



# **Inertiamittayksikön suorituskykyvaatimukset dronen autopilottijärjestelmässä**

Juha Laitila

Opinnäytetyö, ylempi AMK  
Toukokuu 2024  
Robotiikka YAMK

Laitila, Juha

## Inertiamittayksikön suorituskykyvaatimukset dronen autopilottijärjestelmässä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 99 sivua.

Robotiikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö YAMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### Tiivistelmä

Dronejen käyttö on lisääntynyt paljon viime vuosina sekä siviili- että viranomaiskäytössä. Harrastekäyttö lisääntyy, mutta droneja käytetään yhä useammin myös ammattilaisten toimesta sekä kaupallisissa- että viranomaistarkoituksissa. Dronejen käytöllä voidaan parantaa tehokkuutta, turvallisuutta tai vähentää kustannuksia. Tämä kasvava markkina tarjoaa houkuttelevia mahdollisuuksia sekä komponenttien että ohjelmistojen toimittajille.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia dronejen autopilottien inertia-antureiden vaatimuksia. Toimeksiantajana toimi yritys, joka on erikoistunut datan keräämiseen, analysointiin sekä algoritmikehitykseen. Yrityksellä on kokemusta datankeräämisestä monenlaisista laitteista ja tilanteista, mutta dronet ovat uusi osa-alue. Työ tehtiin yhteistyössä MEMS-antureita valmistavan yrityksen ja dronevalmistajan kanssa. MEMS-antureita valmistava yritys on kiinnostunut dronemarkkinoiden kasvavista mahdollisuuksista. Dronevalmistaja oli kiinnostunut nykyisten ja uusien antureiden suorituskyvyn vertailusta ja tältä yritykseltä saatiin myös laite käyttöön testilentoja varten.

Tutkimuksessa yhdistettiin laadullisia, määrällisiä ja kokeellisia menetelmiä kehittämistutkimuksellisella otteella. Näillä menetelmillä pyrittiin vastaamaan kahteen tutkimuskysymykseen. Laadullisia menetelmiä käytettiin tiedon keräämiseen nykyisistä autopiloteista ja antureista. Määrällisiä ja kokeellisia menetelmiä käytettiin anturidatan keräämiseen ja analysointiin todellisista lentotilanteista.

Aineistoa kerättiin useista lennoista käyttäen kahta dronea. Suurin osa datasta kerättiin isolla dronella, joka on tarkoitettu ammattikäyttöön. Yksi vertailulento tehtiin pienellä harrastedronella. Isoon droneen kiinnitettiin erillinen mittalaitteisto, joka sisälsi referenssilaitteen sekä muita antureita vertailua varten. Datan keräämisen ja analysoinnin jälkeen mietittiin seuraavia askeleita näiden tulosten perusteella.

Tutkimuksen tuloksena saatiin tietoa siitä, minkälaisia mitta-alueita antureilta vaaditaan. Toisaalta vaikutti siltä, että useimpien nykyisten gyroskooppien mitta-alueet olivat tarpeettoman suuria, mutta kiihtyvyyssantureiden tapauksessa suurelle mitta-alueelle näytti olevan perusteita. Syynä tähän olivat dronessa esiintyvät voimakkaat värinät. Jatkotutkimuksissa voitaisiin kerätä dataa vielä dynaamisemmista tilanteista isolla dronella, jotta myös tällaisten tilanteiden vaatimukset saadaan selville.

### Avainsanat (asiasanat)

Drone, UAV, miehittämätön ilma-alus, anturi, inertia

### Muut tiedot

Liitteinä analysoitujen datojen kuvaajia, 20 sivua.

Laitila, Juha

**Inertial measurement unit performance requirements in drone autopilot system**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences. May 2024, 99 pages.

Degree program in Robotics. Master's thesis.

Permission for open access publication: yes

Language of publication: Finnish

**Abstract**

Drone usage has skyrocketed in recent years, both in civilian and government sectors. Recreational use of drones is becoming more widespread, and drones are increasingly often used in professional and commercial applications. The reason being that drones can increase efficiency, enhance safety, and reduce costs. This growing market creates attractive opportunities for both component and software suppliers.

The goal of the thesis was to research the requirements of drone autopilot inertial sensors. The thesis was commissioned by a company that specializes in data collection, data analytics, and algorithms. The company has experience in data collection of various equipment, but drone data is a new sector. The thesis was done in collaboration with a MEMS sensor manufacturer and a drone manufacturer. The MEMS sensor manufacturer is interested in the vast potential of the drone business. The drone manufacturer provided the drone for test flights and was also interested in evaluating the performance of current and new sensors.

The research combined qualitative, quantitative, and experimental methods with a design research approach. These methods aimed to answer two research questions. Qualitative methods were used to gather information about the current state of autopilots and inertial sensors. Quantitative and experimental methods were used to record and analyze data from real flight situations.

Data was collected from multiple flights using two drones. Most of the data was recorded with a large drone intended for professional use. One comparative flight was conducted with an ultra-light hobby drone. The large drone had a payload capacity that allowed for the attachment of an external measurement setup. This setup included a reference unit and other sensors for comparison with the autopilot's sensors. After collecting the dataset, an analysis of the data was performed, and the next steps were considered based on the results.

As a result of the study, information about the required measurement ranges for inertial sensors was gained. On one hand, it seemed that the gyroscope ranges of most sensors were unnecessarily large. On the other hand, a large accelerometer range seems to be needed due to the presence of large amplitude vibrations in drones. For further research, more dynamic situations could still be measured with a large drone to gain more information of sensor requirements.

**Keywords/tags (subjects)**

Drone, UAV, unmanned aerial vehicle, sensor, inertia

**Miscellaneous**

Attachments contain plots of the analyzed data, 20 pages.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Työn tausta ja tavoitteet.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Drone .....</b>	<b>8</b>
3.1	Dronen määritelmä ja lainsäädäntö Euroopan unionissa .....	8
3.2	Dronen muut määritelmät .....	13
3.3	Dronen rakenne .....	15
3.4	Dronen sovelluskohteita .....	17
<b>4</b>	<b>Inertiamittayksikkö.....</b>	<b>22</b>
4.1	Rakenne ja määritelmä .....	22
4.2	Antureiden virhelähteitä .....	24
<b>5</b>	<b>Anturifuusio .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Satelliittipaikannus .....</b>	<b>26</b>
6.1	Toimintaperiaate ja eri konstellatit .....	26
6.2	Paikannukseen vaikuttavat epätarkkuudet .....	28
6.3	Häirintä .....	28
<b>7</b>	<b>Navigointi.....</b>	<b>29</b>
7.1	Inertianavigointi .....	29
7.2	Inertianavigointi ja satelliittipaikannus .....	30
<b>8</b>	<b>Ardupilot .....</b>	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>Autopilotti ja lennonohjausyksikkö .....</b>	<b>31</b>
9.1	Määritelmät ja toiminta .....	31
9.2	Tärinän vaimennus .....	32
<b>10</b>	<b>Tutkimusasetelma .....</b>	<b>33</b>
10.1	Tutkimuskysymykset .....	33
10.2	Tutkimusmenetelmät .....	34
<b>11</b>	<b>Anturivertailu .....</b>	<b>35</b>
<b>12</b>	<b>Testilennot .....</b>	<b>36</b>
12.1	Oma mittalaitteisto .....	37
12.2	Testilento 1 isolla dronella .....	44
12.3	Testilennon 1 tulokset.....	45
12.4	Testilento 2 isolla dronella .....	49
12.5	Testilennon 2 tulokset.....	50
12.6	Testilento 3 pienellä dronella.....	53

12.7 Testilennon 3 tulokset.....	55
<b>13 Jälkiprosessointi .....</b>	<b>61</b>
<b>14 Työn tulokset.....</b>	<b>67</b>
14.1 Tutkimuskysymysten vastaukset.....	67
14.2 Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys .....	69
<b>15 Yhteenveto.....</b>	<b>70</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>71</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>77</b>
Liite 1. Kiihtyvyyssantureiden x-, y- ja z-akseleiden aikatazon kuvaajat, testilento 1.....	77
Liite 2. Gyroskooppien x-, y- ja z-akseleiden aikatazon kuvaajat, testilento 1 .....	78
Liite 3. Kiihtyvyyssantureiden x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1.....	79
Liite 4. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1.....	80
Liite 5. Kiihtyvyyssantureiden z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1 .....	81
Liite 6. Gyroskooppien x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1 .....	82
Liite 7. Gyroskooppien y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1 .....	83
Liite 8. Gyroskooppien z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1.....	84
Liite 9. Kiihtyvyyssantureiden x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2.....	85
Liite 10. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2.....	86
Liite 11. Kiihtyvyyssantureiden z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2 .....	87
Liite 12. Gyroskooppien x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2 .....	88
Liite 13. Gyroskooppien y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2 .....	89
Liite 14. Gyroskooppien z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2 .....	90
Liite 15. Kiihtyvyyssantureiden x-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2 .....	91
Liite 16. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2 .....	92
Liite 17. Kiihtyvyyssantureiden z-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2 .....	93
Liite 18. Gyroskooppien x-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2.....	94
Liite 19. Gyroskooppien y-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2 .....	95
Liite 20. Gyroskooppien z-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2.....	96

## Kuviot

Kuvio 1. Sallittu etäisyys maanpinnasta (FAQ n. 116465 2020) .....	13
Kuvio 2. Eri dronemalleja (Different Types of Drones and Uses... 2024.; Different Types of Drones Explained... n.d.; Becher 2023; Free images of Drone n.d.).....	15
Kuvio 3. Nelikopterin rungon muodot (The Complete Guide... 2017, muokattu) .....	16

Kuvio 4. Inertiamittayksikön havainnekuva (Harris 2023) .....	22
Kuvio 5. Kiihtyvyysanturin esimerkkirakenne (Harris 2023, muokattu) .....	23
Kuvio 6. Gyroskoopin esimerkkirakenne (Harris 2023, muokattu).....	23
Kuvio 7. Renderoitu kuva anturilevystä .....	37
Kuvio 8. Inertial Labs miniAHRS (Miniature Attitude & Heading... n.d.).....	38
Kuvio 9. GNSS-vastaanotin (Mosaic-go heading GNSS... n.d.) .....	39
Kuvio 10. GNSS-antenni (HX-CU7603A Helix Antenna n.d., muokattu) .....	39
Kuvio 11. Pacific Inertial PI-logger (Data logger n.d.) .....	40
Kuvio 12. Piloggerin konfigurointitiedosto .....	40
Kuvio 13. RS-485/422 moduuli (RS485 CLICK 5V n.d.).....	41
Kuvio 14. Lohkokaavio mittalaitteistosta.....	42
Kuvio 15. Mittalaitteiston paino .....	43
Kuvio 16. Mittalaitteiston kaksi kerrosta .....	43
Kuvio 17. Mittalaitteisto kasattuna.....	44
Kuvio 18. Kiihtyvyysanturin data eri lähteistä .....	46
Kuvio 19. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, x-akseli.....	47
Kuvio 20. Kiihtyvyysanturit, x-akseli, FFT, testilento 1.....	48
Kuvio 21. Gyroskoopit, x-akseli, FFT, testilento 1 .....	49
Kuvio 22. Kiihtyvyysanturit, x-akseli, PSD, testilento 2.....	52
Kuvio 23. DatCon ohjelma.....	57
Kuvio 24. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, x-akseli.....	58
Kuvio 25. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, y-akseli.....	58
Kuvio 26. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, z-akseli.....	59
Kuvio 27. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, z-akseli, 30 sekuntia .....	60
Kuvio 28. Virheiden kompensoiminen jälkiprosessoinnilla (What's IMU/GNSS Post-Processing... n.d.) .....	62
Kuvio 29. Dronen lasketut reitit.....	66

## Taulukot

Taulukko 1. Droneluokat (Lennättäminen avoimessa kategoriassa n.d., muokattu).....	12
Taulukko 2. Antureiden vertailu .....	36
Taulukko 3. Lennon 1 loki .....	45
Taulukko 4. Testilento 1, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot.....	48
Taulukko 5. Lennon 2 loki .....	50

Taulukko 6. Testilento 2, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot.....	51
Taulukko 7. Lennon 3 loki .....	55
Taulukko 8. Testilento 3, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot.....	61

# 1 Johdanto

Dronet ovat tulleet monille tutuiksi erityisesti ilmakuvaustarkoituksissa. Markkinoilla on yhä enemmän kuluttajille suunnattuja halpoja sekä kohtuuhintaisia laitteita ja myös vaativampaan harrastus- sekä ammattikäyttöön tarkoitettuja droneja. Laitteita alkaa olla jokaisessa hintaluokassa vaihtelevin ominaisuuksin lelulennokeista kymmeniä kiloja painaviin droneihin. Pienimmissä leludroneissa ei välttämättä ole kameraa, mutta yleisesti ottaen kuvausominaisuudet ovat dronessa tärkeä ja oleellinen käyttötarkoitus. Droneilla tehtävää kuvaustoimintaa on monenlaista ja laitteiden kuvauslaitteistot usein käyttötarkoituksen mukaan räätälöityjä. Monille dronesta sanana ensimmäisenä saattaa tulla mieleen kuluttajien harrastusdronet, jotka ovatkin hintaluokaltaan monien saavutettavissa nykyisin, ja ovat yleistyneet paljon. Yhä enemmän kuitenkin droneja käytetään myös ammattimaisempaan kuvaustoimintaan sekä viranomaiskäyttöön. Tavoitteena on voinut olla korvata perinteisempiä menetelmiä tai avustaa ja tehostaa toimintaa sekä kustannustehokkuutta.

Laitteiden kehittyessä ja hintojen laskiessa käyttötarkoitukset droneille ovat lisääntyneet yhä enemmän. Laitteita hyödynnetään niin etsintä- ja pelastustehtävissä ihmisten paikantamiseen kuin maataloudessa satojen ja eläinten tarkkailuun ja laskentaan. Yksi uusimmista siviili-ilmailun sovelluksista alkaa olla tavarantoimitus droneja käyttäen. Siviilikäytön lisäksi laitteet ovat suuressa roolissa myös sotilaskäytössä. Erityisesti viimeaikaiset tapahtumat Euroopassa ovat osoittaneet näiden laitteiden hyödyllisyyden ja monipuolisuuden hyvin monissa sotilaskäytön sovelluksissa. Laitteiden lukumäärät ja niiden hyödyntäminen siis kasvavat vauhdilla useilla aloilla.

