

Maa-57.270, Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen seminaari

Korkeusmallin luonti laserkeilausaineistosta

2007

Juha Kareinen
Teknillinen korkeakoulu
Maanmittausosasta

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	2
1. Johdanto.....	3
2. Laserkeilauksen toimintaperiaate.....	3
3. Korkeusmallin luonti	4
3.1 Mittausdatassa esiintyviä virheitä.....	4
3.1.1 Satunnaiset virheet.....	4
3.1.2 Karkeat virheet.....	4
3.1.3 Systemaattiset virheet.....	5
3.2 Korkeusmallin luonti	5
3.2.1 Interpolointi.....	5
3.2.2 Vankka interpolointi.....	5
3.2.3 Hierarkkinen vankka interpolointi.....	6
3.3 Korkeusmallin luonti metsäisellä alueella.....	7
3.3.1 Alkuperäisen vertailupinnan P laskeminen.....	8
3.3.2 Kasvuston luokittelu ja poistaminen vertailu pinnasta.....	8
3.3.3 Alkuperäisen pistepilven luokittelu.....	8
3.3.4 DTM:n laskenta luokitelluista maanpinnan osumista	9
3.3.5 Puuttuvien pisteiden interpolointi.....	9
4. Testituloksia	9
5. Lähteet	10

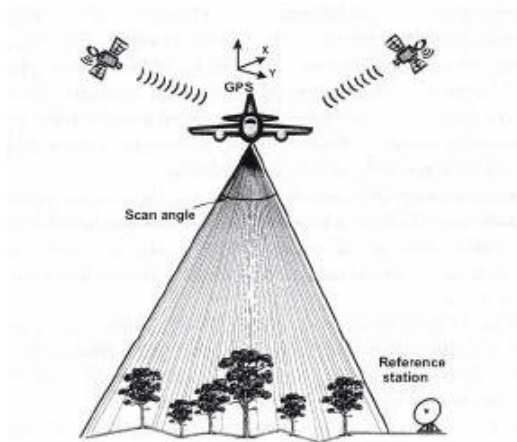
1. Johdanto

Laserkeilaus on yleistymässä ja kehittymässä kokoajan. Laserkeilausaineistoa voidaan käyttää hyväksi monella tapaa ja siitä voidaan työstää monenlaisia aineistoja. Ehkä yksi yleisin tehtävä laserkeilauksella on luoda alueesta korkeusmalli. Tämä siksi, että laserkeilausaineisto soveltuu erittäin hyvin korkeusmallien luontiin. Se pystyy tunkeutumaan peitteisellä alueella maanpintaan asti. Laserkeilauksessa varjoisten alueitten osuus on paljon pienempi kuin esimerkiksi fotogrammetriassa. Laserkeilausaineistosta tuotettu korkeusmalli on myös tiheämpi ja homogeenisempi kuin kuvista tuotetulla korkeusmallilla.

Esittelen tapoja kuinka luoda laserkeilausaineistosta korkeusmalli. Käyn muutamia käytettyjä algoritmiä läpi. Lopussa on myös tuloksia J.Hyypän ym. (2002) tekemästä korkeusmallista testialueella.

2. Laserkeilauksen toimintaperiaate

Laserkeilauksen toimintaperiaate on yksinkertainen. Laserkeilaus perustuu etäisyyden mittaukseen ja näiden mittausten tarkkaan orientointiin. Laserkeilain on kiinnitetty lentokoneeseen (helikopteriin yms.). Laserkeilain koostuu keilanosasta, lasertykistä ja ilmaisain osasta. Keilanosaa kääntää laserkeilaa ja näin saadaan keilattua laajempia alueita yhdellä lentojonolla. Yleensä kuvauskulma on 10 - 20° väliltä. Kun kulma kasvaa, kasvaa varjoisten alueitten osuus keilauksessa huomattavasti. Yleensä keilain pyyhkii kohdetta lentosuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Lasertykki lähettää laserpulsseja, jotka osuvat ja kimpoavat takaisin kohteesta. Ilmaisinosaa ottaa vastaan takaisin kimmonneet pulssit. Kohteen etäisyys keilaimesta saadaan laskettua pulssin kulkuajasta. Etäisyyksistä voidaan ratkaista pintamalli, kun tiedetään mittaushetkellä lasertykin asento ja paikka. (H.Hyypä ja J.Hyypä, 2005).



