

Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät

Hannu Hyyppä¹ ja Juha Hyyppä²

¹Teknillinen korkeakoulu, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio
PL 1200, 02015 TKK
hannu.hyyppa@hut.fi

²Geodeettinen laitos, Kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osasto
Geodeetinrinne 2, PL 15, 02431 Masala
juha.hyyppa@fgi.fi

Tiivistelmä. Suomessa ei ole olemassa laserkeilauksen laatua koskevia kansallisia ohjeita tai määräyksiä, mikä vaikeuttaa laserkeilauksen nopeaa yleistymistä maastomalli- ja kaupunkimallisovelluksissa. Laserkeilausaineiston avulla muodostettavien kohteiden mitta- tai sijaintitietojen vaihtelut aiheutuvat pääasiassa lasermittauslaitteistojen, lentotapahtuman, prosessointimenetelmien, käytettävien mittausparametrien ja olosuhteiden vaihteluista. Tilaajien tulisi tuntea laserkeilausaineistojen laadun perusasiat voidakseen yhdistellä eri laserlentoja optimaalisesti ja tehdäksesi asiallisia tarjouspyyntöjä aineistotoimittajille. Tässä esityksessä kuvataan laserkeilauksen laatua ja sen osatekijöitä, siihen liittyvää runsauden problematiikkaa sekä kuvataan laserkeilauksella saavutettavaa laatua.

Avainsanat: laserkeilaus, laatu, suorapaikannus, satunnaisvirhe, systemaattinen virhe, intensiteetti.

1 Johdanto

Laserkeilain tuottaa kohteesta kolmiulotteista informaatiota. Laserkeilaimien kehityksen on mahdollistanut viimeaikainen lentokoneinertiajärjestelmien, nopeiden keilaimien, GPS-järjestelmien ja lasertekniikan kehitys. Laserkeilaimen perusidea on hyvin yksinkertainen: kohteen ja laserin välinen etäisyys mitataan laserpulssin kulkuajan perusteella ja keilain pyyhkäisee pulssia lentosuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kun laserkeilaimen asento ja paikka ovat tarkasti tunnetut, mitattu etäisyys voidaan muuttaa korkeudeksi. Laserkeilain täten tuottaa maastosta kolmiulotteisen pinnan (DSM). Tätä pintamallia käsittelemällä voidaan tuottaa erilaisia tuotteita 2,5D:ssä ja 3D:ssä. Ilmakuvaukseen verrattuna laserkeilaus ei edellytä tiheää tukipisteverkkoa maanpinnalla. Riittää, kun käytössä on tarkka referenssipiste differentiaali-GPS:n tukiasemavastaanotinta varten. Yksi tukiasema kattaa alueen, jonka säde on maksimissaan 30 kilometriä, mikä riittää alle 10 cm tarkkuuteen (Cramer, 1999). Laserkeilain tuottaa kohteesta maastopistetiedoston useimmiten ensimmäisen ja viimeisen kaiun perusteella sekä intensiteettitietoa että yhä yleisimmin jonkinlaista kuvainformaatiota samaan aikaan.

Laserkeilauksen kaupalliset markkinat Suomessa vuonna 1997 olivat olemattomat. Vuonna 2002 markkinat olivat jo useiden miljoonien eurojen suuruiset ja olivat jo yksistään

suuremmat kuin yritysten kaupallinen toiminta satelliittikuvien kanssa. Laserkeilausta voidaan siten pitää merkittävänä kasvualana geoinformaatiosektorilla. Kolmasosa Helsingistä mitattiin laserkeilauksella jo useita vuosia sitten 3D-kaupunkimalleja varten. Useat maat, kuten Alankomaat, ovat kokonaisuudessaan keilattu laserilla. USA:ssa on viime aikoina mitattu laajoja alueita (1 Mha) laserkeilaimilla. Vaikka Suomessa ei ole omaa laserkeilainta, myös suomalaiset yritykset ja organisaatiot tarjoavat laserkeilauspalveluja (mm. Tieliikelaitos, TopTerra Oy, FM-Kartta Oy) ruotsalaisten (mm. TopEye), norjalaisten (mm. Fotonor) ja saksalaisten (mm. TopoSys) laserkeilausyritysten avulla.

Laserkeilaus on suhteellisen edullista (noin 100 euroa per jonokilometri), jos huomioidaan sen tarkkuus ja verrataan sitä muihin 3D tiedon tuottamismenetelmiin. Edullisuus ilmenee sekä kustannus- että aikasäästöinä. Erityisen hyvin laserkeilaus soveltuu maanpinnan kartoittamiseen, linjamaisiin kohteisiin (tiet ja rautatiet), vesialueiden kartoitukseen, kaupunkien kohdemallien tuottamiseen (3D-kaupunkimallit), sähkölinjojen ja ympäristön kartoitukseen (mm. avokaivannot, kaatopaikat ja läjityskasat). Laserkeilauksen kustannuksiin vaikuttavat voimakkaasti siirtokustannukset (mobilisointi, tyypillisesti luokkaa 10 kEuroa), keilattavan alueen koko ja muoto sekä käytetty keilain. Lentokonepohjaiset järjestelmät (TopoSys ja Optech) soveltuvat laajojen yhtenäisten alueiden kartoittamiseen. Noin 100 km² kokoisten yhtenäisten alueiden keilaus maksaa tänä päivänä 3-5 euroa hehtaaria kohden pulssitiheyden ollessa useita pulsseja per neliometri. Pienillä kohteilla hehtaarikustannukset ovat usein kymmenkertaiset. Kustannuksia nostavat myös laitteistojen hinta. On arvioitu, että hinnasta 60 % on tällä hetkellä laitteen kuoletuskustannuksia.

