

Heikki Virekunnas

KAUPALLISEN GPS-INS-LAITTEEN TARKKUUDEN MITTAUS

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Jussi Collin
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Heikki Virekunnas: Kaupallisen GPS–INS-laitteen tarkkuuden mittaus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Datafuusiolla on mahdollista saada parempia tuloksia yhdistämällä useiden antureiden mittauksia. Tässä työssä mitataan VectorNav VN-200 GPS–INS-laitteen tarkkuutta käyttäen RTK–GPS-vastaanotinta vertailukohtana. RTK–GPS-laitteistolla saavutetaan hyvissä olosuhteissa senttimetreissä mitattava tarkkuus. GPS–INS-laite käyttää datafuusiota yhdistämään GPS-satelliittipaikantimen ja inertiasuunnistusantureiden (kiihtyvyyssanturit, gyroskooppi, barometri) mittauksia saavuttaakseen paremman tuloksen kuin yksittäisellä anturilla.

Mittaukset suoritettiin kävellen ulkotiloissa. Kummatkin laitteistot olivat tukevasti kiinnitetty toisiinsa, joten mittauksia voitiin suoraan verrata toisiinsa. GPS–INS-laitteiston absoluuttisen tarkkuuden todettiin olevan tyypillisen kuluttajakäyttöön suunnatun vastaanottimen tasoa. Laitteiston edut ovat kuitenkin pienten ja lyhytaikaisten liikkeiden, kuten askeleiden, mittaamisessa.

Avainsanat: satelliittipaikannus, inertiasuunnistus, datafuusio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. PAIKANNUSMEMETELMIEN TEORIAA	2
2.1 Satelliittipaikannus.....	2
2.2 INS-paikannus	3
2.3 GNSS–INS-fuusio.....	4
3. MITTAUSJÄRJESTELYT	6
3.1 Käytettävä laitteisto.....	6
3.2 Mitattavat tiedot	6
3.3 Mittaus	7
3.4 Datan synkronointi.....	7
4. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY	9
4.1 Mittaustulokset.....	9
4.2 Tulosten vertailu referenssiin.....	10
4.3 Virhelähteet.....	12
4.4 Laitteiston soveltuvuus	13
5. YHTEENVETO	14
LÄHTEET.....	15

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AHRS	Attitude Heading Reference System
Beidou	Kiinan tasavallan navigaationsatelliittien perhe
DGPS	Differential GPS
EKF	Extended Kalman filter
ESA	European Space Agency
EU	Euroopan Unioni
Galileo	EU:n ja ESA:n satelliittipaikannusjärjestelmä
GLONASS	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema, Venäjän paikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
KF	Kalman filter
RTK	Real-time kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
TOA	Time of Arrival
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
UKF	Unscented Kalman filter

1. JOHDANTO

Teknologinen kehitys on tuonut monelle eri alalle uusia mahdollisuuksia. Paikannusteknologian kehittyminen on mahdollistanut monia sijaintitietoa hyödyntäviä sovelluksia autonomisista laitteista urheilusuoritusten analysointiin. Monessa sovelluskohteessa muutamien metrin tarkkuus on riittävä, eikä sijaintia tarvitse päivittää montaa kertaa sekunnissa. Monessa sovelluksessa tarkkuudesta on kuitenkin merkittävää hyötyä, tai sitä vaaditaan toimivaan järjestelmään.

Alle metrin tarkkuuteen yltävien paikannuslaitteiden korkeat kustannukset ovat pitäneet suuren tarkkuuden paikannusmenetelmät kuluttajalaitteiden saavuttamattomissa. Viime vuosina on kuitenkin kehitetty erilaisia ratkaisuja tarkkuuden parantamiseksi yhdistämällä usean eri anturin mittausdataa niin kutsutulla datafuusiolla. Yhdistämällä GPS-vastaanotin inertia-anturiin, saadaan kahdesta toisistaan täydentävästä paikannusjärjestelmästä yhdistämällä parempi sijaintitieto, kuin kummastakaan anturista yksinään.

Tässä työssä mitataan VectorNav VN-200 GPS–INS-laitteen tarkkuutta käyttäen RTK–GPS laitteistoa vertailukohtana ja selvitetään millaisiin tarpeisiin GPS–INS-laitteet soveltuvat. Työn luvussa 2 perehdytään satelliitteihin perustuvaan paikannukseen, inertia-anturiin perustuvaan paikannukseen, sekä datafuusioon paikannuksessa ja GPS- ja INS-laitteiden yhteydessä. Kolmannessa luvussa esitellään mittausjärjestelyt kaupallisen GPS–INS-paikannusjärjestelmän tarkkuuden mittaamiseksi ja lopussa käydään läpi saadut tulokset sekä johtopäätökset.

2. PAIKANNUSMEMETELMIEN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään muutamaa eri paikannusmenetelmää sekä niihin liittyviä tekniikoita yleisellä tasolla. Luvussa 2.1 esitellään satelliitteihin perustuvia paikannusjärjestelmiä, luvussa 2.2 esitellään inertia-antureihin perustuvaa paikannusta ja luvussa 2.3 esitellään keinoja paikannusdatan yhdistämiseksi.

