



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JARKKO TUOMI**  
**INERTIA-ANTURIEN HYÖDYNTÄMINEN**  
**KULKUNEUVOJEN LIIKETILAN HAVAINNOINNISSA**

Diplomityö

Tarkastajat: Jarmo Takala, Jussi Collin  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
3. huhtikuuta 2013

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

**JARKKO TUOMI: Inertia-anturien hyödyntäminen kulkuneuvojen liiketilan havainnoinnissa**

Diplomityö, 45 sivua

Kesäkuu 2014

Pääaine: Sulautetut järjestelmät

Tarkastajat: professori Jarmo Takala ja yliopistotutkija Jussi Collin

Avainsanat: inertia-anturit, liiketila, inertiamittausyksikkö

Tässä työssä perehdyttiin inertia-anturien hyödyntämiseen kulkuneuvojen liiketilan havainnoinnissa. Työn tavoitteena oli selvittää inertia-anturien soveltamismahdollisuuksia erilaisten kulkuneuvojen tapauksissa. Vaikka inertia-antureita käytetäänkin monipuolisesti eri teollisuuden aloilla, ei kaikkea anturien potentiaalia olla osattu vielä hyödyntää.

Työssä inertia-anturien hyödyntämistä kulkuneuvojen liiketilan havainnoinnissa tutkittiin kehittämällä kolme erillistä järjestelmää. Järjestelmien avulla suoritettiin kulkuneuvoihin kohdistuvia mittauksia, joiden perusteella inertia-anturien hyödyntämismahdollisuuksia pyrittiin selvittämään. Järjestelmät koostuivat inertiamittausyksiköistä, tallennuslaitteista sekä mahdollisista muista järjestelmistä, kuten GPS-vastaanottimesta. Vaikka työn mittaukset ja selvitykset suoritettiin henkilöautoille ja moottoripyörille, voidaan työn periaatteet kohdistaa myös muihin kulkuneuvoihin.

Diplomityössä havaittiin, kuinka inertia-antureita hyödyntämällä kulkuneuvon liiketila pystytään tarkasti mittaamaan. Kulkuneuvojen liiketilaa seuraamalla on mahdollista kehittää sekä turvallisempi että taloudellisempi liikenneympäristö. Lisäksi inertia-anturien avulla on mahdollista laajentaa kulkuneuvojen paikannus kattamaan satelliittien katveet.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Signal Processing and Communications Engineering

**JARKKO TUOMI: Usage of Inertial Sensors in Observing the Motions of Vehicles**

Master of Science Thesis, 45 pages

June 2014

Major: Embedded Systems

Examiner: Professor Jarmo Takala and Research Fellow Jussi Collin

Keywords: inertial sensors, motion of a vehicle, inertial measurement unit

In this thesis, inertial sensors were used to examine motions of vehicles. The aim of this study was to find out the opportunities of inertial sensors attached to vehicles. Although inertial sensors are widely used in different industries a lot of hidden potential still exists.

The study was done by developing three separate systems to observe the motions of vehicles. Measurements were done to explore the possibilities of inertial sensors. The systems were based on inertial measurement units, recording equipments and additional systems such as GPS-receiver. Although the measurements and analysis were done in the scope of cars and motorcycles, principles of the study are extensible to other kind of vehicles as well.

The thesis proved how inertial sensors can be used to record the motion of a vehicle accurately. It is possible to improve safety and economy of driving environment by using inertial sensors. Additionally, inertial sensor can expand the possibilities of locating a vehicle to cover the blind spots of satellites.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Tietotekniikan laitokselle. Työn tekeminen oli kaksivaiheinen prosessi. Alun tutkimus- ja tekemisvaihe sujui nopeasti ja mielekkäästi, kun taas työn päättävä kirjoitusvaihe oli enemmän tai vähemmän tuskainen taival. Kummastakaan vaiheesta en olisi selvinnyt ilman ohjaajiani Jarmo Takalaa ja Jussi Collinia, kiitokset heille siitä. Lisäksi haluan kiittää vanhempiani, sisaruksiani ja tuttaviani sekä avopuolisoani Lauraa tuesta, ymmärryksestä sekä vauhtiin potkimisesta. Lopuksi haluan omistaa työni setäni ja mummini muistolle; he eivät ehtineet valmistumistani näkemään.

Tampereella 20.04.2014

Jarkko Tuomi

# SISÄLLYS

Tiivistelmä . . . . .	I
Abstract . . . . .	II
Alkusanat . . . . .	III
Sisällys . . . . .	IV
Termit ja niiden määritelmät . . . . .	V
1. Johdanto . . . . .	1
2. Anturien fysikaalinen tausta . . . . .	3
2.1 Kiihtyvyyssanturi . . . . .	4
2.2 Gyroskooppi . . . . .	5
2.3 Magnetometri . . . . .	6
2.4 Anturien virhemallit . . . . .	7
3. Anturifuusio . . . . .	10
3.1 Asento ja koordinaattimuunnokset . . . . .	11
3.1.1 Suuntakosinimatriisi . . . . .	11
3.1.2 Eulerin kulmat . . . . .	12
3.1.3 Kvaternio . . . . .	13
3.2 AHRS-järjestelmä . . . . .	15
3.2.1 Kallistusten määrittäminen . . . . .	16
3.2.2 Suunnan määrittäminen . . . . .	16
3.3 Kalman-suodin . . . . .	17
4. Inertia-anturit vektorisuunnistuksessa . . . . .	19
4.1 Taustat ja menetelmät . . . . .	20
4.2 Vektorisuunnistusjärjestelmä . . . . .	21
4.3 Tulokset . . . . .	23
4.4 Pohdinta . . . . .	24
5. Inertia-anturit kaksipyöraisessä . . . . .	27
5.1 Taustat ja menetelmät . . . . .	27
5.2 Liiketilantarkkailujärjestelmä . . . . .	29
5.3 Tulokset . . . . .	30
5.4 Pohdinta . . . . .	32
6. Inertia-anturit taloudellisessa liikenteessä . . . . .	34
6.1 Taustat ja menetelmät . . . . .	34
6.2 Mittausjärjestelmä . . . . .	36
6.3 Tulokset . . . . .	37
6.4 Pohdinta . . . . .	38
7. Yhteenveto . . . . .	41
Lähteet . . . . .	43

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AHRS	Järjestelmä, joka tietää asentonsa paikallisessa koordinaatistossa (engl.: Attitude and heading reference system)
barometri	Ilmanpainetta mittaava anturi
bias	Yksi anturin mittausvirheistä
DGPS	Tarkennusmenetelmä GPS-paikannukseen (engl.: Differential Global Positioning System)
DR	Vektorisuunnistus. Navigointimenetelmä, jossa nykyinen sijainti lasketaan edellisen sijainnin sekä kuljetun matkan ja kulkusuunnan avulla (engl.: Dead reckoning)
GPS	Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (engl.: Global Positioning System)
gyroskooppi	Kulmanopeutta mittaava anturi
IMU	Inertiamittausyksikkö (engl.: Inertial measurement unit)
inertia	Hitaus. Kappaleen taipumus vastustaa liiketilan muutosta
inertia-anturi	Kappaleen hitauteen perustuva anturi
INS	Inertianavigointijärjestelmä (engl.: Inertial navigation system)
kiihtyvyyssanturi	Kiihtyvyyttä mittaava anturi
magnetometri	Magneettikenttää mittaava anturi
MEMS	Mikrosysteemit (engl.: Microelectromechanical systems)

# 1. JOHDANTO

Kulkuneuvojen paikka- ja liiketilatietoa hyödynnetään kasvavassa määrin. Lähes jokaiselle perinteisen maantiekartan on korvannut navigaattori, Formula-lähetyskiä katsoessaan pystyy samalla seuraamaan kilpa-autojen sijaintia radalla, ja kaupunki-liikenteen linja-autoaikataulut päivittyvät linja-autojen liikkeiden mukaisesti. Ajoneuvoverollekin on kaavailtu kuljettuun matkaan perustuvaa maksumallia [1]. Esimerkkejä paikka- ja liiketilatietojen hyödyntämisestä ei ole vaikea keksiä. Edelliset esimerkit tukeutuvat kaikki GPS-satelliitteihin, mutta on olemassa paikkoja, joissa näköyhteyttä taivaalle ei ole. Katvepaikoissa, kuten pitkissä tunneleissa, satelliitteihin perustuvat paikannusjärjestelmät eivät kykene tarjoamaan luotettavaa paikkatietoa.

Satelliiteista riippumattoman paikannusratkaisun pystyvät tarjoamaan inertiaan eli massan hitauteen perustuvat paikannusjärjestelmät. Paikannusjärjestelmissä kulkuneuvojen liiketilaa tarkkaillaan inertia-anturien avulla ja anturien mittaustuloksista lasketaan kulkuneuvon sijainti kyseisellä hetkellä. Paikannus ei kuitenkaan ole inertia-anturien ainoa sovelluskohde. Esimerkiksi lähes jokaisesta nykyaikaisesta älypuhelimesta löytyy puhelimen liiketilaa tarkkailevia inertia-antureita. Inertia-antureilla matkapuhelimen asento ja liikkeet saadaan mitattua tarkasti. Anturien tuottamaa informaatiota hyödynnetään peleissä ja muissa sovelluksissa. Älypuhelimien tavoin myös kulkuneuvojen asentoa voidaan inertian avulla tarkastella. Esimerkiksi laiva ja lentokone voidaan vakauttaa inertia-antureihin kuuluvan gyroskoopin avulla.

Inertia-anturit auttavat myös esimerkiksi liikenneturvallisuuden kasvattamisessa. Antureita käytetään jo useissa autojen turvallisuuslaitteissa kuten ABS-jarruissa, ESC-ajonvakautusjärjestelmissä ja turvavyönyissä. Näiden lisäksi inertia-perustaisia turvallisuuslaitteita on mahdollista kehittää moottoripyöriin soveltuviksi.

Tämä työ alkaa inertia-anturien teoreettisilla perusteilla luvussa 2. Luvussa tutustutaan inertia-anturien, kiihtyvyysanturin ja gyroskoopin, sekä magnetometrin toimintaperiaatteisiin ja virhemallinnuksiin. Luvussa 3 vastaavasti määritellään työssä käytettävät koordinaatistot sekä työkalut koordinaatistoilla toimimiseen.

Luvussa 4 esitellään ensimmäinen kolmesta tässä työssä kehitetystä järjestelmästä, joista jokaisessa inertia-antureita käytetään eri tarkoituksessa. Ensimmäisessä järjestelmässä inertia-antureita hyödynnetään navigointitarkoituksessa. Inertia-

anturien avulla kehitetään vektorisuunnistusjärjestelmä, jolla paikannus onnistuu satelliittien kantamattomissa. Luvussa käsitellään vektorisuunnistusta ja pohditaan kehitettyyn järjestelmään jatkokehitysmahdollisuuksia.

Luvun 5 järjestelmässä inertia-anturit kiinnitetään moottoripyörä-moottoripyöräilijä -yhdistelmään. Liiketilantarkkailujärjestelmän inertia-antureita hyödyntämällä moottoripyörän ja -pyöräilijän liiketilaa voidaan tarkkailla esimerkiksi onnettomuuksien varalta. Onnettomuuksien automaattinen havainnointi johtaa yhä turvallisempaan liikenteeseen. Luvussa järjestelmä esitellään, suorituskyky visualisoidaan ja soveltamiskohteita pohditaan.

Luvussa 6 inertia-anturit yhdistetään energianmittaus- sekä paikannusjärjestelmän kanssa monipuoliseksi mittausjärjestelmäksi. Järjestelmällä pyritään edesautamaan taloudellisempaa liikennettä. Kehitetty mittausjärjestelmä esitellään, suorituskyky todistetaan ja laajennusmahdollisuuksia pohditaan. Lopuksi työ päätetään luvun 7 yhteenvetoon.



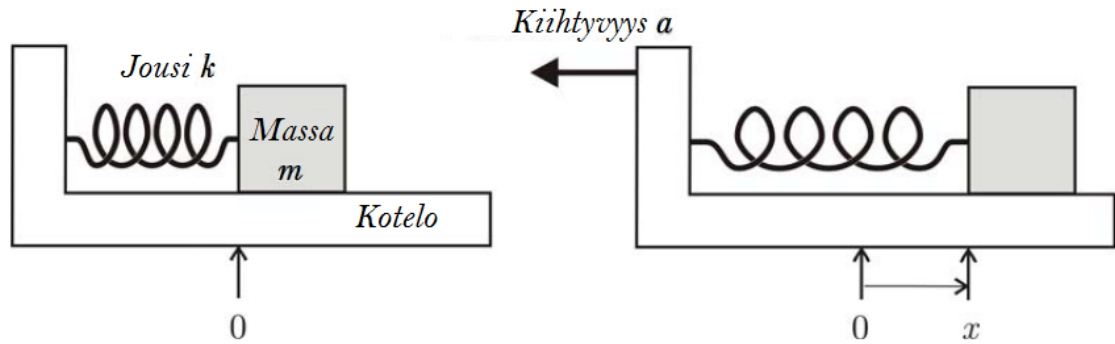
## 2. ANTURIEN FYSIKAALINEN TAUSTA

Anturit ovat MEMS-tekniikan (*Microelectromechanical systems*) ansiosta tulleet kuluttajille osaksi arkipäivää ja kuuluvat esimerkiksi nykyaikaisten älypuhelimien vaikiokomponentteihin. Kyseisellä tekniikalla valmistettujen anturien vahvuuksia ovat niiden pienuus, keveys ja hyvä iskunkestävyys. Heikkoutena voidaan sen sijaan pitää muihin valmistusmenetelmiin nähden huonompaa suorituskykyä. MEMS-tekniikka mahdollistaa useiden kvartsista ja piistä tehtyjen anturien massatuotannon yhdele piikiekolle, joten MEMS-anturit ovat muihin tekniikoihin nähden myös halvempia. [2]

Anturit mittaavat usein yhtä suuretta tiettyssä akselissa, joten niitä on tapana yhdistellä kattavamiksi kokonaisuuksiksi. Tavallisinta on yhdistää kolme akselia kohtisuoraan toisiinsa nähden. Kolmiulotteisella karteesisella koordinaatistolla pystytään esimerkiksi kiihtyvyyksianturin tapauksessa mittaamaan kiihtyvyyttä eteen ja taakse, ylös ja alas sekä vasemmalle ja oikealle. On olemassa myös vektorittomia suureita eli skalaareita mittaavia antureita kuten barometri, joka mittaa ilmanpainetta.

Kuten sanottua, anturit mittaavat usein yhtä suuretta. Tämän vuoksi myös eri antureita yhdistellään yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi. Yleisintä on yhdistää toisiinsa 3-akselinen kiihtyvyyksianturi ja 3-akselinen gyroskooppi. Kiihtyvyyksianturi, joka käsitellään tarkemmin luvussa 2.1, mittaa kiihtyvyyttä ja gyroskooppi (luku 2.2) mittaa vastaavasti tämän työn puitteissa kulmanopeutta. Molemmat perustuvat alunperin kappaleen hitauteen eli inertiaan ja tästä syystä niitä kutsutaankin inertia-antureiksi.

Laitetta, joka sisältää sekä kiihtyvyyksianturin että gyroskoopin kolmelle akselille kutsutaan inertiamittausyksiköksi eli IMU:ksi (*Inertial measurement unit*). IMU:lla pystytään havainnoimaan kaikki kuusi vapausastetta ilman ulkoisia referenssejä ja tästä syystä niitä käytetään esimerkiksi avaruusaluksissa. IMU:t saattavat sisältää myös magneettikenttää mittaavan magnetometrin (luku 2.3). Inertiamittausyksiköt tarjoavat ulostulona mittaustulokset antureiltaan, kun taas AHRS-järjestelmä (*Attitude and heading reference system*, luku 3.2) tarjoaa ulostulossaan myös painovoimasta ja maan magneettikentästä prosessoidun asentotiedon.



Kuva 2.1: Kiihtyvyyssanturin peruskonsepti: massa koteloon jousella kiinnitettynä. Vasen kuva: ei kiihtyvyyttä. Oikea kuva: kotelon kiihtyvyys vasemmalle aiheuttaa jousen venymisen. [3]

## 2.1 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi mittaa kiihtyvyyttä  $\mathbf{a}$ . Kiihtyvyyssanturin toiminta perustuu Newtonin toiseen lakiin eli dynamiikan peruslakiin. Lain mukaan kappaleeseen vaikuttava kokonaisvoima  $\mathbf{F}$  antaa kappaleelle massaltaan  $m$  kiihtyvyyden  $\mathbf{a}$  seuraavasti:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (2.1)$$

Koska ei ole käytännöllistä mitata kulkuneuvoon kohdistuvaa kokonaisvoimaa, on parempi mitata kulkuneuvoon kiinnitettyyn kevyeen massaan kohdistuva voima. Tämä massa jousella koteloon kiinnitettynä muodostaa kuvan 2.1 tavoin kiihtyvyyssanturin peruskonseptin.

