

ELEKTRONINEN KOMPASSI

Petri Moisio

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2014
Tietotekniikka
Sulautetut järjestelmät ja
elektroniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

PETRI MOISIO:
Elektroninen kompassi

Opinnäytetyö 38 sivua
Huhtikuu 2014

Tämän opinnäytetyön aiheena oli elektronisen kompassin suunnittelu ja toteutus sulautettuun järjestelmään. Työ tehtiin Trelab Oy:lle, joka suunnittelee ja valmistaa seuraavan sukupolven langattomia mittalaitteita. Kompassi oli suunniteltava siten, että se toimisi osana Trelabin Oloni-järjestelmää ja täyttäisi yrityksen vaatimukset langattoman mittalaitteen ohjelmiston suhteen. Koska varsinainen mittalaite sensoreineen oli jo olemassa, elektronisen kompassin toteuttaminen oli käytännössä ohjelmistoprojekti.

Oloni-järjestelmän käyttökohteet ja mittalaitteen arkkitehtuuri määrittivät ominaisuudet ja vaatimukset kompassiohjelmistolle. Keskeisimmät vaatimukset ohjelmistolle olivat kallistuksen ja magneettisten häiriöiden kompensointi sekä kompassisuunnan alipäästösuodatus. Kallistuksen kompensointi oli tarpeen, sillä kohdejärjestelmää käytetään joko kiinteästi asennettuna tai esimerkiksi ranteeseen kiinnitettynä, jolloin sen asento voi muuttua jatkuvasti. Samasta syystä tarvittiin alipäästösuodatusta, joka poistaa liikkeessä olevan mittalaitteen rekisteröimät lyhytaikaiset häiriöt, esimerkiksi kävelyn aiheuttaman tärinän. Suurin osa kompensoitavista magneettisista häiriöistä syntyi itse mittalaitteen aktiivisista komponenteista, kuten lähettimestä.

Kallistuksen kompensointi toteutettiin käyttämällä kiihtyvyysanturin dataa, Eulerin kulmia ja alipäästösuodatusta. Näin saatiin aikaan kompensointi, joka takaa kohtuullisen vakaan tuloksen, on mittalaite sitten liikkeessä tai paikallaan. Lisäksi toteutettu toisen asteen alipäästösuodin suodattaa lähes kaikki lyhytkestoiset mittalaitteeseen kohdistuvat impulssit lasketusta kompassisuunnasta. Myös toteutettu magneettinen kompensointi toimii hyvin, eivätkä mittalaitteen muut aktiivikomponentit vaikuta laskettuun kompassisuuntaan.

Valmis kompassiohjelmisto ylittää kaikki odotukset ja siinä toteutuvat kaikki sille asetetut vaatimukset. Heti valmistuttuaan ohjelmistosta tuli osa kaupallista tuotetta. Mahdollinen jatkokehitys kartoitetaan ja toteutetaan ensimmäisten asiakaskokemusten jälkeen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Information Technology
Embedded Systems and Electronics

PETRI MOISIO:
Electronic Compass

Bachelor's thesis 38 pages
April 2014

The subject of this bachelor's thesis was to design and implement the electronic compass to an embedded system. The thesis was made for Trelab Ltd. which designs and manufactures wireless measurement solutions of the next generation. The compass had to be designed in such way that it can be working part of the Oloni-system made by Trelab Ltd. The software also had to meet the requirements of the architecture set by the company. Because the actual wireless measurement device and its sensors already existed, implementation of the compass was practically software project.

Usage and hardware architecture of the Oloni-system defined the requirements and the features of the electronic compass. Most important features needed were tilt and magnetic compensation and low-pass filtered magnetic bearing. The tilt compensation was needed because measurement device could be installed on fixed position or it could be attached on person's wrist. In that case tilt of the compass can be in continuous change which is also the reason why low-pass filtering was needed. The low-pass filter removes all fast interference registered by the accelerometer of the measurement device. This kind of interference can be derived from the vibration caused by walking for example. Most of the magnetic interference that had to deal was originated from the measurement device itself and from its active components like wireless transmitter.

The tilt compensation was implemented by using accelerometer, Euler's angles and the low-pass filter. In this way the implemented tilt compensation was able to produce good result for stationary and moving measurement devices. The implemented second order low-pass filter filtered almost all short term interference from the magnetic bearing. Also the magnetic compensation which was implemented with matrices among other methods was working as intended and active devices on measurement device were not effecting to the compass outcome.

Ready compass software exceeded all the expectations and it put all the requirements into practice. Immediately after the compass was ready it became part of the commercial product. Further development of the compass will be surveyed and implemented after the first customer experiences.

Key words: electronic compass, embedded system, Trelab Oy, magnetic fields, eCompass

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	MAAPALLON MAGNEETTIKENTTÄ.....	6
2.1	Magneettikentän synty.....	6
2.2	Magneettikentän voimakkuus.....	7
2.3	Magneettikentän deklinaatio.....	8
2.4	Magneettikentän inkliinaatio.....	9
2.5	Muutokset magneettikentässä.....	10
3	KOMPASSIN TOIMINTAPERIAATE.....	11
3.1	Perinteinen kompassi.....	11
3.2	Elektroninen kompassi.....	12
4	OHJELMISTON VAATIMUKSET.....	16
4.1	Modulaarinen ohjelmisto.....	16
4.2	Ajurin päivittäminen.....	17
4.3	Liikuteltavuus.....	17
4.4	Tarkka suuntatieto.....	17
4.5	Streamaus.....	18
4.6	Dynaaminen näytteenottotaajuus.....	18
5	SUUNNITTELU.....	19
6	KOMPASSIN TOTEUTUS.....	20
6.1	Rakenne.....	20
6.2	Ajuri.....	20
6.3	Mittapuskuri.....	21
6.4	Kompassisuunnan tuottaminen.....	24
6.4.1	Kallistuksen kompensointi.....	24
6.4.2	Rautakalibrointi.....	28
6.4.3	Kompassisuunnan laskeminen.....	31
6.4.4	Kompassisuunnan alipäästösuodatus.....	31
6.5	Streamaus.....	32
6.5.1	BLE-moduuli.....	33
6.5.2	Asiakaspääteohjelma.....	34
6.5.3	Mittalaite.....	35
7	YHTEENVETO.....	36
	LÄHTEET.....	38

1 JOHDANTO

Ensimmäisiä maapallon magneettikenttään perustuvia suunnistusvälineitä eli kompassia on käytetty ensimmäisen kerran jo tuhansia vuosia sitten. Noin 600 vuotta sitten kompassin kehä jaettiin 360 asteeseen, mikä mahdollisti aiempaa tarkemman suunnittamisen sekä maalla että merellä. Elektroniset kompassit ovat kuitenkin yleistyneet ja ovat osittain syrjäyttäneet perinteisen kompassin varsinkin tarkkuutta vaativien teknisten sovellusten yhteydessä.[5]

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa tarkka ja liikuteltava elektroninen kompassi Trelab Oy:n Oloni-järjestelmän mittalaitteisiin. Mittalaitteiden käyttämän piirilevyn pakkaustiheys oli erittäin suuri, noin 100 komponenttia ladottuna piirilevyn yhdelle puolelle. Tämän lisäksi lähes pyöreän piirilevyn halkaisija oli vain 32 mm ja pinta-ala noin 10 cm², joka tekee siitä hieman kahden euron kolikkoa suuremman. Koska magneettisensori oli yksi edellä mainitusta sadasta komponentista, kyseessä oli vaativa ympäristö elektronisen kompassin toteuttamiselle. Oloni-järjestelmällä puolestaan voidaan esimerkiksi mitata henkilön liikettä, suuntaa ja biometrisia tietoja reaaliaikaisesti.

Toinen luku käsittelee maapallon magneettikenttää niiltä osin, kuin on olennaista perinteisen ja elektronisen kompassin toiminnan ymmärtämisen kannalta. Kolmannen luvun tarkoituksena on selvittää, miten kompassi toimii maapallon magneettikentässä. Asia esitellään selvittämällä perinteisen ja elektronisen kompassin toimintaperiaate yleisellä tasolla.

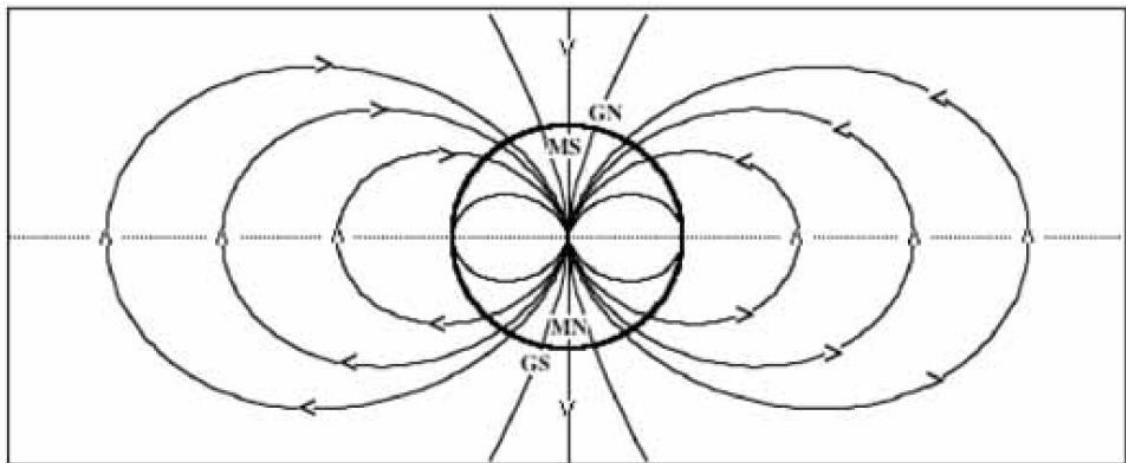
Näiden yleistietoa sisältävien lukujen jälkeen on helpompi ymmärtää kompassiohjelmiston vaatimukset ja elektronisen kompassin toteuttamisen haasteellisuus sulautetussa järjestelmässä. Kuudennessa luvussa selvitetään ne kokonaisuudet, joista valmis elektroninen kompassi koostuu ja tarvittavien metodien matemaattinen perusta. Lopuksi tehdään katsaus valmiiseen työhön ja siihen, onko työn vaatimukset täytetty.

2 MAAPALLON MAGNEETTIKENTTÄ [4],[6],[7],[8]

2.1 Magneettikentän synty

Nykyisen käsityksen mukaan maapallon magneettikenttä syntyy maan nestemäisessä ulkoytimessä tuhansien kilometrien syvyydessä. Dynamoteorian mukaisesti ulkoytimeen syntyy miljardien ampeerien sähkövirtoja, jotka aiheuttavat maan magneettikentän. Näin syntynyt magneettikenttä on niin voimakas, että se ulottuu kauas avaruuteen ja suojaa maapalloa muun muassa aurinkotuulen hiukkasvirroilta sekä mahdollistaa useita teknisiä sovelluksia kuten magneettikenttään perustuvat kompassit.

Maapallon lähiavaruudessa magneettikenttä muistuttaa magneettisen dipolin aiheuttamaa kenttää (kuva 1). Magneettisen dipolin yksinkertaisin malli on sauvamagneetti, jonka voidaan ajatella olevan maapallon sisällä siten, että magneettinen pohjoisnapa sijaitsee maantieteellisellä etelänavalla ja magneettinen etelänapa maantieteellisellä pohjoisnavalla. Sauvamagneetin kuvitteellinen akseli poikkeaa noin $11,5^\circ$ maapallon pyörimisakselin asennosta.



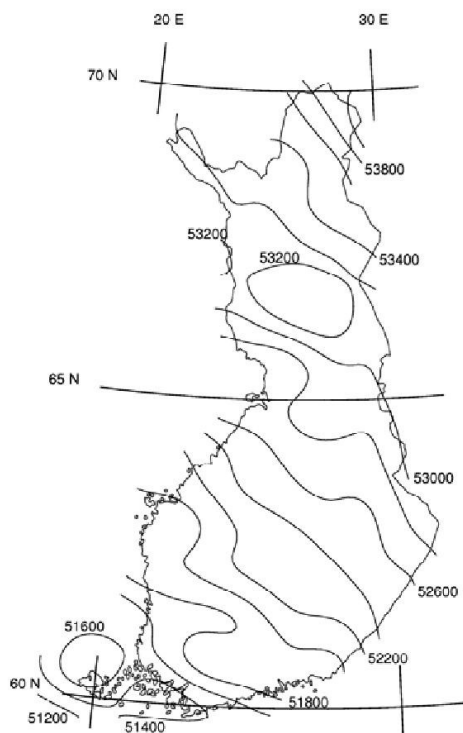
KUVA 1. Maapallon dipolikentän magneettisia kenttäviivoja. GN tarkoittaa maantieteellistä pohjoista, GS maantieteellistä etelää, MS magneettista etelää ja MN magneettista pohjoista. [8]

2.2 Magneettikentän voimakkuus

Kuten edellä mainittiin, maapallon magneettikenttä on todella voimakas. Sen sijaan maapallon magneettivuon tiheys on suhteellisen pieni. Magneettikentän voimakkuus ja magneettivuon tiheys ovat suoraan verrannollisia toisiinsa siten, että tiheyteen vaikuttavat ainoastaan magneettikentän voimakkuus ja väliaineen permeabiliteetti μ , kuten kaava (1) osoittaa.

$$B = \mu \cdot H \quad (1)$$

Koska maapallon magneettivuon tiheys on pieni, siitä puhuttaessa käytetään yleensä yksikköä nanotesla (nT) tai mikrottesla (μT). Magneettivuon tiheys on suurimmillaan magneettisilla navoilla (noin $60 \mu\text{T}$) ja pienimmillään se on magneettisella päiväntasaajalla (noin $25 \mu\text{T}$). Maapallolta löytyy kuitenkin alueita, missä edellä mainitut arvot ylittyvät reilusti. Nämä poikkeamat saattavat johtua rauta- sekä magneettimalmiesiintymistä tai muusta paikallisesta magneettikenttään vaikuttavasta lähteestä. Malmien aiheuttamat häiriöt voivat vääristää paikallista magneettivuon tiheyttä jopa $\pm 40 \mu\text{T}$. Suomessa magneettivuon tiheys kasvaa melko tasaisesti Etelä-Suomen $51 \mu\text{T}$:sta Pohjois-Suomen $54 \mu\text{T}$:aan.