2.1 Satelliittipaikannus

Satelliittipaikannusjärjestelmät (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS) perustuvat saapumisajan mittauksiin (engl. Time of Arrival, TOA), jossa satelliitin lähettämää aikaleimaa verrataan vastaanottimen kelloon. Kun molemmat kellot ovat synkronoitu samaan aikaan, saadaan signaalin kulkemasta ajasta mitattua etäisyys satelliitin ja vastaanottimen välille. Kolmiulotteisen sijainnin määrittämiseen tarvitaan etäisyys kolmeen satelliittiin. [1, s. 163-164]

Satelliittien ja vastaanottimien kellot eivät käytännössä käy samassa tahdissa, jolloin mittauksiin syntyy virhettä. Satelliittien kellojen virhettä mitataan satelliittijärjestelmän maasemilla ja virhe välitetään satelliitin lähettämässä signaalissa. Näiden virheiden vuoksi vastaanottimen mittauksia kutsutaan pseudoetäisyyksiksi, erotuksena todellisesta etäisyydestä. Vastaanotin tekee korjaukset satelliittien kelloihin. Vastaanottimen kellon virhe on kuitenkin edelleen tuntematon, mistä syystä tarvitaan neljäs mittaus, jolloin virhe saadaan laskettua. [1, s. 165]

Maailmassa on neljä merkittävää satelliittipaikannusjärjestelmää, joista tunnetuin on Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä NAVSTAR Global Navigation System (GPS). GPS-järjestelmä saavutti täyden toimintakyvyn vuonna 1993, jolloin 24 satelliittia oli radallaan ja käytössä [2, s. 3-4]. Toinen täysin toimintakykyinen satelliittipaikannusjärjestelmä on Venäjän puolustusministeriön ylläpitämä GLONASS, joka myös saavutti täyden konstellation vuonna 1995 [3]. Kolmas järjestelmä on Euroopan unionin kehittämä Galileo, joka on edelleen kehitysvaiheessa, mutta jo toimintakuntoinen. Täysi toimintakunto on tavoitteena saavuttaa vuonna 2020. [4] Neljäs satelliittipaikannusjärjestelmä on Kiinan kehittämä BeiDou-järjestelmä, joka on pitkälti täydessä toimintakunnossa vuoden 2019 lopussa [5, s. 7].

Satelliittipohjaiseen paikannukseen on kehitetty useita parannusjärjestelmiä, jotka perustuvat DGPS (Differential GPS) -tekniikkaan, jossa tunnetulla paikalla sijaitsevan tuki-

aseman mittauksia verrataan todelliseen sijaintiin. Mittauksista voidaan päätellä eri virhelähteiden parametreja. Yksi näistä järjestelmistä on satelliittipohjainen parannusjärjestelmä (engl. satellite-based augmentation system, SBAS), jossa korjaustiedot välitetään satelliittien välityksellä. Euroopassa on käytössä European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) ja Pohjois-Amerikassa U.S. Wide Area Augmentation System (WAAS). Nämä ovat laajalla alueella toimivia parannusjärjestelmiä. [2, s. 379-381, 355, 432] Satelliittipohjaisia parannusjärjestelmiä pienemmällä alueella käytettävä RTK (real-time kinematic) -parannusjärjestelmä mahdollistaa senttimetrin tarkkuuden jopa 50 kilometrin säteellä tukiasemasta. Tällaisia järjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi ilmalusten automaattiseen lähestymiseen, maanmittaukseen tai muihin tarkkuutta vaativiin sovelluksiin. [2, s. 398]

Satelliittipaikannuksen virheet syntyvät monesta eri osasta paikannusketjussa. Merkittävä osa virheestä tavallisessa GNSS-vastaanotuksessa syntyy ionosfäärin aiheuttamista viiveistä, jotka voidaan lähes kokonaan kumota käyttäen kaksitaajuisia vastaanotinta. Varsinkin kaupunkiympäristössä monitie-eteneminen ja signaalin varjostuminen vaikuttavat paikannuksen tarkkuuteen. Myös satelliittien geometria eli sijoittuminen taivaalla voi vaikuttaa sijainnin tarkkuuteen. Virheiden vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä usean eri järjestelmän havaintotietoja ja käyttämällä eri parannusjärjestelmiä. [2, s. 302-322]

2.2 INS-paikannus

Inertiasuunnistusjärjestelmät (engl. Inertial Navigation System, INS) perustuvat inertia-anturin gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin tekemiin mittauksiin. Lisäksi usein käytetään magnetometriä tarkemman suunnan säilyttämiseksi. Inertia-anturit (engl. Inertial Measurement Unit, IMU) jaetaan yleensä kahteen luokkaan, gimbaalipohjaisiin ja strapdown-tyyppisiin inertia-antureihin. Gimbaalipohjaiset anturit sisältävät vakautetun alustan, joka gyroskoopin perusteella pitää anturit aina samassa asennossa suhteessa ympäröivään maailmaan. Tällöin kiihtyvyyssanturin antamat lukemat ovat aina oikeassa koordinaatistossa. Strapdown-anturit nimensä mukaisesti kiinnitetään suoraan mitattavaan kappaleeseen, jolloin kiihtyvyyssanturi mittaa kappaleen koordinaatistossa. Mittaukset muunnetaan ympäristön koordinaatistoon gyroskoopin mittausten perusteella. Suurin osa käytettävistä inertia-antureista on strapdown-tyyppisiä ja vain kalliimmissa, suurinta tarkkuutta vaativissa käyttökohteissa, kuten avaruusraketeissa, käytetään vakautetun alustan inertia-antureita. [6, s. 57-58, 77-82]

