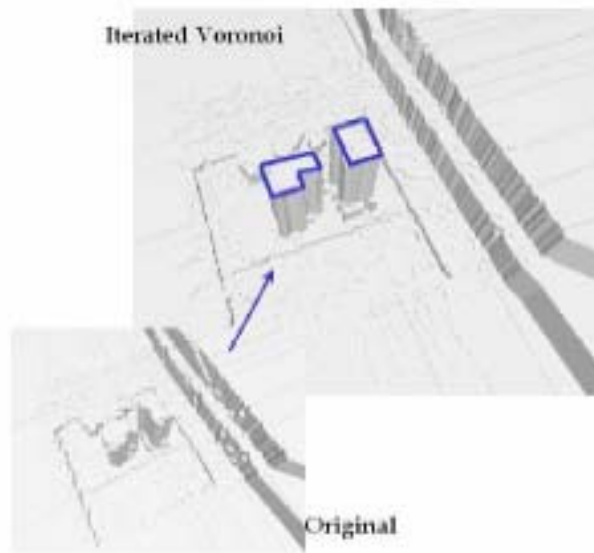
Tse et. al. (2006) käyttävät vaihtoehtoisena rakennusten paikantamismenetelmänä Voronoi-verkkoa. Ideana on jakaa verkon solut kuulumaan rakennuksiin ja muihin objekteihin (Kuva 4). Verkko muodostetaan näytteistämällä alkuperäinen LIDAR-aineisto Voronoi-verkoksi. Luodulle Voronoi-verkolle suoritetaan tämän jälkeen iteraatio.

Jokaista solua verrataan naapurisoluihin ja kyseisten solujen välille lasketaan F-suhde solujen sisältämien LIDAR-pisteiden arvoista. F-suhde kertoo rakennuksen ja muun maailman välissä olevien LIDAR-pisteiden suhteen rakennuksen sisältämiin LIDAR-pisteisiin. Seuraavana solua siirretään ja mikäli siirron seurauksena F-suhde kasvaa, jätetään solu uuteen paikkaan.

Iteraatiota jatketaan kunnes rakennukset näyttävät 3-d näkymässä hyviltä (Kuva 5). Tällöin ei ole oletettavasti enää juuri lainkaan soluja, jotka osittain sisältävät rakennusta ja osittain muuta maailmaa. Menetelmän huonoksi puoleksi voi laskea että siinä iteraation lopettamiseen ei käytetä automaattista tarkastusta.



Kuva 4. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on LIDAR-aineistosta muodostettu näytteistämällä Voronoi-verkko. Oikeanpuoleinen kuva on saatu vasemmasta suorittamalla iteratiivinen naapurisolujen vertailu. (Kuva: Tse et. al., 2006).



Kuva 5. 3-d näkymä Voronoiduista soluista. (Kuva: Tse et. al., 2006).

3.1.3 Pienimmän neliön liikkuvan pinnan käyttö

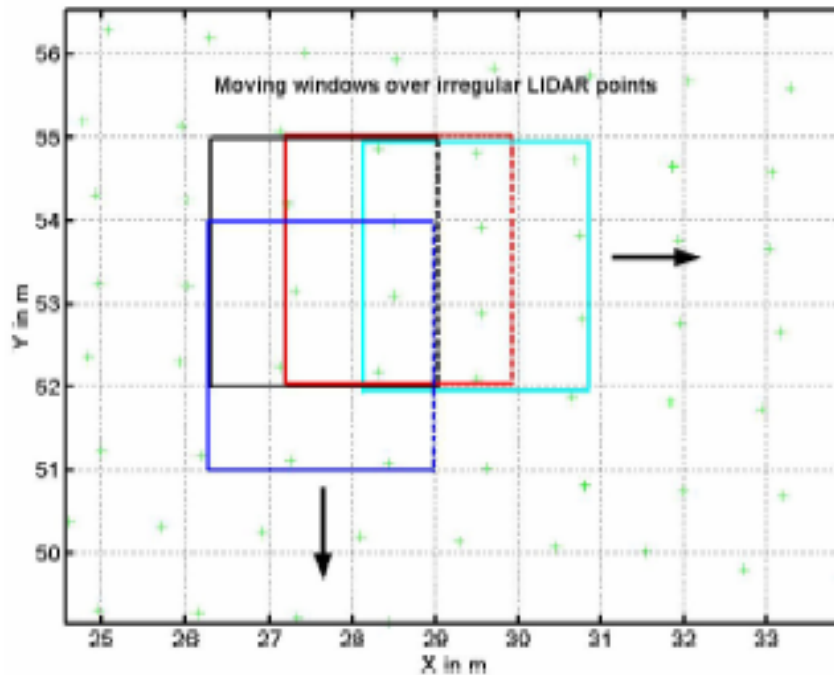
Pienimmän neliön liikkuvan pinnan menetelmä on Alharthyn ja Bethelin (2004) kehittämä menetelmä, jossa määritetään tasavälinen hila, joka asetetaan LIDAR-pisteiden päälle (Kuva 12). Hilan solujen koko määrittää menetelmällä saavutettavan tarkkuuden. Tämän jälkeen kuljetetaan jokaisen hilan solun kautta ikkuna, jonka sisälle jäävien LIDAR-pisteiden lukumäärä lasketaan. Ikkunan koko riippuu pistetiheydestä siten että se on tarpeeksi pieni yksityiskohtien huomaamiseen, mutta kuitenkin voi sisältää tarpeeksi pisteitä luotettavan tuloksen saamiseksi.

Mikäli ikkunan sisältämien pisteiden lukumäärä ylittää ennakkoon määritetyn raja-arvon suoritetaan tason sovitus. Tason perusparametrien lisäksi lasketaan tasolle kaltevuudet x- ja y-akseleiden suunnissa sekä korkeuserotus ja RMSE, jotka annetaan ikkunan keskimmaiselle solulle.

Kun kaikki solut on käyty läpi ja tasot on määritetty, käytetään parhaan sovituksen algoritmia. Algoritmi selvittää mihin ikkunoista määritettyyn tasoon kukin solu kuuluu. Solu kuuluu siihen

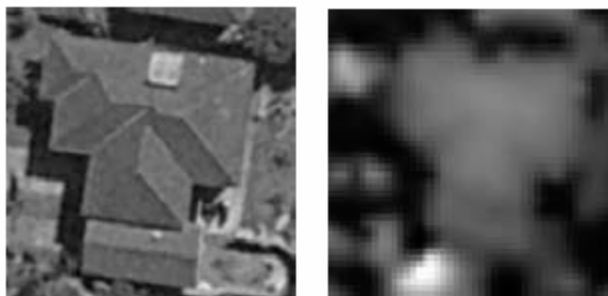
tasoon, jonka ikkuna on tuottanut pienimmän RMSE:n. Täten taso sisältää mahdollisimman homogeenisia pisteitä.

Seuraavana kasvatetaan saatuja tasoja. Tähän voi käyttää solujen parametreja, joista voi rakentaa parametriavaruuden. Näille parametreille tulee tietenkin asettaa myös rajat. Esimerkiksi kaltevuus ei samassa rakennuksessa ole lähes koskaan yli 45 astetta. Korkeudelle voidaan puolestaan asettaa rajat mm. korkeuserojen histogrammista. Mikäli parametrit ovat asetetun rajan sisällä sekä naapureita, voidaan ne yhdistää.



Kuva 12. Kuvassa on asetettu hila LIDAR-pisteiden päälle, jotka näkyvät vaalean vihreinä. Kuvan yli kuljetettavan ikkuna näkyy kuvassa neljän eri solun päällä. (Kuva: Alharthy ja Bethel, 2004)

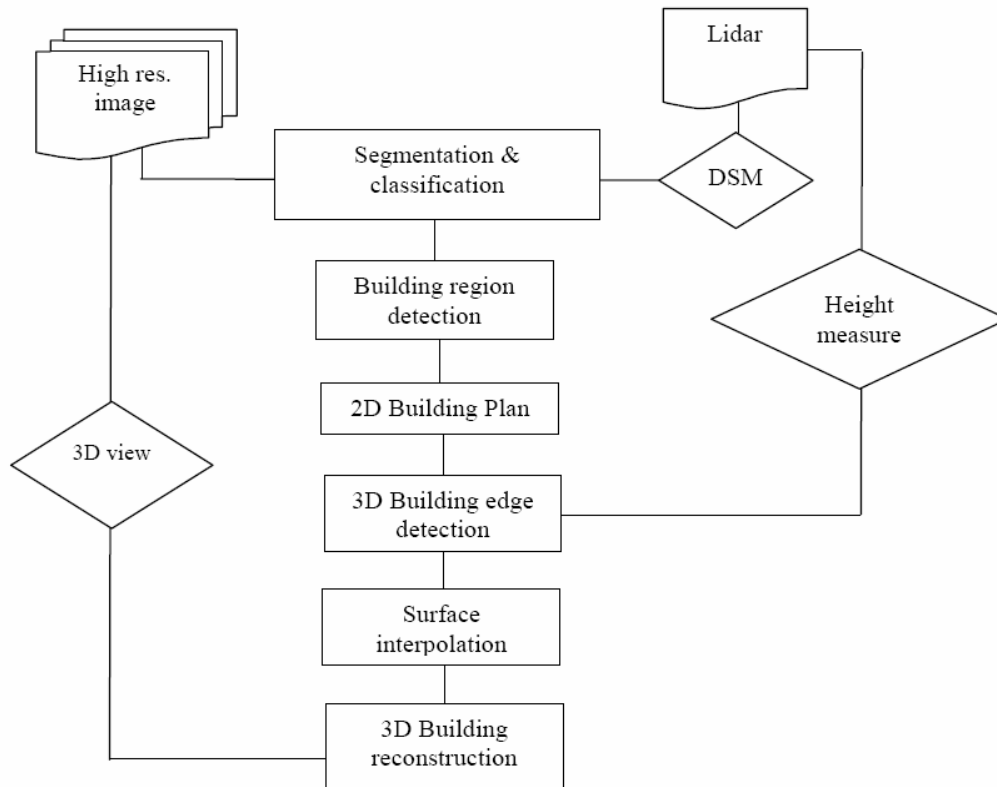
3.2 Ilmakuvien käyttö



Kuva 6. Vasemmanpuoleisessa kuvassa ortoilmakuva ja oikeanpuoleisessa kuvassa DSM. Resoluutio on 15 cm. (Kuva: Rottensteiner et. al., 2003)

Syed et. al. (2005) esittelevät menetelmän, joka hyödyntää kohde-orientoitunutta luokittelua, joka puolestaan pohjautuu korkea-resoluutiollisiin ilmakuviin ja LIDAR-pistepilvestä johdettuun DTM-malliin. Kuva 7 esittää koko prosessin kulun. Menetelmässä lasketaan kuvakohteiden segmenteille muodon, tekstuurin ja topologisten ominaisuuksien perusteella kasvatetussa korreloimattomassa piirreavaruudessa merkitsevät tilastotiedot.

