

Maa-57.290 Fotogrammetrian erikoistyö

**Laserkeilaimen valinta
lähifotogrammetrisiin
mittaustehtäviin**

Lokakuu 2005

Antero Kukko

Sisällys

1. Johdanto	4
2. Laserkeilaimet lähifotogrammetrisissa mittauksissa	6
2.1 Lasermittaus	6
2.1.1 Yleistä	6
2.1.2 Pulssilaser	6
2.1.3 Jatkuva-aaltainen laser	7
2.2 Laserkeilaimien käyttökohteet	8
2.3 Käytännön toimintaan vaikuttavat tekijät	9
3. Laserkeilaimen valintakriteerit	11
3.1 Laserin ominaisuudet	11
3.1.1 Kulmaerotuskyky ja kulmatarkkuus	11
3.1.2 Mittaustarkkuus	12
3.1.3 Säteen hajoamiskulma l. divergenssi	13
3.1.4 Mittausetäisyys	13
3.1.5 Toistotaajuus	14
3.1.6 Keilauskulma	14
3.1.7 Profiilimittaus ja keilaustaajuus	15
3.2 Toimintavarmuus	15
3.2.1 Huolto ja takuu	15
3.2.2 Säänkestävyys	16
3.2.3 Käytettävyys ja päivitettävyys	16
4. Vertailuun valitut keilaimet ja niiden arviointi	17
4.1 Riegl LSM-Z420i	18
4.2 FARO880HE80	18
4.3 Optech Iris-36D	19

4.4 Leica HDS4500	20
5. Johtopäätökset	21
6. Lähteet	22

1. Johdanto

Lasermittaus on tullut osaksi fotogrammetrisen tutkimuksen ja soveltavan mittausteollisuuden työkenttää. Lasermittaus perustuu aktiiviseen laserpumpulla tuotettuun, kollimoituun jatkuvaan lasersäteeseen tai lyhyeen laserpulssiin. Jatkuvaaltoisessa mittaustavassa lasersäteeseen moduloidaan yksi tai useampia eripituisia kantoaaltoja ja etäisyydenmittaus perustuu lähetetyn ja vastaanotetun singnaalin vaiheeroon. Pulssilaserissa etäisyysmittaus perustuu lähetetyn pulssin edestakaiseen kulku-aikaan laserin ja kohteen välillä. Vaihe-erolaserit ovat tyypillisesti aikaerolasereita nopeampia, mutta kantama on lyhyempi.

Aktiivisen mittaustapansa vuoksi laserkeilaus oikoo monia fotogrammetrian keinoin suoritettujen mittausten mutkia. Kohteesta saadaan suoraan runsaasti kolmiulotteisia havaintoja ilman työläitä välivaiheita ja kuvatulkitkaa. Laserkeilaus ei kuitenkaan kokonaan syrjäyttäne kuvamittauksiin perustuvaa lähestymistapaa, mutta resoluution parantuessa laserkeilaus vähitellen kaventaa kuvamittauksen etumatkaa. Kuvan ja lasermittauksen yhdistäminen onkin tällä hetkellä mielenkiintoinen ja varteenotettava mittaustapa.

Laserkeilausta voidaan soveltaa kaikessa tiedonkeruussa, jossa tavoitteena on kolmiulotteisen tiedon hankinta ja käsittely. Aktiivisen mittaustapansa vuoksi se usein soveltuu sellaisiinkin mittaustehtäviin, missä kuvamittaus ei onnistu tai on hankalaa, kuten esimerkiksi laajoilla tekstuurittomilla pinnoilla. Nykyisellään laserin erotuskyky asettaa kuitenkin rajat kohteen yksityiskohtaisuuden toistolle. Sovellusalueet vaihtelevat arkeologisten kaivausten dokumentoinnista pienten kappaleiden ja suurienkin rakenteiden mittaamisen kautta aina maaston muotojen mittaamiseen. Keilaimien teknisten käyttöominaisuuksien kehittyessä sovelluksiakin tulee koko ajan lisää.

Geodeettisessa laitoksessa laserkeilainaineistoja on käytetty jo useita vuosia maastomallien tuotannossa ja muissa kartoitussovelluksissa (Ahokas ym., 2004; Ahokas ym., 2002; Ahokas ym., 2001; Hyyppä & Hyyppä, 2000; Matikainen ym., 2004; Oksanen & Sarjakoski, 2004) sekä metsäntutkimuksessa (Yu ym., 2004; Hyyppä ym., 2004). Käytännössä tutkimus on keskittynyt lentokäyttöisten laserkeilaimien tuottamiin aineistoihin, mikä on usein kallista ja saatavuus hidasta. Terrestriaalisen laserkeilaimen avulla pyritään osittaiseen omavaraisuuteen datahankinnan suhteen ja toistaalta laajentamaan tutkimuskenttää.

Tämän erikoistyön tarkoituksena oli selvittää mittaus- ja kartoitustehtäviin soveltuvat markkinoilla olevat terrestriaaliset laserkeilaimet sekä niiden soveltuvuus annettuihin mittaustehtäviin. Arviontia varten luotiin pisteytysjärjestelmä, joka perustuu keilaimen teknisiin ominaisuuksiin. Lisäksi arvioitiin keilaimien yleistä käytettävyyttä suunnitelluissa mittaustehtävissä. Laserkeilaimien hintatiedot ja -vertailu rajattiin työn ulkopuolelle.

Lasertekniikan räjähdysmäinen kehitys ja hyödyntäminen tarjoaa suuria haasteita ja mahdollisuuksia tieteen ja mittauksiin perustuvilla teollisuuden aloilla. Laserkeilauksen haasteita tulevaisuudessa ovat suuren tietomäärän käsittely ja saattaminen järkevään muotoon. Tämä tarjoaa laajan tutkimuskentän laserkeilauksen menetelmien kehittämiseen.