Yleisimmissä strapdown-tyyppisissä inertia-antureissa on joko MEMS (Micro Electro Mechanic System) -tyyppinen tai kuituoptikkaan perustuva gyroskooppi ja MEMS-tyyppinen kiihtyvyyssanturi. MEMS-anturit ovat usein pienempiä ja edullisempia kuin kuituoptiset gyroskoopit, mutta niiden tarkkuus ei ole yhtä hyvä. MEMS-anturit ovat kuitenkin jo päässeet navigointiin riittävään tarkkuuteen, minkä vuoksi kuituoptisia gyroskooppeja on alettu korvata edullisemmilla MEMS-gyroskoopeilla. [7, 1, s. 98-99]

Sijainnin ja nopeuden laskeminen inertiasuunnistusjärjestelmässä perustuu kiihtyvyyssanturin mittausten integrointiin. Integroimalla gyroskoopin mittaamaa kulman muutosnopeutta saadaan inertia-anturin asento, jolloin kiihtyvyyssanturin mittaukset voidaan muuntaa ympäristön koordinaatistoon. Integroimalla projisoituja kiihtyvyyksiä saadaan nopeus ja edelleen integroimalla saadaan sijainti käyttämällä dead reckoning -menetelmää. [1, s. 6-7]

INS-järjestelmät ovat hyvin tarkkoja lyhyellä aikavälillä, mutta sijainnin tarkkuus huononee nopeasti antureiden epätarkkuuksien kertyessä. Erityisesti edullisemmissa MEMS-tyyppisissä antureissa on merkittäviä vinoumia, joita voidaan vähentää korjauksilla kalibrointitietojen perusteella. Kaikki virheet eivät kuitenkaan ole deterministisiä, jolloin niitä ei voida korjata. Myös integroinnista itsestään tulee muun muassa kvantisointivirheitä, jotka voivat kertyessään olla merkittäviä. Virheitä voidaan kuitenkin mallintaa, jolloin niitä voidaan huomioida sijaintia laskettaessa. [8]

Inertiasuunnistusjärjestelmiä käytetään usein ilmailualalla, laivoissa sekä ohjautuvissa aseissa. Inertiasuunnistusjärjestelmät toimivat itsenäisesti eivätkä tarvitse tietoa ulkopuolelta, mikä tekee järjestelmästä luotettavan ja vaikeasti häiritävän. Virheiden kasautuminen tekee kuitenkin inertiasuunnistuksesta epätarkkaa pidemmällä aikavälillä, minkä vuoksi inertiasuunnistusta käytetäänkin useimmiten yhtenä osana muiden navigointijärjestelmien kanssa. [1, s. 8]

2.3 GNSS–INS-fuusio

Satelliittipaikannus- tai inertiasuunnistusjärjestelmä yksinään ei tavallisesti mahdollista riittävää paikannustarkkuutta, kun paikannuksen täytyy toimia luotettavasti ja tarkasti missä päin maailmaa tahansa. Yhdistämällä nämä kaksi järjestelmää datafuusion keinoin saadaan kuitenkin molempien järjestelmien parhaat ominaisuudet käyttöön. [9]

Käytettävä fuusioalgoritmi määräytyy usein käyttökohteen mukaan, jolloin algoritmissa voidaan käyttää myös soveltuvaa liikemallia, mikä parantaa osaltaan paikannuksen tark-

kuutta. Yleisimmin paikannusfuusioon käytetään Kalman-suodinta tai jotakin sen johdannaista. Joissain käyttötapauksissa voidaan Kalman-suotimeen myös yhdistää erilaisia sumeita päättelymenetelmiä, jotka voidaan opettaa parantamaan suodatustulosta. [8, 9]

GNSS–INS-fuusiossa käytettävät Kalman-suodintoteutukset jaetaan yleensä karkeasti kahteen eri luokkaan, väljästi ja tiiviisti kytkettyihin toteutuksiin. Jako kuvaa sitä, kuinka paljon suodatin muuttaa kunkin alijärjestelmän toimintaa verrattuna alijärjestelmän toimintaan yksin. Väljästi kytketyissä toteutuksissa kummankin alijärjestelmän ulostuloja kohdellaan erillisinä antureina, joiden tuottamat tulokset sitten yhdistetään. Tällöin järjestelmän tarkkuus paranee, kun molemmat anturit toimivat, mutta jos esimerkiksi GNSS ei ole saatavilla, toimii järjestelmä kuten yksittäinen inertiasuunnistusjärjestelmä. [10, 11]

Tiiviisti kytketyt suodatintoteutukset vaikuttavat alijärjestelmien sisäiseen toimintaan eri tavoin. Eri antureiden raakoja mittaustietoja, kuten GNSS-vastaanottimen pseudoetäisyyksiä tai inertia-anturin kiihtyvyyksimittauksia, käsitellään suotimessa suoraan, jolloin mahdollistetaan parempi tarkkuus. Esimerkiksi GNSS-mittauksia voidaan käyttää inertia-anturin jatkuvaan kalibrointiin tai inertia-anturin mittaamaa asentotietoa voidaan hyödyntää päättelemään, mitä satelliitteja pitäisi olla näkyvissä GNSS-vastaanottimella, kun järjestelmä liikkuu eri asentoon. Tiiviisti kytketyllä suodatintoteutuksella saavutetaan yleensä parempi suorituskyky kuin väljästi kytketyllä, ja suodintoteutuksen suorituskyky on tavallisesti vähemmän riippuvainen inertiasuunnistusjärjestelmän laadusta ja hinnasta. [10, 11]

3. MITTAUSJÄRJESTELYT

Tässä työssä tehtävissä mittauksissa on tavoitteena selvittää edullisen kaupallisen GPS–INS-paikannuslaitteen tarkkuus, käyttäen vertailukohtana kertaluokkaa kalliimpaa laitteistoa, jonka tarkkuus on tunnettu.