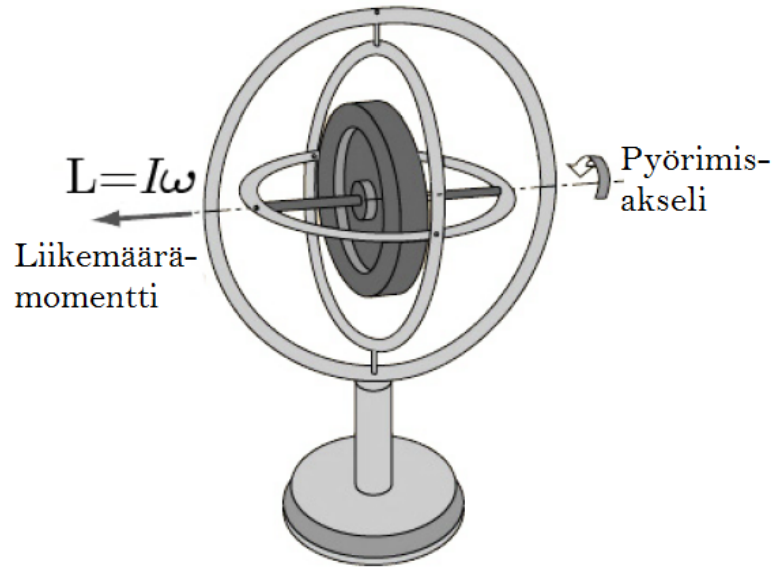
Kun koteloon kohdistuu kuvan 2.1 tavoin mittaavan akselin suuntainen kiihtyvyyden aiheuttama voima, massa pyrkii vastustamaan liiketilan muutostaan. Tämä saa aikaan sen, että jousi venyy Hooken lain mukaan  $\mathbf{x} = \mathbf{F}/k$ . Kun yhtälöön sijoitetaan kaavasta 2.1  $\mathbf{F}$ , saadaan  $\mathbf{x} = m\mathbf{a}/k$ . Ratkaistessa yhtälö kiihtyvyyden  $\mathbf{a}$  suhteen  $\mathbf{a} = k\mathbf{x}/m$ , huomataan kiihtyvyyden olevan ratkaistavissa kahden vakion, massan  $m$  ja jousivakion  $k$  sekä kappaleen siirtymän  $\mathbf{x}$  avulla. [3]

Koska painovoima vaikuttaa suoraan jokaiseen massalliseen kappaleeseen, vaikuttaa se myös kiihtyvyyssanturin sisällä olevaan massaan. Täten yhtälö 2.1 laajenee muotoon

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\mathbf{f} + m\mathbf{g}, \quad (2.2)$$

jossa  $\mathbf{g}$  kuvaa gravitaatiovoiman tuottamaa ja  $\mathbf{f}$  kaiken muun voiman tuottamaa kiihtyvyyttä.

Seurauksena on, että kiihtyvyyssanturin mittaavan akselin ollessa kohtisuoraan



Kuva 2.2: Perinteinen gyroskooppi. [3]

maahan nähden, on paikallaan olevan kappaleen kiihtyvyyssanturin ilmoittama kiihtyvyys putoamiskiihtyvyyden suuruinen ja kappaleen ollessa vapaassa pudotuksessa, on kiihtyvyyssanturin ilmoittama lukema  $0 \text{ m/s}^2$ . Tämä ominaisuus tuo käytännön hyötyä, johon palataan myöhemmissä kappaleissa.

## 2.2 Gyroskooppi

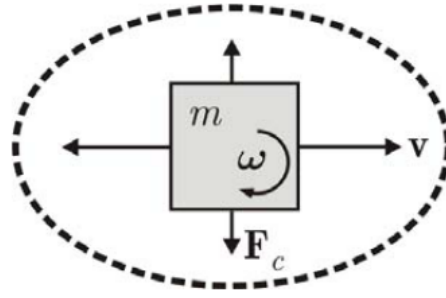
Gyroskooppi mittaa kulmanopeutta  $\omega$ . Ensimmäisen mekaanisen gyroskoopin rakensi Foucault jo vuonna 1852. Mekaanisen gyroskoopin toiminta perustuu liikemäärämomentin säilymiseen ja sen muutoksen havaitsemiseen. Newtonin toisen lain mukaan liikemäärämomentti säilyy muuttumattomana ellei siihen vaikuteta vääntömomentilla. Täten perinteisen gyroskoopin (kuva 2.2) toimintaa kuvaa yhtälö

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \frac{d(I\boldsymbol{\omega})}{dt} = I\boldsymbol{\alpha}, \quad (2.3)$$

missä  $\boldsymbol{\tau}$  on gyroskooppiin vaikuttava vääntömomentti,  $\mathbf{L}$ ,  $I$ ,  $\boldsymbol{\omega}$  ja  $\boldsymbol{\alpha}$  ovat gyroskoopin liikemäärämomentti, hitausmomentti, kulmanopeus ja kulmakiihtyvyys. [3]

Perinteiset mekaaniset gyroskoopit eivät ole ainoa gyroskooppikategoria. Värisävään massaan perustuvat gyroskoopit ovat pieniä, halpoja, vähävirtaisia ja valmistettavissa MEMS-tekniikalla. Värisävään massaan perustuvia gyroskooppeja pyöritettäessä, ne altistuvat Coriolis-ilmiiölle. Coriolisvoima voidaan esittää seuraavasti:

$$\mathbf{F}_C = -2m(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}), \quad (2.4)$$



Kuva 2.3: Värähtelevään massaan perustuva gyroskooppi käsittää massan, joka värähtelee nopeudella  $\mathbf{v}$ . Gyroskoopin kiertyessä massa liikkuu coriolisvoimasta johtuen kohtisuoraa värähtelyyn nähden. [3]

missä  $m$  on massa,  $\mathbf{v}$  on nopeus pyörivän pinnan suhteen ja  $\omega$  on pyörivän pinnan kulmanopeus. [3]

Coriolisvoiman vaikutuksesta värinäelementtiin aiheutuu kohtisuoraan värinää vasten toinen värinä. Toisesta värinästä voidaan päätellä kääntymisnopeus. Kuvassa 2.3 on värisevään massaan perustuvan gyroskoopin periaatekuva.

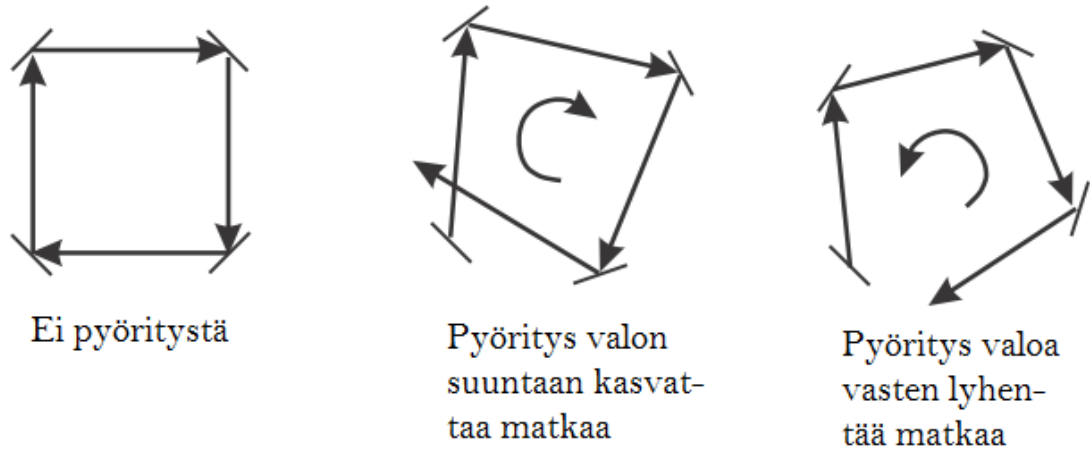
Kolmas gyroskoopikategoria on optiset gyroskoopit. Optiset gyroskoopit perustuvat siihen, että inertiaalikoordinaatistossa valo kulkee vakionopeudella. Tästä seuraa, että valoa lähetettäessä peileillä tai valokuidulla muodostettuun silmukkaan molempiin suuntiin, pyörimättömässä silmukassa valon kulkema matka on sama. Kuitenkin kuvan 2.4 tavoin silmukkaa pyöritettäessä, pyöriytysuuntaan kulkeva valo joutuu kulkemaan pidemmän matkan ja vastaavasti vastasuuntaan kulkeva valo kulkee lyhyemmän matkan. Tämä tunnetaan Sagnac-ilmionä. Mittaamalla muutokset valon kulkemassa matkassa, voidaan kulmanopeus määrittää. [2]

## 2.3 Magnetometri

Magnetometri mittaa magneettivuon tiheyttä  $B$ . Kuitenkin magneettivuon tiheyden ollessa vektorisuure, käytetään tässä työssä notaatiota  $\mathbf{m}$ . Magnetometri tarvitsee inertia-antureista poiketen ulkoisen referenssin, magneettikentän. Magnetometriä käytetäänkin perinteisesti navigointisovelluksissa mittaamaan maan magneettikenttää kompassin tavoin.

Maan magneettikenttä kulkee magneettiselta pohjoisnavalta maan läpi magneettiselle etelänavalle ja toiseen suuntaan maan pinnalla sekä ilmakehässä. Tästä syystä johtuen magneettikenttä on magneettisilla navoilla vertikaalinen ja päiväntasaajalla horisontaalinen kuvan 2.5 tavoin. Maan magneettiset navat eivät sijaitse samassa pisteessä kuin maantieteelliset navat vaan liikkuvat niihin nähden. [2]

Magneettikentän suuntaa ja suuruutta kuvataan magneettivuon tiheydellä, jonka yksikkö SI-järjestelmässä on tesla. Magneettivuon tiheys vaihtelee paikan mukaan



Kuva 2.4: Valon kulkema matka muuttuu pyörityksessä. [2]

ja on noin  $30 \mu\text{T}$  päiväntasaajalla ja noin  $60 \mu\text{T}$  navoilla. Suomessa magneettikenttä on noin  $51 \mu\text{T}$  [4].

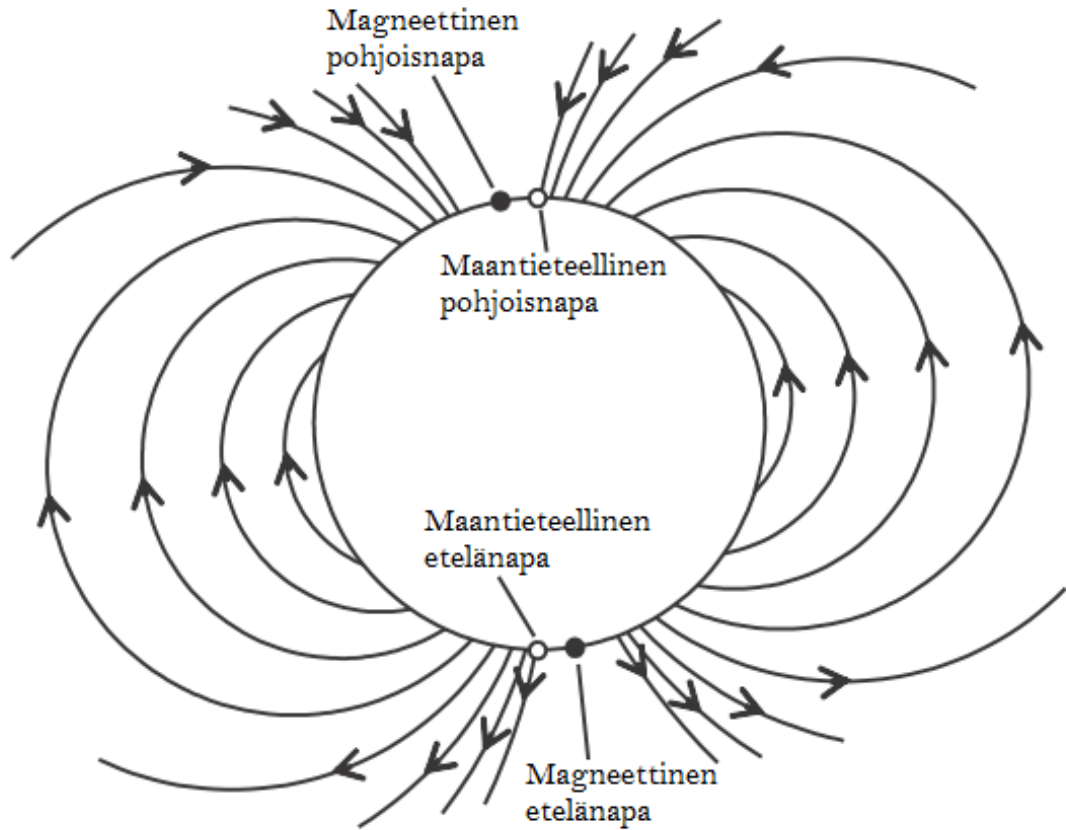
Maan magneettikenttä ei ole tasainen vaan siinä esiintyy suuriakin paikallisia anomalioita eli poikkeamia. Tämän lisäksi magneettikenttää häiritsevät muun muassa anturin lähellä sijaitsevat kestopagneetit sekä ferromagneettiset ja muut magneettikenttään vaikuttavat kappaleet. Kun perinteisen kompassin neula ei osoita pohjoiseen, on magneettikentässä häiriötä. Näin voi käydä esimerkiksi voimalinjojen läheisyydessä.

## 2.4 Anturien virhemallit

Anturit mittaavat usein yhtä suuretta tietyssä akselissa. Anturien tuottama signaali on konversio fysikaalisesta maailmasta ihmisten luomiin malleihin. Konversioon epäideaalisuuksista johtuen anturien kokemat ja ilmoittamat suuret eivät täysin vastaa toisiaan vaan anturien tuottamiin signaaleihin summautuu virhettä.

Virheet voivat olla vakioita eli esiintyä aina anturin ollessa käytössä. Tällaiset virheet on mahdollista kompensoida laboratoriokokeissa suoritettujen kalibrointitesti- tien perusteella. Virheet voivat olla myös lämpötilasta riippuvia. Myös lämpötilasta johtuvat virheet voidaan kompensoida mallien perusteella, mutta varteen otettava vaihtoehto on pyrkiä pitämään inertia-anturin lämpötila vakiona ulkoisella lämpötilakompensoinnilla. Tämän lisäksi antureissa esiintyy mittausten välillä muuttuvia ja jopa mittausten aikana muuttuvia virheitä. [2]

Kiihtyvyydasanturin ja gyroskoopin virheistä merkittävin on bias-virhe. Bias-virhe on mittauksesta riippumaton ja se voidaan jakaa staattiseen ja dynaamiseen komponenttiin seuraavasti:



Kuva 2.5: Maan magneettikenttä. [2]

$$\mathbf{b}_t = \mathbf{b}_s + \mathbf{b}_{d,t}, \quad (2.5)$$

missä  $\mathbf{b}_s$  kuvaa ajasta riippumatonta ja  $\mathbf{b}_{d,t}$  ajan mukaan muuttuvaa biasta. [2]

Staattiseen komponenttiin kuuluu mittausten välillä muuttuva virhe ja kompensoinnista huolimatta mahdollisesti jäänyt vakiovirhe. Dynaaminen komponentti käsittää mittauksen aikana muuttuvan virheen ja lämpökompensoinnista jääneen virheen. Dynaaminen komponentti on yleensä kymmenys staattisesta komponentista. Kiihtyvyyssanturin bias ilmoitetaan yleensä suhteessa putoamiskiihtyvyyteen ja on mg-luokkaa. Vastaavasti gyroskoopin tapauksessa bias ilmoitetaan yksiköllä  $^{\circ}/h$  eli astetta tunnissa. [2]

Kiihtyvyyssanturin ja gyroskoopin mittaustuloksissa esiintyy myös mittaustuloksesta riippuvaa virhettä. Tätä virhettä kutsutaan termillä *scale factor error* eli kulmavirhe. Virheellä on tapana kasvaa mitattuun suureeseen verrannollisesti jollain tietyllä kulmalla. Kulmavirhe on tapana liittää osaksi ristikytkentä eli *cross-coupling* virhettä muodostaen virhematriisin:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s_x & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{yx} & s_y & m_{yz} \\ m_{zx} & m_{zy} & s_z \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

missä  $s_i$  kuvaa akseliin kohdistuvaa kulmavirhettä ja  $m_{ij}$  vastaavasti akseleista johtuvaa ristikytkevirhettä. Kulmavirheet ja ristikytkevirheet ovat yksiköttömiä ja ilmoitetaan prosenteilla tai yleisemmin yksiköllä ppm eli miljoonasosina. [2]

Magnetometrin virheet mallintuvat edellä mainittuihin virheisiin siten, että magneettikenttään suoraan summaantuvat eli niin sanotut *hard iron* -virheet, jotka aiheutuvat esimerkiksi kestmagneeteista, malliintuvat bias-virheeksi. Vastaavasti magneettikenttää muokkaavat niin sanotut *soft iron* -virheet, jotka aiheutuvat ferromagneettisista materiaaleista, malliintuvat virhematriisiin 2.6. [2]

Edellä mainittujen virheiden lisäksi antureilla esiintyy kohinaa sekä anturirakenteesta johtuvaa muuta virhettä, joita ei tässä työssä käsitellä tarkemmin.

### 3. ANTURIFUUSIO

Anturifuusion tarkoituksena on yhdistää antureilta samanaikaisesti tulevat signaalit informatiivisemmaksi ja mielekkäämmäksi kokonaisuudeksi [5]. Esimerkiksi inertia-mittausyksiköitä kehittyneemmässä AHRS-järjestelmässä antureilta samanaikaisesti tulevat signaalit on yhdistelyalgoritmin avulla jalostettu asentotiedoksi. Anturifuusioon on kehitetty useita algoritmeja, joista Kalman-suodin esitellään kappaleessa 3.3.

