

Aapeli Ruotsalainen

FRISBEEN LENNON MITTAAMINEN INERTIAMITTAUSYKSIKÖLLÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Tuomas Salomaa
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Aapeli Ruotsalainen: Frisbeen lennon mittaaminen inertiamittausyksiköllä
Measurement of frisbee flight with inertial measurement unit
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Joulukuu 2021

Frisbeen lennon mittaaminen tarjoaa mielenkiintoisen haasteen. Frisbeen kiihtyvyys heiton alkuvaiheessa ja pyörimisnopeus lennon aikana asettavat suuret vaatimukset mittauslaitteen suorituskyvyille. Frisbeen massa on pieni, joten mitään isoa anturia frisbeehen ei voi kiinnittää.

Inertiamittausyksikkö (IMU) on kiihtyvyyssanturista, gyroskoopista ja magnetometrillä rakennettu anturi, jolla voidaan mitata pyörimistä ja kiihtyvyyttä eri suunnissa. IMU:a käytetään esimerkiksi älypuhelimien asennon mittaamiseen. Suurempia IMU:ja käytetään esimerkiksi lentokoneiden navigoinnissa. Tässä työssä selvitetään mahdollisuutta mitata frisbeen pyörimisnopeus, nopeus ja lentorata frisbeehen kiinnitettävällä IMU:lla.

Työn teoriaosuudessa tutustutaan frisbeegolfin fysiikkaan ja erilaisiin antureihin. Tutkimusosuudessa mietitään työssä käytettävän anturin vaatimuksia ja lasketaan kiinnitetyn anturin vaikutusta frisbeen lentoon. Tutkimuksen aluksi valitaan vaatimukset parhaiten täyttävä anturi ja tutustutaan sen ominaisuuksiin. Anturi kiinnitetään frisbeehen, ja sillä mitataan frisbeen lentoa. Mittauksista saatavaa dataa tutkitaan ja siitä lasketaan frisbeen pyörimisnopeuksia eri nopeuksilla heitoilla.

Tutkimuksessa todettiin, että IMU soveltuu kokonsa ja painonsa puolesta kiinnitettäväksi frisbeehen, eikä se vaikuta huomattavasti frisbeen lentoon. Markkinoilla olevien gyroskooppien mittausalue ei riitä frisbeen pyörimisnopeuden mittaamiseen. Pyörimisnopeus saadaan kuitenkin laskettua kiihtyvyyssanturin datasta. Frisbeen nopeutta ja lentorataa ei saada laskettua, koska kiihtyvyyssanturin mittausalue ei riitä anturin mittaaman keskeiskiihtyvyyden vuoksi. Anturin keskeiskiihtyvyyttä saataisiin pienennettyä sijoittamalla anturi keskemmälle frisbeettä. Tällöin kiihtyvyydet saataisiin mitattua, ja frisbeen nopeuden ja lentoradan laskeminen olisi mahdollista.

Työssä ei löydetty syytä, miksi inertiamittausyksiköllä ei voisi mitata frisbeen lentoa. Frisbeen lentoradan laskeminen voisi onnistua työssä rakennettua anturointia hieman kehittämällä. Työssä todettiin myös, että frisbeen nopeus ja pyörimisnopeus voitaisiin mitata myös pelkällä kiihtyvyyssanturilla. Työn tuloksia voidaan hyödyntää muidenkin nopeasti pyörivien kappaleiden mittaamisessa.

Avainsanat: inertiamittausyksikkö, IMU, MEMS, frisbee, frisbeegolf, pyörimisnopeus, lennon mittaaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TYÖN TEORIAA	3
2.1 Frisbeen lentäminen.....	3
2.1.1 Nopeus	3
2.1.2 Pyöriminen.....	3
2.1.3 Hitausmomentti	4
2.2 Oikean käden rystyheitto.....	5
2.3 Erilaiset frisbeet	7
2.4 Frisbeen lennon mittaaminen	8
2.5 Mikrosysteemit	9
2.5.1 Kiihtyvyyssanturi.....	9
2.5.2 Gyroskooppi.....	10
2.5.3 Magnetometri.....	12
2.6 Inertiamittausyksikkö.....	13
3. MITTAUSDATAN KERÄÄMINEN.....	15
3.1 Käytettävä frisbee	15
3.2 Anturin vaatimukset.....	15
3.3 Valittu anturi.....	16
3.4 Anturin kiinnittäminen.....	18
3.5 Mittausjärjestelyt	21
3.5.1 Mittausvälineet.....	21
3.5.2 Mittaukset	21
4. MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU	23
4.1 Data	23
4.2 Tutkimuksen tulokset	28
4.2.1 Kiihtyvyys, nopeus ja lentorata.....	28
4.2.2 Pyörimisnopeus	29
4.3 Tulosten analyysi	32
4.4 Tulosten luotettavuuden arviointi.....	33
5. YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET	36

LIITE A: Kuvaajien piirtämiseen käytetty koodi

LYHENTEET JA MERKINNÄT

IMU	Inertiamittausyksikkö (Inertial Measurement Unit)
MEMS	Puolijohteesta valmistettu mikrosysteemi (Micro Electro Mechanical Systems)
RTC	Anturissa oleva kello (Real Time Clock)
(mm:ss.ss)	Minuutit, sekunnit ja sekunnin sadasosat
J	Hitausmomentti
m	Massa
r	Pyörimissäde
C	Kapasitanssi
F_c	Coriolisvoima
v	Nopeus
ω	Kulmanopeus
B	Magneettikenttä
Δv	Nopeuden muutos
Δt	Ajan muutos
a	Kiihtyvyys
T	Tesla
g	Putoamiskiihtyvyys
mAh	Milliampeeritunti
mg	Putoamiskiihtyvyyden tuhannesosa

1. JOHDANTO

Frisbeegolf on kasvava ja monille tuttu laji. Sitä voi harrastella kavereiden kanssa tai pelata hieman totisemmin viikkokisoissa, joita useat frisbeegolfseurat järjestävät. Maailman parhaat frisbeegolfaajat voivat ottaa toisistaan mittaa maailmanmestaruuskisoissa. Jotkut frisbeegolfaajat ovat voineet mitata heittonsa lähtönopeuden, mutta harva tietää kuinka suurella pyörimisnopeudella heitto lähtee.

Frisbeen nopeuden mittaamiseen tarvitaan käytännössä mittauspaiikka ja urheilututka. Pyörimisnopeuden mittaaminen taas vaatii monimutkaisia mittausjärjestelyitä ja on harrastajalle käytännössä lähes mahdotonta.

Tiedetään, että frisbeen lähtönopeus vaikuttaa huomattavasti heiton lentorataan [1, s. 24], kun taas pyörimisnopeuden vaikutuksesta lentorataan tiedetään vain vähän. Pyörimisnopeuden vaikutusta ei ole juuri tutkittu, vaikka sillä on mahdollisesti suuri vaikutus frisbeen lentoon [2, s. 21]. Tutkimuksen vähyyteen osasyynä lienee pyörimisnopeuden mittaamisen hankaluus.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, että voidaanko frisbeen lennon mittaamiseen käyttää frisbeehen kiinnitettävää *inertiamittausyksikköä* (Inertial Measurement Unit, IMU). IMU on puolijohdeesta valmistetuista gyroskoopista, kiihtyvyyssanturista ja magnetometrillä koottu anturi, jolla voidaan mitata pyörimisliikettä ja kiihtyvyyttä eri suunnissa.

Työssä perehdytään frisbeen fysiikkaan, puolijohdeteknologialla valmistettuihin antureihin ja valittuun inertiamittausyksikköön. Tässä työssä frisbeen alle kiinnitetään IMU, jonka jälkeen frisbeetä heitetään ja tutkitaan IMU:n tallentamaa dataa. Työn tavoitteena on selvittää, onko frisbeehen kiinnitettävällä anturilla mahdollista mitata frisbeen pyörimisnopeus, nopeus ja lentorata.

Työssä rakennettava kokonaisuus voisi kehittää edelleen siten, että heitosta tallennettu data saataisiin lähes välittömästi luettavassa muodossa puhelimeen. Tällaiselle sovellukselle olisi paljon kysyntää lajin harrastajien piirissä. Tällä hetkellä markkinoilla ei ole frisbeegolfkiekkoon kiinnitettävää anturia, jolla voitaisiin mitata frisbeen lentoa.

Menetelminä työssä käytetään tiedonhakua ja käytännön tutkimusta. Työn aluksi etsitään aiempia tutkimuksia, teoriaa frisbeen lentämisestä sekä tietoa erilaisista antureista ja niiden suorituskyvystä. Kun työn taustalla oleva teoria on selvitetty, valitaan tarkoitukseen soveltuvin anturi. Anturin kiinnitys frisbeehen suunnitellaan ja toteutetaan.

Anturoidulla frisbeellä heitetään heittoja, joista saatua dataa tutkitaan MatLabilla. Työn lopussa arvioidaan IMU:n soveltuvuutta frisbeen lennon mittaamiseen.

Työ rajataan yhden valmistajan inertiamittausyksikön testaamiseen. Työssä ei perehdytä laskennallisiin menetelmiin, joilla kiihtyvyyssanturin ja gyroskoopin mittausdatasta saataisiin laskettua reitti.

Työn luvuissa 2.1–2.3 tutustutaan frisbeen lentämisen teoriaan, frisbeegolfheittoihin ja frisbeiden ominaisuuksiin. Luvuissa 2.4–2.6 käsitellään erilaisia tapoja mitata frisbeen lentoa ja puolijohdeteknologialla valmistettuja kiihtyvyyssantureita, gyroskooppeja ja magnetometrejä, jotka ovat IMU:n perusosia. Luvuissa 3.1 ja 3.2 esitellään työssä käytettävä frisbee ja pohditaan vaatimuksia, jotka anturin tulee täyttää. Luvussa 3.3 esitellään vaatimusten perusteella valittu anturi. Luvussa 3.4 kerrotaan anturin kiinnittämisestä ja arvioidaan anturin vaikutusta frisbeen lentoon. Luvussa 3.5 kuvataan mittausjärjestelyjä. Mittauksista saatua dataa tarkastellaan luvussa 4, jonka lopuksi lasketaan frisbeen pyörimisnopeuksia ja arvioidaan tulosten luotettavuutta. Luvussa 5 esitetään yhteenveto tutkimuksen tuloksista.

2. TYÖN TEORIAA

2.1 Frisbeen lentäminen

Luku 2.1 käsittelee frisbeen lentämiseen liittyvää teoriaa. Luku 2.1.1 käsittelee frisbeen nopeutta, joka vaikuttaa paljon frisbeen lentorataan. Luku 2.1.2 käsittelee frisbeen pyörimisnopeutta ja luvussa 2.1.3 käsitellään hitausmomentin kaavoja, joita tarvitaan myöhemmin työssä.

2.1.1 Nopeus

Frisbeen nopeutena ajatellaan yleensä frisbeen maanopeutta, mutta frisbeen lentoon vaikuttaa enemmän frisbeen ilmanopeus. Ilmanopeus tarkoittaa frisbeen ohi virtaavan ilman nopeutta [2, s. 20].

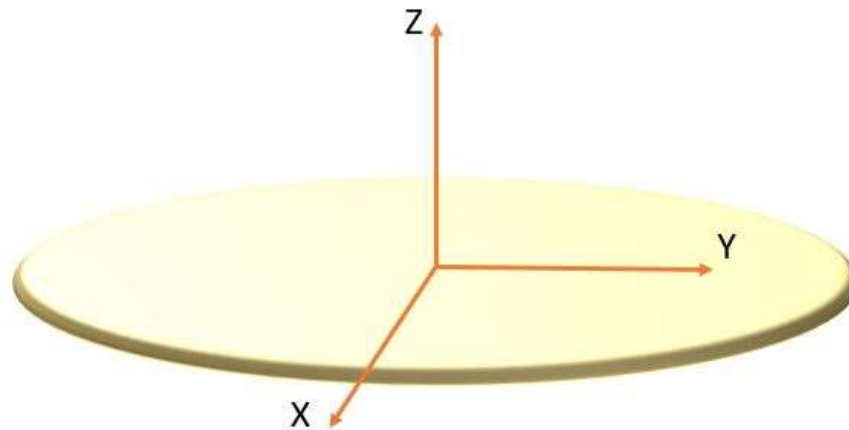
Myötätuuleen heitettäessä frisbeen ilmanopeus on hitaampi kuin vastatuuleen heitettäessä, mikäli maanopeus on sama kummassakin tilanteessa. Ilmanvastus kuitenkin vaikuttaa frisbeehen, joten vastatuuleen heitettäessä tarvitaan suurempi lähtönopeus, jotta saavutetaan sama maanopeus kuin myötätuuleen heitettäessä [2, s. 27].

Frisbeen ohi virtaava ilma aiheuttaa frisbeehen nostevoiman. Nostevoiman suuruus voidaan laskea Bernoullin yhtälöllä. [2, s. 6] Frisbeen saamaan nosteen suuruuteen vaikuttaa myös frisbeen kohtauskulma [2, s. 9].

Frisbeen nopeus vaikuttaa frisbeen lentorataan huomattavasti. Kaikki frisbeet kaartavat oikean käden rystyheitolla vasemmalle, mikäli heitto on tarpeeksi hidas ja korkea. Jos heiton nopeutta kasvatetaan frisbeen kriittistä nopeutta suuremmaksi, frisbee alkaa kaartamaan oikealle lennon alkuvaiheessa. Vauhdin hidastuessa frisbee alkaa kaartamaan taas vasemmalle. [1, s. 24]

2.1.2 Pyöriminen

Frisbeen tasaisen lentämisen mahdollistaa suuri pyörimisnopeus z-akselin (kuva 1) ympäri, jolloin frisbee toimii gyroskooppina ja lento on tasaista. Pyörimisestä aiheutuu myös painekeskapisteen siirtyminen lennon aikana takaa eteen, mikä voi aiheuttaa frisbeen s-kirjaimen muotoisen lentoradan [3, s. 30].



Kuva 1. Työssä käytettävät frisbeen akselit.

Frisbeen pyörimisnopeuden mittaamiseen ei ole helppoa tapaa. Juhwan et al. [4, s. 1] ovat mitanneet frisbeen pyörimisnopeutta frisbeehen kiinnitettyllä magnetometrillä. Immonen [2, s. 32] on mitannut frisbeen pyörimisnopeuksia pro gradussaan seuraamalla frisbeehen kiinnitetyn ledin asemaa hidastetusta videosta.