Suomessa yleisimmin käytetty laserjärjestelmä on helikopteriin asennettu TopEye. Laserin lisäksi siinä on vakiovarusteena korkealuokkaisen digitaalikamera. Kohteesta riippuen lentonopeus on 36-130 km tunnissa ja lentokorkeus on 60-400 m. Lasersensori mittaa helikopterin ja maaston välistä etäisyyttä 7000 kertaa sekunnissa. Keilausleveys helikopterin kulkusuuntaan nähden on 20-680 m. Pistetiheys on 0.25 m–4 m lentokorkeudesta riippuen. TopEye-järjestelmää markkinoivat Tieliikelaitos ja TopTerra Oy. Pienissä kohteissa TopEye-järjestelmän mobilisaatiokustannukset ovat olleet pienimmät, koska laitetta on säännöllisesti käytetty Suomessa. Jatkossa uskoisimme, että Optechin ja muiden tehokkaampien lasereiden tuonti Suomeen yleistyy ja sitä kautta hankkeita voidaan paremmin kilpailuttaa.

Nopeasti kasvavien markkinoiden kehittymistä estävät kuitenkin seuraavat asiat: käyttäjillä on puutetta käyttökelpoisista menetelmistä laserpilvien käsittelyyn (suomalainen TerraScan-ohjelmisto on kuitenkin markkinajohtaja pistepilvien prosessoinnissa), käyttäjillä ei ole tarpeellista tietoa laserkeilauksen laatuun liittyvistä asioista, puhumattakaan laadun osatekijöistä ja aineistojen heikohko saatavuus estää käytön lisääntymistä.

2 Laserkeilauksen soveltuvuus ja käyttö Suomessa

Laserkeilaustekniikka soveltuu erittäin hyvin kolmiulotteisen maasto- ja kohdemallin luomiseen erityisesti seuraavissa tapauksissa: 1) malli halutaan tuottaa nopeasti, 2) alue on riittävän laaja kustannustehokkaalle laserlennolle, 3) alue on aikaisemmin huonosti kartoitettu, 4) alueelta halutaan useita erilaisia tuotteita (DEM, rakennukset, puusto, tielinjat ja 5) erikoissovelluksissa (kuten sähkölinjat, maastomallin muutokset, puuston pituuskasvu).

Verrattaessa laserkeilausta ja perinteistä fotogrammetrista stereokartoitusta korkeusmallin tuottamisessa metsäisellä alueella voidaan todeta, että saman maanpinnan pisteen tulee näkyä stereokartoituksessa kahdessa kuvassa ja laserkeilauksessa vain yhdellä kuvausgeometrialla. Koska laserkeilauksen avauskulmat ovat selkeästi kapeammat (usein maksimissaan 10 astetta metsäalueilla), saadaan laserkeilauksen avulla laadultaan ylivertainen korkeusmalli metsäalueilla stereokuvaukseen nähden ja vieläpä varsin automaattisin

menetelmin. Tiheissä metsissä ero on merkittävä. Vaikka suuri osa laserpulseista heijastuu suoraan puuston lehvistä, oksista ja neulasista, osa tunkeutuu maahan asti latvustoissa olevien aukkojen kautta. Laserkeilauksen lisäetuna perinteiseen fotogrammetriseen mittaukseen verrattuna on nopeus ja menetelmän vähäisempi riippuvuus sääolosuhteista.

Laserkeilauksella saatavia aineistoja yhdistellään usein fotogrammetrisiin mittauksiin ja käytetään ilma- ja satelliittikuvien kanssa. Laserkeilaimen kanssa samaan kuvausalueeseen voidaan asentaa myös digitaalikamera, jolla voidaan ottaa keilauksen aikana kohteesta myös digitaalisia ilmakuvia. Laserpisteiden käsittelyn yhteydessä kuvat oikaistaan ortokuviksi. Maanpinnan laserpisteistä tehdyt tarkat korkeusmallit yhdessä orto-oikaistujen kuvien kanssa muodostavat moniin suunnittelutarkoituksiin soveltuvia aineistoja. Useissa sovelluksissa tulee kuitenkin harkita, tarvitaanko kuvat samanaikaisesta kuvauksesta. Lasermittausten peitto on usein kapeampi kuin ilmakuvien, mutta niitä voidaan ottaa huonommissa sääoloissa kuin optisia kuvia ja myös yöaikaan. Niinpä eri aikana eri geometrialla otetut kuvat ovat varteen otettava vaihtoehto samanaikaisille kuvauksille. Ainakin tällä tavalla tulevaisuudessa voidaan tuottaa kustannustehokkaampia yhdistelmäaineistoja.