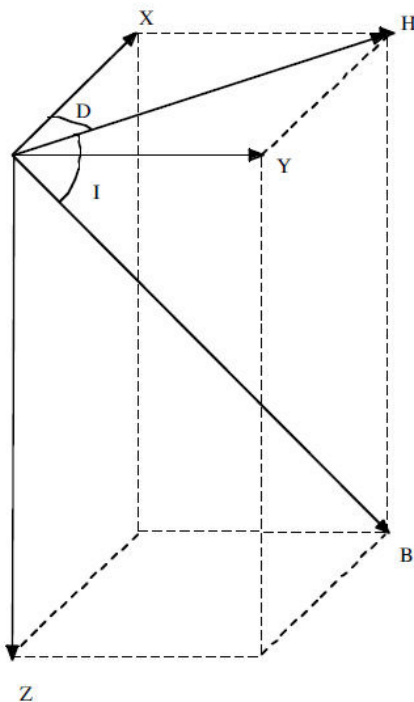


KUVA 2. Magneettivuon tiheys (nT) Suomessa vuonna 2009 [8]

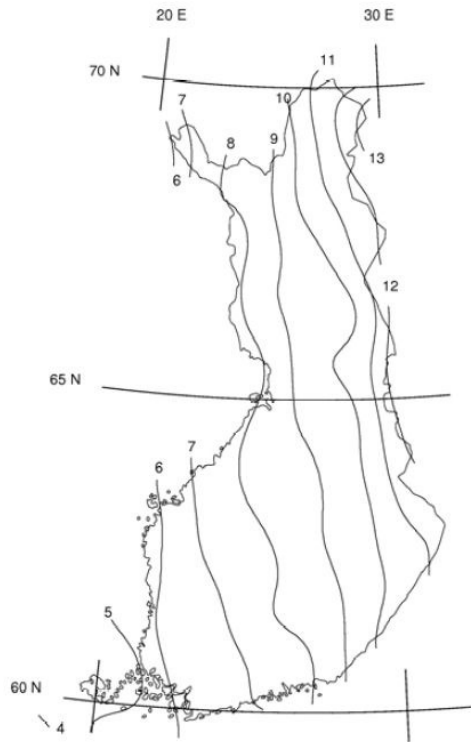
2.3 Magneettikentän deklinaatio

Vaikka maapalloa ympäröivää magneettikenttää voidaankin havainnollistaa yksinkertaisella sauvamagneettimallilla, on maapallon todellisessa magneettikentässä huomattavia vaihteluita verrattuna ideaaliseen dipoli-kenttään. Nämä vaihtelut ja magneettisten napojen sijainti aiheuttavat sen, että kompassipohjoinen ja maantieteellinen pohjoinen eroavat toisistaan lähes aina (kuva 3). Kompassipohjoisen ja maantieteellisen pohjoisen välistä eroa kutsutaan erannoksi tai deklinaatioksi ja sen suuruus vaihtelee välillä $\pm 180^\circ$ ympäri maapalloa.

Erannon suuruuden voi tarkistaa kartasta ja esimerkiksi Suomessa eranto vaihtelee välillä $3^\circ - 12^\circ$ lännestä itään (kuva 4). Positiivista erantoa sanotaan itäiseksi ja negatiivista läntiseksi. Näin voidaan siis todeta, että Suomessa eranto on kaikkialla itäistä. Maapallon magneettikenttä on jatkuvassa muutoksessa ja näin ollen myös eranto muuttuu ajan kuluessa. Suomessa eranto muuttuu kuuden asteminuutin nopeudella eli noin asteen kymmenesosan vuodessa. Myös kyseinen muutosnopeus ilmoitetaan usein kartoissa.



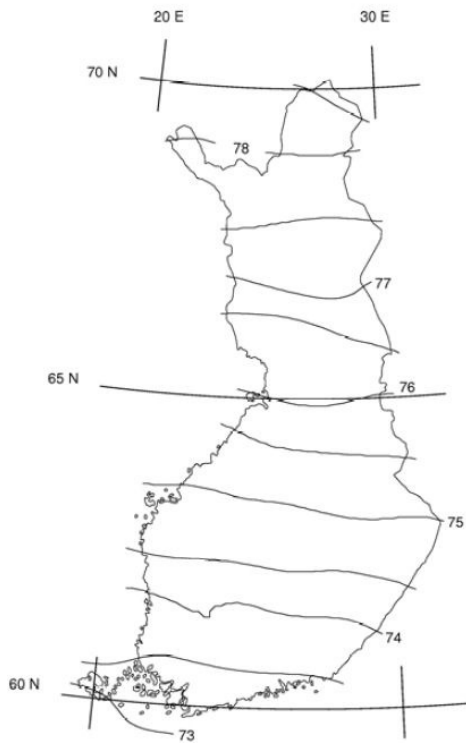
KUVA 3. Magneettikenttävektorin B komponenttiesitys. X osoittaa maantieteelliseen pohjoiseen, Y maantieteelliseen itään, Z alaspäin. H on magneettinen pohjoissuunta, mikä on sama kuin kompassineulan suunta. Kulma D tarkoittaa magneettikenttävektorin deklinaatiota eli erantoa ja kulma I inkliinaatiota. [8]



KUVA 4. Deklinaatio Suomessa vuonna 2009. Pohjois-etelä-suuntaiset tasa-arvoviivat kuvaavat deklinaation suuruutta asteina. [8]

2.4 Magneettikentän inkliinaatio

Toinen olennainen magneettikenttävektoriin liittyvä suure on inkliinaatiokulma (kuva 3), joka ilmaisee magneettikenttävektorin poikkeaman maan pintaan nähden. Inkliinaation arvo vaihtelee välillä $\pm 90^\circ$ ja suurimmillaan se on magneettisilla navoilla. Siellä inkliinaatiokulma on lähes 90° , eli se on kohtisuorassa magneettista napaa vasten. Pienimmillään se on magneettisella päiväntasaajalla, missä magneettikenttävektori on likimain samansuuntainen maanpinnan kanssa eli inkliinaatiokulma on 0° . Suomessa inkliinaatio kasvaa etelästä pohjoiseen välillä $73^\circ - 79^\circ$ (kuva 5). Mainittuja lukuarvoja karkeasti vastaavat kulmat ovat havaittavissa tarkastelemalla maapallon dipolikentän magneettisia kenttäviivoja ja niiden asentoa maan pintaan nähden (kuva 1).



KUVA 5. Inklinaatio Suomessa vuonna 2009. Itä-länsi-suuntaiset tasa-arvoviivat kuvaavat inklinaation suuruutta asteina. [6]

2.5 Muutokset magneettikentässä

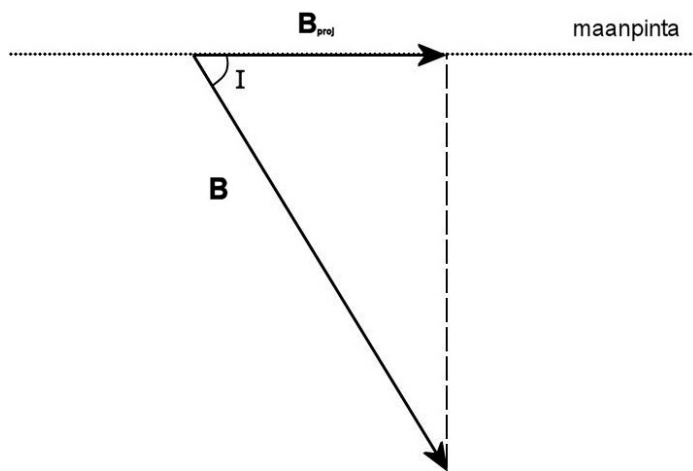
Maapallon magneettikenttä on jatkuvassa muutostilassa. Pohjoinen magneettinapa liikkuu vuodessa noin 30 – 40 km. Viimeisen 170 vuoden aikana se on liikkunut peräti 1000 km. Tällä hetkellä navat ovat kiihtyvässä liikkeessä, ja viimeisten 20 vuoden aikana ne ovat liikkuneet yhtä paljon kuin niitä edeltäneiden 100 vuoden aikana yhteensä. Juuri napojen siirtyminen aiheuttaa deklinaation ja sen ennustettavissa olevan muutoksen.

Myös maapallon magneettinen napaisuus vaihtelee säännöllisesti, eli pohjoisesta tulee etelä ja päinvastoin. Tällainen muutos tapahtuu keskimäärin pari kertaa miljoonassa vuodessa. Muutos ei tapahdu hetkessä, vaan siihen saattaa kulua aikaa kymmeniä tuhansia vuosia ja muutoksen aikana maapallolla voi olla useita magneettisia napoja. On myös mahdollista, että magneettikenttä häviää napaisuuden vaihtuessa kokonaan, mikä altistaisi maapallon avaruuden ja auringon säteilylle vaarantaen elämän maapallolla. Muutoksen syytä ei ole pystytty täysin selvittämään, mutta todennäköisin selitys on maan nesteytymisen virtauksien epäsäännöllisyydet.

3 KOMPASSIN TOIMINTAPERIAATE

3.1 Perinteinen kompassi

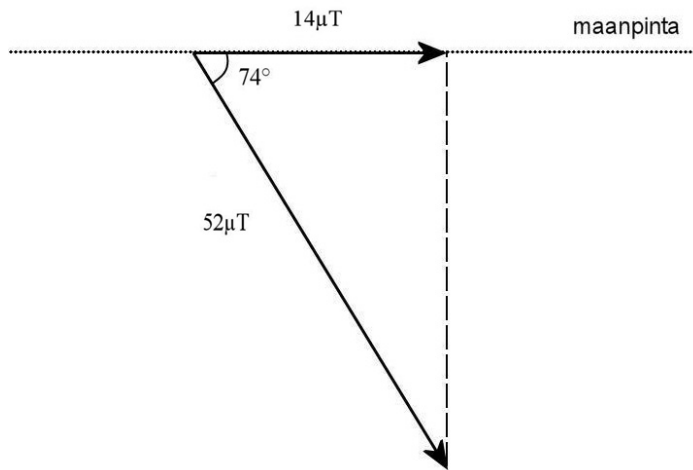
Perinteisen kompassin toiminta perustuu magneettikenttävektorin maanpinnan suuntaisen projektion (kuva 6) eli magneettisen pohjoisen havaitsemiseen ja näyttämiseen. Magneettisen pohjoisen näyttäminen tapahtuu usein kompassineulalla, joka kääntyy magneettikentän suuntaisesti ja näyttää näin pohjois-etelä-suunnan. Nykykompassseissa kompassineula on useimmiten neularasian sisällä, missä neula on kiinnitetty omasta keskipisteestään pieneen akseliin, jonka varassa se pystyy vaivatta kääntymään magneettikentän suuntaisesti. Tämän lisäksi rasia on useimmiten täytetty jollakin pakkasta kestäväällä nesteellä kuten alkoholilla. Nesteen tarkoitus on hidastaa neulan liikkeitä ja estää esimerkiksi liikkumisesta aiheutuva neulan värähtely, mikä helpottaa kompassin lukemista.[5]



KUVA 6. Magneettikenttävektori B :n maanpinnan suuntainen projektiio B_{proj} inkliinaatiokulmassa I

Neulaa kääntävä voima on magneettikentän siihen aiheuttama vääntömomentti, joka on suurimmillaan, kun neula on kohtisuorassa magneettikenttää vasten, ja pienimmillään niiden ollessa samansuuntaiset. Magneettikentän aiheuttama vääntömomentti on verrannollinen magneettikentän maanpinnan suuntaisen projektion kanssa (kuva 6), mikä pienenee kohti nollaa inkliinaatiokulman lähestyessä arvoa 90° . Tällainen noltilanne voidaan havaita esimerkiksi magneettisilla navoilla, missä kompassi asettuu satunnaiseen suuntaan tai on jatkuvassa liikkeessä. Inkliinaation takia perinteiset neulakompassit

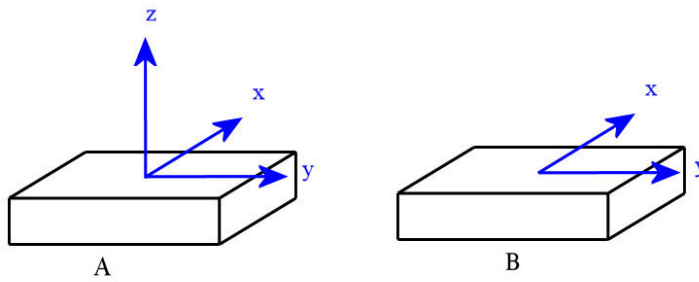
täytyy lokalisoida, jotta ne pyörivät rasiassa esteettömästi eivätkä jumitu paikalleen. Neulakompassi, joka toimii Suomessa moitteettomasti, missä inkliinaatio on yli 70° , ei välttämättä edes pyöri päiväntasaajalla, missä inkliinaatio on lähellä 0° :aa. Suuren inkliinaation takia magneettikenttävektorin pinnansuuntainen komponentti on Suomessa melko pieni (kuva 7), mikä tekee neulakompasseista herkkiä ulkoisille häiriöille. [7],[8]



KUVA 7. Tampereella inkliinaatio on 74° ja magneettikenttävektorin tiheys on noin $52 \mu\text{T}$ [8], mikä aiheuttaa noin $14 \mu\text{T}$:n suuruisen projektion.