Laserkeilaimen paikka ja asento saadaan mitattua tarkasti GPS ja IMU (Inertial Measurement Unit) -järjestelmällä. Inertiaalilaitteisto mittaa laserkeilaimen tarkkaa asentoa mittaushetkellä. GPS-mittauksella saadaan keilaimen tarkka paikka mittaushetkellä. Käytössä on yleensä differentiaalimittaus, missä maanpinnalla olevasta referenssipisteestä lähetetään differentiaalikorjausta lentokoneen GPS:ään. Tällä menetelmällä saavutetaan parempi navigointi tarkkuus. Tarkkuus on 10 senttimetrin luokkaa.. (J.Hyypä ym., 2000).

Kuva 1 Laserkeilauksen periaate

J.Hyypä ym. (2002)

Kuvausalue saadaan keilattua vierekkäisten jonojen avulla. Jonojen etäisyys riippuu lentokorkeudesta ja keilauskulmasta. Lasermittaukset eivät ole riippuvaisia vuorokauden ajasta eikä sääolosuhteista kuten ilmakeiäisyys. Heijastuneista pulsseista on myös mahdollista mitata useampia heijastuksia kuin pelkästään ensimmäinen heijastus. Esimerkiksi metsäisillä alueilla ensimmäinen heijastus tulee yleensä puitten latvoista ja oksista ja viimeinen kaiku on vasta oikea maanpinta.

3. Korkeusmallin luonti

Laserkeilaus tuottaa pistepilven, jonka X, Y ja Z koordinaatit on tunnettuja. Nämä pisteet muodostavat digitaalisen pintamallin (digital surface model, DSM). DSM:ssä ei ole eriteltyä maanpinnan pisteitä ja kasvuston/rakennusten pisteitä toisistaan vaan DSM:n sisältää kaikki pisteet. Tästä pisteistöstä on mahdollista muodostaa digitaalinen korkeusmalli (digital terrain model, DTM) luokittelemalla pisteet joko maanpinnan pisteiksi tai kasvuston pisteiksi.

3.1 Mittausdatassa esiintyviä virheitä

Virhelähteitä korkeusmallin luonnissa laserkeilausaineistosta on monia. Virheitä on mahdollista olla GPS-IMU mittauksissa ja erityisesti niiden laskennassa jne. ,mutta keskityn tässä erilaisiin ”virheisiin”, joilla tarkoitan Briesen ym. (2000) tarkoittamaa eroa mitatun pisteen z-arvon ja oikean maanpinnan korkeuden välistä erotusta, kuvaamiseen.

3.1.1 Satunnaiset virheet

Riippumatta mittaussysteemistä ja välineistä, mitatuilla pisteillä on enemmän tai vähemmän satunnaista jakaumaa oikeaan maanpintaan nähden. Yleisesti ottaen tämä satunnainen virhe jakauma on mittaussysteemin keskihajontaa ja se tulisi ottaa huomioon korkeusmallia luodessa.

3.1.2 Karkeat virheet

Karkeitä virheitä tulee kaikissa tiedostoissa. Erityisesti automaattisissa järjestelmissä, kuten laserkeilaus, tuottaa suuria määriä karkeitä virheitä maanpinnan suhteen. Laserkeilauksen tapauksessa nämä virheet voidaan jakaa, joko oikeisiin mittausrvirheisiin tai sitten väärin heijastuksiin (kuten puun latva maanpinnan sijaan).