2. Laserkeilaimet lähifotogrammetrisissa mittauksissa

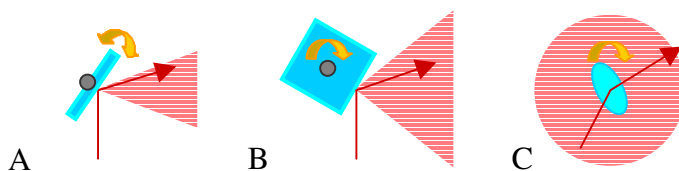
2.1 Lasermittaus

2.1.1 Yleistä

Laserkeilaimet voidaan jakaa etäisyysmittausyksikön toimintaperiaatteen perusteella kahteen päätyyppiin, aikaero- ja vaihe-erolasereihin. Nämä kaksi mittaustapaa on esitetty yksityiskohtaisemmin kappaleissa 2.1.2 ja 2.1.3.

Keilaimen toimintatapaa luonnehtii myös peilijärjestelmän toteutus. Peilijärjestelmä tuottaa yleensä keilaimen vertikaalin keilauskulman ja mittaus tapahtuu peilijärjestelmän suuntaaman säteen avulla. Peilijärjestelmä voi olla oskilloiva tai ympäripyörivä. Oskilloiva peili tuottaa kapean keilauskulman, mikä on usein riittävä pienten kohteiden tarkkaan mittaamiseen. (Riegl, 2005; FARO, 2005; Leica, 2005; Optech, 2005).

Pyörivä peilijärjestelmä voidaan pääpiirteissään toteuttaa kahdella tavalla; polygonipeilillä tai vinopeilillä. Polygonipeili pyörii akselinsa ympäri ja se koostuu yleensä kolmesta tai useammasta peilipinnasta. Lasersäde on tyypillisesti kohtisuorassa pyörimisakselia vasten. Polygonipeili rajoittaa keilaimen keilauskulman tyypillisesti alle 90°. Pyörivä vinopeili on asennettu pyörimisakselinsa suhteen 45° kulmassa ja laser on suunnattu siihen pyörimisakselin suunnassa. Tällä ratkaisulla saavutetaan periaatteessa 360° keilauskulma, mutta laitteen runko asettaa kuitenkin usein rajoituksia. Eri peilijärjestelmät on kuvattu kuvassa 1. Huomaa, että kuvassa 1C lasersäde tulee pyörimisakselin suunnasta.



Kuva 1. Peilijärjestelmien päätyypit. A: Oskilloiva, B: Polygoni, C: Vinopeili.

2.1.2 Pulssilaser

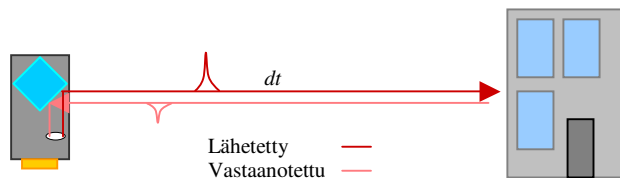
Pulssi- eli aikaerolaserit toimivat lähettämällä laserdiodin tuottaman energiapulssin kahden suuntakulman määrittämään suuntaan avaruudessa. Pulssin edestakainen

kulku-aika laserista kohteeseen mitataan. Aikaeron perusteella johdetaan etäisyysmittaus-tulos, jonka tarkkuus riippuu siten keilaimen ajanmäärityksen tarkkuudesta, kohteen ja pulssin ominaisuuksien lisäksi:

$$r = \frac{dt \cdot c}{2}, \quad (1)$$

missä r on mitattu etäisyys, dt mitattu pulssin kulku-aika ja c valon nopeus. (Höglund & Large, 2005; Bohler & Marbs, 2002).

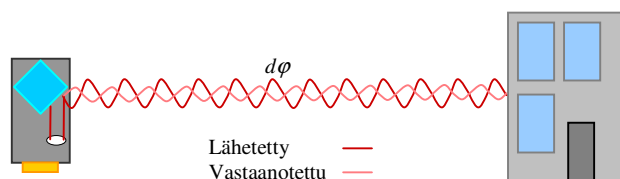
Lähtämällä pulsseja eri suuntiin saadaan muodostettua kolmiulotteinen näkemä ympäristöstä. Pulssilasereilla voidaan mitata etäisyyksiä suurella vaihteluvälillä – muutamasta metristä yli kilometriin – mutta yleensä pienellä, muutaman tuhannen havainnon toistotaajuudella.



Kuva 2. Pulssilaserin toimintaperiaate.

2.1.3 Jatkuva-aaltainen laser

Vaihe-erolaser, toisin kuin pulssilaser, lähettää jatkuvaa signaalia, jonka intensiteetti on moduloitu siniaallolla tai jollain monimuotoisemmalla aaltomuodolla, jossa on useampia eri kanta-aallonpituuksia. Kuten aikaerolaserin tapauksessakin, signaali heijastuu kohteesta ja lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen vaihe-ero mitataan. Useamman aallonpituuden moduloinnilla saadaan kanta-aallon kokonaislukutuntematon luotettavasti ratkaistua. Etäisyshavainto saadaan vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla. (Höglund & Large, 2005; Bohler & Marbs, 2002).



Kuva 3. Jatkuva-aaltoisen laserin toimintaperiaate.

Kolmiulotteinen näkemä muodostetaan samalla tavoin kun pulssilaserillakin. Pulssilaseriin verrattuna vaihe-erolaserien toistotaajuus on huomattavasti suurempi, tyypillisesti päästään jopa 250 kHz taajuuksiin, ja etäisyysresoluutio on parempi. Suurin mittausetäisyys on kuitenkin pääsääntöisesti rajoittunut alle 100 metriin.

2.2 Laserkeilaimien käyttökohteet

Laserkeilaimien käyttö on yleistynyt nopeasti mitä erilaisimmissa käyttökohteissa. Sovellusalueet vaihtelevat arkeologisten kaivausten dokumentoinnista (Marbs, 2002; Böhler & Marbs, 2002; Bur ym. 2003) kappaleiden ja rakenteiden mittaamisen (Schulz & Ingensand, 2004; Wunderlich, 2003; Vögtle & Steinle, 2000) kautta aina maaston muotojen mittaamiseen (Axelsson, 1999; Hyypä ym., 2000).