3.2 Elektroninen kompassi

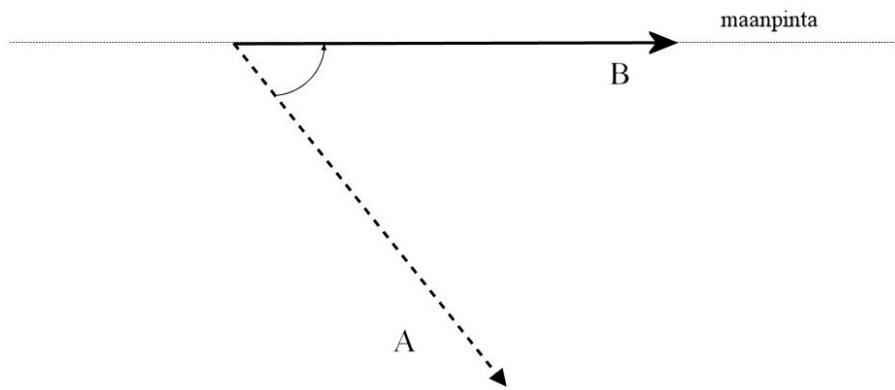
Elektroniset kompassit perustuvat useimmiten magneettikentän havaitsemiseen ja pohjois-etelä-suunnan osoittamiseen havaintojen perusteella. Havainnointi suoritetaan tällöin magneettisensorilla. On olemassa myös elektronisia kompasseja, jotka eivät perustu magneettikentän havaitsemiseen. Tällaisia elektronisia kompasseja ovat esimerkiksi satelliittipaikannukseen ja elektronisen gyroskoopin tarkkailuun perustuvat laitteet. Magneettisensoria käytettäessä sen mittaustulos muunnetaan digitaaliseen muotoon mikrokontrolleria varten, joka laskee pohjoissuunnan mitatun datan perusteella, minkä jälkeen digitaalinen tulos voidaan esittää halutulla tavalla. Käytännössä elektronisia kompasseja toteutetaan sekä kaksi- että kolmeakselisilla magneettisensoreilla (kuva 8).



KUVA 8. kolme akselinen A (kolmiulotteinen avaruus) ja kaksi akselinen magneettisensori B (kaksiulotteinen avaruus)

Kaksi akselista magneettisensoria rajoittaa periaatteessa sama ongelma kuin perinteistäkin kompassia: ainoastaan magneettikenttävektorin projektio (kuva 6) on havaittavissa sensorin ollessa vaakatasossa. Sensorin poiketessa vaakatasosta se havaitsee erilaisen projektion, joka voi olla pidempi tai lyhyempi. Ilman tietoa paikallisesta inkliinaatiosta kaksi akseliselä sensorilla toteutetun kompassin kalibrointi voi olla työlästä. Tämän lisäksi magneettisten häiriöiden havaitseminen ja kompensointi voi olla erittäin hankalaa tai mahdotonta, koska käytettävissä on useimmiten alkuperäistä magneettikenttävektoria huomattavasti heikompi projektio (kuva 7). Ideaalitalanteessa, jossa sensori havaitsee pelkästään magneettikenttävektorin projektion, eli mikään muu ulkoinen tekijä ei vaikuta vektorin pituuteen, kompassisuunta voidaan helposti laskea arkustangentin avulla. Näin yksinkertainen ratkaisu on kuitenkin harvoin toimiva, minkä lisäksi se on herkkä kaikenlaisille magneettisille häiriöille.

Kolme akseliselä magneettisensorilla mitattaessa magneettikenttävektori havaitaan aina kolmiulotteisena (kuva 8) ja oikean pituisena. Kun kolme akselisen magneettisensorin kanssa on saatavilla tieto mittalaitteen asennosta, on vektorin kiertäminen vaakatasoon mahdollista ilman, että sen mittasuhteet vääristyvät (kuva 9). Tällaista toiminnallisuutta elektronisissa kompassissa kutsutaan kallistuksen kompensoinniksi ja se voidaan toteuttaa esimerkiksi Eulerin kulmien avulla [2]. Tieto mittalaitteen asennosta saadaan joko kolme akseliselä kiihtyvyyssensorilta tai gyroskoopilta. Kaksi akseliselä sensorilla mitattu vektori voidaan kiertää vaakatasoon samalla periaatteella, mutta kuten edellä mainittiin, vektorin pituus riippuu tällöin alkuperäisestä mittausasennosta. Inkliinaatiolla ei ole vaikutusta kompassisuunnan tuottamiseen kolme akseliselä sensoria käytettäessä, kunhan suuntaa ei yritetä tuottaa magneettisilla navoilla (inkliinaatio 90°), missä mikään magneettikenttään perustuva kompassi ei toimi [2].



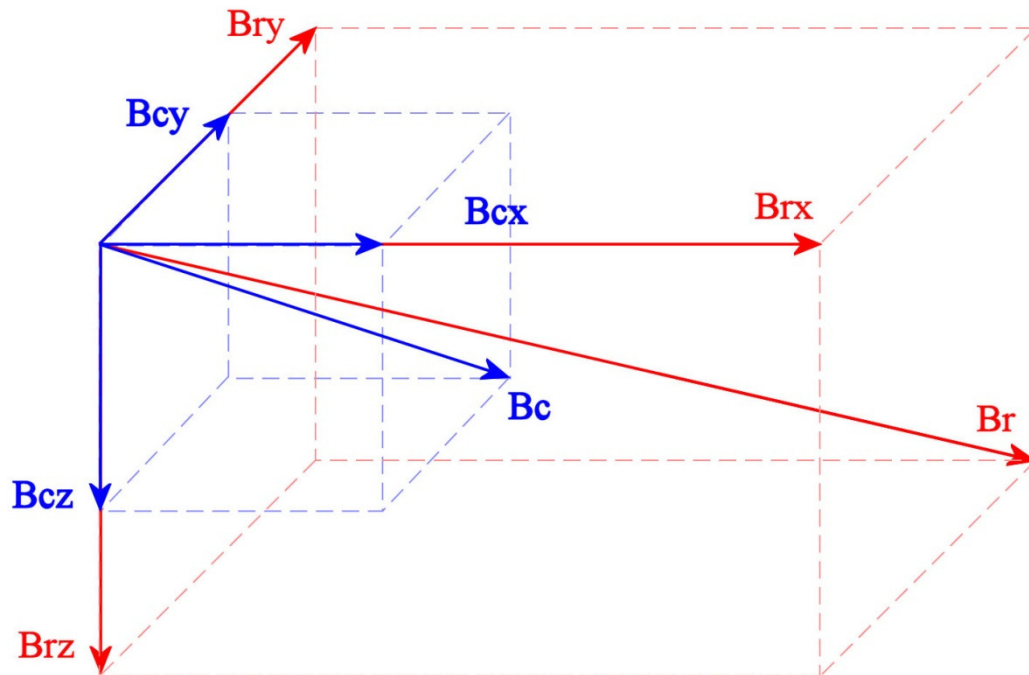
KUVA 9. Magneettikenttävektori (A) voidaan kiertää maanpinnan suuntaiseksi (B) ilman, että sen pituus tai maanpinnan suuntainen suunta muuttuvat.

Yksinkertaisesti ilmaistuna elektronisen kompassin rautakalibraatio tarkoittaa ulkoisten häiriöiden poistamista mitatusta datasta. Teoriassa tämä kuulostaa helpolta, mutta häiriöt pitää poistaa jokaiselta akselilta erikseen (kuva 10), jotta kalibroidun magneettikenttävektorin B_c suunta vastaisi todellista ja häiriötöntä maan magneettikenttävektoria B . Käytännössä kalibrointi voidaan tehdä reaaliaikaisesti laskemalla tai esimittamalla ympäristön aiheuttamat magneettiset häiriöt ja poistamalla ne mitatusta datasta.

Magneettiset häiriöiden esimitäuksella kalibrointi pelkistyy vähennyslaskuksi, mutta tällöin systeemin emittoimien magneettisten häiriöiden täytyy olla ajan suhteen muuttumattomia. Mikäli magneettisensori sijaitsee sulautetussa järjestelmässä, missä muiden komponenttien virrankulutus vaihtelee voimakkaasti, ei kalibrointi esimitatun datan avulla ole luotettava. Suuret tai nopeat muutokset sähkövirrassa aiheuttavat vaihtelua sulautetun järjestelmän välittömässä magneettikentässä, mikä näkyy vääränä kalibrointituloksena ja kompassisuuntana.

Laskennallisesti toteutettu rautakalibrointi mahdollistaa luotettavan kompassisuunnan tuottamisen ympäristössä, missä muut komponentit kuluttavat virtaa epäsäännöllisesti ja tuottavat vaihtelevia magneettisia häiriöitä. Tämä johtuu siitä, että laskennallinen kalibrointi voidaan suorittaa säännöllisin väliajoin laitteen ollessa toiminnassa, jolloin systeemin sisäiset muutokset otetaan aina kalibroidessa huomioon. Laskennallinen kalibrointi vaatii kuitenkin toimiakseen monimutkaista matematiikkaa ja paljon laskentatehoa. Matemaattinen kalibrointi perustuu vanhan sensoridatan (magneetti- ja kiihtyvyyssensori) analysointiin ja maan magneettikenttävektorin löytämiseen kyseisen raa'an datan joukosta. Vanhaa mittadataa tallennetaan yleensä jonkinlaiseen mittapuskuriin. Parhailta kalibrointialgoritmeilla saavutetaan jopa minuutin eli asteen kuudeskym-

menesosan tarkkuus. Laskennallinen kalibrointi on mahdollista, kunhan magneettisen-sori ei saturoidu ympäröivästä magneettikentästä. [1]



KUVA 10. Mitattu magneettikenttävektori B_r , sekä rautakalibroitu magneettikenttävektori B_c , jonka pituus ja suunta vastaavat maan magneettikenttävektoria.

Samalla tavalla kuin perinteisen kompassin neulaa hidastettiin nesteellä lukemisen helpottamiseksi, täytyy myös elektronisen kompassin tuottamien suuntien vaihtelua (värähtelyä) hidastaa. Värähtely on peräisin muun muassa systeemin kohinasta, ulkoisesta kiihtyvyydestä ja sensorien epätarkkuudesta. Valmiin kompassisuunnan vakauttaminen onnistuu helposti käyttämällä esimerkiksi digitaalista alipäästösuodinta, jolloin ainoastaan niin sanotut hitaat muutokset (kompassia käännetään oikeasti) näkyvät lopputuloksessa ja nopeat muutokset (suunta muuttuu kohinan vuoksi) suodattuvat pois.

4 OHJELMISTON VAATIMUKSET

4.1 Modulaarinen ohjelmisto

Olemassa olevaan Oloni-järjestelmään piti toteuttaa ohjelmistomoduuli, joka tuo järjestelmään elektronisen kompassin toiminnallisuuden. Kompassin piti pystyä tuottamaan tarkkaa suuntatietoa mahdollisesta kallistuksesta ja runsaasta magneettisesta häirinnästä huolimatta. Tämän lisäksi oli tiedossa, että sen hetkiset sensoriajurit vaativat päivityksen ja uusia toiminnallisuuksia elektronista kompassia varten. Kompassimoduulin ollessa jo lähes valmis streamaus ja dynaaminen näytteenottotaajuus lisättiin vaatimuksiin.

