

Maanmittaus 79:1-2 (2004)

Saapunut 27.11.2003

Hyväksytty 9.3.2004

## Paikannus ja työkoneohjaus

**Hannu Salmenperä**

Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto

PL 600, 33101 Tampere

hannu.salmenpera@tut.fi

***Tiivistelmä.** Maarakentamisessa ollaan siirtymässä perinteisestä etukäteen tehdystä rakenteiden maastoonmerkinnästä työkoneiden automaattiseen tai puoliautomaattiseen ohjaukseen. Tällöin koneen ja koneenosien sijainti ja suunta joudutaan määrittämään reaaliaikaisesti. Toisaalta on suunnitelmätiedon avulla määritettävä rakenteen (rakennepinnan) sijainti kyseisellä paikalla ja ratkaistava koneen toimielinten säätötarve. Toimivia ratkaisuja on olemassa, mutta kehitystyö jatkuu voimakkaana. Tässä esityksessä tarkastellaan geodeettisen paikannuksen ja perinteisen geodeettisen laskentatekniikan soveltuvuutta kyseiseen tehtävään. Lisäksi esitellään kinemaattisen takymetrimittauksen ja kinemaattisen GPS-mittauksen tarkkuustutkimuksista saatuja tuloksia.*

***Avainsanat:** koneohjaus, paikannus, kinemaattinen mittaus, virheyhtälötaositus.*

### 1 Johdanto

Työkoneiden ja robottien ohjauslaskennassa on olemassa jo kohtalaisen pitkät perinteet. Näitä menetelmiä ei pyritä mitenkään kyseenalaistamaan. Sen sijaan esitetään eräitä ehkä uusia ajatuksia kyseiseen tehtävään. Artikkelissa tarkastellaan liikkuvan koneen paikannusta ja pienimmän neliösumman periaatteen mukaisen koordinaattitasoituksen soveltuvuutta ohjauslaskentaan. Päämääränä on yksinkertaistaa ja monipuolistaa ratkaisua ja toisaalta ylimääräisten havaintojen avulla lisätä ohjauksen luotettavuutta eli paljastaa mahdolliset karkeat virheet. Toisaalta voidaan arvioida työn tarkkuutta eli esimerkiksi kaivuterän sijainnin ja asennon tarkkuuslukuja. Tasoitus tarjoaa lisäksi erään yleispätevän ratkaisun erilaisten konetyyppien ohjaukseen.

### 2 Työkoneen rakenne ja ohjauslaskenta

Työmaaolosuhteissa paikannus perustuu useimmiten takymetrimittaukseen tai satelliittipaikannukseen. Takymetrimittauksessa havaintoina ovat vaakasuunta,

korkeuskulma ja vinoetäisyys tunnetulta asemapisteeltä liikkuvassa koneessa olevaan prismatähykseen. Näistä voidaan laskea asemapisteen ja tähyksen väliset koordinaattierot. Mittauksia toistetaan esimerkiksi 5 kertaa sekunnissa (0,2 s välein). Kuitenkin havaintojen teko, käsittely ja siirto työkoneelle aiheuttaa viivettä, esimerkiksi 0,3 s. Tämä aikaviive voi olla muuttuva tai vakio, kuten se on ainakin eräillä takymetrijärjestelmillä. Koneen sijainti ja suunta tietyllä ajanhetkellä joudutaan ekstrapoloimaan edeltävistä koordinaattiarvoista.

Satelliittipaikannuksessa sovelletaan menetelmää, jossa liikkuvan yksikön sijainti määritetään suhteessa yhteen tai useampaan kiinteään asemaan. Kiinteä asema voi olla siirrettävä tai alueellinen kiinteä tukiasema (tukiasemaverkosto). Liikkuvan antennin koordinaatit saadaan aikaviiveellä, joka ei yleensä ole vakio. Sijainnin lisäksi saadaan kuitenkin ajankohta, mihin koordinaatit liittyvät. Tämän kaltaisen RTK-GPS paikannuksen lähitarkkuus on heikompi ja epävarmuus suurempi kuin parhaan takymetripaikannuksen. Toisaalta useampi vastaanotin on mahdollista kiinnittää samaan työkoneeseen, jolloin saadaan varmistusta ja lisäksi tietoa suunnasta ja kallistuksista.

### 2.1 Paikannushavainnoista

Geometristen suureiden määrittämisen yhteydessä alkuperäisinä havaintoina on usein kulmia ja välimatkoja. Kulmat voivat olla suorien tai tasojen välisiä kulmia. Ne voivat olla myös avaruussuorien projektioiden välisiä kulmia. Esimerkiksi teodoliitilla tai takymetrillä mitataan vaakakulmia, jotka ovat painovoimakenttää vastaan kohtisuoralle tasolle projisioitujen suuntien välisiä kulmia. Pystykulmia mitataan myös teodoliitilla ja takymetrillä. Niiden referenssinä on painovoimakentän suunta. Kaltevuusantureilla mitataan yleensä pieniä poikkeamia vaak- tai pystysuorasta suunnasta.