3.1 Käytettävä laitteisto

Käytettäväksi GPS–INS-laitteistoksi valikoitui VectorNavin VN-200, joka on pienikokoinen ja vähävirtainen GPS–INS-vastaanotin. VN-200 sisältää suorittimen ja ohjelmiston, joka Kalman-suotimen avulla tekee datafuusion ilman ulkoista laskentaa. Käytössä on vastaanottimen suojatumpi Rugged-malli, jolle on myös tehty lämpötilakalibrointi. VN-200 on suunniteltu käytettäväksi muun muassa miehittämättömissä ilma-aluksissa, lisätyn ja virtuaalitodellisuuden sovelluksissa sekä ilmailunavigoinnissa. VN-200 edustaa uuden sukupolven vähävirtaisia MEMS-pohjaisia, integroituja inertiasuunnistusjärjestelmiä. [12, 13]

VN-200 GPS–INS-laitteisto on kytkettynä Raspberry Pi 3 -tietokoneeseen sarjaliikenneportin välityksellä datan keräystä varten. Laitteisto on rakennettu Suomen Akatemian rahoittaman OpenKin-projektin [14] yhteydessä. Laitteistolla ajettava ohjelmisto perustuu ROS (Robot Operating System) -järjestelmään [15] sekä Dereck Wonnacottin kehittämään ROS-ajuriin [16] VectorNavin GPS–INS-laitteille.

Referenssilaitteistona on käytössä NovAtelin DL-4 plus -GPS-vastaanottimet, joissa on tuki L1- ja L2-taajuuksille. Vastaanottimia käytetään RTK-tilassa 20 Hertsin taajuudella, jolloin saavutettava tarkkuus on paras mahdollinen. Ohjelmistona sijainnin jälkilaskennassa käytetään NovAtelin Inertial Explorer versiota 8.70 [17].

3.2 Mitattavat tiedot

GPS–INS-laitteistolta tallennetaan dataa 400 Hz taajuudella, jolloin datan päivitystaajuus on riittävä myös pieniin yksityiskohtiin. Tallennettavat tiedot sisältävät muun muassa GPS-vastaanottimen kellonajan nanosekunnin tarkkuudella, Kalman-suotimen laske-
man sijainnin LLA (Latitude, Longitude, Altitude) -muodossa, asentotiedon, nopeuden sekä GPS-ratkaisun tilan (fix).

Referenssilaitteistolla kerätään RTK-ratkaisun vaatimat raakamittaustiedot, kuten satelliittien pseudoetäisyydet, vaihemittaukset, Doppler-siirtymät sekä signaalikohinasuhteet.

3.3 Mittaus

Mittaus suoritettiin Tampereen Teknillisen Yliopiston pihalla kävelen. Mittalaitteisto kiinnitettiin vaellusrinkan rakenteisiin tukevasti, jolloin molemmat laitteet olivat tukevasti samalla etäisyydellä toisistaan. Kuvassa 1 on esitelty mittauslaitteisto.



Kuva 1. Mittauslaitteisto. GPS–INS-laite mustan kotelon päällä. GPS-vastaanotin repun sisällä. Tukiasemavastaanotin kytkettynä kiinteään antenniin.

Mittauspäivän keli oli puolipilvinen, lämpötila $+1^{\circ}\text{C}$. Laitteiston annettiin olla paikallaan useita minutteja GPS-satelliittien löytymiseksi ja signaalin vakaantumiseksi. Kuljettu reitti sisälsi useita kierroksia samaa reittiä suorakulmaista laatoituksen reunaan, kävelytietä, korkeuseroja sekä rakennusten katvealueita.

3.4 Datan synkronointi

Molemmista käytetyistä laitteistoista saadaan mittauksen aikaleima perustuen GPS-aikaan, mikä mahdollistaa mittauksen synkronoinnin keskenään. Aikamittauksen tarkkuus korreloi sijaintitarkkuuden kanssa, mutta on kuitenkin vain nanosekuntien luokassa, jolloin aikamittauksen tarkkuus ei ole ongelma. Datan synkronointi voidaan tehdä yhdistä-

mällä aikaleiman perusteella lähimmät mittaukset molemmista järjestelmistä, sillä korkean mittaustaajuuden vuoksi mittauspisteiden välillä tapahtuva liike on lähes olematonta kävelen tehdyissä mittauksissa.

4. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

Mittaustuloksista halutaan selvittää GPS–INS-laitteen tarkkuus käyttäen RTK–GPS-laitteistoa vertailukohtana. Tuloksista verrataan sekä absoluuttisen sijainnin tarkkuutta, että absoluuttisen nopeuden tarkkuutta käyttäen anturin yhdistettyä ratkaisua sekä pelkkää GPS-ratkaisua. Tulosten perusteella selvitetään, minkälaisiin käyttökohteisiin GPS–INS-laitteen tarkkuus soveltuu, mihin se ei riitä sekä mistä virheet mahdollisesti syntyvät.