Seuraavana moniresoluutio-segmentoinnilla jaetaan segmentit polygoneihin, jotka ovat suunnilleen saman kokoisia ja sisäisesti homogeenisia. Tämän jälkeen käydään läpi jokainen segmentti ja mikäli LIDAR-aineistosta laskettu nDEM eroaa korkeudessa segmentistä yli 1,2 metriä, lasketaan segmentin kuuluvan johonkin rakennukseen. Lopulta naapuruussegmentit liitetään yhteen muodostamaan todennäköisten rakennusten sijaintipaikat.



Kuva 7. Mahdollinen rakennusten 3-d mallinnusprosessi, kun käytetään ilmakuvia apuna .(Kuva: Syed et. al., 2005).

3.3 Monikanavakuvien käyttö

Rottensteiner et. al. (2003) kehittämässä menetelmässä DTM:n approksimaatio muodostetaan viimeisen pulssin DSM-hilasta morfologisella harmaasävyavauksella käyttäen neliöllistä strukturoivaa elementtiä. Menetelmä on hierarkkinen eli aluksi poistetaan pienimmät rakennukset pienellä strukturoivalla elementillä, minkä jälkeen elementin kokoa kasvatetaan ja koko seuraavaa operaatiota toistetaan kunnes kaikki rakennukset on poistettu DSM-hilasta (Kuva 9). Suurin strukturoiva elementti vastaa siis suurimman rakennuksen kokoa.

Rakennusmaski luodaan laskemalla edellä muodostetun DTM:n ja viimeisimmän pulssin DSM:n korkeusero. Suuri korkeusero viittaa kasvillisuuteen, kuten puustoon ja pieni rakennuksiin. Suuren korkeuseron omaavat alueet poistetaan aineistosta. Tämä menetelmä on esitetty myös Maas (2001) ja mikäli koko alueen korkeusvaihtelut ovat suuria, voi ensimmäisen ja viimeisen pulssin menetelmään käyttää nDSM:iä (Kuva 8).

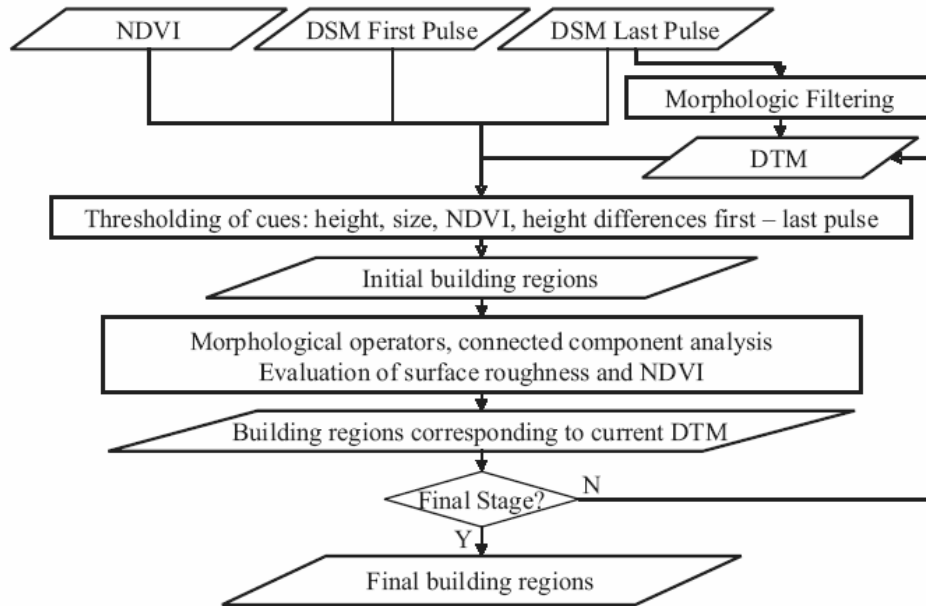


Kuva 8. Vasemmalla on ilmakekuva ja oikealla samasta rakennuksesta muodostettu nDEM-malli.
(Kuva: Syed et. al., 2005).

Seuraavana poistetaan binäärisellä morfologisella avauksella harhauttavat ja oudon muotoiset alueet esimerkiksi $3 \times 3 \text{ m}^2$ elementillä, minkä jälkeen voidaan tarkastella NDVI-indeksiä (Kuva 1), joka saadaan laskettua monikanavakuvien lähi-infrapunakaistan ja punaisen kaistan kuvista. NDVI:n suuret arvot viittaavat kasvillisuuteen ja nämä paikat tulee poistaa aineistosta.

Mikäli edellisten vaiheiden jälkeen on olemassa alueita, jotka ovat tiettyä pinta-alaa pienempiä eli eivät sovellu rakennusten pohjaksi, tulee nämä poistaa.

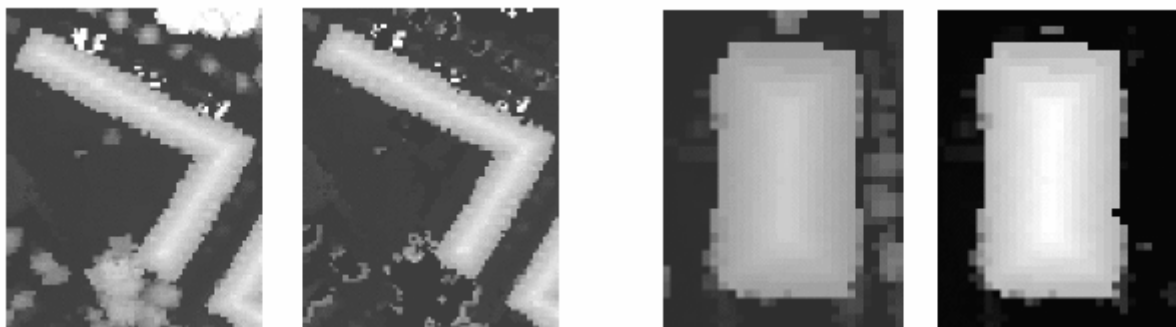
Tämän jälkeen arvioidaan pinnan karkeus pikseleille, jotka ovat jäljellä. Tämä suoritetaan iteratiivisesti eli aluksi käytetään karkeudelle todella tiukkoja kynnysarvoja, koska isojen rakennusten voi kuvitella koostuvan pitkälti suurista tasaisista tasoista. Kun seuraavilla iteraation kierroksilla strukturoivaa elementtiä kasvatetaan, niin pinnan karkeuden kynnysarvoa lasketaan. Karkeuden kriteeri voidaan johtaa DSM:n toisista derivaatoista. Tällöin saadaan jaettu pikselit pistemäisiin, lineaarisiin sekä homogeenisiin. Homogeeniset pikselit viittaavat tasoihin, kuten rakennuksiin, lineaariset tasojen risteyskohtiin ja pistemäiset pikselit sijaitsevat lähellä suuresti ja anistrooppisesti vaihtelevia pinnan normaalivektoreita. Mahdollisten rakennusalueiden karkeudet saadaan laskemalla homogeenisten ja pistemäisten pikseleiden osuudet kyseisillä alueilla.



Kuva 9. Mahdollisten rakennusten sijaintipaikkojen määrittäminen hyödyntämällä monikanava-kuvasta saatavaa NDVI-indeksiä. (Kuva: Rottensteiner et al., 2003)

Myös Vögtle ja Steinle (2000) käyttävät monikanavakuvista tuotettua NDVI-indeksikuva. Heidän ratkaisussaan lasketaan aluksi DTM, minkä jälkeen maasto- ja pintamallien erotus, kuten edellä. Tämän jälkeen poistetaan kasvillisuuden vaikutus käyttämällä NDVI-kuvaa, jolle toisin kuin edellä suoritetaan morfologinen sulkeminen ja avaus (Kuva 10).

Tämän jälkeen Vögtle ja Steinle käyttävät vielä yksittäisten rakennusten irrottamiseen alueen kasvatus-algoritmia, jolla liitetään vierekkäiset lähes saman korkeuden omaavat pikselit. Algoritmi ottaa huomioon alueiden reunoilla olevat korkeat gradienttiarvot, joiden kohdalle se muodostaa irrotettavan alueen rajan.



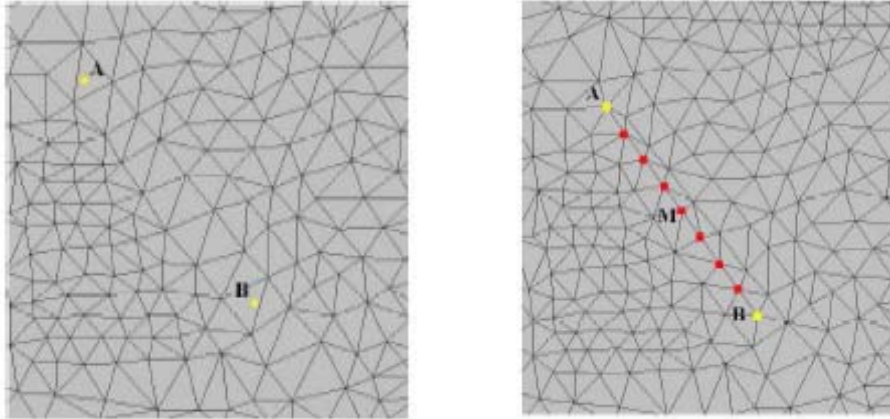
Kuva 10. Kummankin kuvaparin tapauksessa on poistettu oikeasta kuvasta NDVI-kuvan sisältämät pikselit. (Kuva: Vögtle ja Steinle, 2000).