Vaakakulmien orientointi tarkoittaa sitä, että kulman (kulmien) kylkien suuntakulma mittauskoordinaatistossa määritetään. Tällöin puhutaankin suunnista eikä kulmista.

Välimatkat voivat olla pisteiden välisiä etäisyyksiä. Usein etäisyydet jaetaan komponentteihin, puhutaan vaakäetäisyydestä ja korkeuserosta. Tämä jako edellyttää kaltevuuskulman tuntemista. Korkeuseroja voidaan kuitenkin määrittää myös välittömästi esimerkiksi vaaituksen avulla.

Eräs havaintotyyppi on mittakameralla saatava keskusprojektion mukainen avaruussuuntien viuhka ("sädekimppu"). Jokainen mitattu kuvapiste (kuvakoordinaattipari) määrittää yhdessä projektiokeskuksen kanssa avaruussuunnan kohdepisteeseen. Suuntia on periaatteessa ääretön määrä ja niillä kaikilla on yhteinen orientointi. Orientoinnin muodostaa toisaalta kameran geometria (projektiokeskuksen asema kuvatasoon nähden, ns. sisäinen orientointi) ja toisaalta projektiokeskuksen koordinaatit sekä kameran koordinaatiston kiertoasento kohteen koordinaatistoon nähden (ns. ulkoinen orientointi).

Joskus havaintoina käytetään alkuperäisistä havainnoista johdettuja arvoja. Esimerkiksi takymetrimittauksen vaakasuunnan, pystykulman ja vinoetäisyyden

avulla voidaan laskea koordinaattierot asema- ja tähtäyspisteen välille. Satelliit-tipaikannuksessa etäisyyksien tai etäisyserojen avulla määritetään koordinaattieroja ja edelleen koordinaatteja. Koordinaatteja voidaan käyttää lähtöarvoina, mutta usein niitä tulisi käsitellä havaintoina, joilla on tietty tarkkuus (varianssi). Myös keskinäiset riippuvuudet (kovarianssit) tulisi ottaa huomioon.

Erilliskoordinaatistoissa määritetyt pistejoukot muodostavat erään yleisen havaintolajin. Esimerkiksi jos takymetrillä tai laserkeilaimella mitataan pistejoukko ilman, että mittausta mitenkään sidotaan mihinkään koordinaatistoon, syntyy pisteistö, jossa pisteiden keskinäinen sijainti tunnetaan. Fotogrammetriassa stereomalli muodostaa erilliskoordinaatiston, ennen kuin sen ulkoinen orientointi on määrätty. Ulkoisen orientoinnin määrittävät kolme koordinaattia ja kolme kiertokulmaa sekä mahdollinen mittakaavakerroin. Takymetri on orientoitu vaakatasoon. Sen orientointiin riittää tieto kojeen koordinaateista ja vaakasuunnan orientoinnista.

Koneohjauksessa työkone muodostaa maastokoordinaatistossa olevan erilliskoordinaatiston. Sen orientointiin tarvitaan kolme koordinaattia ja kolme kulmaa. Koneen toiminnalliset pisteet (sylinterien kiinnityskohdat, sarananivelet, pallonivelet, paikannuslaitteet yms.) voidaan määrittää tässä koordinaatistossa. Koneeseen liittyy sarja- tai rinnakkaismuotoisia komponentteja (puomeja yms.), jotka kaikki muodostavat omat koordinaatistonsa. Niiden toiminnalliset pisteet voidaan määrittää näissä erilliskoordinaatistoissa. Koordinaatistot liittyvät yhteen yhden pisteen avulla (pallonivel) tai kahden pisteen avulla (sarananivel). Lisäksi niiden keskinäistä asemaa määrittävät niveliin liittyvät kulma-anturit (kiertoanturit), pisteiden väliset pituusanturit tai kaltevuusanturit.

## **2.2 Havaintoyhtälöistä**

Jokaisesta geometrisesta havainnosta voidaan muodostaa havaintoyhtälö, jossa tuntemattomina ovat määritettävät parametrit, esimerkiksi työkoneen ja sen osien sijainti ja kiertoasento. Kun toisistaan riippumattomia yhtälöitä on yhtä monta kuin tuntemattomia, voidaan tuntemattomat yleensä ratkaista.