2.1.3 Hitausmomentti

Hyvä esimerkki hitausmomentin merkityksestä on taitoluistelija, joka pyörii ensin hitaasti kädet ojennettuina. Kun taitoluistelija siirtää kädet lähelle kehoaan, pyörimisnopeus kasvaa. Ilmiö on seuraus hitausmomentin muuttumisesta. Kappale, jolla on suurempi hitausmomentti, vaatii suuremman voiman pyörimisliikkeen muuttamiseksi. [5, s. 67]

Pistemäisen kappaleen hitausmomentti saadaan kaavalla

$$J = mr^2, \quad (1)$$

missä J on hitausmomentti, m on kappaleen massa ja r on massan etäisyys pyörimisakselista. Kun taitoluistelija siirtää kädet lähelleen, massa ei muutu, mutta massan etäisyys pyörimisakselista muuttuu. Tällöin kaavan (1) mukaan luistelijan hitausmomentti pienenee, mikä aiheuttaa pyörimisnopeuden kasvamisen. [5, s. 68]

Monimutkaisemmille kappaleille hitausmomentti saadaan laskettua summaamalla kappaleen pisteiden hitausmomentit yhteen. Integroimalla pistemäisen kappaleen hitausmomenttia saadaan johdettua kaavat monimutkaisemmille kappaleille. [5, s. 162] Erilaisten kappaleiden hitausmomenttien kaavoja löytyy MAOL-taulukosta [6].

Frisbeen pyörimiseen vaikuttaa frisbeen hitausmomentti z-akselin (kuva 1) ympäri. Frisbee voidaan ajatella reunan ja kannen yhdistelmänä [2, s. 28]. Reunaosa on

paksuseinäinen rengas, ja kansi on ohut lieriö. MAOL-taulukoiden [6] mukaan lieriön hitausmomentti saadaan kaavalla

$$J = \frac{1}{2}mr^2. \quad (2)$$

Kaavassa J on hitausmomentti, m on massa ja r on massan etäisyys massakeskipisteestä. Reunan hitausmomenttia voidaan approksimoida paksuseinäisen lieriön hitausmomentin kaavalla

$$J = \frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2), \quad (3)$$

missä r_1 ja r_2 ovat lieriön sisä- ja ulkohalkaisijat. [6, s. 126–127]

Kannen ja reunan hitausmomentit voidaan yhdistää käyttämällä Steinerin sääntöä

$$J_A = J_P + mr^2. \quad (4)$$

Steinerin säännössä J_A on hitausmomentti halutun akselin ympäri, J_P on kappaleen hitausmomentti, m on kappaleen massa ja r on kappaleen massakeskipisteen etäisyys halutusta akselistä. [5, s. 164][6, s. 127]

Koska kannen ja reunan massakeskipiste on pyörimisakselilla, saadaan koko frisbeen hitausmomentin kaavaksi

$$J = \frac{1}{2}m_k r_k^2 + \frac{1}{2}m_r(r_1^2 + r_2^2), \quad (5)$$

missä alaindeksi k tarkoittaa frisbeen kantta ja alaindeksi r tarkoittaa frisbeen reunaa. Kaavasta (5) nähdään, että eniten hitausmomenttiin vaikuttaa massan etäisyys pyörimisakselista.

Frisbeen massa on keskittynyt reunoille, mikä kasvattaa frisbeen hitausmomenttia verrattuna samanmassaiseen tasapaksuun lieriöön. Suurempi hitausmomentti saa frisbeen säilyttämään pyörimisnopeuden ja kallistuskulman pidempään lennon aikana. Hitausmomenttia muuttamalla voidaan valmistaa eri tavalla käyttäytyviä frisbeitä. [2, s. 25]

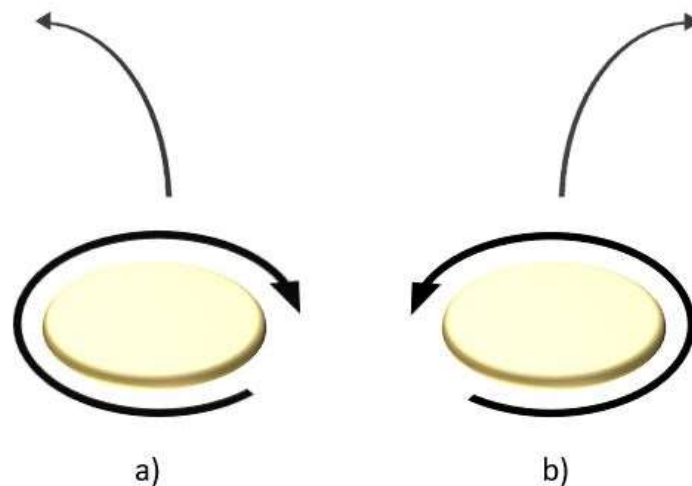
2.2 Oikean käden rystyheitto

Frisbeegolfissa on useita erilaisia tekniikoita heittää frisbeetä. Jokaisella tekniikalla on omat ominaispiirteensä, joita taitava heittäjä voi hyödyntää radalla. Tässä luvussa kerrotaan kahdesta tavallisimmasta tekniikasta, joissa frisbeetä heitetään vaakatasossa.

Ehkä tyypillisin heitto on rystyheitto, jossa frisbeestä pidetään kiinni niin, että rystyset osoittavat heittosuuntaan, peukalo on frisbeen päällä ja sormet pitävät kiinni frisbeen reunuksesta. Oikealla kädellä heitetty rystyheitto kaartaa vasemmalle heiton loppuvaiheessa. [1, s. 24][3, s. 1]

Kuvassa 2 on havainnollistettu frisbeen käyttäytymistä erilaisilla heitoilla. Oikean käden rystyheitto käyttäytyy yleensä kuvan a) mukaisesti, eli frisbee pyörii myötäpäivään ja lentorata kaartaa lopussa vasemmalle. Lentorata voi kuitenkin vaikuttaa valitsemalla alivakaan frisbeen tai kallistamalla frisbeettä oikealle (anhyzer-heitto). [1, s. 24–27]

Toinen usein käytetty heitto on kämmenheitto, missä frisbeestä pidetään kiinni etu- ja keskisormella. Kämmenheitto heitetään kämmen heittosuuntaan, jolloin rystyset osoittavat taaksepäin. Kämmenheitossa frisbeen pyörimissuunta on päinvastainen kuin rystyheitossa. Oikean käden kämmenheitossa frisbee käyttäytyy kuten kuvassa 2 b). [1, s. 24]



Kuva 2. a) Frisbeen pyörimissuunta ja lentoradan suunta oikean käden rystyheitolla tai vasemman käden kämmenheitolla b) Frisbeen pyörimissuunta ja lentoradan suunta oikean käden kämmenheitolla tai vasemman käden rystyheitolla, muokattu lähteestä [1, s. 24].

Vasemmalla kädellä heitettäessä frisbee käyttäytyy päinvastoin kuin oikean käden heitoissa. Vasemman käden rystyheitto käyttäytyy kuvan 2 b) mukaisesti ja vasemman käden kämmenheitto käyttäytyy kuvan 2 a) mukaisesti. [1, s. 24]

Rystyheitto heitetään vetämällä frisbee nopeasti suoraa linjaa pitkin rintakehän edestä. Frisbee vapautetaan käden suoristuessa, jolloin frisbee saa pyörimisnopeutensa. Lisää voimaa heittoon saa kiertämällä vartaloa. [7]

Edellä esiteltyjä heittoja ja lentoratoja voidaan muuttaa kallistamalla frisbeetä. Myös frisbeen ominaisuuksilla ja lähtönopeudella on vaikutusta frisbeen lentorataan [1, s. 24] [8, s. 20]. On olemassa myös monia muita tapoja heittää frisbeetä, mutta niihin perehtyminen ei ole tarpeellista tämän työn kannalta.

2.3 Erilaiset frisbeet

Frisbeiden vertailua varten frisbeiden valmistajilla on erilaisia tapoja kuvailla frisbeen lento-ominaisuuksia. Useimpien valmistajien käyttämä tapa kuvata frisbeen lentoa on neljän numeron järjestelmä, jossa frisbeelle annetaan neljä lento-ominaisuuksia kuvaavaa lukua, eli lentonumerot. Tavallisesti lentonumerot ovat ilmoitettu frisbeen kannessa järjestyksessä nopeus, liito, vakaus ja loppufeidi. Ilmoitettuja lukuja voidaan pitää vain suuntaa antavina, koska frisbeevalmistajat eivät ole kertoneet, miten luvut määräytyvät. [1, s. 40]

Nopeuden vaihteluväli on 1–15 [1, s. 40][9][10]. Nopeuden arvo määräytyy frisbeen reunan muodon mukaan siten, että suurempi luku tarkoittaa terävämpää ja leveämpää reunaan, jolloin ilmanvastus on pienempi [10]. Mitä suurempi nopeuden arvo on, sitä pidemmille heitoille frisbee on suunniteltu [11]. Mikäli nopeaa frisbeetä heitetään hitaasti, frisbee käyttäytyy eri tavalla kuin on suunniteltu. Suuremman nopeuden omaava frisbee vaatii suuremman lähtönopeuden, jotta frisbee lentää suunnitellusti [1, s. 40][12].

Liidon vaihteluväli on 1–7. Suurempi liitonumero tarkoittaa voimakkaampaa nostetta. Nosteen avulla frisbee pysyy ilmassa pidempään ja lentää pidemmälle. [12]

Vakaus vaihtelee välillä -5–1 [1, s. 40][9][12]. Jos vakauden arvo on negatiivinen, sanotaan, että frisbee on alivakaa. Jos vakaus on 0 tai positiivinen sanotaan frisbeetä vakaaksi. Vakaus kuvaa frisbeen lennon alkuvaiheen käyttäytymistä. Oikean käden rystyheitolla alivakaa frisbee kääntyy enemmän oikealle kuin vakaa frisbee. [11]

Loppufeidi vaihtelee välillä 0–5 [1, s. 40–41][10][12]. Loppufeidin suuruus kertoo frisbeen käyttäytymisestä heiton loppuvaiheessa. Frisbee pyrkii oikean käden rystyheitolla kaartamaan heiton lopussa vasemmalle. Loppufeidi kuvaa lopun kaarroksen jyrkkyyttä siten, että loppufeidin arvo 0 tarkoittaa lähes suoraa laskeutumista ja 5 tarkoittaa voimakasta kaarrosta ennen vauhdin loppumista. [12]

2.4 Frisbeen lennon mittaaminen

Frisbeegolfheittojen nopeuksien vertailemiseen soveltuva vaihtoehto on muissakin urheilulajeissa käytetty doppler-tutka. Tutkan etuja ovat tuloksen luotettavuus ja tarkkuus. Maailman nopein virallinen heitto on Simon Lizotten heittämä 144 km/h, joka on mitattu doppler-tutkalla [13]. Tutkan heikkous on kiinteä tai hankalasti liikuteltava mittauspaiikka.

Älypuhelimien GPS-paikannusta voidaan hyödyntää heiton pituuden arvioinnissa. Ennen heittoa merkitään heittopaikka, jonka jälkeen heitetään frisbeetä ja lopuksi frisbeen loppusijainti merkitään kävelemällä älypuhelimien kanssa frisbeen luokse. Heittopaikan ja frisbeen laskeutumispaiikan sijainteja vertaamalla voidaan arvioida heiton pituutta. Ainakin UDisk sovellus tarjoaa käyttäjälleen mahdollisuuden mitata heittojen pituuksia puhelimen GPS-paikannuksen avulla [14].

Heitolle voidaan laskea myös keskinopeus, mikäli mitataan frisbeen lentoaika, ja jaetaan frisbeen kulkema matka matkaan kuluneella ajalla. Tällä tavalla laskettu keskinopeus ei ota huomioon frisbeen yleensä kaarevaa lentorataa, joka pidentää frisbeen kulkemaa matkaa. Tästä seuraa, että laskettu keskinopeus on todellista suurempi. Myös puhelimen GPS-paikannuksen virhe voi olla enemmän kuin 10 m [15], mikä on paljon, kun puhutaan noin 100 m heitoista.

Heiton pituuksia voitaisiin mitata myös mittanauhalla, laser-etäisyysmittarilla tai mittapyörällä. Nämä ovat GPS-paikannusta tarkempia, mutta eivät myöskään ota huomioon frisbeen kaarevan lentoradan koko pituutta ja ovat käytännössä hankalia toteuttaa.

Frisbeen lentoradan arvioimiseen voidaan käyttää videokameraa, jolla saadaan myös frisbeen lentoaika selville. Lentoajasta ja mitatusta matkasta voidaan laskea arvio nopeudelle.

Markkinoilla ei ole vielä frisbeen pyörimisnopeuden mittaamiseen soveltuvaa anturia. Yritys nimeltä TOSY kerää kickstarter.com -sivustolla rahoitusta kiihtyvyyssanturilla, gyroskoopilla ja magnetometrillä varustetun frisbeen valmistamista varten. TOSY:n frisbee mittaa frisbeen lentoa ja lähettää heiton jälkeen puhelimeen dataa lennosta, mukaan lukien pyörimisnopeuden. [16]. Juhwan et al. [4] ovat tutkimuksessaan onnistuneesti mitanneet frisbeen pyörimisnopeuksia magnetometrillä.

2.5 Mikrosysteemit

Kiinnittämättömällä jäykällä kappaleella on kuusi vapausastetta, joista kolme on translationaalista ja kolme on rotationaalista. Kappale voi pyöriä ja liikkua vapausasteidensa suunnassa [5, s. 61]. Translaatiota, eli pyörimätöntä liikettä voidaan mitata kiihtyvyyssanturilla. Rotaatiota, eli pyörimisliikettä voidaan mitata gyroskoopilla. [17, s. 307, s. 325] Lisäksi kappaleen liikettä kolmiulotteisessa koordinaatistossa voidaan mitata magnetometrillä, joka mittaa magneettikentän voimakkuutta. Magnetometrillä voidaan mitata kappaleen asento. [18, s. 67]

2020-luvulla pienimmissäkin laitteissa on antureita, joilla pystytään mittaamaan laitteen asentoa. Puolijohdeteknologia mahdollistaa tarpeeksi pienet anturit. Puolijohdeteknologialla voidaan rakentaa millimetrikokoluokan laitteita, mukaan lukien erilaisia antureita. [17, s. 1] Näitä puolijohteesta valmistettuja laitteita kutsutaan mikrosysteemeiksi (MEMS, Micro Electro Mechanic Systems).