4.1 Mittaustulokset

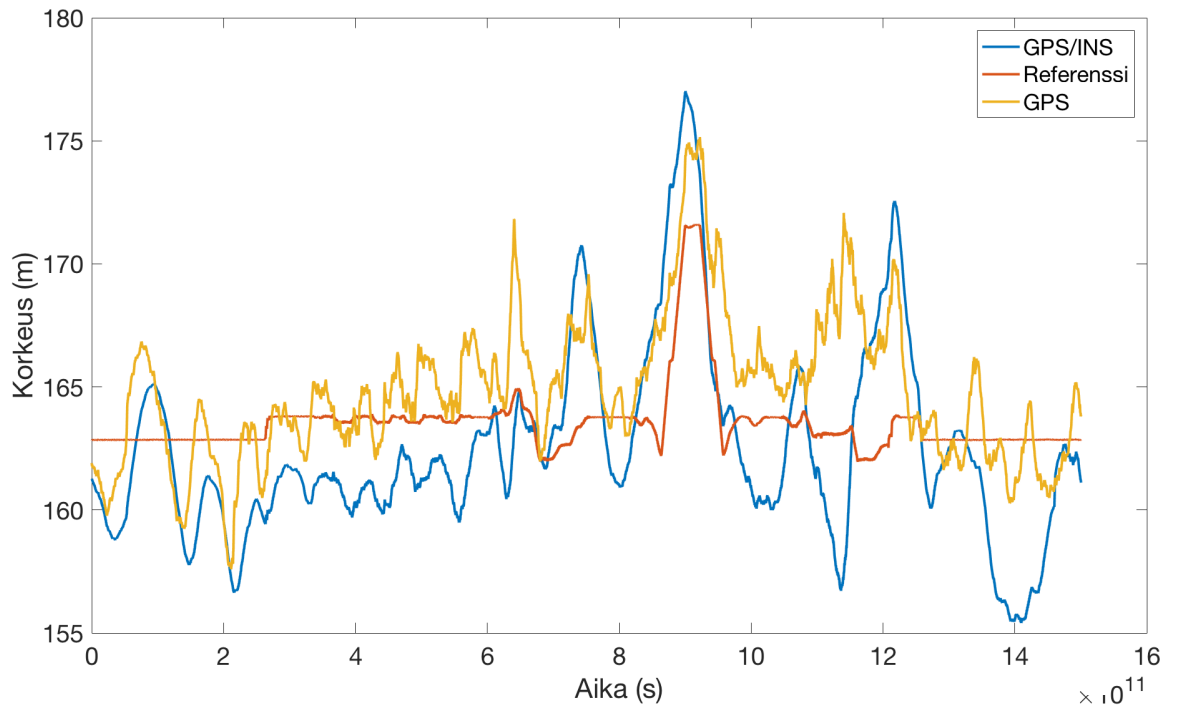
Dataa kerättiin 25 minuutin ajalta, jonka aikana kuljettiin kävellen noin 1,2 km matka. Reitti ja mittaukset on kuvattu kuvassa 2. Ilmakuva ei ole täysin ajantasainen, muun muassa kuvan keskellä oleva rakennus on purettu ja oikeassa reunassa oleva rakennus on valmistunut. Referenssilaitteiston tallennustiheys oli 20 Hz ja tutkittavan laitteiston tallennustiheys oli 400 Hz. Vertailua varten data tuotiin MATLAB-ohjelmistoon ja GPS-aikaleimat muunnettiin samaan muotoon.



Kuva 2. Mittauksissa kuljettu reitti. Sinisellä GPS–INS-mittaus, punaisella referenssi. Karttakuvat © 2018 DigitalGlobe

4.2 Tulosten vertailu referenssiin

Kuten kuvista 2 ja 3 nähdään, on sinisellä viivalla merkityllä GPS–INS-laitteen tallentamalla reitillä merkittävä ero punaisella merkittyyn referenssiin. Korkeuskuvaajasta nähdään, kuinka GPS-vastaanottimen epätarkkuus näkyy myös fuusioidussa korkeudessa. Yhdistetty korkeus seuraa pääosin keltaisella kuvattua GPS-vastaanottimelta suoraan tallennettua korkeuskuvaajaa lukuun ottamatta muutamaa kohtaa loppupuolella, joissa yhdistetty korkeus laskee, vaikka GPS-korkeus nousee tai säilyy suunnilleen samana.