Työn toimeksiantajana toimi Nordic Inertial, ja mukana yhteistyössä olivat myös MEMS-antureita kehittävä yritys sekä dronevalmistaja. Nordic Inertial on erikoistunut datan keräämiseen monista laitteista ja käyttötapauksista. Tämän lisäksi yrityksen vahvuuksia ovat datan prosessointi ja analysointi, johon on vuosien mittaan kehitetty useita tehokkaita ja tarkkoja algoritmeja. Työssä mukana oleva komponenttivalmistaja on kiinnostunut dronekäytön vaatimuksista antureille sekä nykytilanteen kartoittamisesta yleisesti käytössä olevien antureiden suorituskyvystä. Dronevalmistaja on samoin kiinnostunut nykyisten antureiden tarkkuudesta ja anturiyksilöiden välisistä eroista, sillä heillä on jonkin verran ollut ongelmia markkinoilla nykyisin olevien autopilottijärjestelmien kanssa.



MEMS-antureiden (Micro-Electro-Mechanical Systems) suorituskyky kasvaa jatkuvasti, mutta antureiden valmistuksessa on silti tehtävä kompromisseja, jotka vaikuttavat hintaan, valmistettavuuteen ja tarkkuuteen. Autopilottivaihtoehtoja on paljon ja niissä käytettyjen antureiden ja muiden komponenttien suorituskyvyt ja hintaluokat vaihtelevat. Dronejen lentodynamiikasta ja autopiloteissa käytettävistä anturifuusioalgoritmeista ja niiden vaikutuksista on jo tutkimustietoa. Tässä työssä kuitenkin haluttiin saada käytännön lentotesteillä tietoa antureiden ominaisuuksista ja niiden mahdollisesta vaikutuksesta dronen käyttäytymiseen eri lentotilanteissa.

Työ rajattiin koskemaan ammattikäyttöön tarkoitettua akulla toimivaa nelikopteria eli dronea, jossa on rungossa neljä moottoria. Kuluttajille suunnatuissa laitteissa ja niiden komponenteissa on yleisesti ottaen tiukempi hintakilpailu ja suorituskyvystä tingitään, jotta hintaa saadaan painettua alas. Työssä mukana ollut komponenttivalmistaja on lähinnä kiinnostunut isompien, usein ammatillisille suunnattujen, dronejen anturivaatimuksista. Nelikopteri valikoitui käyttöön myös siksi, että tällainen drone on hyvin tyypillinen kopterimalli ja toinen työssä mukana ollut yhteistyökumppani valmistaa juuri tällaisia isompia droneja.

Työssä perehdyttiin yleisesti droneihin, niiden sovelluksiin ja tekniikkaan niiltä osin, jotka liittyvät autopilottijärjestelmiin, antureihin ja dronen asento- ja paikkatietoon. Nykyisin yleisesti käytössä olevaan autopilottiohjelmistoon ja lennonohjausjärjestelmiin tutustuttiin ja tehtiin vertailua niissä käytetyistä antureista. Lisäksi yhteistyökumppanin dronella suoritettiin testilentoja, joista kerättiin dataa analysoitavaksi. Dronen kyytiin laitettiin vertailtavia laitteita ja dataa kerättiin näistä sekä dronen omista autopilotin antureista. Kerättyä dataa käytettiin antureiden toiminnan vertailuun lentodynamiikaltaan erilaisissa tilanteissa. Vaikka kiinnostuksen kohteena olivat isommat dronet, suoritettiin yksi vertaileva testilento myös pienellä kuluttajaluokan dronella.

## **2 Työn tausta ja tavoitteet**

Monenlaiset dronet ja niiden käyttötarkoitukset ovat lisääntyneet viime aikoina nopeasti ja yhä useammin myös ammattimaisessa toiminnassa vartenotettavana vaihtoehtona on dronen käyttö. Sillä voidaan korvata perinteisempiä menetelmiä kuten lentokoneen tai helikopterin käyttöä tai muuten vain tehostaa toimintaa sekä parantaa tehtävää suorittavien ihmisten turvallisuutta. Dronejen nopea määrän kasvu luo uusia tilaisuuksia liiketoiminnalle niin fyysisten komponenttien kuin ohjelmistoratkaisujen toimittamisen muodossa.

Työn toimeksiantajana toimi Nordic Inertial, joka on inertia-anturijärjestelmien kehittämiseen erikoistunut yritys. Nordic Inertial yhdistää data-analyysin, inertianavigointialgoritmit ja innovatiiviset laitteistot ratkaisujen löytämiseksi. Nordic Inertial on vuosien mittaan tehnyt töitä hyvin monen tyyppisten ajoneuvojen ja työkoneiden parissa. Projektista riippuen näihin laitteisiin asennetaan erilaisia antureita ja referenssilaitteita, joilla ajoneuvojen ja koneiden liikettä ja asentoja voidaan tarkasti mitata. Kerätyn datan perusteella voidaan kehittää uusia menetelmiä ja arvioida niiden toimivuutta liikkeen määrittämiseen ja vertailla eri ratkaisujen käyttökelpoisuutta.

MEMS-inertia-anturit on kehittyneet paljon ja niillä pystytään yhä parempiin tarkkuuksiin. Tällaiset anturit ovat samalla pienikokoisia, kustannustehokkaita ja vähävirtaisia ja yritys hyödyntääkin niitä monenlaisissa sovelluksissa, joissa vaaditaan suurta tarkkuutta. Nordic Inertialin algoritmikirjasto on kehittynyt vuosien mittaan laajan inertianavigoinnin, odometrian, stokastisen suodatuksen ja koneoppimisen aloilla tehdyn tutkimuksen ansiosta. Yrityksen kehittämät kattavat algoritmit helpottavat ja nopeuttavat siirtymistä antureista saatavasta raakadatasta valmiiseen toimivaan ratkaisuun.

Myös dronejen ohjausyksiköissä käytetään yleisesti MEMS-tekniikkaan perustuvia inertia-antureita mittaamaan liikettä ja asentoa kolmiulotteisen avaruuden kaikkien kolmen akselin suhteen. Koska dronejen käyttö monilla aloilla lisääntyy nopeasti, ovat ne uusi ja mielenkiintoinen osa-alue myös Nordic Inertialille. Yrityksellä on myös MEMS-antureita kehittävä yhteistyökumppani, jonka mielenkiintona on droneissa käytettävien antureiden suuri kaupallinen potentiaali. Tutkimusta tehtiin yhteistyössä myös erään dronevalmistajan kanssa, jolla on ollut jonkin verran huonoja kokemuksia nykyisin käytössä olevien lennonohjausyksiköiden kanssa. Ongelmien syynä epäiltiin olevan ohjausyksiköiden inertia-antureiden huono tarkkuus. Tutkimuksella haluttiin selvittää mitä dronen inertia-antureilta vaaditaan ja minkälaista suorituskykyä tällaisilla antureilla nykyisin tyypillisesti on.

### **Työn rajaus**

Droneja on hyvin monenlaisia erilaisiin käyttötarkoituksiin ja drone-termi voi tarkoittaa monen tyyppisiä laitteita, jotka kulkevat joko vedessä, maalla tai ilmassa. Ilma-alustyyppisten dronejen suosio on viime vuosina kasvanut hyvin paljon ja Sesarin (European Drones Outlook Study 2016) tutkimuksen mukaan vuoteen 2050 mennessä Euroopassa saattaisi olla 400 000 kaupallisessa- tai

viranomaiskäytössä olevaa lentävää dronea. Maailmanlaajuisesti nämä lukemat olisivat vielä selvästi isompia. Saman tutkimuksen arvion mukaan harrastuskäytössä olevien dronejen määrä saataisi olla seitsemän miljoonaa. Tällaisille massamarkkinoille mukaan pääseminen on houkutteleva ajatus etenkin komponenttien toimittamisen kannalta. Ilma-alustyyppisiä droneja on kuitenkin myös monenlaisia. Lentokoneita muistuttavia kiinteäsiipisiä, perinteisen helikopterin näköisiä sekä moniroottorisia droneja. Tässä tutkimuksessa keskityttiin lentävään droneen ja näistä vielä tarkemmin nelikopteriin. Tällainen dronetyyppi on yleinen ja suosittu monissa sovelluksissa kuten ilmakuvauksessa, kartoituksessa ja ympäristön tarkkailussa.

## 3 Drone

### 3.1 Dronen määritelmä ja lainsäädäntö Euroopan unionissa

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, joka vastaa Suomessa dronesäädöksistä, käyttää dronea yleisterminä miehittämättömälle ilma-alukselle (UAV, unmanned aerial vehicle) tai miehittämättömälle ilma-alusjärjestelmälle (UAS, unmanned aircraft system). Tällainen ilma-alus toimii joko automaattisesti, autonomisesti tai sitä voidaan kauko-ohjata. (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023.)

Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto, EASA, käyttää Traficomin tavoin myös yleisesti drone termiä, kun viitataan miehittämättömiin ilma-aluksiin. EASA:n määritelmän mukaan automaattisesti toimiva drone voi lentää itsenäisesti ennalta määriteltujen reittien mukaisesti. Dronesta vastaavan kauko-ohjaajan on kuitenkin oltava valmis ottamaan drone hallintaansa yllättävien olosuhteiden varalta, joihin laitteen ennalta tehty ohjelmointi ei osaa reagoida. Autonominen drone sen sijaan kykenee suorittamaan lennon turvallisesti myös ilman ohjaajaa tekoälyn avulla. Tällaisen dronen on mahdollista toimia myös yllättävissä tilanteissa itsenäisesti ja turvallisesti. (Drones (UAS) n.d.)

Euroopan unionin alueella on voimassa yhteiset ilmailun säädökset ja määräykset, joita myös jokaisen dronelennättäjän on noudatettava. Kansainvälisten määräysten lisäksi Suomessa on kansallisia säädöksiä kuten ilmailulaki ja Traficomin ilmailumääräykset. Nämä määräykset pyrkivät helpottamaan dronejen käytön kehitystä sekä samalla takaamaan turvallisuuden ilmailuliikenteen

lisääntyessä nopeasti. Nämä säädökset ja määräykset koskevat niin dronevalmistajia kuin loppukäyttäjiäkin. Dronet on valmistettava vaatimusten mukaisesti ja valmistaja tai maahantuoja vakuuttaa, että tuote täyttää Euroopan Unionin terveys-, ympäristö- ja turvallisuusvaatimukset. (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023.)

Dronen käyttäjille on Traficomın toimesta määritelty vastuita ja vaatimuksia, joista osa koskee dronen operaattoria ja osa kauko-ohjaajaa. Dronen operaattori tarkoittaa vastuussa olevaa joko luonnollista tai oikeushenkilöä ja kauko-ohjaaja henkilöä, joka lennättää dronea sillä hetkellä. Yksityiskäytössä kuitenkin operaattori ja kauko-ohjaaja ovat useimmiten sama henkilö, yrityskäytössä operaattori on oikeushenkilö. Suomessa Traficom ylläpitää dronetoimijarekisteriä, johon operaattoreiden pitää tarvittaessa rekisteröityä. Lisäksi kaikkiin operaattorin käytössä oleviin droneihin pitää kiinnittää sama operaattoritunnus. Rekisteröinnin lisäksi Traficom luettelee myös seuraavia asioita operaattorin velvollisuuksiksi:

- Toimintamenetelmien kehittäminen
- Radiotaajuuksien tehokkaan käytön varmistaminen
- Kauko-ohjaajan nimeäminen jokaiselle lennolle
- Varmistaminen, että dronen käyttöohjeisiin on perehdytty riittävästi
- Dronen paikkatietoisuusjärjestelmän päivityksistä huolehtiminen
- Toiminnassa mukana olevien ihmisten tiedottaminen riskeistä
- Toiminnassa mukana olevien suostumuksen varmistaminen

Traficom (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023) määrittelee lisäksi kauko-ohjaajalle muutamia vaatimuksia. Ohjaajan on tunnettava määräykset ja rajoitukset, joita lentoalueella sovelletaan ja käytettävään droneen pitää olla perehtynyt sekä tuntea sen toiminta ja järjestelmät riittävän hyvin. Ohjaajan on huolehdittava omasta lennätyskunnostaan sekä huomioitava ympäristö ja siellä tapahtuvat muutokset. Väsymyksen, alkoholin tai huumaavien aineiden alaisena ei ole sallittua suorittaa lentoa. Lennon aikana on tarkkailtava muita ilma-aluksia, ihmisiä ja eläimiä ja arvioitava vaikuttavatko nämä tekijät lennon turvallisuuteen. Toisin sanoen kauko-ohjaaja on aina vastuussa itse lennosta, vaikka operaattori ja kauko-ohjaaja olisivat eri tahot. (Mt.)

Traficom jakaa dronet kahteen kategoriaan, moniroottoriin ja kiinteäsiipisiin. Kiinteäsiipiset muistuttavat perinteistä lentokonetta, kun taas moniroottoriset dronet ovat enemmän helikopterin kaltaisia käyttäen useimmiten joko neljää, kuutta tai kahdeksaa moottoria. Kiinteäsiipinen drone

tarvitsee riittävän lentonopeuden, jotta siipi tuottaa riittävästi nostovoimaa, kun taas moniroottorisen dronen on myös mahdollista leijua paikoillaan. Traficomin mukaan sekä kiinteäsiipisiä että moniroottorisia droneja käytetään yleisesti moniin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Kiinteäsiipiset alukset ovat nopeampia ja niillä on monesti myös pidempi lento- ja toiminta-aika ja niitä käytetäänkin yleensä esimerkiksi laajempien alueiden mittaamiseen ja kartoittamiseen. Moniroottorinen drone on kuitenkin yleisempi ja tällaisia aluksia käytetään hyvin usein esimerkiksi video- ja valokuvaukseen. (Mt.)