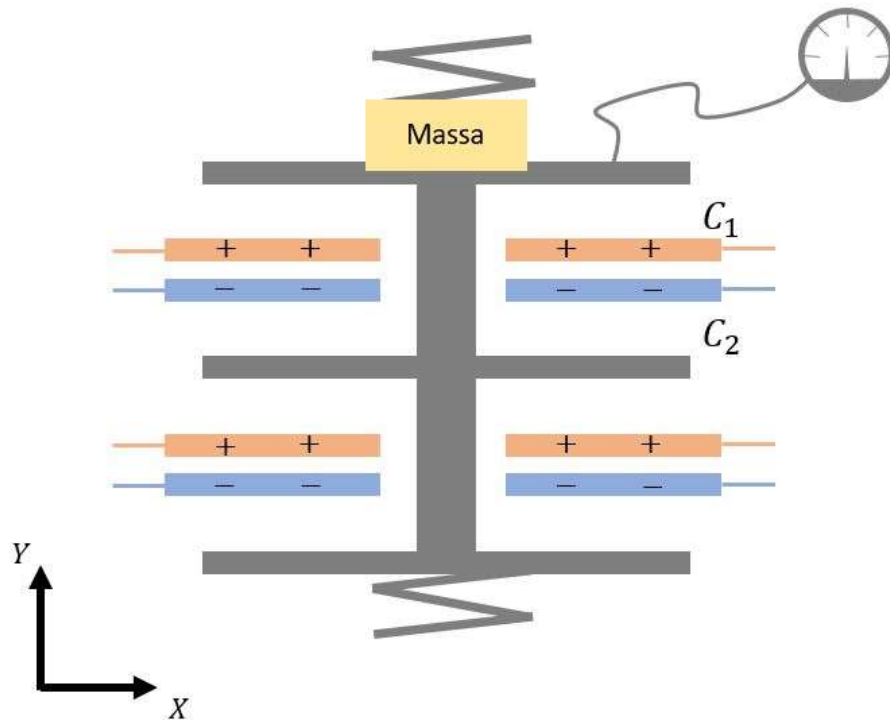
S. Cetinkunt määrittelee kirjassaan [19] mikrosysteemit pii-levystä rakennetuksi systeemiksi, jossa yhdistyy laskentaa sekä mekaanisia ja sähköisiä toimintoja. S. Cetinkuntin mukaan mikrosysteemistä on vaikea erottaa yksittäisiä komponentteja. [19, s. 15]

Seuraavissa kolmessa luvussa on kerrottu tarkemmin kiihtyvyyssanturin, gyroskoopin ja magnetometrin toiminnasta. Luvussa 2.6 kerrotaan inertiamittausyksiköstä, joka koostuu seuraavaksi esiteltävistä komponenteista.

2.5.1 Kiihtyvyyssanturi

Kiihtyvyyssanturi mittaa kappaleen kiihtyvyyttä ja hidastuvuutta yhden akselin suunnassa. Asettamalla kolme kiihtyvyyssanturia kohtisuoraan toisiaan vastaan voidaan mitata kappaleen kiihtyvyys kaikkiin suuntiin. [17, s. 307]

Perehdytään tarkemmin mikrosysteemeihin kuuluvaan kapasitiiviseen kiihtyvyyssanturiin, jonka yksi mahdollinen toimintaperiaate on esitelty kuvassa 3. Jonesin ja Nenadin [17] mukaan kiihtyvyyssanturin sisällä on jousella keskitetty massa (proof mass) ja kondensaattori, jonka kapasitanssi riippuu massan etäisyydestä. Kun kappale on kiihtyvässä liikkeessä, kiihtyvyyssanturin sisällä oleva massa vastustaa nopeuden muutosta. Massan sijainti muuttuu suhteessa anturin ulkokuoreen, jolloin kondensaattoreiden kapasitanssi muuttuu. Kiihtyvyyden loppuessa jousi palauttaa massan tasapainoasemaan. Kapasitanssin muutosta mittaamalla voidaan mitata kappaleen kiihtyvyyttä. [17, s. 309–310]



Kuva 3. Mikromekaanisen kiihtyvyyssanturin yksinkertaistettu rakenne. C_1 ja C_2 ovat kapasitansseja, muokattu lähteestä [17, s. 313].

Kuvan 3 kiihtyvyyssanturin ollessa tasapainoasemassa, anturin kapasitanssit C_1 ja C_2 ovat yhtä suuret. Kun anturilla on kiihtyvyyttä y -akselin suuntaan, keskimääräinen elektrodi siirtyy kiihtyvyyden ja massan hitauden vuoksi lähemmäksi negatiivista elektrodia. Tästä seuraa, että kapasitanssi C_2 pienenee ja C_1 kasvaa. Jos kiihtyvyys on vastakkaiseen suuntaan, kapasitanssi C_1 pienenee ja vastaavasti kapasitanssi C_2 kasvaa. [17, s. 312]

Rakenteensa vuoksi kiihtyvyyssanturit mittaavat putoamiskiihtyvyyttä. Esimerkiksi jos kiihtyvyyssanturin y -akseli osoittaa maan keskipisteestä poispäin, kiihtyvyyssanturi mittaa 1 g :n suuruisen kiihtyvyyden y -akselin suuntaan. [20, s. 22]

Teoriassa kappaleen kiihtyvyyksistä voidaan laskea integroimalla kappaleen nopeus eri ajanhetkillä. Jos kiihtyvyyttä integroidaan kahdesti, saadaan kappaleen asema eri ajanhetkinä.

2.5.2 Gyroskooppi

Gyroskoopilla mitataan kappaleen kulmanopeutta tietyn akselin ympäri [18, s. 1]. Gyroskoopit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan toimintaperiaatteen mukaisesti: pyöriviin, optisiin ja väräheteleviin gyroskooppeihin. Pyörivämassaisissa gyroskoopeissa

on massa, joka pyörii suurella nopeudella yhden akselin ympäri. Optiset gyroskoopit perustuvat sagnac-ilmiöön, jossa pyörimisliike aiheuttaa vaihe-eron vastakkaisiin suuntiin etenevässä valonsäteissä. Värähtelyyn perustuvat gyroskoopit mittaavat coriolis-ilmiöstä aiheutuvia voimia. [21, s. 1–2]

Puolijohdeteknologialla valmistetut värähtelyyn perustuvat MEMS-gyroskoopit ovat pienen koon ja virrankulutuksensa ansiosta käyttökelpoisia useissa sovelluksissa, esimerkiksi älypuhelimissa [21, s. 83]. MEMS-gyroskoopin sisällä on runko, joka värähtelee tasaisella taajuudella yhden akselin suunnassa. Kun MEMS-gyroskooppi on pyörimisliikkeessä, coriolis-ilmiö aiheuttaa rungon sisällä olevaan elektrodiin värähtelyliikkeelle kohtisuoran coriolisvoiman. Coriolisvoima saa elektrodin siirtymään värähtelyn mukaan lähemmäksi ja kauemmaksi toisesta kiinteästä elektrodista. Näiden elektrodien välistä kapasitanssia mittaamalla voidaan laskea anturin kulmanopeus. [21, s. 83]

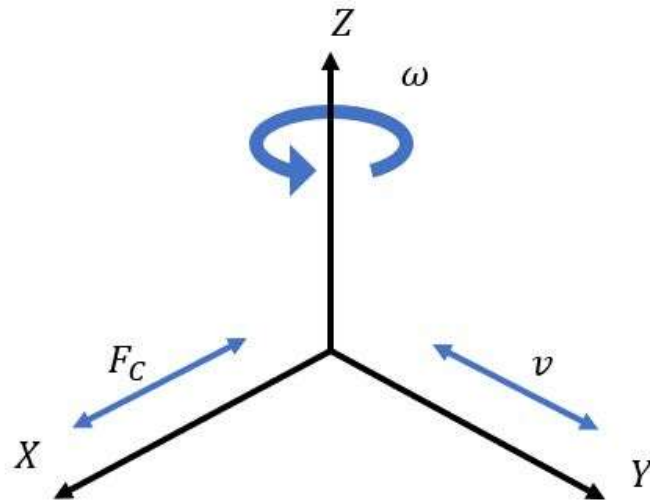
Anturiin vaikuttava coriolisvoima saadaan laskettua kaavalla

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega}). \quad (6)$$

Kaavassa \vec{F}_C on coriolisvoima, m on värähtelevä massa, \vec{v} on massan nopeus ja $\vec{\omega}$ on anturin kulmanopeus. Kaavasta (6) voidaan ratkaista ja laskea kulmanopeus $\vec{\omega}$. Coriolisvoiman aiheuttaman liikkeen suuruutta voidaan mitata esimerkiksi kapasitanssilla (samantapaisesti kuin kiihtyvyyssanturissa). Kun coriolisvoiman suuruus tunnetaan, voidaan laskea anturin kulmanopeus $\vec{\omega}$. [21, s. 13] Coriolisvoiman muodostuminen värähtelyyn perustuvassa gyroskoopissa on havainnollistettu kuvassa 4.

Värähtelyyn perustuvassa gyroskoopissa värähtelijä värähtelee tasaisella taajuudella y-akselin suunnassa (Kuva 4). Mikäli anturi ei ole pyörivässä liikkeessä z-akselin ympäri, coriolisvoimaa ei synny. Kun anturi pyörii z-akselin ympäri, syntyy coriolisvoima, joka on kohtisuoraan värähtelijän nopeutta ja pyörimisakselia vastaan. Kun värähtelijän liikkeen suunta vaihtuu, myös coriolisvoiman suunta vaihtuu. Anturin asento voidaan laskea integroimalla kulmanopeutta ajan suhteen.

Coriolisvoimaa ei synny, mikäli anturi pyörii jonkin muun akselin ympäri. Eli yhdellä MEMS-gyroskoopilla voidaan mitata kulmanopeutta vain yhden akselin ympäri. Kappaleen kaikkien kolmen pyörimissuunnan mittaamiseen tarvitaan kolme gyroskooppia.



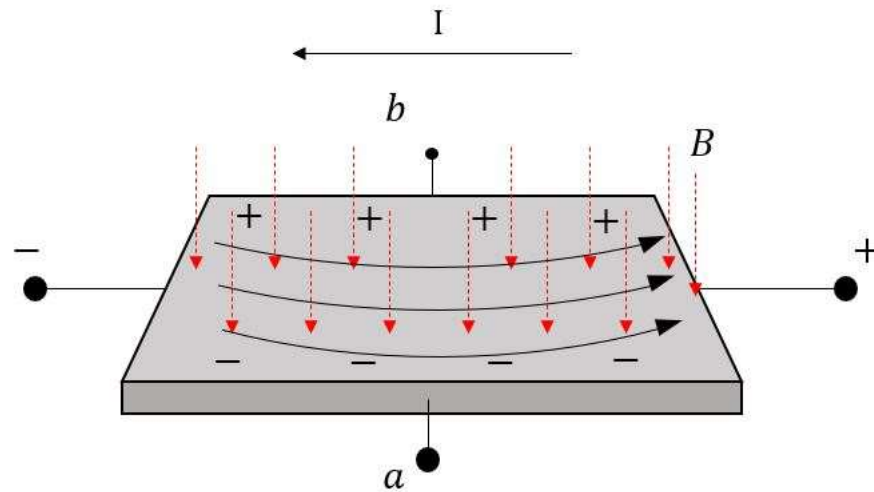
Kuva 4. Coriolisvoima värähtelyyn perustuvassa kiihtyvyyssanturissa, perustuu lähteeseen [21, s. 13].

Gyroskooppi yksinään ei sovellu asennon mittaamiseen pitkäkestoisessa mittauksessa, koska gyroskoopin systemaattinen virhe aiheuttaa pitkässä mittausjaksossa suuren virheen integroimalla laskettavaan asentoon. Gyroskooppia ei voi myöskään kalibroida mittausjakson aikana. [18, s. 1–2][22, s. 2]

2.5.3 Magnetometri

Magnetometrien toiminta voi perustua yli 18 erilaiseen fysikaaliseen ilmiöön [23]. Magnetometrit voidaan jakaa skalaarimagnetometreihin (scalar magnetometer) ja vektorimagnetometreihin (vector magnetometer). Skalaarimagnetometri mittaa vain magneettikentän voimakkuutta, kun taas vektorimagnetometri mittaa magneettikentän voimakkuutta eri suunnissa. [24, s. 3]

Tässä työssä käytettävän magnetometrin toiminta perustuu Hall-ilmiöön (Hall-effect) [20, s. 22]. Hall-ilmiö on esitetty kuvassa 3. Hall-ilmiössä ohuen sähköä johtavan levyn läpi ohjataan sähkövirta. Kun levy on magneettikentässä, elektronit siirtyvät virran ja magneettikentän ristituloa vastaan, eli positiivinen varaus siirtyy ristitulon suuntaan. Tämän seurauksena levyn laitojen välille muodostuu jännite-ero, jota mittaamalla voidaan mitata magneettikentän voimakkuutta. [25, s. 1] Jos magnetometrissä on useampia levyjä asetettuina osoittamaan eri suuntiin, magneettikentän voimakkuutta voidaan mitata näiden levyjen osoittamissa suunnissa.



Kuva 3. Hall-ilmiö johdelevyssä. Kuvassa sähkövirta on I ja magneettikenttä on B . Punaiset nuolet osoittavat magneettikentän suunnan. Mustat nuolet kuvaavat elektronien liikettä. Levyssä oleva jännite mitataan pisteiden a ja b väliltä, muokattu lähteestä [25, s. 1].

2.6 Inertiamittausyksikkö

Asettamalla kolme kiihtyvyyssanturia ja kolme gyroskooppia mittaamaan kolmea toisiaan vastaan kohtisuoraa akselia, saadaan mitattua jäykän kappaleen liikettä kaikkien vapausasteiden suunnassa. Yhdistämällä siihen vielä prosessori ja tarpeelliset sähkökomponentit, saadaan inertiamittausyksikkö (IMU, Inertial Measurement Unit). [17, s. 346] IMU:un voidaan lisätä vielä magnetometri, jolloin saadaan kappaleen asennon mittaaminen vielä luotettavammaksi [18, s. 67].