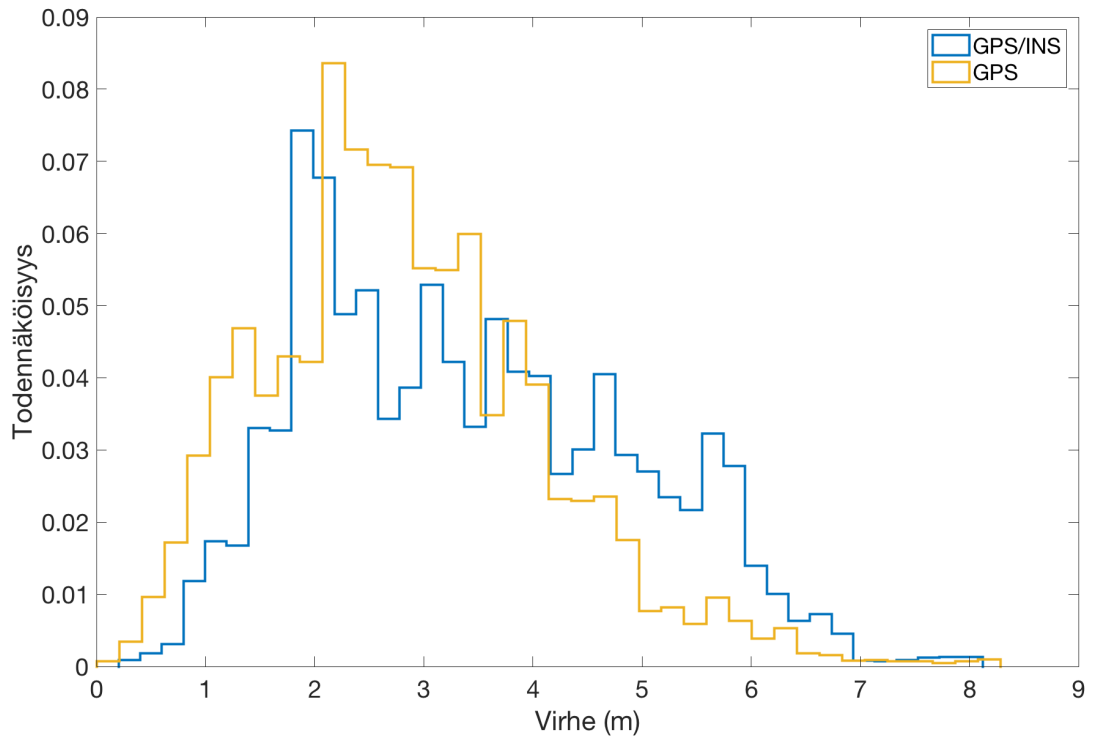


Kuva 3. Korkeuskuvaaja

GPS–INS-mittauksen korkeuden keskimääräinen virhe verrattuna referenssiin oli 2,85 metriä, ja pelkän GPS-korkeuden keskimääräinen virhe 2,09 m keskihajontojen ollessa vastaavasti 1,96 metriä ja 1,69 metriä.

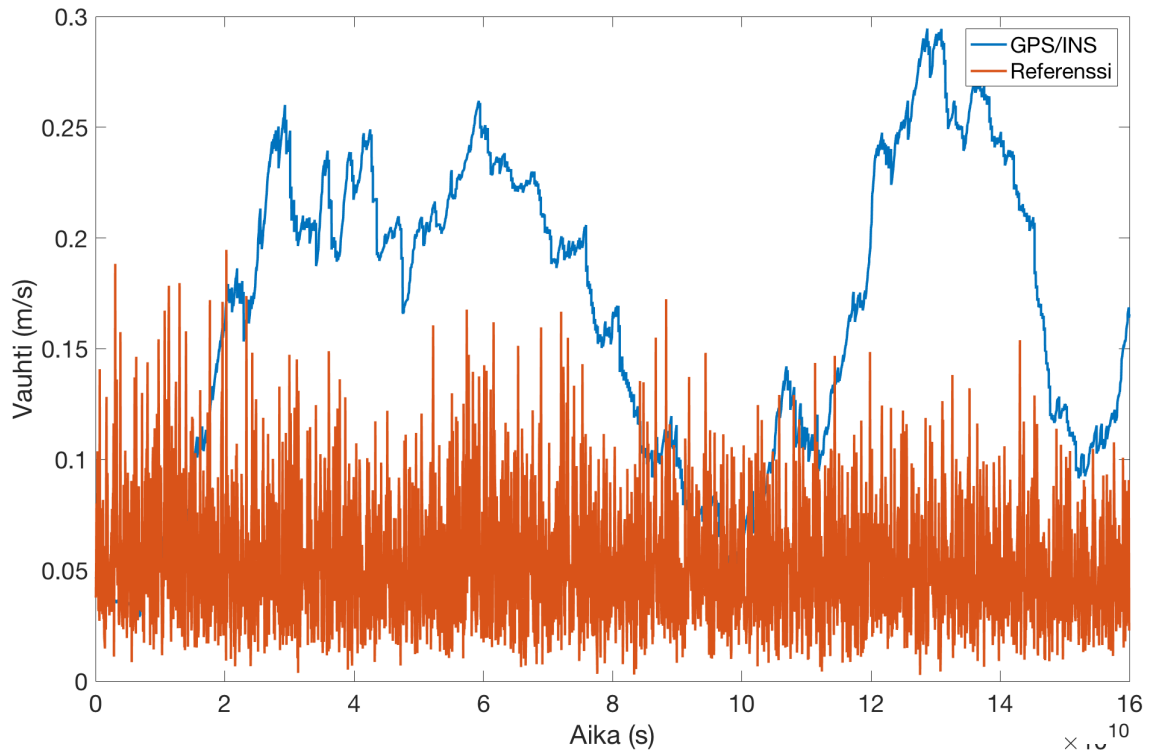
Vaakatasossa GPS–INS-mittauksen keskimääräinen virhe oli 3,42 metriä keskihajonnalla 1,48 metriä. Pelkän GPS-mittauksen keskimääräinen virhe oli 2,84 metriä keskihajonnalla 1,28 metriä.

Kuvasta 4 nähdään vaakasuuntaisen virheen jakaumat yhdistetylle sijainnille sekä GPS-sijainnille. Yhdistetyn sijainnin virhejakauma on hyvin samankaltainen, kuin pelkän GPS-mittauksenkin antama jakauma. Yhdistetyssä ratkaisussa 95% mittauksista sijaitsee 5,93 metrin säteellä referenssistä, kun taas GPS-ratkaisussa 95% mittauksista sijaitsee 5,12 metrin säteellä. Tarkkuus on vertailukelpoinen tyypillisten kuluttajatason GPS-laitteiden, kuten älypuhelimien, kanssa. [18]