3.4. Rakennusten runkolinjojen käyttö

Tse et al. (2006) lähtevät liikkeelle morfologisilla operaattoreilla LIDAR-aineistosta tuotetusta DTM:stä, josta on poistettu kaikki rakennukset, puut ja muut maaston pinnasta erottuvat kohteet. DTM:stä muodostetaan TIN-malli, johon lisätään paikallisen maanmittaustoimiston toimittama tieto rakennusten runkolinjoista.

Rakennusten runkolinjat lisätään laittamalla aluksi linjan päätepisteet TIN-mallille. Tämän jälkeen

suoritetaan rekursiivinen prosessi, jolla saadaan pisteiden väli koostumaan kolmioiden yhdensuuntaisista sivuista. Mikäli heti algoritmin aluksi ei kolmioiden sivut muodosta janaa pisteiden väliin, laitetaan TIN-malliin pisteiden puoleen väliin uusi piste, joka liitetään Voronoi-verkkoon. Tätä pisteiden puoleen väliin lisäämistä jatketaan rekursiivisesti, kunnes koko alkuperäisten kahden pisteen väli koostuu kolmioiden sivuista (Kuva 11).



Kuva 11. Rakennuksen reunan sijoittaminen TIN-verkkoon. (Kuva Tse et. al., 2006).

4. Malli-pohjaiset menetelmät

Malli-pohjaiset menetelmät käyttävät rakennusten malleja, kuten suorakulmioita, joita pyritään sovittamaan aineistoon. Tämä tietenkin rajoittaa menetelmien tehoa monimutkaisiin rakennuksiin. Tähän voi olla ratkaisuna pilkkua monimutkaiset rakennukset palasiksi ja ratkaista nämä erikseen.

Mikäli käytössä on luotettavia suurimittakaavaisia (1:500-1:25000) skannattavissa olevia kartoja, katasterikarttoja, ortoilmakuvia tai muuta 2-d tai 3-d GIS dataa, voidaan näitä käyttää hyväksi.

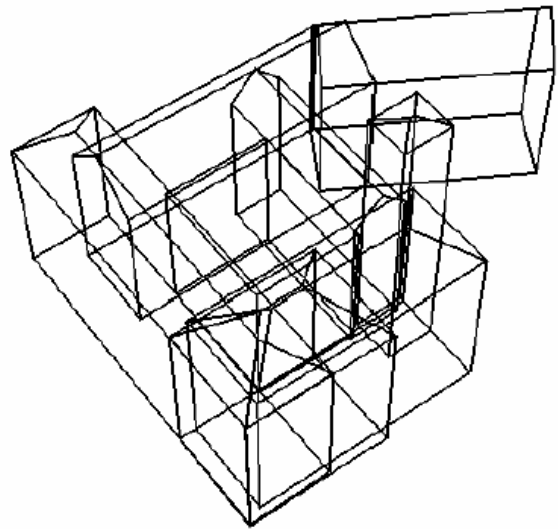
Yksi mahdollisuus on rakentaa kaikista rakennuksista pohjamalli, joka koostuu suorakulmioista xy-tasossa (Kuva 13). (Brenner ja Haala, 2000). Jopa monimutkaiset rakennukset voidaan mallintaa tällä tavoin käyttämällä useita suorakulmioita kyseisiin rakennuksiin. Näitä suorakulmioita voidaan käyttää 3-d primitiivien pohjana (Kuva 14). Kun primitiivit on rakennettu voidaan ne sovittaa oletettaviin tai tunnettuihin rakennusten sijaintipaikkoihin mm. bi-lineaarista interpolaatiota hyödyntäen. (Syed et. al., 2005).

Ulkopuolisen tiedon käyttö saattaa aiheuttaa myös ongelmia, mikäli tiedoissa on puutteita, kuten rakennusten sisäpihat puuttuvat. (Brenner ja Haala, 2000). Rakennukset eivät kartoilla ole myöskään aina tarkasti siellä mihin ne on kuvattu ja Hoffmanin tekemässä kokeessa todettiin että eroa saattaa olla jopa 12 metriä todelliseen paikkaan ja että 3 % rakennuksien keskipisteistä oli yli neljän metrin päässä todellisesta sijainnista. (Hofmann et. al., 2002).

Mikäli rakennusten sijainnit skannataan, saattaa olla tarpeen hyödyntää morfologisia operaattoreita selventämään rakennukset. Tähän voidaan hyödyntää avausta (dilaatio ja eroosio), jota seuraa dilaatio (laajennus). (Hofmann et. al., 2002).



Kuva 13. Rakennuksesta on muodostettu 2-d suorakulmiot. (Kuva: Brenner ja Haala, 2000).



Kuva 14. Rakennuksesta rekonstruoidut 3-d primitiivit. (Kuva: Brenner ja Haala, 2000).

5. Data-pohjaiset menetelmät

5.1 Tasojen reunojen määrittelyminen

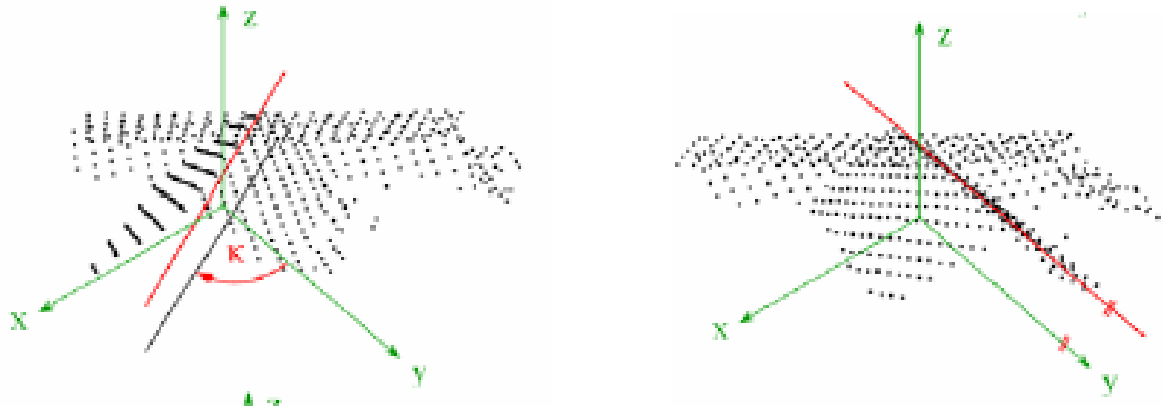
Rakennusten 3-d mallinnus vaatii, että rakennusten kattotasot ovat tunnettuja. Nämä perustuvat 3-d pisteisiin. Pisteiden hankinta voi tapahtua suoraan stereoilmakuvilta tai pisteet voidaan lukea DHM:ltä, joka on tuotettu laserkeilaimen datasta. DHM:n etuna suhteessa ilmakuviin on että datan sisältämä tieto on jo redusoitu ja prosessin automatisointi helpottuu. (Brenner ja Haala 2000). Mikäli DSM:n resoluutio on huono eli esimerkiksi lentokorkeus on ollut korkea, voidaan reunan etsintää tukea ilmakuville. (Oda et. al., 2003).

Useat algoritmit tekevät oletuksia esimerkiksi katon muodosta. Yksinkertaisimmat algoritmit eivät pysty kuin erottamaan tasa- ja harjakattoja, jotkin taas eivät erota kuin suorakulmaisia kattoja. Monimutkaisimmat menetelmät erottavat edellisten lisäksi pulpetti-, auma-, nelilape- ja satulakattoja, jopa siten että talolla on useampi pääsuunta.

5.1.1 Ihmisoperaattorin matkiminen

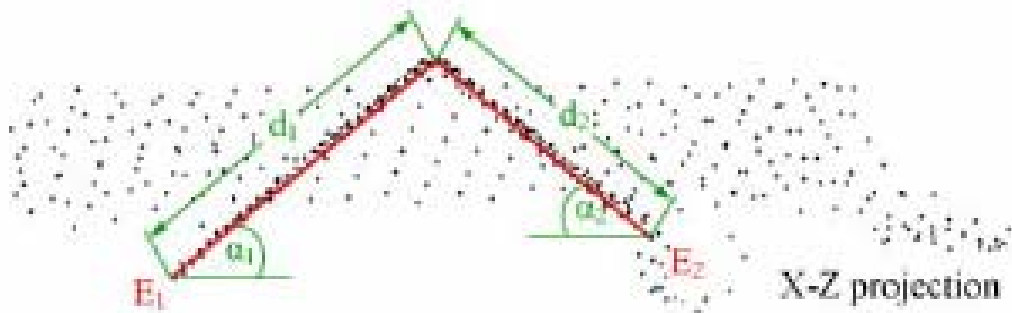
Eräs mahdollisuus on matkia ihmisoperaattoria kattotasojen löytämiseen. Tätä on tehnyt mm. Schwalbe (2004), jolta seuraava algoritmi on.

Algoritmi vaatii että pistepilvi harvennetaan ja oletettavat rakennusten sijainnit etsitään. Tämän jälkeen käydään läpi jokainen potentiaalinen rakennus ja redusoidaan koordinaatisto barysentriseksi. Seuraavana määritetään käsiteltävän katon harjan atsimuti eli rakennuksen pääsuunta ja kierretään pisteitä atsimutin verran z-akselin ympäri, jotta harja saadaan paralleeliksi y-akselin kanssa.