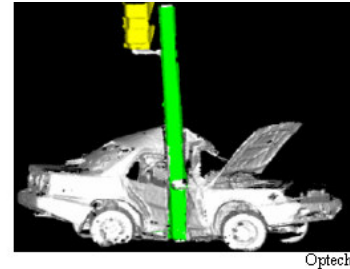
Taulukko 1. Esimerkkejä terrestriaalikeilaimen käyttökohteista ja niiden asettamista vaatimuksista.

Terrestriaalikeilaimen sovellukset ja laitteistovaatimukset					
Sovellus	Prioriteetti	Asennustapa	Data	Liikkuva käyttö	Muuta
Rakenne-elementtien laatu	15%	Erillinen alusta, sisä- ja ulkokäyttö	Erittäin suuri pistetarkkuus mm, etäisyys 2-50 m, erittäin suuri pistetiheys, pisteväli mm	Ei/Kyllä	Nopea keilaus, Profiilimittaus elementtituotannon mittauksessa (kohde liikkuu)
Lentokeilausten referenssimittaukset	15%	Erillinen alusta, ulkokäyttö	Erittäin suuri pistetarkkuus (mm), etäisyys 2-50 m, pisteväli cm	Ei	Aaltomuotodata tuottaisi parhaan tuloksen, ensimmäinen ja viimeinen kaiku riittävät
3D-liikenne	15%	Sivulle keilaava järjestelmä, ulkokäyttö	Kohtuullinen pistetarkkuus, etäisyys 3-100 m, kohtuullinen toistotaajuus, pistetiheys dm	Kyllä	Profiilimittaus, Leveä keilauskulma
Teiden pintamallit	10%	Taakse keilaava järjestelmä, ulkokäyttö	Erittäin suuri pistetarkkuus mm, etäisyys 2-30 m, kohtuullinen pistetiheys, pisteväli ajosuunnassa dm, poikkisuunnassa mm	Kyllä	Profiilimittaus, Leveä-laaja keilauskulma
3D-metsät	10%	Koko taivaanpallo, erillinen alusta, ulkokäyttö	Kohtuullinen pistetarkkuus, etäisyys 3-50 m, suuri pistetiheys, pisteväli mm	Ei	Referenssituki lentokeilauksille, Nopea keilaus
3D-rakennukset	20%	Sivulle keilaava järjestelmä, ulkokäyttö	Kohtuullinen pistetarkkuus, etäisyys 3-100 m, kohtuullinen-suuri toistotaajuus, pisteväli 2-20 cm	Kyllä	Yksityiskohdat tarvittaessa tarkemmin

Sovellus = Suunitellun käytön kuvaus.
 Prioriteetti= Oletettu laitteiston käyttöprosentti.
 Asennustapa = Kuinka keilain asennetaan kussakin sovelluksessa (esim. taakse keilaava, 360° pyörivä).
 Data = pistetarkkuus, mittausetäisyys (3-50 m, 3-100 m, 3-500 m), toistotaajuus (haluttu pistetiheysluokka, mm, cm, dm).
 Liikkuva käyttö = Kyllä, jos käytetään liikkuvalla alustalla (auto, mönkijä, muu). Ei, jos paikallaan mittaminen riittää.

Keilaimien teknisten käyttöominaisuuksien kehittyessä sovelluksiakin tulee koko ajan lisää. Taulukossa 1 on esitetty ne Geodeettisen laitoksen tarpeita vastaavat sovellusalueet, joihin tässä erikoistyössä kuvattu terrestriaalisen keilaimen hankinta perustuu.

Terrestriaalisia laserkeilaimia voidaan käyttää parhaiten suuren kolmiuloitteisen pistejoukon tuottamiseen. Yhtenäisen pistejoukon mittaukset voidaan suorittaa laajoillekin kohteille keilauksia yhteen rekisteröimällä. Integroiduilla kamerajärjestelmillä voidaan mitatuille pisteille tuottaa myös väri-informaatio, jolloin pisteiden tulkinta kohteen mallinnusvaiheessa helpottuu ja kohdemalleista saadaan todentuntuisia. Kuvainformaatiota voidaan hyödyntää viivamaisten kohteiden mittaamisessa laseraineiston tukemalla yksikuvamittauksella. Tämä menetelmä on tarpeen varsinkin silloin, kun laserkeilaimen kulmaresoluutio on riittämätön.



Kuva 4. Esimerkkejä terrestriaalisten laserkeilaimien käyttökohteista.

2.3 Käytännön toimintaan vaikuttavat tekijät

Laserkeilaimen tekniset ominaisuuden määrittävät, mihin sovelluksiin se soveltuu. Soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi mittausetäisyyden, kulmaresoluution, lasersäteen divergenssin ja keilauskulman perusteella.

Pitkää mittausetäisyyttä tarvitaan usein maaston kartoitustehtävissä. Tällöin vaatimuksena on usean sadan metrin kantama. Lyhyemmällä etäisyyksillä pärjätään yksittäisten rakennusten ja kaupunkimaisten kohteiden mittaamisessa. Rakennuselementtien ja -osien yksityiskohtaisessa mittaamisessa tarvitaan vain hyvin lyhyttä, metriluokan kantamaa. Tällöin etäisyyden- ja kulmaresoluution merkitys kuitenkin korostuu.

Kulmaresoluutio määrää keilaimen kyvyn toistaa kohteen yksityiskohtia. Mitä pienempi laitteen keilauskulman jako on, sitä pienempiä kohteita voidaan erottaa.

Kohteiden erottumiseen vaikuttaa myös mittaussäteen energian hajoaminen nimellisen mittaussuunnan ympärille.

