

# Laserkeilaimien toimintaperiaatteet ja kalibrointi

**Vahur Joala**

Leica Nilomark Oy  
Sinimäentie 10 C, 02631 Espoo  
geo@leica.fi

**Tiivistelmä.** Laserkeilaus täydentää koordinaattimittausmaailman uudella korkean yksityiskohtaisella mittausmenetelmällä, jolla pystytään keräämään ympäröivästä maailmasta tietoa monipuolisemmin ja nopeammin. Ongelmaksi kuitenkin on osoittautunut standardisoidun kalibrointimenetelmän puuttuminen laserkeilaimien parametrien määrittämisessä. Tässä esitelmässä on tuotu esille ongelmat, jotka johtuvat standardien puuttumisesta ja Suomessa kehitetty menetelmä laserkeilaimien tarkkuuden määrittämiseksi laboratorio-olosuhteissa.

**Avainsanat:** laserkeilaus, maa-laserkeilain, toimintaperiaate, kalibrointi.

## 1 Laserkeilaimien toimintaperiaatteet

Laserkeilain on mittalaite, jolla pystytään mittaamaan pisteitä koskematta kohteeseen. Laserkeilaimella mitataan kohteesta kolmiulotteinen pistepilvi. Mittausmenetelmä muistuttaa monessa suhteessa mittauksia prismattomalla takymetrillä. Mittalaitteessa on nollapiste, josta lähtee liikkeelle lasersäde, jonka avulla mitataan kohteen etäisyys mittalaitteesta. Etäisyys mitataan aikana, jonka valosignaali kulkee mittalaitteesta kohteeseen ja takaisin. Koska tiedetään valosignaalin (lasersäteen) lähtökulmat (sekä vaaka että pystysuunnassa) ja matka, voidaan laskea jokaiselle mitatulle pisteelle koordinaatit. Koordinaattien lisäksi tallentaa järjestelmä jokaiselle pisteelle myös intensiteetti-arvon paluusignaalin voimakkuuden pohjalta.

### 1.1 Laserkeilaimien luokittelu

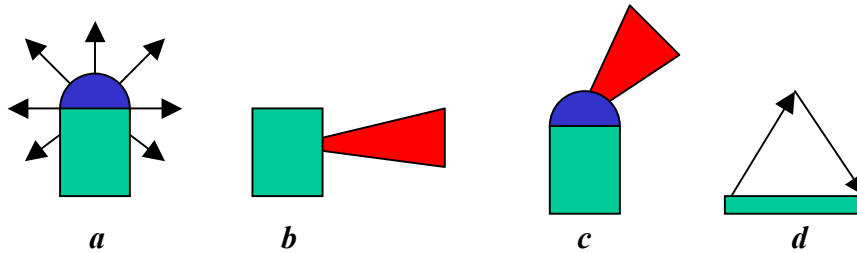
Laserkeilaimet voidaan luokitella kolmeen pääluokkaan:

- Kaukokartoitus-laserkeilaimet, joita käytetään lentokoneista, helikoptereista tai avaruusaluksilta. Mittausetäisyys näissä laitteissa on 0,1–100 km ja mitatun pisteen tarkkuus on joitakin senttimetrejä ( tyypillisesti >10 cm);
- Maa-laserkeilaimet, joita käytetään mittauksiin matkoille 1–300 m ja joissa mittaustarkkuus on alle 2 cm;
- Teollisuus-laserkeilaimet, joilla mitataan pieniä kohteita alle millimetrin tarkkuudella ja etäisyydeltä alle 30 m.

Jatkossa käsittelemme maa-laserkeilaimia ja näiden ominaisuuksia.

Maa-laserkeilaimet (terrestriaaliset laserkeilaimet) voidaan toimintaperiaatteen pohjalta jakaa neljään eri tyyppiin:

- Kupolimainen mittaustapa (näitä sanotaan myös laserskannereiksi);
- Keilamainen mittaustapa;
- Kahden edellisen mittaustavan yhdistelmä;
- Optinen kolmiomittaus.



*Kuva 1. Laserkeilaimien tyypit.*

Kupolimaisesti mittaava laserskanneri sopii pääasiallisesti louhosten, tunnelien ja pienten sisätilojen mittaukseen. Puutteena on ollut se rajoite, että mitattavien pisteiden välimatka kasvaa etäisyyden funktiona, jolloin yksityiskohtaisten mittauksien suorittaminen jo yli 20 metrin etäisyydellä on ollut lähes mahdotonta.