Asentotiedon ratkaisemiseksi on määriteltävä koordinaatisto, jossa asento ratkaistaan. Kun puhutaan kappaleen asennosta, puhutaan itse asiassa kappaleen kappalekoordinaatiston asennosta referenssikoordinaatistoon nähden. Esimerkiksi Pisan torni on kallellaan maahan nähden. Itseensä nähden torni on täysin suorassa. Tämä tarkoittaa siis samaa asiaa kuin se, että tornin ja maan koordinaatistot ovat jossain tietyssä asennossa toisiinsa nähden.

Koordinaatistoista on myös huomioitavaa se, että ne noudattavat suhteellisuusperiaatetta. Suhteellisuusperiaatteen mukaan fysiikan lait ovat samat kaikille toistensa suhteen tasaisessa liikkeessä oleville koordinaatistoille. Toisin sanoen suoraan etenevä auto liikkuu maahan nähden samalla vauhdilla kuin maa autoon nähden. [6]

Asioiden selkeyden vuoksi osalle koordinaatistoista on hyvä antaa koko työn kattava määritelmä. Jo mainittu kappalekoordinaatisto on koordinaatisto, jossa kappale kuvataan. Tässä työssä kappaleen suunnat, jos sille ne voidaan määritellä, ovat:

- positiivinen x-akseli: eteen
- positiivinen y-akseli: vasemmalle
- positiivinen z-akseli: ylös

Anturit ovat tässä työssä aina kappalekoordinaatistossa. Toisin sanoen, jos kiihtyvyyssanturi havaitsee kiihtyvyyttä x-akselin suuntaan, kiihdyttää kappale eteenpäin.

Toinen määriteltävä koordinaatisto on käytettävä referenssikoordinaatisto. Tässä työssä käytetään referenssikoordinaatistona paikallista koordinaatistoa, joka tarkoittaa koordinaatistoa maan pinnalla siten, että:

- positiivinen x-akseli: magneettinen pohjoisnapa
- positiivinen y-akseli: magneettinen länsi
- positiivinen z-akseli: kohtisuoraan ylös



### 3.1 Asento ja koordinaattimuunnokset

Verrattaessa koordinaatistoja toisiinsa, tulee niiden olla jotenkin matemaattisesti esitettävissä. Paikka voidaan esittää vektorina origosta origoon ja nopeus totutusti paikan muutoksena. Asentoa ei kuitenkaan pysty tavallisella vektorilla esittämään. Seuraaviin alilukuihin on koottu yleisesti käytössä olevat menetelmät asentotiedon esittämiseen ja sillä toimimiseen.

#### 3.1.1 Suuntakosinimatriisi

Yksi tapa esittää asentoa on suuntakosinimatriisi. Suuntakosinimatriisi  $\mathbf{C}_A^B$  on 3x3-matriisi, joka määritellään seuraavasti:

$$\mathbf{x}^B = \mathbf{C}_A^B \mathbf{x}^A, \quad (3.1)$$

missä  $\mathbf{x}^A$  on vektori ilmaistuna koordinaatiston A koordinaateissa ja  $\mathbf{x}^B$  on sama vektori koordinaatiston B koordinaateissa. Toisin sanoen  $\mathbf{x}^B$ :n komponentit ovat  $\mathbf{x}^A$ :n lineaarisia kombinaatioita ja lineaarikuvauksen kertoimet on koottu suuntakosinimatriisiksi. [2]

Voidaan osoittaa [7], että matriisin elementit ovat kosineita koordinaatistojen akselien välisistä kulmista:

$$\mathbf{C}_A^B = \begin{bmatrix} \cos \mu_{Bx, Ax} & \cos \mu_{Bx, Ay} & \cos \mu_{Bx, Az} \\ \cos \mu_{By, Ax} & \cos \mu_{By, Ay} & \cos \mu_{By, Az} \\ \cos \mu_{Bz, Ax} & \cos \mu_{Bz, Ay} & \cos \mu_{Bz, Az} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Lause 3.2 on täten hyödyllinen erityisesti koordinaatistojen kierroissa. Esimerkiksi kierrettäessä kahdesta aluksi yhtenevästä koordinaatistosta toista kulman  $\phi$  verran x-akselin ympäri, supistuu yhtälö muotoon:

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Samoin supistuu yhtälö myös y- ja z-akselin suhteen:

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (3.4)$$

$$\mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Kulmat  $\phi$ ,  $\theta$  ja  $\psi$  tunnetaan nimillä *roll* eli kallistuminen, *pitch* eli nyökkääminen ja *yaw* eli kääntyminen. Ne tunnetaan myös kappaleessa 3.1.2 esiteltävinä Eulerin kulmina.

Suuntakosinimatriisi  $\mathbf{C}$  voidaan kiertämisominaisuuden vuoksi muodostaa toistuvien kääntöjen sarjana kaavoja 3.3, 3.4 ja 3.5 hyväksi käyttäen:

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_x \mathbf{C}_y \mathbf{C}_x \mathbf{C}_z \mathbf{C}_y \mathbf{C}_x. \quad (3.6)$$

Mainittavaa on myös mahdollisuus palata vaihdetusta koordinaatistosta takaisin:

$$\mathbf{C}_B^A = (\mathbf{C}_A^B)^{-1} = (\mathbf{C}_A^B)^T. \quad (3.7)$$

Suuntakosinimatriisi on edellä mainittujen ominaisuuksiensa johdosta erittäin monipuolinen ja soveltuu kattavasti laajaan määrään eri sovelluksia. Lisäksi, vaikka suuntakosinimatriisi on peräti yhdeksän kulman funktio, on näistä kulmista vain kolme riippumattomia [8].

### 3.1.2 Eulerin kulmat

Eulerin kulmat ovat helpoiten hahmotettava tapa kuvata asentoa. Eulerin kulmilla muunnos koordinaatistosta toiseen määritetään koordinaatiston akseleiden perättäisillä kierroilla tietystä järjestyksessä. Järjestyksellä on väliä, sillä suoritettaessa kuvan 3.1 mukaisesti samat kierrot, mutta eri järjestyksessä, on lopputulos eri. Titterton [9] on määritellyt kappalekoordinaatiston eri tavalla, mutta se ei vaikuta lopputulokseen.

Eulerin kulmien muuttaminen suuntakosinimatriisiksi onnistuu siis kaavan 3.6 avulla kertoen järjestyksessä tehdyt käännöt toisillaan. Esimerkiksi muunnos koordinaatistosta toiseen sekvenssillä z-y-x tuottaa seuraavanlaisen matriisin:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.8) \end{aligned}$$

Vastaavasti suuntakosinimatriisin muuttaminen Eulerin kulmiksi vaatii myös tiedon kääntämisyjärjestyksestä. Esimerkiksi yhtälön 3.8 Eulerin kulmat saadaan seuraavasti:

$$\phi = \arctan(c_{23}, c_{33}); \quad (3.9)$$

$$\theta = \arcsin(-c_{13}); \quad (3.10)$$

$$\psi = \arctan(c_{12}, c_{11}), \quad (3.11)$$

missä  $c_{ij}$  tarkoittaa suuntakosinimatriisin  $\mathbf{C}$  elementtiä riviltä  $i$  ja sarakkeelta  $j$ . Eulerin kulmista tulee huomioida, että  $\theta$  on määritelty vain välille  $\pm 90^\circ$ , kun taas  $\phi$  ja  $\psi$  ovat määritelty välille  $\pm 180^\circ$ .

### 3.1.3 Kvaternio

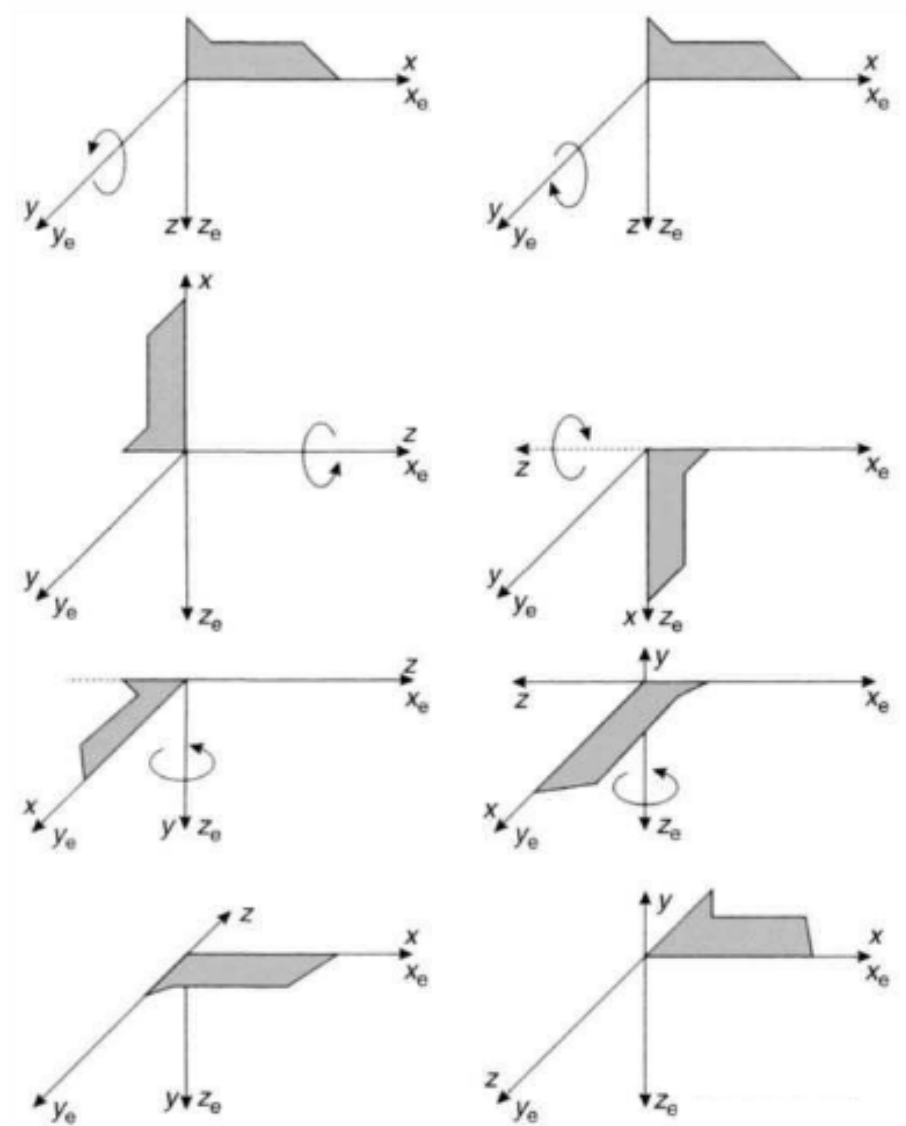
Kvaterniot perustuvat ideaan, että muunnos koordinaatistosta toiseen voidaan suorittaa yhden referenssikoordinaatistoon suhteutetun kiertovektorin  $\mathbf{u}$  perusteella. Kvaternio  $\mathbf{q}$  on neljäelementtinen vektori, jossa elementit kuvaavat vektorin funktioita ja kierron suuruutta [9]:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mu/2) \\ (\mu_x/\mu \sin(\mu/2)) \\ (\mu_y/\mu \sin(\mu/2)) \\ (\mu_z/\mu \sin(\mu/2)) \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

missä  $\mu_x, \mu_y, \mu_z$  ovat kulmavektorin  $\mathbf{u}$  komponentit ja  $\mu$  on kierron suuruus.  $\mathbf{u}$  on määritelty siten, että muunnos referenssikoordinaatistosta kappalekoordinaatistoon suoritetaan pyörähtämällä kulman  $\mu$  verran akselin  $\mathbf{u}$  ympäri.

Kvaternio voidaan ilmoittaa suuntakosinimatriisina seuraavasti [9]:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} (a^2 + b^2 - c^2 - d^2) & 2(bc + ad) & 2(bd - ac) \\ 2(bc - ad) & (a^2 - b^2 + c^2 - d^2) & 2(cd + ab) \\ 2(bd + ac) & 2(cd - ab) & (a^2 - b^2 - c^2 + d^2) \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$



Kuva 3.1: Havainnoillistamiskuva Eulerin kulmien kääntöjärjestyksen merkityksestä. Vasemmassa sarakeessa kääntö on tehty sekvenssillä  $+90^\circ$  nyökkäämistä,  $+90^\circ$  kääntymistä ja  $-90^\circ$  nyökkäämistä. Oikeassa sarakeessa vastaavasti sekvenssillä  $-90^\circ$  nyökkäämistä,  $+90^\circ$  kääntymistä ja  $+90^\circ$  nyökkäämistä. Lopputulos samojen, mutta eri järjestyksessä tehtyjen kääntöjen jälkeen on eri. [9]

Eulerin kulmat kvaterniosta saadaan kaavoista 3.9, 3.10 ja 3.9 johtamalla:

$$\phi = \arctan(c_{23}, c_{33}) = \arctan(2(cd + ab), (a^2 - b^2 - c^2 + d^2)); \quad (3.14)$$

$$\theta = \arcsin(-c_{13}) = \arcsin(-2(bd - ac)); \quad (3.15)$$

$$\psi = \arctan(c_{12}, c_{11}) = \arctan(2(bc + ad), (a^2 + b^2 - c^2 - d^2)). \quad (3.16)$$

Kvaterniot on tässä työssä esitelty lähinnä sivistävänä tietona. Työn laskutoimituksissa niitä ei käytetty, vaan ne muutettiin heti joko suuntakosinimatriisiksi tai Eulerin kulmiksi laskuja varten.

## 3.2 AHRS-järjestelmä

AHRS-järjestelmä eli *Attitude and heading reference system* osaa päätellä asentonsa suhteessa paikalliseen koordinaatistoon. Anturifuusion avulla se yhdistää antureilta samanaikaisesti tulevat signaalit informatiivisemmaksi ja mielekkäämmäksi kokonaisuudeksi, asennoksi.

AHRS-järjestelmän ilmoittama asento perustuu kallistusten ja suunnan laskemiseen. Suunta voidaan laskea primitiivisesti pelkästään magnetometrin mittauksista luvun 3.2.2 mukaan, mutta tällöin järjestelmä on altis magneettikentän häiriöille. Jos järjestelmä hyödyntää magnetometriä vain alkusuunnan saamiseksi ja päivittää tämän jälkeen suuntaansa pelkästään gyroskoopin mittauksia integroimalla, altistuu järjestelmä vastaavasti gyroskoopin summautuvalle virheelle. Näistä syistä johtuen tulisi suunnan määrittämisessä hyödyntää molempia antureita esimerkiksi seuraavasti:

$$\hat{\psi}_{nb}(t) = W_m \hat{\psi}_{nb,m}(t) + (1 - W_m)[\hat{\psi}_{nb}(t - \tau) + \tilde{\omega}_{ib,z}^b \tau], \quad (3.17)$$

missä  $\hat{\psi}_{nb}$  ja  $\hat{\psi}_{nb,m}$  ovat yhdistetty sekä magnetometrin ilmoittama suuntaestimaatti,  $\tilde{\omega}_{ib,z}^b$  on gyroskoopin kulmanopeusmittaus ja  $W_m$  magnetometrille annettu painokerroin. [2]

Painokerroin  $W_m$  voi olla vakio tai muuttuja. Kerroin voi vaihdella esimerkiksi magneettikentän normin mukaisesti. Normin poiketessa alkuarvostaan, pienenee kerroin poikkeamaan verrannollisesti. Näin ollen magneettikentän häiriöiden alaisena luotettaisiin voimakkaammin gyroskooppiin.

Parhaimman asento- eli myös suuntaestimaatin tarjoaa kuitenkin kappaleen 3.3 periaatteita noudattava Kalman-suodinalgoritmi. Kalman-suotimella gyroskoopin biakset kalibroituivat, edellä mainittu painotus optimoituu ja magnetometrin mittaustuksista suodattuvat anomaliat pois.

### 3.2.1 Kallistusten määrittäminen

Kappaleen ollessa paikoillaan, pystytään kappaleen kallistukset eli kallistuminen ja nyökkääminen määrittämään pelkästään kiihtyvyyssanturin perusteella. Tällöin kiihtyvyyssanturin mittaama voima aiheutuu vain gravitaatiosta, joka osoittaa paikallisessa koordinaatistossa alaspäin eli negatiivisen z-akselin suuntaisesti. Käyttäessä hyödyksi yhtälössä 3.8 määriteltyä suuntakosinimatriisia sekä tietoa, että paikallisen koordinaatiston kiihtyvyyksvektorin x- ja y-komponentit ovat nollia, saadaan kappalekoordinaatiston kiihtyvyyksvektori seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ -\sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} g. \quad (3.18)$$

Tästä voidaan edelleen johtaa [2] nyökkääminen

$$\theta = \arctan \left( \frac{-a_x}{\sqrt{(a_y)^2 + (a_z)^2}} \right) \quad (3.19)$$

sekä kallistuminen

$$\phi = \arctan(-a_y, -a_z). \quad (3.20)$$

### 3.2.2 Suunnan määrittäminen

Suunnan määrittämisessä voidaan kappaleen 3.2.1 tavoin hyödyntää yhtälössä 3.8 määriteltyä suuntakosinimatriisia. Kappaleen 3 alussa määriteltiin paikallinen koordinaatisto maan magneettikentän mukaiseksi inkliinaatiokulmaa huomioimatta. Täten maan magneettikenttä jakautuu paikallisen koordinaatiston x- ja z-komponenteille ja edelleen kappalekoordinaatiston magnetometrin akseleille seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ 0 \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} B, \quad (3.21)$$

missä  $\alpha$  on inkliinaatiokulma.