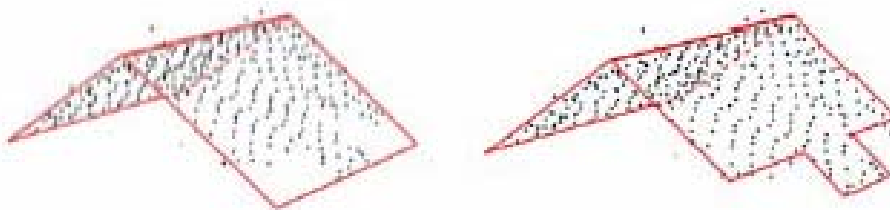
Kuva 15. Kummassakin kuvassa näkyy pistepilvestä löydetty katon harja punaisena. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy kierto kappa (atsimuti), jonka verran akselistoa pitää kiertää z-akselin ympäri, jotta harja saadaan y-akselin kanssa paralleeliksi. (Kuva: Schwalbe et. al., 2005).

Seuraavana projisoidaan pisteet zx - ja zy - tasoihin. Projisoiduista pisteistä pitää etsiä kattotasojen viivat, joista selviää katon ulottuvuus (Kuva 16). Tästä on tarkemmin Schwalbe et. al. (2005). Loppu- ja alkupisteistä saadaan myös tietää katon tason inkliinaatio. Kun esimerkiksi katolla on 50 goonin korkeuskulma, ovat viivat yhtä pitkät zx - ja zy -tasoihin projisoituina. Yhdistämällä päätepisteet saadaan kattotasojen alustavat polygonit.



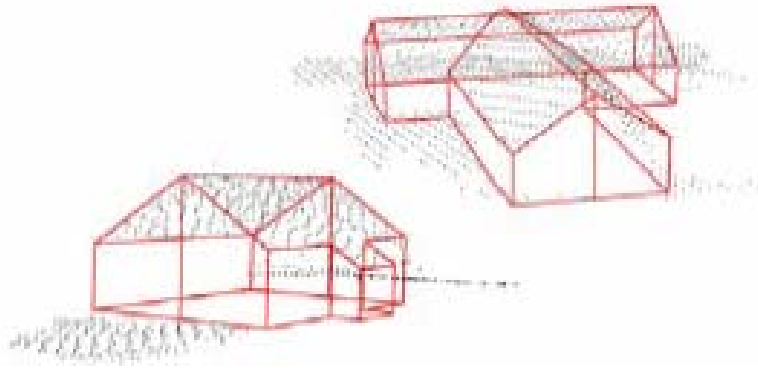
Kuva 16. Pistepilvi projisoituna xz -tasoon. (Kuva: Schwalbe et. al., 2005).

Ulkonemien selvittämiseksi tulee vielä jatkaa kattopolygonien tutkimista (Kuva 17, 18). Tutkimisen kannalta kannattaa tasot kiertää erikseen xy -tasoon, jolloin tutkiminen helpottuu.



Kuva 17. Ulkonemien selvittäminen kattopolygonin sisältä. (Kuva: Schwalbe et. al., 2005).

Vaikkakin algoritmi on löytänyt kattotasot yhdestä pääsuunnasta, on mahdollista että katto jatkuu vielä toisiinkin suuntiin (Kuva 18), yleisesti ottaen ortogonaalisesti ensimmäiseen suuntaan nähden. Tämä mahdollisuus tutkitaan toistamalla projisoinnit ortogonaalisesti aiempiin projisointeihin nähden.

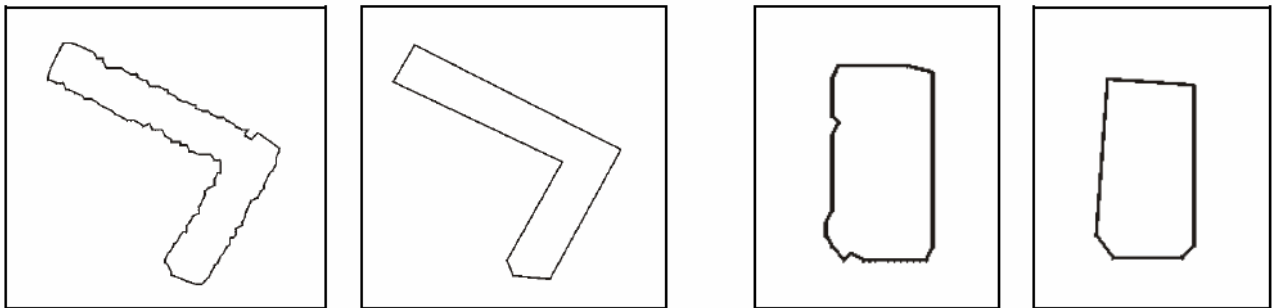


Kuva 18. Kuvasta näkyy miltä toinen rakennuksen pääsuunta sekä katon ulkonema voisi näyttää. (Kuva: Schwalbe et. al., 2005).

5.1.2 Suorakulmaisten kattoelementtien irrotus kolmioinnilla

Katto voidaan luoda DHM-datasta Delaunay kolmioinnilla. (Vosselman, 1999). Tällöin katon ulkorajat muodostuvat kolmioverkon ulkorajoista. Mikäli kolmioverkkojen välinen etäisyys on lyhyt, voidaan tasojen olettaa leikkaavan.

Vaihtoehtoisesti voidaan suorakulmaiset kattotasot ratkaista esimerkiksi Vögtlen ja Steinlen (2000) esittelemällä algoritmeilla, joka käyttää myös kolmiointia. Siinä pienen halkaisijan omaavat kolmiot valitaan ja liitetään yhteen, jolloin saadaan viivoista koostuva polygoni jokaisen alueen ympärille. Tämän jälkeen poistetaan ylimääräiset, merkityksettömät kolmiot ja suoritetaan reunojen tasoitus Douglas-Peucker menetelmällä (Douglas & Peucker, 1973) (Kuva 19). Vielä tämänkin jälkeen voidaan analysoida luotujen polygonejen muotoa ja pinta-alaa, ja sitä kautta vähentää elementtien lukumäärää.

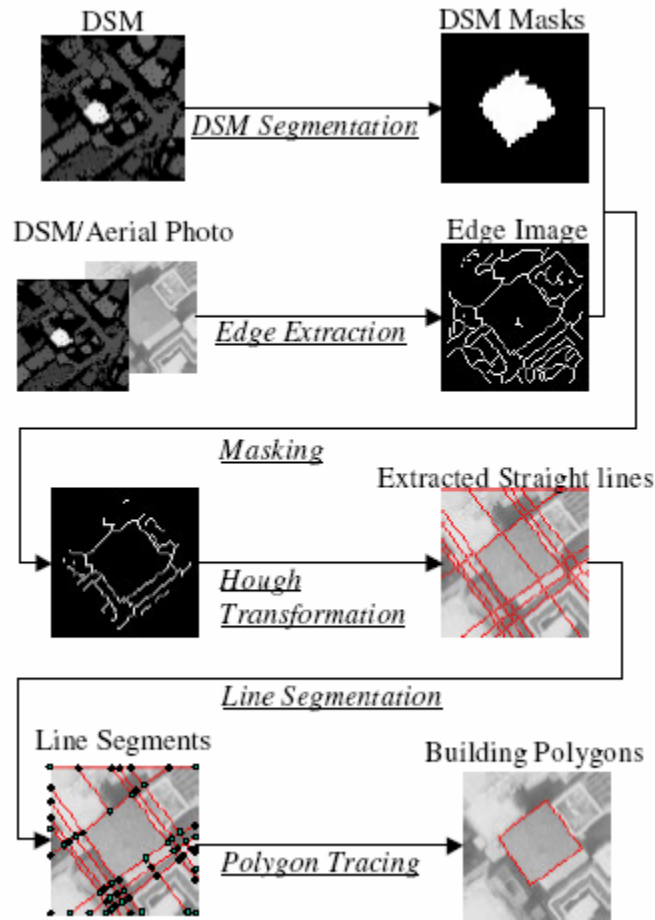


Kuva 19. Vasen kuva on kummassakin kuvaparissa alkuperäinen ja oikeanpuoleiseen on sovellettu Douglas-Peucker suodatus-algoritmia. (Kuva: Vögtle ja Steinle, 2000).

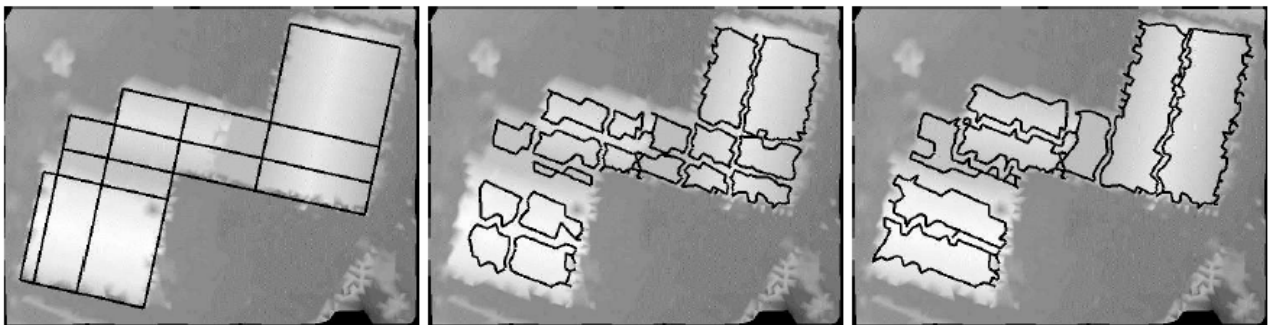
Sekä Vosselmanin (1999) että Vögtlen ja Steinlen (2000) algoritmeissa on suurena heikkoutena, että reunojen oletetaan olevan ortogonaalisia tai paralleleleja eli rakennukset ovat suorakulmaisia.