3.1.3 Systemaattiset virheet

Systemaattisissa virheissä tulee erottaa toisistaan karkeat systemaattiset virheet ja pienet systemaattiset virheet (esim. heijastus maanpinnan sijaan aluskasvillisuudesta). Pienten virheiden vaikutus lopputulokseen on vähäistä. Pienten virheiden poistamiseen tarvitaan myös enemmän informaatio kuin niistä on yleensä mahdollista saada.

3.2 Korkeusmallin luonti

Edellä mainittujen kolmen eri virhetyyppien poistamiseksi on kehitetty algoritmeja. Systemaattisia virheitä tulisi välttää ja pyrkiä estämään ne mittaustilanteessa tai korjata ne sopivalla mallilla ennen korkeusmallin luontia. Kuten aikaisemmin mainitsin, ei pieniä systemaattisia virheitä yleensä pystytä välttämään ja niiden poistaminen korkeusmallista voi olla vaikeaa.

3.2.1 Interpolointi

DTM:n interpolointiin Briese ym. (2002). käyttivät lineaarista ennustusta. Tämä lähestymistapa pitää maanpinnan korkeutta stokastisena tapahtumasarjana. Riippuen datasta sen kovarianssi funktio määräytyy automaattisesti. Kovarianssifunktio kuvaa eri pisteiden korkeuksien mittausvirheiden keskinäistä riippuvuutta, ja se vaimenee monotonisesti pisteiden välisen vaakasuoran Euklidisen etäisyyden kasvaessa. Varianssi mitatuista korkeuksista pitää sisällään varianssin maanpinnan korkeudesta ja varianssin mittausvirheestä. Vähentämällä mittausvirheen varianssin, mikä tiedetään jo ennestään mittauksesta, saadaan maanpinnan varianssi. Kovarianssi funktiot on keskitetty jokaiseen datapisteeseen ja funktioitten tekijät on määritetty jokaiselle pisteelle lineaarisilla yhtälöillä. Skaalattujen funktioiden summa on interpoloitu pinta. Mittausvirheen varianssilla pystytään vaikuttamaan pinnan sileyteen.

3.2.2 Vankka interpolointi

Vankka interpolointi (robust interpolation) on alun perin kehitetty DTM:n luontiin laserkeilausaineistosta metsäisillä alueilla. Tämä menetelmä eliminoi karkeat ”virheet” ja interpoloi maanpinnan yhtenä prosessina. Algoritmin tavoite on laskea yksilölliset painot kaikille epäsäännöllisesti hajautuneille pisteille siten, että mallinnettu pinta esittää maanpintaa.

Algoritmi sisältää seuraavat vaiheet:

1. Pintamallin interpolointi käyttäen yksilöllisiä painoja jokaiselle pisteelle. (Alussa kaikilla pisteillä on sama paino)
2. Laskea suodatusarvot (orientoidut etäisyydet pinnasta mitattuun pisteeseen) jokaiselle pisteelle.
3. Laskea uudet painot jokaiselle pisteelle suodatettujen arvojen avulla.

Algoritmin vaiheita toistetaan niin pitkään kunnes on saavutettu vakaa tilanne (kaikki karkeat virheet on eliminoitu) tai kun iterointeja on tehty maksimi määrä. Algoritmin tuloksena saadaan maanpinnan korkeusmalli sekä pisteitten luokittelu maanpinnan pisteisiin ja ei-maanpinnan pisteisiin.

Algoritmin ensimmäisessä kohdassa interpolointiin käytetään aikasemmin selvitettyä lineaarista ennustamista. Karkeiden virheiden eliminointia kontrolloidaan painofunktion avulla. Painofunktion parametrina on suodatettu arvo ja lopputuloksena saadaan uusi paino. Painofunktiona voi olla kellokäyrä, joko tavallisena tai epäsymmetrisenä. Algoritmista voidaan sanoa, että se tarvitsee sekä karkeita virheitä että pisteitä ilman virheitä, voidaakseen eliminoida ei-maanpinnan pisteet. Lopuksi luokittelu maanpinnan pisteisiin ja ei-maanpinnan pisteisiin suoritetaan toleranssi arvoilla, jotka ovat kynnysarvoja suodatuksen arvoille. (Briese ym., 2002)