Yhtälöitä tulee painottaa niihin liittyvän havainnon tarkkuuden mukaan. Paino on kääntäen verrannollinen havainnon keskihajonnan neliöön (varianssiin). Erityisen merkityksen painotus saa, kun yhtälöryhmässä on eri tyyppisiä yhtälöitä. Yhtälöt voivat perustua välimatkahavaintoihin, kulmiin, koordinaattihavaintoihin jne. Samaan yhtälöryhmään voidaan siis sijoittaa aivan eri tyyppisiä havaintoyhtälöitä.

## **2.3 Virheyhtälötasoituksesta**

Jos havaintoja on enemmän kuin tuntemattomia, ei edellä käsitellyllä tavalla muodostetulla yhtälöryhmällä ole yksikäsitteistä ratkaisua. Virheyhtälötasoituksessa jokaisesta havaintosuureesta muodostetaan ns. virheyhtälö, jossa havaintoon ajatellaan liittyvän tässä vaiheessa tuntematon ”virhe” (ristiriita). Yhtälöissä havainto esitetään parametrien funktiona. Havainnoille arvioidaan tarkkuus ja yhtälöitä

painotetaan kääntäen verrannollisesti variansseihin (*á priori* varianssien arviointi). Kun havainnot ovat eri tyyppisiä (kulmia, matkoja, koordinaatteja yms.), eivät painot ole paljaita lukuja.

Tasoituksen ajatuksen mukaisesti yhtälöitä on enemmän kuin tuntemattomia. Jokaiseen havaintoon ajatellaan siis liittyvän virhe. Ratkaisu haetaan sillä periaatteella, että näiden virheiden painotettu neliösumma on minimissä. Toisin sanoen ratkaisusta laskettujen havaintoarvojen ja alkuperäisten havaintoarvojen erojen (jäännösvirheiden, residuaalien) painotettu neliösumma on minimissä. Ratkaisu saadaan ns. normaaliyhtälöiden avulla. Normaaliyhtälöt saadaan, kun muodostetaan minimoitavan neliösumman lauseke ja otetaan siitä osittaisderivaatat vuoron perään kunkin tuntemattoman parametrin suhteen ja merkitään nämä nolllaksi tavallisen ääriarvotehtävän tapaan.

Alkuperäiset havaintoyhtälöt eivät aina ole tuntemattomien parametrien suhteen lineaarisia. Tästä syystä yhtälöt on linearisoitava ja ratkaisuna saadaan likiarvojen parannuksia.

Residuaalien perusteella voidaan tutkia karkeiden virheiden olemassaoloa. Normaaliyhtälöiden kerroinmatriisin ja painomatriisin avulla saadaan ns. rakenematriisi, joka pitää sisällään tiedon mittauksen geometriasta. Sen käänteismatriisin alkiot määrittävät tuntemattomien parametrien varianssien ja kovarianssien väliset suhteet. Virhetermeille saadaan mittakaava laskemalla jäännösvirheistä ns. painoyksikön (ykköspainoisen havainnon) keskihajonta (*á posteriori* varianssi-kerroin).

### 3 Ajatuksia koneohjaussovelluksesta

Työkone (esim. kaivuri) voidaan määritellä omassa koordinaatistossaan toiminnallisina pisteinä (pallonivelet, sarananivelet, sylinterien kiinnityskohdat, paikannuslaitteen antennit tai prismat). Puomit tms. määritellään vastaavasti omassa koordinaatistossaan. Koordinaatistoilla on yhteisiä nivelpisteitä. Sylintereissä voi olla pituusantureita ja sarananivelissä kulma-antureita. Lisäksi ainakin kaltevuusanturit ovat hyödyllisiä.

Koneen koordinaatiston ulkoisen orientoinnin määrittelevät origon maastokoordinaatit ja koneen ja maastokoordinaatiston akselien väliset kiertokulmat. Kaksi kiertokulmaa (kallistuskomponentit) voidaan määrittää kaltevuusantureilla. Pysty akselin ympäri tapahtuva kiertymä (suuntakulma) voidaan periaatteessa määrittää hyrrälaitteella, mutta käytännössä tämä ei onnistu, tapahtuu nollasuunnan ajautumaa. Suunta voidaan määrittää kahden tai useamman koordinaattihavainnon avulla. Lisäksi suunta voidaan määrittää ”peilaamalla” ulkopuolista suuntapistettä tai maan magneetikenttään perustuen.

Sarananivelellä kytkeytyvien puomien orientointi koneen tai toisen puomin koordinaatiston suhteen määräytyy yhden kulman tai yhden etäisyyden avulla. Pallonivelellä kytkeytyvien laitteiden määrittelyssä tarvitaan kolme kulmaa, kolme etäisyyttä tai näiden yhdistelmä. Lineaarinen liike johdetta pitkin määräytyy yhden etäisyyden avulla.