Dronetoiminta on jaettu kolmeen kategoriaan, avoin-, erityinen- ja sertifioitu- tai matalan, keskitason ja korkean riskin -kategoriat. Näistä sertifioitu-kategorian lainsäädäntö on vielä kehitteillä ja tulee koskemaan tulevaisuudessa korkean riskin toimintaa kuten droneilla suoritettavaa ihmisten kuljetusta tai tavaroiden toimitusta paikallisesti kaupunkialueilla tai kansainvälisillä lennoilla. Nämä määräykset tulevat olemaan hyvin samankaltaisia kuin tavanomaisessa lentoliikenteessä nykyisin, sillä riskit ovat samanlaisia. (Certified Category n.d.; Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023)

Tällä hetkellä suurin osa dronetoiminnoista tapahtuu avoin-kategoriassa. Avoin-kategoria jaetaan kolmeen alakategoriaan: A1, A2, A3. Nämä eroavat toisistaan sallitun dronen painon, toimintaympäristön ja koulutusvaatimusten osalta. Lisäksi 1.1.2024 alkaen EU:n uusien säädösten mukaisesti avoimessa kategoriassa tehdasvalmisteisella dronella on oltava virallinen luokitus C0, C1, C2, C3 tai C4. Jos käytössä on vanhempi drone, jolla virallista luokitusta ei ole, voi olla, että sillä ei enää uusien säädösten mukaisesti saa lentää samoin kuin ennen 1.1.2024.

Uusien säädösten mukaan alakategoria A1 sallii korkeintaan 900 gramman painoisella dronella (C1) lentämisen lähellä asutusta ja ihmisiä. Ihmisten päältä lentämistä on kuitenkin vältettävä. Jos käytettävä drone painaa alle 250 grammaa (C0), ei ohjaajan tarvitse suorittaa mitään koulutusta, mutta Traficomin sivuilla itsenäisesti suoritettavan teoriakokeen tekeminen on silti suositeltavaa. Painavammalla, korkeintaan 900 grammaisella, dronella teoriakokeen suoritus on pakollista. (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023; Open Category - Low Risk... n.d.)

Alakategoria A2 sallii korkeintaan neljä kilogrammaa painavan dronen (C2) lennättämisen. Tällaisella dronella ei saa lentää yhtä lähellä toimintaan kuulumattomia ihmisiä kuin A1-kategoriassa,

mutta asutusalueella lentäminen on kuitenkin sallittua. Jos dronessa on erityinen hidaslento-moodi, etäisyys ihmisiin voi olla viisi metriä. Muussa tapauksessa etäisyyttä on pidettävä 30 metriä, korkeintaan 30 metrin lentokorkeudella. Yli 30 metrin korkeudessa mitä korkeammalla lennetään, sitä suurempaa vaakasuoraa etäisyyttä ihmisiin on pidettävä. A2-kategoriassa toimiessa pitää olla suoritettuna verkkoteoriakokeen lisäksi omatoiminen käytännön koulutus sekä A2-lisäteoriakoe. Omatoimista käytännön koulutusta pitää tehdä alueella, jossa ulkopuolisille ei aiheudu vaaraa, käytännössä vähintään 150 metrin etäisyydellä ihmisistä ja asutuksesta. Harjoittelu pitää tehdä vastaavanlaisella dronella kuin minkäläistä aikoo lento-operaatioissaan myöhemmin käyttää. Lisäteoriakoe on maksullinen koe, joka suoritetaan valvotuissa olosuhteissa, kun verkkoteoriakoe ja käytännön koulutus on ensin suoritettu. Kokeessa testataan tietämystä muun muassa sään vaikutuksista ja dronen suorituskyvystä eri lentotilanteissa sekä riskien hallinnasta. (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023; Open Category - Low Risk... n.d.; Valvottu lisäteoriakoe toiminnan 2023.)

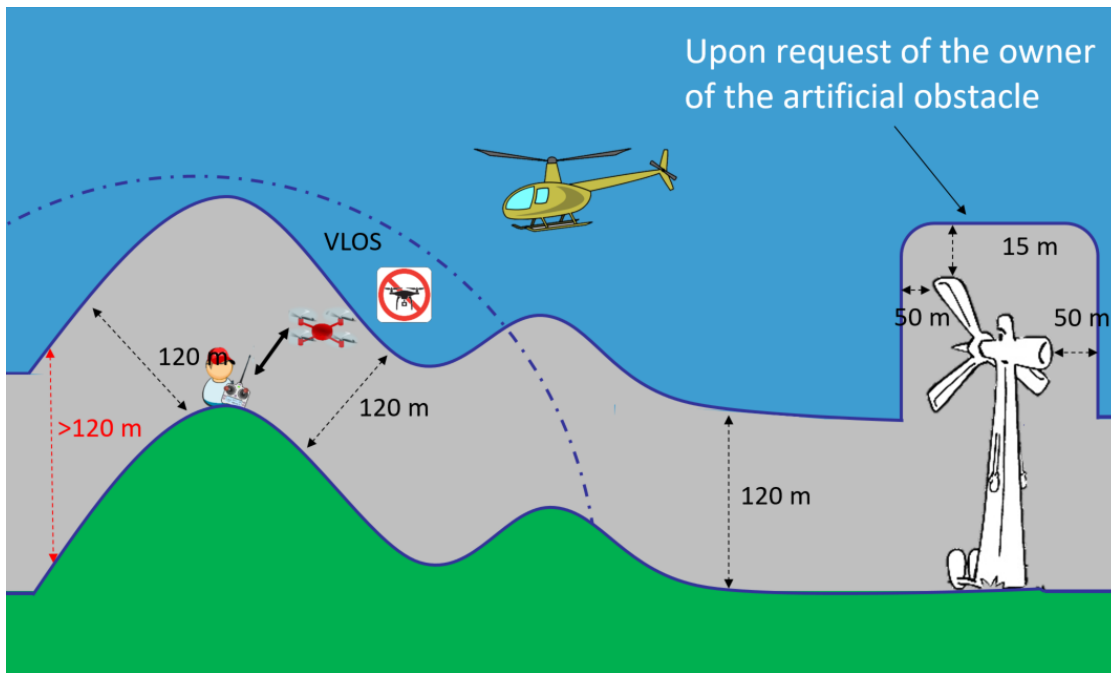
Alakategoriaan A3 kuuluvat yli neljä kilogrammaa painavat dronet eli luokat C3 ja C4, joissa suurin sallittu paino on 25 kilogrammaa. C4-luokan dronen käyttövoimaa ei ole rajattu, muissa luokissa dronet voivat olla vain sähkökäyttöisiä. Lisäksi C4-luokassa on kielletty sellainen autopilotti, joka voisi puuttua suunniteltuun lentorataan, kauko-ohjaajan on siis vastattava joka hetki dronen hallinnasta. A3-kategoriaan kuuluvat myös itserakennetut yli 250 grammaa painavat dronet tai vanhemmat dronet, joilla ei ole virallista C-luokitusta. A3-kategoriassa voivat lentää kaikki muutkin dronet sen lisäksi, että niillä on mahdollista operoida myös A1 tai A2-kategoriassa. Sallittu lentäminen tässä kategoriassa on määritelty ihmisistä, asuin-, tehdas- ja puistoalueista vähintään 150 metrin etäisyydellä tapahtuvaksi. Taulukossa 1 on yhteenveto droneluokista ja muutamista niistä koskevista säädöksistä.

Taulukko 1. Droneluokat (Lennättäminen avoimessa kategoriassa n.d., muokattu)

<b>Dronen C-luokitus</b>	<b>C0</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
Maks. paino [kg]	0,25	0,9	4	25	25
Alakategoriat	A1, A3	A1, A3	A2, A3	A3	A3
Maks. nopeus [m/s]	19	19	-	-	-
Automaattiohjaus sallittu	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei
Etätunnistus pakollinen	ei	kyllä	kyllä	kyllä	ei
Käyttövoima	sähkö	sähkö	sähkö	sähkö	ei rajausta

Kaikessa avoimen kategorian toiminnassa dronen pitää pysyä aina kauko-ohjaajan suorassa näköyhteydessä (VLOS, Visual Line Of Sight) (FAQ n. 116465 2020). Näin dronea lennättäessä voidaan samalla tarkkailla sekä katseella että kuulon perusteella muita ilma-aluksia tai vastaantulevia esteitä ja tarvittaessa muuttaa lentosuuntaa tai korkeutta. Kuten Traficomien ohjeistuksessa edellä sanottiin, kauko-ohjaaja on aina vastuussa dronen lennätyksestä.

Avoin-kategoria myös rajoittaa yleisesti ottaen lentokorkeuden 120 metriin. Erilliset ilmatilavyöhykkeet tai väliaikaiset rajoitukset saattavat vielä muuttaa suurinta sallittua korkeutta. Jos lennätys ei tapahdu tasaisen maaston päällä, voidaan dronen korkeutta muuttaa maaston muotoja seuraten. Tällöin etäisyys lähimpään maaston kohtaan tulee pitää alle 120 metrissä. Tarvittaessa yli 120 metrin korkuisen esteen yli voidaan lentää korkeintaan 15 metrin ylityksellä, jos tarkoituksena on suorittaa jonkinlaista tarkastusta esteeseen liittyen. (FAQ n. 116465 2020.) Kuviossa 1 nähdään EASAn ohjekuva sallituista lentokorkeuksista. Dronen ilmoittama lentokorkeus voi olla kuitenkin vain suhteellinen korkeus lähtöpisteeseen nähden eikä aluksen todellinen korkeus sen hetkisestä maastonmuodosta. Kauko-ohjaajan on syytä huomioida tämä sekä olla tietoinen oman dronsa tekniikasta ja ohjaimen ilmoittamista parametreista, pitääkseen aluksen sallitun lennon rajoissa.



Kuvio 1. Sallittu etäisyys maanpinnasta (FAQ n. 116465 2020)

Kaikissa avoimen toiminnan kategorioissa operaattorin on oltava täysi-ikäinen ja suomessa kauko-ohjaajan vähintään 12-vuotias. Kauko-ohjaajan tulee huolehtia kaikista ilmatilavyöhykkeiden pysyvistä ja väliaikaisista kielto-, rajoitus-, ja vaara-alueista. Lisäksi aina, jos käytettävä drone painaa yli 250 grammaa tai sisältää henkilötietojen tallentamiseen kykenevän anturin, kuten kameran tai mikrofonin, pitää käyttäjän rekisteröityä operaattoriksi edellä mainittuun toimijarekisteriin. Tämä koskee myös esimerkiksi itse rakennettuja alle 250 grammaa painavia droneja, jos ne sisältävät kyseisiä antureita. Tästä poikkeuksia voivat olla vain EU-direktiivin mukaiset leludronet. (Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen... 2023.)

### 3.2 Dronen muut määritelmät

Traficomista ja EASA:sta poiketen Austin (2010) määrittelee dronen ilma-alukseksi, jonka täytyy kyetä lentämään operaattorin näkökentän ulkopuolelle (BVLOS, Beyond Visual Line Of Sight) suorittamaan ennalta määriteltä tehtävää ja lentoreittiä. Hänen mukaansa dronella ei ole omaa kyvykkyyttä älykkääseen toimintaan eikä se myöskään kommunikoi lennon aikana. Lennon tulokset esimerkiksi valokuvat saadaan vasta dronen palattua takaisin lähtöpaikkaan. (Austin 2010, k1.)



Austin määrittelee UAV:n lennokiksi, jossa on dronesta poiketen enemmän automatiikkaa ja joka kykenee kommunikointiin ohjaimen kanssa. Tämä mahdollistaa lennon aikana esimerkiksi UAV:n telemetriatietojen ja vaikkapa lennokin mukana kulkevan kameran kuvan välittämisen reaaliaikaisesti ohjaimeen. UAS määritelmä Austinin mukaan pitää sisällään UAV:n lisäksi muun muassa mukaan lähtevän hyötykuorman, ohjainlaitteen tai ohjaus- ja hallinta-aseman, aluksen laukaisualustan, kuljetusjärjestelmän sekä muita mahdollisesti tarvittavia laitteistoja. UAS termi korostaakin pelkän UAV:n lisäksi muiden oheislaitteiden tärkeyttä. (Mts.)

Miehittämättömiin ilma-aluksiin viitattiin alun perin lyhenteellä RPV (Remotely Piloted Vehicle, etänä ohjattava ajoneuvo). Erityyppisten kauko-ohjattavien alusten ja ajoneuvojen yleistyttyä oli otettava käyttöön erilaisia termejä, joilla nämä saadaan erotettua. UAV on yksi näistä termeistä, jolla siis viitataan nimenomaan ilma-aluksiin. (Mts.) Nykyisin on paljon myös maalla ja veden pinnalla sekä veden alla operoivia ajoneuvoja ja robotteja, jotka saattavat olla joko kauko-ohjattavia tai itsenäisesti liikkuvia, ks kuvio 2. Unmanned Systems Technology (Unmanned Systems News & Articles n.d.) raportoi aiheeseen liittyvistä uutisista ja uusista tuotteista sekä ratkaisuista. He käyttävät seuraavia termejä:

- Ilma-alukset
  - UAV
  - UAS
- Maalla kulkevat ajoneuvot ja robotit
  - UGV (Unmanned Ground Vehicle, miehittämätön maa-ajoneuvo)
- Veden pinnalla ja veden alla kulkevat alukset
  - ASV (Autonomous Surface Vehicles, autonominen pinta-alus)
  - USV (Unmanned Surface Vehicles, miehittämätön pinta-alus)
  - AUV (Autonomous Underwater Vehicle, autonominen vedenalainen ajoneuvo)
  - UUV (Uncrewed Underwater Vehicle, miehittämätön vedenalainen ajoneuvo)
  - ROV (Remotely Operated Vehicle, etänä operoitava ajoneuvo)



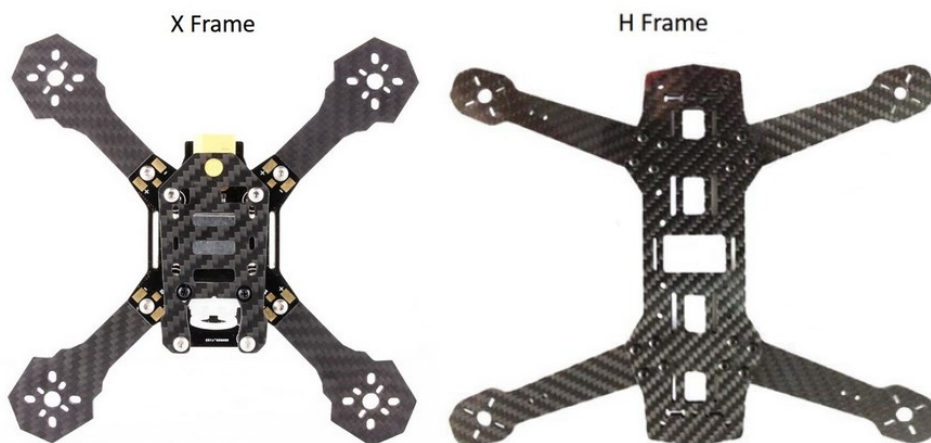
Kuvio 2. Eri dronemalleja (Different Types of Drones and Uses... 2024.; Different Types of Drones Explained... n.d.; Becher 2023; Free images of Drone n.d.)