Keilamaisesti mittaava koje sopii parhaiten yksityiskohtaisten mittauksien suorittamiseen. Jopa 50 metrin etäisyydeltä voidaan mitata kohteita millimetrin ruutuun. Kyseinen menetelmä on markkinoilla menestynyt parhaiten ja on käytössä laitossuunnittelussa, siltamittauksissa, muistomerkkien mittauksissa ja rakennusmittauksissa.

Kahden edellisen mittaamenetelmän yhdistelmä mahdollistaa mittaukset vaakasuunnassa  $360^\circ$  ja pystysuunnassa  $270^\circ$  alueella keilamaisesti, jolloin yhdeltä asemapisteeeltä voidaan mitata yksityiskohtainen pistepilvi ympäröivästä kohteesta yhdellä mittauksella. Menetelmä on muihin menetelmiin verrattuna uusi (ensiesittely syyskuussa 2003), mutta ominaisuuksiltaan muihin menetelmiin verrattuna monipuolisin.

Optinen kolmiomittaus, mittaamenetelmistä harvinaisin, on pisteenmittauksessa tarkka, mutta rajoituksena on lyhyt mittausetäisyys ja muihin menetelmiin verrattuna isot katvealueet.

## **1.2 Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät**

Laserkeilaimella voidaan mitata kohteesta näkyviä kohteita (ns. kulmantaaksemittaukset eivät onnistu), sekä kohteita, joista mittalaitteeseen palautuu riittävän tehokas signaali.

Koska kohteen mittauksessa yleensä tarvitaan tietoa myös yhdeltä kojepisteeltä mitattuna piiloon jäävistä alueista, on mitattava monelta kojeasemalta. Mitattujen pistepilvien yhdistämiseksi yhdeksi isoksi pistepilveksi on monia menetelmiä.

Tarkin yhdistämismenetelmä on yhteisten tähyksien käyttö, eli jokaisesta mitatusta pistepilvestä pitää löytyä ainakin kolme yhteistä koodattua tähytä, joiden avulla pistepilvet yhdistetään samaan koordinaatistoon. Tähyksien keskipisteet on mitattava keilaimella. Tähykset ovat yleensä tasomaisia, pallomaisia tai puolipalloja. Niiden keskipisteiden määrittäminen keilaimen pistepilvestä tapahtuu ns. automaattisesti. Tähyksien keskipisteet voidaan mitata takymetrillä ympäröivässä koordinaatistossa yhdistettyjen pistepilvien siirtämiseksi tarvittavaan koordinaattijärjestelmään. Pistepilvien yhdistäminen tapahtuu kyseisellä menetelmällä parhaimmillaan 1–3 mm tarkkuudella.

Pistepilviä voidaan yhdistää myös käyttäen yhteisiä mallinnettuja kohteita. Kahdessa erikseen mitatussa pistepilvessä mallinnetaan yhteisiä kohteita (tasoja, lieriöitä,...), niille annetaan koodit ja niitä käytetään pistepilvien yhdistämisessä. Kohteiden mallintaminen ei ole kuitenkaan yhtä tarkkaa kuin tähyksien keskipisteiden määrittäminen. Tästä johtuen on pistepilvien yhdistäminen kyseisellä menetelmällä epätarkempi tapa verrattuna yhteisten tähyksien käyttöön.

Uutena menetelmänä on käytettävissä pistepilvien yhdistäminen yhteisten pistepilvien toisensa peittävien alueiden avulla. Tämä menetelmä vaatii, että kahdessa keskenään yhdistettävässä pistepilvessä olisi ainakin kolmasosa yhteistä peittoa. Kummassakin pistepilvessä osoitetaan vähintään kolmelle yhteiselle pisteelle (osoitustarkkuus pisteparille

kahdessa pistepilvessä alle 10cm), joita käytetään kahden pistepilven likiarvosovitukseen. Sen jälkeen sovittaa mittaussovellus parhaimmalla tavalla (jäännösvirheet minimoiden) molemmat pistepilvet samaan koordinaatistoon. Pistepilvien yhdistämistarkkuus kyseisellä menetelmällä käytännössä on 5–10 mm.

Isoimmissa projekteissa on tavallista, että mitatut pistepilvet yhdistetään edellä mainittujen menetelmien kombinaationa.