Kallistusten ollessa kappaleen 3.2.1 jäljiltä tiedossa, voidaan suunta  $\psi$  määrittää seuraavasti [2]:

$$\psi = \arctan \left( \frac{-\cos \phi m_y + \sin \phi m_z}{\cos \theta m_x + \sin \phi \sin \theta m_y + \cos \phi \sin \theta m_z} \right). \quad (3.22)$$

Tasaisella maalla olevan kulkuneuvon tapauksessa  $\phi$  ja  $\theta$  saavat arvon nolla ja tällöin yhtälö 3.22 supistuu muotoon:

$$\psi = \arctan(-m_y, m_x). \quad (3.23)$$

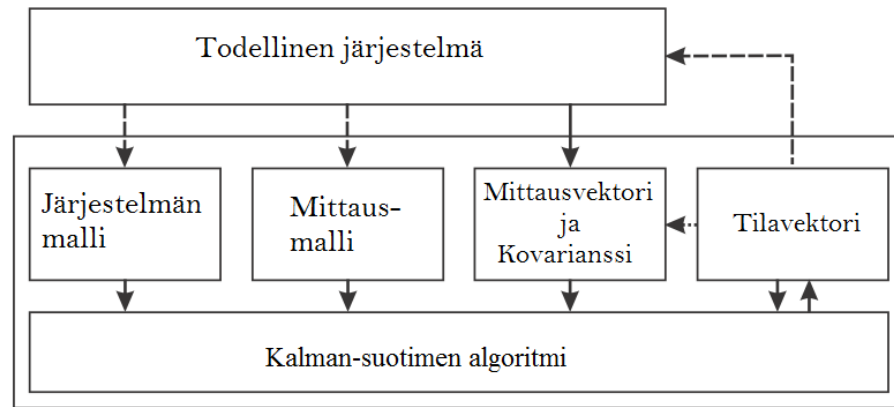
### 3.3 Kalman-suodin

Kalman-suodin muodostaa perustan lähes kaikille käytössä oleville estimaatioalgoritmeille navigointijärjestelmissä. Nimestään huolimatta se on enemmänkin nimenomaan estimaatioalgoritmi kuin suodin. Se on signaalinkäsittelyalgoritmi, joka toimii rekursiivisesti ja sillä pystytään estimoimaan järjestelmän tilaa tilastollisesti optimaalisella tavalla. [2]

Kalman-suotimeen kuuluu viisi peruselementtiä, joiden avulla se estimoi mittaus-  
ten kohinaisuudet huomioiden. Suotimen peruselementit ovat:

- tilavektori ja siihen liittyvä virheen kovarianssimatriisi
- järjestelmän malli
- mittausvektori ja kovarianssimatriisi
- mittausmalli
- itse algoritmi

Tilavektorissa on muuttujat, joita estimoidaan, kuten esimerkiksi asento. Kovarianssimatriisi kertoo, kuinka luotettava estimaatti tällä hetkellä on. Järjestelmän malli taas kertoo, kuinka tilavektori ja kovarianssimatriisi muuttuvat ajan suhteen. Mittausvektorissa on itse mittaukset, ja kovarianssimatriisi kuvaa mittaus-  
ten kohinaisuutta. Algoritmi hyödyntää mittausvektoria, mittausmallia ja järjestelmän mallia aikaansaadakseen optimaaliset estimaatit tilavektoriin. Kuvassa 3.2 on esitetty



Kuva 3.2: Kalman-suotimen peruselementit ja niiden suhteet. Yhtenäiset nuolet kuvaavat suhteita, jotka ovat aina olemassa. Katkoviivat kuvaavat vastaavasti mahdollisia suhteita. [2]

Kalman-suotimen peruselementit ja niiden suhteet. Kuvan yhtenäiset nuolet kuvaavat aina olemassa olevia suhteita, kun taas katkoviivat kuvaavat vastaavasti mahdollisia lisäsuhteita. [2]



## 4. INERTIA-ANTURIT VEKTORISUUNNISTUKSESSA

Nykyaikaiset kulkuneuvojen paikannusjärjestelmät perustuvat pääsääntöisesti satelliittipaikannukseen, jossa satelliitit lähettävät ympärilleen signaalilla informaatiota sijainnistaan ja ajastaan. Useammasta satelliittien lähettämästä signaalista kulkuneuvon mukana oleva päätelaite pystyy päättelemään sijaintinsa. Satelliittipaikannuksen heikkous on kuitenkin signaalin kuulumattomuus paikoissa, joissa suoraa näkyvyyttä taivaalle ei ole. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi tunnelit ja parkkihallit, teollisuushallit ja muut sisätilat sekä muut veden tai maan alla olevat tilat.

Sisätiloissa paikannuksessa voidaan hyödyntää esimerkiksi WLAN- tai Bluetooth-verkkoja [10; 11]. Kyseiset menetelmät tarvitsevat kuitenkin tiedon tukiasemien sijainnista. Langattomien verkkojen lisäksi sisätiloissa on mahdollista navigoida magneettikentän uniikkeja häiriöitä hyödyntämällä [12], mutta tällöin magneettikentän häiriöitä aiheuttavat rakennelmat on pidettävä muuttumattomina.

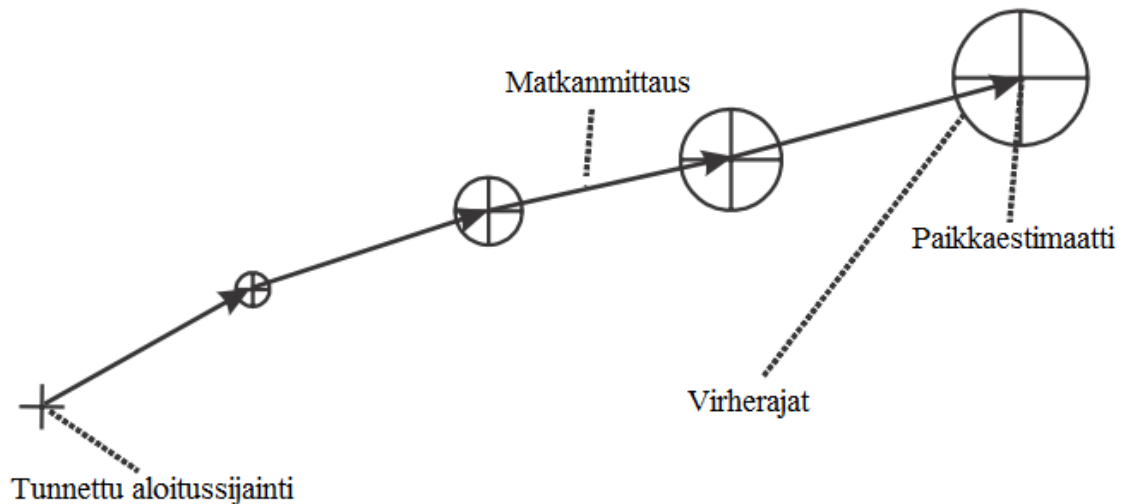
Ulkoisista lähteistä riippumattoman navigointiratkaisun pystyy tarjoamaan inertiamittausyksiköt liitettynä osaksi inertianavigointijärjestelmää eli INS-järjestelmää (*Inertial navigation system*). INS- ja AHRS-järjestelmän ero on, että INS-järjestelmä tarjoaa ulostulossaan asentotiedon lisäksi myös paikka- nopeus- ja kiihtyvyydetiedot. INS-järjestelmien heikkous on kuitenkin niiden hinta. Riittävän tarkan navigointiratkaisun tarjoavat järjestelmät maksavat kymmeniä, jopa satoja tuhansia euroja. Tästä syystä johtuen järjestelmiä ei käytetä kuluttajakulkuneuvoissa. [2]

INS-järjestelmät perustuvat vektorisuunnistukseen. Vektorisuunnistuksessa eli DR-menetelmässä (*Dead reckoning*) sijainti lasketaan paikan muutoksena, joka lisätään edelliseen sijaintiin. Paikanmuutos lasketaan kuljetun matkan ja kulkusuunnan perusteella. Puhdas INS-järjestelmä ratkaisee kuljetun matkan kiihtyvyyssanturin mittausten perusteella:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (4.1)$$

missä  $v_0$  on alkunopeus,  $a$  mitattu kiihtyvyys ja  $t$  aika. Kiihtyvyyssanturin mittausten virheiden kasvaessa voimakkaasti ajan suhteen, vaaditaan anturilta huomattavaa tarkkuutta. Tämä selittää INS-järjestelmien korkean hinnan.

Puhtaan INS-järjestelmän perustuessa pelkästään oman liiketilansa tarkkailuun



Kuva 4.1: Vektorisuunnistuksen havainnekuva [2].

kappaleen 2 antureilla, pystytään niiden hintaa tiputtamaan luopumalla matkamittauksen itsenäisyydestä. Esimerkiksi renkailla kulkevien kulkuneuvojen tapauksessa voidaan hyödyntää renkasiin helposti integroituvaa odometriä eli matkamittaria. Matkamittarilla ajan vaikutus kuljetun matkan mittaamisessa saadaan eliminoitu.

Tässä luvussa esitellään vektorisuunnistusjärjestelmä, joka hyödyntää lämpökompensoitua inertiamittausyksikköä sekä matkamittaria kulkuneuvon sijainnin laskemisessa.

## 4.1 Taustat ja menetelmät

Vektorisuunnistus on paikannusmenetelmä, jossa sijainti lasketaan paikan muutoksena, joka lisätään edelliseen sijaintiin. Paikan muutos lasketaan kuljetun matkan ja kulkusuunnan perusteella. Kuljettu matka mitataan kappaleen koordinaatistossa ja täten erillinen asentomittaus on suoritettava määrittääkseen kuljettu suunta referenssikoordinaatistossa [2]. Tämä luku käsittelee kaksiulotteista vektorisuunnistusta, joten asentomittaukseksi riittää suunnan mittaaminen.

Kuvassa 4.1 on kuvattuna vektorisuunnistuksen idea. Vektorisuunnistus alkaa aina tunnetusta aloitussijainnista. Aloitussijainnista siirrytään seuraavaan sijaintiin mittaamalla kuljettu matka ja kulkusuunta. Täten paikkaestimaatti on summa toisistaan riippuvia mittauksia. Jokainen mittaus aiheuttaa summautuvaa virhettä, jota kuvassa havainnollistaa paikkaestimaatin ympärillä oleva ympyrä.

Vektorisuunnistus koostuu siis kahdesta mittauksesta, matkan ja suunnan mittaamisesta. Matkan voi mitata perinteisesti askeleilla, mittatikulla, renkaista tai integroimalla esimerkiksi tutkan tai kiihtyvyyssanturin antamia lukemia. Suunnan mittaamisessa on perinteisesti hyödynnetty kompassia tai aivan alkumetreillä täh-

tiä tai muita kiinteitä pisteitä. Nykyään suunta voidaan mitata esimerkiksi elektronisella kompassilla eli magnetometrillä tai gyroskoopin tuottamaa kulmanopeutta integroimalla. Suunnan määrittäminen käytiin läpi kappaleessa 3.2.

Vektorisuunnistuksen vahvuudeksi luetaan riippumattomuus ulkoisista referensseistä kuten radiosignaaleista tai kattavista tietokannoista. Vastaavasti vektorisuunnistuksen heikkouksia ovat alkuarvojen vaatiminen sekä virheiden summautuminen. Näistä syistä johtuen vektorisuunnistusta on tapana käyttää yhdessä muiden paikannusmenetelmien kanssa.

## 4.2 Vektorisuunnistusjärjestelmä

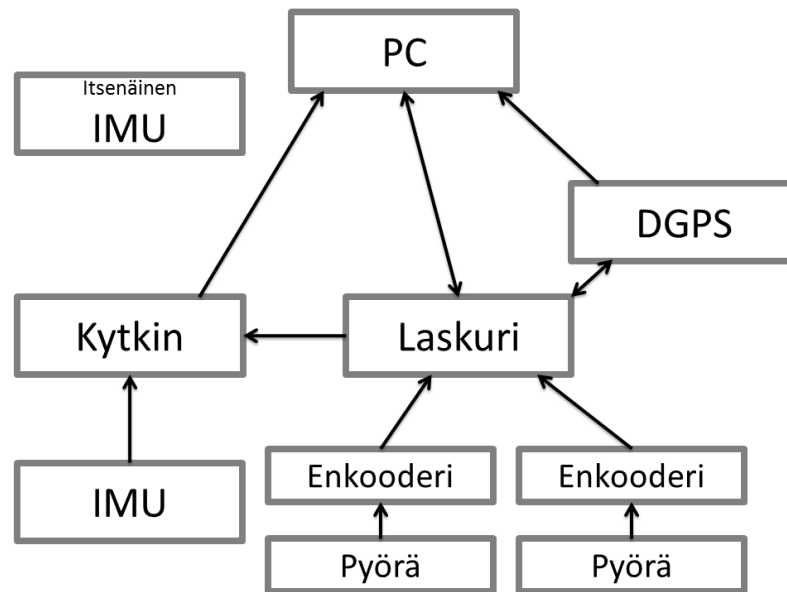
Vektorisuunnistusjärjestelmä rakennettiin sisätilasuunnistukseen tarkoitettuun järjestelmään [13; 14] perustuen. Mittauskärry päivitettiin vastaamaan uuden järjestelmän vaatimuksia ja muistona vanhasta säilyivät oikeastaan vain matkan mittamiseen tarkoitetut pyörät, enkooderit ja laskuri.

Kuvassa 4.2 on kuvattuna päivitetty järjestelmä. Vektorisuunnistusjärjestelmä koostui iSense-yhtiön lämpökompensoidusta AIST-350 inertiamittausyksiköstä (kuva 4.3), jonka tärkeimmät ominaisuudet on koottu taulukkoon 4.1. Inertiamittausyksikön lisäksi järjestelmä koostui mittauskärryssä valmiiksi olleesta matkamittausjärjestelmästä sekä differentiaaliseen GPS-paikannukseen soveltuvasta NovAtel DL-4plus -vastaanottimesta [15], jota hyödynnettiin sekä referenssipaikantimena että laitteiden synkronoinnissa. Mukana järjestelmän toimivuutta selvittävässä mittauksessa oli myös kuluttajaelektronikan inertiamittausyksikkö, joka sisälsi lisäksi magnetometrin ja GPS-vastaanottimen.

Taulukko 4.1: AIST-350 inertiamittausyksikön tärkeimmät ominaisuudet [16].

	gyroskooppi	kiihtyvyysanturi
akselit	3	3
mittausalue	$\pm 400^\circ/\text{s}$	$\pm 15 \text{ g}$
biaksen vakaus	$15^\circ/\text{h}$	0.5 mg
kaistanleveys	100 Hz	100 Hz

Laitteiden välinen synkronointi suoritettiin aikaleimaamalla kaikki mittaukset GPS-aikaan. Itsenäinen IMU suoritti aikaleimaamisen omalla vastaanottimellaan, kun taas matkamittarin ja lämpökompensoidun IMUn tapauksessa hyödynnettiin DGPS-vastaanotinta. Lämpökompensoitu IMU synkronoitiin kytkimen avulla. Laskurin ohjaama kytkin avattiin inertiamittauksille samalla hetkellä laskurin kellonajan nollaamisen kanssa. Tällöin myös DGPS-laitteelle välitettiin informaatio tapahtumasta ja GPS-aika otettiin talteen.



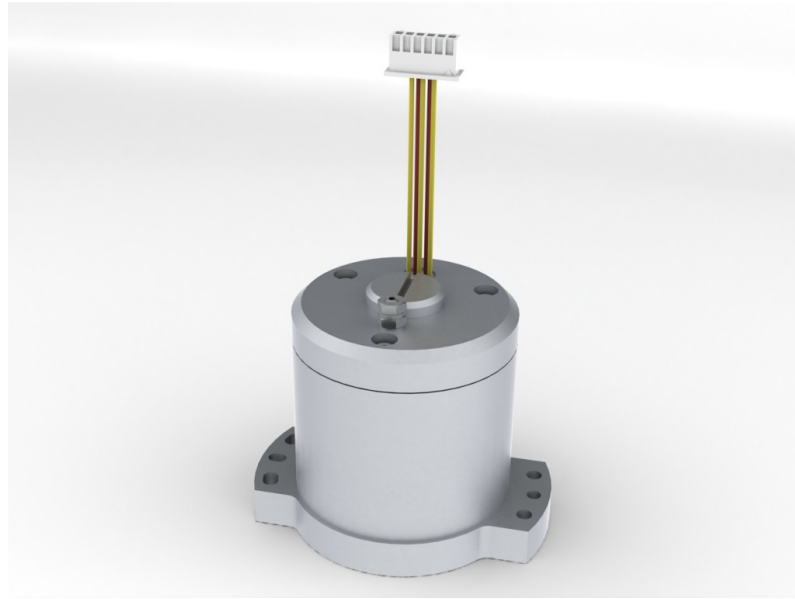
Kuva 4.2: Järjestelmän toiminnalliset kokonaisuudet.

Järjestelmän toimivuutta selvittävät mittaukset suoritettiin TTY:n kampuksella jalkakäytävällä ja parkkipaikalla. Ennen virallista mittausta anturit kalibroitiin. Kalibrointi suoritettiin tekemällä kalibrointimittauksia, joiden perusteella kalibrointi oli mahdollista suorittaa jälkikäteen. Gyroskoopin biasin kalibrointimittaus suoritettiin seisottamalla mittauskärryä paikallaan muutaman minuutin ajan. Tämän jälkeen magnetometrin kalibrointimittaus suoritettiin ajelemalla kärryllä ympyrää ja kahdeksikkoo.