Havaintojen painotuksella voidaan säädellä yhtälöryhmän toimintaa. Periaatteessa paino on kääntäen verrannollinen havainnon varianssiin. Myös mahdollisesti tunnetut havaintojen keskinäiset riippuvuudet (kovarianssit) voidaan ottaa huomioon. Paino nolla merkitsee, että suure on vapaa muuttuja. Paino ääretön vastaavasti merkitsee, että suureen arvo on kiinteä (vakio). Jos esimerkiksi määritetään jonkin työkoneneen terän tms. sijaintia, ovat sijaintikoordinaatit vapaita muuttujia. Tämä on painotuksen normaali käyttötapa. Koneohjauksessa painotusta voidaan hyödyntää myös aivan toisella tavalla. Jos halutaan laskea koneen tila silloin, kun terällä on tietty esimerkiksi suunnitelman mukainen sijainti ja suunta, annetaan näille suureille suuri paino. Muita suureita painotetaan sen mukaan, miten liikkeen halutaan tapahtuvan (jos on monta ratkaisua). Havaintojen jäännösvirheet kertovat suoraan kone-elinten säätötarpeen.

Edellä oleva ajatuskulku on eräs mahdollisuus työkonerohjauksen geometrian ratkaisuun. On kuitenkin todettava, että menetelmää on vain muutamain simuloinnein testattu, eikä sen todellista toimivuutta tai etevämyyttä muihin vaihtoehtoihin ole tutkittu. Sen sijaan erilaisten havaintotyyppien yhteistasoitus sinänsä on jo pitkään ollut yleisessä käytössä mittaustekniikan piirissä. Tarkkuus- ja luotettavuustarkastelun lisäksi menetelmä saattaisi muodostua sillä tavalla yleispäteväksi, että sen muuntaminen konetyypin mukaan olisi melko yksinkertaista.

#### **4 Kinemaattisten mittausjärjestelmien kalibrointi**

Kalibrointitoiminta voidaan jakaa laitekalibrointiin (laboratoriokalibrointiin), järjestelmäkalloibrointiin (koekenttäkalibrointiin) ja seurantakalibrointiin.

Laitekalibrointia suoritetaan yleensä laboratorio-olosuhteissa ja se on luonteeltaan komponenttikalibrointia. Tällä tarkoitetaan sitä, että mittauslaitteesta kalibroidaan erillisiä toimintoja kuten takymetrin etäisyysmittaus ja kulmamittaus, mutta kaikkia toimintoja ja etenkin laitteen kokonaistoimintaa ei kalibroida.

Koekenttien avulla suoritetaan järjestelmäkalloibrointia, jossa testataan koko mittauslaitteiden, mittausmenetelmien, mittaajien ja ohjelmistojen muodostamaa kokonaisuutta. Koekenttien avulla voidaan suorittaa myös rajoitetusti laitekalibrointia.

Seurantakalibrointi ei ole varsinaista kalibrointia, vaan käyttäjän suorittamaa kojeen muutosten seurainta, eräänlaista omavalvontaa. Tämä toiminta ei edellytä tunnettua referenssiä, vaan ajatuksena on testimittauksin todeta, milloin laitteen ominaisuudet ovat muuttuneet merkitsevästi. Kun muutos ylittää mittaustarkkuuden, on suoritettava säätö ja uusintakalibrointi.

Kalibrointitoiminnassa on oleellista, että käytössä oleva mittanormaali on riittävän tarkka ja että sen jäljitettävyyden kalibrointavan suureen ylimpään kansainväliseen mittanormaaliin tai ko. suureen määritelmään on katkeamattomana olemassa. Käytännön toiminnan kannalta on lisäksi oleellista, että kalibrointi uusitaan riittävän usein ja että on asetettu rajat, jotka laitteen on täytettävä kulloinkin kyseessä olevassa tehtävässä. Kummassakin asiassa on tällä hetkellä vakavia puutteita.

#### 4.1 Kinemaattinen mittaus

Kaikki edellä kuvattu kalibrointitoiminta koskee yleensä staattista mittaustilannetta. Kuitenkin käytössä on mittausjärjestelmiä, jossa paikannetaan liikkuvaa ajoneuvoa tai työkonetta reaaliajassa. Nämä menetelmät perustuvat joko automaattisesti heijastinprismaa seuraavaan takymetriin (vaakakulma, pystykulma ja matka), satelliittipaikannukseen (RTK-paikannus) tai myös ultraäänipaikannukseen, konenäköön (reaaliaikaiseen fotogrammetriaan), radiotekniseen paikannukseen (eri menetelmiä) tai pelkkään kulmamittaukseen (taaksepäinleikkaus). Sovellukset liittyvät työkonoiden ohjaukseen tai mittaustoimintaan ja niiden merkitys on voimakkaassa kasvussa.