Moniin käyttötarkoituksiin soveltuvia IMU:ja on olemassa monen kokoisina. Suurimmat IMU:t löytyvät lentokoneista ja sotilasilmailusta, joissa suuri tarkkuus ja pienet häiriöt ovat tärkeitä. Tarkkuutta vaativissa sovelluksissa IMU:ssa on ilmatiiviisti suljettu kotelo ja IMU kommunikoi tietokoneen kanssa kaapelia pitkin häiriöiden minimoimiseksi. Suurikokoisissa IMU:issa voi olla optinen gyroskooppi, joka on MEMS-gyroskooppia tarkempi, mutta suurikokoisempi. [22, s. 2]

Pienikokoisia IMU:ja, joiden komponentit ovat puolijohteesta valmistettuja mikrosysteemejä, käytetään älypuhelimissa ja muissa laitteissa, joissa asennon ja liikkeen tunnistamisesta on hyötyä. IMU:a voidaan käyttää hetkellisesti paikantamiseen

esimerkiksi sisätiloissa, missä ei ole GPS-signaalia saatavilla. IMU:ja käytetään esimerkiksi myös droneissa lennon vakauttamiseksi. [22, s. 1]

Lämpötilan vaihtelu vaikuttaa puolijohteesta valmistetun mikrosysteemin herkkyyteen ja voi aiheuttaa systemaattista virhettä. Hyvällä suunnittelulla voidaan vähentää lämpötilan vaikutusta. Mittaustuloksia voidaan korjata laskemalla, jos tunnetaan lämpötilan vaikutuksen keskimääräinen suuruus. Lämpötilan vaikutusta anturin herkkyyteen voidaan mitata prosentteina per asteen muutos ($\%/^{\circ}\text{C}$). Systemaattisen virheen muutosta voidaan mitata kiihtyvyyssanturilla yksikössä $\text{mg}/^{\circ}\text{C}$ ja gyroskoopilla yksikössä $\%/s/^{\circ}\text{C}$. [17, s. 325]

3. MITTAUSDATAN KERÄÄMINEN

3.1 Käytettävä frisbee

Työssä käytettäväksi frisbeeksi valittiin Discmanian valmistama Mentor, joka on melko tyypillinen distance-driver. Distance-driverit on suunniteltu avoimille väylille, ja ne tarvitsevat oikein lentäekseen suuremman lähtönopeuden kuin keskimääräinen frisbee. Mentorin lentorata on alivakaalet driverille tyypillisesti s-kirjaimen muotoinen.

Mentorin lentonumerot ovat 11, 5, -2, 2. Eli nopeus on 11 asteikolla 1–15, liito on 5 asteikolla 1–7, vakaus on -2 asteikolla -5–1 ja loppufeidi on 2 asteikolla 0–5. Numeroiden perusteella frisbee on tyypillinen alivakaa draiveri.

Valinnan perusteina oli hieman muita frisbeitä korkeampi reuna, joka peittää anturin kotelon. Frisbeen melko tavallinen lentorata oli myös kokeelle eduksi, jolloin tuloksia on helpompi vertailla.

3.2 Anturin vaatimukset

Frisbeen suuri pyörimisnopeus rajoittaa anturin valintaa. Nyquistin näytteistysteoreeman mukaan näytteistystaajuuden on oltava kaksi kertaa suurempi kuin suurin mitattava taajuus, jotta vältytään mittaussignaalin laskostumiselta [26, s. 123][27]. Toisen lähteen mukaan anturin kaistanleveyden on oltava dynaamisessa mittauksessa vähintään 10-kertainen suurimpaan mitattavaan taajuuteen verrattuna [19, s. 331].

Immosen tekemässä tutkimuksessa [2] suurimmat mitatut pyörimisnopeudet olivat keskimäärin 20,23 kierrosta sekunnissa keskihajonnan olleessa 1,24 [2, s. 35]. Juhwan et al. [4] mukaan frisbeen pyörimisnopeus on 12–20 kierrosta sekunnissa [4, s. 15]. Voidaan siis olettaa, että frisbeen pyörimisnopeus lennon aikana on noin 20 kierrosta sekunnissa.

Näin ollen anturin mittaustaajuuden tulisi olla yli 200 Hz. Immosen pro gradussa [2] eikä Juhwan et al. [4] tutkimuksessa ole arvioitu heittäjien tasoa, mikä voi vaikuttaa heittojen pyörimisnopeuteen huomattavasti. Anturin mittaustaajuuden on oltava vähintään 200 Hz.

Frisbeen pyörimisnopeutta voitaisiin mitata gyroskoopilla, mutta toistaiseksi markkinoilla olevien gyroskooppien mittausalueen suurin yläraja on 2000 °/s [28][29][30]. Frisbeen

pyörimisnopeudeksi oletettiin 20 kierrosta sekunnissa, mikä on asteiksi muutettuna 7200 %/s. Gyroskoopilla ei siis saada mitattua frisbeen pyörimisnopeutta.

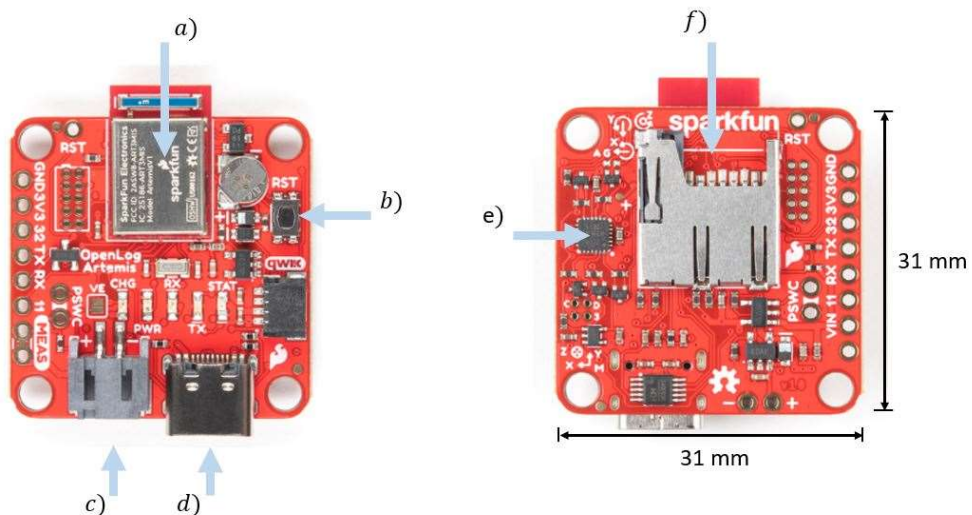
Frisbeen kiihtyvyys on heiton alkuvaiheessa kova, mutta kiihtyvyyden arvioimiseen ei löytynyt tarpeeksi tarkkaa keinoa. Immosen pro gradussa [2] mitatut heitonopeudet ovat 20–30 m/s [2, s. 35]. Jos kiihtyvyys on tasaista, voidaan kiihtyvyys laskea kaavasta

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a, \quad (7)$$

missä Δv on nopeuden muutos kiihdytyksen aikana, Δt on kiihdyttämiseen käytetty aika ja a on kiihtyvyys. Mutta todennäköisesti kiihtyvyys ei ole tasainen, ja kiihdytykseen käytetty aika on vaikea arvioida.

3.3 Valittu anturi

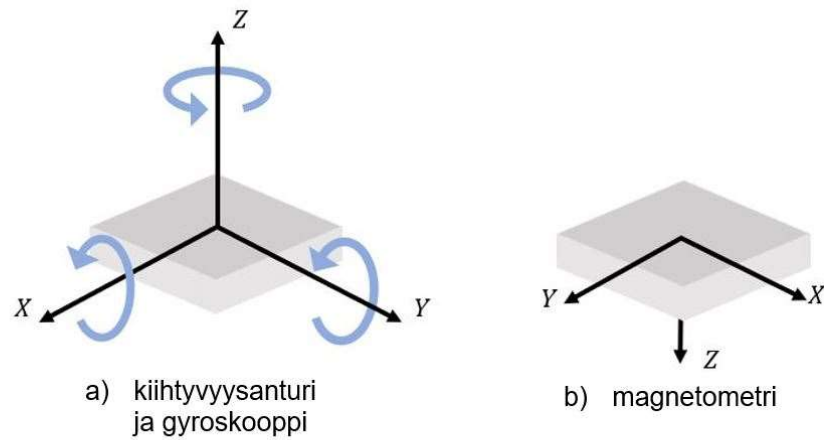
Työssä käytettäväksi anturiksi valittiin SparkFun:in valmistama OpenLog Artemis anturi. Työn kannalta anturin tarpeelliset komponentit on nimetty kuvassa 4. Anturi on isoimmilta mitoiltaan 35 mm x 31 mm x 9 mm, joten kokonsa puolesta se soveltuu tähän työhön hyvin.



Kuva 4. Anturin osat: a) Artemis-prosessori, b) reset-nappi, c) JST-liitin LiPo-akulle, d) USB-C -liitin, e) IMU ja f) microSD-kortin kiinnitys. Mukailten [31].

Anturissa on TDK:n valmistama inertiamittausyksikkö, jossa on kiihtyvyyssanturi, gyroskooppi ja magnetometri. Kaikilla näillä on kolme akselia, joiden suunnissa IMU kerää tietoa. Yhteensä anturi tallentaa dataa yhdeksän eri akselin suunnassa. [20] IMU:n akselit ja positiiviset mittaussuunnat on esitelty kuvassa 5. Kuvan 5 mukaisesti

kiihtyvyyssanturilla ja gyroskoopilla on yhteiset akselit, mutta magnetometrin koordinaatisto on eri asennossa.



Kuva 5. IMU on molemmissa kuvissa samassa asennossa. Nuolet osoittavat positiiviseen mittaussuuntaan, muokattu lähteestä [20, s. 83].

Anturissa on Real Time Clock (RTC), eli kello, jonka avulla kaikki mittauspisteet saadaan aikaleimattua sekunnin sadasosan tarkkuudella. IMU:un kuuluu sisäänrakennettu lämpömittari, jonka avulla voidaan kompensoida lämpötilan vaikutusta IMU:n lukemiin. Näiden lisäksi anturissa on tässä työssä tarpeeton Bluetooth 5.0 ja liitin, jolla anturiin on mahdollista ydistää SparkFun:in valmistamia muita antureita, esimerkiksi paine- tai valoanturi. [31]

Anturin prosessori käsittelee IMU:lta tulevan mittaustiedon dataksi ja tallentaa sen microSD-kortille. MicroSD-kortille tallentuu aiemmin mainitut kiihtyvyys, pyörimisnopeus ja magneettikentän voimakkuus kolmen akselin suunnissa. Näiden lisäksi muistikortille tallennetaan mittauspisteen mittauspäivämäärä ja mittauksen kellonaika, jotka saadaan RTC:ltä. Muistikortille kirjataan myös lämpötila ja mittaustaajuus jokaisesta mittauspisteestä. Anturin mittaamat suureet on listattu taulukossa 1. Taulukossa 1 on myös näkyvillä eri mittausalueet, jotka käyttäjä voi määrittää.

Taulukko 1. Anturin mittaamat suureet, niiden mittausalueet ja yksiköt [20, s. 11–13] [32].

Suure	Mittausalue	Yksikkö
Kiihtyvyys	$\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$	g (putoamiskiihtyvyys)
Pyörimisnopeus	$\pm 250 / \pm 500 / \pm 1\,000 / \pm 2\,000$	°/s
Magnetometri	$\pm 4\,900 \times 10^{-6}$	T (tesla)
Lämpötila	-40 °C–+85	°C
Mittaustaajuus ¹	10^{-5} –500	Hz

Anturi voi tallentaa dataa hitaimmillaan kerran vuorokaudessa ja nopeimmillaan 500 kertaa sekunnissa. Käytännössä mitaustaajuus on kuitenkin alle 250 Hz riippuen siitä, että mitä antureita käytetään, missä muodossa data kerätään ja minne data tallennetaan. [31] Tässä työssä käytetään useampaa anturia, data muutetaan jännitteistä suureiksi ja tallennetaan microSD-kortille. Tämän vuoksi mitaustaajuus jää tässä työssä alle 250 Hz:n.

Gyroskoopin mittausalue on suurimmillaan 2000 °/s, joten sillä ei saada mitattua frisbeen pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeus on mahdollista määrittää myös magnetometrin tai kiihtyvyyssanturin datasta.

Frisbeen lähdön kiihtyvyyttä ei osattu arvioida, mutta TDK:n mukaan IMU kestää 20 000 g kiihtyvyyden 20 ms aikana hajoamatta [20]. Muokataan kaava (7) muotoon

$$\Delta v = a * \Delta t. \quad (8)$$

Sijoitetaan kaavaan kiihtyvyys $a = 20\,000\text{ g}$ ja käytetty aika $\Delta t = 20\text{ ms}$, jolloin saadaan nopeuden muutos $\Delta v = 400 \frac{m}{s}$. Näin suurta kiihtyvyyttä on mahdotonta saada heittämällä, joten voidaan olettaa kiihtyvyyssanturin vähintään kestävän heittämistä.

3.4 Anturin kiinnittäminen

Anturin lisäksi kokeen suorittamiseen tarvittiin virtalähde anturille. Virtalähteeksi valittiin 190 mAh litium-polymeeri akku. Pieni akku ei paina paljon, mutta sisältää tarpeeksi virtaa mitausten toteuttamiseen.

Anturin ja akun kiinnittämistä varten suunniteltiin ja 3D-tulostettiin pyöreä aluslevy. Kaavan (1) mukaan massan etäisyys pyörimisakselista vaikuttaa hitausmomenttiin

neliöllisesti, joten anturi ja akku sijoitettiin mahdollisimman lähelle frisbeen keskipistettä. Anturi ja akku olivat lähes saman massaiset, jonka vuoksi ne sijoitettiin symmetrisesti frisbeen keskipisteen eri puolille. Anturi ja akku sijoitettiin samaan tasoon, jotta ne olisivat frisbeen reunan suojassa.

Akku kiinnitettiin aluslevyyn teipillä, minkä jälkeen aluslevy liimattiin frisbeehen ja viimeiseksi anturi kiinnitettiin neljällä ruuvilla aluslevyyn. Kuvassa 6 näkyy anturin ja akun sijoittuminen frisbeessä.



Kuva 6. Frisbeen osien sijoittuminen. Kuvaan on piirretty kiihtyvyyssanturin koordinaatisto. Kuvassa z-akseli osoittaa sisäänpäin.

Anturille ja akulle tulostettiin myös aluslevyn kanssa yhteensopiva kotelo, joka kiinnittyi aluslevyyn tiukalla sovituksella. Kotelon tehtävänä oli suojata anturia ja akkua kosteudelta ja liialta. Kotelo mitoitettiin frisbeen reunaa matalammaksi, jotta se ei altistuisi iskulle laskeutumisessa. Kotelo suunniteltiin reunaa matalammaksi myös siksi, että se vaikuttaisi frisbeen ilmanvastukseen mahdollisimman vähän.

Anturoinnin vaikutusta frisbeen pyörimiseen arvioitiin laskemalla jokaisen osan hitausmomentti frisbeen pyörimisakselin suhteen. Tulokset on esitelty taulukossa 2.

Aluslevyn ja kotelon hitausmomentit saatiin laskettua 3D-mallien avulla. Mallien ja massojen avulla niille laskettiin tiheydet, jonka jälkeen mallinnusohjelma (Siemens NX)

laski niiden hitausmomentit. Frisbeen hitausmomentin laskemista varten frisbeelle piirrettiin 3D-malli, minkä jälkeen hitausmomentti saatiin samalla tavalla kuin aluslevylle ja kotelolle. Koska aluslevyn ja kotelon pyörimisakselit olivat samat kuin frisbeellä, niihin ei tarvinnut lisätä Steinerin termiä.