Elektronisen kompassin ohjelmisto piti toteuttaa täysin itsenäisenä moduulina, joka pystytään tarvittaessa liittämään olemassa olevaan ohjelmistoon. Käytännössä moduulin liittäminen muuhun ohjelmistoon tuli tapahtua yhdellä esikäntäjän käskyllä. Mikäli käsky oli käytössä (kuva 11), kaikki kompassin ominaisuudet olivat mukana varsinaisessa käännöstuloksessa ja kompassitoiminnallisuus oli käytettävissä mittalaitteessa. Jos käskyä ei ollut (kuva 12), mitään kompassiin liittyvää ohjelmakoodia ei sisällytetty käännöstulokseen. Näin sensorilaitteeseen oli helppo lisätä älyä käyttökohteen ja -tarpeen mukaan.

```
/* Use eCompass functionality */  
#define USE_COMPASS
```

KUVA 11. Kompassimoduulin käyttöönotto esikäntäjän käskyllä

```
/* Use eCompass functionality */  
//#define USE_COMPASS
```

KUVA 12. Ilman esikäntäjän käskyä kompassiin liittyvä ohjelmakoodi jätetään käännöksen aikana huomioimatta

4.2 Ajurin päivittäminen

Työn alkaessa mittalaitteessa oli jo olemassa oleva kiihtyvyyssensori ja magneettisensorin ajuri, johon oli toteutettu rajapinta pääasiassa kiihtyvyyssensorille. Magneettisensorin rajapinta oli erittäin suppea ja mahdollisti vain sensorin testaamisen. Tämä johtui siitä, että moni järjestelmän moduuli perustui kiihtyvyyssensorin analysointiin, mutta magneettisensorin dataa ei tarvittu mihinkään ennen elektronista kompassia.

4.3 Liikuteltavuus

Oloni-järjestelmän luonteen vuoksi oli selvää, että mittalaitetta tullaan käyttämään paljon esimerkiksi ihmiseen kiinnitettynä. Tästä johtuen mittalaite on harvoin paikallaan tai vaaka-asennossa. Tämän vuoksi yksi tärkeimmistä vaatimuksista oli kallistuksen kompensointi. Vaatimuksissa ei otettu kantaa siihen, tulisiko ominaisuuden toteutuksessa käyttää kiihtyvyyssensoria vai digitaalista gyroskooppia. Molemmat komponentit olivat käytettävissä ja toteutus tuli tehdä paremmalla vaihtoehdolla.

4.4 Tarkka suuntatieto

Suurin haaste ja hankalin vaatimus olivat tarkan suuntatiedon tuottaminen magneettisista häiriöistä huolimatta. Mittalaitteen piirilevyn suuresta pakkaustiheydestä (taulukko 1) johtuen magneettisensori altistui jatkuvasti magneettisille häiriöille, jotka olivat huomattavasti voimakkaampia kuin maan magneettikenttä. Koska piirilevyn uudelleen toteuttaminen ainoastaan kompassia varten ei olisi ollut järkevää eikä mahdollista, oli ohjelmistopohjainen rautakalibrointi ainoa vartenotettava vaihtoehto. Rautakalibroinnin piti kyetä poistamaan piirilevyllä tapahtuvien virranvaihteluiden aiheuttamat vaihtelevat häiriöt sekä fyysisten komponenttien aiheuttamat kiinteät häiriöt, jotta tarkan suunnan tuottaminen olisi mahdollista (kuva 13).

TAULUKKO 1. Mittalaitteen piirilevyn pakkaustiheyttä kuvaavat arvot

pinta-ala	10 cm ²
komponenttien lukumäärä	noin 100 yhdelle puolelle ladottuna (suuri pinta-alan käyttöaste)
piirilevyn tyyppi	monikerroksinen HDI buil up -piirilevy
passiivikomponenttien koko	0201
kytkentöjen minimietäisyys piirilevyllä	0,4 mm

4.5 Streamaus

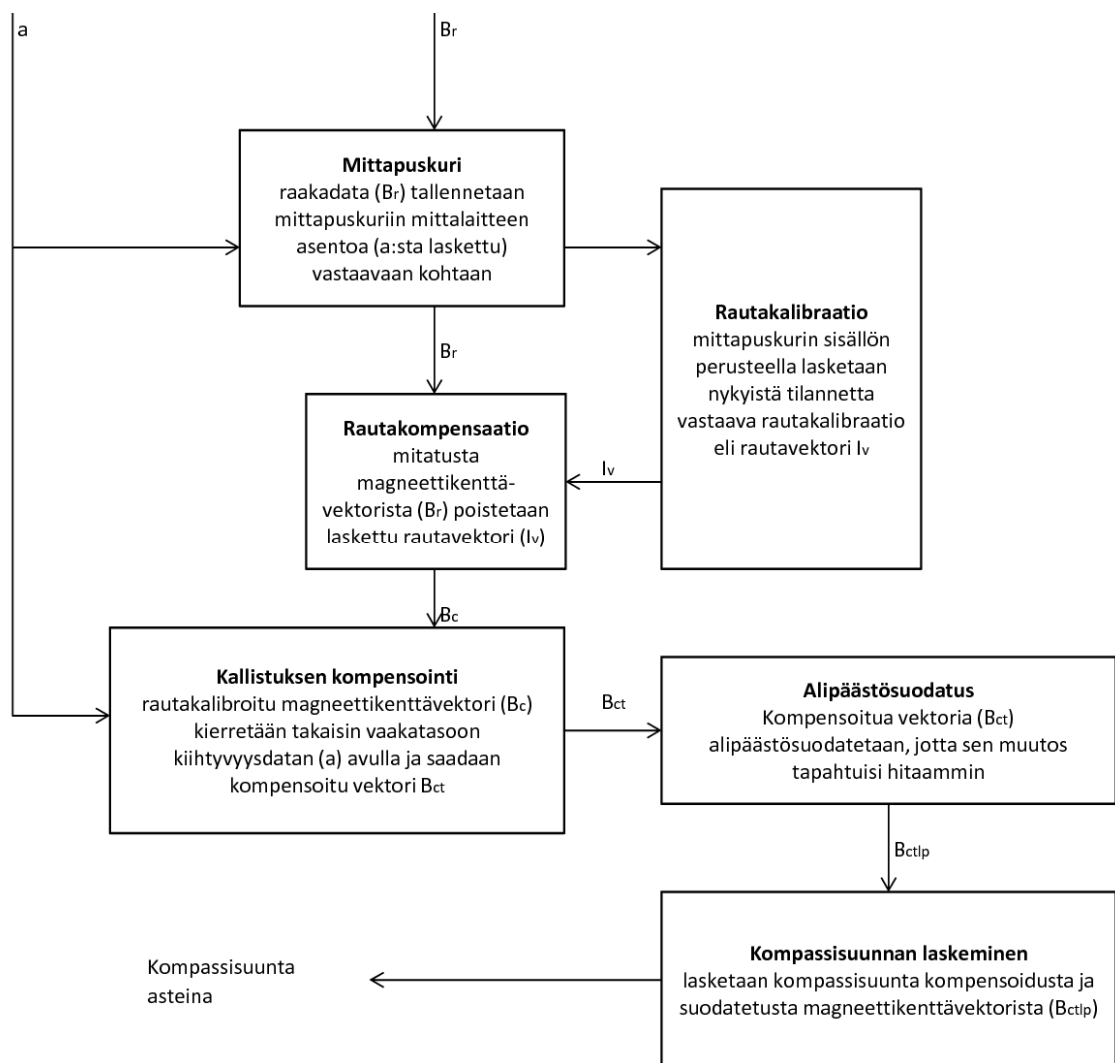
Oloni-järjestelmässä streamauksella eli suoratoistolla tarkoitetaan datan reaaliaikaista lähettämistä niin sanotulle asiakaspäätteelle. Streamaus toiminnallisuus piti toteuttaa myös kompassille, mikä tarkoitti käytännössä kompassisuunnan lähettämistä asteina halutulla näytteenottotaajuudella. Näytteenottotaajuus ilmoitetaan mittalaitteelle samalla, kun sitä käsketään aloittamaan suoratoisto. Suoratoiston alkaessa mittalaitteen muu toiminta piti keskeyttää ja suoratoiston loppuessa toiminnan tuli jatkua häiriintymättä. Langaton tiedonsiirto oli tarkoitus tehdä BLE-moduulilla. BLE on Bluetooth 4.0 -standardiin sisältyvä vähän tehoa käyttävä langaton viestintäprotokolla, joka sopii erinomaisesti toteutuksiin, missä pieni virrankulutus on tärkeää. Myös asiakaspäätteen ohjelmisto tuli päivittää sellaiseksi, että kompassin hallinta ja datan vastaanottaminen oli mahdollista.

4.6 Dynaaminen näytteenottotaajuus

Vaatus dynaamisesta eli vaihdeltavasta näytteenottotaajuudesta seurasi suoratoisto-toiminnallisuudesta. Näytteenottotaajuuden piti olla säädettävissä välillä 1 – 200 Hz. Koska dynaaminen näytteenottotaajuus lisättiin kompassimoduuliin vasta työn loppuvaiheessa, sen lisääminen vaati kompassin keskeytyksiin perustuvan ajastimien, ajurien ja suotimien rakenteen uudelleensuunnittelun sekä toteuttamisen.

5 SUUNNITTELU

Elektronisen kompassin suunnittelu alkoi aiheeseen liittyvän tiedon etsimisellä ja vastaavien kaupallisten toteutusten tutkimisella. Tämän jälkeen suunnittelu eteni lohkokaaavion piirtämisellä, joka perustui löydetyn tiedon analyysiin ja kohdejärjestelmän tiedetuihin haasteisiin (kuva 13). Lohkokaaavion oli tarkoitus jäsenellä kokonaisuus, josta elektroninen kompassi koostuu, mahdollisimman selkeiksi ja toteutuksen kannalta mielekkäiksi kokonaisuuksiksi. Lohkokaaavion ja tiedossa olevien vaatimuksien avulla varsinainen toteutus oli helppo aloittaa. Vaikka jokaisen lohkokaaavion lohkon olisi voinut jakaa paljon pienempiin osasiin, ei siitä olisi ollut juurikaan hyötyä. Näin oli helppo todeta, sillä jokaisen lohkon toteutukseen liittyi paljon teoriaa, johon oli järkevää perehtyä tarkemmin vasta kyseisen lohkon toteutuksen yhteydessä.



KUVA 13. Kompassisuunnan tuottaminen kiihtyvyys- ja magneettisensorin raakadatas-
ta

6 KOMPASSIN TOTEUTUS

6.1 Rakenne

Modulaarisen vaatimuksen vuoksi kompassimoduuli toteutettiin yhden lähdekooditiedoston sisälle. Näin sen liittäminen olemassa olevaan järjestelmään oli helppoa ja moduulin vaikutus muihin moduuleihin oli mahdollisimman vähäinen. Kompassimoduulilla oli tarvetta keskustella ainoastaan kiihtyvyy- ja magneettisensorin sekä BLE-moduulin kanssa, mikäli suuntatietoa streamattiin.

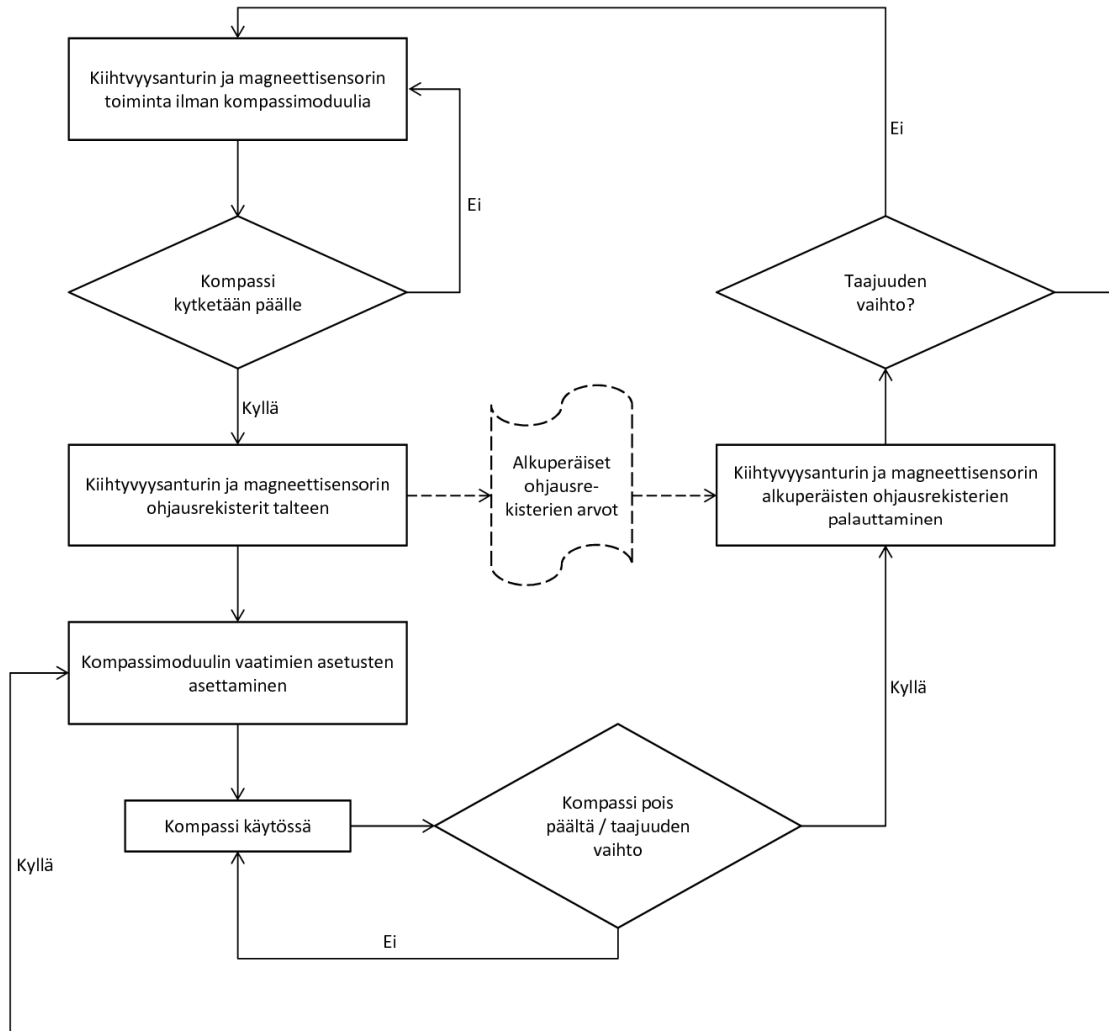
Kompassimoduulin sisäinen rakenne vastasi pitkälti suunniteltua. Uusi magneettinen data aiheuttaa keskeytyksen, joka käsitellään kompassimoduulissa tallentamalla magneettidata ja sitä vastaava orientaatiodata mittapuskuriin. Tämän jälkeen mitatusta magneettikenttävektorista poistetaan mittapuskurin datan perusteella laskettu rautavektori ja kierretään korjattu magneettikenttävektori vaakatasoon. Uusi rautakalibraatio lasketaan kerran minuutissa. Ennen varsinaisen suunnan laskemista kalibroitu data suodatetaan alipäästösuotimella. Tämän jälkeen lasketaan suunta, joka lähetetään langattomasti asiakaspäätteelle tai kompassimoduulin rajapinnan kautta sitä pyytäneelle moduulille.