Vaikka puhutaan reaaliaikaisesta paikannuksesta, ei toiminta kuitenkaan ole täysin viiveetöntä. Tästä syystä laitekalibroinnissa on määritettävä mittaus-tarkkuuden (paikannustarkkuuden) lisäksi ajankohta, johon järjestelmän antamat koordinaatit liittyvät. Ei siis riitä, että perinteiseen tapaan suoritetaan komponenttikalibrointia, eli määritetään esimerkiksi kulmamittauksen tarkkuutta ja etäisyysmittauksen tarkkuutta testauslaitteissa. Ei myöskään riitä, että koekenttien avulla määritetään järjestelmän antamien koordinaattien tarkkuutta. Kalibroinnissa on kyettävä määrittämään, miten tarkasti kohteen sijainti tosiajassa on määritettävissä. Tämä edellyttää mitattujen koordinaattien ja mittausajankohdan liittämistä yhteen, eli on tehtävä  $(x, y, z, t)$ -havaintoja ja määritettävä niiden tarkkuus. Tämä edellyttää uuden ulottuvuuden ottamista mukaan kalibrointitoimintaan.

Kinemaattinen kalibrointi edellyttää referenssiä, jossa sijainti tunnetaan ajan funktiona. Tämä voidaan toteuttaa testiradan avulla. Liike voi olla tasaista tai kiihtyvää, reitti voi olla lineaarinen, ympyrämainen tai vaihteleva. Liike voi olla siis yksiulotteinen, kaksiulotteinen tai kolmiulotteinen.

Kolmiulotteinen referenssirata voidaan saada aikaan suorakulmaisilla lineaarisilla liikkeillä (esimerkiksi työstökoneet), polaarilla liikkeillä (esimerkiksi monet teollisuusrobotit) tai niiden yhdistelmänä. Kaksiulotteisella liikkeellä (esimerkiksi ympyrärata) saadaan kolmiulotteinen kalibrointitilanne, kun liikerata ja mittauskoordinaatisto eivät ole yhdensuuntaisia. Nopeutta muuttamalla saadaan referenssiä monipuolistetuksi. Kalibrointiradan (kalibrointikehyksen) määrittäminen riittävällä tarkkuudella on verraten vaivatonta. On määritettävä referenssin keskipiste, säde, suurin kallistus ja sen suunta. Käytännössä tämä tapahtuu esimerkiksi mittaamalla staattisesti radalta pisteitä, joihin sovitetaan ympyrä pienimmän neliösumman tasoituksella. Lisäksi kiertoasema ja aika on sidottava yhteen anturitekniikan avulla. Puutteena voidaan pitää säännöllistä liikerataa, mutta toisaalta edut ovat kiistattomia. Lisäksi referenssistä voidaan rakentaa liikuteltava, jolloin kalibrointeja voidaan suorittaa myös ulkona (GPS) ja muutenkin joko laboratorioolosuhteissa tai käytännön olosuhteissa.

#### 4.2 Kalibroinnin suorittaminen

Automaattisesti prismaa seuraavan takymetrilaitteiston staattinen mittaustarkkuus voidaan kalibroida mittauskoekentän avulla. Tampereen teknillisen yliopiston

TTY:n koekentällä on mittauspilarit, joiden keskinäinen sijaintikeskivirhe on noin 0,2 mm ja korkeuskeskivirhe 0,1 mm. Koje kiinnitetään yhteen pilariin ja prisma kiinnitetään vuoron perään kuhunkin kolmeen muuhun pilariin. Toistettujen havaintojen erojen perusteella voidaan laskea mittauksen sisäinen hajonta. Oikeiden koordinaattien avulla voidaan määrittää ulkoinen tarkkuus.

Kinemaattista kalibrointia on TTY:ssä tehty ympyrätestiradan avulla. Kalibroitavan takymetrin prisma (tai vaihtoehtoisesti satelliittipaikantimen antenni) kiinnitetään kallistettavassa tasossa pyörivään puomiin. Puomin kiertoasento määritetään pyörimisakselille kiinnitetyn pulssianturin avulla. Anturi on kytketty tietokoneen mittauskorttiin. Kalibroitavan laitteen paikannustieto johdetaan samaan tietokoneeseen, jolloin paikantimesta tuleva mittaustieto voidaan ajallisesti kytkeä puomin senhetkiseen kiertoasentoon. Esimittausten avulla puomin liikerrata sidotaan mittauskoordinaatistoon. Tämä tapahtuu staattisena mittauksena, jossa määritetään kiertoradan 3D-pisteitä ulkoisessa mittauskoordinaatistossa. Näihin sovitetaan ympyrä, jolloin testirata on määritetty.