UAV on siis erityisesti ilmassa toimiva drone. Nykyisin harraste-, lelu- ja ammattikäyttöön tarkoitettujen ilma-alusten yleistyttyä, arkikielessä monella sanasta drone todennäköisesti tulee mieleen ensimmäiseksi taivaalla lentävä kauko-ohjattava moniroottorinen alus, vaikka droneja voi olla monenlaisia. Tästä kertonee myös Traficom ja EASAn käyttämä drone-termi UAV aluksiin viitatessa. Drone ja UAV ovat siis usein synonyymejä, mutta UAV on näistä terminä tarkempi. Myös tämän työn kontekstissa käytetään jatkossa termiä drone, jolla viitataan UAV:hen ja vielä tarkemmin nelimoottoriseen kopteriin, jollaisia tämän työn yhteydessä käytettiin.

### 3.3 Dronen rakenne

Nelikopterin, tässä työssä dronin, perusrakenne on yleisesti ottaen samanlainen aluksesta toiseen. Aluksen runko on keskeinen osa, joka määrittää dronin koon ja vaikuttaa valittaviin kom-

ponentteihin ja lento-ominaisuuksiin. Rungon koko, materiaali ja geometria valitaan dronen käyttötarkoituksen mukaan. Kaksi yleistä nelikopterin runkogeometriaa ovat kuviossa 3 nähtävät X- ja H-muoto. Näistä on lisäksi useampia variaatioita, joissa rungon muoto vaihtelee hieman. Kuvion 3 H-runko on myös tällainen muunnos sillä moottorin varret eivät ole täysin kohtisuorassa sivuille rungon keskiosaan nähden. Materiaalivaihtoehtoja on useita ja valintaa ohjaavat halutut ominaisuudet ja hinta. Rungon on oltava kevyt, mutta kuitenkin jäykkä, jotta dronen rakenne ei tärisee liikaa käytössä. GensTattu-sivuston (How to choose... 2018) mukaan yleisiä materiaaleja ovat hiilikuitu, lasikuitu, alumiini, muovi sekä vaneri- ja MDF-levyt. (How to choose... 2018; The Complete Guide... 2017.) Nykyisin 3D-tulostuksen myötä rakennetta voidaan myös optimoida entistä enemmän ja tulostaa joko muovista tai metallista juuri halutunlainen runkorakenne. Esimerkiksi Nordic Drones käyttää titaanista 3D-tulostettuja runkoja tuotteissaan (Dronejärjestelmät vaativaan ammattikäyttöön n.d.).



Kuvio 3. Nelikopterin rungon muodot (The Complete Guide... 2017, muokattu)

Muita keskeisiä dronen osia ovat lennonohjausyksikkö, joka toimii dronen keskuksena ja huolehtii kaiken tiedon prosessoinnista. Se sisältää lennon vakautukseen tarvittavat anturit ja voi lisäksi ottaa vastaan tietoa myös ulkopuolisista datalähteistä esimerkiksi satelliittipaikannusmoduulilta, esteentunnistusanatureilta, kompassilta ja radiovastaanottimilta. Radiolähettämiä ja -vastaanottimia tarvitaan, jotta saadaan välitettyä kauko-ohjaimen komennot dronelle sekä lähetettyä telemetriatietoja takaisin operaattorille päin. Akku ja virranhallintayksikkö huolehtivat virran ja jännitteen jakamisesta kaikille dronen komponenteille. Virranhallintayksikkö voi olla myös lennonohjausyksik-

köön sisäänrakennettuna erillisen komponentin sijaan. Moottorit ja potkurit huolehtivat tarvittavan työntövoiman aikaansaamisesta. Nelikopterissa on nimensä mukaisesti neljä moottoria, näistä kaksi pyörittävät potkureita myötäpäivään ja kaksi vastapäivään. Näin potkureiden tuottamat vääntövoimat kumoavat toisensa ja drone ei lähde pyörimään hallitsemattomasti. Rungon koko vaikuttaa erityisesti potkureiden koon valintaan, sillä moottorivarsien etäisyys päästä päähän asettaa potkureille suurimman mahdollisen koon. Jokaista moottoria varten tarvitaan vielä nopeudensäädinyksikkö, nämä voivat olla erillisiä tai useamman säätimen sisältävä moduuli. Lennonohjausyksikkö ohjaa moottoreiden nopeudensäätimiä omien antureidensa sekä kauko-ohjaimen signaalien perusteella. Nopeudensäätimille on nykyisin useita protokollia, joilla lennonohjausyksikkö voi niitä ohjata. Näillä on eroja ohjaussignaalien päivitysnopeuden ja häiriösietoisuuden suhteen, ja jotkin protokollat mahdollistavat myös kaksisuuntaisen kommunikoinnin nopeudensäätimen ja lennonohjausyksikön välillä. (Anatomy of A Drone... n.d.; Electronic Speed Controller... 2023.)

Rungon koko ja dronen muut ominaisuudet kuten kuormankantokyky, akun koko ja lennonohjausyksikön saatavilla olevat liitännät vaikuttavat siihen mitä muita lisäosia voidaan ottaa käyttöön. Huomioon tulee ottaa myös droneja koskevat säädökset ja valitun droneluokituksen mahdolliset rajoitukset. Esimerkiksi satelliittipaikannusmoduulit ja erilaiset kamerat ja niiden vakautukseen liittyvät komponentit ovat yleisiä droneissa. Ammattikäyttöön tarkoitetuissa droneissa voi olla erikoisempia lisäosia kuten lämpökameroita tai pelloille levitettävän torjunta-aineen suihkuttamiseen soveltuvia laitteistoja (Drone heavyweights DJI and... 2023; Rescue Services n.d.).

### **3.4 Dronen sovelluskohteita**

Dronen käyttötapaukset ovat viime vuosina kasvaneet nopeasti tekniikan kehittyessä ja hintojen laskiessa. Yhä useammilla aloilla on kustannustehokasta käyttää droneja apuna. Joissain tapauksissa näillä voidaan korvata aikaisempia menetelmiä työn tekemiseen tai tehostaa suoritettavan työn tekemistä. Kummassakin tapauksessa tavoitellaan tehokkuuden, työturvallisuuden tai kustannusten säästöä. Sesar (European Drones Outlook Study 2016) on arvioinut vuoden 2016 raportissaan, että vuoteen 2050 mennessä harrastus- ja vapaa-ajan käytössä olevia droneja olisi Euroopan laajuisesti käytössä jo seitsemän miljoonaa. Kaupallisesti hyödynnettäviä sekä viranomaiskäytössä olevia droneja raportin mukaan saattaisi olla käytössä 400 000. (European Drones Outlook Study 2016, 5.)

Sekä Austin (2010) että McGriffy (2016) mainitsevat useita dronen käyttötapauksia siviili ja viranomaiskäyttöön. Molemmat tuovat esiin valo- ja videokuvauskäytön yhtenä merkittävimmistä käyttötarkoituksista. (Austin 2010, 1; McGriffy 2016, 19.) Tällaisten harrastus- ja ammattikäyttöön soveltuvien kameralla varustettujen dronejen tarjonta onkin kasvanut paljon. Yhtenä esimerkkinä voitaisiin mainita DJI, joka valmistaa moniin tarkoituksiin droneja. Yrityksen valikoimassa on paljon kuluttajille sekä ammattikäyttöön suunnattuja kuvausdroneja sekä varsinaisiin työtehtäviin tarkoitettuja laitteita, esimerkiksi maatalouteen ja pelastustehtäviin soveltuvat dronet (DJI n.d.). DJI on varmasti dronenharrastajillekin yksi tunnetuimmista valmistajista nykyisin. DJI on kiinalainen valmistaja, joka on aloittanut toimintansa 2006 ja on sittemmin kasvanut kansainväliseksi yritykseksi, jolla on toimipisteitä useissa maissa ympäri maailman (About DJI n.d.). Kirjoitushetkellä yrityksen uusien kuluttajille suunnattu kuvausdrone on Mini 4 Pro -malli, joka on käyttövalmis helppo kameradrone. Käyttäjän ei tarvitse säätää itse mitään ja laite on heti valmis käyttöön. Laite huolehtii itselennonvakautuksesta, osaa laskea jäljellä olevaa lentoaikaa akun varauksen perusteella, on varustettu törmäysantureilla ja osaa palata tarvittaessa takaisin lähtöpisteeseen ohjaimen signaalin katketessa. Tällaiset helppokäyttöiset dronet löytävät tiensä yhä useamman kuluttajien käsiin tarjonnan lisääntyessä ja hintojen laskiessa kuten voidaan todeta myös aikaisemmin mainitun Sesarin (European Drones Outlook Study 2016, 5) raportin ennusteista.

Ammattimaisempaa kuvauskäyttöä droneille löytyy McGriffyn (2016) mukaan esimerkiksi elokuva-tuotannosta. Hän mainitsee, että aikaisemmin elokuvien tekijät ovat käyttäneet ilmakuvien saamiseen radio-ohjattavia helikoptereita, mutta nämä olivat isoja, kalliita ja vaikeita lentää. McGriffyn mukaan nämä on sittemmin korvattu droneilla, joita on huomattavasti helpompi lentää nykyaikaisen ohjaus- ja säätöjärjestelmien ansiosta. Toisena esimerkkinä hän mainitsee kiinteistöjen ja maanomaisuuden kuvaamisen ilmasta käsin ja toteaa tällaisen kuvaustoiminnan olleen dronikäytön kaupallistamisessa yksi ensimmäisistä yritystoiminnan muodoista. (McGriffy 2016, 19.)

Ilmakuvausta voidaan hyödyntää paljon muihinkin tarkoituksiin edellä mainittujen lisäksi ja sekä Austin (2010, 1) että McGriffy (2016, 20) mainitsevat muun muassa pelastus- ja etsintätehtävät esimerkkeinä dronejen viranomaiskäytöstä. Käyttötarkoituksia voi löytyä niin poliisilta, pelastuslaitokselta kuin rannikkovartiostoltakin. Kuten aiemmin mainittu dronen käytöllä voidaan tavoitella tehtävän tehokkaampaa suorittamista, työturvallisuutta tai kustannusten säästöä. Droneilla on helpompaa ja halvempaa tutkia onnettomuusalueita, suorittaa kadonneiden ihmisten etsintää,

suorittaa tarkkailua erinäisiin tarkoituksiin tai saada parempi kokonaiskuva tapahtumista ja ympäristöstä, jonka perusteella tehdä päätöksiä. McGriffy mainitsee, että monia näistäkin tehtävistä suoritettiin aikaisemmin helikoptereilla tai ultrakevyillä lentokoneilla. (Austin 2010, 1–2; McGriffy 2016, 20.) Näillä on myös etuja droneen verrattuna vaikkapa toimintamatkan osalta, mutta on helppo nähdä kuinka dronen käyttö on nopeampaa ja vaivattomampaa rajatulla alueella, jossa aluksen toimintasäde ei muodostu ongelmaksi. Lisäksi voidaan välttää miehitetyn aluksen käyttöä, joka itsessään pienentää tehtävän riskejä.

Jo esimerkkinä mainittu DJI valmistaa droneja myös vaativampaan ammatti- ja viranomaiskäyttöön ja tällaisissa droneissa voi olla kahdennettuja järjestelmiä luotettavuuden ja turvallisuuden lisäämiseksi kriittisissä tehtävissä. Näitä voivat olla muun muassa kahdennetut akkujärjestelmät, kommunikointilinkit ja törmäys- sekä ohjausjärjestelmän anturit (Matrice 300 RTK... n.d.). Kuluttajalaitteisiin verrattuna näissä on tarkemmat kamerat paremmilla zoom-ominaisuuksilla, pidemmät toimintamatkat, kuormankantokykyä sekä tavallisten kameroiden lisäksi mahdollisesti myös korkean resoluution lämpökameroita. Erityisesti lämpökamerat voivat helpottaa henkilöiden etsintää haastavissa tai hämärissä olosuhteissa tai voivat esimerkiksi auttaa pelastuslaitosta saamaan tulipalojen tapauksessa paremman tilannekuvan tarkastelemalla ympäristöä ja henkilöiden sijaintia savupilvien lävitse. (Rescue Services n.d.; Firefighting n.d.; Enterprise. Drone Solutions... n.d.)

Alvaradon (2022) artikkelissa Drone Industry Insightsin tutkimuksen mukaan kolme eniten droneja ammattimaisesti hyödyntävää teollisuuden alaa olivat energia, rakennus ja maatalous. Kaikilla näillä aloilla suuressa roolissa on droneilla tehtävä maanmittaus ja kartoitus sekä tarkastukset. Alvarado ja Austin (2010) molemmat listaavat energiateollisuuden esimerkkeinä kaasu- ja öljyputkien sekä voimalinjojen tarkastukset. Myös Alvarado toteaa, kuinka dronea käyttämällä vältetään riskejä, kun ketään ei tarvitse lähettää mahdollisesti vaarallisiin olosuhteisiin vaan tarvittavat tiedot saadaan turvallisesti ilmasta käsin miehittämättömällä aluksella. Maataloudesta molemmat mainitsevat droneilla tehtävät eläinten ja satojen tarkastukset ja laskennan sekä torjunta-aineiden levityksen pelloille. (Alvarado 2022; Austin 2010, 1–2.)