Lopulliset kalibroinnit antureille tehtiin mittausten jälkeen tietokoneella ennen mittausten tulkitsemista navigointiratkaisuiksi. Navigointiratkaisuissa hyödynnettiin vain matkamittaria sekä lämpökompensoidun IMUn gyroskoopin z-akselin tai itsenäisen IMUn magnetometrin x- ja y-akselin mittauksia.

Gyroskoopin bias kalibroitiin seuraavasti. Mittauskärryn ollessa paikallaan, tulee gyroskooppien mitata kulmanopeudeksi  $0^\circ/\text{h}$ , kun maapallon pyörimistä ei oteta huomioon. Gyroskoopin kalibrointimittauksista laskettiin keskiarvo ja se vähennettiin virallisen mittauksen jokaisesta mittauksesta. Samoin olisi toimittu gyroskoopin muiden akselien ja kiihtyvyyssanturin kohdalla, mutta niitä ei tässä työssä hyödynnetty.

Magnetometrin tapauksessa kalibrointimittaukset visualisoitiin kaksiulotteiseen koordinaatistoon. Koordinaatistoon muodostuneen ympyrän sijainnista ja muodosta voidaan päätellä magnetometriin kalibrointimittausten aikana kohdistuneet häiriöt. Mitä enemmän ympyrässä on soikiomaisuutta, sitä enemmän magneettikenttää häiritsevät kappaleessa 2.4 mainitut *soft iron* -häiriöt. Vastaavasti *hard iron* -häiriöt aikaansaavat sen, että ympyrän keskipiste siirtyy origosta. Kalibrointi tulee täten



Kuva 4.3: Lämpökompensoitu IMU AIST-350 [16].

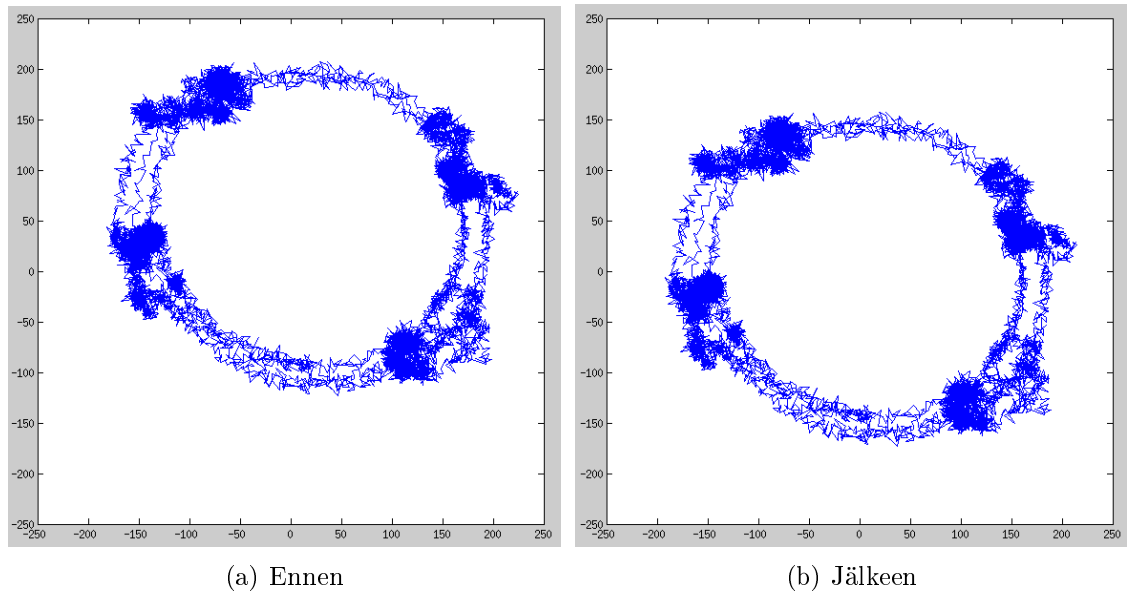
suorittaa siten, että soikio kääntyy oikeaan asentoon ja supistuu ympyräksi. Kuvassa 4.4 on magnetometrin mittaukset ennen ja jälkeen kalibroinnin.

### 4.3 Tulokset

Vektorisuunnistusjärjestelmän toimivuus todennettiin TTY:n kampuksella suoritetulla mittauksella. Järjestelmä koostui lämpökompensoidusta inertiamittausyksiköstä sekä matkamittarista. Mukana mittauksessa oli myös DGPS-vastaanotin ja kuluttajaelektronikan inertiamittausyksikkö magnetometrillä ja GPS-vastaanottimella. Mittauksen aikana järjestelmä keräsi talteen dataa, joka jälkepäin jalostettiin navigointiratkaisuksi.

Mittaus suoritettiin ulkona asfaltilla, mikä aiheutti alun perin sisäkäyttöön suunnitellulle mittaukskärjelle huomattavaa tärinää. Tärinästä huolimatta lämpökompensoidun inertiamittausyksikön datasta saatiin ratkaistua metritarkkuusluokkaa oleva navigointiratkaisu. Vertailuna käytetty magnetometri sen sijaan häiriintyi ajoittain suurestikin paikallisista magneettikentän häiriöistä. Molemmat navigointiratkaisut käyvät ilmi kuvasta 4.5. Kuvassa harmaalla on DGPS-vastaanottimen paikkaratkaisu niissä paikoissa missä se on ollut luotettava. Mustalla kuvassa on gyroskoopin datasta tuotettu paikkaratkaisu ja punaisella magnetometrin vastaava.

Kohdat, joissa magnetometri on häiriintynyt, käyvät vielä selkeämmin esille kuvasta 4.6. Kuvassa on gyroskoopin paikkaratkaisun päälle yhdistetty magneettikentän vektorit. Niissä kohdissa, joissa magneettikenttä on häiriöttömin, osoittaa kartalla oleva nuoli vihreänä kohti pohjoista. Nuolen ollessa keltainen, on magneettikentän suunta yli kymmenen astetta pielessä. Vastaavasti nuolen ollessa punainen,



Kuva 4.4: Magnetometrin mittaukset kalibrointia ennen ja kalibroinnin jälkeen.

on magneettikentän poikkeama yli 20 astetta.

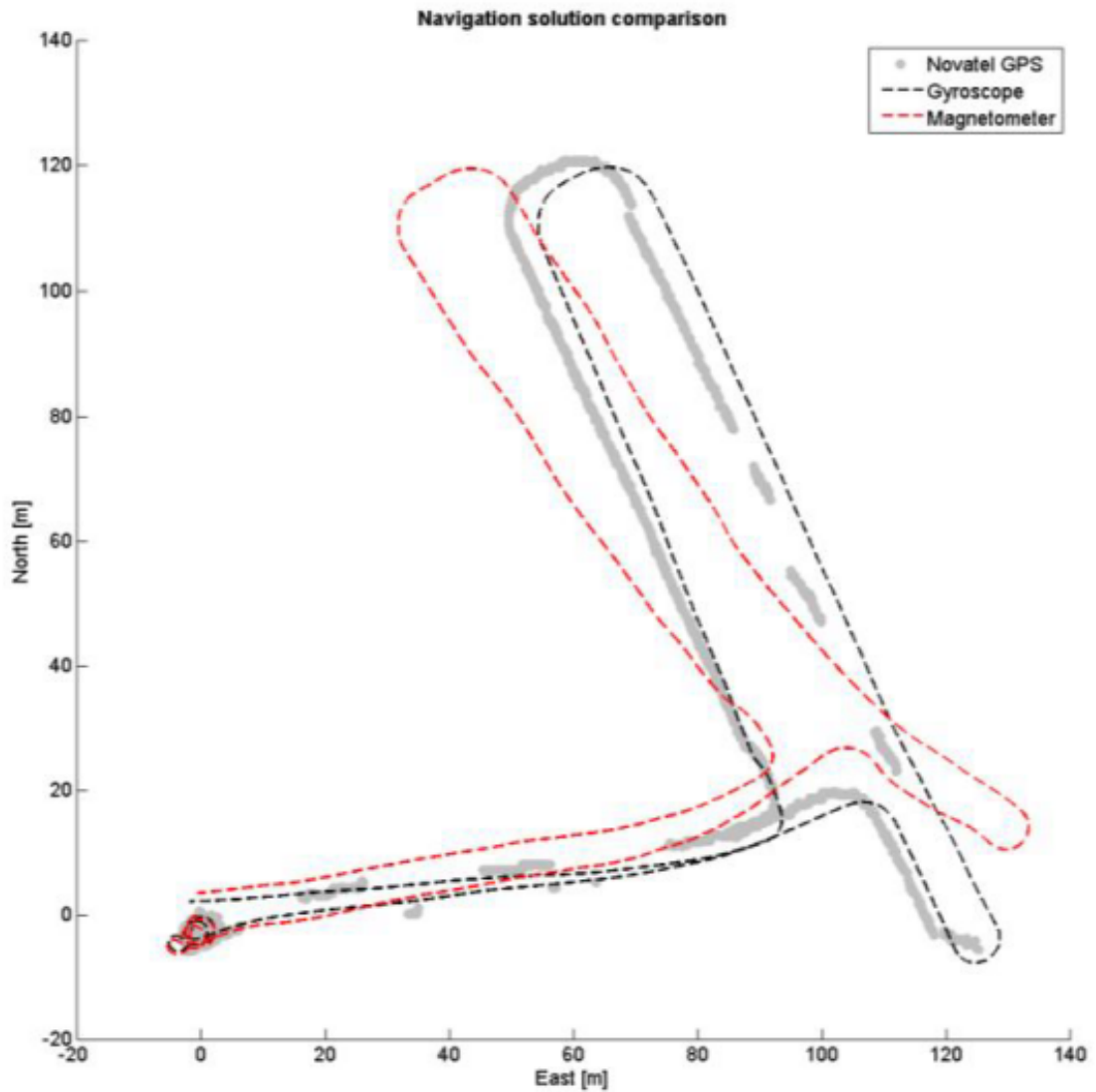
Kuvia 4.5 ja 4.6 tarkastelemalla huomataan, kuinka magneettikentän häiriintyessä magnetometrin tuottama paikkaratkaisu alkaa poikkeamaan todellisesta. Häiriöiden pienentyessä magnetometrin tuottaman paikkaratkaisun muoto alkaa vastata taas todellisuutta. Virheen kuitenkin jo vaikuttaneena, todellisen sijainnin määrittäminen vaatii tukea muilta menetelmiltä kuten GPS:ltä.

#### 4.4 Pohdinta

Järjestelmä todisti, että lämpökompensoitu inertiamittausyksikkö soveltuu hyvin lyhytkestoiseen paikannukseen, kunhan otetaan huomioon pari asiaa. Ensinnäkin alkutiedot on saatava luotettavasti joltain muulta menetelmältä. Tässä tutkimuksessa luotettavan alkusijainnin tarjosi senttimetrin tarkkuuteen pystyvä DGPS-vastaanotin ja alkusuunnan häiriöttömässä alkutilanteessa ollut magnetometri. Toiseksi, kohtuuhintainen IMU lämpökompensoitiosta huolimatta ei millään pysty luotettavaan matkamittaukseen. Täten vaatimuksena on myös luotettava matkamittari.

Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin vain gyroskoopin z-akselia. Ainoastaan yhden akselin hyödyntämisen edellytyksenä on maan pinnan vaakatasoisuus. Esimerkiksi kallistetuissa kaarteissa on otettava huomioon kääntymisen jakautuminen gyroskoopin useammalle akselille. Kallistusten havaitsemisessa, kuten vieläkin tarkempien navigointiratkaisujen tapauksessa, on suotavaa käyttää anturifuusiota virheiden minimoimiseksi.

Käytettäessä lämpökompensoitua IMUa pidempikestoisissa paikannusmittauksissa, tulee gyroskoopin summautuvaa virhettä kompensoida muilla menetelmillä.



Kuva 4.5: Mittauslaitteiden tuottamat ratkaisut kartalla.

Muiksi menetelmäksi soveltuu esimerkiksi magnetometri, mutta tällöin on tarkasteltava mittauksia ja arvioitava magneettikentän mahdollisia häiriöitä. Esimerkiksi tässä mittauksessa magneettikentän häiriöitä aiheuttivat läheltä ohitetut autot.

Esitettyihin tuloksiin viitaten järjestelmää olisi mahdollista kehittää esimerkiksi parkkihallipaikannukseen. Auton saapuessa parkkihalliin, haetaan palvelimelta parkkihallin pohjapiirros. Parkkihalliin saavuttaessa tiedetään alkusijainti sekä -suunta. Täten parkkihallissa olisi mahdollista suunnistaa auton matkamittaria sekä inertia-antureita hyödyntämällä. Tämän tyyppinen ratkaisu vaatii kuitenkin tukea useammalta taholta, eikä täten ole realistinen kuluttajille muutamiin vuosiin.

Parkkihalliesimerkki on vain yksi useista inertia-anturien avulla toteutetun vektorisuunnistusmenetelmän mahdollisuuksista. Muiden kulkuneuvojen kuin autojen tapauksissa pätevät samat periaatteet kuin parkkihalliesimerkissä. Tarvitaan vain



Kuva 4.6: Magneettikentän häiriöt kartalla. Taustakartta: Google Imagery © 2012 Digital Globe GeoEye

lyhytkestoinen tuki muulta menetelmältä ja tämän jälkeen varsinainen navigointi voidaan suorittaa vektorisuunnistusjärjestelmällä.



## 5. INERTIA-ANTURIT KAKSIPYÖRÄISESSÄ

Suomen tieliikenteessä tapahtui tilastokeskuksen tietojen mukaan 5 725 henkilövahinkoon johtanutta onnettomuutta vuonna 2012. Niissä loukkaantui 7 088 ja menehtyi 255. Menehtyneistä moottoripyöräilijöitä oli 21. [17]

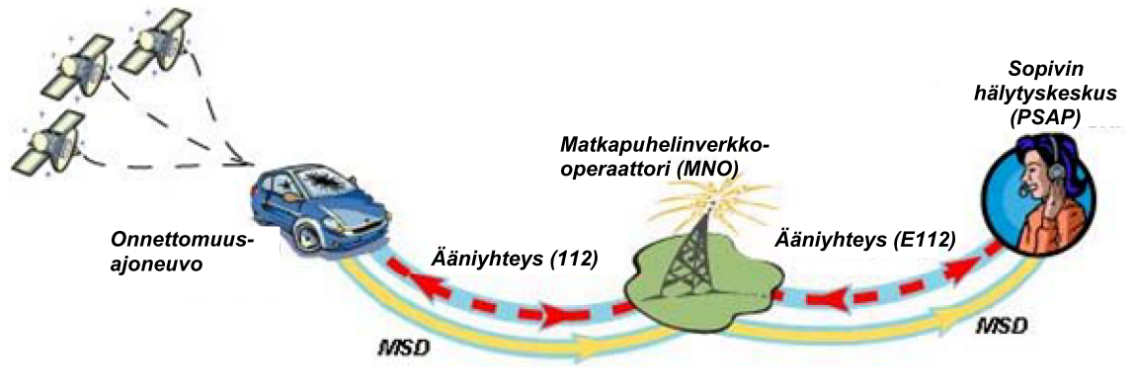
Onnettomuuksia tapahtuu vähemmän kuin koskaan. Yhä lieventääkseen vakavien liikenneonnettomuuksien seurauksia, Euroopan komissio on kesällä 2013 hyväksynyt kaksi ehdotusta liittyen yleiseurooppalaiseen hätäviestijärjestelmään eCall:iin. eCall-järjestelmän ideana on, että onnettomuuden sattuessa auton pitäisi automaattisesti ottaa yhteys hätäkeskukseen ja ilmoittaa onnettomuuspaikan sijainti, vaikka kuljettaja olisi tajuton tai ei muusta syystä johtuen pystyisi itse hätäpuhelua soittamaan. Komission tavoitteena on, että vuoden 2015 lokakuusta lähtien kaikkiin uusiin henkilöautomalleihin asennetaan eCall-järjestelmä ja että hätäpalvelukeskuksiin hankitaan järjestelmän vaatima infrastruktuuri. [18]

Euroopan komission lehdistötiedotteessa [18] puhutaan vain autojen automaattisista hätäpuheluista. Olin mukana tutkimuksessa, jonka tarkoituksena oli kehittää menetelmä kaksipyöräisen moottoriajoneuvon liiketilan mittaamiseen inertianturien avulla. Tarkka kulkuneuvon liiketilan tietämys lisää mahdollisuutta yhdistää myös moottoripyörät eCall-järjestelmän piiriin. Seuraavissa aliluvuissa on esitelty tutkimus ja sen tulokset.