Keilauskulma vaikuttaa mittausprosessin läpivientiaikaan merkittäväällä tavalla. Kapealla näkemällä varustetulla keilaimella mittaaminen lisää työmäärää keilaimen siirtelyn ja kääntelyn vuoksi. Liikkuvassa kartoituksessa yhdelle puolelle näkevä järjestelmä lisää ajokertoja kadun kummankin puolen kartoittamiseksi vähintään kaksinkertaiseksi. Katualueen yläpuolisten rakenteiden, kuten siltojen, mittaaminen vaatii lisäajokertoja ja -keilauksia.

3. Laserkeilaimen valintakriteerit

Tässä luvussa esitetään laserkeilaimien vertailuun valitut arviontikriteerit ja niiden pisteytys. Pisteytystä käytettiin vertailtavien keilaimien saattamisessa paremmuusjärjestykseen suunniteltujen käyttökohteiden asettamien toiminnallisten laitteistovaatimusten pohjalta. Keilaimen lopullinen pistemäärä saatiin laskemalla yhteen vertailtavien ominaisuuksien osapisteet ilman painokertoimia.

Keilausgeometriaan kohdistuvat arviontikriteerit asetettiin siten, että 30 metrin etäisyydellä olevan mitatun pisteen paikkaepävarmuus oli alle 5 millimetriä. Paikkaepävarmuuteen vaikuttavat etäisyysmittauksen ja kulmanmäärityksen epätarkkuudet sekä säteen hajoamiskulma. Keilaimen 1) kulmaresoluutio arvioitiin sekä pysty- että vaakasuunnissa. Lisäksi arvioitiin 2) kulmanmäärityksen tarkkuus, 3) etäisyysmittauksen epätarkkuus ja 4) säteen hajoamiskulma. Yleisistä käyttöominaisuuksista huomioitiin keilaimen 5) kantama, 6) mittausten toistotaajuus sekä 7) keilauskulman suuruus, eli näkemä. 8) Profiilimittauskyky ja keilaustaajuus kirjattiin arviointitaulukkoon, mutta niitä ei pisteytetty. Profiilimittaus katsottiin kuitenkin niin tärkeäksi, että sen puuttuminen oli valinnassa karsiva tekijä.

Laserkeilaimen tuottaman mittausaineiston tärkein ominaisuus on sen yksityiskohtaisuus ja yksityiskohtien tarkkuus – tästä syystä kulmaresoluutio ja mittaustarkkuus pisteytettiin muista arviontikriteereistä poiketen pistein 1-3-5, millä pyrittiin korostamaan näiden ominaisuuksien vaikutusta keilaimen kokonaisarvioinnissa.

Keilaimien toimintavarmuutta arvioitiin käytettävyyden, säänkestävyyden ja takuun sekä ylläpitohuollon osalta. Näitä ei kuitenkaan pisteytetty vaan ne huomioitiin +/- -periaatteella lopullista keilainvalintaa tehtäessä.

3.1 Laserin ominaisuudet

3.1.1 Kulmaerotuskyky ja kulmatarkkuus

Kulmaresoluutio määrittää kahden vierekkäisen lasersäteen välisen kulmaerotuksen. Kulmaresoluutio voi olla erisuuruinen pysty- ja vaakasuunnissa. Kulmaresoluution tuottama erotuskyky määrää, kuinka yksityiskohtaisia havaintoja kohteen pinnasta saadaan. Keilaimen kykyyn toistaa kohdepinnan yksityiskohtaisuus vaikuttaa kulmaresoluution lisäksi mittaussäteen divergenssi, etäisyyden mittaustarkkuus sekä

kohteen etäisyys. Useimmissa keilaimissa kulmaresoluutio voidaan valita mittaustehtävän mukaan.

Kulmaresoluution raja-arvot määritettiin 30 metrin etäisyydellä olevan 5 millimetrin kokoisen kohteen avulla. Tällöin kulmaresoluution tulee olla noin 0.01 astetta. Tätä huonommalla kulmaresoluutiolla selvittää vain karkeissa mittaustöissä. Hienon mittaustarkkuuden sovelluksissa kulmaresoluution tulee olla vähintään 0.005 astetta, jolloin 30 metrin etäisyydeltä havaitaan noin 2.5 millimetrin kokoisia kohteita. Kulmaerotuskyvyn pisterajat on luetteloitu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Kulmaerotuskyvyn pisteytys.

Erotuskykyluokka	Kulmaresoluutio	Pisteytys
Karkea	$> 0.01^\circ$	1
Keskikarkea	$0.005-0.01^\circ$	3
Hieno	$< 0.005^\circ$	5

Kulmatarkkuus ilmoittaa lasersäteen suunnanmäärityksen tarkkuuden. Kulmatarkkuus vaikuttaa etäisyysvirheen ohella mitatun pisteen sijaintivirheeseen. Yleisesti näyttää siltä, että keilaimien kulmatarkkuus on noin kaksinkertainen kulmaresoluutioon verrattuna, joskin poikkeuksiakin on. Tällöin kuitenkin kulmaresoluutio on yleensä muutoin alhaisempi. Tästä syystä kulmatarkkuuden arviointirajat valittiin samoin kuin kulmaresoluution rajat.

Taulukko 3. Kulmatarkkuuden pisteytys.

Tarkkuusluokka	Kulmatarkkuus	Pisteytys
Karkea	$> 0.01^\circ$	1
Keskikarkea	$0.005-0.01^\circ$	2
Hieno	$< 0.005^\circ$	3

3.1.2 Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuudella tarkoitetaan laserin etäisyysmittauksen tarkkuutta, toisin sanoen yhden etäisyyshavainnon mittaustarkkuutta. Yksittäisen havainnon etäisyysmittauksen tarkkuus määrää, kuinka luotettavasti mitattavan kohteen pinnan pienet vaihtelut saadaan mitattua ja myöhemmin mallinnettua.