5.1.3 Hough-muunnoksen hyödyntäminen

DHM:ltä reunat voidaan irrottaa esimerkiksi Canny-operaattorilla tai jollain muulla nollanylitys-operaattorilla (Kuva 20). Irrotuksen jälkeen reunat tulee vielä ohentaa pikselin paksuisiksi. (Oda et. al., 2003). Tämän jälkeen voidaan käyttää 3-d:hen laajennettua Hough-muunnosta reunapikseleihin suorien muodostamiseksi. Hough-muunnoksella saadaan ehdokkaat rakennusten reunoiksi. Näistä muodostetaan viivasegmenttejä siten että segmentin muodostavat toisensa leikkaavat suorat. Viivasegmenteistä rakennetaan lopulta tason muodostavat polygonit. (Oda et. al., 2003).



Kuva 20. Prosessin kulku, jossa rakennuksen reunaviivat irrotetaan Hough-muunnoksella. (Kuva: Oda et. al., 2003)

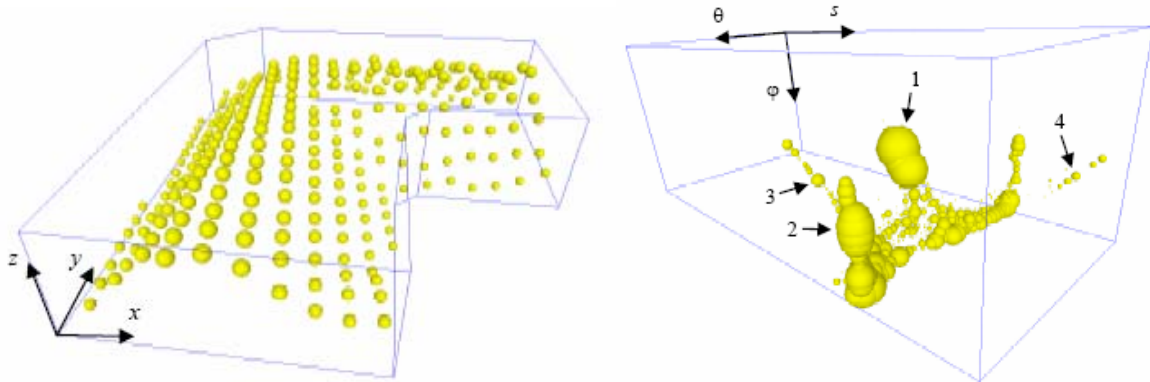


Kuva 21. Vosselman ja Soveg hyödynsivät Hough-muunnosta lidar-datasta muodostettuihin segmentteihin (vasen kuva). Keskimmäinen kuva näyttää muunnoksen tuloksen ja oikealla tuloksen segmentit on liitetty toisiinsa. (Kuva: Vosselman ja Soveg, 2001a).

Vaihtoehtoisesti voi käyttää Overby et. al. (2004) menetelmää, jossa Hough-muunnoksella ratkaistaan kattotasot. Hough-muunnoksen laskemiseksi tulee jokainen LIDAR-piste esittää etäisyyden origosta, atsimutin ja korkeuskulman funktiona. Kun vähintäänkin kolmen pisteet funktiot leikkaavat, niin näiden pisteet parametriavaruudessa muodostavat tason.

Tämän jälkeen jaetaan etäisyyden ja kulmien muodostama parametriavaruus laskentasoluihin $(\theta_i, \varphi_i, s_i)$, joissa $i \in \{0, 1, N_\theta - 1\}$, $j \in \{0, 1, N_\varphi - 1\}$ ja $k \in \{0, 1, N_s - 1\}$ (Kuva 22). Ne solut, jotka omaavat suurimman osumamäärän antavat parametrit tasoille, jotka LIDAR-pisteet määrittävät karteesisessa avaruudessa, mutta ennen kuin arvot annetaan tasoille tulee aineistosta poistaa väärät

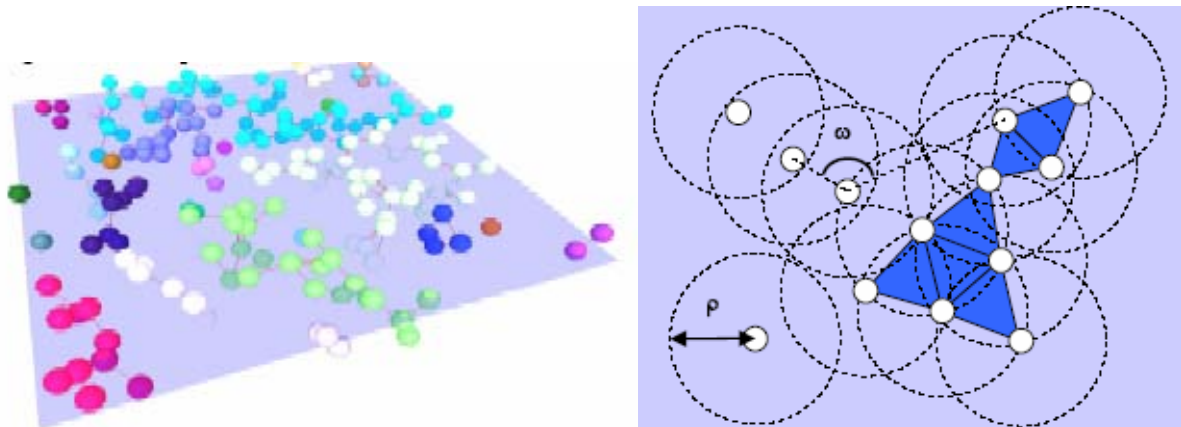
tasot. Tämä suoritetaan tarkastelemalla ensin solua, johon on tullut eniten osumia. Tämän tason parametrit optimoidaan laskemalla pienimmän neliön taso LU-hajoitelmalla. Seuraavan kasataan kaikki tasoon kuuluvat pisteet rykelmiin (Kuva 23), joissa pisteiden keskinäinen etäisyys alle valittavan kynnyksärajan.



Kuva 22. Vasen kuva näyttää LIDAR-pisteet karteesisessa avaruudessa ja oikeanpuoleinen näyttää laskentatasot parametri-avaruudessa, jossa pisteen koko esittää osumien määrän kyseiseen soluun. (Kuva: Overby et. al., 2004).

Näistä rykelmistä muodostetaan projektio kolmioimalla (Kuva 23), siten että kolmion kulman tulee olla alle valittavan kynnyksärajan ja keskinäinen etäisyys on myös alle valittavan kynnyksärajan. Lopulta taso hyväksytään jos kaikkien rykelmien pinta-ala on suhteessa mukana oleviin pisteisiin merkitsevä. Tämä toistetaan kaikille soluille ja jos solu hyväksytään, poistetaan solun pisteiden parametrit parametriavaruudesta.

Lopulta voidaan vielä liittää tasot toisiinsa. Tämä perustuu kandidaattitasojen etsimiseen tasojen normaalien pistetulojen sekä pistepilvien etäisyyksien perusteella. Seuraavana tutkitaan pareja ja yhdistetään pienimmän varianssin omaavat tasot.



Kuva 23. Vasen kuva näyttää pistepilvestä löydetty rykelmät ja oikeanpuoleinen kuva näyttää kolmioinnin rykelmistä. (Kuva: Overby et. al., 2004).

5.1.4 Prismaattisen algoritmin käyttö

Alharthy ja Bethel (2004) esittelevät algoritmin monimutkaisten kattorakenteiden laskentaan, joka perustuu oletettavien katon reunan pikselien läpikäyntiin yhdestä rakennuksen kulmasta alkaen, kattosegmentin ympäri, myötäpäivään kiertäen. Jokaisesta pikselistä tallennetaan sen xy-tason sijainti, segmentti katosta, johon se kuuluu sekä pikselin indeksi segmentissä. Seuraavaksi turhat pikselit poistetaan ja indeksejä muutetaan tämän perusteella.

Tämän jälkeen sovitaan pisteisiin polygoni ja kohinan poistamiseksi käydään läpi pikseleiden merkitsevyys. Pisteet, joiden korkeus on maanpinnan tasolla tai alle annettavan kynnyksen rajan poistetaan rekursiivisesti lähtien maanpinnasta. Seuraavana suoritetaan rekonstruktioon kuuluva vaihe eli liitetään segmentit toisiinsa, siten että jokainen toistensa läheisyydessä oleva eri segmenttien reuna liitetään alkaen sisimmistä segmenteistä. Mikäli rakennuksen sijainti ja ulkomuoto on tunnettu, kuten Alharthyn ja Bethelin (2004) tapauksessa, pakotetaan katon ulommaiset reunat alueen sisään.

5.1.5 Ilmakuvien hyödyntäminen

Rottensteiner et. al. (2003) käyttävät hyväkseen ilmakuvia. Syy on ilmakuvien paremmassa resoluutiossa. Heidän lähestymistapansa on käyttää ilmakuvien kirkkautta ja sen perusteella jakaa digitaalinen ilmakeku homogeenisiin siemenalueisiin. Tässä on huonona puolena lähekkäin olevien kattojen erottaminen, minkä seurauksena Rottensteiner et. al. (2003) paloittelevat aluksi saamansa alueet morfologisella suodatuksella pienemmiksi. Seuraavana propagoidaan alueet LIDAR-DSM:ään. Ortoilmakuvien tapauksessa tämä tarkoittaa yksinkertaisesti LIDAR-DSM:n arvojen interpoloimista ilmakuvista saaduille homogeenisille siemenalueille.