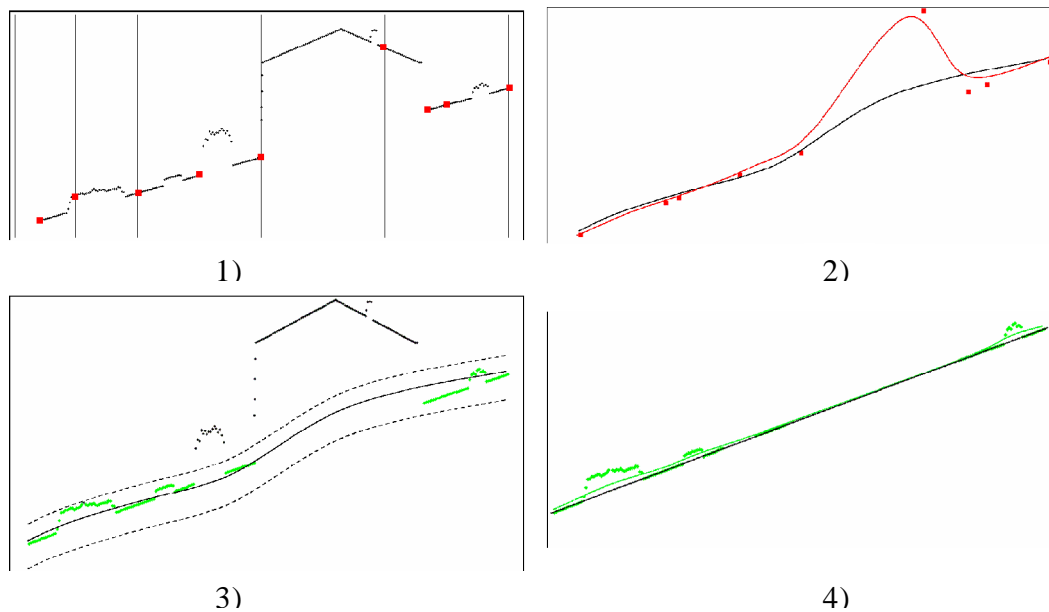
3.2.3 Hierarkkinen vankka interpolointi

Vankka interpolointi on riippuvainen sopivasta suhteesta pisteitä ilman karkeita virheitä ja pisteistä, joissa on karkeita virheitä. Tämä algoritmi ei siis pysty erottelemaan karkeita virheitä, jos ympärillä on laaja alue karkeita virheitä. Välttyäksi tästä ongelmasta on hyvä käyttää hierarkista vankkaa interpolointia (Hierarchic Robust Interpolation). Siinä käytetään vain hierarkista järjestelyä, joka on samankaltainen kuin kuvapyramidit kuvan prosessoinnissa. Datapyramidien avulla data saadaan sellaiseen muotoon, mistä on mahdollista eliminoida kaikki karkeat virheet tällä karkeasta-hienoon tavalla.

Hierarkkinen vankka interpolointi sisältää seuraavat vaiheet:

1. Data pyramidien luonti pienemmällä resoluutiolla
2. DTM:n generointi käyttäen vankkaa interpolointia, aloittaen karkeimmalta tasolta.
3. DTM:n vertailu suuremman resoluution dataan ja pisteiden hyväksyminen, mikäli ovat toleranssin sisällä.