Myös useamman pisteen avulla määritettyjä pintojen ja kohteiden suhteellista etäisyystarkkuutta voidaan mitata. Tällä ei kuitenkaan ole suurta merkitystä pienten ja

monimuotoisten kohteiden mittauksessa, vaan yksittäisen havainnon tarkkuus nousee merkittäväksi. Karkean tarkkuuden mittaussovelluksissa riittää noin senttimetrin tarkkuus, hienomittauksessa etäisyystarkkuusvaatimus on alle 3 millimetriä. Etäisyystarkkuuden arviontirajat ja pisteytys on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Mittaustarkkuuden pisteytys.

Etäisyysresoluutio	Mittaustarkkuus	Pisteytys
Karkea	> 8 mm	1
Keskikarkea	3-8 mm	3
Hieno	< 3 mm	5

3.1.3 Säteen hajoamiskulma l. divergenssi

Säteen hajoamiskulmalla tarkoitetaan sitä avaruuskulmaa, jonka sisällä laserin tuottama energia etenee ja vaimenee määriteltyyn murto-osaan huippuintensiteetistä. Tyypillisesti mitta ilmoitetaan $1/e^2$ lukemana, mikä tarkoittaa säteen energian vaimenemista $1/e^2$ -osaan (0.135) sen huippuenergiasta. (NTM, 2005. Termit beam diameter ja beam divergence).

Energian leviäminen vaikuttaa mittaustarkkuuteen, sillä mitä leveämpi säteen avaruuskulma on, sitä kauempaa säteen keskikohdasta kaijuja rekisteröidään. Koska lasermittauksen luonteeseen kuuluu, että kaiut rekisteröidään säteen nimelliskulman suuntaan, aiheuttaa tämä mittausepävarmuutta varsinkin silloin, kun säteen suunnassa on voimakasta etäisyysvaihtelua. Mittausetäisyyden kasvattaminen lisää vaikutusta, sillä säteen kohtauspinta-ala kasvaa ja tällöin pinnan muotovaihtelut yleensä lisääntyvät. Säteen hajoamiskulman arviontirajat ja niitä vastaava pisteytys on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Hajoamiskulman pisteytys.

Säteen leveys	Hajoamiskulma	Pisteytys
Leveä	> 1 mrad	1
Keskikapea	0.25-1 mrad	2
Kapea	< 0.25 mrad	3

3.1.4 Mittausetäisyys

Lasermittalaitteella on sen lähetystehoon ja mittaustapaan perustuva nimellismittausetäisyys. Pulssilasereissa mittausetäisyyteen vaikuttavat lähetetyn pulssin teho ja toistotaajuuden määräämä enimmäiskulku-aika. Tyypillisesti

pulssilasereiden mittausetäisyydet ovat satoja metrejä. Vaihe-erolaserissa mittausetäisyyteen vaikuttaa lähetystehon lisäksi määrävänä tekijänä kantaallon modulaatio. Vaihe-erolasereiden suurin mittausetäisyys on tavallisesti joitakin kymmeniä metrejä. Kantaman pistetyt ja kantamaluokat on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Mittausetäisyyden pisteytys.

Kantama	Mittausetäisyys	Pisteytys
Lyhyt	< 30 m	1
Keskipitkä	30-100 m	2
Pitkä	> 100 m	3

3.1.5 Toistotaajuus

Toistotaajuudella tarkoitetaan laserin vaihe-ero- tai pulssilaserin mittauhavaintojen määrää sekunnissa. Tyypillisesti pulssilaserilla toistotaajuus on merkittävästi alempi kuin vaihe-eroon perustuvassa mittauavassa. Suurella toistotaajuudella toimivan keilaimen mittaukseen käyttämä aika on merkittävästi pienempi kuin vastaavalla kulmaresoluutiolla mittauavan pienellä toistotaajuudella toimivan laitteen. Toistotaajuuden raja-arvot ja pisteytys on esitetty oheisessa taulukossa 7.

Taulukko 7. Toistotaajuuden pisteytys.

Mittausnopeus	Toistotaajuus	Pisteytys
Hidas	< 30 kHz	1
Keskinopea	30-100 kHz	2
Nopea	> 100 kHz	3

3.1.6 Keilauskulma

Mittauskulma määrittää keilaimen näkemän, eli tasokulman, jonka lasersäteet muodostavat laitteen toimiessa. Keilauskulman leveys riippuu pitkälti laitteen toteutustavasta. Tyypillisesti pyörivään polygonipeiliin tai edestakaisin heilahtelevaan peiliin perustuvat keilaimet tuottavat kapean keilauskulman. Pyörivään vinopeiliin perustuvat keilaimet tuottavat usein yli 300 asteen keilauskulman.

Mittauskulmalla on merkitystä käytännön työssä, sillä kapealla keilauskulmalla joudutaan suuresta kohteesta ottamaan useampia keilauksia kokonaiskuvan saamiseksi. Toisaalta kapea kulma voi tuottaa suuremman keilaustaajuuden, jolla on merkitystä liikkuvan kohteen mittauksessa tai liikkessä mitatessa. Toisaalta laaja kuvakulma

vähentää merkittävästi edestakaisia ajokertoja, jolloin varsinkin hankalissa ja vilkasliikenteisissä paikoissa tuotetaan mahdollisimman vähän haittaa muulle liikenteelle. Keilauskulman pisteytys arviointirajoineen on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Keilauskulman pisteytys.

Näkemä	Keilauskulma	Pisteytys
Kapea	< 90°	1
Leveä	90-180°	2
Laaja	> 180°	3

3.1.7 Profiilimittaus ja keilaustaajuus

Profiilimittauksella tarkoitetaan keilaimen kykyä mitata 2D-profiilia. Tällöin useimmissa tapauksissa täytyy keilaimen horisontaaliliike kyetä pysäyttämään. Kolmas ulottuvuus tuotetaan esimerkiksi liikkuvan alustan avulla tai kohteen liikkeellä. Profiilimittauksessa leveä tai laaja näkemä ovat eduksi.