*Kuva 1. Tarkkuustutkimuksissa käytetty ympyrätestirata. Tieto puomin kiertoasennosta saadaan pulssianturin avulla. Nopeutta voidaan säätää portaattomasti. Esimittauksilla rata sidotaan mittauskoordinaatistoon.*

## **5 Esimerkkejä kinemaattisten paikannusjärjestelmien tarkkuudesta**

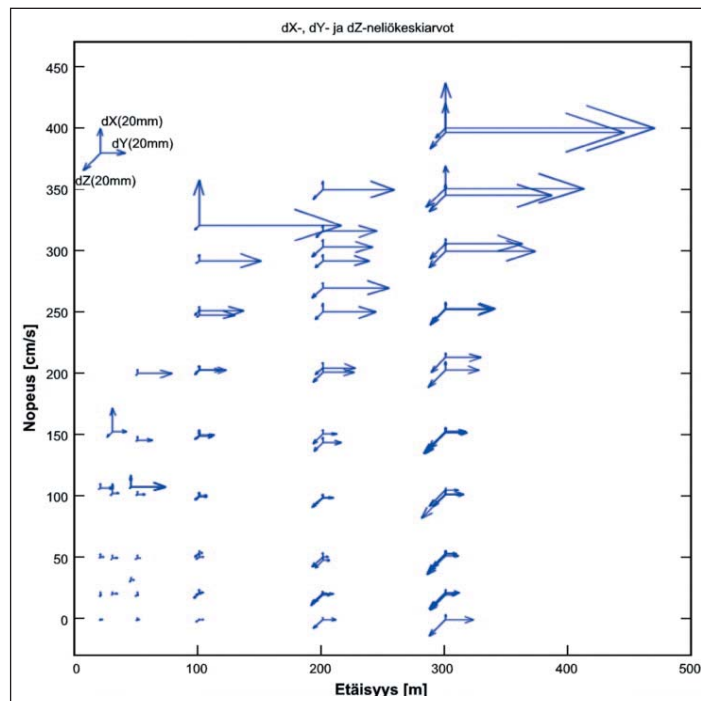
Seuraavassa on esimerkkeinä joitakin tuloksia sekä kinemaattisen takymetri-paikannuksen että kinemaattisen satelliittipaikannuksen tarkkuustutkimuksista. Laitteita ja olosuhteita ei tarkemmin yksilöidä. Tulosten esittelyllä on tarkoitus antaa lukijalle mielikuva kinemaattisen paikannusmittauksen tarkkuusluokasta.

### 5.1 Takymetrimittaus

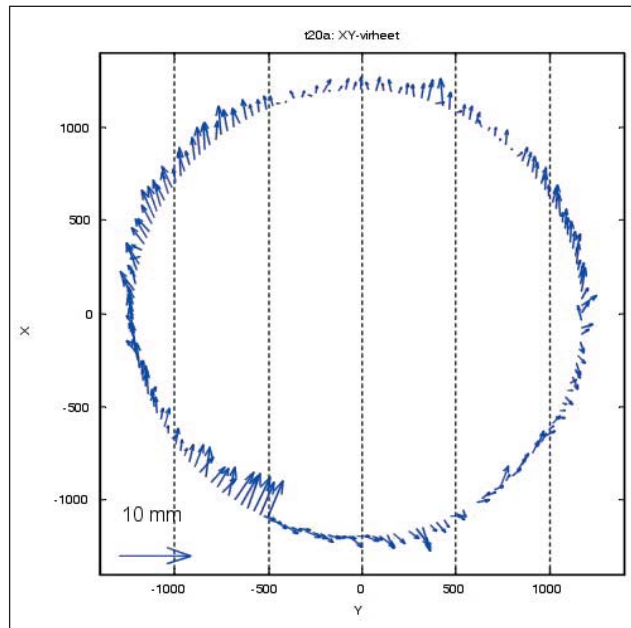
Kalibrointi suoritettiin edellä kuvatulla ympyrätestiradalla. Etäisyys takymetrillä prismaan vaihteli välillä 20...300 m. Prismat ratanopeus vaihteli välillä 0,2...4,0 m/s. Sääolosuhteet testien aikana vaihtelivat. Yhteenvedo tuloksista on esitetty kuvassa 2. Tässä kuvassa on esitetty todettujen sijaintipikkeamien neliölliset keskiarvot etäisyyden ja liikenopeuden funktiona kullekin koordinaatille erikseen. Kuvasta voidaan todeta, että liikenopeudella 2 m/s sijaintipikkeamien neliöllinen keskiarvo on kertaluokkaa 20 mm. Tämä suure estimoit käsitettä keskiahjonta. Toisin sanoen noin kolmannes yksittäisistä poikkeamista ylittää kuvan mukaiset arvot.