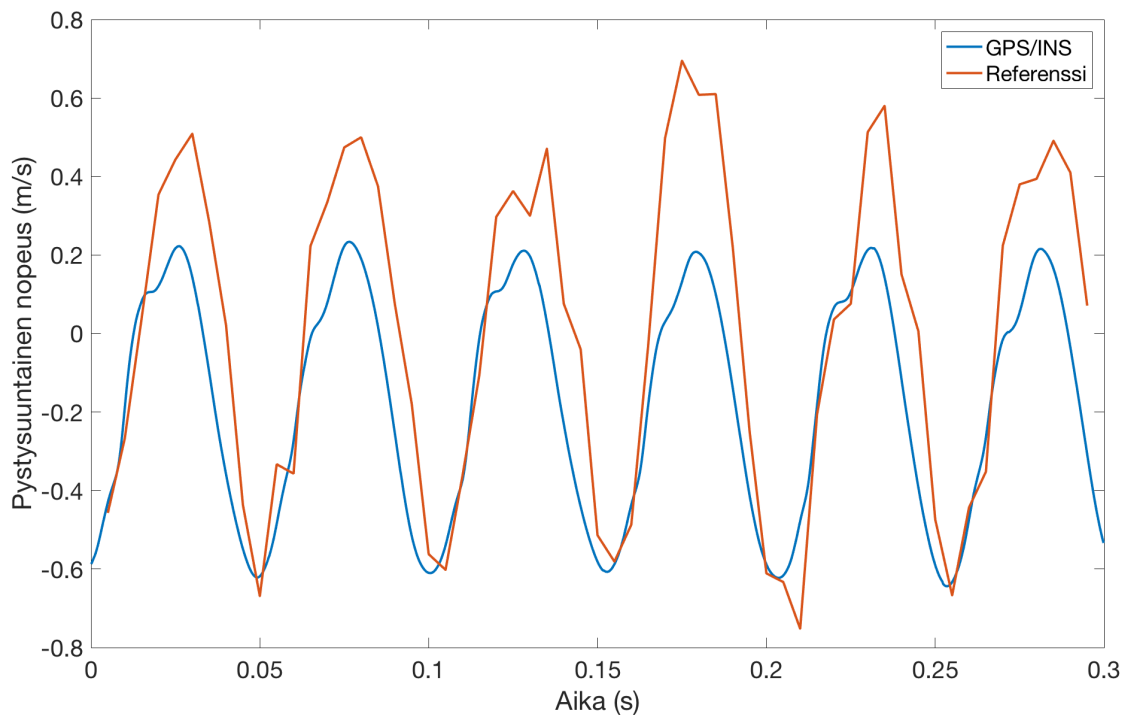


Kuva 4. Vaakasuuntaisen virheen jakauma

Sijainnin lisäksi vauhti on hyödyllinen suure, jota voidaan vertailla laitteiden välillä. Kuvasta 5 nähdään, kuinka GPS–INS-laitteen ilmoittama vauhti vaihtelee levossa ollessaankin melko suuresti verrattuna referenssiin. Tästä huomataan myös, kuinka RTK–GPS:nkin rajat tulevat esiin. GPS–INS-laitteen edut kuitenkin ilmenevät, kun tarkastellaan esimerkiksi pystysuuntaista nopeutta lyhyellä aikavälillä. Kuten kuvasta 6 nähdään, suurempi tallennustiheys mahdollistaa pienempien yksityiskohtien hahmottamisen, ja mahdollistaa esimerkiksi askeleiden vertailun toisiinsa.



Kuva 5. Vauhti levossa



Kuva 6. Pystysuuntainen nopeus kävellessä

4.3 Virhelähteet

Käytetty GPS–INS-laite sisältää u-bloxin valmistaman 50-kanavaisen L1 GPS-vastaanottimen, joka on ominaisuuksiltaan vastaava, kuin monet kuluttajakäyttöön tehdyt vas-

taanottimet [13]. Vain yhtä taajuutta ja yhtä satelliittijärjestelmää käyttävän vastaanottimen tarkkuus on riippuvainen hyvästä näkyvyydestä satelliitteihin, ionos- ja troposfäärin viiveistä ja monitie-etenemisestä. Vastaanotin ei myöskään hyödynnä ulkoisia parannusjärjestelmiä, jotka voisivat kompensoida osaa virhelähteistä.

GPS–INS-laite käyttää laajennettua Kalman-suodinta GPS:n ja INS:n mittausten yhdistämiseksi, mutta todennäköisesti toteutus on väljästi kytketty. Käytetyt INS-anturit ovat yksilökohtaisesti kalibroituja, mikä pienentää antureiden virheitä, mutta edelleen kaikkia INS-antureiden virheitä ei pystytä korjaamaan.

Referenssinä käytetty RTK–GPS ei ole myöskään täysin virheetön, sillä samat virhelähteet, mitkä vaikuttavat tutkittavan laitteiston GPS-tarkkuuteen, vaikuttavat siihenkin. Tukiaseman mittauksia käyttämällä saadaan kuitenkin merkittävää osaa virheistä kompensoitua, mutta esimerkiksi tukiaseman sijainnin tarkkuus vaikuttaa suoraan lopputulokseen. RTK–GPS ei myöskään ole täysin soveltuva lyhyen aikavälin mittauksiin, missä INS-laitteistot ovat parhaimmillaan, joten tarkastelua joudutaan rajoittamaan näiltä osin.

4.4 Laitteiston soveltuvuus

Kuten edellä on todettu, ei tämän GPS–INS-laitteiston absoluuttinen tarkkuus riitä korvaamaan senttimetritarkkuuteen kykeneviä satelliittipaikannuslaitteita. GPS–INS-laitteisto kykenee kuitenkin mittaamaan asentoa ja sen muutoksia suurella tiheydellä. Näitä laitteistoja markkinoidaankin pääosin ilmailukäyttöön, jossa absoluuttisen sijainnin tarkkuus on vähemmän merkitsevä, ja ilma-aluksen asento on olennainen tieto muun muassa automaattisen ohjauksen käytössä.