Teiden, katujen ja rautateiden suunnittelussa on perinteisesti käytetty digitaalista maastomallia. Laserkeilausta onkin käytetty paljolti maanpinnan, ympäristön ja ympäröivien rakenteiden mallintamiseksi.

3D-kaupunkimallit - Viime aikoina kolmiulotteisen tiedon tarve on lisääntynyt myös kaupunki- ja taajama-alueilta. Yleisesti kolmiulotteista tietoa kaupunkialueista ei ole saatavissa, vaan lähes kaikki tieto on kaksiulotteista - karttoja ja kuvia. Mahdollisia lähteitä kolmiulotteisen tiedon hankintaan ovat maanmittaustoimenpiteet, ilmakuvaukset ja laserkeilaus. Laserkeilaimen menetelmän sovellutukset kaupunkialueilla ovat laajat: kaavoitus ja maankäyttö, maisemasuunnittelu, kartoitus, maankäyttö, teiden ja katujen suunnittelu, ympäristön seuranta, rakennussuunnittelu ja -valvonta, massojen tilavuuslaskenta, näkyvyys- ja esteisyysanalyysit, kaupunkirakenteen tutkiminen sekä verkkojen suunnittelu ja havainnollistaminen.

Sähkölinjojen kunnossapidossa laserkeilaimella voidaan tuottaa tietoa puuston etäisyydestä sähkölinjoihin nähden. Tuotettua puuston pituustietoa voidaan käyttää hyväksi linjan aukipitämiseksi.

Metsien inventoinnissa laserkeilaus mahdollistaa hyvinkin tarkan puuston pituuden määrittämisen. Norjassa histogrammipohjaisen pituustiedon avulla tuotetaan tarvittavat puustotunnukset tilastollisesti käyttäen koealoja tunnusten kalibrointiin. Menetelmä on operatiivisessa käytössä. Laserkeilaus mahdollistaa myös yksittäin puun tapahtuvan tulkinnan.

Muutostulkinnan avulla laserkeilauksella saadaan selville hyvinkin pienen korkeusmuutokset, kuten puuston pituuskasvu. Muutoksilla voidaan havaita myös jokitorvien muutokset hyvinkin tarkasti.

3 Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät

Laserkeilauksessa laajat alueet mitataan nauhoina, joiden leveys tyypillisesti vaihtelee 50 m:stä lähes kilometriin. Nauhojen leveyteen vaikuttavat lähinnä käytetty lentokorkeus ja keilauskulma. Lentolinjan pituuteen vaikuttaa lähinnä etäisyys GPS-tukiasemalle. Nauhat yhdessä muodostavat blokin. Etäisyys ja keilausvirheiden lisäksi laserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttaa lähinnä GPS/IMU-järjestelmän suorituskyky. Virheet näissä järjestelmissä aiheuttavat deformaatioita laserin mittaamiin nauhamaisiin linjoihin ja näkyvät eroina vierekkäisillä linjoilla. Virheiden poiston tulisi tapahtua minimoimalla alkuperäisten 3D-pisteparvien väliset muutokset vierekkäisillä linjoilla.

Laserkeilauksen virheet voidaan jakaa ominaisuuksiksi kullekin lennolle, blokille, linjalle, GPS-mittaukselle ja laserpisteelle. On tyypillistä, että kullakin näillä on oma

systemaattinen virheensä, tietenkin niin, että systemaattisen virheen vaihteluväli kasvaa siirryttäessä yksittäisestä pisteestä eri lentokertoihin. Laseraineistoja prosessoitaessa näitä kaikkia virheitä ei kuitenkaan aina erikseen kalibroida. Tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että eri lentojen aineistojen yhdistäminen ilman asianmukaisia systemaattisen virheen poistoa heikentää käytännössä koko laseraineiston laatua. Tällöin saavutettava paras mahdollinen laatu ei olekaan enää senttimetrien luokkaa vaan pikemminkin desimetrien luokkaa. Jokainen lento on siis yksilöllinen tapahtuma, jolloin laseraineiston systemaattisten ja satunnaisten virheiden tunteminen on pakollista laseraineiston laadun selvittämiseksi. Systemaattisten virheiden poistaminen tapahtuu maastotukipisteiden avulla. Korkeus voidaan kalibroida mm. teiden, rakennusten ja järvien pinnan korkeusinformaatiolla. Xy-tason virheet voidaan korjata mm. rakennuskulmien avulla. Yhteisten liitospisteiden avulla vierekkäiset jonon sovitetaan yhteen.

Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat jo hyvin aikaisessa vaiheessa **tilaajan vaatimukset**, jolloin spesifioidaan laserlennon parametrit. Koska eri toimittajilla on käytössään erilaisia laserjärjestelmiä tulisi tilaajan osata spesifioida hänelle kriittiset asiat. Tällaisia asioita ovat mm. pisteparven tarkkuus, pisteparven tiheys, maksimaalinen sallittu keilauskulma ja pisteiden riippumattomuus toisistaan sekä kokonaismittaustarkkuus työlle. Tilaajan ei tulisi spesifioida sellaisia parametreja, jotka estävät kilpailun syntymisen. Aikaisemmin tilaaja spesifioi työnsä usein niin, että tarjous voitiin tehdä vain yhdellä laserkeilausjärjestelmällä.

Laserkeilauksen laatu voidaan jakaa myös **laadun osatekijöihin lasermittauslaitteistojen, käytettävien mittausparametrien ja prosessointimenetelmien, kohteen pintamateriaalien sekä olosuhteiden osalta.**

Lasermittauslaitteistoissa on suuria eroja. Käytännössä nämä erot estävät yksinkertaisten suositusten antamisen tilaajille. Laitteistojen pulssimäärä vaihtelee 7 000:sta 83 000:een mittaukseen sekunnissa. Pelkkä pulssimäärä ei kuitenkaan ole itseisarvo, sillä pulssien laatu ja keskinäinen korrelaatio saattavat vaihdella eri aineistojen kesken. Pulssimäärää voidaan myös kasvattaa lentämällä sama alue useaan kertaan, kunhan muistetaan, että pistepilviä ei tule yhdistää ennen systemaattisten virheiden poistoa. Osa laitteistoista pystyy mittaamaan koko pulssin muodon (kuten TopEye vuodesta 2004 alkaen), osa mittaa vain ensimmäistä tai viimeistä kaikua tai molempia. Intensiteettiarvo voi olla ensimmäistä tai viimeistä kaikua vastaava. GPS- ja inertiajärjestelmät vaihtelevat suuresti. Keilan koko maanpinnalla vaihtelee eri järjestelmillä. Keilan koolla on merkitystä eri kohteiden näkyvyyteen. Lentokonejärjestelmien tulisi periaatteessa tarjota vakaampia mittauksia ja pienempiä tasovirheitä, mutta toisaalta helikopterijärjestelmät tarjoavat monia mahdollisuuksia mittauksissa. Aineistoissa saattaa esiintyä myös järjestelmäspesifistä kohinaa, joka ei olekaan kohteen ominaisuus vaan esimerkiksi keilausmekanismin synnyttämää virhettä.

Käytetty laserjärjestelmä ratkaisee jo hyvin monia **mittausparametreja**, mutta käytännössä lentokorkeus, maksimaalinen keilauskulma, pulssimäärä ja keilanleveys tulisi valita siten, että laseraineiston laatu olisi tasaista ja käyttöä varten optimoitua. Pulssin koko ja muoto sekä pulssitiheys ratkaisevat, minkä kokoiset kohteet näkyvät laserkeilauksessa. Mikäli pulssin leveys on säädettävissä, on mahdollista jopa tuottaa kohteen kattava keilaus, jolloin pienemmätkin kohteet näkyvät laserin tuottamassa kuvassa. Mm. TKK:ssa ja Geodeettisessa laitoksessa tutkitaan tällä hetkellä, minkälaiset kohteet näkyvät laserkeilauskuvassa. Kohteesta saatu pistetiheys (pulssien lukumäärä neliometriä kohden) vaikuttaa voimakkaasti siihen, mitä laserin tuottamasta aineistosta on mahdollista määrittää ja havaita. Lasertutkien kasvaneen pulssintoistotaajuuden ansiosta on ollut mahdollista kehittää sovelluksia, jotka perustuvat enemmän hahmontunnistukseen (saadaan useita osumia kohteeseen neliometriä kohden, jolloin useiden kohteiden piirteet alkavat näkyä) kuin nykyisen tekniikan tason