Aivan esimerkinomaisesti esitetään kuvissa 3 ja 4 erään yksittäisen testin tuloksia. Kyseessä on etäisyydellä 20 m saavutettu taso- ja korkeustarkkuus. Tuloksien käsittelyssä on laskennallisesti haettu optimaalinen viive mittaushetkestä siihen, kun tulokset on siirretty ”työkoneelle” kyseisellä järjestelmällä. Perusteena on ollut minimoida tasopoikkeamien neliöllinen keskiarvo. Tässä tapauksessa vasteaika oli 0,379 s.

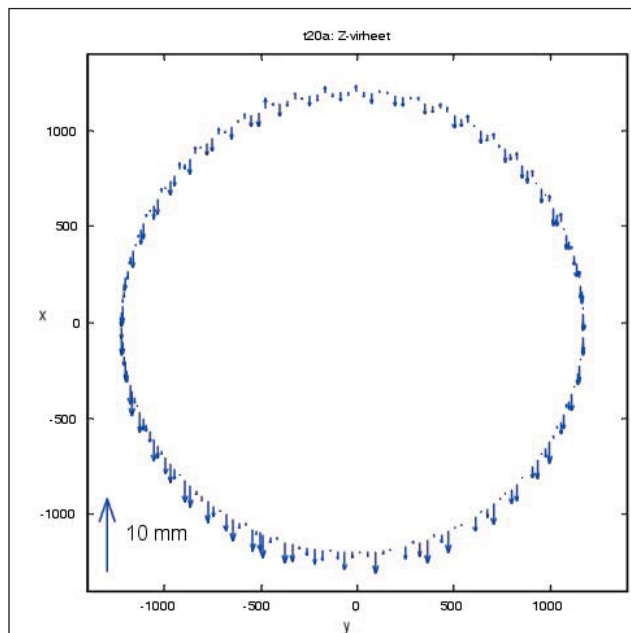
On huomattava, että takymetrihavainnot eivät ole toisistaan riippumattomia. Laite tekee sisäistä interpolaatiota ja kohdistuksessa ennakoitaa prismaa liikettä. Vasteajan määrittämisessä oletettiin, että kulma- ja etäisyysmittaus olivat samanaikaisia laitetoimittajan antamien tietojen mukaisesti. Malli on laajennettavissa niin, että kummallekin havaintotyyppille on oma vasteaika.



**Kuva 2.** Erään takymetrijärjestelmän mittaustarkkuuden riippuvuus etäisyydestä ja prismaan liikenopeudesta. X-koordinaatti vastaa tähtäyssuuntaa.



**Kuva 3.** Tasosijainnin epätarkkuudet takymetripaikannuksessa 20 m etäisyydellä. Viive mittauksesta tulosten valmistumiseen on tässä tapauksessa 0,379 s. Mittakaavavektorin pituus kuvassa on 10 mm. Kuvassa on esitetty eräs yksittäinen testitulos.



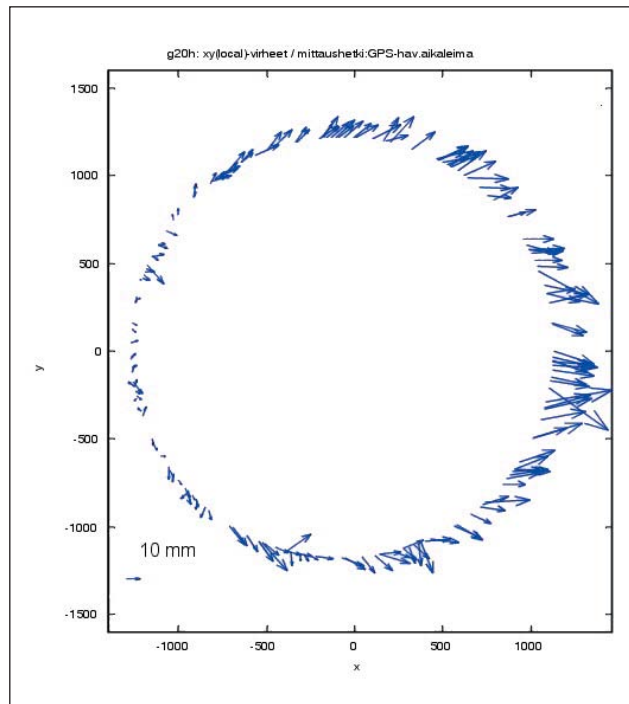
**Kuva 4.** Korkeuden epätarkkuudet takymetripaikannuksessa 20 m etäisyydellä. Tapaus on sama kuin kuvassa 2. Mittakaavavektorin pituus kuvassa on 10 mm.