Pistepilvet mitataan yleensä jatkokäsittelyä varten, eli pistepilviä käytetään kohteen mallintamisessa. Mallintamisen laatuun vaikuttaa suoranaisesti mallintamisessa käytettävän pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka. Mitä tiheämpi on mitattu pistepilvi, sitä tarkemmin pystytään mallintamaan putkistoja, reunoja jne.

Toinen vaikuttava tekijä on mitattujen pisteiden hajonta. Tähän vaikuttaa paljossakin mittaussäteen osumiskulma kohteelle. Kohteiden mallintamisessa on näin ollen erittäin tärkeää jäännösvirheiden seuranta.

Mittausmatkan kasvaessa heikkenee kohteelta mittalaitteeseen palaava signaali. Paluusignaalin voimakkuus riippuu myös mitattavan kohteen pinnan ominaisuuksista. Esim. mittaussignaali palautuu eri tavalla rapatusta seinästä kuin maalatusta pinnasta tai ruosteisesta teräksestä. Myös kohteiden kaarevuus vaikuttaa palautuvan signaalin voimakkuuteen. Osa keilaimista tallentaa mitatun pisteen koordinaattien lisäksi myös palautuvan signaalin voimakkuuden. Paluusignaalin voimakkuus voidaan visuaalisesti esittää tietokoneen näytöllä jokaisen pisteen kohdalla värierona tai harmaasävyn erona. Värieron käyttö on osoittautunut käytännössä monipuolisemmaksi ja miellyttävämmäksi. Parhaimmillaan voidaan kalibroidulla mittalaitteella tuottaa pistepilvi, jossa mitatuilla pisteillä on lähes todellinen värisävy. Käyttäen hyväksi intensiteettiä (palautuvan signaalin voimakkuutta) voidaan tasomaiselta pinnalta erottaa myös tekstuuria (kuvioita, tekstejä). Osa mittalaitteiden valmistajista esittää tietokoneen näytöllä sävyeroja matkan funktiona, jolloin tasomaiset kohteet näyttäytyvät katsojalle samanvärisinä (tekstuuri ei erotu).

### **1.3 Laserkeilaimien parametrit**

Laserkeilaimien mittauseräparametrit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: fyysiset ja mittaustekniset.

Fyysiset parametrit ovat: maksimimittausetäisyys, yhden pisteen mittaustarkkuus, mittaussäteen kulmaluvun tarkkuus, kulman minimiaskel, paino, toiminta-aika, näkökenttä, kahden pisteen välinen minimimatka pistepilvessä esim. 50 m matkalla, lasersäteen läpimitta esim. 50 m matkalla, jne.

Mittausteknisiä parametreja ovat: mittausten lukumäärä yhdellä mittauksella, tähyksien mittaushelpous, käytettävien pistepilvien yhdistämismenetelmät, mittausten suodatusmahdollisuudet (intensiteetin tai etäisyyksien perusteella), mahdollisuus mitata suoraan ylös tai alas, jne.

Mittauskojeiden valmistajat määrittelevät mittalaitteen parametrit poikkeavilla periaatteilla, koska yleistä standardia tähän ei vielä ole. Täten ilmoittavat useimmat valmistajat mittaussäteen minimiarvona (esim. >1000 pistettä/s), mutta myös maksimiarvona (esim. <5000 pistettä/s). Viimeksi mainitulla tavalla ilmaistuna voidaan asiakkaalle toimittaa vaikkapa laite, joka mittaa vain 200 pistettä/s ja spesifikaatio on silti täytetty.

Sama ongelma esiintyy pistemittaustarkkuuden kohdalla. Osa valmistajista ilmoittaa tarkkuuden muodossa <6 mm tai  $\pm 4$  mm. Osa taas ilmoittaa etäisyysmittauksen tarkkuudeksi esim. parhaimmillaan 6 mm, lisäksi, että rajoituksia saattaa olla ja todelliset arvot selviävät vasta laitteen toimituksen yhteydessä toimitettavasta testiraportista. Hämmennystä aiheuttaa myös se, että osa laitevalmistajista ilmoittaa sekä etäisyysmittauksen että pistetarkkuuden, toiset vain etäisyysmittauksen. Jostain syystä eivät teknisiä tietoja

lukevat henkilöt aina osaa tai viitsi erottaa toisistaan näitä kahta eri parametria. Saatetaan luulla, että pistemittaustarkkuus  $<6$  mm ja etäisyysmittaustarkkuus parhaimmillaan 6 mm tarkoittavat samaa.