Keilaustaaajuudella tarkoitetaan laserkeilaimen mittaaman kaksiulotteisen viuhkan tai keilan toistotaajuutta eli yhtä pyyhkäisyä keilauskulman yli. Keilaustaaajuudella on eniten merkitystä silloin, kun mitataan liikkuvaa kohdetta tai liikkeessä ollessa. Usein keilaustaaajuuden nosto kuitenkin huonontaa kulmaerotuskykyä. Kelvollisena tavoitetasona voidaan pitää 40 km/h ajonopeudella liikuttaessa 50-100 herzin keilaustaaajuutta, jolloin päästään 11-22 senttimetrin pisteväliin kulkusuunnassa. Resoluutiota voidaan luonnollisesti parantaa ajonopeutta hidastamalla. Profiilimittauskykyä pidettiin keilainvalinnassa karsivana ominaisuutena.

Taulukko 9. Keilaustaaajuuden pisteytys.

Keilausnopeus	Keilaustaaajuus	Pisteytys
Hidas	< 50 Hz	1
Keskinopea	50-100 Hz	2
Nopea	> 100 Hz	3

3.2 Toimintavarmuus

3.2.1 Huolto ja takuu

Laserkeilain on huipputekninen laite, jonka käyttö vaatii huolellisuutta. Mahdolliset viat etäisyysmittausyksikössä, peilijärjestelmässä tai muualla vaikuttavat välittömästi

mittaustarkkuuteen. Lisäksi laitteiden likaantuminen huonontaa palaavaa signaalia vaikeuttaen siten mittaamista. Säännöllinen huolto ja kalibrointi on oleellista pitkän käyttöiän ja luotettavien mittaustulosten saavuttamiseksi. Varsinkin maastokäytössä puhdistus ja huolellinen käsittely korostuvat. Tässä yhteydessä verrattiin keilainvalmistajien laitteille myöntämää takuuta ja hankintahinnan sisältämää huoltosopimusta.

3.2.2 Säänkestävyys

Kaikki keilainvaihtoehdot ovat säänkestäviä. Optiikkaan tiivistyvä vesi ja sadepisarat vaikuttavat kuitenkin kaikkiin. Valmistajien suosittelemat käyttölämpötilat ovat kaikissa lämpöasteiden puolella. Tämä rajoittaa keilaimien vuosittaista käyttöaikaan lämpimiin kuukausiin- kenties työkausi voisi arviolta olla huhtikuusta lokakuuhun. Sisätilamittauksia voidaan suorittaa ympärivuotisesti.

3.2.3 Käytettävyys ja päivitettävyys

Laserkeilaimen fyysiseen käytettävyyteen vaikuttaa sen painon ja mitoituksen ohella virrankulutus tarvittavan työskentelyajan takaamiseksi. Toisaalta suuren keilauskulman avulla saadaan keilausmääriä pienemmäksi, jolloin mittaustyön suorittaminen nopeutuu.

Staattisessa keilauksessa työskentelyajan määrääväksi tekijäksi nousee kulmaresoluution ja toistotaajuuden tulo. Harvemmillä pistetiheydellä voidaan pienelläkin toistotaajuudella suorittaa nopeahkoja yleissilmäyskeilauksia. Suurella toistotaajuudella kuitenkin aikaa säästetään merkittävästi.

Liikkuvassa kartoituksessa käytettävyyteen vaikuttavat keilaimen rakenteen tukevuus ja soveltuvuus esimerkiksi laitteiston asennukseen ylösalaisin. Keilauskulman vaikutus on arvioitu pisteytyksellä erikseen, joten se vain mainitaan tässä.

Laserkeilaimen tyypillisesti korkean hankintahinnan vuoksi laitteen myöhempi päivitettävyys on hyvä huomioida hankintaprosessissa. Tällöin oleellista on, voidaanko tulevaisuudessa korvata jokin laitteen osa vastaamaan sen hetkisen kehityksen kärkeä, vai joudutaanko koko laite mahdollisesti uusimaan. Modulaarisia keilaimia ei ole tällä hetkellä markkinoilla kuin yksi, mutta tulevaisuudessa sellaisia voi olla jo useita.

4. Vertailuun valitut keilaimet ja niiden arviointi

Luvussa 2 esitettyjen käyttökohteiden asettamien laitteisto- ja datavaatimusten perusteella lähempään vertailuun valittiin neljä laserkeilainta; FARO880HE80 (aikaisemmin iQsun), Riegl LSM-Z420i, Leica HDS4500, sekä Optech ILRIS-36D. Näistä FARO880HE80 ja HDS4500 perustuvat vaihe-eromittaukseen, kun taas LSM-Z420i ja ILRIS-36D toimivat aikaeroperiaatteella. Vertailuun valitut keilaimet ovat nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5. Vertailtavat laserkeilaimet. A: Riegl LSM-Z420i, B: FARO880HE80, C: Optech ILRIS-36D ja D: Leica HDS4500.

Tarkasteluun valittujen keilaimien tärkeimmät tekniset ominaisuudet on koottu taulukkoon 9. Taulukossa esitetään myös kunkin ominaisuuden pisteytys luvussa 3 muodostetun pisteytysjärjestelmän perusteella. Pisteytyksessä ei käytetty painokertoimia, mutta erotuskykyyn vaikuttavat suureet kulmatarkkuus ja etäisyystarkkuus pisteytettiin siten, että niiden vaikutus on muita ominaisuuksia suurempi.

Laserkeilaimien painot ovat keskenään melko yhteneväiset: LSM-Z420i ja FARO880HE80 painavat 14 kg, HDS4500 16 kg ja Ilris-36D 21 kg. Tämän lisäksi on huomioitava tarvittavat akut ja oheislaitteet. FAROn keilain voi toimia itsenäisesti, mutta muut tarvitsevat tietokoneen keilaimen ohjaamiseen ja datan tallennukseen. Useimmissa tarkastelunkohteena olevissa keilaimissa takuu oli yksi vuosi. FAROn tarjous sisälsi kolmen vuoden takuun ja ylläpitohuollot.