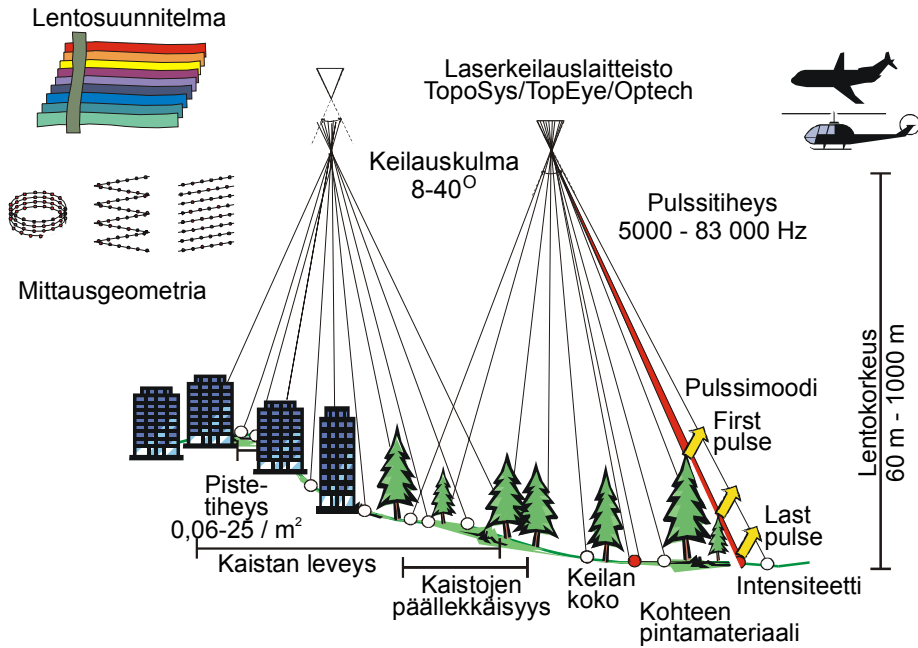
mukaiseen puhtaasti tilastolliseen laskentaan. Pulssimäärän kasvattaminen tuo merkittävää lisäetua laserkeilaimen käytölle. Suuri näytteiden määrä mahdollistaa hyvän erotuskyvyn ja tällöin on mahdollista mitata yksittäisten kohteiden ominaisuuksia. Pistetiheys on tyypillisesti $0,06-25/m^2$, tosin lennettäessä matalalta useita päällekkäisiä lentolinjoja saadaan pistetiheyttä kasvatettua. Optimaalisen keilauskulman valinta on kompromissi usean muun parametrin suhteen. Tyypillisesti eri laserjärjestelmissä on sekä ensimmäisen ja jälkimmäisen kaiun tallennustavat (engl. first pulse mode ja last pulse mode). Ensimmäinen kaiku ilmaisee laseria lähimpänä olevien kohteiden etäisyyden ja jälkimmäinen kaiku pyrkii näkemään esimerkiksi metsäisessä kohteessa maanpinnan. Koska molemmat tallennustavat sisältävät tietoa mm. sekä puuston latvaosista ja maanpinnasta, saadaan paras tulos, mikäli mittaustulokset yhdistetään. Samalla voidaan kasvattaa käytettävissä olevien näytteiden määrää.

Käytetyt prosessointimenetelmät vaikuttavat aineistojen laatuun. Käyttötarkoituksen mukaan laseraineistoa on muokattava ja siirrettävä, mikä vaikuttaa myös suuresti laatuun. Prosessoinnissa aikaisemmin harvennettiin pistejoukkoja tilaajalle. Käytännössä tämä onnistuu vain tasaisilla alueilla korkeusmallia kuvatessa. Tilaaja voi myös saada alkuperäisten pisteiden kautta kulkevan pinnan tai valmiiksi pehmenneen pinnan sen sijaan, että itse alkaisi käsitellä pistejoukkoa. Valmiiksi tehdystä pintamallista on hyvin vaikea määrittää optimaalista korkeus- tai kohdemallia, koska valmiit pinnat on tehty tyypillisesti mediaanisuodatuksen tai keskiarvostuksen avulla. Luotettavat korkeus- ja kohdemallit tehdään kuitenkin maksimi- ja minimisuodatuksien kaltaisilla apuvälineillä. Korkeusmallin laskemiseen on useita menetelmiä. Samaten aineistojen tulkinta voi tapahtua pisteiden tai rasteripintojen avulla. Siirryttäessä rasteripintoihin aina tuhoetaan joku määrä alkuperäistä informaatiota. Muutostulkinta on kaikkein herkin prosessointimenetelmien muutoksille kahden eri kuvauksen välillä. Muutostulkinnassa tulisivat kahden eri ajanhetkinä otettujen kuvauksien prosessointimenetelmien olla täsmälleen samat.

Laserkeilauksen laatuun ja tarkkuuteen vaikuttava tekijä on myös **kohteen pintamateriaali**. Eri materiaalit aiheuttavat voimakkuudeltaan erisuuruisen takaisinsinnsironnan ja myös kohteissa saattaa esiintyä vaihtelua laserin keilan sisällä. Voimakkuudeltaan erisuuruinen kaiku saatetaan tulkita myös pienenä siirtymänä (jos ilmaisukynnys on vakio ja voimakas kaiku on levittänyt tulevaa pulssia). Niinpä vaalealla ja tummalla pinnalla saattaa olla systemaattinen etäisyyssiirtymä. Sisäisessä laadunarviossa tämä tulisi pystyä havaitsemaan. Kohteen sisäinen vaihtelu saattaa aiheuttaa sen, että kohteen etummaisat osat aiheuttavat jo ilmaisukynnyksen ylittävän havainnon (ruohikko) tai että satunnaisvirhe kasvaa.

Kaikkein vähiten tiedetään **olosuhteiden** vaikutuksesta. Hyvin tunnettua on, että tuulisuus kuvaushetkellä tekee linjalla lentämisen vaikeaksi ja että pienetkin kaarrot näkyvät kuvatuotteissa. Sen sijaan tuulisuuden ja muiden vastaavien olosuhdetekijöiden vaikutuksia mm. puuston latvojen sijaintiin ei tunneta. Samat latvat ovat kuitenkin voineet sijaita esimerkiksi 1.5 m etäisyydellä toisistaan kahdessa peräkkäisessä kuvauksessa. Osa virheestä selittyy suorapaikannuksen tasovirheenä, mutta luonnonolosuhdetekijöiden vaikutuksia ei ole edes analysoitu. Erityisesti tällä on merkitystä muutostulkinnassa. Olosuhdetekijänä voidaan pitää myös GPS-satelliittien näkyvyyttä. Laserkeilauksen laatu on erilaista puhuttaessa korkeusmallin tai kohdemallin tarkkuudesta eri ympäristöissä (kaupunki- ja metsäalueet). Maaston kaltevuudella ja peitteisyydellä on vaikutuksensa sekä korkeus- että kohdemalliin.