Anturille ja akulle hitausmomentit laskettiin suorakulmaisen levyn hitausmomentin kaavalla [6, s. 127] ja niihin lisättiin Steinerin termi mr^2 [6, s. 127], jolloin kaavaksi tuli

$$J = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2) + mr^2. \quad (9)$$

Kaavassa J on osan hitausmomentti frisbeen pyörimisakselin suhteen, m on osan massa, a on osan pituus, b on osan leveys ja r on osan massakeskipisteen etäisyys frisbeen pyörimisakselista.

Anturin mitoiksi sijoitettiin $a = 32$ mm ja $b = 32$ mm Akun mitoiksi sijoitettiin $a = 20$ mm ja $b = 34$ mm. Ruuvien aiheuttama hitausmomentti laskettiin pistemäisen kappaleen hitausmomentin kaavalla (1).

Taulukko 2. Komponenttien massat, massakeskipisteen etäisyydet frisbeen pyörimisakselista ja hitausmomentit frisbeen pyörimisakselin suhteen.

Komponentti:	Massa:	Etäisyys frisbeen pyörimisakselista:	Hitausmomentti frisbeen pyörimisakselin suhteen:
Frisbee	172,1 g	0 mm	1 275,1 kg*mm ²
Kotelo	16,3 g	0 mm	16,4 kg*mm ²
Akku	6,2 g	20 mm	3,3 kg*mm ²
Anturi ja muistikortti	5,8 g	16 mm	2,5 kg*mm ²
Aluslevy	3,4 g	0 mm	3,5 kg*mm ²
Ruuvit 4 kpl	0,6 g	13, 13, 31 & 31 mm	0,3 kg*mm ²
Yhteensä	204,4 g		1301,1 kg*mm ²

Anturi kiinnitettiin frisbeehen siten, että kiihtyvyyssanturi mittasi x-akselin suunnassa keskeiskiihtyvyyttä ja y-akselin suunnassa ratakiihtyvyyttä. Frisbeen ollessa oikein päin z-akseli osoitti ylöspäin. Näin asetettuna gyroskoopin z-akseli mittasi frisbeen suurinta pyörimisnopeutta.

3.5 Mittausjärjestelyt

Mittaukset dokumentoitiin anturin lisäksi muilla mittausvälineillä. Mittausvälineet on esitelty luvussa 3.5.1. Mittauksen toteutus on kuvattu luvussa 3.5.2.

3.5.1 Mittausvälineet

Mittaus olisi voitu tehdä pelkästään heittämällä frisbeetä, mutta tuloksista saadaan luotettavimmat, kun niitä pystytään vertailemaan muihin tuloksiin. Anturilta saatavan datan vertailemista varten koeheittoja mitattiin muilla mittauslaitteilla.

Heiton mittaamiseen käytettiin:

- 1) kameraa
- 2) laseretäisyysmittaria
- 3) kynää ja paperia.

Kameralla videoitiin heitot, jotta heittojen lentoratoja ja nopeuksia voidaan tarvittaessa arvioida jälkikäteen. Laseretäisyysmittarina oli yleensä metsästyksessä tai golfissa käytettävä malli. Mittarilla mitattiin suora etäisyys frisbeeltä heittopaikalle, jolloin voidaan arvioida heittojen todellisia pituuksia. Mittarin virhettä arvioitiin mittaamalla jalkapallokentän pituutta, jolloin mittarin virhe oli noin 2 m / 100 m eli noin 2 %. Heittojen pituuksia voidaan pitää suuntaa-antavina. Heiton jälkeen frisbeen lentorataa ja heiton nopeutta arvioitiin ja ne kirjattiin ylös.

3.5.2 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin heittämällä anturilla varustettua frisbeetä jalkapallokentällä. Mittaukset suoritettiin kahtena päivänä. Molempina päivinä tuuli oli niin vähäistä, että se ei vaikuttanut merkittävästi frisbeen lentoon.

Anturin lisääminen muutti hieman frisbeen lentorataa. Ilman anturia pisin heitto oli 110 m. Anturoidulla frisbeellä pisin heitto oli 96 m. Anturoitu frisbee käyttäytyi hieman vakaammin kuin frisbee ilman anturia. Frisbeen vakautuminen ei kuitenkaan haitannut heittämistä, koska frisbee oli aiemmin ollut alivakaa. Frisbeetä täytyi kallistaa hieman anhyzer-kulmaan, jotta lentoradasta saatiin suurempi.

Ensimmäisessä heittosarjassa heitettiin 6 heittoa, minkä jälkeen datasta piirrettiin kuvaajat, ja arvioitiin datan kelvollisuutta. Ensimmäisestä heittosarjasta kävi ilmi, että anturi ei mitannut kuin noin 80 Hz taajuudella, vaikka mittaustaajuus oli asetettu

parhaaseen saatavilla olevaan 100 Hz:iin. Anturin käyttöliittymää tutkimalla selvisi, että mittaustaajuutta saadaan kasvatettua jättämällä osa tallennettavasta datasta pois.

Toisena päivänä mittauksista jätettiin hyödyttömäksi todettu gyroskooppi, lämpötila ja päivämäärä. Näillä asetuksilla heitettiin 8 heittoa, joista osa oli hitaampia ja osa nopeampia. Mitattavien suureiden vähentämisellä mittaustaajuus saatiin asetettua 150 Hz:iin. Todellinen mittaustaajuus jäi 110 Hz:iin.

Toisen päivän heittosarjassa kiinnitettiin huomiota myös asentoon, jossa frisbee on kädessä heiton alkaessa. Frisbee heitettiin kolmella ensimmäisellä heitolla y-akseli heittosuuntaan ja kolmella viimeisellä x-akseli heittosuuntaan.

Jokaisen heiton jälkeen painettiin kerran anturissa olevaa reset-nappia, joka lopettaa tallennuksen ja aloittaa uuden tallennuksen. Uuden tallennuksen aloittamisella varmistettiin varsinaisen mittauksen tallentuminen oikein. Tämän jälkeen akku kytkettiin irti, jotta anturi ei tallenna turhaa dataa.

Reset-napin painaminen ennen seuraavaa heittoa herättää anturin mittaamaan. Ensimmäisessä mittaussarjassa havaittiin, että anturilla kestää muutamia sekunteja saavuttaa tavoiteltu mittaustaajuus, joten toisessa heittosarjassa anturin käynnistämisen jälkeen odotettiin vähintään 3 sekuntia ennen heittoa.

Kun mittaus toteutettiin edellä kuvatulla tavalla, microSD-kortille tallentui kaksi tiedostoa jokaisesta heitosta. Ensimmäinen tiedosto sisälsi heitosta tallentuneen datan. Toinen tiedosto sisälsi resetoinnin ja akun irrottamisen välillä tallentuneen datan, joka on tutkimuksen kannalta tarpeetonta.

4. MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

Anturi ei mennyt rikki heitoista ja data saatiin tallennettua tekstitiedostoon microSD-kortille. Datan tutkimiseen käytettiin Matlabin Live Editoria, joka soveltuu hyvin suurien datamäärien tutkimiseen ja kuvaajien piirtämiseen.

Tässä luvussa kerrotaan, miten dataa luettiin ja mitä tietoa siitä saatiin. Luvun 4 kuvaajien x-akselilla on aika muodossa (mm:ss.ss), missä mm on minuutit, ja ss.ss on sekunnit ja sekunnin sadasosat. Y-akselien suuret on kerrottu akselin vieressä tai kuvaajan selitteessä. Osassa kuvaajista y-akselilla on useita eri suureita. Luvussa 4.1 esitelty koodi on kokonaisuudessaan liitteissä (liite A).

4.1 Data

Mittausdatat tallentuivat microSD-kortille tekstitiedostoiksi, joissa luvut oli eroteltu toisistaan pilkuilla. Kuvassa 7 on yhden tiedoston 5 ensimmäistä riviä. Ensimmäisellä rivillä tiedostossa on kaikkien mitattujen suureiden nimet. Toisesta rivistä alkaen näkyy antureilta tallennettu data jokaisessa mittauspisteessä, ensimmäisen rivin osoittamassa järjestyksessä.

Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje

```
rtcDate,rtcTime,aX,aY,aZ,gX,gY,gZ,mX,mY,mZ,imu_degC,output_Hz,
11/11/2021,10:46:42.71,138.18,242.19,-958.50,-4.15,19.21,0.85,-52.20,-8.70,-106.80,16.24,250.00,
11/11/2021,10:46:42.76,154.79,232.91,-982.42,1.22,6.52,-8.66,-55.65,-9.00,-106.05,16.24,36.36,
11/11/2021,10:46:42.77,130.37,218.75,-974.61,3.41,0.00,-6.89,-54.60,-8.10,-106.65,16.05,44.12,
11/11/2021,10:46:42.78,104.49,225.10,-971.68,6.16,-0.06,-10.18,-56.10,-9.30,-105.90,16.05,51.28,
```

Kuva 7. Kuvakaappaus ensimmäisen heittosarjan tekstitiedostosta.

Ensimmäisestä heittosarjasta tallentui vähimmillään 3329 datariviä ja enimmillään 5002 datariviä. Toisesta heittosarjasta tallentui 6235–8942 datariviä. Ero selittyy toisen heittosarjan suuremmalla mittaustaajuudella. Kuvassa 8 on vertailun vuoksi kuvakaappaus toisen heittosarjan tekstitiedostosta. Toisessa heittosarjassa ei tallennettu päivämäärätietoa, gyroskoopin arvoja ja lämpötilaa, mikä näkyy tiedoston koossa.

Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje

```
rtcTime,aX,aY,aZ,mX,mY,mZ,output_Hz,
00:05:36.32,-110.35,-101.56,-961.91,-48.00,8.70,-104.55,333.33,
00:05:36.37,-132.32,-73.73,-963.38,-49.20,8.25,-103.50,37.74,
00:05:36.38,-131.35,-80.57,-965.82,-48.00,7.95,-102.00,46.15,
00:05:36.39,-111.82,-62.99,-964.36,-48.00,7.95,-102.00,56.34,
```

Kuva 8. Kuvakaappaus toisen heittosarjan tekstitiedostosta.

Matlabissa tekstitiedostot avattiin yksi kerrallaan Matlabin komennolla `readmatrix`. Komento muuttaa tiedoston matriisiksi. Matriisin rivit muodostuivat yhdellä mittaushetkellä tallennetusta datasta, ja matriisin sarakkeet sisälsivät eri datatyyppien saamat arvot. Datan avaamiseen tarvittavat komennot ovat kuvassa 9.

```

1 % Lainausmerkkien sisään syötetään halutun tiedoston nimi
2 LuettavaData = "Heitto1.TXT"
3
4 % Seuraavat rivit lukevat datan
5 Data1 = readmatrix(LuettavaData, 'OutputType','double','range','C:M');
6 Data1 = Data1(:,1:end-1); % Viimeinen rivi on tyhjä
7

```

Kuva 9. Tekstitiedoston avaaminen Matlabiin.

Kuvaajan lukemisen helpottamiseksi x-akselille laitettiin aika. Tarvittavat komennot ovat kuvassa 10. Jos x-akselia ei muokattaisi kuvan 10 komennoilla, x-akselilla olisi mittauspisteiden lukumäärä. Mittaustaajuus ei ollut vakio koko mittauksen ajan, mikä muuttaisi hieman kuvaajan muotoa. Lukemisen helpottamiseksi heiton irtoamishetki asetettiin nolllaksi.

```

8
9 % Luetaan mittauspisteiden ajankohdat
10 Aika = readmatrix(LuettavaData, 'OutputType','datetime','Range','B:B');
11 Aika = Aika(:,1);
12
13 % Muutetaan aika-matriisi vektoriksi ja mittauksen alkuajaksi 0
14 AlkuAika = Aika(1);
15 Aika = Aika - AlkuAika;
16
17 % Muotoillaan ajan muoto sopivaksi
18 Aika.Format = 'mm:ss.SS';
19
20 % Irtoamisen ajanhetki, jotta lento alkaa hetkellä 0
21 IrtoamisAika = '00:09.34';
22
23 % Vaihdetaan irtoamishetki nolllaksi
24 t0 = Aika - duration(IrtoamisAika, 'InputFormat','mm:ss.SS');
25

```

Kuva 10. Kuvaajan x-akselin muokkaaminen.

Kuvassa 9 luettu data piirrettiin muokatun ajan funktiona kuvaajaksi. Kuvaajan piirtämiseen käytetyt komennot näkyvät kuvassa 11.

```

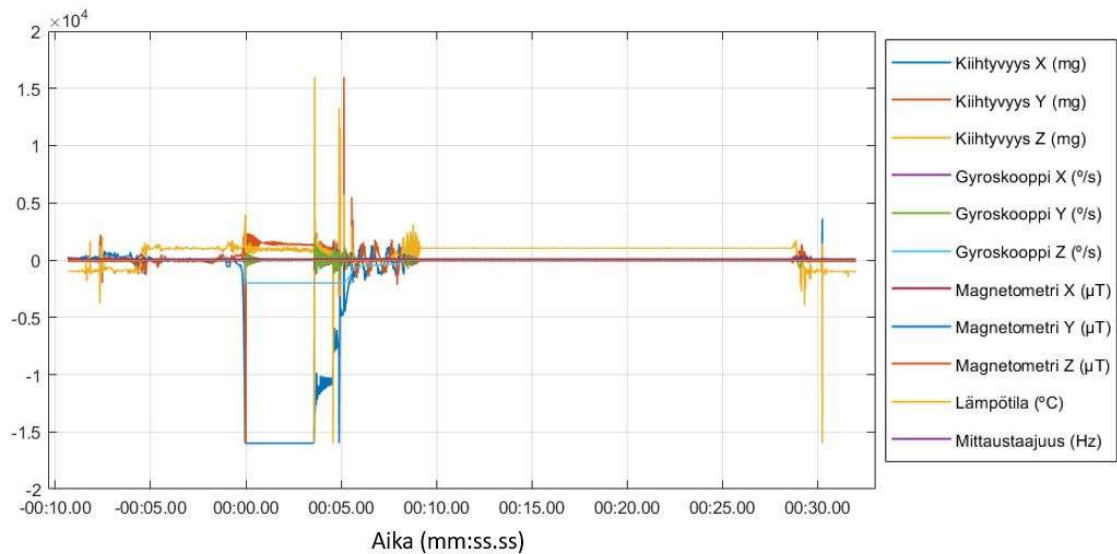
26
27 % Kuvaajan piirtäminen
28 plot(t0,Data1(:,:),'Linewidth',1);
29 % Ruudukko ja viivojen selite
30 grid
31 legend("Kiihtyvyyys X","Kiihtyvyyys Y","Kiihtyvyyys Z","Gyroskooppi X", ...
32        "Gyroskooppi Y","Gyroskooppi Z","Magnetometri X","Magnetometri Y" ...
33        ,"Magnetometri Z","Lämpötila","Mittaustaajuus")
34

```

Kuva 11. Kuvaajan piirtämiseen tarvittavat komennot.