Taulukko 10. Neljän laserkeilaimen ominaisuudet ja arviointipisteitys.

Keilain	LSM-Z420i		FARO880HE80		Iiris-36D		HDS4500/53	
Ominaisuus	Pisteet		Pisteet		Pisteet		Pisteet	
Toistotaajuus, kHz	12	1	120	3	2	1	500	3
Mittausetäisyys, m	800	3	80	2	1500	3	53	2
Hajoamiskulma, mrad	0.25	2	0.2	3	0.17	3	0.34	2
Etäisyystarkkuus, mm/et.	10.0	1	<3	5	7/100	3	> 3/25	3
Vaakakulmaresoluutio, °	0.01	1	0.00076	5	0.0015	5	0.01	1
Pystykulmaresoluutio, °	0.008	3	0.0011	5	0.0015	5	0.01	1
Kulmatarkkuus	0.002	3	0.007	2	0.0034	3	0.02	1
Pystykeilauskulma, °	80	1	320	3	360	2*	310	3
Muita ominaisuuksia								
Profiilimittauskyky	kyllä		kyllä		ei		kyllä	
Keilaustaajuus, Hz, max	20	1	3000	3	-	-	25-	1
Liikkuva kartoitus	kyllä		kyllä		ei		kyllä	
Huolto/takuu, a	1		3		1		1	
Pisteet yhteensä	16		31		25		17	

*Hetkellinen keilauskulma vain 40°.

4.1 Riegl LSM-Z420i

Riegl LSM-Z420i edustaa koeteltua tekniikkaa ja on laajalti levinneen tuotesarjan paras versio. Sen vertailussa saavuttamat pisteet, 16, olivat koko joukon pienimmät. Keilaimen hyviä ominaisuuksia ovat tukeva rakenne ja pitkä kantama. Pieni toistotaajuus, etäisyysmittauksen epätarkkuus ja kulmaerotuskyky ovat kuitenkin selvästi heikommät kuin parhaimmissa vertailuun osallistuneissa laitteissa. LSM-Z420i:n keilauskulma on myös kapea liikkuvan kartoituksen tarpeisiin, vaikka se siihen kohtuullisesti soveltuukin.

Keilaimeen on saatavissa kalibroitu digitaalikamerajärjestelmä väri-informaation tuottamiseen sekä sovellusohjelma kuvien käsittelyyn. Erikseen hankittavien lisävarusteiden määrä on kattava, mutta ne lisäävät hankintakustannuksia merkittävästi.

Riegl'n vahvuutena on suuren ja vakiintuneen organisaation tuomat edut tuotetuessa ja huollossa. Lisäksi monet mittaussovellukset on jo ratkaistu tuotekehityksen ja tutkimuksen keinoin, toisin sanoen Riegl'n toimitus olisi tarjolla olevista vaihtoehdoista fotogrammisesti parhaiten ratkaistu kokonaisuus.

4.2 FARO880HE80

FARO880HE80 edustaa uutta keilainsukupolvea, jossa yhdistyvät laaja kuvakulma sekä nopea mittaus. Vertailussa se keräsi eniten pisteitä, yhteensä 31. Sen huonoin ominaisuus, vaihe-eromittaukseen perustuvan mittaustapansa vuoksi, on noin 80 metrin

kantama. Keilain kuitenkin soveltuu vähintään kohtuullisesti kaikkiin suunniteltuihin mittaustehtäviin, sillä laajan keilauskulman avulla saavutetaan halkaisijaltaan 160 metrin näkemäalue laitteen ympärillä. Keilaimen parhaina ominaisuuksina voidaan pitää erittäin hyvää kulmaerotuskykyä ja etäisyysmittaustarkkuutta.

Keilaimen on saatavissa laajakulmainen kalibroitu digitaalikamerajärjestelmä väri-informaation tuottamiseen ja ohjelmisto sen käsittelyyn. Keilain kykenee myös profiilimittaukseen, ja laitteen asentaminen erilaisiin asentoihin on mahdollista. Nämä seikat puoltavat sen käyttöä liikkuvissa kartoitustehtävissä ja monipuolistavat muutoinkin käyttöä. Kallistussensori mahdollistaa mittaustiedon nopeamman käsittelyn, kun kukin keilaus voidaan automaattisesti tuottaa vaakatason suhteen oikaistuna.

FAROn modulaarisuus parantaa keilaimen haluttavuutta, koska laitteen mittausominaisuuksia voidaan kohtuullisin lisäkustannuksin muokata tarkoituksenmukaisiksi ja laitteen huollon järjestäminen helpottuu. Lisäksi modulaarisuus tarjoaa järkevän tavan laitteen uusimiseen ja mittaussovellusten monipuolistamiseen moduuleja päivittämällä. Tällöin parhaimmillaan vältytään kokonaan uuden laitteen hankinnalta, mikä säästää merkittävästi kustannuksia jatkossa. Esimerkiksi loppuvuoden 2005 aikana markkinoille on tulossa uusi pulssitekniikkaan perustuva etäisyysmittausyksikkö, jonka kantama ulottuu noin 200-250 metriin saakka.

4.3 Optech Iris-36D

Vertailussa toiseksi eniten pisteitä, 25, kerännyt Ilrid-36D edustaa tarkkaa teollisuusmittaustekniikkaa. Järjestelmän vahvuuksia ovat hyvä erotuskyky ja pitkä kantama. Sen etäisyysmittaustarkkuus ei kuitenkaan yllä tarkempien vaihe-erolaitteiden tasolle. Keilain on lisäksi rakenteensa ja toteutustapansa vuoksi hidas, eikä sovellu liikkuvan mittauksen tarpeisiin. Hetkellinen kuvakulmakin on kapea, vain 40°. 360° keilauskulma saavutetaan koko skanneria kääntelemällä. Tästä syystä sille ei keilauskulman arvionnissa annettu täyttä kolmea pistettä, vaikka keilauskulma olikin vertailujoukon suurin. Pieni toistotaajuus ja keilauskulman rajoitteet käytännössä pudottavatkin keilaimen hankinnan ulkopuolelle.