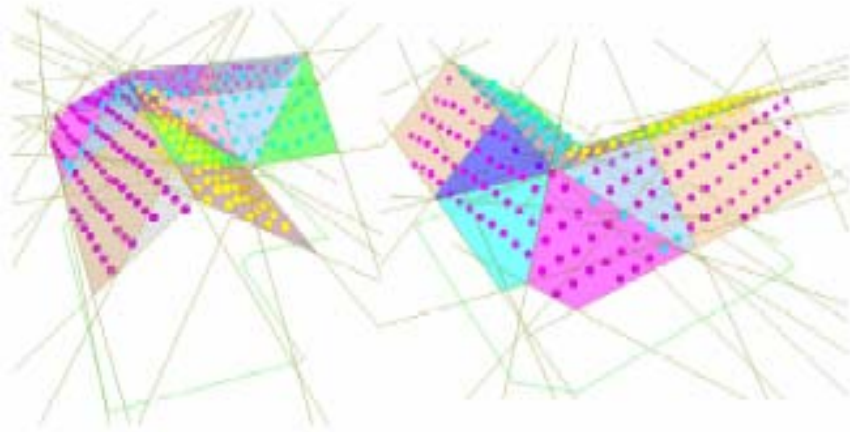
Näistä DSM:n pisteistä voidaan estimoida siemenalueen tason parametrit, ja tason laajentamista voidaan käyttää iteratiivisesti mikäli tason reunalta lisättävän LIDAR-pisteen etäisyys tasosta on alle määrätyn kynnyksen arvon, RMSE on pieni ja piste ei vielä kuulu mihinkään muuhun tasoon. Iteratiivinen kasvattaminen loppuu, kun tasolla ei ole enää yhtään pikseliä, johon laajentua. Laajentamisten jälkeen algoritmi jatkaa iteratiivisesti hyödyntäen polymorfista ominaisuuksien irrotusta ja siemenalueiden pienentämistä suodattamalla.

5.2 Rakennusten rekonstruktio

Pelkät tasot eivät riitä vielä rakennusten mallintamiseen, vaan tasojen topologiset suhteet tulee selvittää. Yksi mahdollisuus on puoliautomaattisessa rakennusten mallinnuksessa operaattorin tunnistaa ilmakuvilta rakennusten kattotasot ja sovittaa näihin aikaansaadut tasot. (Gülch et al. 1999). Vaihtoehtoisesti voi ulkopuolisesta lähteestä tuoduille rakennusten pohjille sovittaa luodut kattotasot tai käyttää hyväksi tasojen pohjana olevien pisteiden ja suorien topologiaa.

Overby et. al. (2004) mielestä kyseessä onkin 3-d mallinnuksen vaikein vaihe. Syynä on ettei aina ole löydy tarpeeksi tasoja ja löytyneissäkin tasoissa saattaa olla virheitä. Overby et. al. (2004) käyttävät tähän ratkaisuna tasojen liittämistä, minkä jälkeen etsitään ristiriitaiset kohdat, kuten aukot ja toisensa leikkaavat tasot, ja nämä korjataan.

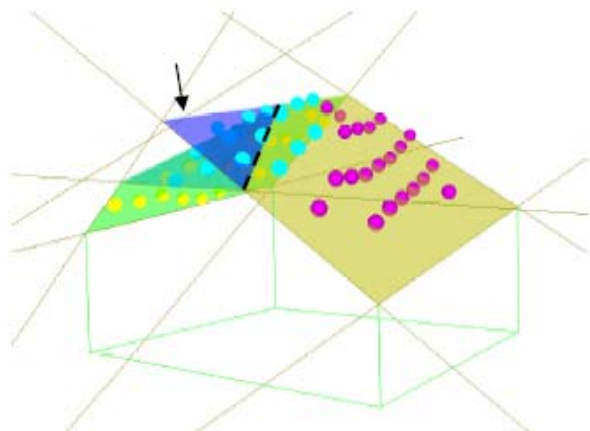
Ennen tasojen rekonstruktioita tulee tasojen olla siirrettyinä xy-tasosta xyz-avaruuteen. Edellä mainituista menetelmistä lähes kaikki tekevätkin näin jo laskettaessa tasot, mutta mm. Alharthy ja Bethel (2004) ratkaisevat ja liittävät katon segmentit xy-tasossa, minkä jälkeen vasta elementeille lasketaan inkliinaatiot sekä x- ja y-suunnissa sekä korkeudet sovittamalla taso elementtiin.



Kuva 24. Kattotasojen liittäminen. Kuvassa näkyy luodut tasot sekä näiden pistepilvet (Overby et. al., 2004).

Aluksi esimerkiksi harjakatoissa yhteisen harjan eli yhden sivun omaavat tasot liitetään, kuten myös ortogonaalisista projektiosta muodostuvat kattotasot. (Schwalbe et. al., 2005). Lisäksi muut tasot, joilla on yhteinen sivu, liitetään (Kuva 24). Tässä vaiheessa voidaan myös määrittää minimietäisyys, jota pienemmän välimatkan omaavat pistepilvien tasot liitetään toisiinsa.

Kun katon naapuruustasot on liitetty voidaan niitä tarkastella muiden tasojen kanssa. Jos kaksi tai useampi taso on z-akselin suunnassa päällekkäin, tulee näistä tasoista poistaa ne päällekkäin menevät osat, joihin ei kuulu lainkaan pistepilven pisteitä. Mikäli vielä tämän jälkeen on päällekkäisiä tasoja on yksi mahdollisuus jakaa tasolle prioriteetit (Overby et. al., 2004).



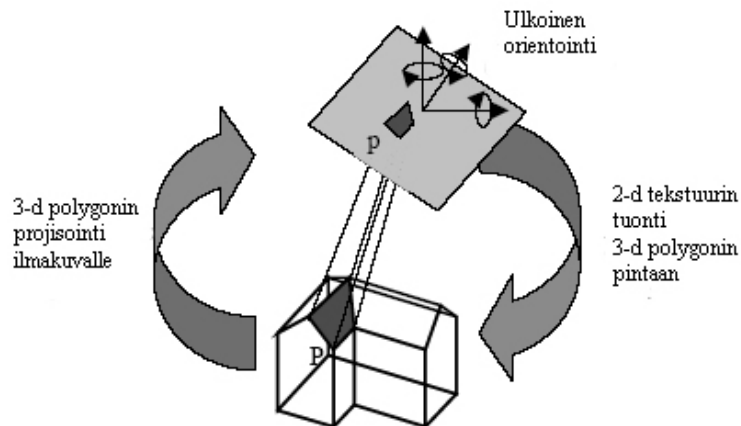
Kuva 25. Tasojen liittämisen jälkeen on löytynyt ristiriita, kun kaksi tasoa ovat z-akselin suunnassa päällekkäin. (Kuva: Overby et. al., 2004)

Kun tasojen välillä ei ole enää ristiriitaa voidaan poistaa ne osat tasoista, jotka eivät sovi toisaalta saatujen rakennusten pohjatietojen kanssa yhteen. Seuraavana on mahdollista vielä täyttää samaan taloon kuuluvien tasojen väliin jääviä aukkoja. Tämä on hankala osa, koska taloilla saattaa olla mm. sisäpihoja. Tämän jälkeen usein viedään kattojen reunoista seinät DEM:n tai DTM:n tasoon eli projisoidaan xy-tasoon. (Oda et. al., 2004; Schwalbe et. al., 2005). Tällöin voidaan ottaa huomioon katon reunojen olevan seinämiä ulompana, mutta aina näin ei tehdä.

Mikäli keilaus on suoritettu lentokoneesta käsin ei katolle kannata yrittää sovittaa savupiippuja tai muita ulokkeita, mutta helikopterista tuotetulla datalla jopa savupiippujen mallinnus voi olla mahdollista. (Brenner ja Haala, 2000). Lentokoneesta käsin suoritettussa mittauksessa mm. savupiiput ovat ennemminkin kohinaa.

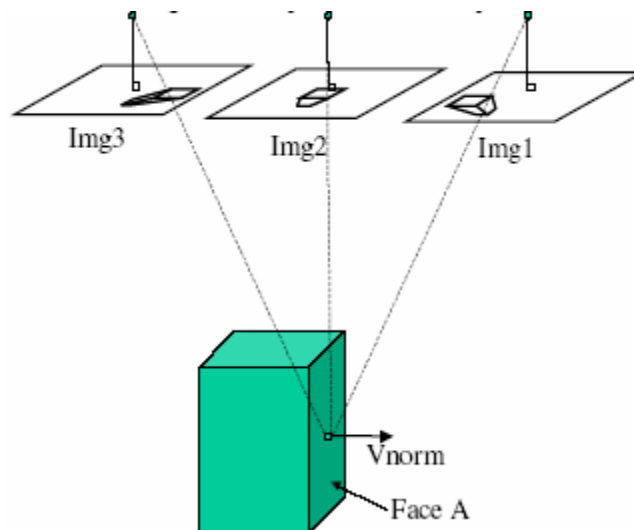
6. Julkisivun liittäminen malliin

Rakennusten julkisivukuvat voidaan tuoda ilmakuvilta, kun tunnetaan ilmakuvien orientointi. Kuvien ulkoiset parametrit voidaan saada joko GPS/IMU-yksiköllä tai ilmakolmioinnilla. Usein malleille riittää katon RGB-värin ottaminen ortoilmakuvasta ja tämän liittäminen syntyneeseen malliin (Kuva 26). Monissa tavatuissa ratkaisuissa mallin julkisivun luominen jäi tähän, mutta osassa ilmakuva projisoitiin kokonaisuudessaan mallien päälle sekä mallien väliin jäävään maastoon (Kuvat 27, 28, 29). Vaihtoehtoisesti voidaan rakennusten seinät kuvata maasta käsin, selvittää kuvien orientointi ja siirtää nämä mallien pintaan. (Brenner ja Haala, 2000).