DJI:n maatalouteen keskittyvän yksikön raportti (Agricultural Drone Industry... 2022) mainitsee, että Japanissa kehitettiin jo 1987 ensimmäinen drone, jonka tarkoituksena oli suojella satoja tuho-

laisilta ja rikkaruohoilta. Raportin mukaan nykyisin yli 20 % Japanin viljelysmaista hyödyntää tämänkaltaisia droneja. DJI perusti oman maatalousyksikkönsä vuonna 2015 kehitettyään ensimmäisen käyttötarkoitukseen soveltuvan dronensa. Samana vuonna myös toinen yritys, XAG, julkaisi vastaavanlaisen dronen ja nykyisin raportin mukaan useat muutkin yritykset kehittävät droneja maatalouden tarpeisiin. (Agricultural Drone Industry... 2022.) Aasian ja Tyynenmeren alueen teknologiauutisia raportoiva KrAsia (Drone heavyweights DJI and... 2023) kertoo uutisessaan, että DJI ja XAG ovat nykyisin kaksi johtavaa maatalousdronen valmistajaa Kiinassa. Yritysten kova kilpailu on johtanut sekä selvään hintojen laskuun että tekniikan kehittymiseen yhä paremmaksi. (Drone heavyweights DJI and... 2023.) Novatelin vuoden 2018 lehden julkaisussa (Velocity Magazine 2018) käsitellään XAG:n droneja ja niiden tuomia hyötyjä maataloudessa. Julkaisussa kerrotaan kuinka dronekäytöllä saadaan lisättyä tehokkuutta ja turvallisuutta ruuan tuotannossa. Ennen droneja torjunta-aineita levitettiin joko käsiruiskuilla, traktorilla tai pienlentokoneilla. Käsiruiskuja käyttämällä kuitenkin työntekijät saattavat altistua suurille torjunta-ainepitoisuuksille, traktorit voivat kulkiessaan tuhota osan sadosta ja pienkoneiden käyttö voi olla kallista. Tarkoilla antureilla varustetulla dronella voidaan sen sijaan levitys suorittaa täsmällisesti oikeisiin kohtiin altistamatta ihmisiä kemikaaleille ja murskaamatta osaa sadosta. XAG toteaa, että he pyrkivät tuotteillaan mahdollistamaan pienemmät torjunta-ainemäärät ja veden käytön ja näin parantamaan ruuan tuotannon tehokkuutta, turvallisuutta ja kustannustehokkuutta ympäri maailman. (Velocity Magazine 2018, 24–28.)

Dronekilpailut ovat myös kasvattaneet suosiotaan paljon ja tällaisen kisaamisen ympärille on muodostunut jo useampia organisaatioita. Kaksi esimerkkiä kilpailuja järjestävistä organisaatioista ovat Drone Racing League ja Drone Champions League. Molemmat näistä järjestävät oikeilla droneilla paikan päällä lennettäviä kisoja eri puolilla maailmaa sekä myös pelisimulaattorilla lennettäviä kisoja. Kilpailuissa on tarkoitus selvitä monimutkaisten esteratojen läpi mahdollisimman nopeasti ilman rikkeitä. Sääntörikkomuksia voivat olla esimerkiksi esteen tai portin vääränlainen ohittaminen, tarkoituksellinen törmäys toiseen alukseen tai yleisesti vaarallinen lento sekä liian korkealla lentäminen. (Race Rules & Format n.d.; The 2018 DRL... 2018; What is drone racing? n.d.)

Kilpalennoissa käytettävät dronet eroavat selvästi esimerkiksi kuluttajille suunnatuista valokuvausdroneista. Kuvausdronet sisältävät usein paljon automatiikkaa, joka huolehtii aluksen vakautuk-

sesta ja mahdollistaa itsenäisen paikallaan leijumisen tai ennalta määrätyn reitin seuraamisen. Lisäksi nämä edellyttävät joka hetki visuaalista näköyhteyttä droneen. Kilpadronet sen sijaan ovat täysin manuaalisesti ohjattavia FPV-tyyppisiä (First Person View) aluksia, joita pilotti ohjaa ikään kuin olisi itse dronen kyydissä. Tämän mahdollistavat pilotin käyttämät FPV-lasit, joihin dronen etuosassa olevan kameran kuva välitetään. Tällaiset FPV-dronet mahdollistavat ketterämmät ohjausliikkeet ja vapaammat lentoasennot kuin automaattisella vakautuksella varustetut dronet. Dronesäädösten (Drone racing and... n.d.) mukaan yleisellä alueella lentävään FPV-droneen on kuitenkin myös oltava näköyhteys joka hetki, eli käytännössä pilotti tarvitsee toisen henkilön tarkkailemaan dronea lennon aikana.

Siviilikäytön lisäksi droneille löytyy paljon sovelluksia myös sotilaskäytössä. Austin (2010) on luetellut useita mahdollisia sovelluskohteita eri aselajien (maavoimat, merivoimat, ilmavoimat) käyttöön. Joitakin yhteisiä käyttötarkoituksia kaikille aselajeille Austinin mukaan ovat tiedustelu, signaalitiedustelu ja tarkkailu. Joitakin erikoisempia sovelluksia hänen mukaansa voisivat olla maamiinojen tuhoaminen, räjähtämättömien pommien tuhoaminen, tutkien häiritseminen ja tuhoaminen sekä ohjusten harhautus ja puoleensa vetäminen. (Austin 2010, 2.; ks. Lehto & Hutchinson 2021.) Vaikuttaa siis siltä, että vain taivas on rajana dronen hyödyntämiselle sotilaskäytössäkin. Useissa Austinin (2010) mainitsemisissa sovelluksissa laite vaikuttaa olevan tarkoitus uhrata suuremman vahingon välttämiseksi, joten edullisia tarkoitukseensa soveltuvia droneja tullaan mahdollisesti tulevaisuudessa tarvitsemaan entistä enemmän.

Sotilaskäytössä olevilta laitteilta tarvitaan huomattavasti parempaa suorituskykyä ja luotettavuutta kuluttajatuotteisiin verrattuna. Laadukkaat komponentit, pitkä tuotekehitys ja kattavat testit näkyvät niin lopputuotteiden ominaisuuksissa kuin myös hinnassa. Tällaiseen käyttöön suunnitellut laitteet ovatkin yleisesti ottaen aivan eri hintaluokassa kuluttajalaitteisiin verrattuna. Shevchenkon (2023) Euroopan viimeaikaisia tapahtumia käsittelevässä uutisessa kuitenkin kerrotaan kuinka myös tavallisia kenen tahansa saatavilla olevia droneja on hyödynnetty laajasti sotilaallisessa toiminnassa viime aikoina. Pienin muokkauksin nämäkin dronet on saatu muutettua soveltuviksi suorittamaan sotilasoperaatioita onnistuneesti. (Shevchenko 2023.) Vaikuttaa siis siltä, että halvat kuluttajaluokan dronetkin saadaan tarvittaessa valjastettua tekemään enemmän kuin laitteen valmistaja on tarkoittanut. Tämä osaltaan kertoo myös siitä kuinka teknologisesti kyvykkäitä kuluttajillekin suunnatut laitteet ovat nykyisin.

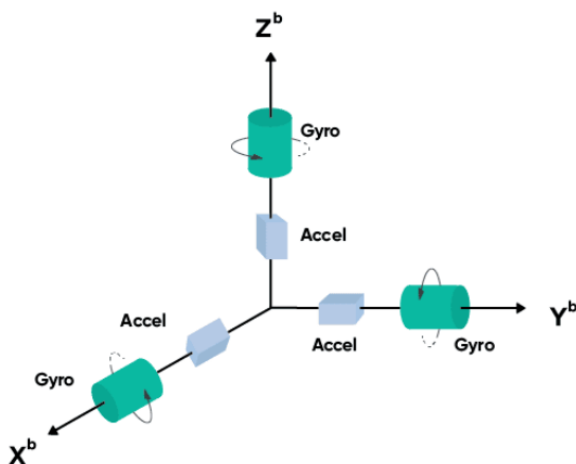


Seuraava suuri kehitysskaskel droneissa saattaa tulla viimeaikaisen tekoälykehityksen myötä. Lehdon ja Hutchinsonin (2021) mukaan tutkimuksia ja kokeiluja tekoälyn ja droneparvien käytöstä löytyy jo maailmalta useita. Tämä mahdollistaisi suuremman joukon droneja toimia joko osittain tai täysin autonomisesti ryhmässä tai hajaantuen, mutta toistensa kanssa kommunikoiden ja tietoa vaihtaen. (Lehto & Hutchinson 2021.) Vaikka tämäkin droneihin liittyvä kehitys etenee sotilaskäytön tarpeet edellä, voi älykkäästi toimivalle droneparvelle kuvitella tulevaisuudessa paljon hyötyjä monissa edellä mainituissa siivipuolen toiminnoissa myös.

## 4 Inertiamittayksikkö

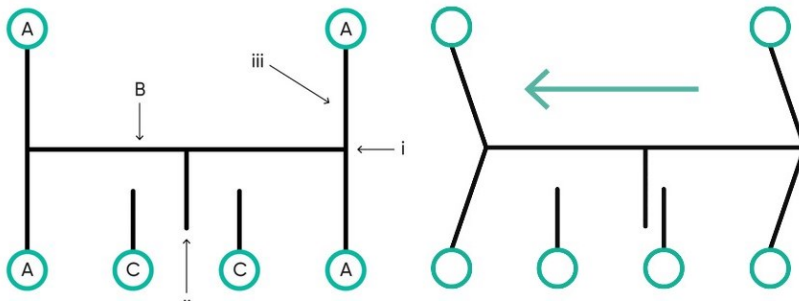
### 4.1 Rakenne ja määritelmä

Inertiamittayksikkö (IMU, inertial measurement unit) sisältää tyypillisesti gyroskooppeja ja kiihtyvyyssantureita, jotka mittaavat kappaleeseen vaikuttavia voimia usein kolmen akselin suhteen. Gyroskoopit mittaavat kappaleen kulmanopeutta ja kiihtyvyyssanturit lineaarista kiihtyvyyttä tietyn akselin suhteen. Inertiamittayksikössä voi olla esimerkiksi kolme gyroskooppia sekä kolme kiihtyvyyssanturia, jolloin kyseessä olisi kuusiakselinen tai kuuden vapausasteen (6 DOF, Degrees Of Freedom) inertiamittayksikkö. Jokainen gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturi mittaa omaa toisiinsa nähden kohtisuoraa akselia suorakulmaisessa koordinaatistossa. Inertia-anturit mittaavat muutoksia, jotka aiheutuvat jonkin massan liikkeen muutoksesta. Kuviossa 4 nähdään havainnekuva kuusiakselisesta inertiamittayksiköstä, joka mittaa jokaisen akselin suhteen lineaarista kiihtyvyyttä sekä kulmanopeutta. (Harris 2023; What is an inertial... 2023.)



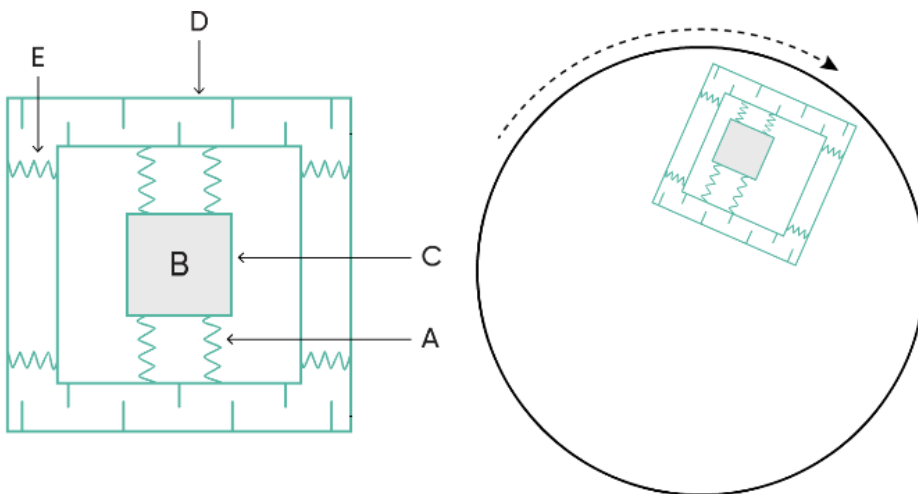
Kuvio 4. Inertiamittayksikön havainnekuva (Harris 2023)

Kuviossa 5 on esimerkkirakenne MEMS-kiihtyvyyssanturista. Ankkurit (A) pitävät massaa (B) paikoillaan. Kun anturi on kiihtyvässä liikkeessä, ankkureiden ja massan väliset osiot (iii) toimivat jousina. Tukirakenteen kiinteät elektrodit (C) saavat niiden välissä liikkuvan ”sormen” kanssa aikaan muuttuvan kapasitanssin. Näistä muutoksista voidaan laskea kiihtyvyys.



Kuvio 5. Kiihtyvyyssanturin esimerkkirakenne (Harris 2023, muokattu)

Kuviossa 6 on esimerkkirakenne tyypillisestä MEMS-gyroskoopista. Jouset (A) kannattelevat massaa (B) sisemmän rakenteen (C) suhteen. Massa on jatkuvassa värähtelyliikkeessä näiden jousien suuntaisesti. Ulompi rakenne (D) on myös eristetty sisemmästä rakenteesta jousilla (E). Jos gyroskoopia käännetään niin tämä aiheuttaa ensisijaiseen liikeakseliin nähden kohtisuoran voiman, joka saa sisemmän rakenteen värähtelyliikkeeseen tämän kohtisuoran akselin mukaisesti. Kun nämä rakenteet lähentyvät ja loittonevat, niiden välinen kapasitanssi muuttuu, josta voidaan laskea gyroskoopin liike. (Harris 2023.)



Kuvio 6. Gyroskoopin esimerkkirakenne (Harris 2023, muokattu)

Inertiamittausta käytetään monissa sovelluskohteissa, joissa halutaan selvittää kappaleen asentoa tai liikettä. Esimerkiksi ajoneuvoissa, lentokoneissa, roboteissa ja matkapuhelimissa. (Harris 2023; What is an inertial... 2023.) Mittayksiköiden antureiden määrä ja laatu vaihtelevat käyttötapauksesta toiseen. Anturit valitaan sen mukaan minkälaista liikettä mitataan ja kuinka suuret virheet ovat hyväksyttäviä. Inertial Sensen (The 4 Grades Of IMUs... 2023) ja VectorNavin (What is an inertial... 2023) mukaan inertiamittayksiköt voidaan jakaa suorituskyvyn mukaan neljään kategoriaan:

- kuluttajaluokka
- teollisuusluokka
- taktinen luokka
- navigointiluokka

Kuluttajaluokan anturit ovat hyvin halpoja ja tarkoitettu massamarkkinoille moniin sovelluksiin. Näiden tarkkuus ei kuitenkaan riitä yhtään vaativampaan käyttöön. Tällainen anturi saattaa olla esimerkiksi puhelimesta tai muussa suurina määrinä valmistetussa laitteessa, jolta ei edellytetäkään suurta tarkkuutta. Teollisuusluokan anturit ovat hieman parempia ja kalliimpia ja kykenevät hyvin lyhytaikaiseen, korkeintaan minuutin mittaiseen, inertianavigointiin. Taktisen luokan antureissa hintaluokka nousee jo selvästi ja yleisimmin tällaisia antureita käytetäänkin sotilaallisissa sovelluksissa tai vastaavissa, joissa hinta ei muodostu ongelmaksi. Tällaisilla antureilla kyetään inertianavigoimaan joistakin minuuteista noin kymmeneen minuuttiin. Navigointiluokan anturit mahdollistavat ilman satelliittipaikannusta jopa useiden tuntien inertianavigoinnin. Tällaisia laitteita käytetään esimerkiksi lentoliikenteessä. (The 4 Grades Of IMUs... 2023; What is an inertial... 2023.)