6.2 Ajuri

Kompassimoduulin toiminta edellytti kiihtyvyyssanturin ja magneettisensorin ajurin asetusten asettamista siten, että osa kiihtyvyyssanturiin perustuvasta toiminnasta keskeytyi kompassin aktiivisen toiminnan ajaksi. Magneettianturin toimintojen kanssa tällaista ongelmaa ei ollut, koska kompassia lukuun ottamatta sitä ei käytetty mihinkään muuhun tällä hetkellä. Oli tärkeää, että muu toiminta pystyi jatkumaan häiriintymättä kompassin sammuttamisen jälkeen. Tämän toteuttamiseksi kaikki kiihtyvyyssanturin ja magneettisensorin ohjausrekisterit otettiin talteen ennen kompassin vaatimien asetusten kirjoittamista. Vastaavasti tallennetut asetukset kirjoitettiin takaisin kompassin sammussa (kuva 14). Näin muut moduulit eivät tavallaan edes huomaa, että kompassi oli käytössä.

Ajurin tuki muuteltavalle näytteenottotaajuudelle toteutettiin siten, että haluttu näytteenottotaajuus ilmoitettiin parametrina samalle funktiolle, joka muutenkin asetti senso-

rit toimintakuntoon. Mikäli näytteenottotaajuutta haluttiin muuttaa ajon aikana, kompassi sammutettiin ja käynnistettiin uudelleen halutulla näytteenottotaajuudella. Uudelleenkäynnistys oli luotettavin tapa vaihtaa taajuutta siten, että mittapuskuri ja alipäästösuodin jatkavat toimintaansa luotettavasti.



KUVA 14. Kiihtyvyyssanturin ja magneettisensorin ajurin toimintaperiaate

6.3 Mittapuskuri

Mittapuskuri on tietue, joka pitää sisällään magneettisensorin mittadatan eriteltynä akselleittain, aikaleiman jokaiselle näytteelle ja laskurin, mistä selviää puskurissa olevien näytteiden lukumäärä (kuva 15). Mittapuskurin sisältämän datan on tarkoitus olla riittävän erilaista luotettavan rautakalibroinnin laskemista varten. Tämän lisäksi kalibrointi pyritään tekemään aina uusimmalla mahdollisella datalla. Tätä varten jokaisen näytteen

lisäyshetki sekä hetkeä vastaava kolmeakselinen magneettinen data tallennetaan lasketun indeksin osoittamaan alkioon kolmiulotteiseen taulukkoon. Mitä isompi aikaleima on, sitä uudempi näyte on kyseessä. Mittapuskuri vaatii toimiakseen dataa sekä kiihtyvyyssanturilta ja magneettisensorilta.

```

11 #define MAX_SIZE 7
12 typedef struct mittapuskuri_t
13 {
14     int16_t Bx[MAX_SIZE][MAX_SIZE][MAX_SIZE]; // x-akseli
15     int16_t By[MAX_SIZE][MAX_SIZE][MAX_SIZE]; // y-akseli
16     int16_t Bz[MAX_SIZE][MAX_SIZE][MAX_SIZE]; // z-akseli
17     int32_t aikaleima[MAX_SIZE][MAX_SIZE][MAX_SIZE]; // näytteiden
18 // lisäämishetki
19     int32_t puskuri_laskuri; // näytteiden lukumäärä
20 } mittapuskuri_t;
21
22 mittapuskuri_t mittapuskuri;

```

KUVA 15. Mittapuskurin C-kielinen tietorakenne

Aikaleima tallennetaan taulukkoon, joka on tietotyypiltään 32-bittinen etumerkillinen kokonaisluku. Etumerkkiä tarvitaan ainoastaan käyttämättömien taulukon alkioden ilmaisemiseen. Negatiivinen luku aikaleimataulukon tietyssä lasketun indeksin osoittamassa alkiossa kertoo, että taulukoiden Bx, By ja Bz vastaavissa alkioissa ei ole käyttökelpoista dataa (kuva 16). Jotta ohjelmakoodi säilyi mahdollisimman yksinkertaisena, ainoa sallittu negatiivinen luku on -1. Positiivinen luku taas kertoo, että vastaavassa indeksissä on käyttökelpoista sensoridataa ja se on tallennettu aikaleimataulukon osoittamalla ajan hetkellä. Koska käytössä on 32-bittisen muuttujan positiivinen kokonaislukuvaraus, laskuriin mahtuu aikaleimoja lukuun 2 147 483 647 asti alkaen nolasta. Tämä rajoittaa kompassin yhtäjaksoisen käytön 50 Hz:n taajuudella noin 1,3 vuoteen, koska silloin laskuri pyörii ympäri lukuun -2 147 483 648. Käytännössä tämä ei kuitenkaan ole ongelma, sillä kompassia ei tulla soveltamaan siten, että sen täytyisi pysyä yli vuoden yhtäjaksoiseen toimintaan. Mikäli tällainen tilanne kuitenkin tulee tulevaisuudessa eteen, on mahdollista muuttaa sekä laskuri että aikaleimamuuttujat 64-bittisiksi luvuiksi. Tällöin yhtäjaksoinen käyttö on mahdollista n. 5,8 miljardin vuoden ajan.

Aktiivisten näytteiden lukumäärä on rajoitettu 250 kappaleeseen, vaikka puskuriin mahtuisi näytteitä 7^3 eli 343 kappaletta. Maksimirajoitus otettiin käyttöön, jotta vanhoilla näytteillä on tilaa vanhentua ilman, että niitä poistetaan välittömästi uuden datan tieltä. Näytteiden tallentaminen ja vanheneminen tapahtuu melko yksinkertaisella logiikalla.

Aluksi data tallennetaan sopivan indeksin osoittamaan alkioon. Mikäli kyseisessä alkiossa oli näyte ennen uuden näytteen tallentamista riittää, että indeksin aikaleima päivitetään. Jos alkiossa ei ollut näytettä ennen tallentamista, riittää, että aikaleiman kirjoittamisen lisäksi kasvattaa mittapuskurin näytteiden lukumäärää yhdellä. Jos alkio oli tyhjä, mutta puskurissa oli jo suurin sallittu määrä näytteitä, etsitään vanhin näyte ja poistetaan se asettamalla sitä vastaavan aikaleiman arvoksi -1. Varsinaista sensoridataa ei ole tarvetta poistaa tai nollata, koska luku -1 aikaleimassa tulkitaan siten, että vastaava indeksi oli tyhjä.

Kuten edellä mainittiin, on erittäin tärkeää, että kaikki mittapuskurissa olevat näytteet ovat riittävän erilaisia. Käytännössä tämä toteutettiin laskemalla sopiva taulukon indeksi väliltä 0–6 sensorin sen hetkistä kallistuskulmaa hyväksi käyttäen. Jokainen indeksi on määritelty 25,7 asteen välein. Väli määräytyy taulukon ulkodimension MAX_SIZE ja 180°:een osamäärästä. Ohjelmakoodissa laskeminen tehtiin kiihtyvyyssanturin datan avulla jokaisen akselin (x, y ja z) suhteen siten, että x-akseli vastasi ensimmäisen ulottuvuuden indeksia, y toisen ja z kolmannen (kuva 16). Tällä menetelmällä saatiin nopeasti täysin erilaisia mittatuloksia, joiden avulla rautakalibroinnista saatiin luotettava jo suhteellisen pienellä näytemäärällä. Jos kompassi on pitkän ajan paikallaan esimerkiksi pöydällä, ei mittapuskurin avulla todennäköisesti pystytä tuottamaan rautakalibrointia. Tällöin kaikki uusimmat näytteet tallennettaisiin samaan indeksiin ja aiempien näytteiden vanhetessa puskurissa olisi vain yhdenlaista magneettista dataa. Pitkän liikkumattomuuden jälkeen kompassi vaati hieman liikuttelua ja esimerkiksi piirtämällä kahdeksikko ilmaan, puskurin täyttyi nopeasti laadukkaalla ja monipuolisella magneettisella datalla.

```

36     float to_range = (float)MAX_SIZE / 180.0F;
37
38     int32_t i = ( GetCurrentOri(acc_data, Gx) + 90.0F ) * to_range;
39     int32_t j = ( GetCurrentOri(acc_data, Gy) + 90.0F ) * to_range;
40     int32_t k = ( GetCurrentOri(acc_data, Gz) + 90.0F ) * to_range;
41
42     mittapuskuri.Bx[i][j][k] = mag_data[0];
43     mittapuskuri.By[i][j][k] = mag_data[1];
44     mittapuskuri.Bz[i][j][k] = mag_data[2];
45

```

KUVA 16. Sopivan indeksin laskeminen ja uuden datan tallentaminen vastaavaan indeksiin toteutettiin mittalaitteen asennon perusteella

6.4 Kompassisuunnan tuottaminen

Kompassisuunnan tuottaminen tapahtuu luvussa 5 esitetyn periaatteen mukaisesti. Tässä luvussa tutustutaankin tarkemmin lohkojen (kuva 13) sisäiseen toimintaan ja niiden matemaattisen perustaan.

6.4.1 Kallistuksen kompensointi [2]

Kallistuksen kompensointi perustui Eulerin kulmien määrittämiseen kiihtyvyysanturin avulla. Eulerin kulmat kolmiulotteisessa avaruudessa (kuva 8) ovat kiertyminen x-akselin ympäri eli kallistuminen (englanniksi roll), kiertyminen y-akselin ympäri eli nyökkääminen (englanniksi pitch) ja kiertyminen z-akselin ympäri eli kääntyminen (englanniksi yaw). Kun magneettikenttävektori kierretään vaakatasoon, käännetty vektori osoittaa edelleen kompassisuunnan ja sen pinnansuuntainen voimakkuus lisääntyy.