Kuvassa 12 näkyy aiemmin esitellyillä komendoilla piirretty kuvaaja. Kuvaajassa on yhden heiton kokonainen mittausjakso anturin käynnistämisestä sen sammuttamiseen. Kuvaan alussa näkyvä värähtely on seurausta anturin kotelon sulkemisesta ja heittoon valmistautumisesta. Heitto näkyy piikkinä alaspäin ajanhetkellä 00:00.00.

Seuraavat korkeat piikit ajanhetkellä 00:05.00 tulevat frisbeen osumisesta maahan. Sitä seuraa lisää osumia maahan ja pitkä tasainen jakso, kun frisbee on maassa. Lopussa olevat värähtelyt tulevat frisbeen nostamisesta ja anturin sammuttamisesta.

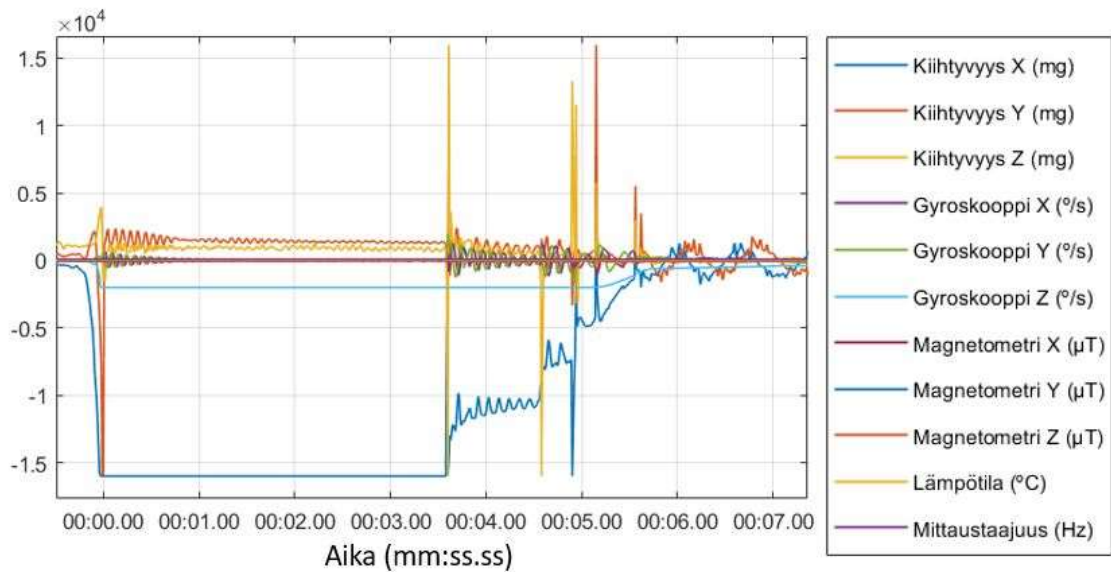


Kuva 12. Yhden heiton datasta piirretty kuvaaja.

Frisbeen lentovaihe näkyy lähempää kuvassa 13. Lähennyksessä kuvassa lentovaiheesta erottuu selvästi sini-aaltomaista värähtelyä, mutta myös suoraa viivaa.

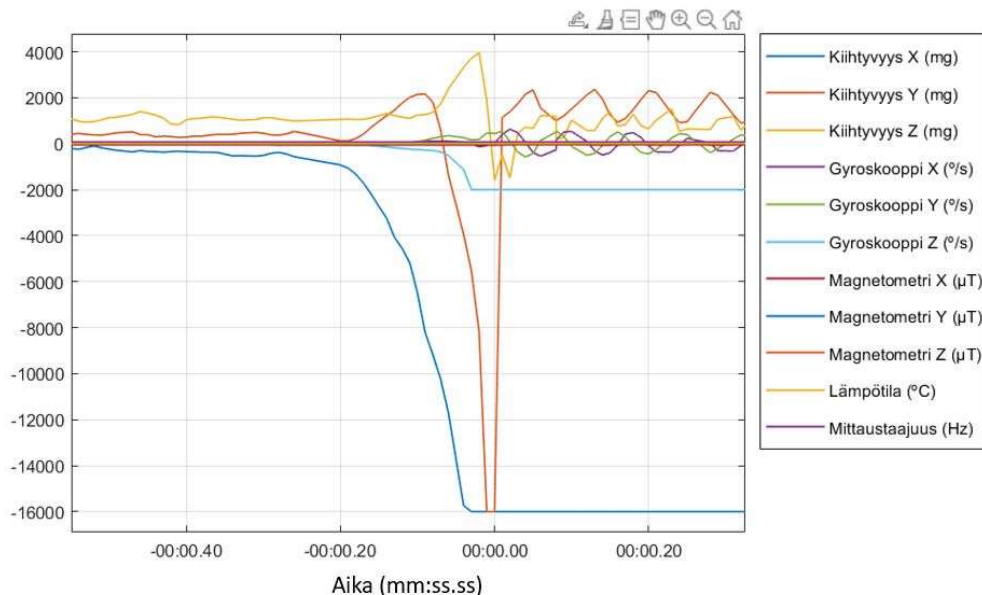
Suorat viivat tulevat gyroskoopin z-akselista ja kiihtyvyyksianturin x-akselista. Kuten luvussa 3.2 oletettiin, gyroskoopin mittausalue ei riitä frisbeen pyörimisnopeuden mittaamiseen. Kiihtyvyyksianturin x-akseli mittasi keskeiskiihtyvyyttä, joka oli suurempi kuin kiihtyvyyksianturin mittausalue.

Kuvaajan vasemmassa reunassa näkyvät sininen ja punainen piikki ovat kiihtyvyyksianturin mittaamat heiton alkuvaiheen kiihtyvyydet. Alun kiihtyvyydet näkyvät lähempää kuvassa 14.



Kuva 13. Heiton kuvaaja lähennettynä lentovaiheeseen.

Kuvassa 14 punainen käyrä on kiihtyvyyssanturin y-akselin mittaama kiihtyvyyys. Sininen käyrä on kiihtyvyyssanturin mittaama kiihtyvyyys x-akselin suunnassa. Kiihtyvyydet ovat negatiivisia, koska ne ovat osoittaneet heitettäessä taaksepäin. Kiihtyvyyssanturin suurin mittausalue oli ± 16 g, ja kuvasta 14 näemme, että kumpikin kiihtyvyyys leikkautuu mittausalueen rajalla. Kiihtyvyyys on esitetty kuvaajassa putoamiskiihtyvyyden tuhannesosina, koska kiihtyvyyssanturin tallentaman kiihtyvyyden yksikkö oli mg.

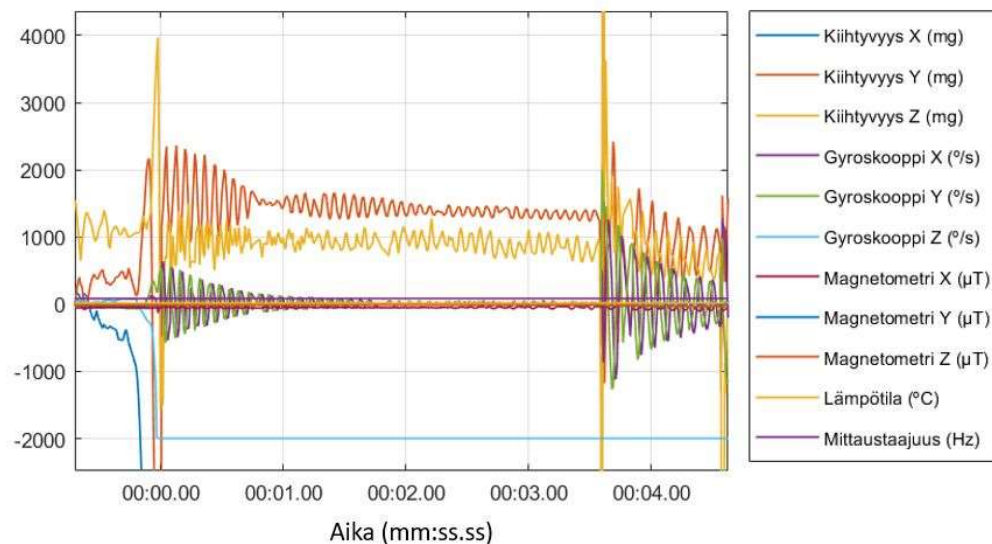


Kuva 14. Heiton kuvaaja lähennettynä alun kiihtyvyyksiin.

Tarkastellaan vielä heiton lentovaihetta lähempää kuvassa 15. Kuvassa erottuu selkeästi kiihtyvyyssanturin z- ja y-akselin mitaamat kiihtyvyydet. Kiihtyvyyksien kuvaajissa näkyy värähtelyä.

Z-akselin mittaaman kiihtyvyyden värähtely johtuu frisbeen kallistumisesta, jolloin frisbeen pyöriminen aiheuttaa kiihtyvyyden vaihtelua z-akselilla. Kiihtyvyys z-akselin suunnassa poikkeaa nolasta noin 1 g:n verran. Poikkeama on maan vetovoimasta aiheutuva kiihtyvyys.

Värähtely y-akselin kiihtyvyydessä on seurausta frisbeen pyörimisestä. Kiihtyvyysanturi mittasi y-akselin suunnassa ratakiihtyvyyttä (kuva 6) ja anturin nopeus vaihtelee frisbeen pyöriessä. Anturin ollessa frisbeen lentosuuntaan kääntyvällä puolella anturin kiihtyvyys on suurempi. Kun anturi on frisbeen toisella puolella, anturin kiihtyvyys pienenee. Tätä huomiota voidaan käyttää frisbeen pyörimisnopeuden laskemiseen. Kiihtyvyys y-akselin suunnassa poikkeaa nolasta noin 1,5 g:n verran. Poikkeama on seurausta kiihtyvyysanturin y-akselin ja frisbeen pyörimisakselin välimatkasta. Välimatka aiheuttaa y-akselille keskeiskiihtyvyyttä, joka on noin 1,5 g:n suuruinen.

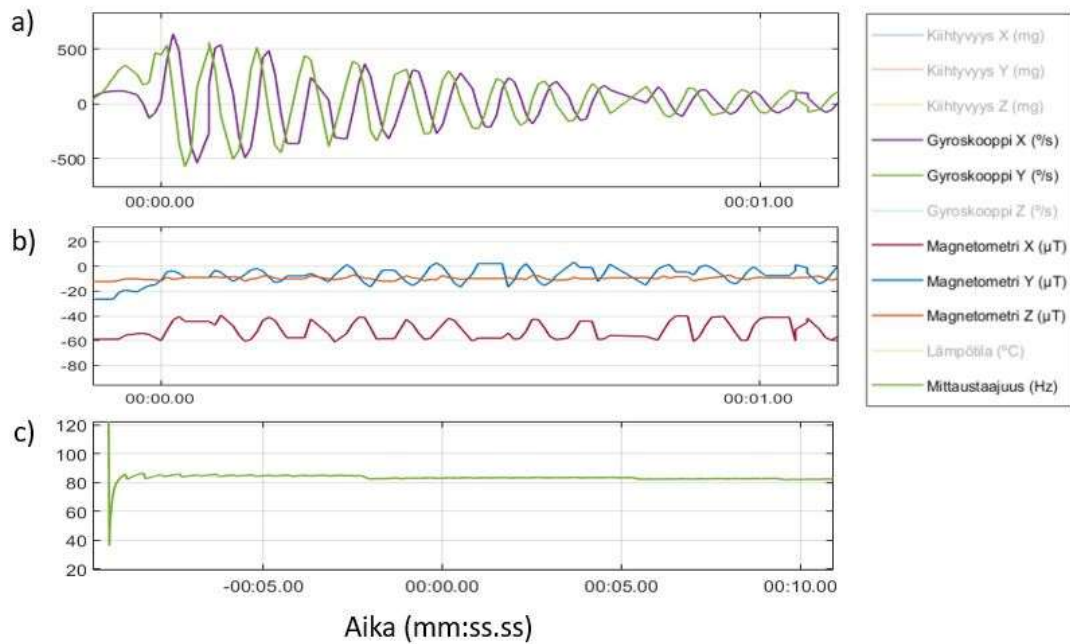


Kuva 15. Frisbeen lennon kuvaaja lähempää.

Lopuksi tarkastellaan kuvassa 16 gyroskoopin x- ja y-akseleiden mittaamia pyörimisnopeuksia ja magnetometrin mittaamaa asentoa. Kuvassa 16 a) on gyroskoopin mittaamaa kulmanopeutta x- ja y-akseleiden ympäri. Aiemmin nähtiin (kuva 13), että pyörimisnopeus z-akselin ympäri oli gyroskoopin mittausaluetta suurempi. Gyroskoopin vaihtelevat lukemat johtuvat frisbeen kallistuskulmasta heiton alussa. Kuvassa 16 a) amplitudin pieneneminen johtuu mahdollisesti frisbeen suoristumisesta, eli z-akselin kääntymisestä osoittamaan ylöspäin.

Magnetometrin kuvaajassa (kuva 16 b)) oli yllättävää magnetometrin epätarkkuus. Epätarkkuus johtuu luultavasti frisbeen suuresta pyörimisnopeudesta. Magnetometrin z-akselin kuvaaja on lähes suora, koska z-akselin suunnassa magneettikentän vaihtelu on

pientä. Magnetometrin x- ja y-akseleista näkyy magneettikentän vaihtelu frisbeen pyöriessä.



Kuva 16. a) Gyroskoopin x- ja y-akseleiden kuvaajat, b) Magnetometrin x-, y- ja z-akseleiden kuvaajat, c) Mittaustaajuuden kuvaaja.

Mittaustaajuuden kuvaaja näkyy kuvassa 16 c). Kuvissa 7 ja 8 tekstitiedoston ensimmäisillä riveillä mittaustaajuuden arvot ovat suuret. Toiselta riviltä alkaen on mittaustaajuuden todellisia arvoja (kuvat 7 & 8). Kuvasta 16 c) nähdään, että mittaustaajuus ei ole vakio koko heiton ajan. Alussa mittaustaajuus nousee nopeasti suurimpaan arvoonsa. Nousun jälkeen mittaustaajuus vaihtelee pienesti.