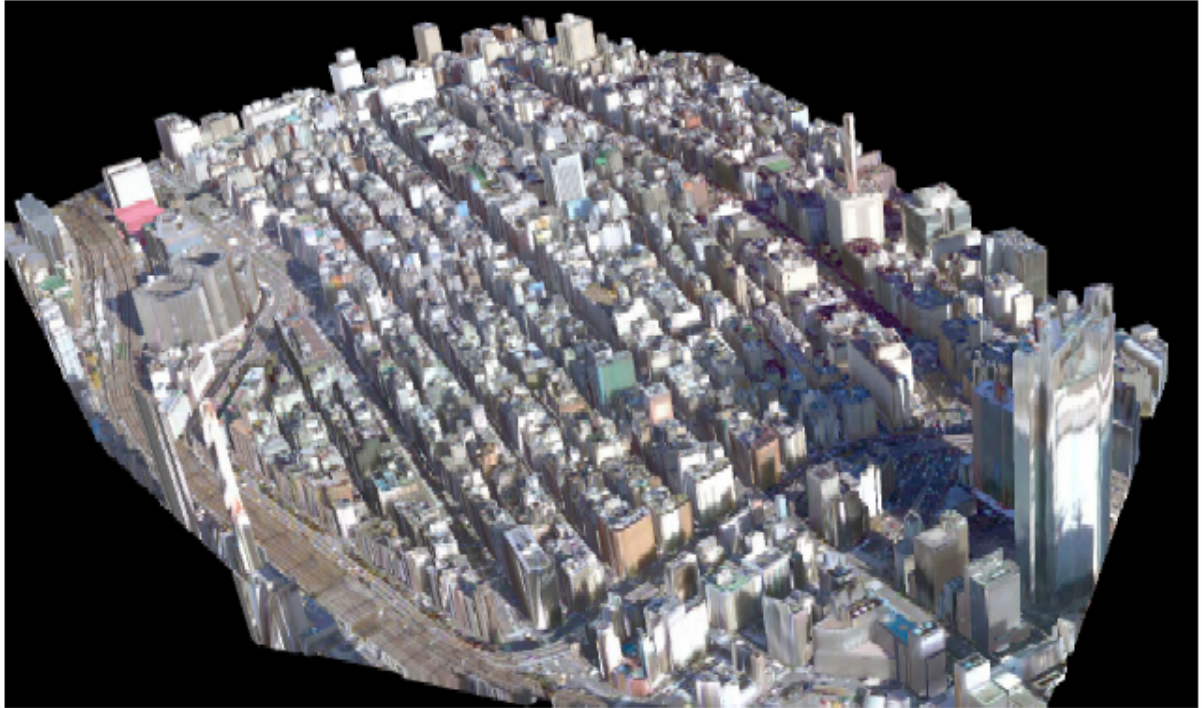


Kuva 26. Tekstuurin tuonti ilmakuvalta 3-d primitiivin pintaan. (Kuva: Haala, 2001).

Viimeisenä vaiheena voidaan siirtää tuotettu malli esimerkiksi VRML-formaattiin, jota useat ohjelmointikielet tukevat. (Overby et. al., 2004; Schwalbe, 2004).



Kuva 27. Tekstuurin siirtäminen ilmakuvalta rakennuksen seinään. Ennen siirtoa tulee ratkaista orientoinnit.



Kuva 28. Valmis 3-d malli, johon tekstuuri siirretty ilmakuvulta. (Kuva: Oda et. al., 2004)



Kuva 29. Valmis 3-d malli, johon tekstuuri siirretty ilmakuvulta. (Kuva: Oda et. al., 2004)

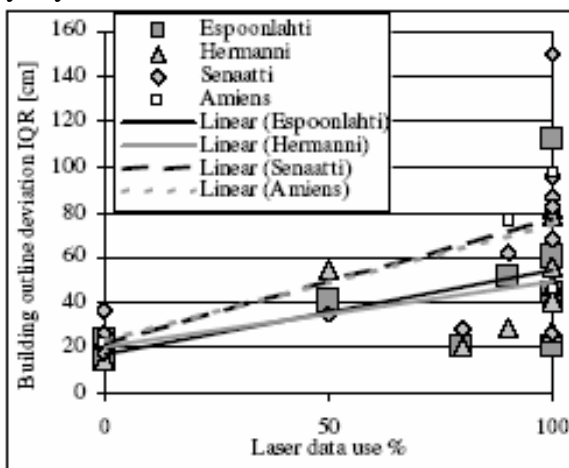
7. Tarkkuus

Edellytys rakennusten rekonstruoinnille on menetelmien stabiilius sekä luotettavuus. (Brenner ja Haala, 2000). Tämän lisäksi tulee menetelmän ilman muuta olla myös tarpeeksi tarkka. Pelkkä algoritmi ei määritä laserkeilauksen tarkkuutta, vaan tähän vaikuttavat mm. paikannuksen tarkkuus, vertauspisteiden tarkkuus ja datan suodatusmenetelmä (Lohmann et. al., 2000).

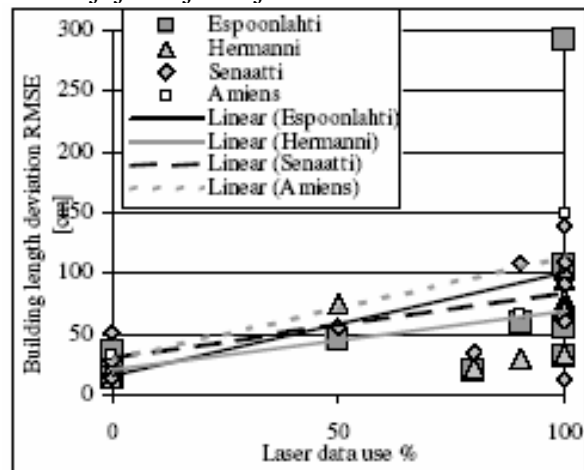
Vuonna 2005 Kaartinen et. al. (2005) suorittivat vertailun eri 3-d rakennusmallien tuottajien välillä, niin kaupallisten kuin yliopistojen. Vertailuun osallistui 11 tahoja. Vertailun tarkoituksena oli arvioida vektorimallien laatua, tarkkuutta, toteutettavuutta ja taloudellisia näkökulmia. Vertailuun osallistuneet tahot käyttivät puoli-automaattisia ilmakeivästekniikoita (3) tai puoliautomaattisia ja automaattisia laserkeilain tekniikoita (7) tai näiden hybridiratkaisuja (3). Muutama käytti useampaakin menetelmää. Tulosten analysoimiseksi käytettiin vertailupisteitä, joiden avulla saatiin vertailumitat yksittäisen pisteen tarkkuudelle, kahden pisteen väliselle tarkkuudelle ja katon inkliinaatiolle.

Vertailun seurauksena Kaartinen et. al. (2005) totesivat fotogrammetristen menetelmien olleen pääsääntöisesti tarkempia rakennusten ulkomittojen määrittämisessä (Kuva 30) sekä kahden pisteen välisen etäisyyden vertailussa (Kuva 31). Vastaavasti katon inkliinaatio oli parempi laserkeilainmenetelmillä. Kuitenkin korkeuden tarkkuutta vertailtaessa kumpikin menetelmä antoi lähes yhtä hyviä tuloksia (Kuva 32). Tässä erittäin merkittävä huomio oli tarkkuuden riippumattomuus menetelmän automaatioasteesta (Kuva 35). Fotogrammetristen menetelmien voitiin todeta lisäksi olevan parempia yksityiskohtien, kuten savupiippujen, mallintamisessa.

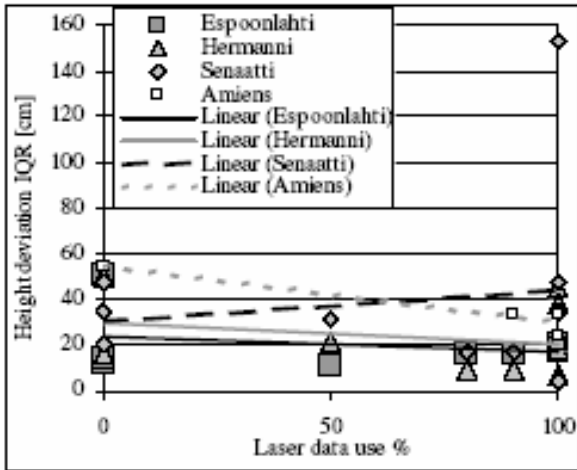
Kokonaisuudessaan laserkeilauksen todettiin olevan parempi menetelmä korkeuksien ja kattotasojen johtamiseen. Lisäksi todettiin että laserkeilaimen tarkkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä toisista lähteistä saatavia rakennusten ulkolinjojen sijainteja.



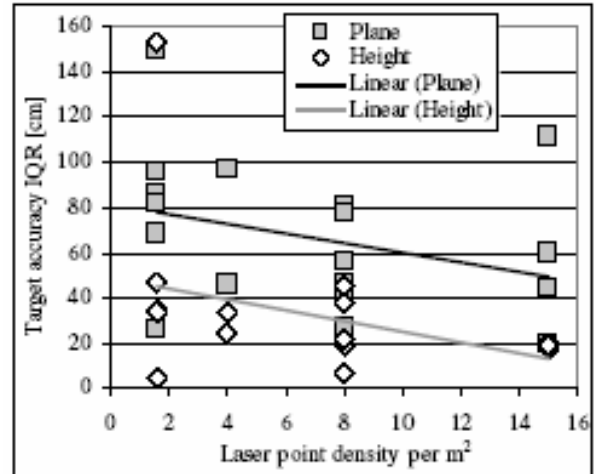
Kuva 30. Rakennusten ulkoreunojen poikkeama laserkeilain datan käytön funktiona. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).



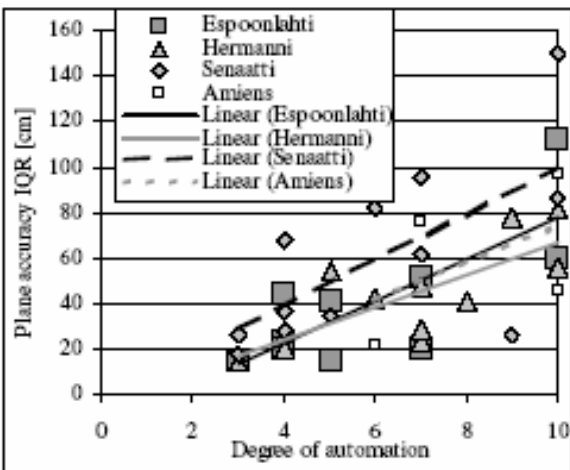
Kuva 31. Kahden pisteen välisen etäisyyden tarkkuuden poikkeama laserkeilain datan käytön funktiona. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).