Suuri tallennustiheys mahdollistaa laitteiston käytön myös hyvin lyhytaikaisten tapahtumien, kuten juoksuaskeleiden, mittaamiseen. Tällöin tyypillisesti käytetään inertia-antureita, kameroita tai esimerkiksi paineantureita askeleen analysointiin. Nämä voivat kuitenkin rajoittaa käyttöympäristöä tai tarkkuutta pidemmällä aikavälillä. GPS–INS-laitteiston saama lisätieto verrattuna pelkkiin inertia-antureihin mahdollistaa suuremman tarkkuuden mittauksen missä tahansa ulkotiloissa. [19]

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin VectorNav VN-200 GPS–INS-laitteen tarkkuutta verrattuna RTK–GPS-laitteeseen. Laitteita testattiin kävelemällä ulkotiloissa laitteiden ollessa kiinnitettynä vaellusrinkkaan. Mittauksia vertailemalla todettiin GPS–INS-laitteen absoluuttisen sijainnin tarkkuuden olevan tyypillisen kuluttajakäyttöön suunnitellun GPS-vastaanottimen tasoa, mutta integroitujen INS-antureiden ansiosta lyhyen aikavälin tarkkuus ja suuri tallennustiheys mahdollistavat uusien sovellusten kehittämisen.

GPS–INS-laitteiston todettiin sopivan erityisen hyvin ulkotiloissa tapahtuvan, pieniä muutoksia sisältävän liikkeen, kuten kävelyn tai ilma-aluksen lennon, mittaamiseen. GPS-vastaanotin määrittää karkean, absoluuttisen sijainnin, kun taas INS-anturit tallentavat pienet ja nopeat liikkeet. Yhdistämällä nämä mittaustulokset, voidaan esimerkiksi analysoida yksittäisiä juoksu- tai kävelyaskeleita varsin tarkasti.

Tässä työssä keskityttiin lähinnä absoluuttisen sijainnin tarkkuuteen, mutta laitteiston vahvuudet ovat lyhyen aikavälin suhteellisissa mittauksissa. Näitä ominaisuuksia voitaisiin paremmin tutkia vertaamalla mittauksia kalliimpiin ja tarkempiin inertia-antureihin.

LÄHTEET

- [1] P.D. Groves, Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, Artech House, Boston (MA), 2008, xvi, 518 p.
- [2] E.D. Kaplan, C.J. Hegarty, Understanding GPS: principles and applications, 2nd ed. Artech House, Boston, 2005, 703 p.
- [3] Glonass history, Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>
- [4] What is Galileo?, European Space Agency, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo
- [5] Development of the BeiDou Navigation Satellite System (Version 4.0), China Satellite Navigation Office Development of the BeiDou Navigation Satellite System. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Official-document/202001/P020200116329195978690.pdf>
- [6] Grewal, MS, Andrews, AP, & Bartone, Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration, Wiley, Somerset, 2013, 501 p.
- [7] O. Deppe, G. Dorner, S. König, T. Martin, S. Voigt, S. Zimmermann, MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors—Recent Improvements and Comparison, Sensors, Vol. 17, Iss 3, 2017, pp. 567. Saatavilla (viitattu 27.4.2020): <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5375853/>.
- [8] A. Noureldin, T.B. Karamat, M.D. Eberts, A. El-Shafie, Performance enhancement of MEMS-based INS/GPS integration for low-cost navigation applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, Iss 3, 2009, pp. 1077-1096.
- [9] J.H. Ryu, G. Gankhuyag, K.T. Chong, Navigation System Heading and Position Accuracy Improvement through GPS and INS Data Fusion, Journal of Sensors, Vol. 2016, 2016, pp. 1-6.
- [10] G. Falco, M. Pini, G. Maruccio, Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios, Sensors, Vol. 17, Iss. 2, 2017, pp. 255.
- [11] M.S. Grewal, A.P. Andrews, Kalman Filtering : Theory and Practice with MATLAB, Wiley, Somerset, 2015, 578-583 p.
- [12] VectorNav Technologies Introduces New VN-200 GPS/INS Features at Sensor Expo 2013, PR Newswire, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://www.prnewswire.com/news-releases/vectornav-technologies-introduces-new-vn-200-gpsins-features-at-sensor-expo-2013-209511391.html>
- [13] VN-200 GPS-Aided INS, VectorNav Technologies, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://www.vectornav.com/products/vn-200>

- [14] OpenKin, Tampere University of Technology, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): [https://tutcris.tut.fi/portal/en/projects/openkin\(448ebae5-34af-4284-8ae3-d89f9fa1fdc9\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/projects/openkin(448ebae5-34af-4284-8ae3-d89f9fa1fdc9).html)
- [15] ROS Robot Operating System, Open Source Robotics Foundation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <http://www.ros.org>
- [16] Vectornav ROS Driver, D. Wonnacott, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://github.com/dawonn/vectornav>
- [17] Inertial Explorer, NovAtel Inc., verkkosivu (viitattu 27.4.2020): <https://novatel.com/products/waypoint-software/inertial-explorer>
- [18] F. van Diggelen, P. Enge, The World's first GPS MOOC and Worldwide Laboratory using Smartphones, Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), September 14 - 18, 2015, pp. 361-369.
- [19] P. Davidson, H. Virekunnas, D. Sharma, R. Piché, N. Cronin, Continuous Analysis of Running Mechanics by Means of an Integrated INS/GPS Device, Sensors, Vol. 19, Iss 6, 2019. Saatavissa (viitattu 27.4.2020): <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1480>