### 5.1 Taustat ja menetelmät

Yleiseurooppalainen hätäviestijärjestelmä eCall:n ideana on, että onnettomuuden sattuessa auton pitäisi automaattisesti ottaa yhteys hätäkeskukseen ja ilmoittaa onnettomuuspaikan sijainti, vaikka auton kuljettaja ja matkustajat olisivat sokissa eivätkä välttämättä tietäisi tarkkaa sijaintiaan tai eivät pystyisi ilmoittamaan sitä tai käyttämään matkapuhelinta. [19]

eCall-järjestelmän toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 5.1. Vakavan onnettomuuden sattuessa ajoneuvoon asennetut anturit käynnistävät automaattisesti eCall-puhelun. Toiminnon aktivoiduttua ajoneuvoon asennettu järjestelmä muodostaa ääniyhteyden hätäkeskukseen. Äänipuhelun yhteydessä lähetetään hätäviesti ja vähimmäistiedot (*minimum set of data, MSD*), joihin sisältyvät tärkeimmät tiedot onnettomuudesta, kuten aika, paikka, ajosuunta ja ajoneuvon kuvaus. Tämän lisäksi eCall-järjestelmä voidaan aktivoida myös manuaalisesti. [19]



Kuva 5.1: eCall-järjestelmän havainnoillistamiskuva. [19]

eCall-järjestelmän kautta saatavien tietojen ansiosta pelastustoimi voisi auttaa kuljettajia ja matkustajia nykyistä joutuisammin, mikä auttaisi pelastamaan ihmishenkiä ja hoitamaan loukkaantuneita nopeammin. On arvioitu, että eCall-järjestelmä voisi Euroopan alueella nopeuttaa pelastustoimen vasteaikoja kaupunkialueilla 40% ja maaseudulla 50%, ja pelastaa jopa 2 500 ihmishenkeä vuosittain. Liikenneturvallisuu den parantumisen lisäksi eCall auttaisi myös merkittävästi vähentämään liikenneonnettomuuksien aiheuttamaa ruuhkaantumista ja välttämään seurannais onnettomuuksia, joita aiheutuu valvomattomista onnettomuuspaikoista. [18]

eCall-järjestelmästä puhuttaessa järjestelmän käyttöönotto rajataan usein vain henkilöautoihin ja muihin nelipyöräisiin. Kuitenkin eCall-järjestelmän vähentäviä vaikutuksia liikenneonnettomuuksissa kuolleiden määrässä Suomessa tutkiessaan Virtanen huomasi eCall-järjestelmän tulon tärkeyden myös moottoripyöräkuolemia silmällä pitäen. Virtanen totesi diplomityössään [20], että yli puolet moottoripyöräonnettomuuksista on yksittäisonnettomuuksia, pääasiassa tieltä suistumisia, ja juuri näissä nimenomaisissa tapauksissa korostuu hälytysviive eli aika, jolloin onnettomuudesta suoritetaan hälytys ja juuri nimenomaan tähän tapaukseen eCall-järjestelmän on todettu auttavan. Täten Virtanen piti eCall-järjestelmän tarvetta kaksipyöräisille selkänä.

eCall-järjestelmän edellytyksenä on, että onnettomuus pystytään havaitsemaan. Auton tapauksessa törmäys voidaan havainnoida vaikkapa auton turvatyynyn laukeamisesta. Moottoripyörän tapauksessa onnettomuuden havaitseminen ei ole näin suoraviivaista. Jos esimerkiksi pystyttäisiin tavalla tai toisella havaitsemaan kaatuminen, mistä tiedetään, ettei kaatuminen ole samaa luokkaa kuin autolla ojassa käyminen; pieni ponnistus ja auto on taas tiellä ja moottoripyörä vastaavasti pysy tyssä.

Moottoripyöräonnettomuuksien havainnointi vaatii mallien luomista. Tässä tutkimuksessa mallinnusta lähdettiin toteuttamaan kehittämällä järjestelmä kaksipyörä-

sen moottoriajoneuvon liiketilan tarkkailemiseksi. Liiketilan tarkkailujärjestelmässä liitettiin moottoripyörään, kuljettajan vartaloon ja kypärään oma inertiamittausyksikkö. Näin saatiin havainnoitua kyseisten kappaleiden kuusi vapausastetta. Moottoripyörä ja kuljettaja valittiin omiksi kappaleikseen, sillä onnettomuuden sattuessa kuljettaja ei todennäköisesti pysy pyörän selässä. Kypärä valittiin kolmanneksi kappaleeksi pään elintärkeyden vuoksi. Kolme anturiyksikköä muodostavat yhdessä kattavan anturiverkoston moottoripyörän ja -pyöräilijän liiketilan tarkkailemiseksi.

## 5.2 Liiketilan tarkkailujärjestelmä

Inertia-anturit ovat yleistyneet ja on olemassa monia valmiita inertiamittausyksiköitä sekä useamman inertia-anturin sisältämiä kokonaisuuksia. Jopa matkapuhelimityössä on tänä päivänä kolme akselinen kiihtyvyyssanturi, gyroskooppi ja magnetometri. Inertiamittausyksiköt kuitenkin poikkeavat toisistaan ominaisuuksien perusteella huomattavasti.

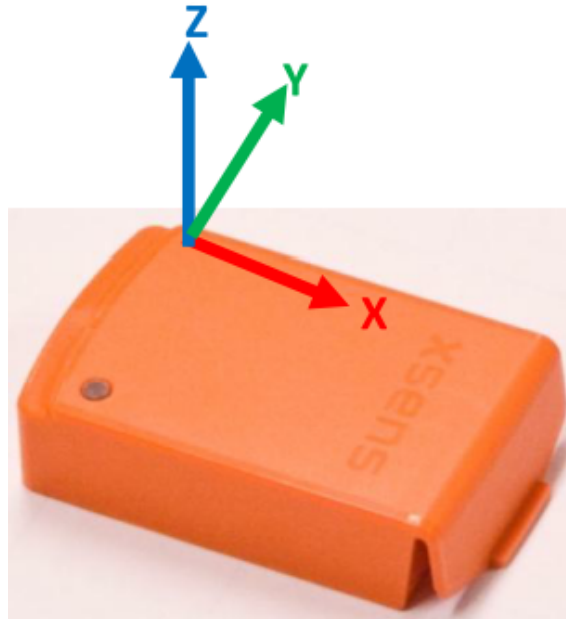
Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, moottoripyörä-kuljettaja-yhdistelmää mallinnettaessa on käytössä useampi kappale mittaussyksiköitä. Tämän vuoksi mittalaitteiden välinen synkronisaatio on tärkeää. Pieni fyysinen koko sekä tarkka ja helppo yksiköiden välinen synkronointi rajaa suuren osan mittaussyksiköistä pois. Täten tutkimuksessa päädyttiin Xsens MTw Development Kit -anturikokonaisuuteen [21].

Liiketilan tarkkailujärjestelmä koostui kolmesta Xsens MTw -inertiamittausyksiköstä sekä HD-tasoisesta videokamerasta. Lisäksi järjestelmän toimivuutta selvittämissä mittauksissa käytettiin taulutietokonetta mittauksien tallentamiseen. Tallennus tapahtui langattomasti tietokoneeseen kytketyn lisälaitteen avustuksella. Kuvassa 5.2 on MTw-inertiamittausyksikkö kappalekoordinaatistossaan. Inertiamittausyksikkö sisältää kiihtyvyyssanturin, gyroskoopin, magnetimetrin ja barometrini.

Xsens MTw -mittalaitteissa on käytössä yhtiön oma Kalman-suodin XKF-3w, joka käyttää mittalaitteen asentoa estimoidessaan hyödyksi gyroskoopilta, kiihtyvyyssanturilta ja magnetometriltä tulevia signaaleja. Suodin hyödyntää kiihtyvyyssanturilta gravitaation kautta saatua vaakasuuntotietoa sekä magnetometriltä maan magneettikentän kautta saatua suuntatietoa kompensoidessaan gyroskoopin integroituissa asentotiedossa olevaa virhettä. Täten MTw toimii kappaleessa 3.2 esiteltyinä AHRS-laitteena. [21]

Asentotietoa estimoidessaan XKF-3w seuraa myös anturien biaksia sekä paikallisen magneettikentän arvoja. Perustuessaan osittain historiatietoihin, XKF-3w:n tulee laittaa päälle mahdollisimman häiriöttömissä olosuhteissa. Samoin myös mitaustapahtumassa tulee huomioida kappaleessa 2.3 esiteltyt magneettikentän häiriöt.

Xsens MTw -mittalaitteet ilmoittavat anturiensa ulostulonsa omissa kappalekoordinaatistossaan. Tämän lisäksi mittalaitteet mahdollistavat asentotiedon ilmoittamisen kaikissa kappaleissa 3.1 määritetyissä muodoissa. Asento ilmoitetaan kappalekoordina-



Kuva 5.2: Xsens MTw kappalekoordinaatistossa. [21]

naatiston ja paikallisen koordinaatiston suhteen siten, että paikallinen koordinaatisto toimii referenssikoordinaatistona. Paikallinen koordinaatisto on määritelty kuten kappaleessa 3.1 eli siten, että positiivinen x-akseli osoittaa paikalliseen magneettiseen pohjoiseen, y-akseli osoittaa vasemmalle eli länteen ja z-akseli ylös.

MTw-mittausyksiköiden tarkat tulokset perustuvat tarkkoihin antureihin ja erityisesti anturien tarkkoihin virhemallinnuksiin. Anturit yhdessä optimoidun Kalman-suotimen kanssa aikaansaavat sen, että mittauslaitteen saa näyttämään väärin vain ylittäessä anturien mittausalueet. Taulukossa 5.1 on esitelty mittausyksikön anturien tärkeimmät ominaisuudet, joista huomataan ominaisuuksien riittävän monipuolisiin mittauksiin.

Taulukko 5.1: Xsens-anturien tärkeimmät ominaisuudet [21].

	gyroskooppi	kiihtyvyyssanturi	magnetometri	paineanturi
akselit	3	3	3	–
mittausalue	$\pm 1200$ °/s	$\pm 160$ m/s <sup>2</sup>	$\pm 150$ $\mu$ T	-500...9000 m
biaksen vakaus	20 °/h	–	–	100 Pa/a
kaistanleveys	120 Hz	140 Hz	10...60 Hz	–

### 5.3 Tulokset

Kehitetyn järjestelmän arvioimista varten TTY:n kampuksella suoritettiin useampi mittaus moottoripyörällä ajaen. Mittauksia tehtiin viisi kappaletta, joissa jokaisessa keskityttiin johonkin tiettyyn ajotapahtumaan. Ensimmäisessä testissä pääpaino

oli moottoripyörällä tehdyillä hillityillä kiihdytyksillä ja jarrutuksilla. Toisessa mittauksessa keskityttiin vastaavasti huomattavasti rajumpiin kiihdytyksiin ja äkkijarrutuksiin. Kolmannessa ajossa vuorossa olivat kaistanvaihdot ja neljännessä kääntymiset. Viides testi painottui ajoon erilaisilla alustoilla. Neljä ensimmäistä testiä oli kaikki ajettu asfaltilla, mutta viidennessä käytiin asfaltin lisäksi pomppuisalla hiekkaosuudella sekä ylitettiin pieniä maassa olevia esteitä.

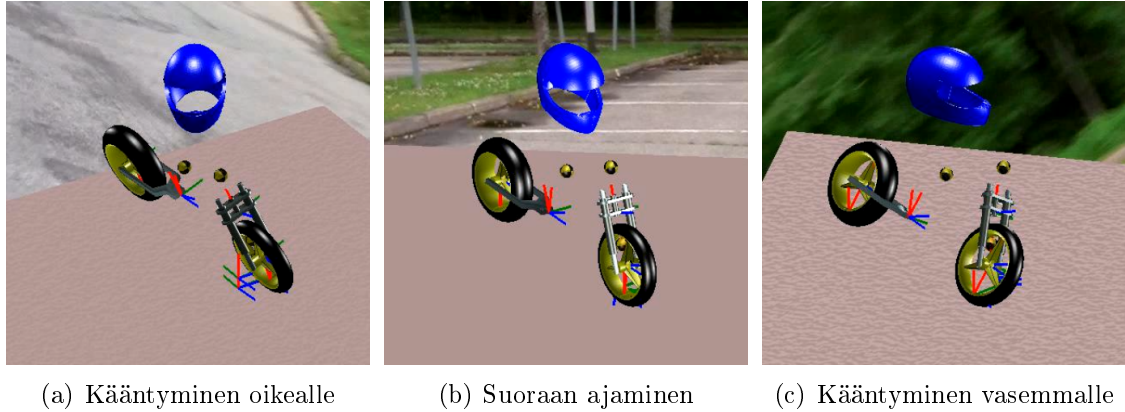
Liiketilantarkkailujärjestelmän arvioiminen suoritettiin kokoamalla mittausdatasta malli, jonka käyttäytymistä arvioitiin. Mallin moottoripyöräosuudessa hyödynnettiin Wesley Oomsin Matlab-ohjelmaan luomaa moottoripyörämallia [22]. Moottoripyörämallia ohjattiin mittauksissa käytetyssä moottoripyörässä kiinni olleen inertia-mittausyksikön mittauksilla, kunhan mallin ja anturin koordinaatistot oltiin ensin yhtenäistetty. Yhtenäistämisen hyödynnettiin kappaleessa 3.1 esiteltyjä menetelmiä.

Moottoripyörämalliin yhdistettiin myös kuljettajan kypärän anturin mittauksilla ohjailtava kypärämalli. Näin pystyttiin arvioimaan kuljettajan pään käyttäytymistä mittaus tilanteissa. MTW-anturien tarjoaman sykronoinnin ansiosta mallien yhdenaikaistamiseen ei tarvinnut kiinnittää huomiota. Kolmatta anturia eli kuljettajan vartaloon kiinnitettyä mittalaitetta ei mittausmenetelmän arvioinnissa hyödynnetty, sillä mittauksissa kuljettaja pysyi jatkuvasti moottoripyörän selässä ja liikkui täten moottoripyörään nähden vähän.

Mallin käyttäytymisen arvioimiseksi oli mallille oltava referenssi, johon mallin käyttäytymistä voidaan verrata. Referenssinä arvioinnissa toimivat moottoripyörään kiinnitetyn videokameran nauhoitukset. Arvioimista varten kameralla kuvattu video oli yhdistettävä malliin. Video yhdistettiin malliin manuaalisesti ja silmämääräisesti. Silmämääräinen yhdistäminen oli moottoripyörämäisen käyttäytymisen todentamisen arviointiin riittävä.

Havainnollistamiskuvassa 5.3 näkyy mallin käyttäytyminen eri tilanteissa. Sarjakuvan ensimmäinen kuva kuvaa tilannetta, jossa moottoripyöräilijä on kääntymässä oikealle. Pyörän kallistuminen on selkeästi havaittavissa mallissa olevien värikkäiden akselien erosta mallin pyörään nähden. Keskimmaisessä kuvassa moottoripyörä kulkee suoraan eteenpäin ja näin ollen pyörä ja akselit ovat samassa kohdassa. Oikean puoleisessa kuvassa moottoripyöräilijä on vastaavasti kääntymässä vasemmalle. Kallistumiskulman voi havaita punaisten akseleiden tuottamasta v-kirjaimesta.

Toinen sarjakuvasta 5.3 havaittava asia on kypärän liike. Kuvasta näkyy, kuinka malli seuraa oikean kypärän oletettavaa käyttäytymistä. Moottoripyöräilijän kääntymässä oikealle, myös kypärä on kääntynyt vastaavan suuntaan. Samoin mallin kypärä käyttäytyy myös vasemmalle kääntymässä. Näin tarkalla moottoripyöräilijän kypärän ja sitä kautta pään seuraamisella on mahdollista kiinnittää huomiota sekä päähän kohdistuviin iskuihin onnettomuuksissa että kuljettajan pään käyttäytymi-



Kuva 5.3: Moottoripyöräilijämallin käyttäytyminen

seen normaalissa ajotilanteessa esimerkiksi risteysalueella ja ohitustilanteissa.

## 5.4 Pohdinta

Tämä tutkimus sekä todisti että havainnollisti, kuinka inertia-antureita voidaan hyödyntää kaksipyöräisen kulkuneuvon liiketilän havainnoinnissa. Tutkimus toi ilmi myös, kuinka kehittyneitä nykyaikaiset inertiamittausyksiköt voivat olla ja kuinka sulavasti niitä voidaan useamman mittausyksikön tapauksessa yhdessä käyttää.

Tutkimuksella on edesauttava vaikutus moottoripyörien saamiseksi eCall-järjestelmän piiriin. Selvittämällä tutkimuksessa esitellyn liiketilantarkkailujärjestelmän avulla moottoripyörälle ja -pyöräilijälle tyypillisiä ajotapahtumia, voidaan ajotapahtumien kautta rakentaa malleja normaaliin moottoripyöräajoon. Laajentamalla mallien luomista myös onnettomuustilanteisiin, saadaan järjestelmän avulla luotua myös hälytyksen laukaisevia onnettomuusmalleja. Tällöin on otettava huomioon myös tässä tutkimuksessa huomioimatta jätetty eli kuljettajan vartaloon kiinnitetty inertiamittausyksikkö. Riittävän kattavista mittauksista muodostetut kattavat mallit edesauttavat onnettomuuksien havainnointia ja täten mahdollistavat eCall-järjestelmän laajenemisen myös moottoripyöriin.

Riittävän kattavat mittaukset ovat vaatimus moottoripyöraonnettomuuksien mallien rakentamiselle. Moottoripyörien autoista poikkeava käyttäytymismalli vaikeuttaa onnettomuusmallien kehittämistä. Esimerkiksi maastossa liikkuvilla, mutta myös kaupunkiajossa sallituilla kaksipyöräisillä moottoriajoneuvoilla, moottoripyörään kohdistuvat voimat voivat kaupunkiajossa tarkoittaa onnettomuutta, mutta maastossa normaalia ja haluttua toimintaa.