Koska kääntymiskulmaa ei laskettu kiihtyvyysanturin datan perusteella, kallistuksen kompensointi aloitettiin määrittämällä kallistus- ja nyökkäyskulmat. Molemmat Eulerin kulmat oli mahdollista ratkaista yhdestä matriisiyhtälöstä (2), missä ϕ vastasi kallistuskulmaa ja θ nyökkäämiskulmaa.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (2)$$

Kun yhtälö (2) kerrottiin auki suorittamalla matriisien kertolasku, kallistuskulma ϕ voidaan määrittellä kiihtyvyysanturin y- ja z-komponentin avulla (3; 4).

$$G_y \cos \phi - G_z \sin \phi = 0 \quad (3)$$

$$\Rightarrow \tan \phi = \left(\frac{G_y}{G_z} \right) \quad (4)$$

Nyökkäyskulman θ ratkaisemiseen tarvittiin dataa jokaiselta kiihtyvyyssanturin akselilta (5; 6), kun se ratkaistiin matriisikertolaskun avulla (2).

$$G_x \cos \theta + G_y \sin \theta \sin \phi + G_z \sin \theta \cos \phi = 0 \quad (5)$$

$$\Rightarrow \tan \theta = \left(\frac{-G_x}{G_y \sin \phi + G_z \cos \phi} \right) \quad (6)$$

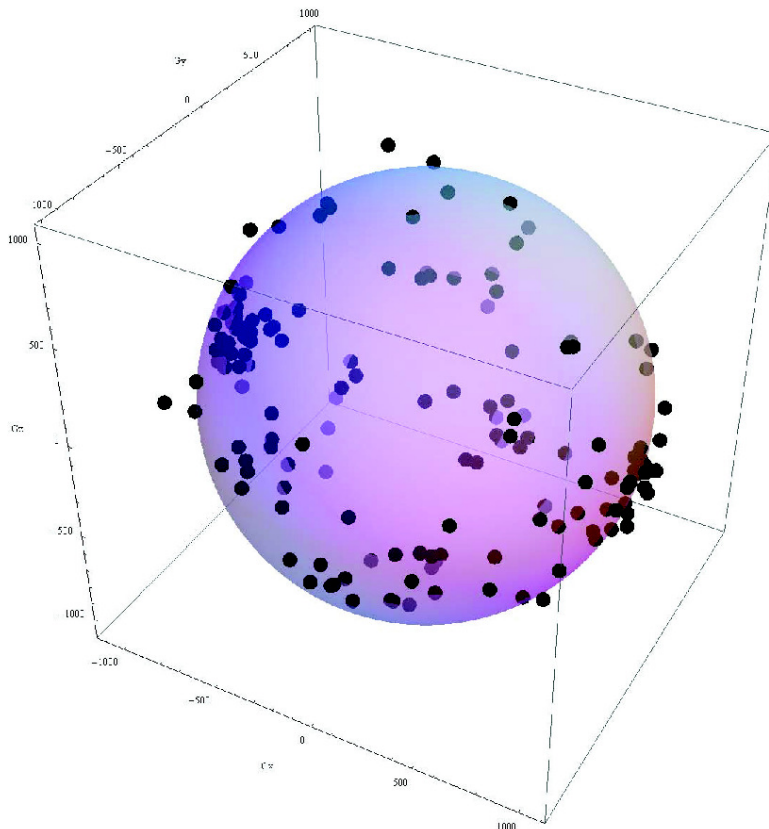
Kun kallistus- ja nyökkäyskulma oli ratkaistu, magneettinen data pystyttiin kiertämään vaakatasoon (kuva 9) soveltamalla yhtälöä (2) siten, että kiihtyvyyssanturin data korvattiin rautakalibroidulla magneettisella datalla B_c (7). Tuloksena oli rautakalibroitu ja kallistuskompensoitu magneettivektori B_T (8).

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{cx} \\ B_{cy} \\ B_{cz} \end{pmatrix} \quad (7)$$

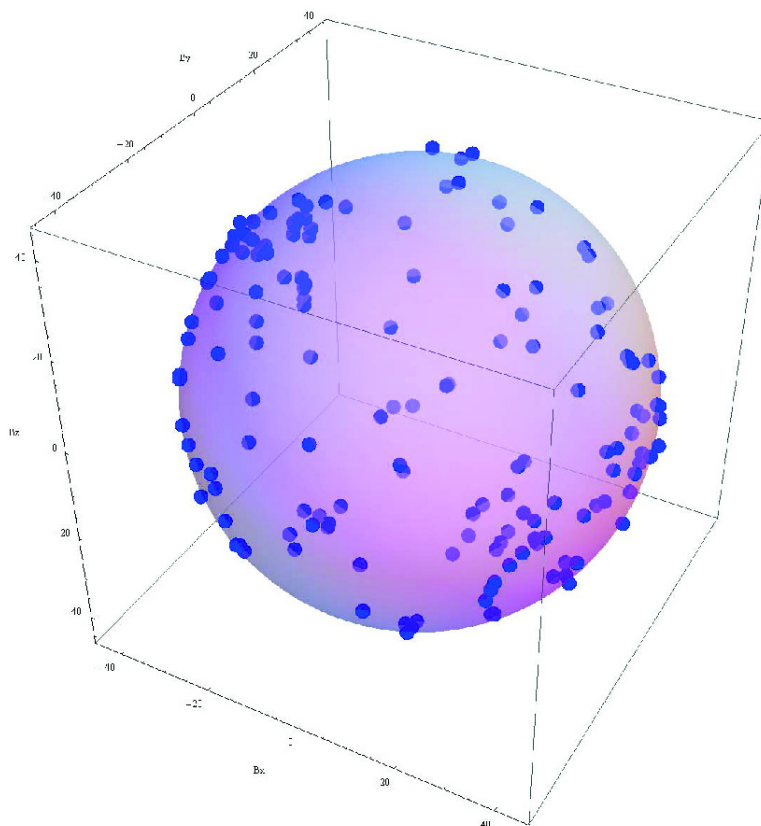
$$\Rightarrow \begin{pmatrix} B_{cx} \cos \theta + B_{cy} \sin \theta \sin \phi + B_{cz} \sin \theta \cos \phi \\ B_{cy} \cos \phi - B_{cz} \sin \phi \\ -B_{cx} \sin \theta + B_{cy} \cos \theta \sin \phi + B_{cz} \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{Tx} \\ B_{Ty} \\ B_{Tz} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Kallistuksen kompensointi voidaan esittää myös kuvien avulla, jolloin eri vaiheiden ymmärtäminen on huomattavasti helpompaa. Käytännössä visuaalinen esitys näyttää, minkälaista mittadataa järjestelmä tuottaa kalibroinnin eri vaiheissa.

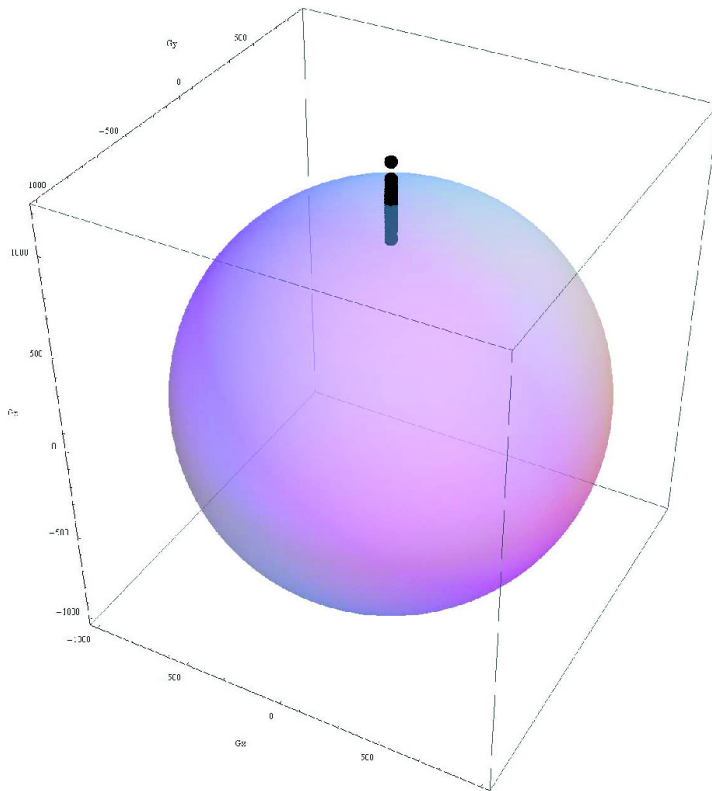
Alussa kiihtyvyyssanturin ja magneettisensorin data on levinnyt tasaisesti pallon pinnalle siten, että tiettyä asentoa vastaa tietynlainen magneettinen data (kuvat 17 ja 18). Magneettisen datan kohdalla on otettava huomioon, että kyseessä on rautakalibroitu data. Mikäli kyseessä olisi raakadataa, pisteet asettuisivat pallon sijasta ellipsoidin pinnalle. Kun datapisteitä kompensoidaan Eulerin kulmien avulla, voidaan sekä kiihtyvyyssanturin että magneettisensorin data kiertää niin sanottuun nollassuunnassa, missä $\theta = \phi = 0$ ja näin saada aikaiseksi kallistuskompensoitua dataa (kuvat 19 ja 20). Kiihtyvyyssanturin kalibroidussa datassa oli huomattavissa hajontaa pystysuunnassa (z-akseli), mikä johtui kiihtyvyyssanturiin kohdistuneesta kiihtyvyydestä, joka oli saattanut syntyä esimerkiksi käden tärähtelystä.



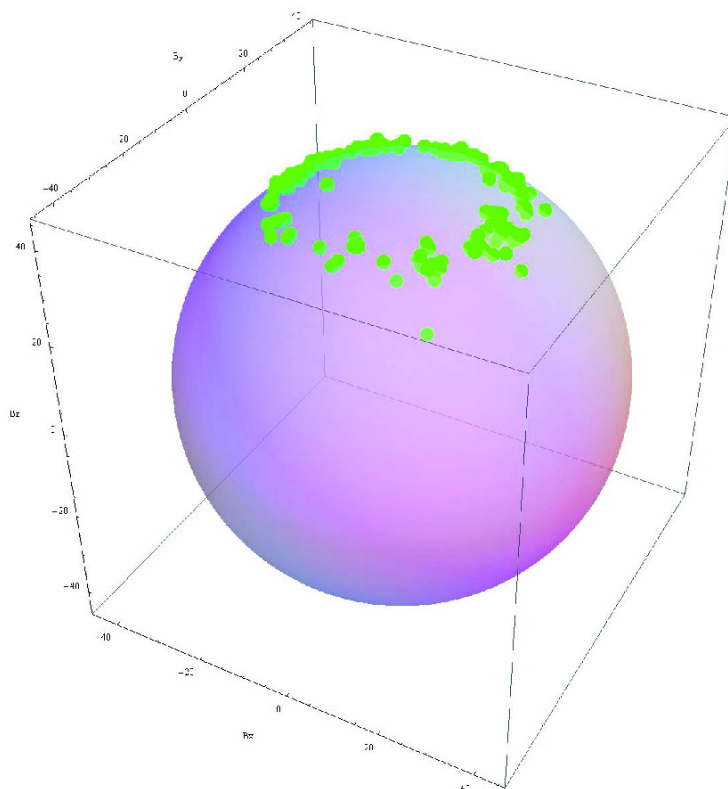
KUVA 17. Visuaalinen esitys kiihtyvyyssanturin tuottamasta raakadatasta [2]



KUVA 18. Visuaalinen esitys rautakalibroidusta, mutta ei kallistuskompensoidusta magneettisesta datasta [2]



KUVA 19. Visuaalinen esitys kiihtyvyyssanturin datasta, joka on käännetty nollatasoon [2]



KUVA 20. Visuaalinen esitys rautakalibroidusta ja kallistuskompensoidusta magneettisesta datasta [2]

6.4.2 Rautakalibrointi [1]

Kuten aiemmin esitettiin, magneettiset häiriöt johtuivat sensorin piirilevyn muista ferromagneettisista ja sähköisistä komponenteista sekä magneettisensorin sisäisistä häiriöistä. Nämä häiriöt ja virheet muodostivat niin sanotun rautavektorin V (9). Ilmiötä oli mahdollista käsitellä vektorina, koska se pyörii aina samassa suhteessa sensorin ja piirilevyn kanssa. Rautavektorilla on aina sama suunta ja pituus, joka riippuu käytössä olevasta mittalaitteesta ja sen piirilevystä.

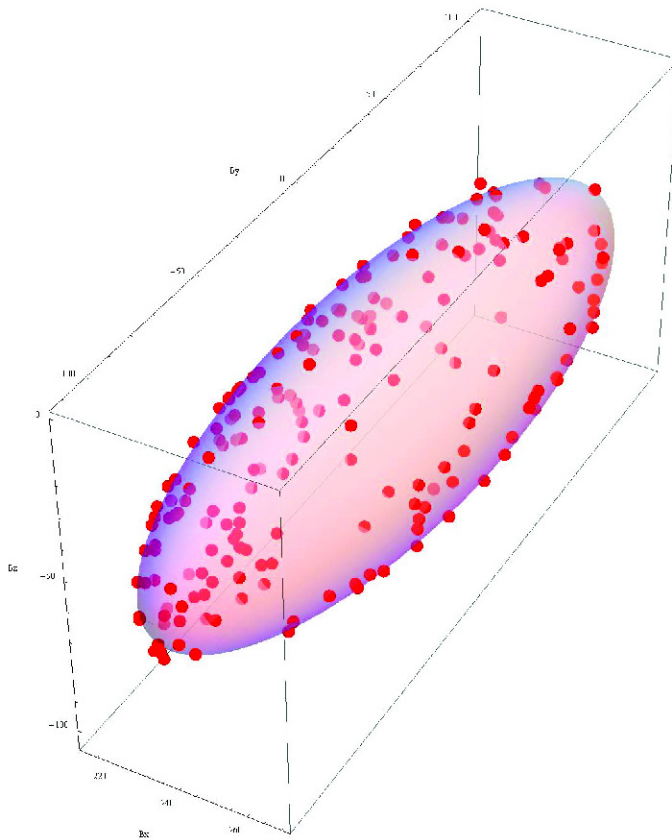
$$V = V_{PCB} + V_{SENSORI} \quad (9)$$

Kun rautavektori oli selvillä, rautakalibrointi suoritettiin vähentämällä rautavektori V mitatusta magneettikenttävektorista B_r . Erotuksen tuloksena oli rautakalibroitu magneettikenttävektori B_c (10).