Vaiheita kaksi ja kolme toistetaan jokaisella hienomalle tasolle. (Briese ym. 2002)



Kuva 2. Hierarkisen voimakkaan interpoloinnin vaiheet

- 1) Datapyramidien luonti
 - 2) DTM:n generointi karkealla tasolla voimakkaalla interpoloinnilla. Ensimmäisen ja viimeisen iteroinnin pinta on näkyvissä.
 - 3) Karkea DTM:n toleranssin kanssa. Kaikki toleranssinauhan sisään jäävät pisteet hyväksytään.
 - 4) DTM:n generointi hienomalla tasolla voimakkaalla interpoloinnilla.
- (Briese ym., 2002)

3.3 Korkeusmallin luonti metsäisellä alueella

DTM:n luontiin on useita menetelmiä, kerron vielä tässä J.Hyypän ym. (2000) esittelemää tapaa luoda DTM laserkeilauksen pistepilvestä metsäisellä alueella. DTM:n luontiin kuuluu viisi vaihetta:

1. Alkuperäisen vertailupinnan P laskeminen
2. Kasvuston luokittelu ja poistaminen vertailupinnasta
3. Alkuperäisen pistepilven luokittelu
4. DTM:n laskenta luokitelluista maanpinnan osumista
5. Puuttuvien pisteiden interpolointi

3.3.1 Alkuperäisen vertailupinnan P laskeminen

Aluksi luodaan keilattua aluetta vastaava ruudukko. Ruudukon pikselien koon tulee vastata keilauksen mittaustarkkuutta. Pistepilven pisteet siirretään ruudukolle käyttäen laskettuja koordinaatteja x , y ja z . Jokaisen ruudun koordinaattien pienin z -arvo (korkeus) tallennettiin kyseiseen ruutuun. Tätä ruudukon samaa arvoa pidetään alkuperäisenä vertailupintana P .

3.3.2 Kasvuston luokittelu ja poistaminen vertailu pinnasta

Kasvuston poisto tehdään käyttäen suodatusta. Oletetaan, että alkuperäinen vertailupinta on jatkuva ja maanpinnan korkeudet eivät muutu merkittävästi paikallisesti. J.Hyyppä ym. (2000) käyttävät suodatukseen seuraavanlaista menetelmää. Lasketaan kaksi gradienttimatriisia. Ensimmäinen on summa lähi pikseleitten eroavaisuuksista ja toinen matriisi on summa absoluuttisista arvoista lähi pikseleitten eroavaisuuksista.

Laskettujen gradienttien arvoja verrattiin kynnyсарvoon. Jos gradientin arvo oli pienempi kuin kynnyсарvo, luokiteltiin pikseli maanpinnan pisteeksi. Jos gradientin arvo oli suurempi kuin kynnyсарvo, luokiteltiin pikseli kasvillisuudeksi.

Luokittelun jälkeen lasketaan uusi korkeusmalli maanpinnan pisteille. J.Hyyppä ym. (2000) laskivat tämän Delaunayn interpolointi algoritmilla, käyttäen naapuri pikselien korkeuksia. Uuden korkeusmallin laskeminen on iteratiivinen prosessi. Tulokseksi saadaan ensimmäinen DTМ, jota kutsutaan karkeaksi pintamalliksi (rough DTМ).

3.3.3 Alkuperäisen pistepilven luokittelu

Alkuperäisen pistepilven luokitteluun käytetään karkeaa pintamallia. Alkuperäisen pistepilven pisteitä verrataan karkean pintamalliin ja lasketaan näiden välinen erotus dz_n .

$$dz_n = z_n - z(j,i)$$

missä z_n on alkuperäisen pistepilven pisteen korkeus ja $z(j,i)$ on pikselin pinnan korkeus karkealla pintamallilla.

Erotuksen dz_n perusteella luokitellaan pikselit joko kasvillisuudeksi tai maanpinnaksi.

3.3.4 DTM:n laskenta luokitelluista maanpinnan osumista

Lopullinen DTM lasketaan maanpinnaksi luokitelluista pisteistä. J.Hyyppä ym. (2000) käyttävät laskentaan maanpinnan pisteiden keskiarvoja ja mediaaneja.