Osassa mittalaitteista voidaan muuttaa mittausnopeutta, jolloin hitaammalla mittauksella saavutetaan parempi pistetarkkuus. Esitteistä parhaan pistetarkkuuden saavuttamiseen tarvittava mittausnopeus ei selviä. Näistä esitteissä esiintuoduista arvoista ei aina voida päätellä laitteen todellisia teknisiä parametreja ja asiakkaille on helppo antaa väärä kuva mittalaitteen todellisesta suorituskyvystä ja sen parametreista. Puuttumatta siihen johtuuko mittaustarkkuuden esitystavan epäselvyys yhteismitallisten parametrien vakiintumattomuudesta tällä suhteellisen uudella alalla vai onko kyse mainostoimiston ottamasta vapaudesta, suosittelen, että laitehankintoja harkitsevat vaativat laitteiden valmistajilta todellisia vakioiduissa testitilanteissa saatuja numeroarvoja.

## 2 Laserkeilaimen kalibrointi

Laserkeilaimia on yritetty kalibroida eri menetelmillä muutamassa Euroopan tutkimuslaitoksessa. Kaikkia laserkeilainmalleja ei ole pystytty kalibroimaan eikä testaamaan ja laitehankintoja harkitsevien yritysten on tyytyminen vain laitevalmistajien esitetietoihin. Seuraavaksi esitellään Helsingin Teknillisessä Korkeakoulussa käytössä oleva kalibroitimenetelmä sekä tuloksia Leica Cyrax 2500 (Leica HDS 2500) laserkeilaimen kalibroinnista.

Leica HDS 2500 (aikaisemmalla nimellä Cyrax 2500) laserkeilaimen kalibrointi toteutettiin TKK:n Geodesian laboratoriossa yliassistentti Jaakko Santalan ohjauksessa vuonna 2002. Kalibrointia varten oli käytössä ympyrämäinen kehystaulu halkaisijaltaan 3 m. Pystyasennossa olevalle alumiiniselle kehystaululle kiinnitettiin ristikkomuotoisesti 9 laserkeilaimen tähyistä. Kehystä käännettiin ympäri vaaka-akselin neljään asentoon (0, 90, 180 ja 270 astetta) sekä käännettiin mittalaitteen tähtäyssuunnan suhteessa kolmeen asentoon (atsimuuttiin) – suorakulmaisesti sekä  $+30^\circ$  ja  $-30^\circ$  suorakulmasta. Mittaukset suoritettiin neljältä eri etäisyydeltä: 3 m, 10 m, 25 m ja 50 m. Jokaiselta asemapisteltä mitattiin kehyksellä sijaitsevia tähyksiä kolmella eri atsimuutilla ja neljässä kehän asennossa. Yhteensä mitattiin 360 tähyksien keskipistettä. Tähyksien keskipisteiden koordinaatit mitattiin käyttäen Cyclone-ohjelmistoa.

Jokaisen tähyksen keskipiste mitattiin tarkasti myös kahdella Wild T2000 teodoliitilla käyttäen leikkausmenetelmää. Pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettiin keilauksen tuloksena saadut koordinaatit ja leikkausmenetelmällä mitatut tähyksien keskipisteiden koordinaatit. Tuloksista laskettiin koordinaattien jäännösvirheet ja mittakaavavirheet. Yhden tähyksen keskipisteen koordinaattien laskenta epäonnistui sinne osuneen liian kirkkaan valon seurauksena. Kun jätettiin tämä mittaus huomioimatta, saatiin koko testin tuloksena pistemittaustarkkuuden keskiarvoksi 4.23 mm keskihajonnalla 0.16 mm. Mittakaavavirheen keskiarvoksi saatiin 0.99972513 keskihajonnalla 0.000239.

Kalibrointi osoitti, että kalibroitava laite täyttää valmistajan lupaamat spesifikaatiot (pistemittaustarkkuus  $<6$  mm matkoille alle 50 m).

### Lähdeluettelo

Johansson M. Explorations Into the Behaviour of Three Different High-resolution Ground-based Laser Scanners in the Built Environment. Gävle GIS Institute, University of Gävle. Korfu 2002.

Santala J., Joala V. On the Calibration of Ground-based Laser Scanner. TS12.4, FIG Working Week 2003, Paris. 7 sivua.

Wunderlich T.A. Terrestrial Laser Scanners – an Important Step towards Construction Information. TS22.2, FIG Working Week 2003, Paris. 11 sivua.