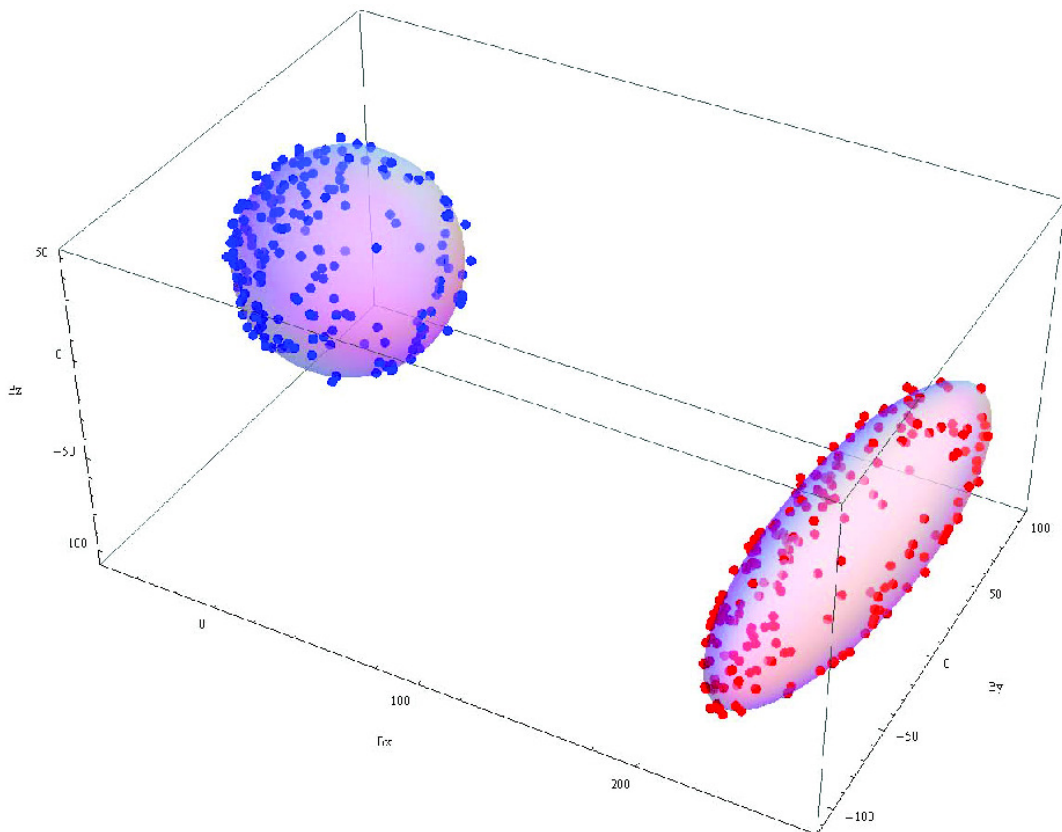
$$B_c = B_r - V \quad (10)$$

Rautavektorin ratkaisemiseksi käytettiin niin sanottua neljän pisteen rautakalibrointia, missä mainitut neljä pistettä vastasivat neljää tuntematonta suuretta. Tuntemattomat arvot olivat rautavektorin kolme komponenttia (V_x , V_y ja V_z) sekä magneettikenttävektorin B pituus. Koska tuntemattomia muuttujia oli neljä, täytyi mittapuskurissa olla vähintään yhtä monta mittatulosta. Tulos kuitenkin parani, kun kalibrointi suoritettiin useammalla mittaustuloksella.

Mikäli kalibroimatonta dataa esitetään graafisesti, datapisteet eivät asetu pallon pinnalle (kuva 18), vaan ne muodostavat ellipsoidin (kuva 21), mikä johtuu rautavektorin vääristävästä vaikutuksesta. Jos kalibrointioperaatiota ajatellaan graafisesti, on ellipsoidista tarkoitus saada mahdollisimman pyöreä pallo (kuva 22). Kun arvioidaan, kuinka hyvin ellipsoidi on pystytty sovittamaan palloksi, voidaan laskea myös sovitusvirhe. Sovitusvirheen avulla voidaan arvioida, kuinka hyvin kalibrointi on onnistunut. Kun kalibroinnin hyvyttä voidaan arvioida, ollaan tilanteessa, jossa voidaan miettiä, kannattaako uutta kalibrointia käyttää vai oliko edellinen kalibrointi tarkempi tai parempi.



KUVA 21. Visuaalinen esitys kalibroimattomasta magneettisesta datasta B_r [1]



KUVA 22. Oikealla kalibroimatonta magneettista dataa B_r ja vasemmalla kalibroitua magneettista dataa B_c [1]

Kalibroinnin tarkoituksena oli laskemalla selvittää rautavektorin suuruus siten, että tulos laskettiin käyttämällä kaikkia mittapuskurissa olevia magneettisensorin mittaamia kalibroimattomia magneettikenttävektoreita B_r ja sijoittamalla ne vektoriin Y (11) ja matriisiin X (12). Matriisin ja vektorin avulla voitiin laskea ratkaisuvektori β , joka piti sisälleen kaikki neljä tuntematonta muuttujaa (13). Ratkaisuvektorin avulla saatiin lasketuksi kalibroitu magneettikenttävektori B_c , joka vastasi todellista maan magneettikenttävektoria B (14).

$$Y = \begin{bmatrix} B_{rx}[0]^2 + B_{ry}[0]^2 + B_{rz}[0]^2 \\ B_{rx}[1]^2 + B_{ry}[1]^2 + B_{rz}[1]^2 \\ \dots \\ B_{rx}[N-1]^2 + B_{ry}[N-1]^2 + B_{rz}[N-1]^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$X = \begin{bmatrix} B_{rx}[0]^2 & B_{ry}[0]^2 & B_{rz}[0]^2 & 1 \\ B_{rx}[1]^2 & B_{ry}[1]^2 & B_{rz}[1]^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \\ B_{rx}[N-1]^2 & B_{ry}[N-1]^2 & B_{rz}[N-1]^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2V_x \\ 2V_y \\ 2V_z \\ B^2 - V_x^2 - V_y^2 - V_z^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = B_c = \sqrt{\beta_3 + V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (14)$$

Yhtälöissä (11 ja 12) esitetty muuttuja N tarkoittaa mittapuskurissa olleiden aktiivisten näytteiden lukumäärää. Kuten edellä sanottiin, mitä enemmän näytteitä voidaan käyttää, sen parempi kalibrointituloks saadaan. Yhtälöiden lukumäärä oli kuitenkin syytä pitää järkevänä, jotta kalibrointi vastaisi mahdollisimman uusia näytteitä ja kalibroinnin laskeminen ei kuluttaisi suunnattomasti laskentatehoa. Etenkin ratkaisuvektorin tuottaminen C-kielellä on erittäin raskasta sulautetussa järjestelmässä, koska sen ratkaiseminen vaatii matriisien kertolaskua, transponointia ja käänteismatriisien ratkaisemista.

6.4.3 Kompassisuunnan laskeminen [2]

Itse kompassisuunnan laskeminen kävi helposti, kun Eulerin kulmat oli laskettu ja rautakalibrointi suoritettu. Koska magneettikenttävektori oli käännetty nollatasoon, kuten aiemmin näytettiin, kompassisuunta laskettiin kaksiulotteisesti pinnansuuntaisista komponenteista B_{Tx} ja B_{Ty} (15). Nollatasossa z-komponentti on aina kohtisuorassa x- ja y-komponentin muodostamaa tasoa kohti.

$$\tan(\psi) = \left(\frac{-B_{Ty}}{B_{Tx}} \right) = \left(\frac{B_{Tz} \sin \phi - B_{Ty} \cos \phi}{B_{Tx} \cos \theta + B_{Ty} \sin \theta \sin \phi + B_{Tz} \sin \theta \cos \phi} \right) \quad (15)$$

Kun lopullinen suunta oli laskettu, piti se muuttua radiaaneista asteiksi. Tämän lisäksi piti yksikköympyrän avulla määrittää, miltä neljännekseltä tulos oli peräisin, jotta se pystyttiin esittämään välillä $0^\circ - 359^\circ$. Tämä johtuu siitä, että arkustangentin (C-kielessä atan) arvojoukko on määritelty välillä $-90^\circ - 90^\circ$. Määrittäminen tapahtui yksinkertaisesti tutkimalla yhtälön 15 osamäärän osoittajan ja nimittäjän etumerkkejä. Käytettävissä oli myös laajennettu arkustangenttifunktio (C-kielessä atan2), joka otti parametrina kaavan 15 osoittajan ja nimittäjän, joiden perusteella se laajensi arvojoukon välille $-180^\circ - 180^\circ$. Laajennettu arvojoukko saatiin välille $0^\circ - 359^\circ$ lisäämällä negatiivisiin lukuihin arvo 360° .

6.4.4 Kompassisuunnan alipäästösuodatus

Alipäästösuodatus oli käytettävyyden kannalta erittäin tärkeä ominaisuus, mutta sen toteuttaminen oli vaikeampaa, kuin miltä aluksi vaikutti. Ongelmia ei tuottanut suodatimen matemaattinen toteutus, vaan suodatettavan arvon valinta. Suodatus itsessään tapahtui käyttämällä toisen asteen Butterworth-suodatinta (16), jonka suodinkertoimet a_n ja b_n laskettiin siten, että ne sopivat mahdollisimman hyvin käytettyyn näytteenottoaajuuteen. Kertoimet täytyi laskea uudelleen aina kompassin käyttöaajuuden muuttuessa.

$$y[k] = b_0x[k] + b_1x[k - 1] + b_2x[k - 2] + a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] \quad (16)$$

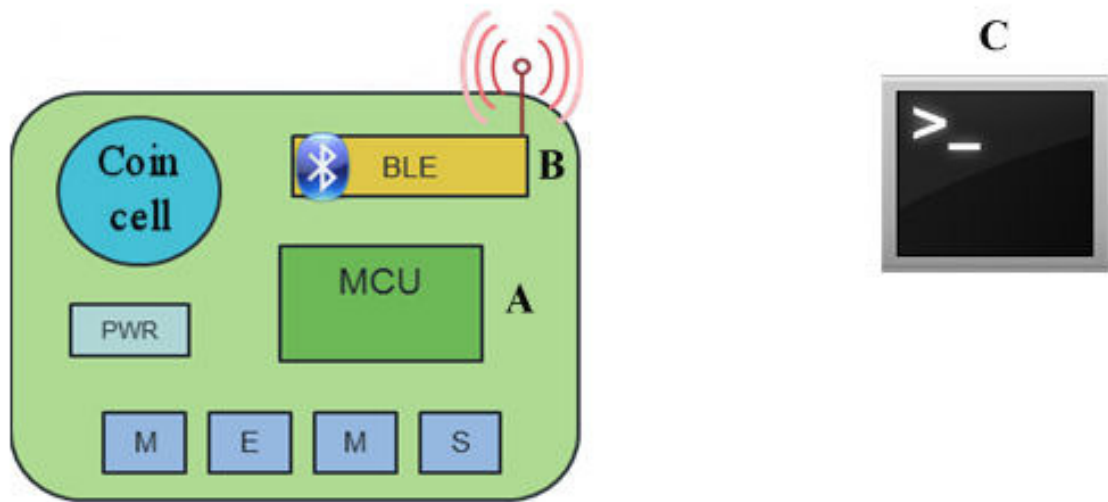
Muutaman testitapauksen jälkeen suodatettavaksi suureiksi valittiin nyökkäys- ja kallistuskulmat. Kuten kallistuksen kompensointia käsittelevässä luvussa näytettiin, nyökkä-

ys- ja kallistuskulma laskettiin kiihtyvyyssanturin datan perusteella. Tästä seurasi, että näiden kahden kulman suodattaminen Butterworth-suodattimella esti esimerkiksi käden tärinästä aiheutuvien häiriöiden näkymisen lasketussa kompassisuunnassa. Tämän lisäksi kulmien suodattaminen ei vaikuta järjestelmän nopeuteen reagoida todellisiin suunnan muutoksiin, sillä magneettisensorin arvoja ei suodatettu lainkaan. Myös magneettisten arvojen suodatukselle olisi ollut tarvetta, mikäli niissä olisi ollut enemmän kohinaa. Magneettisensorin kohinan vaikutukset olivat havaittavissa vasta tarkkuudessa $\pm 0,5 \mu\text{T}$, ja niin pieni kohina ei näkynyt valmiissa kompassisuunnassa, joka esitettiin kokonaisina asteina.

Mikäli suodatinta olisi sovellettu suoraan laskettuun kompassisuuntaan (tätä testattiin ensimmäisenä), olisivat kiihtyvyyssanturiin kohdistuneet häiriöt suodatuksesta huolimatta vaikuttaneet kompassisuuntaan. Ongelmia olisi tällöin aiheuttanut myös niin sanottu hyppykohta eli kompassisuunnan pyörähtäminen 359° :stä takaisin 0° :aa. Suodin olisi pyrkinyt hidastamaan tätä muutosta ja kompassisuunta olisi saanut satunnaisia arvoja väliltä $0^\circ - 359^\circ$ ennen vakiintumista 0° :een.