3.3.5 Puuttuvien pisteiden interpolointi

DTM ei peitä koko aluetta, vaan osassa mallia on aukkoja. Aukot johtuvat siitä, että alue on ollut liian peitteinen (kasvillisuus / rakennukset) eikä maanpintaan ole saatu osumia. Nämä aukot paikataan interpoloimalla niihin arvot. J.Hyyppä ym. (2000) käyttävät naapuri pikseleiden korkeuksia ja Delaunayn algoritmiä interpolointiin.

4. Testituloksia

J.Hyyppä ym. (2000) olivat tehneet korkeusmallin testialueesta. Testialueen oli pieni metsäinen alue (1,4 hehtaaria) Kalkkisissa. Testialueelta oli mitattu 750 pistettä takymetrillä, jotta saatiin aineistoa korkeusmallin tarkkuuden vertailuun. Takymetri mittausten ja laserkeilaus aineiston välille laskettiin erotus ja erotusta verrattiin kuin d_{zn} arvoja. Tarkimmat korkeusmallit saatiin, kun otettiin keskiarvo tai mediaani kaikista maanpintaan osuneista pisteistä, jotka olivat korkeinta 60 senttimetrin (toleranssiarvo) päässä pienimmästä arvosta. Tuloksena oli 22 senttimetrin keskihajonta. 60 senttimetrin toleranssiarvo voidaan pitää hyvänä arvona tyypilliseen suomalaiseseen metsään. Erot keskiarvon ja mediaanin välillä olivat marginaaliset. Jos käytettiin vain ensimmäisten heijastustusten tuottamaa dataa (first pulse), oli karkea DTM melkein yhtä tarkka (keskihajonta 25 cm) kuin paras luotu DTM (keskihajonta 22 cm).

Laserkeilauksesta saatu DTM erosi testialueella olleesta metsätien korkeudesta vain 8,5 cm (keskihajonta). Ennen kuin korkeusmallia verrattiin takymetrimittauksiin, näytti siltä, että korkeuksia oli kahden tyyppisiä; paljasta maanpintaa vastaavia ja aluskasvillisuutta vastaavia. Kun nämä kaksi eri tyyppiä analysoitiin eriksiin, huomattiin, että saatu keskihajonta oli melkein sama (23cm ja 21cm). Näitten datojen välillä oli 12 senttimetrin systemaattinen siirtymä. Tämä vain siis varmisti sen, että laserpulssi heijastuu metsän aluskasvillisuudesta.

Laserkeilauksen tarkkuuden analysointi suoritettiin maaperän kaltevuuden funktiona. Huomattiin, että mitä kaltevampi maanpinta on, sitä suuremmiksi virheet kasvoivat. Luokittelemalla data maanperän kaltevuuden avulla eri ryhmiin, saatiin jokaiselle ryhmälle oma keskihajonta. Tasaisilla alueilla keskihajonta oli 15 senttimetriä, kun 40% kaltevuusalueella keskihajonta oli enemmän kuin 40 senttimetriä. Kahden maanpintaan osuneen pisteen maksimi etäisyys oli pensaisella alueella 4 metriä, tiheässä havupuustossa 10 metriä ja vanhan havupuuston alueella 4 metriä. Nämä tulokset tulivat käyttäen ensimmäistä pulssia (first-pulse).

5. Lähteet

Ch. Briese, N. Pfeifer, P. Dorninger, 2002

Applications of the robust interpolation for DTM determination,

http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/Briese_Pfeifer_Dorninger.pdf

Hannu Hyyppä ja Juha Hyyppä, 2005

Laserkeilaus ja kansallisia suosituksia

J. Hyyppä, U. Pyysalo, H.Hyyppä ja A. Samberg, 2000

Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment,

http://las.physik.uni-oldenburg.de/eProceedings/vol01_1/01_1_hyyppae1.pdf

Ulla Pyysalo, 2000

Metsäalueen korkeusmallin muodostaminen laserkeilaimella mitatusta kolmiulotteisesta pistejoukosta. Diplomityö. TKK. Maanmittausosasto