Intensiteettitiedon hyväksikäytön pahin este on sen puutteellinen laadunmäärittäminen. Intensiteettitietoa ei kalibroida, minkä vuoksi sen arvot voivat vaihdella runsaasti eri lennoilla.



Kuva 1. Laserkeilauksen laadun osatekijät.

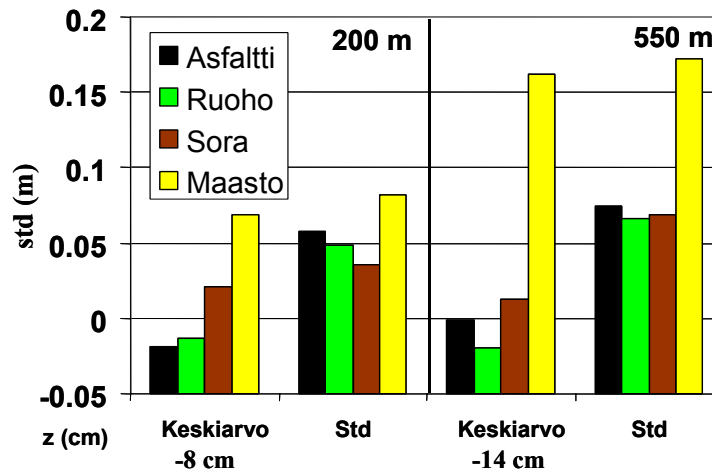
4 Esimerkkejä laserkeilauksen tarkkuudesta

Seuraavassa on esitetty esimerkkien avulla laserkeilauksella saavutettavaa tarkkuutta. Suomalaisissa esimerkeissä laseraineistojen tarkkuus on määritetty vertaamalla syntyneitä malleja ja pistejoukkoja referenssimittauksiin. Laserpisteiden laadun arvioinnissa voidaan määrittää sijaintitarkkuus (x-, y-, z-tarkkuus), joka sisältää sekä systemaattisen ja satunnaisten osan. Kaupunkimallin ollessa kyseessä voidaan arvioida myös sijainnista riippumattomia suureita, mm. pituusmittojen, pinta-alojen ja tilavuuksien oikeellisuutta.

Referenssimittauksina voidaan käyttää täkymetrimittauksia kuin myös huolellisesti tehtyjä RTK-GPS-mittauksia. RTK-GPS-mittauksien virhe on 1-3 cm, mikäli ne tehdään huolellisesti. RTK:n etuna on kuitenkin se, että sen avulla voidaan tuottaa nopeasti runsas referenssipisteaineisto. Virhe, joka on suuruudeltaan 3 cm, aiheuttaa alle 1 cm virheen tulosten tulkinnassa. Runsaalla referenssipisteiden käytöllä saadaan kuitenkin tehtyä kattavammat ja sitä kautta luotettavammat analyysit.

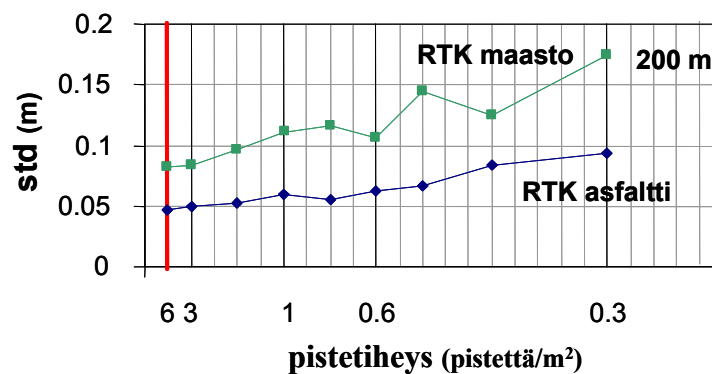
Kuvassa 2 on esitetty TopEye:n aineistolla kahdelta eri lentokorkeudelta (200 ja 550 m) tehtyjä tarkkuusanalyysijä. Tarkkuus on määritetty neljälle eri kohdemateriaalille: asfaltille, ruoholle, soralla ja peitteiselle maastolle. Tuloksia analysoidessa havaitaan, että eri materiaalien välillä on vain pieni systemaattinen ero. Ero on hyvin pieni huomioiden, että yksittäiset suuret virheet saattavat aiheuttaa helposti myös tulkintavirheitä. Kuitenkin eri materiaalien välillä on tilastollisesti havaittava korkeero. Ero johtuu pääsääntöisesti aikaisemmin mainitusta voimakkaamman signaalin leviämisestä ja siitä syntyvästä etäisyyseroista, mutta myös muista systemaattista virhettä aiheuttavista lähteistä (kuten eri keskimääräinen keilauskulma, kohteen epätasaisuus vrt. ruohikko). Eri kohteiden satunnaisvirhe puolestaan 200 m korkeudesta on likimain sama 4-6 cm. Tulee kuitenkin muistaa, että näin hyviä tuloksia saadaan vain optimiolosuhteissa, eli aineistojen tulee olla asianmukaisesti prosessoituna. Kumpuilevan maaston satunnaisvirhe 200 m korkeudesta oli n. 8 cm. Tämä on selitettävissä kohdealueen (Otaniemen) verraten tasaisella maastolla. Erityisesti 550 m:n korkeudesta on merkille pantavaa, että systemaattinen tasoero on siirtynyt 6 cm, vaikka kyseiset lennot on tehty samana päivänä vieläpä noin yhden tunnin aikana.