Liiketilantarkkailujärjestelmän yhdistäminen GPS-järjestelmän kanssa mahdollistaisi monipuolisen moottoripyöräilijän havainnoimisen. Tämä edelleen mahdollistaisi moottoripyöräilijän ajokäyttäytymisen kattavan arvioinnin. Moottoripyöräilijän ajokäyttäytymisen tunnistamisen avulla moottoripyöräilijän ajotapaan olisi mahdol-

lista positiivisesti vaikuttaa. Tämä saattaisi kitkeä liikenteestä vaaraa aiheuttavat voimakkaat kiihdytykset pois. Näin ollen laajat jatkokehitys- sekä soveltamismahdollisuudet liiketilantunnistusjärjestelmälle ovat olemassa.

## 6. INERTIA-ANTURIT TALOUDELLISESSA LIIKENTEESSÄ

Nykyiset autonavigaattorit ja älypuhelinien autonavigointiin tarkoitetut sovellukset tarjoavat käyttäjilleen usein vain kahdenlaista pääreititysvaihtoehtoa: lyhyintä ja nopeinta reittiä. Näihin kahteen vaihtoehtoon pystyy toki vaikuttamaan esimerkiksi kieltämällä moottori-, hiekka- ja maksutiet sekä lautat ja tunnelit. Myös yhdistetty eli tasapainotettu vaihtoehto on usein mahdollinen. Kuitenkin polttoaineen kallistuessa, myös mahdollisuus taloudellisimpaan reittivaihtoehtoon tulisi olla saatavilla.

Taloudellisimmassa reittivaihtoehdossa tarkoituksena on löytää reitti pisteestä A pisteeseen B siten, että kulutetaan mahdollisimman vähän energiaa ja samalla aiheutetaan mahdollisimman vähän pienhiukkaspäästöjä. Tästä syystä tätä taloudellista reititystä kutsutaankin englanniksi termillä *green routing* eli vihreä reititys. Vihreälle reititykselle onkin tarvetta, sillä liikenteen kasvihuonepäästöt ovat Suomessa vuodessa yli kymmentä miljoonaa hiilidioksiditonnia vastaava määrä [23].

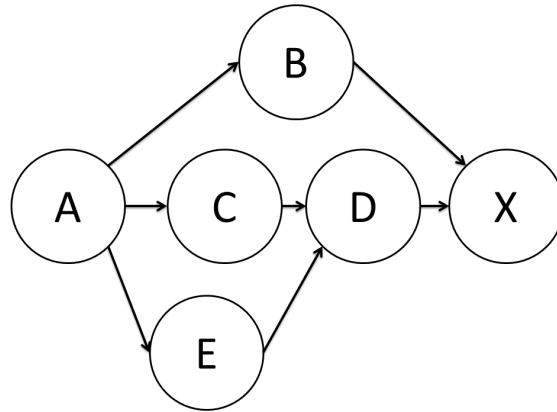
Liikenteen päästöjä on pyritty vähentämään erilaisilla taloudellisen ajon menetelmillä kuten pysähdyksien välttämällä ja nopeuden sekä kiihtyvyyden optimoinnilla. On tutkittu, että nämä menetelmät säästävät vuosittain arviolta jopa 33 miljoonaa tonnia hiilidioksidia pelkästään Yhdysvalloissa [24]. Säästöjä on vieläkin mahdollista kasvattaa, sillä on osoitettu, että vihreällä reitityksellä on mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjä jopa 27% matka-ajan hidastuessa vain 11% satunnaisilla kuljettajilla [25].

Miksi navigaattoreista ei sitten vielä löydy taloudellisimman reitin vaihtoehtoa? Ongelmana on, ettei eri tienpätkille ole vielä onnistuttu määrittelemään riittävän tarkkoja ja virheettömiä energiamalleja. Lyhyimmän reitin tapauksessa riittää tienpätkän pituuksien tietäminen ja nopeimmassa reittivaihtoehdossa on siinäkin vähemmän muuttujia kuin taloudellisimman reitin laskemisessa. Olin mukana tutkimuksessa, joka etsi ratkaisua energia-arvojen datankeruuseen kehittämällä tehokkaan mittausjärjestelmän, joka hyödynsi muun muassa inertia-antureita. Osa tutkimuksesta on jo esitelty viitteessä [26].

### 6.1 Taustat ja menetelmät

Reitityksessä eri reittivaihtoehdot määritellään usein graafin eli verkon avulla. Graafi koostuu joukosta solmuja ja niitä yhteen liittäviä kaaria. Kuvassa 6.1 on esitetty





Kuva 6.1: Reitti pisteestä A pisteeseen X.

reitti graafin avulla.

Reitityksessä graafin solmuja vastaavat risteykset ja tien kohdat, joissa tapahtuu reitityksen kannalta merkittäviä muutoksia eli esimerkiksi tien nopeusrajoitus muuttuu. Graafin kaaret kuvaavat vastaavasti teitä. Reitityksessä kaarille annetaan erilaisia arvoja. Arvot voivat olla yksinkertaisia ja täysin tai lähes muuttumattomia, kuten esimerkiksi kaarta vastaavan tien pituus tai nopeusrajoitus. Tiedonkeruuta kasvattamalla kaarelle voidaan asettaa myös monimutkaisempia ja muuttuvia arvoja, kuten tien käyttöaste ja siitä tai esimerkiksi sateesta johtuen vaihtuva autojen keskinopeus.

Kaarien energia-arvoja määriteltäessä mukaan tulee elementtejä, joilla ei ole ollut ennen merkitystä tai joiden merkitys huomattavasti kasvaa. Esimerkkinä mainittakoon mäet. Lyhyimmässä ja nopeimmassa reittivaihtoehdossa mäet ovat lähes merkityksettömiä, kun taas energiankulutuksen kannalta ne ovat huomattavassa roolissa. Eikö mäelle sitten voi vain antaa jotain tiettyä energia-arvoa? Ei, sillä energia-arvon määrittäminen on monitahoinen ongelma. Siihen vaikuttaa mäen tapauksessa suunta, mahdolliset pysähdykset ja liikkeellelähdöt sekä kuljettajan ajotapa ja auton ominaisuudet. Nopeimman reitin vaihtoehdossa mainitut muuttujat vaikuttavat lopputulokseen huomattavasti vähemmän kuin energiankulutuksen tapauksessa. Vaikka mäkireitillä olisi joka tapauksessa aina nopein, se ei tarkoita sitä, että se olisi aina lähellekään taloudellisin.

Kuinka sitten määrittää kaarelle energia-arvo, joka tuottaa riittävän tarkan arvon? Vaihtoehtona on ajaa tienpätkät useaan kertaan vaihdellen kuljettajaa ja autoa sekä ajaen eri olosuhteissa. Kyseinen ratkaisu ei kuitenkaan ole tehokas vaan tarvitsee suuren määrän resursseja. Tähän ratkaisuun löytääkseen on seuraavassa kappaleessa kuvattu tehokas tapa kerätä dataa energia-arvoja määrittävien algoritmien tueksi. Menetelmässä on huomioitu, että voidakseen vertailla energiankulutusta eri tieyhteyksillä, on kuljettajan ja auton vaikutus poistettava. Samoin on huomioi-

tu, että energia-arvo perustuu useisiin muuttuviin tekijöihin, kuten ajonopeuteen ja ajo-olosuhteisiin. Lisäksi on otettu huomioon se, että energia-arvot voivat poiketa huomattavasti riippuen ajosuunnasta ja voivat sähkö- ja hybridiautoissa olla jopa negatiivisia.

## 6.2 Mittausjärjestelmä

On olemassa muutama vaihtoehto kerätä dataa liikkuvasta autosta. Yksi vaihtoehto on käyttää jokaisessa nykyaikaisessa autossa olevaa OBD-porttia. Tapa on helppo ja yksinkertainen. Ei tarvitse kuin liittää lukija porttiin ja saada kaikki tarvittava tieto suoraan käyttöön. Tässä menetelmässä on kuitenkin myös huonoja puolia. Datan näytteenottotaajuus on kiinteä ja auton valmistajan määrittelemä. Dataa saatetaan myös suodattaa sopivaksi auton sisäistä käyttöä varten.

Toinen vaihtoehto on käyttää antureihin perustuvaa mittalaitteistoa. Ulkoisista laitteista koostuva mittalaitteisto voidaan tarvittaessa kytkeä erilaisiin autoihin ja saavuttaa silti vertailukelpoisia tuloksia. Juuri näistä syistä tutkimuksessa päätettiin anturipohjaiseen ratkaisuun. Mittalaitteiston sijoituksen kohteeksi valittiin puhtaaksi sähköautoksi muutettu Volkswagen Passat. Sähköauto valintui kohteeksi, sillä sähköenergian kulutusta on helppo mitata korkealla näytteenottotaajuudella ja näin saadaan tuloksia myös sähköön uudelleen generoitumisesta.

Energiankeruujärjestelmä oli erillinen järjestelmä ja on tarkemmin kuvattu viitteessä [26], mutta lyhyesti sanottuna järjestelmä koostui virta- ja jännitemittauksista, joiden lukemat leimattiin GPS-ajalla ja -paikalla. Energiankeruujärjestelmän lisäksi tarvittiin antureita mittaamaan kuljettajan käyttäytymistä, jotta voidaan sulkea kuljettajan toimet pois. Antureita sijoitettiin rattiin, kaasun- ja jarrupolkimeen sekä auton runkoon. Antureina toimivat samat Xsens MTw -inertiamittausyksiköt kuin kappaleessa 5.

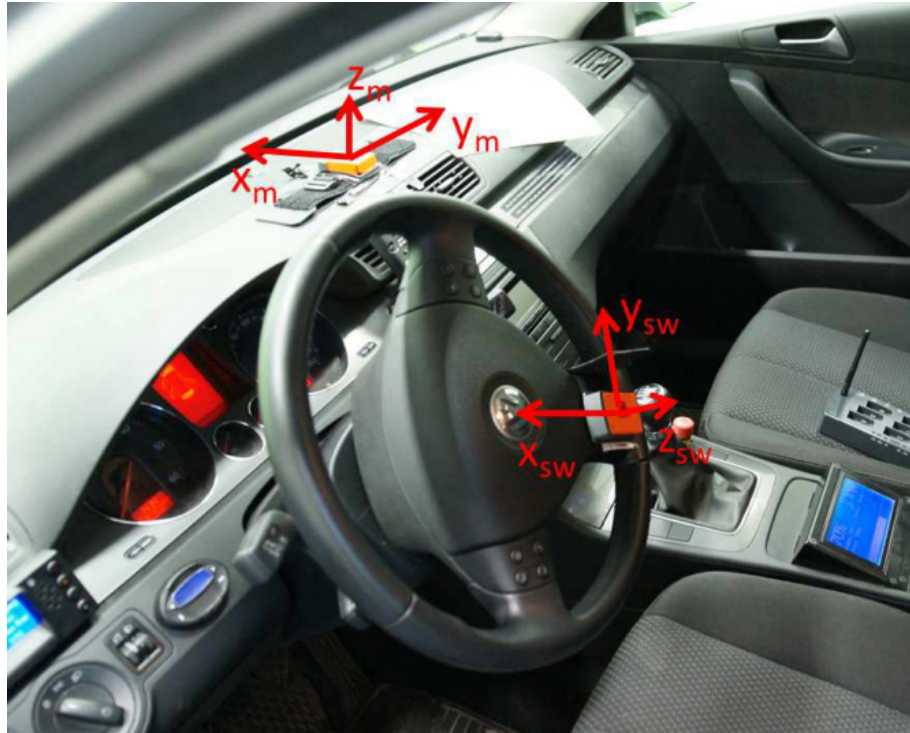
Saadakseen tarkkoja paikka- ja nopeusmittauksia, tutkimuksessa käytettiin samaa NovAtel DL-4+ -DGPS-vastaanotinta kuin kappaleessa 4. Tämän lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin kulkuneuvon runkoon kiinnitetyn MTw-anturin barometria mäkien havainnoimiseksi.

Inertia-antureilla ratin ja polkimien asento laskettiin selvittämällä niiden kulmat seuraavasti: [26]

Olettaen, että kuvan 6.2 anturit kokevat samat kiihtyvyydet, saadaan asento esitettyä suuntakosinimatriisin avulla

$$y^m = C_{sw}^m y^{sw} + n. \quad (6.1)$$

Suuntakosinimatriisi voidaan täten ratkaista esimerkiksi minimoimalla:



Kuva 6.2: Kaksi inertia-anturia kappalekoordinaatistoissaan [26]

$$\operatorname{argmin}_{C_{sw}^m} \|y^{sw} - C_{sw}^m y^m\|. \quad (6.2)$$

Kun vielä oletetaan, että mitatut kiihtyvyydet aiheutuvat vain gravitaatiosta, saadaan kulma mitattua seuraavasti:

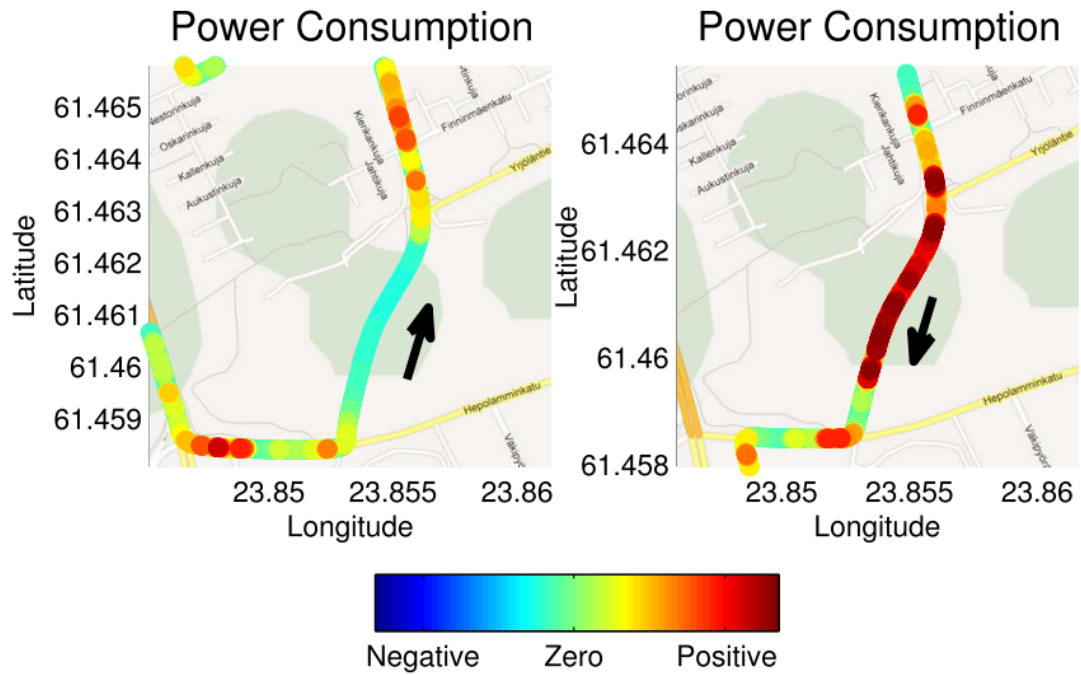
$$\alpha = \arctan \frac{y^{sw}}{x^{sw} + z^{sw}}. \quad (6.3)$$

Ennen kyseistä estimointia tulee anturimittaukset suodattaa esimerkiksi alipäästösuotimella häiriöiden vähentämiseksi. Tarkempaan asentotietoon päästään hyödyntämällä lisäksi gyroskooppia ja Kalman-suodinta.

### 6.3 Tulokset

Järjestelmän toimivuuden todistamiseksi suoritettiin Tampereella mittaus. Mittausajona toimi suhteellisen pitkä ajolenkki, jonka aikana suoritettiin erilaisia ennalta määriteltyjä tapahtumia kattavan mittauksen mahdollistamiseksi. Ajolenkin aikana normaalin ajon lisäksi suoritettiin muun muassa jarru- ja kaasupolkimen pumpausta eri tilanteissa. Näillä liikkeillä ajotavan vaikutusta ajoneuvon polttoaineen kulutukseen pyrittiin selvittämään.

Mittauksissa haettiin todistusta myös sille, että ajosuunnalla voi olla huomattava merkitys ja sähköauton tapauksessa myös energiaa varastoiva. Kuvassa 6.3 on



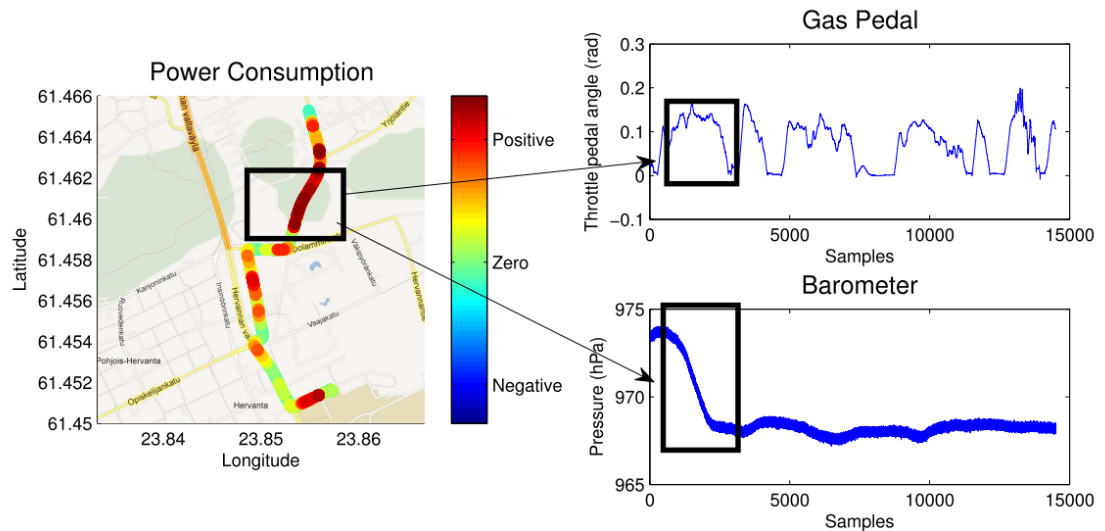
Kuva 6.3: Mäki erisuuntiin ajettuna [26].

kuvattuna sama reittiväli, mutta vastakkaisiin suuntiin ajettuna. Kuvassa olevat väripisteet kertovat energiankulutuksesta tiettyinä hetkenä. Punainen väri tarkoittaa korkeaa energiankulutusta ja sininen väri indikoi vastaavasti energian regeneroitumista. Kuvasta on selkeästi havaittavissa kulutuksen huomattava eroavaisuus. Tässä nimenomaisessa tapauksessa eron tuottaa jyrkkä mäki.