Keilaimen on integroitu kamerajärjestelmä väri-informaation tuottamiseen mittauspisteille. Mikäli profiilimittauskyky ja mittausnopeus eivät ole kriittisiä tekijöitä, Iris-36D on varteenotettava vaihtoehto sellaisiin teollisuus- ja kartoitusmittaustehtäviin, joissa erinomainen kulmaresoluutio ja pitkä kantama ovat tarpeen.

4.4 Leica HDS4500

HDS4500 on nopea lyhyen-keskikantaman laserkeilain. Sen vartailussa saavuttamat pisteet olivat yhteensä 17. Keilaimen vahvuuksia ovat suuri toistotaajuus ja laaja keilauskulma sekä hyvä mittaustarkkuus. Heikkouksia ovat huono kulmaresoluutio sekä joukon suurin säteen hajoamiskulma ja lyhin kantama. Keilain soveltuu profiilimittaukseen ja sitä on siinä tarkoituksessa muualla käytettykin. Keilainvalmistaja ei tarjoa laitteelle värioptiota, mikä rajoittaa sen käyttömahdollisuuksia fotogrammetrisissa tehtävissä.

5. Johtopäätökset

Arviointikriteerien ja yleisten käyttöominaisuuksiensa perusteella FARO880HE80 on sopivin laserkeilain suunniteltuihin mittaussovelluksiin ja tarpeisiin.

FARO tarjoaa eniten tieteellisiä mahdollisuuksia ja se edustaa laserkeilamien uutta sukupolvea tarkkuutensa ja nopeutensa perusteella.

Kolmen vuoden takuu ja huolto ovat merkittävä etu aktiivisesti maastokäytössä olevalle laitteelle.

Keilaimen on saatavissa kalibroitu digitaalikamerajärjestelmä väri-informaation tuottamiseen ja käsittelyyn.

Modulaarisuus parantaa keilaimen käytettävyyttä ja päivitettävyyttä jatkossa.

6. Lähteet

Ahokas, E., Kaartinen, H. ja J. Hyypä, 2004. A quality assessment of repeated airborne laser scanner observations. Proceedings of the XXth ISPRS Congress, July 2004, Istanbul, Turkey, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXV(B3/III):237-242.

Ahokas, E., Kaartinen, H., Matikainen, L., Hyypä, J. ja H. Hyypä, 2002. Accuracy of high-pulse-rate laser scanners for digital target models. In: Observing our environment from space. New solutions for a new millennium. Proceedings of the 21st EARSeL Symposium, Paris, 14-16 May, 2001. Balkema Publishers 2002, pp. 175-178.

Ahokas, E., 2001. Airborne Laser Scanning - a Height Accuracy Assessment. Finnish Journal of Surveying Sciences. 19(1-2):9-16.

Axelsson, P., 1999. Processing of laser scanner data—algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, pp. 138–147.

Bur, D., Perrin, J-P., Fuchs, A. ja V. Germonprez, 2003. Laser scanning as a tool for archeological reconstitution: A gallo-roman temple in naix-aux-forges, france. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX

Böhler, W. ja Marbs, A., 2002. 3D Scanning instruments. CIPA, Heritage Documentation, International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece.

FARO, 2005. www.faro.com. Luettu 4.10.2005.

Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J. ja M. Maltamo, 2004. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. International Conference NATSCAN 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications', 3-6, Oct. 2004, Freiburg, Germany (keynote presentation), International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI(8/W2):82-89.

Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H., Haggrén, H. and G. Ruppert, 2000. Accuracy of laser scanning for DTM generation in forested areas. Proceedings of AeroSense'2000,

April 24-28, 2000, Orlando, Florida, USA, Laser Radar Technology and Applications V, 4035:119-130.

Hyyppä, H., ja J. Hyyppä, 2000. Quality of 3-dimensional infrastructure models using airborne laserscanning. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 17(1): 43-53.

Matikainen, L., Hyyppä, J., ja Kaartinen, H. 2004. Automatic detection of changes from laser scanner and aerial image data for updating building maps. *Proceedings of the XXth International ISPRS Congress, July 2004, Istanbul, Turkey, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXV(B2):434-439.*

Leica, 2005. www.leica.com. Luettu 4.10.2005.

NTM, 2005. Glossary. NTM Glossary for lasers. <http://www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/ntm/Glossary.html>. Luettu 3.10.2005.

Oksanen, J. ja T. Sarjakoski, 2004. Characterization of the digital elevation model (DEM) error by using airborne laser scanning elevation data. *GIScience 2004, The Third International Conference on Geographic Information Science : extended abstracts and poster summaries, Oct 20-23, 2004, Adelphi, MD, pp. 165-167.*

Höglund, R. ja Large, P., 2005. Direct Reflex EDM technology for the surveyor and civil engineer. Trimble white papers, Trimble Survey, Westminster, Colorado, USA. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-208582/022543-010D_TrimbleS6_DR_WP_1104_lr.pdf. Luettu 3.10.2005.

Marbs, A., 2002. Experiences with laser scanning at i3mainz. CIPA, Heritage Documentation. *International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece.*

Optech, 2005. www.optech.ca. Luettu 4.10.2005.

Riegl, 2005. www.riegl.com. Luettu 4.10.2005.

Schulz, T. ja Ingensand, H., 2004. Terrestrial laser scanning – investigations and applications for high precision scanning. *FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.*

Wunderlich, T., A., 2003. Terrestrial Laser Scanners – an Important Step towards Construction Information. *FIG Working Week 2003, Paris, France, April 13-17, 2003.*

Vögtle, T. ja Steinle, E., 2000. 3D modelling of buildings using laser scanning and spectral information. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.

Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H. ja M. Maltamo, 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. Remote Sensing of Environment 90:451-462.