6.5 Streamaus

Streamauksen eli suoratoiston toteutus koostui kolmesta vaiheesta, joista kukin toteutettiin eri ympäristöihin (kuva 23). Ensimmäinen vaihe oli BLE-moduulin sisäisen ohjelmiston eli firmwaren päivittäminen, toinen oli kompassisuunnan streamauksen vaatimien muutosten tekeminen kompassimoduuliin sekä muihin mittalaitteen ohjelmistomoduuleihin, ja viimeiseksi asiakaspääteohjelmistoon lisättiin asiaan kuuluvat ominaisuudet. Kaikki vaiheet pitivät sisällään suuntatiedon tietotyypin muunnoksia, sillä eri osiot (kuva 23) käsittelivät tietoa eri tietotyypeinä. Mittalaitteessa suuntatieto oli tallennettuna 16-bittisinä kokonaislukuina, siirtotielle se piti pilkkoa 8-bittisiksi tavuiksi ja ennen tulostusta ne piti muuttaa takaisin 16-bittisiksi kokonaislukuiksi tai 32-bittisiksi liukuluvuiksi.



KUVA 23. Suoratoisto vaatii mittalaitteen mikrokontrollerin (A) sekä BLE-moduulin (B) ja asiakaspääteohjelman (C) saumatonta yhteistyötä

6.5.1 BLE-moduuli

BLE-moduulin firmware ohjelmoitiin XML-merkkikielillä (Extensible Markup Language). Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että ensin XML-tiedostoon tehtiin sopivat palvelukuvaukset datan siirtämistä varten, minkä jälkeen kääntäjä tuotti kyseisestä tiedostosta heksatiedoston, joka ladattiin BLE-moduuliin. Palvelu koostui itse palvelusta ja sen kanssa käytettävistä ominaispalveluista. Jokainen ominaispalvelu koostui seuraavista tiedoista: ominaispalvelun nimi, ominaispalvelulla siirrettävän datan pituus tavuina ja tieto siitä, käytetäänkö ominaispalvelua datan kirjoittamiseen, lukemiseen vai molempiin (kuva 24).

```
<service uuid="11111111-1111-1111-1111-111111111111">
  <characteristic uuid="11111111-1111-1111-1111-111111111111" id="datatype_compass_data">
    <properties read="true" />
    <value length="16" />
  </characteristic>
  <characteristic uuid="11111111-1111-1111-1111-111111111111" id="datatype_compass_ctrl">
    <properties write="true" />
    <value length="1" />
  </characteristic>
  <characteristic uuid="11111111-1111-1111-1111-111111111111" id="datatype_compass_interval">
    <properties write="true" />
    <value length="1" />
  </characteristic>
</service>
```

KUVA 24. BLE-moduulille ohjelmoitu palvelu, joka mahdollistaa kompassin hallinnan ja datan siirtämisen mittalaitteesta asiakaspääteelle (kuvan UUID-tunnisteet ovat esimerkkejä ja poikkeavat todellisista käytetyistä arvoista)

Palvelun ja ominaispalveluiden nimet esitettiin UUID:n sekä ID:n avulla. Näin jokaisella palvelulla ja ominaispalvelulla on oma yksilöllinen tunnisteensa, eikä se sekoitu muihin palveluihin. UUID on lyhenne sanoista ”Universally unique identifier” ja se pyrkii nimensä mukaisesti tuottamaan ainutlaatuisen universaalien tunnisteiden. UUID on 128-bittinen tunniste eli se muodostuu 32 heksadesimaalinumerosta (kuva 24). Erilaisia uniikkeja tunnisteita voidaan luoda 2^{128} eli noin $3,4 \cdot 10^{38}$ kappaletta. Tunnisteiden luomiseen käytettiin internetistä löytynyttä ilmaisgeneraattoria.

Kompassipalvelun alle toteutettiin kolme ominaispalvelua (kuva 24), joiden avulla siirrettiin tietoa (`datatype_compass_data`), lähetettiin komentokäskyjä (`datatype_compass_ctrl`) ja määrättiin kompassille haluttu näytteenottotaajuus (`datatype_compass_interval`). Kaksi jälkimmäistä olisi ollut mahdollista yhdistää yhdeksi ominaispalveluksi, mutta niiden erottaminen kahdeksi erilliseksi teki mittalaitteen ohjelmakoodista huomattavasti selkeämmän. Datat siirtämiseen tarkoitettun ominaispalvelun pituudeksi asetettiin 16 tavua eli kerralla pystyttiin lähettämään kahdeksan kahden tavun (16-bittistä) pituisia näytettä. Kontrollipalveluiden pituudeksi riitti yhden tavun pituus.

6.5.2 Asiakaspääteohjelma

Asiakaspääteohjelma oli valmiiksi olemassa oleva ohjelmisto, joka oli Linux-käyttöjärjestelmään toteutettu konsolisovellus. Sitä käytettiin pääasiassa mittalaitteen mittaamien arvojen suoratoistoon, joten sitä piti muokata niin, että myös kompassisuunnan suoratoisto oli mahdollista.

Ensimmäisenä pääteohjelmaan toteutettiin tekstipohjainen käyttöliittymä, jonka avulla käyttäjän oli mahdollista käynnistää kompassisuunnan suoratoisto halutuilla parametreilla. Käyttöliittymän avulla oli mahdollista valita kompassin näytteenottotaajuus väliltä 1 – 200 Hz, suodatetaanko kompassisuuntaa alipäästösuodattimella ja lähetetäänkö kompassisuunnan mukana kiihtyvyyssanturin akselikohtaista dataa. Kiihtyvyyssanturin data esitettiin joko metreinä sekunneissa (m/s) tai orientaationa (akselin asento vaakatasoon nähden asteina). Asiakasohjelmaan piti tietenkin toteuttaa myös kaikki tarvittavat tulostusfunktiot suoratoistodatan sekä mahdollisten virheilmoitusten esittämistä varten. Vastaanotettaessa tulostettava suuntadata siirtotieltä se muunnettiin takaisin 16-

bittisiksi kokonaisluvuiksi. Kiihtyvyyssanturin data muunnettiin 32-bittisiksi liukuluvuiksi. Ohjelman logiikkaa piti päivittää myös siltä osin, mikä liittyi BLE-moduulin kanssa keskustelemiseen, jotta ohjelma osasi tunnistaa kompassipalvelun ja ominaispalvelut niiden UUID:n perusteella ja käyttää palveluita datan lähettämiseen sekä vastaanottamiseen.

6.5.3 Mittalaite

Myös mittalaitteessa oli valmis logiikka BLE-moduulin käyttämistä varten, mutta se piti päivittää ymmärtämään uudet kompassin toimintaan liittyvät palvelut. Kompassin käynnistäminen, sammuttaminen, taajuuden valinta ja valinta suotimen käyttämisestä olivat yksinkertaisia toteuttaa, mutta suuntatiedon lähettäminen oli hieman työläämpää. Tämä johtui siitä, että virrankulutuksen näkökulmasta ei ollut järkevää lähettää jokaista laskettua suuntatietoa erillisinä kahden tavun paketteina. Ongelma ratkesi siten, että kompassimoduuliin toteutettiin FIFO-pino suuntadataa varten.

Pinon kooksi valittiin 16 tavua (kuva 24) eli sinne mahtui kahdeksan kappaletta suuntadatoja, joiden pituus oli kaksi tavua (16-bittiä). Kuten aiemmin todettiin, BLE-moduuli lähetti dataa tavu (8-bittiä) kerrallaan. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että 16-bittinen luku täytyi pilkkoa kahdeksi 8-bittiseksi luvuksi. Tämä suoritettiin tehokkaasti lukemalla 16-bittistä pinoa 8-bittisellä osoittimella ja siirtämällä tieto näin varsinaiseen lähetyspuskuriin, mistä data lopulta lähetettiin pääteohjelman kuultavaksi.

7 YHTEENVETO

Mittalaitteen piirilevy oli erittäin tiheästi ladottu (taulukko 1), mutta sen seuraavissa kehitysversioissa olisi mahdollista tarjota kompassille suotuisimmat olosuhteet sijoittamalla magneettisensori mahdollisimman kauas mittalaitteen akusta tai paristosta. Nykyversiossa paristo on lähes kiinni magneettisensorissa, jonka takia sensorin arvot ovat lähellä saturoitumista. Lähes saturoituneen magneettisensorin toleranssi voimakkailla magneettisille häiriöille on heikko. Vaikka tämä ei aiheuta ongelmia valmiissa kompassissa, on asia silti syytä tiedostaa. [3]

Nykyisessä versiossa magneettisen datan kerääminen aloitetaan vasta silloin, kun kompassi käynnistettiin suoratoistoa varten. Tämä aiheuttaa sen, että rautakalibrointi pystytään suorittamaan vasta silloin, kun käyttäjä jo odottaa saavansa suoratoistettua kompassidataa. Kyseisen ongelman voisi ratkaista muuttamalla koko kompassimoduulin tietorakennetta siten, että dataa kerättäisiin koko ajan mittalaitteen ollessa päällä. Tällöin mittapuskurissa olisi riittävästi dataa suoratoiston alkaessa ja rautakalibrointi olisi mahdollista suorittaa ilman, että käyttäjä joutuu odottamaan sen valmistumista. Tämä ei tietenkään vaikuttaisi kompassin toimintaan, mutta parantaisi laitteen käyttömukavuutta.

Kompassin nykyversio tekee rautakalibroinnin, kun magneettista dataa on saatavilla vaadittu minimimäärä ja sen jälkeen muutaman minuutin välein. Vaikka kyseinen metodi takaakin laadukkaan kalibroinnin, kuluttaa se merkittävästi laskentatehoa. Mikäli laskentatehoa olisi tarvetta vapauttaa muihin tarpeisiin, voisi jatkuvan kalibroinnin sijasta käyttää vakiokalibrointia. Vakiokalibroinnin voisi selvittää sulkemalla mittalaitteen nollan gaussin kammioon. Sen sisälle eivät ulkoiset magneettikentät pääse, jolloin kaikki magneettisensorin mittaama data edustaisi ainoastaan mittalaitteen itsensä tuottamia magneettikenttiä. Vähentämällä nämä mitatut vakioarvot kaikista mitatuista magneettosensorin arvoista päästäisiin todennäköisesti hyvin lähelle samanlaista kompassin käyttötarkkuutta kuin laskennallisella kalibroinnilla. [9]

Valmis kompassiohjelmisto täyttää kaikki sille ennalta asetetut vaatimukset. Lisäksi valmiissa ohjelmistossa on useita ominaisuuksia, jotka syntyivät alkuperäisten vaatimusten sivutuotteena, esimerkiksi useat erilaiset suoratoistomahdollisuudet. Näille lisäominaisuuksille oli kuitenkin tarvetta, mikä lisää työn arvoa. Mahdollisen jatkokehityk-

sen tarve ja suunta määräytyy tarkemmin ensimmäisten asiakaskokemusten myötä ja mahdollinen asiakaskohtainen räätälöinti onnistuu helposti ohjelmiston joustavan arkkitehtuurin myötä.

Elektronisen kompassin toteuttaminen ja integrointi kaupalliseen sulautettuun järjestelmään oli erinomainen ja palkitseva opinnäytetyön aihe. Työn valmistuminen edellytti kykyä soveltaa käytännössä kaikkia kolmen vuoden aikana opittuja taitoja aina konekielen perusteista digitaaliseen signaalinkäsittelyyn ja matriisilaskentaan. Tämän lisäksi useat, aiemmin vain teoriassa ymmärretyt asiat, konkretisoituivat työn aikana käytännössä. Luonnollisesti aikaa kului paljon myös täysin uusien asioiden selvittämiseen ja opettelemiseen, mikä on yksi tärkeimmistä koulutuksen antamista valmiuksista. Työskentely sujui sovitun aikataulun puitteissa ja suuri kiitos tästä kuului myös Trelab Oy:lle. Mittalaitteeseen ja kehitysympäristön liittyvät ongelmat ratkesivat yleensä muutamassa minuutissa, ja näin ollen oli helppoa keskittyä itse työn tekemiseen.

LÄHTEET

- 1 Calibrating an eCompass in the Presence of Hard and Soft-Iron Interference. Luettu 1.7.2013. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4246.pdf
- 2 Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors. Luettu 1.7.2013. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf
- 3 Layout Recommendations for PCBs Using a Magnetometer Sensor. Luettu 15.9.2013. http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4247.pdf
- 4 Maan magneettikenttä. Luettu 20.6.2013. <http://ilmatieteenlaitos.fi/maan-magneettikentta>
- 5 Macaulay, D. 2005. Uusi kuinka kaikki toimii. 2. painos. Helsinki: Otava
- 6 Magneettiset navat ja kentän hitaat muutokset. Luettu 21.6.2013. <http://ilmatieteenlaitos.fi/maan-magneettikentan-synty>
- 7 Mansfield, M & O'Sullivan. 1998. Understanding Physics. England: John Wiley & Sons Ltd
- 8 Nevanlinna, H. 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. Helsinki: Ilmatieteen laitos. Luettu 20.6.2013. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/1204/2009nro1.pdf>
- 9 Zero Gauss Chamber. Luettu 25.10.2013. <http://www.trifield.com/content/zero-gauss-chamber/>