## 4.2 Antureiden virhelähteitä

Useat virhelähteet vaikuttavat antureiden tarkkuuteen, sillä niiden rakenne ja sisäinen toiminta ei ole ikinä täysin ideaalista. Nämä epätäydellisyydet vääristävät fyysisen maailman ilmiöstä tehtävää muunnosta niin, että ulostulosignaali ei vastaa täydellisesti anturin mittaamaa suuretta. Virheitä voivat olla erinäiset käytönaikaiset satunnaisvirheet, vakiovirheet ja antureiden valmistuksesta johtuvat epätäydellisyydet. Virheistä käytettävät termit vaihtelevat jonkin verran valmistajien välillä ja toiset ilmoittavat antureiden datalehdillä tietoja kattavammin kuin toiset. Alla on kuvattu VectorNavin (3.1 IMU Specifications n.d.) listaamia yleisiä virheitä. Näiden lisäksi vielä lämpötilan muutokset voivat vaikuttaa virheiden suuruuteen.

- Bias-virhe (nollapistevirhe) kuvaa ulostulon vakiopoikkeamaa laskennalliseen oikeaan arvoon nähden.
- Bias-instability-virhe (nollapistevirheen vakaus) kuvaa bias-virheen satunnaista ajautumista johonkin suuntaan käytönaikana.
- Bias repeatability -virhe (nollapistevirheen toistettavuus) kuvaa bias-virheen suuruuden toistuvuutta käynnistysten yhteydessä.
- Random walk -virhe (satunnaiskulku) kuvaa ulostulossa olevaa satunnaista lyhyen aikavälin vaihtelua. Valkoisen kohinan vaikutus voi näkyä satunnaiskulkuna esimerkiksi kulmaa laskeuttaessa.
- Scale factor -virhe on kulmakerroinvirhe eli kuinka tarkasti ulostulo seuraa mitattua suuretta. Virhe on verrannollinen signaalin voimakkuuteen nähden.
- Nonlinearity-virhe liittyy kulmakerroinvirheeseen ja kuvaa sen epälineaarisuutta.
- Cross-axis-sensitivity-virhe (ristiakseliherkkyys) kuvaa mitta-akselin herkkyyttä toisen akselin suuntaiselle signaalille.
- Misalignment-virhe (kohdistusvirhe) kuvaa mittaelementin kaikkien akselien yhteistä asentovirhettä anturin koteloon nähden.

Yleinen tapa ilmoittaa anturin kohinan vaikutuksesta virheisiin on noise density (kohinatiheys) määritelmä. Tämä ilmoitetaan yleensä suhteessa näytetaajuuden neliöjuureen esimerkiksi  $^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$ . Tämä kuvaa kuinka paljon kohinaa esiintyy tietyllä kaistanleveydellä ja paljonko ulostulosignaali vaihtelee tämän vuoksi. (3.1 IMU Specifications n.d.)

## 5 Anturifuusio

Fuusiolla tarkoitetaan kahden tai useamman asian yhdistämistä. Antureiden tapauksessa fuusiolla viitataan prosessiin, jossa yhdistetään useamman anturin tietoja. Tällä pyritään saamaan tarkempi, kattavampi ja luotettavampi lopputulos tutkittavasta järjestelmästä tai ympäristöstä. Elmenreich (2002) toteaa, että anturifuusio terminä ei kuitenkaan välttämättä edellytä, että yhdisteltävien tietojen on pakko tulla useammasta anturista. Kyseessä voi olla myös järjestelmä, jossa yksittäinen anturi tekee mittauksia useammalla ajanhetkellä ja näiden mittausten tiedot sitten yhdistetään. (Elmenreich 2002.) Useimmiten kuitenkin kyseessä on useamman anturin järjestelmä ja yhdisteltävät tiedot voivat myös tulla monentyyppisistä antureista. Tällöin anturit voivat mitata fyysisesti eri asioita ja tarjota monipuolisempaa tietoa fuusiota varten. Elmenreich toteaa, että anturifuusiosta voidaan odottaa esimerkiksi seuraavia etuja: korkeampi vikasietoisuus ja luotettavuus, laajempi kattavuus sekä ajallisesti että alueellisesti ja parempi resoluutio. Gustafsson (2018) mainitsee, että yksi klassinen esimerkki anturifuusiosta on inertiamittausten yhdistäminen absoluuttiseen paikkatietoon. (Elmenreich 2002; Gustafsson 2018, 1–10.)

## Kalman-suodin

Kalman-suodin (Kalman Filter, KF) on Rudolf E. Kálmánin 1960 julkaistuun työhön perustuva estimaattorialgoritmi. Suodin on kehitetty tilan arvioimiseen lineaarisissa järjestelmissä epätäydellisten ja epävarmojen mittauksien perusteella. Kyseessä on rekursiivinen algoritmi, jossa käytetään sekä menneitä ennusteita että uusia mittauksia arvioimaan järjestelmän tulevaa tilaa mahdollisimman tarkasti. Suodin toimii kahdessa vaiheessa: ennustus ja korjaus. Seuraavan aikavälin tila ennustetaan edellisen aikavälin tiedon perusteella, ja sitten päivitetään ennustetta uusien mittausten avulla. Suotimella on tiedossaan jonkinlainen malli, joka kertoo kuinka järjestelmän tilan tulisi muuttua. Tätä mallia käytetään ennustusvaiheen tekemiseen. Usein ennustukset ovat kuitenkin epätarkkoja, jonka vuoksi ennustuksia korjataan tehtyjen mittausten avulla. Suodin yhdistää ennustuksen ja mittauksen löytääkseen todennäköisimmän oikean arvon. Tämä menetelmä minimoi virheet ja epävarmuudet, jotka syntyvät mittauskohinasta ja järjestelmän mallin epätäsmällisyyksistä. (Elmenreich 2002; Zucconi 2022a.)

## Laajennettu Kalman-suodin

Laajennettu Kalman-suodin (Extended Kalman Filter, EKF) on algoritmin laajennus, joka soveltuu paremmin epälineaarisille järjestelmille. Tässä menetelmässä muodostetaan lineaarinen approksimaatio sen hetkisen keskiarvon ympärille, jonka jälkeen voidaan käyttää lineaarista Kalman-suodinta. Suotimen laajennettua versiota käytetään yleisesti monilla teknologian aloilla, kuten navigoinnissa, jossa suodin auttaa arvioimaan esimerkiksi auton sijaintia ja nopeutta epätarkkojen sensoritietojen perusteella. Satelliittinavigointi ja inertiamittayksiköt tuottavat myös dataa, jota Kalman-suotimella voidaan käsitellä, jotta saadaan optimoitua liikkeen ennusteet ja minimoitua virheet ja epävarmuudet mittauksissa. (Elmenreich 2002; Zucconi 2022b.)

# 6 Satelliittipaikannus

## 6.1 Toimintaperiaate ja eri konstellatit

GNSS (Global Navigation Satellite System) on termi, joka tarkoittaa maailmanlaajuista satelliittipaikannusjärjestelmää. Terminä GNSS ei välttämättä ole monille tuttu, vaan arkikielessä saatetaan puhua monesti GPS-paikannuksesta. GNSS terminä kattaa kuitenkin kaikki eri satelliittinavigointijärjestelmät, konstellatit, joita on nykyisin useampia.

- GPS (Global Positioning System) on satelliittinavigointijärjestelmä, jota ylläpitää Yhdysvaltojen puolustusministeriö.
- GLONASS (Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema) on Venäjän puolustusministeriön ylläpitämä satelliittinavigointijärjestelmä.
- Galileo on Euroopan GNSS-viraston (GSA, European Global Navigation Satellite Systems Agency) hallinnoima satelliittinavigointijärjestelmä.
- BeiDou on Kiinan avaruushallinnon (CNSA, China National Space Administration) satelliittinavigointijärjestelmä.

Nämä neljä konstellaatiota tarjoavat maailmanlaajuista paikannusta kukin omilla satelliiteillaan. Moni vastaanotin osaa hyödyntää useamman konstellaation signaaleja ja mitä useampaan satelliittiin on yhteys sen tarkempaa ja nopeampaa paikannus on. Mainittujen maailmanlaajuisten järjestelmien lisäksi Intialla ja Japanilla on omia navigointisatelliittejaan, jotka tarjoavat tai tarkentavat navigointia paikallisemmin. (An Introduction to GNSS, 5–6 n.d.)

Satelliitit kiertävät 19 000–36 000 kilometrin korkeudessa konstellaatioiden mukaan kiertoradoille järjestettynä. Jokainen satelliitti lähettää jatkuvasti signaalia, jossa on sen tunnistetiedot, tarkka aika sekä sijainti kiertoradalla ja vastaanottimet seuraavat näitä signaaleja. Vastaanottimet voivat olla mitä tahansa halvoista älypuhelimista kalliisiin ja korkeatasoisiin vastaanottimiin. Pelkän sijaintitiedon lisäksi saadaan myös satelliittiaika, jonka avulla voidaan vastaanottimia synkronoida tarkasti samaan aikaan. Ajan tarkkuus liittyy myös olennaisesti paikan määrittämisen tarkkuuteen, sillä signaalin kulkuajalla satelliitista vastaanottoon määritetään etäisyys näiden kahden välillä. Koska signaalit kulkevat valon nopeutta, pienetkin virheet ajassa tarkoittavat suurta virhettä etäisyyden laskennassa. Paikan määrittäminen tapahtuu laskemalla vastaanottimen etäisyys vähintään neljään satelliittiin. Trilateraatiolla voitaisiin normaalisti selvittää kolmen tunnetun etäisyyden perusteella tarkka sijainti, mutta satelliittipaikannuksen tapauksessa tarvitaan avuksi vielä neljäs satelliitti. Vaikka satelliittien kellot ovat erittäin tarkkoja, niin vastaanottimien kellojen tarkkuus saattaa olla selvästi huonompi. Tämä aiheuttaa virhettä kolmen satelliitin etäisyyksien laskentaan, jonka vuoksi yhtä yksiselitteistä paikkaratkaisua ei löydy. Tarvitaan vielä neljäs satelliitti, jonka avulla vastaanotin voi säätää omaa kelloaan niin, että trilateraation tuloksena löytyy yksittäinen piste. (Mts. 5–13, 21–23.)

## 6.2 Paikannukseen vaikuttavat epätarkkuudet

Koska signaalit kulkevat valonnopeudella pienetkin virheet kelloissa tai signaalin etenemisessä aiheuttavat virhettä, joka saattaa olla sovelluksesta riippuen liian suuri. Vaikka satelliittien kellot ovat hyvin tarkkoja, nekin vaeltavat ajan mittaan jonkin verran. Samoin satelliittien kiertoradoissa tapahtuu pieniä etäisyyden muutoksia, jotka jälleen muuttuvat suuriksi paikkavirheiksi. Kun GNSS-signaalit etenevät Maan ilmakehän läpi, ionosfääri ja troposfääri aiheuttavat pieniä muutoksia signaalin kulkuun. Ionosfäärin vaikutus paikannuksen epätarkkuuteen on tyypillisesti  $\pm 5$  metriä, mutta vaihtelee vuodenajan, vuorokaudenajan, sijainnin ja auringon aktiivisuuden mukaan. Troposfäärin aiheuttamat virheet signaalin kulkuun johtuvat ilman kosteudesta, lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Multipath-virhe viittaa tilanteeseen, jossa signaali samasta satelliitista saapuu vastaanottimeen useammin kuin kerran. Tällainen tilanne voi johtua esimerkiksi rakennuksen seinästä heijastuvasta signaalista, jolloin se saapuu vastaanottimeen eri aikaan ja aiheuttaa virheitä etäisyyden laskennassa. Lopuksi vielä vastaanottimissa itsessään on virhelähteitä elektroniikassa, jotka voivat lisätä laskettavan etäisyyden virhettä. (An Introduction to GNSS, 43–45 n.d.)

Virheiden korjaamiseksi on olemassa useampia menetelmiä, joissa kiinnostuksen kohteena olevalle vastaanottimelle voidaan syöttää korjausdataa joko reaaliaikaisesti tai datan jälkikäsitteilyssä. Näillä saadaan korjattua paikka- ja aikaratkaisun virheitä, jotka syntyvät edellä mainituista pienistä virheistä satelliittien kelloissa ja kiertoratatiedoissa sekä ilmankehän vaikutuksesta (ks. An Introduction to GNSS, 47–58).

## 6.3 Häirintä

Satelliittien lähettämät signaalit ovat hyvin heikkoja ja paikallinen voimakkaampi signaalilähde saattaa helposti peittää ne alleen. Häirintä voi olla joko signaalien estämistä (jamming) tai niiden väärentämistä (spoofing). Signaalien estämisessä voimakkaammalla säteilylähteellä pyritään peittämään satelliittien signaalit niin, että vastaanottimen kyky tulkita niitä heikkenee tai estyy kokonaan. Tällöin paikannustiedot voidaan menettää kokonaan tai niistä tulee epäluotettavia. Väärentämisessä on myös kyse oikeiden signaalien peittämisestä, mutta toisin kuin estämisessä, häirintä ei tapahdu sattumanvaraisella säteilyllä vaan oikeita satelliittisignaaleja matkivilla häirintäsignaa-

leilla. Tällä pyritään siihen, että vastaanotin hyväksyy nämä signaalit ja antaa tämän jälkeen virheellistä PVT-tietoa (Position Velocity Time, paikka nopeus aika). Näillä menetelmillä voidaan yrittää häiritä tai harhauttaa navigointi- ja paikannuspalveluita.