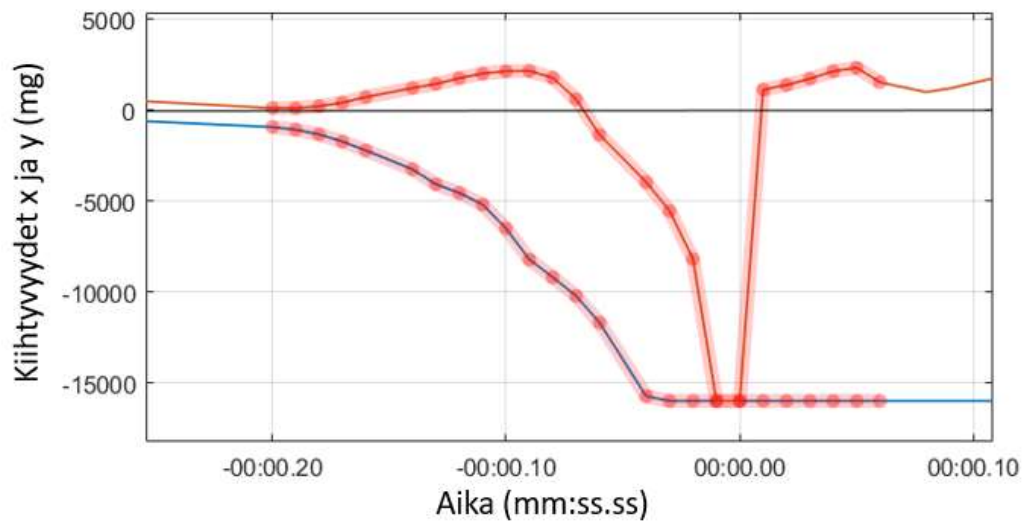
4.2 Tutkimuksen tulokset

Luvussa 4.2.1 arvioidaan kiihtyvyyden mittaamisen ongelmia ja mahdollisia parannuksia frisbeen anturointiin. Luvussa 4.2.2 lasketaan frisbeen pyörimisnopeuksia kiihtyvyydanturilta saadusta datasta.

4.2.1 Kiihtyvyys, nopeus ja lentorata

Kiihtyvyyttä ei voitu laskea tarkasti, koska kiihtyvyys heiton alkuvaiheessa ylitti kiihtyvyydanturin mittausalueen. Kuvassa 17 nähdään kiihtyvyyden mittauspisteet heiton alkuvaiheessa. Kuvasta huomataan, että x-akselin kiihtyvyys ylittää mittausalueen paljon

ennen frisbeen irtoamista kädestä. Y-akselin kiihtyvyys ylittää mittausalueen vain vähän ennen frisbeen irtoamista.



Kuva 17. Kiihtyvyysanturin mittauspisteet heiton alussa.

Kiihtyvyysanturin mittaama keskeiskiihtyvyys aiheuttaa virhettä nopeuden laskemiseen. Jos kiihtyvyysanturi ei ole keskellä frisbeettä, sisältyy kiihtyvyyden kuvaajaan aina myös keskeiskiihtyvyyttä frisbeen pyörimisen vuoksi.

Kiihtyvyyksien mittaamista varten anturi olisi kannattanut kiinnittää niin, että kiihtyvyysanturi tulisi keskelle frisbeettä, jolloin mittausalue ei ylittyisi keskeiskiihtyvyyden takia. Myös mittaustaajuutta olisi saatava suuremmaksi, jotta kiihtyvyyden mittaamatta jäävä osa olisi pienempi. Mittaustaajuuden kasvattaminen voisi onnistua mittaamalla anturilla vain aikaa ja kiihtyvyyttä.

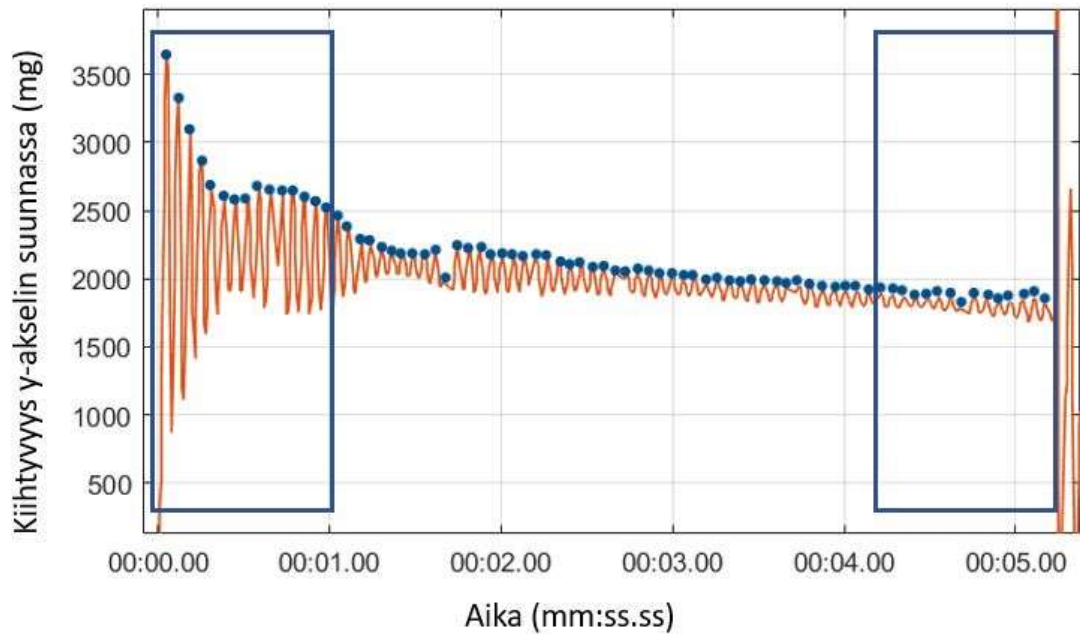
Koska kiihtyvyyttä ei saatu mitattua luotettavasti, myöskään nopeuden, paikan ja lentoradan laskeminen integroimalla ei onnistu. Integroimalla voitaisiin laskea alaraja lähtönopeudelle, mutta puuttuvan kiihtyvyyden suuruutta on vaikea arvioida. Toisaalta keskeiskiihtyvyys voi suurentaa integroimalla saatavaa nopeutta todellista suuremmaksi.

4.2.2 Pyörimisnopeus

Pyörimisnopeutta laskettiin kuvassa 15 punaisella näkyvästä y-akselin kiihtyvyydestä. Kiihtyvyys oli aaltomuotoista, koska kiihtyvyysanturin y-akseli ei leikannut frisbeen pyörimisakselia. Frisbeen pyörimisen vuoksi anturi etenee frisbeen toisella puolella nopeammin kuin toisella puolella, jolloin anturin kiihtyvyys vaihtelee.

Kuvassa 18 on havainnollistettu pyörimisnopeuden laskemiseen käytettyä menetelmää. Kiihtyvyysanturin y-akselin kiihtyvyyden kuvaajasta laskettiin pallolla merkityt huiput

heiton alusta ensimmäiseen maa-osumaan. Huiput laskettiin ensimmäisen sekunnin ajalta, viimeisen sekunnin ajalta ja koko jaksolta. Koko jakson huippujen määrä jaettiin jakson pituudella, jolloin saatiin frisbeen keskimääräinen pyörimisnopeus. Heiton kesto saatiin määriteltyä Matlabilla sekunnin sadasosan tarkkuudella.



Kuva 18. Pyörimisnopeuden laskeminen y-kiihtyvyyden huipuista.

Kuvan 18 menetelmällä lasketut pyörimisnopeudet ovat taulukossa 3. Taulukko on järjestelty heiton pituuksien mukaisesti. Taulukon toisessa sarakkeessa on frisbeen kokonaiset kierrokset ennen ensimmäistä maaosumaa. Kolmannessa sarakkeessa on frisbeen lennon kesto ennen maahan osumista. Neljännessä sarakkeessa kierrokset ennen maaosumaa on jaettu ajalla ennen maaosumaa, jolloin on saatu heiton keskimääräinen pyörimisnopeus. Keskimääräiset pyörimisnopeudet on taulukoitu viidennessä sarakkeessa.

Taulukko 3. Frisbeen pyörimisnopeus y-suunnan kiihtyvyyden vaihteluista.

Heiton pituus (m)	Kierrokset ennen maaosumaa (kpl)	Aika ennen maaosumaa s	Kierrokset keskimäärin (1/s)	Kierrokset ensimmäisen sekunnin aikana (1/s)	Kierrokset viimeisen sekunnin aikana (1/s)
96	78	5,26	14,8	16	15
93	78	5,01	15,5	15	15
93	69	4,93	14,0	15	14
90	18	1,99	9,0	10	9
88	72	5,02	14,3	15	14
87	57	4,39	13,0	14	14
77	54	4,10	13,2	15	14
75	42	3,16	13,3	13	13
72	46	3,60	12,8	14	13
68	50	3,66	13,7	15	14
65	44	3,6	12,2	13	13
55	27	2,84	9,5	10	11

Taulukon viimeisistä sarakkeista näkyy, että heiton pituus ja frisbeen pyörimisnopeus ovat suoraan verrannollisia. Otanta on pieni ja tuloksissa on joitain poikkeuksia, joten kovin selvä yhteys ei ole.

Pyörimisnopeus ensimmäisen sekunnin aikana on yhtä poikkeusta lukuunottamatta suurempi kuin pyörimisnopeus viimeisen sekunnin aikana, joten oletetusti nähdään, että frisbeen pyöriminen hidastuu lennon aikana. Pyörimisnopeuden hidastuminen nähdään myös kuvasta 18 y-akselin suuntaisen kiihtyvyyden pienenemisenä. Kiihtyvyys pienenee, koska pyörimisnopeuden hidastuessa y-akselin mittaama keskeiskiihtyvyys pienenee.

4.3 Tulosten analyysi

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, että voidaanko IMU:lla mitata frisbeen nopeus, pyörimisnopeus ja lentorata. Nopeuden ja lentoradan selvittämiseksi olisi tarvittu parempaa dataa frisbeen kiihtyvyyksistä heiton alkuvaiheessa. Parempaa dataa kiihtyvyyksistä olisi voinut saada anturin toisenlaisella sijoittamisella.

Kiihtyvyyssanturi olisi kannattanut asettaa lähemmäksi frisbeen pyörimisakselia, jotta mittausalue ei ylittyisi keskeiskiihtyvyyden vuoksi. Tällöin anturi olisi joutunut epätasapainoon, koska akkua olisi jouduttu siirtämään kauemmaksi frisbeen massakeskipisteestä. Toinen vaihtoehto olisi ollut sijoittaa akku ja anturi päällekkäin, mutta silloin anturi olisi ollut frisbeen reunaa korkeammalla.

Frisbeen kokonaiskiihtyvyyden laskemista varten frisbeen asento tulisi tietää vauhdinoton aikana. Kuten luvussa 3.3 todettiin, gyroskooppien mittausalueet eivät vielä riitä frisbeen pyörimisnopeuksien mittaamiseen. Magnetometriltä saatu data oli sen verran epätarkkaa, että siitäkään ei saatu laskettua frisbeen asentoa luotettavasti. Magnetometrin toimintaan kannattaisi perehtyä tarkemmin ja selvittää mittausepätarkkuuden syy.

Hieman yllättäen frisbeen pyörimisnopeuksia voitiin laskea kiihtyvyyssanturin y-akselin mittaamista kiihtyvyyksistä. Y-akselin mittaamat kiihtyvyydet johtuivat todennäköisesti frisbeen pyörimisliikkeestä ja kiihtyvyyssanturin y-akselin sijoittumisesta frisbeessä. Kiihtyvyyssanturi oli hieman sivussa frisbeen pyörimiskeskipisteestä niin, että y-akseli ja frisbeen pyörimisakseli eivät leikanneet. Tällöin y-akselin nopeus vaihteli riippuen siitä, oliko kiihtyvyyssanturi frisbeen lentosuuntaan nähden eteenpäin vai taaksepäin pyörivällä puolella.

Kiihtyvyyden y-akselin kuvaajan huippuja laskemalla saatiin frisbeen pyörimisnopeus, mutta laskutekniikasta johtuen pyörimisnopeuden resoluutio oli noin yhden kierroksen verran. Pyörimisnopeus saataisiin laskettua tarkemmin, jos y-akselin ja frisbeen pyörimisakselin välimatka tunnettaisiin. Yhdistämällä normaalikiihtyvyyden ja ratanopeuden kaavat [6, s. 124] saadaan normaalikiihtyvyydelle yhtälö

$$a = \omega^2 * r, \tag{10}$$

missä ω on frisbeen kulmanopeus, a on normaalikiihtyvyys ja r on frisbeen pyörimisakselin ja kiihtyvyyssanturin välinen etäisyys. Kaavasta (10) voitaisiin laskea kulmanopeus

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{r}}. \tag{11}$$

Frisbeen pyörimisakselin ja kiihtyvyyssanturin y-akselin välimatkaa ei kuitenkaan tässä työssä tunnettu tarkasti.

Tutkimuksen tulokset eivät tarkoita, että IMU ei soveltuisi frisbeen lennon mittaamiseen. Tutkimuksesta nähtiin, että kokonsa ja painonsa puolesta pieni IMU soveltuu kiinnitettäväksi frisbeehen. Tutkimustulosten perusteella jo pelkällä kiihtyvyyssanturilla voitaisiin mitata frisbeen pyörimisnopeutta ja mahdollisesti myös nopeutta. Tutkimusta tulisi jatkaa ja suorittaa iterointikierroksia, joilla selvitetäisiin paras tapa kiinnittää anturi frisbeehen. Erilaisiin laskutekniikoihin nopeuden ja lentoradan selvittämiseksi tulisi myös perehtyä.

4.4 Tulosten luotettavuuden arviointi

Frisbeen massa ilman anturia ja tarvikkeita oli 172,1 g. Kun anturi, akku, kotelo, aluslevy ja ruuvit lisättiin, frisbeen massa oli 204,6 g. Massa lisääntyi siis 32,5 g, eli 18,9 %.

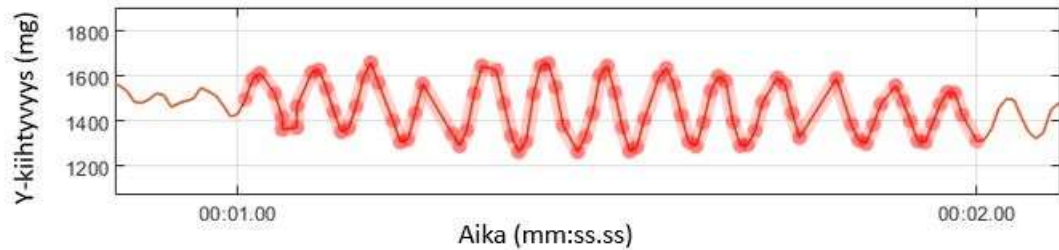
Taulukkoon 2 laskettiin pelkän frisbeen hitausmomentti ja anturoidun frisbeen hitausmomentti. Pelkän frisbeen hitausmomentti oli 1275,1 kg*mm², ja anturoidun frisbeen hitausmomentti oli 1301,1 kg*mm². Hitausmomentti kasvoi siis 2,0 %.