Mittauksilla kerättyä dataa voidaan myös hyödyntää erottelemaan energiankulutukseen vaikuttavat eri tekijät. Kuvissa 6.4 ja 6.5 on esitettyä kaksi tilannetta, joissa molemmissa energiankulutus on huomattava. Kuvissa vasemmalta löytyy energiankulutus ja oikealla on esitettyä kaasupolkimen asento sekä barometrilla mitattu ilmanpaine. Kuvan 6.4 energiankulutuksen syy löytyy jyrkästä mäestä eli reitin tieominaisuudesta. Tämä on havaittavissa huimassa tiputuksessa ilmanpaineessa, joka tarkoittaa nousua korkeammalle. Kuvassa 6.5 on vastaavasti kyseessä kuljettajan toimet. Ilmanpaineen kertoessa, että ajetaan suhteellisen tasaisella maalla, on kuljettaja pumpannut kaasupoljinta ja saanut täten aikaan kasvaneen energiankulutuksen.

## 6.4 Pohdinta

Tutkimus todisti kuinka energian kulutuksen tapauksessa ajosuunnalla on huomattava merkitys tuloksiin. Ajettaessa sama reittiväli samalla nopeudella eri suuntiin, on matkan pituus ja kesto sama, mutta energian kulutus eri. Jyrkän mäen tapauksessa



Kuva 6.4: Mäen aikaansaama energiapiikki [26].

energian kulutus voi sähkö- ja hybridautojen tapauksessa olla jopa negatiivinen.

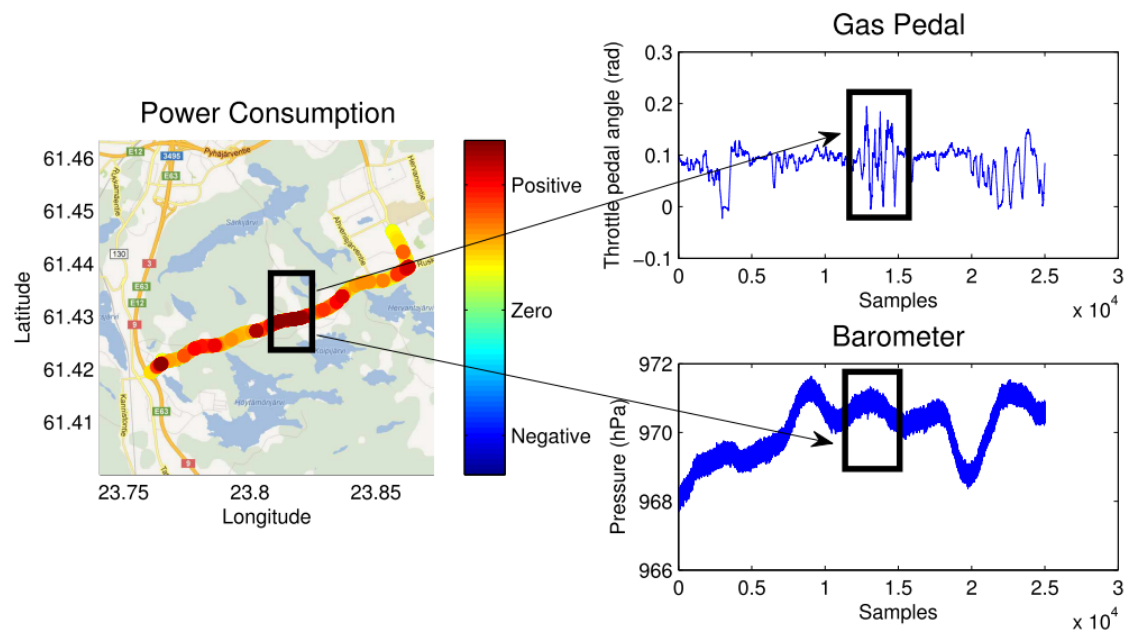
Tutkimus todisti myös kuljettajan vaikutuksen energian kulutukseen. Tasaisella maalla ajettaessa kuljettaja pystyy aikaansaamaan merkittäviä energiankulutuspiikkejä kuluttavalla ajotavalla. Tulokset toivat ilmi mittausjärjestelmän kyvyn taltioida kuljettajan tämän tyyppistä ajokäyttäytymistä.

Tutkimuksessa esitellyllä mittausjärjestelmällä voidaan täten tehokkaasti kerätä dataa teiden energia-arvojen kartoittamiseksi. Mittausjärjestelmän avulla voidaan poistaa kuljettajan vaikutus mittauksista ja näin ollen säästää resursseja. Mittauksia tulee kuitenkin suorittaa riittävä määrä ottaen huomioon energiankulutuksen monitahoisen riippuvuuden myös autosta ja säästä. Autoille on kuitenkin olemassa omat energiankulutusmallinsa ja täten niiden vaikutuksetkin voidaan poistaa ja tehokkuutta edelleen lisätä.

Kehitettyä järjestelmää voidaan hyödyntää vihreän reitityksen tutkimisen lisäksi myös kuljettajan ajotavan kehittämisessä. Kuljettajaa tarkkailemalla voidaan kuljettajalle tarjota ajovalmennusta. Ajovalmennuksessa voidaan puuttua turhiin kaasutuksiin ja jarrutuksiin, suositella mäissä moottorijarrutusta ja näin edistää kuljettajaa saavuttamaan taloudellisempi ajotapa.

Lisäksi mittauksen kautta tulevat teiden energia-arvot pystyvät tarjoamaan sähköauton kuljettajille luotettavampia polttoaineen riittävyysarvioita. Nykyään sähköautojen kantama aiheuttaa sähköautojen kuljettajille epäilystä polttoaineen riittävydestä. Tarkalla energiakulutustietoisuudella tätä varmuutta voitaisiin lisätä. Samalla voitaisiin esittää reittejä latauspaikkojen kautta sekä suunnitella latauspaikkojen sijainnit optimaalisiksi.

Kuten tuloksista käy ilmi, soveltuu inertia monenlaisiin sovelluksiin. Sillä voi-



Kuva 6.5: Kuljettajan aikaansaama energiapiikki [26].

daan autoon liitettynä joko poistaa kuljettajan vaikutus erityyppisistä mittauksista kokonaan tai vastaavasti ottaa huomioon pelkästään kuljettajan toimet. Inertiamittausjärjestelmien helppo yhdistettävyys muiden mittausjärjestelmien kanssa tekee inertiaista apuvälineen monen ongelman ratkaisuun.

## 7. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin inertia-antureita ja niiden hyödyntämistä eri tilanteissa. Työssä perehdyttiin anturien perustana olevaan teoriaan, jatkettiin anturien yleisiin toimintaperiaatteisiin ja käyttäytymismalleihin sekä sovellettiin antureita kolmessa toisistaan poikkeavan järjestelmän kehittämisessä.

Ensimmäisessä järjestelmässä inertia-antureita hyödynnettiin tutkimalla kulkuneuvojen navigointia paikoissa, joissa ulkoisiin referensseihin perustuvat järjestelmät eivät ole käytettävissä. Tutkimuksessa hyödynnettiin kohtuuhintaista lämpökompensoitua inertiamittausyksikköä. Lämpökompensoinnilla saadaan lämpötilan muutoksista johtuva ja anturin mittaustarkkuuteen huomattavasti vaikuttava virhe pienennettyä. Inertiamittausyksikön lisäksi mittauksessa hyödynnettiin kulkuneuvon renkasiin liitettyä matkamittaria. Näin saatiin toteutettua vektorisuunnistusjärjestelmä, joka tärisevissäkin olosuhteissa saavutti metriluokkaa olevan tarkkuuden. Järjestelmän periaatteita noudattaen on mahdollista jatkokehittää järjestelmä, joka pystyy radiosignaalien kantamattomissa tarkkaan navigointiin kulujen kuitenkin pysyessä maltillisina.

Toisessa järjestelmässä moottoripyörään ja sen kuljettajaan kiinnitettiin useampi inertiamittausyksikkö kuljettajan ja pyörän liiketilan havainnoimiseksi. Järjestelmän avustamana tutkittiin moottoripyörän käyttäytymistä normaalissa ajossa edesauttaen yleiseurooppalaisen eCall-hälytysjärjestelmän laajentamista kaksipyöräisille moottoriajoneuvoille. Liiketilantarkkailujärjestelmän avulla on mahdollista kerätä riittävä määrä dataa moottoripyöräonnettomuuksien havainnoimiseksi. Tutkimuksessa järjestelmän tuottamat mittaukset visualisoitiin ja järjestelmä täten luotettavaksi todistettiin.

Kolmannessa järjestelmässä inertia-anturit toimivat yhdessä muiden järjestelmien kanssa luoden kattavan kokonaisuuden autojen taloudellisimman reitityksen selvittämiseksi. Nykyisten navigaattorien tarjotessa usein vain lyhyintä tai nopeinta reititysvaihtoehtoa, tulisi energian säästön lisäämiseksi olla mahdollisuus myös taloudellisimpaan vaihtoehtoon. Taloudellisimman vaihtoehdon selvittämiseksi tulee tienpätkille löytää oikeat energia-arvot. Energia-arvojen monitahoisuuden vuoksi täytyy olla olemassa keino suorittaa energia-arvomittaukset tehokkaasti. Tätä varten energian kulutuksen mittaussjärjestelmään yhdistettiin inertiaan perustuva mittaussjärjestelmä, jolla kuljettajan vaikutus mittauksista saatiin eliminoidua. Kuljettajan

vaikutuksen eliminoiminen mahdollistaa reitin energia-arvon selvittämisen pienemällä määrällä mittauksia. Tutkimuksessa esitelty mittausjärjestelmä todettiin hyödylliseksi sekä energia-arvojen selvittämisessä että myös kuljettajan ajotavan tarkkailemisessa.

Nämä kolme järjestelmää toimivat esimerkkinä siitä laajasta määrästä sovelluksia, joissa inertia-antureita voidaan hyödyntää. Inertia-anturien sovellukset eivät rajoitu vain kulkuneuvoihin vaan niitä pystytään hyödyntämään lähes kaikkien kappaleiden liiketilan tarkkailussa.

Itse työn suorittaminen onnistui kohtuullisen hyvin; järjestelmillä saatiin mitattua halutut asiat. Kuitenkin perusteellisempi järjestelmien ja mittausten suunnittelu olisi tuonut tuloksiin lisää tarkkuutta. Samoin mittausten kattavampi dokumentointi jo ensimmäisestä mittauksesta lähtien olisi helpottanut työn kirjoitusta.



## LÄHTEET

- [1] Tässä on Ollilan veroesitys: Autoilijat verolle kilometrien mukaan [verkkojulkaisu]. 2013 Alma Media Kustannus Oy [viitattu 5.4.2014]. Saantitapa: <http://www.aamulehti.fi/Kotimaa/1194860970558/artikkeli/tassa+on+ollilan+veroesitys+autoilijat+verolle+kilometrien+mukaan.html>
- [2] Groves, P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Artech House, 2008.
- [3] Inertial and magnetic sensing of human motion [verkkojulkaisu]. 2006. Daniel Roetenberg [viitattu 8.3.2014]. Saantitapa: <http://www.xsens.com/images/stories/PDF/Inertial%20and%20Magnetic%20Sensing%20of%20Human%20Motion.pdf>
- [4] Nurmijärven magneettikenttä [verkkojulkaisu]. Ilmatieteen laitos [viitattu 31.3.2014]. Saantitapa: [http://aurora.fmi.fi/public\\_service/suomi/nur\\_now.html](http://aurora.fmi.fi/public_service/suomi/nur_now.html)
- [5] Sensor Fusion in Time-Triggered Systems [verkkojulkaisu]. 2002 Elmenreich, W. [viitattu 5.4.2014] Saantitapa: [http://www8.cs.umu.se/research/ifer/dl/Sensors/elmenreich\\_Dissertation\\_sensorFusionInTimeTriggeredSystems.pdf](http://www8.cs.umu.se/research/ifer/dl/Sensors/elmenreich_Dissertation_sensorFusionInTimeTriggeredSystems.pdf)
- [6] Einstein, A., Lorentz, H.A., Minkowski, H., Weyl, H. The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity. Dover Publications, 1952.
- [7] Grewal, M.S., Weill, L.R., Andrews, A.P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. Wiley, 2001.
- [8] Arfken, G., Weber, H. Mathematical Methods for Physicists. Academic Press, San Diego (CA), 5th edition, 2001. 1112 p.
- [9] Titterton, D.H., Weston, J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. The Institution of Electrical Engineers, 2004, 2nd edition.
- [10] Leppäkoski, H., Tikkinen, S., Takala, J. Optimizing Radio Map for WLAN Fingerprinting. Proceedings of the Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS), 2010. Helsinki, Finland, 2010, pp. 1-8.
- [11] Perez Iglesias, H., Barral, V., Escudero, C. Indoor Person Localization System Through RSSI Bluetooth Fingerprinting. Proceedings of the 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2012. Vienna, Austria, 2012, pp. 40-43.

- [12] IndoorAtlas Aims to Use Magnetic Fields to Map the Insides of Buildings [verkkojulkaisu]. 2013 Arik Hesseldahl [viitattu 31.3.2014]. Saantitapa: <http://allthingsd.com/20131016/indooratlas-aims-to-use-magnetic-fields-to-map-the-insides-of-buildings/>
- [13] Pekkalin, O., Leppäkoski, H., Iozan, L., Hautamäki, J., Collin, J., Takala, J. Reference for Indoor Location Systems Using Gyroscope and Quadrature Incremental Encoder. Proceedings of the ION GNSS 2010, 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland, OR, USA, 2010, pp. 1192-1197.
- [14] Pekkalin, O. Indoor Dead Reckoning System [verkkojulkaisu]. Saantitapa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201312121482>
- [15] NovAtel DL-4 plus [datalehti]. NovAtel Inc, 2006. [viitattu: 6.4.2014] Saantitapa: <http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/DL4plus.pdf>
- [16] MEMS IMU AIST-350 [verkkojulkaisu]. iSense. Saantitapa: [http://isense.ru/en/product\\_catalog/mems\\_imu\\_aist\\_350/](http://isense.ru/en/product_catalog/mems_imu_aist_350/)
- [17] Suomen virallinen tilasto (SVT): Tieliikenneonnettomuustilasto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-758X. 2012. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 1.2.2014]. Saantitapa: [http://tilastokeskus.fi/til/ton/2012/ton\\_2012\\_2013-06-18\\_tie\\_001\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/ton/2012/ton_2012_2013-06-18_tie_001_fi.html)
- [18] eCall: automaattinen hätäpuhelu pakolliseksi liikenneonnettomuuksissa vuodesta 2015 lähtien [verkkojulkaisu]. IP/13/534. 2013. Euroopan yhteisöjen komissio [viitattu: 7.3.2014]. Saantitapa: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-534\\_fi.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-534_fi.htm)
- [19] Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Aika ottaa eCall käyttöön [verkkojulkaisu]. KOM(2009) 434 lopullinen. 2009. Euroopan yhteisöjen komissio [viitattu: 7.3.2014]. Saantitapa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0434:FIN:FI:PDF>
- [20] Virtanen, N. 2005. Automaattisen hätäviestijärjestelmän vaikutukset onnettomuustilanteessa. AINO-julkaisuja 14/2005. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki. ISBN 952-201-966-6
- [21] MTw User Manual [datalehti]. Xsens Technologies B.V., 2010-2013. [viitattu: 7.3.2014] Saantitapa: [www.xsens.com/download/usermanual/MTw\\_usermanual.pdf](http://www.xsens.com/download/usermanual/MTw_usermanual.pdf)

- [22] Motorcycle Model [MatLab-kirjasto]. Saantitapa: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35045-motorcycle-model>
- [23] Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. ISSN=1797-6049. 2008. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 15.1.2014]. Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/khki/2008/khki\\_2008\\_2010-04-23\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2008/khki_2008_2010-04-23_tie_001_fi.html)
- [24] J. N. Barkenbus, Eco-Driving: An Overlooked Climate Change Initiative, Energy Policy, vol. 38, no. 2, pp. 762-769, 2010.
- [25] L. Guo, S. Huang, and A. W. Sadek, An Evaluation of environmental Benefits of Time-Dependent Green Routing in the Greater Buffaloniagara Region, Journal of Intelligent Transportation Systems, vol. 17, no. 1, pp. 18-30, 2013. [verkkojulkaisu] Saantitapa: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15472450.2012.704336>
- [26] Markkula, J., Parviainen, J., Collin, J., Tuomi, J., Järventausta, P., Takala, J. Energy Consumption Analysis for Green Routing - Data Collection from Electric Vehicles. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013, 10-13 November 2013, Vienna, Austria. pp. 4630-4634.