Tasoero voidaan selittää suorapaikannuksen virheenä ja ero on hyvä esimerkki eri blokkien välisestä virheestä. Merkille pantavaa on myös kumpuilevan maaston systemaattisen virheen tasoero. Ero on selitettävissä aluskasvillisuuden, kaltevuuden ja keilan koon kasvun yhteisvaikutuksella. Satunnaisvirheet 550 m:n korkeudesta olivat 7-8 cm luokkaa tasaisille kohteilla ja kumpuilevalle maastolle 17 cm:n luokkaa.



Kuva 2. Pintamateriaalin/kohteen vaikutus.

Kuvassa 3 on esitetty pistetiheyden vaikutus 200 m:n korkeudesta mitatulle aineistolle asfaltin ja kumpuilevan maaston osalta. Tasaisilla kohteilla pistetiheydestä 6 pistettä neliometriä kohden siirtyminen 0.6 pisteeseen ei sanottavasti heikennä tuloksia ja vielä 0.3 pisteellä neliometriä kohden saadaan parempi kuin 10 cm satunnaisvirhe. Kumpuilevalla maastolla vastaavalla tiheydellä päästään kuitenkin vain alle 20 cm satunnaisvirheeseen.



Kuva 3. Pistetiheyden vaikutus laserkeilauksen tarkkuuteen.

Ahokas ym. (2002) selvittivät eri korkeusmallialgoritmien vaikutusta tuloksiin. Erilaisilla menetelmillä saatiin satunnaisvirhe, joka vaihteli 13 cm:stä 40 cm:iin. Rakennusten korkeus voitiin määrittää 6-7 cm tarkkuudella.

Ahokas ym. (2003) vertailivat korkeusmallin tarkkuutta erilaisissa olosuhteissa käyttäen TopEye:n ja TopoSys-1:n aineistoja. Yksittäisten linjojen välillä oli kohtuullisen suuri systemaattinen ero (jopa 20 cm). Linjan eri reunoissa oli tyypillisesti noin 10 cm

systemaattinen ero. Sen sijaan mittauskulman ei havaittu tässä tutkimuksessa suurentavan satunnaisvirhettä.

Yu ym. (2003b) tutkivat korkeusmallin tarkkuutta puustoisilla alueilla. He havaitsivat mittauskulman vaikuttavan merkittävästi korkeusmalliin yli 5 asteen kulmilla. Samaten kuusikot heikensivät korkeusmallia enemmän kuin muut puulajit. Alle 20 asteen kaltevuudet eivät sanottavasti heikentäneet korkeusmallia.

Matikainen ym. (2003) esittivät automaattisen konseptin karttojen ajantasaistamiseksi 2D:stä 3D:een sekä automaattiseksi muutosten havaitsemiseksi kartan ja laserpistepilven välille.

Hyyppä ja Hyyppä (2003) tutkivat samanaikaisesti laserkeilauksen kanssa helikopterista kuvatun ja muodostetun ortomosaiikin tarkkuutta RTK-mittauksiin. XY-tason suuntainen ero/tarkkuus oli keskimäärin 6 cm.

Hyyppä ja Hyyppä (2000) vertailivat laseraineistolla saatuja rakennuksen korkeuksia, pinta-aloja ja tilavuuksia fotogrammetrisesti saatuihin vastaaviin arvoihin. Rakennuksien katon muodolla oli selvä vaikutus tuloksiin. Tasa- ja viistokattoisten rakennusten tarkkuudet olivat huomattavasti parempia kuin harja- ja aumakattoisten talojen vastaavat arvot. Myös rakennuksen katon jyrkkyys vaikutti merkittävästi korkeuden poikkeamaan. Rakennuksien korkeusvirheet johtuivat usein rakenteita ympäröivän maanpinnan kallistuksista, luiskista, portaista, ja muista rakenteista.