Viimeaikaiset tapahtumat Euroopassa ovat osoittaneet kuinka tällainen häirintä on muuttunut todellisuudeksi ja on levinnyt koskemaan myös laajemmin esimerkiksi ilmailua ja laivaliikennettä. Hietalahden (2024), Tyystjärven (2024) ja Kirkkalan (2024) uutisissa käsitellään Itämeren ympäristössä ja Kaakkois- sekä Itä-Suomessa raportoitua laajaa satelliittipaikannuksen häirintää. Hietalahden uutisessa kuitenkin liikenne- ja viestintäviraston ilmailusta vastaava johtaja Jari Pöntinen toteaa, että satelliittipaikannusjärjestelmän häirintä ei vaikuta lentoturvallisuuteen sillä lentokoneissa on useita navigointijärjestelmiä.

## 7 Navigointi

### 7.1 Inertianavigointi

Inertianavigointi on menetelmä, jossa kappaleen nykyinen sijainti ja asento lasketaan suhteessa tunnettuun alkupisteeseen, asentoon ja nopeuteen käyttäen vain inertia-antureilta saatavia tietoja. Tällaisessa järjestelmässä hyödynnetään kiihtyvyyssantureilta ja gyroskoopeilta saatavia lineaarikiihtyvyy- ja kulmanopeustietoja, joista integroimalla saadaan laskettua kappaleen paikan ja asennon muutoksia. Kiihtyvyyssanturin arvoja integroitaessa yhden kerran saadaan nopeustieto ja integroimalla toisen kerran saadaan paikkatieto. Pienetkin virheet anturin ulostulossa aiheuttavat kuitenkin virhettä ensin nopeustietoon ja sitä kautta paikkatietoon, jonka virhe alkaa kasvamaan rajattomasti. Kulmatieto voidaan saada integroimalla gyroskoopeilta saatavaa kulmanopeutta. (Woodman 2007.)

Inertianavigointijärjestelmät ovat itsenäisiä ja luotettavia ja tällaisia hyödynnetään erilaisissa sovelluksissa kuten lentokoneiden, ohjusten ja sukellusveneiden navigoinnissa, sillä se ei ole riippuvainen ulkoisista päivityksistä (mt). Käytännössä kuitenkin vaaditaan erittäin kalliit ja tarkat inertia-anturit, jotta järjestelmä olisi hyödyllinen ja tarjoaisi riittävän tarkkaa navigointia merkityksellisen ajan verran. Vedenalaisiin tehtäviin on tarjolla myös ulkopuolisiin päivityksiin perustuvia paikannusratkaisuja. Advanced Navigation (Underwater Navigation & Robotics n.d.) esimerkiksi tarjoaa



akustisesti toimivia paikannusratkaisuja, jossa sekä veden alla että pinnalla oleviin aluksiin kiinnitetään akustiset anturit ja pinta-alukseen lisäksi GNSS-kompassi. GNSS-kompassi yhdistää GNSS- ja inertianavigointijärjestelmät ja tästä saatu tarkka paikka- ja suuntaratkaisu lähetetään akustisesti vedenalaiselle alukselle (mt).

## 7.2 Inertianavigointi ja satelliittipaikannus

Pelkkä inertia-antureilla tapahtuva navigointi on altis nopeasti kasvaville virheille, ellei käytetä takaisen- tai navigointiluokan inertia-antureita. Tällaisillakaan antureilla nämä järjestelmät eivät ole täydellisiä, vaan virheet alkavat joka tapauksessa kumuloitumaan. Käyttämällä jotakin ulkopuolista päivitystä, esimerkiksi satelliittipaikannusta, voidaan inertia-antureiden virheet nollata hyödyntämällä satelliiteista saatavia päivityksiä.

Tällaisessa järjestelmässä satelliittipaikannuksesta saadaan hitaalla päivitystaajuudella tarkkaa paikkatietoa kolmiulotteisessa avaruudessa. Inertia-antureilta sen sijaan saadaan kuuden akselin suhteen liiketietoa suurella taajuudella. Kaikilta kolmelta akselilta lineaarikiihtyvyyksiä sekä kulmanopeuksia. Satelliittipaikannus ja inertia-anturit täydentävät näin toisiaan anturifuusion kautta. IMUista saadaan tarkkaa tietoa siitä, miten kappale on liikkunut satelliittipäivitysten välillä ja satelliiteista saadaan absoluuttinen paikkatieto, jolla estetään IMUjen virheiden kumuloituminen. Yhdistämällä nämä tiedot kappaleen sijainnista, nopeudesta ja asennosta saadaan tarkempi tulos. (Gustafsson 2018, 6–7.)

## 8 Ardupilot

Ardupilot on avoimen lähdekoodin autopilottiohjelmisto, joka tukee monenlaisia miehittämättömiä ajoneuvoja. Ardupilotista on kehitetty omat ohjelmistohaaransa niin ilmassa, maassa kuin vedessä kulkeville aluksille ja se toimii useiden valmistajien ohjausyksiköillä. (ArduPilot. Versatile, Trusted, Open 2024.)

- ArduPilot Rover kattaa maalla ja veden päällä kulkevat ajoneuvot ja alukset sekä kävelevät robotit (ArduPilot Rover 2024).
- ArduPilot Plane kattaa kiinteäsiipiset ilma-alukset (ArduPilot Plane 2024).
- ArduPilot Copter kattaa kaikki helikopterit ja moniroottoriset ilma-alukset (ArduPilot Copter 2024).

- ArduPilot Sub kattaa vedenalaiset alukset (ArduPilot Sub 2024).
- ArduPilot Blimp kattaa LTA-alukset (lighter-than-air, ilmaa kevyemmät) (ArduPilot Blimp 2024).
- ArduPilot AntennaTracker mahdollistaa suunta-antennin automaattisen kohdistamisen maalla, veden pinnalla tai ilmassa kulkevaan alukseen (ArduPilot AntennaTracker 2024).

Ardupilot tukee myös ohjaus- ja hallinta-asema-ohjelmistoja (Ground Control Station), jotka yleensä sijaitsevat maassa olevassa tietokoneessa ja mahdollistavat esimerkiksi dronen tietojen tarkastelun tai monesti myös lennon ohjaamisen. Yksi esimerkki tällaisesta on Mission Planner. Tämän ohjelman muutamia ominaisuuksia ovat:

- Ohjausyksikön ohjelmointi.
- Ajoneuvon/aluksen asetusten säätäminen.
- Autonomisten tehtävien suunnittelu ja niiden lataaminen aluksen muistiin.
- Autopilotin logien lataaminen ja tarkastelu.

(Mission Planner Overview 2024.)

Ardupilot on asennettu maailmanlaajuisesti jo yli miljoonaan ajoneuvoon/alukseen ja ohjelmiston kehitystyö jatkuu edelleen suuren ammattilaisista ja harrastajista koostuvan yhteisön toimesta (ArduPilot. Versatile, Trusted, Open 2024).

## 9 Autopilotti ja lennonohjausyksikkö

### 9.1 Määritelmät ja toiminta

Keskeinen osa dronen tekniikkaa on ohjausyksikkö, joka prosessoi kaikkien antureiden tietoa ja suorittaa tarvittavat laskennat moottoreiden toiminnan ohjaukseen. Moottoreiden pyörimisnopeutta säädetään sekä antureilta tulevan tiedon että dronen pilotin antamien ohjauskomentojen perusteella niin, että alus saadaan sekä vakautettua että liikkumaan haluttuun suuntaan. Ohjausyksikössä on inertiamittayksiköitä, joissa on ainakin gyroskooppeja sekä kiihtyvyysantureita, joiden antaman tiedon perusteella aluksen asento voidaan laskea. Näiden lisäksi voi olla myös ylimääräisiä antureita, jotka tarjoavat lisätietoa dronen paikan ja asennon määrittämiseen. Magnetometrillä voidaan havainnoida Maan magneettikenttää ja määrittää dronen suunta magneettiseen pohjoiseen nähden. Barometrillä mitataan ilmanpainetta ja voidaan paineen muutosten perusteella arvioida dronen lentokorkeutta. Tällainen anturikokonaisuus, jossa olisi gyroskooppi, kiihtyvyysanturi ja magnetometri jokaisella kolmella akselilla sekä lisäksi barometri, olisi 10-akselinen IMU.

Usein edellä mainittujen antureiden lisäksi dronessa on myös mahdollisuus satelliittipaikannukseen (GNSS), josta saadaan tarkka paikkatieto koordinaatteina. Satelliittipaikannus ja inertia-anturit yhdessä mahdollistavat dronen tarkemman hallinnan ja navigoinnin. Yleensä käytössä on Kalman-suotimeen perustuvat algoritmit, joilla antureiden tiedot ja satelliittipaikannus yhdistetään paremman asento- ja paikkaratkaisun saamiseksi. (Kumar 2020.)

Autopilotin ja lennonohjausyksikön määritelmät eivät vaikuta olevan selkeästi eroteltuja ja niitä käytetään myös synonyymeinä. Lennonohjausyksikkö on fyysinen moduuli, joka rakentuu edellä mainituista minimivaatimuksista, joilla dronen perustoiminnot saadaan suoritettua. Autopilotin voisi ajatella olevan laajempi kokonaisuus, joka sisältää lennonohjausyksikön lisäksi ainakin satelliittipaikannuksen ja käyttää laitteiston toimintojen ohjaamiseen Ardupilotin kaltaista edistynyttä ohjelmistoa. Nämä antavat dronelle kyvyn toimia jonkin verran itsenäisesti ja esimerkiksi lentää lyhyitä matkoja pisteestä A pisteeseen B ilman pilotin antamia ohjauskomentoja.

Tällainen drone tarvitsee siitä huolimatta vielä pilotin jatkuvaa tarkkailua. Seuraava askel olisi autonominen drone, jolla on kyky tunnistaa esteitä ja reagoida niihin sekä yllättäviin tilanteisiin älykkäästi kuten Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto on määritellyt, ks. luku 3.1. Nykyään useissa droneissa on jo esteentunnistusantureita, mutta ne toimivat monesti vain päivänvalossa. Hämärässä drone ei saa riittävän luotettavia mittauksia näistä antureista ja pilotin on muun muassa varmistettava, että laskeutumiskohta on vapaa esteistä. Riittävän valoisassa ympäristössä alaspäin suunnatuilla antureilla varustetut dronet pystyvät itse määrittämään onko laskeutumiskohta turvallinen.

## 9.2 Tärinän vaimennus

Kedadouche, Yulan, Liu, Thomas, Charland-Arcand ja Beck (2018) ovat tutkineet dronen rungosta siirtyvien tärinöiden vaikutusta lennonohjausyksikköön ja sen sisältämiin antureihin. Kedadouche ja muut toteavat, että MEMS-anturit ovat erittäin herkkiä korkeataajuisille tärinöille ja tarvitsevat suojaa näitä tärinöitä vastaan parhaan suorituskyvyn saamiseksi. Liian suuret tärinätasot saattavat haitata tarkkaa asento-, nopeus- ja kiihtyvyydestiedon mittaamista. Heidän mukaansa on kolme vaihtoehtoa yrittää parantaa antureista saatavan tiedon luotettavuutta:

- digitaaliset suodattimet
- MEMS-anturin rakenteen muutokset
- mekaaninen suodatin

Digitaalisten suodattimien huonoja puolia ovat mahdolliset virheet signaalin vaiheessa ja amplitudissa, ja toisaalta MEMS-rakenteen muuttaminen ei onnistu loppukäyttäjältä, vaan on anturin valmistajan määrittämä. Kedadouchen ja muiden tutkimus keskittyi kolmanteen vaihtoehtoon, mekaanisten vaimentimien rakenteeseen. He tutkivat vaimentimien toimintaa ja värinöiden siirtymistä sekä näiden vaikutusta antureiden lukemiin. (Kedadouche, Yulan, Liu, Thomas, Charland-Arcand & Beck 2018.)

Kedadouche ja muut selvittivät tutkimuksessaan, että ilman mekaanista vaimenninta kaikki dronen rungon värinät siirtyvät samanlaisina lennonohjausyksikön antureihin. Tämä tekee antureiden datasta hyvin kohinaista. Syy huonoon lennonohjausyksikön toimintaan saattaa siis olla riittämättömässä mekaanisessa vaimennuksessa eikä antureissa itsessään. He päätyvät ehdottamaan uudenlaista vaimenninrakennetta ja toteavat yleisellä tasolla, että mekaaninen värinänvaimennin on oleellinen osa hyvin toimivaa lennonohjausjärjestelmää. (Kedadouche ym. 2018.)

## 10 Tutkimusasetelma

### 10.1 Tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena oli löytää valittuihin tutkimuskysymyksiin vastauksia, joiden perusteella työn toimeksiantaja sekä yhteistyökumppanit saavat aiheesta riittävät tiedot asioiden jatkokehitystä varten. Ensimmäinen tutkimuskysymys oli:

- Mitkä ovat inertia-antureiden mitta-alueen vaatimukset dronekäytössä?

Tähän kysymykseen liittyen tutkittiin minkälaisia kiihtyvyyksiä ja kulmanopeuksia anturit kokevat erilaisissa lentotilanteissa ja minkälaista värinää niiden on kestävä. Dataa keräämällä ja analysoimalla selvitettiin mikä on antureilta vaadittava mitta-alueen laajuus, jotta ne pystyvät tarjoamaan luotettavaa tietoa dronen ohjausjärjestelmälle.

Toisella kysymyksellä haettiin vastausta eri antureiden toimintaan liittyen. Toinen kysymys oli:

- Nähdäänkö antureiden välillä selkeitä eroja?

Tähän kysymykseen pyrittiin saamaan vastaus kerätystä datasta vertaamalla antureiden tuloksia toisiinsa. Aineistoa tätä kysymystä varten saatiin dronen omien antureiden lisäksi työssä käytetystä toimeksiantajan erillisestä mittalaitteistosta. Tällä kerättiin vielä lisää analysoitavaa aineistoa testilentojen aikana.

## 10.2 Tutkimusmenetelmät

Työ oli monimenetelmäinen tutkimus, jossa aineistoa kerättiin sekä laadullisin, kokeellisin että määrällisin menetelmin. Työn lähtökohtana oli kerätä todellisista käytännön tilanteista aineistoa tutkittavaksi ja analysoitavaksi, mutta tietoa kerättiin lisäksi autopilottien dokumentteihin ja dronen teorian tietoon tutustumalla. Tehdyistä testilennoista saatiin aineistoa analysoitavaksi ja tutkimuksessa suoritettiin useampi tällainen käytännön koe. Kokeiden edetessä tehtiin tarvittavia muutoksia mittajärjestelyihin ja mietittiin suuntaa seuraaville testeille. Näin aineistoa kerättiin monimenetelmäisesti ja kehittämistutkimuksellisella otteella. Testilennoista aineiston kerääminen ja tämän analysointi edustavat kokeellisia ja kvantitatiivisia menetelmiä ja autopilottien ja antureiden dokumentteihin tutustuminen kvalitatiivisia menetelmiä.