Hitausmomentin massaa huomattavasti pienempi kasvu selittyy massan sijoittumisella. Frisbeen massa on kaukana pyörimisakselista, kun taas anturin massa on lähellä pyörimisakselia. Kaavan 1 mukaisesti massan etäisyys vaikuttaa hitausmomenttiin neliöllisesti, jolloin pyörimisakselin lähellä oleva massa ei juuri vaikuta hitausmomenttiin.

Anturin vaikutus frisbeen pyörimisnopeuteen on hitausmomentin perusteella lähes olematon. Massan muutos on kuitenkin huomattavan suuri ja se todennäköisesti lyhentää frisbeen lentomatkaa.

Anturi vaikuttaa jonkin verran frisbeen ilmanvastukseen, mikä mahdollisesti lyhentää frisbeen lentämää matkaa. Anturi oli kuitenkin sijoitettu frisbeen pohjaan ja anturi oli frisbeen reunaa matalampi. Ahosen [3] mukaan ilman virtausnopeus frisbeen pohjassa on pieni [3, s. 24], jolloin anturi ei välttämättä vaikuta ratkaisevasti frisbeen aerodynamiikkaan. Anturin aiheuttamaa ilmanvastusta olisi voinut pienentää suunnittelemalla virtaviivaisemman kotelon.

Mittaussignaalin laskostumisesta pyörimisnopeuden laskemisessa ei ollut ongelmia. Kuvasta 19 nähdään, että jokaisessa jaksossa on 5–8 mittauspistettä. Kuva 19 on ensimmäisen sarjan heitosta ja toisessa sarjassa mittaustaajuus saatiin vielä suuremmaksi.



Kuva 19. Datapisteet pyörimisnopeuden laskemisessa.

Immosen pro gradussa [2] eri heittäjien heittämien frisbeiden keskimääräisiksi pyörimisnopeuksiksi mitattiin 13,93–20,23 kierrosta sekunnissa. Immosen tutkimuksessa ei ole kerrottu käytetystä frisbeestä. Hitaimmat heitot olivat noin 14 kierrosta sekunnissa. Samojen heittojen lähtönopeuksien keskiarvot olivat 22,44–27,06 m/s. [2, s. 35]

Juhwan et al. tutkimuksessa [4] frisbeen pyörimisnopeudet olivat 4500–7000 %/s, mikä tarkoittaa 12,5–19,4 kierrosta sekunnissa. Samassa tutkimuksessa frisbee painoi 164 g, mikä voi lisätä pyörimisnopeutta verrattuna tähän tutkimukseen, jossa käytettiin 172,1 g painoista frisbeettä. Juhwan et al. tutkimuksessa myös anturi oli kevyempi. Heittojen pituudet olivat 70–80 m, eli suunnilleen vastaavan pituisia heittoja kuin tässä tutkimuksessa. [4, s. 11, s. 15]

Tässä tutkimuksessa mitatut pyörimisnopeudet ovat keskimäärin hieman pienempiä kuin Immosen [2] ja Juhwan et al. [4] tutkimuksissa. Pyörimisnopeuksien ero voi johtua heittäjän tekniikasta. Tässä tutkimuksessa mitattiin vain yhden heittäjän heittämiä heittoja.

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia, soveltuuko frisbeehen kiinnitettävä IMU frisbeen lennon mittaamiseen. Työn alussa perehdyttiin teoriaan frisbeegolfin taustalla ja erilaisiin mahdollisuuksiin mitata frisbeen lentoa. Työssä perehdyttiin mikrosysteemeihin, joista pienet IMU:t usein koostuvat. Teoriaan tutustumisen jälkeen valittiin työhön parhaiten soveltuva anturi, ja sille rakennettiin kiinnitys frisbeehen. Anturoidulla frisbeellä kerättiin mittausdataa heittämällä 14 heittoa. Heitoista saatua dataa tutkittiin, ja siitä saatiin laskettua frisbeen pyörimisnopeuksia.

Tutkimuksessa selvisi, että IMU soveltuu kokonsa ja painonsa puolesta kiinnitettäväksi frisbeehen. Tutkimuksessa todettiin myös, että tällä hetkellä markkinoilla olevat edulliset ja pienet gyroskoopit eivät riitä mittausalueensa puolesta frisbeen pyörimisnopeuden mittaamiseen. Tässä työssä myöskään magnetometrillä ei saatu mitattua frisbeen pyörimisnopeutta luotettavasti. Toisaalta työssä selvisi, että kiihtyvyyssanturin mittausdatasta on mahdollista laskea frisbeen pyörimisnopeus.

Työssä rajoituttiin tutkimaan vain yhtä IMU:a. Työssä ei yritetty varmistua tulosten tarkkuudesta, vaan tavoitteena oli nähdä mahdollisuus nopeuden, pyörimisnopeuden ja lentoradan laskemiseen. Työssä käytetyllä kiihtyvyyssanturilla ei saatu mitattua luotettavasti frisbeen kiihtyvyyksiä, joten frisbeen nopeutta ja lentorataa ei saatu laskettua. Työssä ei käsitelty laskutekniikoita, joita tarvitaan frisbeen lentoradan ja nopeuden laskemiseen.

Tämän työn perusteella frisbeen lentoradan mittaaminen IMU:lla on mahdollista. Anturin osien sijoittelua kannattaisi miettiä tarkemmin. Anturin mittaustajuuutta nostamalla frisbeen nopeuden ja lentoradan laskeminen voisi olla mahdollista. Työn perusteella myös pelkän kiihtyvyyssanturin mahdollisuuksia frisbeen lentoradan mittaamiseen kannattaisi tutkia.

LÄHTEET

- [1] Suomen frisbeegolfliitto, Frisbeegolfhjaajan opas, 2017 painos 1.0, 47 s., saatavissa (viitattu 14.11.2021): https://frisbeegolfliitto.fi/wp-content/uploads/2017/05/Ohjaajan_Opas_2_JA_Liitteet_PRINT.pdf
- [2] P. Immonen, Frisbeen lentämisen fysiikkaa, pro gradu -tutkielma, Itä-Suomen yliopisto, 2016, 52 s., saatavissa (viitattu 27.10.2021): https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/16896/urn_nbn_fi_uef-20160789.pdf
- [3] N. Ahonen, Frisbeegolfkiekon s-kirjaimen muotoisen lentoradan synty, Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, 38 s., saatavissa (viitattu 27.10.2021): <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25827/ahonen.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [4] L. Juhwan, L. Byungjin, W.S. Jin, J.L.Young, S. Sung, Study on Improved Flight Coefficient Estimation and Trajectory Analysis of a Flying Disc through Onboard Magnetometer Measurements, Department of Aerospace Information Engineering & School of Intelligent Mechatronic Engineering, 2018, 21 p., saatavissa (viitattu 27.10.2021): <https://www.proquest.com/docview/2126383483/fulltextPDF/2E451C30479C4F87PQ/1?accountid=14242>
- [5] W. Greiner, Classical Mechanics, Springer, 2010, 579 p., saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-03434-3.pdf>
- [6] R. Seppänen, L. Mannila, M. Kervinen, I. Parkkila, P. Konttinen, L. Karkela, T. Yli-Kokko, MAOL-taulukot, Otava, 2014, 175 s.
- [7] Frisbeegolfliitto.fi, Harrastuksen aloittaminen, 2021, saatavissa (viitattu 14.11.2021): <https://frisbeegolfliitto.fi/harrastuksen-aloittaminen/>
- [8] Suomen frisbeegolfliitto, Frisbeegolfin tekniikkakoulu / ohjaajan opas, 2021, 51 s., saatavissa (viitattu 14.11.2021): <https://frisbeegolfliitto.fi/wp-content/uploads/2021/04/Frisbeegolfin-tekniikkakoulu-Ohjaajan-opas.pdf>
- [9] Discgolfnow.com, The 11 Fastest Disc Golf Discs in the Game Today, 2021, saatavissa (viitattu 11.11.2021): <https://discgolfnow.com/fastest-disc-golf-discs/>
- [10] Dgputtheads.com, Disc Golf Disc Numbers, 2021, saatavissa (viitattu 11.11.2021): <https://www.dgputtheads.com/disc-golf-disc-numbers>
- [11] Innovastore.fi, Frisbeegolfkiekkojen lentonumerot, saatavissa (viitattu 11.11.2021): <https://www.innovastore.fi/page/13/lentonumerot>
- [12] Innovadiscs.com, Flight ratings system, saatavissa (viitattu 11.11.2021): <https://www.innovadiscs.com/home/disc-golf-faq/flight-ratings-system/>
- [13] discmania.net, Simon Lizotte, 2021, saatavissa (viitattu 27.10.2021): <https://www.discmania.net/collections/simon-lizotte>

- [14] T. Mazurek, UDisc: Measure Throw Redesign, 2020, saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://tylermazurek.medium.com/udisc-measure-throw-redesign-a5890a0adb31>
- [15] K. Merry, P. Bettinger, Smartphone GPS accuracy study in an urban environment, PLoS ONE, 2019, saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0219890>
- [16] TOSY, TOSY: Smart Golf Disc & 360 LED Flying Disc & Boomerang, Kickstarter.com, 2021, saatavissa (viitattu 1.11.2021): <https://www.kickstarter.com/projects/tosyFlyingduo/tosy-flying-duo-360-leds-flying-disc-and-patented-boomerang>
- [17] T. B. Jones, G. N. Nenad, Electromechanics and MEMS, Cambridge University Press, 2013, 582 p., saatavissa (viitattu 4.12.2021): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1099805>
- [18] M. Nazarahari, H. Rouhani, 40 years of sensor fusion for orientation tracking via magnetic and inertial measurement units: Methods, lessons learned, and future challenges, University of Alberta, 2020, 18 p. saatavissa (viitattu 27.10.2021): <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1566253520303997?token=A0646BC8A2F44232EB7C5D300BEE3A5466BAFF45C6C56ECAE53C34DCB545EADD E696A3E09050C7E72854D8D8A53B64EB&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211026142610>
- [19] S. Cetinkunt, Mechatronics with Experiments, John Wiley & Sons, Incorporated, 2015, 902 p., saatavissa (viitattu 4.12.2021): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1843629>
- [20] TDK, World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking™ Device, Sparkfun.com, 2016–2017, 89 p., saatavissa (viitattu 2.12.2021): <https://cdn.sparkfun.com/assets/7/f/e/c/d/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf>
- [21] M. N. Armenise, C. Ciminelli, F. Dell'Olio, V. M. N. Passaro, Advances in Gyroscope Technologies, Springer, 2010, 117 p., saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://link.springer.com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-15494-2.pdf>
- [22] F. Höflinger, J. Müller, R. Zhang, L. M. Reindl and W. Burgard, A Wireless Micro Inertial Measurement Unit (IMU), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 9, Sept. 2013, pp. 2583–2595, saatavissa (viitattu 14.11.2021): <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/hoeflinger13tim.pdf>
- [23] A. Grosz, M. J. Haji-Sheikh, S. C. Mukhopadhyay, High Sensitivity Magnetometers, Springer, 2017, 576 p., saatavissa (viitattu 6.12.2021): <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-34070-8.pdf>
- [24] E. Weiss, R. Alimi, Low-Power and High-Sensitivity Magnetic Sensors and Systems, Artech House, 2018, 255 p., saatavissa (viitattu 13.12.2021): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=5625453>
- [25] E. Ramsden, Hall-Effect Sensors : Theory and Application, Elsevier Science & Technology, 2006, 265 p., saatavissa (viitattu 7.12.2021): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=317230>

- [26] P. Regtien, F. van der Heijden, M. J. Korsten, W. Otthius, W. Otthius, Measurement Science for Engineers, Elsevier Science & Technology, 2004, 361 p., saatavissa (viitattu 21.10.2021): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=314050>
- [27] TEPA, laskostuminen, termipankki.fi, 2021, saatavissa (viitattu 23.11.2021): <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/laskostuminen>
- [28] XSens, Gyroscopes, Xsens.com, saatavissa (viitattu 7.12.2021): <https://www.xsens.com/gyroscopes>
- [29] Robotshop, Compare Accelerometers Gyros & IMU, robotshop.com, 2020, saatavissa (viitattu 7.12.2021): <https://www.robotshop.com/uk/compare-accelerometers-gyros-imu.html>
- [30] Sparkfun, Gyroscopes, sparkfun.com, saatavissa (viitattu 7.12.2021): <https://www.sparkfun.com/search/results?term=gyroscopes>
- [31] Nate, Bboyho, Paulzc, OpenLog Artemis Hookup Guide, sparkfun.com, saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://learn.sparkfun.com/tutorials/openlog-artemis-hookup-guide/hardware-overview>
- [32] Sparkfun.com, SparkFun OpenLog Artemis, saatavissa (viitattu 20.10.2021): <https://www.sparkfun.com/products/16832>

LIITTEET

LIITE A: Kuvaajien piirtämiseen käytetty koodi

```

% Lainausmerkkien sisään syötetään halutun tiedoston nimi
LuettavaData = "Heittol.TXT"

% Seuraavat rivit lukevat datan
Data1 = readmatrix(LuettavaData, 'OutputType','double','range','C:M');
Data1 = Data1(:,1:end-1); % Viimeinen rivi on tyhjä

% Luetaan mittauspisteiden ajankohdat
Aika = readmatrix(LuettavaData, 'OutputType',"datetime","Range","B:B");
Aika = Aika(:,1);

% Muutetaan aika-matriisi vektoriksi ja mittauksen alkuajaksi 0
AlkuAika = Aika(1);
Aika = Aika - AlkuAika;

% Muotoillaan ajan muoto sopivaksi
Aika.Format = 'mm:ss.SS';

% Irtoamisen ajanhetki, jotta lento alkaa hetkellä 0
IrtoamisAika = '00:00.00';

% Vaihdetään irtoamishetki nolllaksi
t0 = Aika - duration(IrtoamisAika, 'InputFormat', "mm:ss.SS");

% Kuvaajan piirtäminen
plot(t0, Data1(:, :), "LineWidth", 1);
% Ruudukko ja viivojen selite
grid
legend("Kiihtyvyyys X", "Kiihtyvyyys Y", "Kiihtyvyyys Z", "Gyroskooppi X",
...
    "Gyroskooppi Y", "Gyroskooppi Z", "Magnetometri X", "Magnetometri Y"
...
    , "Magnetometri Z", "Lämpötila", "Mittaustaajuus")

```