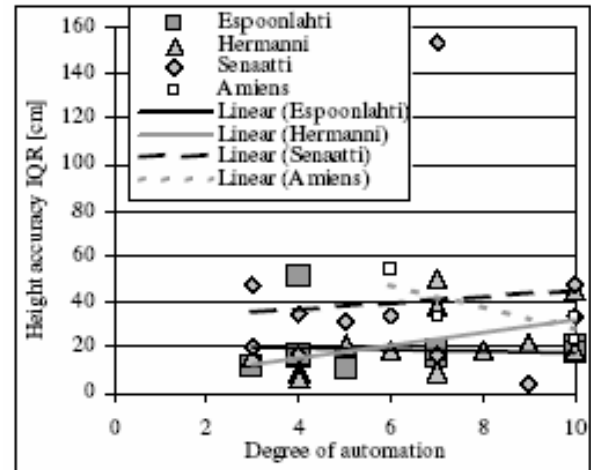
Kuva 32. Korkeuden poikkeama laserkeilain datan käytön funktiona. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).



Kuva 33. Keskimääräinen tarkkuus suhteessa laserkeilain datan pistepilven tiheyteen. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).



Kuva 34. XY-tason tarkkuus laserkeilain datan käytön funktiona. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).



Kuva 35. Korkeuden tarkkuus menetelmän automaatioasteen funktiona. (Kuva: Kaartinen et. al., 2005).

8. Johtopäätökset

Perinteisellä fotogrammetriallakin saa tuotettua rakennusten malleja, mutta laserkeilauksella voidaan mallinnuksen prosessia nopeuttaa ja tehdä siitä halvempaa. Tarkkuus on korkeudessa ja kattotasojen määrittämisessä myös osittain ohittanut pelkän perinteisen ilmakuvauksen.

Huonona puolena laserkeilaimessa on kohteen tekstuurin puuttuminen. Lisäksi ilmakuvilla saadaan vielä tuotettua tarkemmin pelkät rakennusten ulkorajat. Jo tämän hetken lupaavana näkymänä onkin hybridiratkaisut, jolloin käytetään useampia kuin vain yhtä mittauslähdettä rakennusten mallinnukseen. Laserkeilain on näistä yksi varsin varteenotettava menetelmiä. Laserkeilaimen lisänä käytettäviä lähteitä ei tule kuitenkaan käyttää vain tekstuurin tuontiin, vaan myös laskennan tukena. Tästä antaa myös hyvän kuvan nyt pinnallisesti esitellyt algoritmit. Tekstuuri tuo muille, kuten ilmakuvaukselle lisäarvoa.

Nyt esitetyissä menetelmissä en tarkoituksella jakanut menetelmiä harvalle vai tiheälle pistepilvelle tarkoitettuihin. Syynä on että harvoihin pistepilviin tarkoitettuja menetelmiä ei usein suositella

laskentavaatimusten takia tiheille pistepilville, mutta laskentatehojen jatkuvasti kasvaessa, voidaan näitä algoritmeja hyödyntää kumpaankin tapaukseen lähivuosina. Harvojen pistepilvien menetelmiä voi puolestaan kukin tutkija soveltaa ja jatkokehittää itse tiheille pistepilville.

Lähteet

Alharthy A., Bethel J., 2004: Detailed building reconstruction from airborne laser data using moving surface method. XXth ISPRS Congress, 12-23.7.2004 Istanbul, Turkey, Commission 3. <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/269.pdf> (Tarkistettu 18.4.2006).

Beesley B. J., 2003: Sky viewshed modeling for gps use in the urban environment. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc03/p0361.pdf> (Tarkistettu 18.4.2006).

Brenner C., Haala N., 2000: Erfassung von 3D Stadtmodellen, PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 2/2000, s.109 - 118.

Brenner C., 2001: Automatische Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. Künstliche Intelligenz, Heft 4/2001, ISSN 0933-1875, arendtap Verlag, Bremen http://www.kuenstliche-intelligenz.de/archiv/2001_4/brenner.pdf (Tarkistettu 18.4.2006).

Douglas, D.H., Peucker, T.K., 1973: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its character. Canadian Cartographer, 10(2), s. 112-123

Haala N., 2001: Anwendungspotential virtueller Stadtmodelle. http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/Haala_intergeo01.pdf (Tarkistettu 17.4.2006).

Haala, N., Brenner, C. 1997: Generation of 3D city models from airborne laser scanner data. EARSel Workshop, Tallin, Estonia.

Hofmann A. D., Maas H., Streilein A., 2002: Knowledge-based building detection based on laser scanner data and topographic map information. ISPRS Commission III, Symposium 2002, 9 – 13.9.2002, Graz, Itävalta.

Kaartinen H., Hyypä J., Gülch E., Vosselman G., Hyypä H., Matikainen L., Hofmann A.D., Mäder U., Persson Å., Söderman U., Elmqvist M., Ruiz A., Dragoja M., Flamanc D., Maillet G., Kersten T., Carl J., Hau R., Wild E., Frederiksen L., Holmgaard J., Vester K., 2005: Accuracy of 3D city models. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, 12-14.9.2005 <http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/227.pdf> (Tarkistettu 21.4.2006).

Lohmann P., Koch A, Schaeffer M., 2000: Approaches to the filtering of laser scanner data. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000. http://www.tnt.uni-hannover.de/~schaeffer/papers/paper_470.pdf (Tarkistettu 10.4.2006).

Maas H.-G., 2000: Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure.

XIXth ISPRS Congress, Amsterdam 2000 IAPRS Vol. 33, Part 3A, s. 548-555
http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ2000/Amsterdam_LSMTIN.pdf
(Tarkistettu 20.4.2006).

Oda K., Takano T., Doihara T., Shibasaki R., 2004: Automatic building extraction and 3-d city modelling from LIDAR data based on Hough transformation.
XXth ISPRS Congress, 12-23.7.2004 Istanbul, Turkey
<http://www.cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm3/papers/280.pdf>

Overby J., Bodum L., Kjems E., Ilsøe P.M., 2004: Automatic 3d Building Reconstruction from Airborne Laser Scanning and Cadastral Data Using Hough Transform
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/284.pdf>

Palmer, T.C., 2001: Urban modelling from LIDAR data in an integrated GIS environment. ASPRS annual conference, St Louis, Canada, 23-27.4.2001.

Rottensteiner F., Trinder J., Clode S., Kubik K., 2003: Detecting Buildings and Roof Segments by Combining LIDAR Data and Multispectral Images. Image And Vision Computing New Zealand 26-28.11.2003. http://sprg.massey.ac.nz/ivcnz/Proceedings/IVCNZ_12.pdf
(Tarkistettu 18.4.2006).

Schuster H., 2002, Segmentation of LIDAR data using the tensor voting framework. ISPRS Commission III, Symposium 2002, 9-13.9.2002, Graz, Itävalta.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/426.pdf>
(Tarkistettu 18.4.2006).

Steinle E., Vögtle T., 2001: Automated extraction and reconstruction of buildings in laserscanning data for disaster management. 3. International workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Ascona, Switzerland, 10.06.2001

Steinle, E., Bähr, H.-P., 2002: Potential of Laserscanning derived Digital Height Models for the Recognition of Building Damages Caused by Earthquakes. In: Proceedings International Conference "Earthquakes Loss Estimation and Risk Reduction", Bucharest, 2002.
<http://www.ipf.uni-karlsruhe.de/Projekte/SFB461/C5/publications/Ascona01.pdf>
(Tarkistettu 18.4.2006).

Schwalbe E., 2004: 3D building model generation from airborne laserscanner data by straight line detection in specific orthogonal projections. XXth ISPRS Congress, 12-23.7.2004 Istanbul, Turkey Commission 3/ WG3. <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/275.pdf>
(Tarkistettu 18.4.2006).

Schwalbe E., Maas H.-G., Seidel F., 2005: 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2d GIS data and orthogonal point cloud projections. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005.
<http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/209.pdf>
(Tarkistettu 18.4.2006).

Syed S., Dare P., Jones S., 2005: Semi –automatic 3d building model generation from LIDAR and high resolution imagery. Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute, 9.2005.

<http://www.definiens-imaging.com/documents/publications/0187.pdf>

(Tarkistettu 20.4.2006).

Tse R., Gold C., Kidner D., 2006: A New Approach to Urban Modelling Based on LIDAR. WSCG 2006, Plzen, Czech Republic, 31.1 - 2.2.2006

http://147.228.63.9/WSCG2006/Papers_2006/Full/B97-full.pdf

(Tarkistettu 18.4.2006).

Vosselman G., 1999: Building reconstruction using planar faces in very high density height data. IAPRS XXXII/3-2W5, s. 87-92.

<http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman1999.munich.pdf>

(Tarkistettu 18.4.2006).

Vosselman G., Suveg I., 2001a: Map base building reconstruction from laser data and images.

<http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman2001.ascona.pdf>

(Tarkistettu 18.4.2006).

Vosselman G., Suveg I., 2001b: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data.

<http://www.tu-dresden.de/ipf/photo/publikationen/aeltere/>

[Vosselmann Maas OEEPEStockholm2001.pdf](#)

Vögtle T., Steinle E., 2000: 3D modelling of buildings using laser scanning and spectral information. IAPRS, Vol. XXXIII-B3 s. 927-933, Amsterdam, 2000.

http://www.ipf.uni-karlsruhe.de/Projekte/SFB461/C5/publications/Amsterdam00_1.pdf

(Tarkistettu 17.4.2006).

Zhong C., Zhongmin Z., DongMei Y., Renxi C.: Multi-Scale Segmentation Of The High Resolution Remote Sensing Image.

<http://www.definiens-imaging.com/documents/publications/IGARSSzhong.pdf>

(Tarkistettu 18.4.2006).