Puustoisilla alueilla yksittäisten puiden pituus voidaan määrittää n. 50-100 cm satunnaisvirheellä pulssitiheydestä riippuen, koealakohtainen kasvu voidaan määrittää n. 10 cm tarkkuudella ja puustotunnukset (tilavuus, keskipituus, pohjapinta-ala) voidaan määrittää 10 % tarkkuudella kuviotasolla. Kaatuneet tai kaadetut puut voidaan tunnistaa automaattisesti. Kaikki varttuneet kaadetut puut löydetään, mutta automaattiset algoritmit voivat tunnistaa niiden lukumäärän vain 75 % oikein (Yu ym. 2003a).

Rönholm ym. (2003) ovat tarkastelleet eroja maastokoordinaatiston ja laserdatan koordinaatiston välillä. Interaktiivisella orientointimenetelmällä ja lähifotogrammetrisellä kuvausjärjestelyllä (ottamalla kuvat läheltä kohdetta) voitiin tutkia, mistä laserkeilauspisteet todella muodostuivat.

5 Laserkeilauksen laadun tulevaisuus

Geodeettisella laitoksella on yhdessä TKK:n, Terrasolid Oy:n ja ICC:n (Institut Cartogrâphic de Catalunya) kanssa eurooppalainen Eureka-projekti laserkeilauksen laadusta kaupunkialueilla. Projekti kestää vuoden 2004 loppuun asti. Projektissa analysoidaan laserkeilauksen laadun osatekijät ja kehitetään laadulle malli, jonka avulla voidaan ennustaa halutun mittauksen laatu. Projektin aikana osapuolet myös kirjoittavat laserkeilauksen laadusta käsikirjan.

Kirjallisuutta

Ahokas, E., H. Hyyppä, J. Hyyppä ja H. Kaartinen (2002). Analysing the effects related to the accuracy of laser scanning for digital elevation and target Models. 22nd EARSel Symposium & General Assembly, June 4 - 6, 2002, Prague, Czech Republic, 4 p.

Ahokas, E., H. Kaartinen, L. Matikainen, J. Hyyppä ja H. Hyyppä (2001). Accuracy of high-pulse-rate laser scanners for digital target models, Proceedings of Earsel, 14-16 May 2001, Paris, 4 p.

Cramer, M. (1999). Direct Geocoding – is aerial triangulation obsolete? 47th Photogrammetric Week, Stuttgart, pp. 59-69.

Hyyppä H. ja J. Hyyppä (2000). Quality of 3-D Infrastructural models using airborne laserscanner data, Submitted to The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 17. No. 1. pp. 43-53.

Hyypä J. ja H. Hyypä (2003). Laser Scanning research in Finland. Quality of laser scanning. Laserskanning och digitala bilder - idag och imorgon - mark, hus, ledningar, träd och annan vegetation i 3D. Stockholm 23.1.2003.

Hyypä, J., H. Hyypä, M. Maltamo, X. Yu, E. Ahokas, U. Pyysalo (2003) Laser scanning of forest resources, some of the Finnish experience. ScandLaser 2003, Umeå, Sweden, September 2-4, 2003. 8 p.

Hyypä, J., M. Schardt, H. Haggrén, B. Koch, Ú. Lohr, H.U. Scherrer, R. Paananen, H. Luukkonen, M. Ziegler, H. Hyypä, U. Pyysalo, H. Friedländer, J. Uuttera, S. Wagner, M. Inkinen, A. Wimmer, A. Kukko, E. Ahokas ja M. Karjalainen (2001), HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. The Photogrammetric Journal of Finland, 17.No. 2. pp. 58-68.

Hyypä, J., X. Yu, P. Rönnholm, H. Kaartinen ja H. Hyypä (2003). Factors affecting object-oriented forest growth estimates obtained using laser scanning. The Photogrammetric Journal of Finland, 15 p.

Matikainen, L., J. Hyypä ja H. Hyypä (2003). Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating. ISPRS Commission III. Workshop 3-d reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data. 8 p.

Pyysalo, U., 2000. Metsäalueen korkeusmallin muodostaminen laserkeilaimella mitatusta kolmiulotteisesta pistejoukosta. Diplomityö. TKK. Maanmittausosasto. 70 s.

Pyysalo, U. ja H. Hyypä (2002). Geometric shape of the tree extracted from laser scanning data. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS Commission III Symposium (PCV'02). September 9-13, 2002. Graz. Austria.

Rönnholm, P., H. Hyypä, P. Pöntinen, H. Haggrén ja J. Hyypä (2003), Interactive Orientation of Digital Images, the Photogrammetric Journal of Finland, Vol 18, No. 2.

Rönnholm, P., H. Hyypä, P. Pöntinen ja H. Haggrén (2003). Interactive relative orientation between terrestrial images and airborne laser scanning data. ISPRS Commission III. Workshop 3-d reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data. 6 p.

Yu, X., J. Hyypä, H. Kaartinen, M. Maltamo, P. Rönnholm ja H. Hyypä (2003a). Automatic Determination of Forest Growth and Detection of Individual Cut and Fallen Trees using Laser Scanning. ScandLaser 2003, workshop about laser scanning of forests, Umeå, Sweden, September 2-4, 2003.

Yu, X., J. Hyypä, H. Kaartinen (2003b). Evaluation of laser-derived DEM in forested areas, käsikirjoitus.