## 5.2 RTK GPS-mittaus

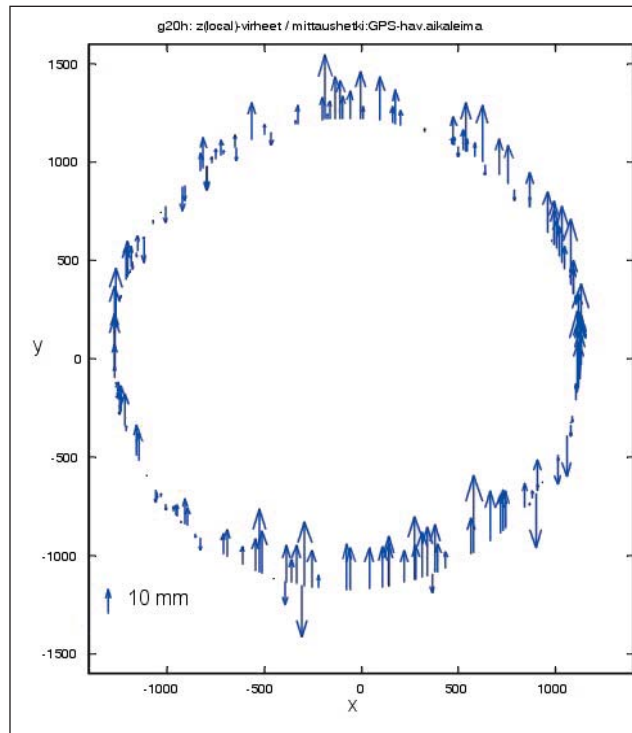
GPS-paikannusta testattiin samalla ympyrätestiradalla kuin takymetrimittaustakin. Erona on tietysti se, että paikannuksen tarkkuus on riippumaton sijainnista (jos jätetään huomiotta satelliittikonstellaatio, mahdolliset katveet yms.). Lisäksi GPS-paikannuksen tuloksiin sisältyy aikaleima, joka ilmaisee paikannuksen ajankohdan satelliittiajassa. Paikannuslaitteen sisäisen laskennan käyttämä aika tässä tapauksessa vaihteli samanlaisissakin olosuhteissa runsaasti, mutta myös käytettyjen satelliittien lukumäärä vaikutti asiaan. Tulosten siirto yhdessä mainitun laitteen prosessointiajan kanssa muodostaa viiveen, jonka kuluttua tulokset ovat käytettävissä. Tämän viiveen suuruus vaihteli satelliittien lukumäärän mukaan. Testeissä viive 5...7 satelliitilla oli 0,2...0,4 s ja 8 satelliitilla 0,4...0,8 s.

Liikenopeudella ei ollut merkittävää vaikutusta paikannustarkkuuteen. Paikannusvirheiden neliölliset keskiarvot vaihtelivat tyypillisesti välillä 10...30 mm. Kuvan 5 esimerkissä olevaan systemaattiseen virheeseen vaikuttanee osittain paikallisen mittauskoordinaatiston määrittely.

Testituloksissa esiintyi räntäsateisella säällä maksimissaan noin 100 mm virheitä. Kyse ei ollut yksittäisistä virheistä, vaan jopa kymmenien mittausten ajautumasta, joka äkillisesti korjaantui. Tämän ilmiön syytä ei varmuudella kyetä selittämään.



**Kuva 5.** Kuvassa on esitetty eräs esimerkki RTK-GPS paikannuksen tasotarkkuudesta. Mittakaavavektorin pituus on 10 mm. Viive on tässä esimerkissä otettu huomioon GPS-mittauksen aikaleiman perusteella. Mittauskoordinaatiston määrittelyn virhe voi näkyä systemaattisena virheenä.



**Kuva 6.** Kuvassa 5 esitetyn tapauksen korkeustarkkuus.

### Viiteluettelo

Heikkilä, R. and Jaakkola, M. (2003). Intelligent Road Construction Site – Development of Automation into Total Working Process of Finnish Road Construction. 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Eindhoven, the Netherlands, September 21-25, 2003.

Hennes, M. (2000). Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit trackender Totalstationen. Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München, 13.-17.3.2000, in Schnädelbach, K., Schilcher, M. (Hrsg.) Ingenieurvermessung 2000, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 334 - 339.

Retscher, G. (2002). Multi-Sensor Systems for Machine Guidance and Control. FIG XXII International Congress, Washington, D.C., USA, April 19-26, 2002.

Salmenperä, H. (2001). Virheteorian ja tasoituslaskun alkeet. TTKK Geoinformatiikka 2001.

Santala, J. (2003). Robottitakymetrin kinemaattisen mittauss moodin kalibrointimenetelmän kehittäminen ja ensimmäiset tulokset. Maankäyttö 3/2003, s. 42-43.