Pääosa tutkimuksen aineistosta kerättiin yhteistyökumppanin dronea hyödyntäen. Tämän avulla saatiin kokeellisesti kerättyä analysoitavaa aineistoa, josta toivottiin saatavan vastauksia tutkimuskysymyksiin. Kehittämistutkimukselle ominaisesti kokeiden edetessä aineistoa analysoitiin ja havainnoitujen tulosten perusteella tehtiin tarvittavia suunnanmuutoksia. Aineiston keräämisen jälkeen toista tutkimuskysymystä lähestyttiin vielä eri näkökulmasta. Aineistoa käytettiin simuloituissa lentotilanteissa pyrkimyksenä selvittää saadaanko tutkimuskysymykseen lisätietoja lähestymällä aihetta päinvastaisesta suunnasta. Tämän tavoitteena oli sekä tutkimuksen luotettavuuden että tiedon lisääminen.

## 11 Anturivertailu

Työssä kerättiin aineistoa tutustumalla Ardupilot autopilottiohjelmiston kanssa yhteensopiviin lennonohjausyksiköihin ja niissä käytettyihin antureihin. Ardupilot on yleisesti käytetty avoimen lähdekoodin autopilotti, ja sille tarkoitettuja lennonohjausyksiköitä on tarjolla runsaasti. Ardupilot lisää sivuillaan yhteensopivia ohjausyksiköitä ja näistä valittiin satunnaisesti useampia vertailtavaksi. Näin kerättiin tietoa nykyisin autopiloteissa käytössä olevista antureista, joiden datalehdissä ilmoitettuja tietoja kerättiin yhteen. Tällä tavalla saatiin jonkinlainen käsitys tällä hetkellä yleisesti käytössä olevien ohjausmoduulien antureiden tasosta. Alla on lista sattumanvaraisesti valituista ohjausyksiköistä. Listan viimeisenä on tässä työssä käytetyn ison dronen lennonohjausyksikkö.

- Speedy Bee F4 V3/V4
- Mamba H743v4
- FlywooF405 Pro
- The Cube Black
- CUAUV X7+

Taulukkoon 2 on kerätty yllä olevan listan mukaisista lennonohjausyksiköistä niissä käytettyjen antureiden arvoja siltä osin kuin ne kaikkien datalehdistä löytyivät. Valmistajat saattavat käyttää hiekan poikkeavia termejä tai yksiköitä eivätkä kaikki ilmoita samoja tietoja. Taulukkoon on valittu listattavaksi sellaisia arvoja, jotka on yleisimmin ilmoitettu ja jotka nytkin löytyivät lähes kaikista antureista. Joidenkin ilmoitettujen tietojen kohdalla vaadittiin yksikkömuunnoksia, jotta lukemista saatiin vertailukelpoisia. Taulukossa on merkitty vihreällä CUAUV X7+ lennonohjausyksikön anturit. Tämä ohjausyksikkö oli käytössä yhteistyökumppanin dronessa. Lisäksi on ilmoitettu referenssinä toimineen miniAHRS:än sekä kahden vertailtavan anturin tiedot.

Taulukko 2. Antureiden vertailu

Sensor	Type	Range	Noise density	Nonlinearity [%]	Cross-axis [%]	max LPF [Hz]	max ODR [Hz]
ICM-20689	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,006 °/s/√Hz	0,1	2	250	500
ICM-20689	Acc	$\pm 16$ g	150 µg/√Hz	0,5	2	218	500
ICM-42688-P	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,0028 °/s/√Hz	0,1	1,25	3979	32000
ICM-42688-P	Acc	$\pm 16$ g	70 µg/√Hz	0,1	1	3979	32000
IIM-42652	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,0038 °/s/√Hz	0,1	1,25	3979	32000
IIM-42652	Acc	$\pm 16$ g	70 µg/√Hz	0,1	1	3979	32000
L3GD20	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,03 °/s/√Hz	0,2	-	-	760
LSM303D	Acc	$\pm 16$ g	150 µg/√Hz	-	-	362	1600
MPU-6000	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,005 °/s/√Hz	0,2	2	256	8000
MPU-6000	Acc	$\pm 16$ g	400 µg/√Hz	0,5	2	260	1000
MPU-9250	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,01 °/s/√Hz	0,1	2	250	8000
MPU-9250	Acc	$\pm 16$ g	300 µg/√Hz	0,5	2	260	4000
miniAHRS	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,006 °/s/√Hz	0,035	-	260	2000
miniAHRS	Acc	$\pm 15$ g	76,5 µg/√Hz	0,08	-	260	2000
Vert. anturi 1	Gyro	$\pm 2000$ °/s	0,007 °/s/√Hz	0,01	0,2	751	6400
Vert. anturi 1	Acc	$\pm 16$ g	160 µg/√Hz	0,5	1	740	1600
Vert. anturi 2	Gyro	$\pm 300$ °/s	0,0006 °/s/√Hz	0,007	0,15	370	377000
Vert. anturi 2	Acc	$\pm 8.15$ g (26.5 g)	81,5 µg/√Hz	0,075	0,15	370	377000

Antureiden mitta-alueisiin liittyen huomataan, että ainoastaan vertailtava anturi 2 eroaa merkittävästi kaikista muista. Tämä sama anturi on myös ilmoitettujen tietojen osalta selvästi tarkempi ja vähäkohinainen kuin muut.

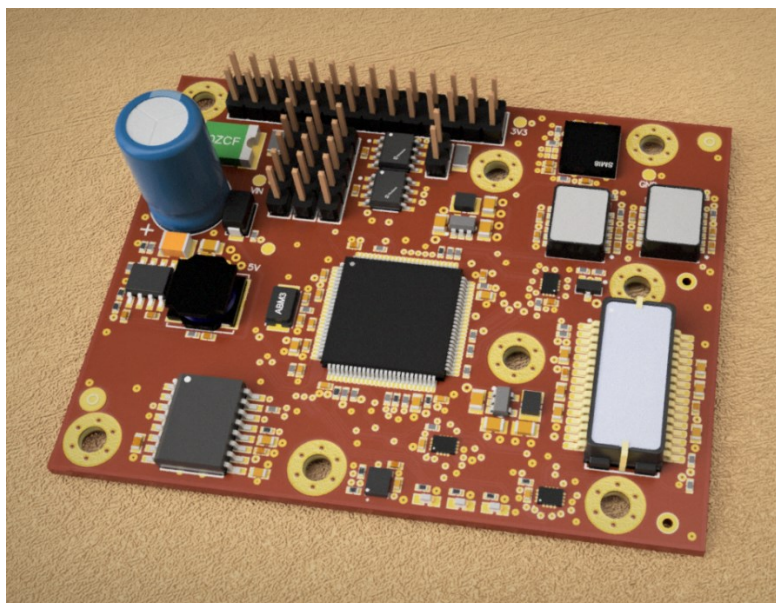
## 12 Testilennot

Antureiden toiminnasta todellisissa lentotilanteissa kerättiin dataa suorittamalla testilentoja kahdella hyvin erilaisella dronella. Pääosin lennot suoritettiin yhteistyökumppanin ammattikäyttöön tarkoitettulla isolla dronella, johon saatiin myös kiinnitettyä oma mittalaitteisto. Näiden lentojen lisäksi tehtiin myös yksi vertaileva lento pienellä kuluttajaluokan dronella. Tähän ei pystynyt kiinnittämään mitään omia laitteistoja eikä dronessa käytössä olleista antureista ollut myöskään tietoa, mutta tämän dronen käyttöön oli kuitenkin kaksi syytä. Tästä testilennosta saatiin vertailevaa tietoa, sillä osittaiseen lentodataan oli mahdollista päästä käsiksi, vaikka antureiden malleista ei ollutkaan tietoa. Lisäksi tällä dronella yritettiin kerätä tietoa erikoisemmista lentotilanteista, joissa dronen hallinnan menetys ja vauriot ovat mahdollisia. Pientä dronea käyttämällä pystyttiin tällainen data keräämään turvallisemmin eivätkä vahingot dronen kanssa aiheuttaisi myöskään yhtä suuria korjauskustannuksia.

## 12.1 Oma mittalaitteisto

Pääosa testilentojen datasta kerättiin yhteistyökumppanin isolla nelikopterilla. Yksi oleellinen ominaisuus dronessa on sen kantokyky eli kuinka painavaa hyötykuormaa se pystyy kuljettamaan mukanaan. Testilennoissa käytetyssä dronessa suurin sallittu hyötykuorman paino oli 2,5 kg ja tämä mahdollisti hyvin lisäosien kiinnittämisen. Tämän dronen autopilottiohjelmistona käytettiin Ardupilottia ja CUAV Technin kehittämää lennonohjausyksikköä CUAV X7+, ks. taulukko 2. Tämä lennonohjausyksikkö tallentaa kaiken lentodatan, joten antureiden tietoja voidaan tutkia jälkikäteen. Droneen kiinnitettiin lisäksi oma mittalaitteisto, jossa oli myös inertia-antureita. Tämäkin laitteisto tallensi antureiden arvot koko lennon ajalta. Näin saatiin kerättyä aineistoa dronen ohjausyksikön antureiden ja tämän mittalaitteiston antureiden vertailuun.

Mittalaitteiston keskiössä toimi Nordic Inertialin käyttöön kehitetty ja monenlaisiin mittauksiin soveltuva piirilevy, jossa on paikka usealle erilaiselle inertia-anturille. Tämä mahdollistaa erilaisissa käyttötarkoituksissa ja tilanteissa datan keräämisen monesta anturista ja näiden välisen vertailun. Työssä hyödynnettiin jokin aika sitten kehitettyä uusinta versiota tällaisesta piirilevystä (kuvio 7), joka on mahdollista kalustaa kuudella erilaisella anturilla. Levyä ei kuitenkaan ollut suunniteltu erityisesti tätä työtä varten, joten kaikki siinä olevat anturit eivät olleet kiinnostavia tämän työn kontekstissa.



Kuvio 7. Renderoitu kuva anturilevystä



Mittalaitteistossa oli anturipiirilevyn lisäksi mukana referenssinä myös Inertial Labsin valmistama miniAHRS (kuvio 8). AHRS (Attitude and Heading Reference System) on itsessään jo valmis mitta-järjestelmä, josta saadaan suoraan ulostulona kappaleen asento- ja suuntatieto toisin kuin gyro-skoopeista ja kiihtyvyyssantureista, joiden ulostulona saadaan kulmanopeuksien ja lineaarikiihtyvyyksien arvoja. MiniAHRS sisältää kaikille kolmelle akselille gyroskoopin, kiihtyvyyssanturin ja magnetometrin ja prosessointiyksikkö hoitaa automaattisesti anturitiedon käsittelyn. Prosesso-rissa ajetaan Kalman suotimeen perustuvia algoritmeja, joilla eri antureiden mittaamat suureet yh-distetään paremman asento- ja suuntatiedon arvioimiseksi. Tällainen anturifuusio auttaa kompen-soimaan eri antureiden rajoituksia ja virheitä, ks. luku 5. (1.6 Attitude & Heading Reference... n.d.; AHRS - Attitude and... n.d.; Miniature Attitude & Heading... n.d.)



Kuvio 8. Inertial Labs miniAHRS (Miniature Attitude & Heading... n.d.)

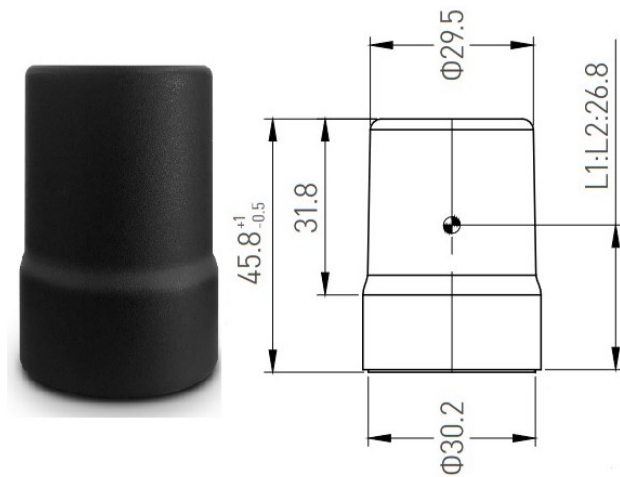
MiniAHRS on kooltaan 53 x 19 x 13 mm ja painaa 20 grammaa. Laitteen toimintalämpötila- ja käyt-töjännitealueet ovat melko laajat ja kommunikointiin käytetään RS-422 väylää. Laitteesta on saata-villa eri versioita halutun mitta-alueen mukaan, joten useammat sovellukset voivat hyötyä siitä. Gyroskoopin mitta-alueeksi luvataan  $\pm 2000$  astetta/s ja kiihtyvyyssanturin mitta-alue on joko  $\pm 8$  g,  $\pm 15$  g tai  $\pm 40$  g ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Työssä käytetyn laitteen mitta-alue oli  $\pm 15$  g. Kaistanleveydeksi dataleh-dessä ilmoitetaan 260 Hz (-3 dB) ja maksimi näytetaajuudeksi 2000 Hz.

Jotta kaikki saatiin synkronoitua keskenään, mittalaitteistossa oli mukana GNSS-vastaanotinmoduuli, jonka avulla tapahtumat saatiin sidottua tarkkaan GPS-aikaan. Käytössä ollut vastaanotin oli Septentrio mosaic-go (kuvio 9), joka on pieni ja kevyt, mutta tarkka usean taajuu-den ja konstellaation vastaanotin, joka tukee myös kahden antennin käyttöä. Mosaic-go on tarkoi-tettu käytettäväksi esimerkiksi autonomisten järjestelmien, robotiikan ja UAV-sovellusten käyttö-tapauksissa helppoon järjestelmän testaukseen ja evaluointiin (Mosaic-go heading GNSS... n.d.).



Kuvio 9. GNSS-vastaanotin (Mosaic-go heading GNSS... n.d.)

Kahden antennin käyttö mahdollistaisi dronen suunnan määrittämisen, mutta tätä varten antennien tulisi olla riittävän etäällä toisistaan. Alkuperäinen ajatus oli sijoittaa antennit vastakkaisiin moottorivarsiin, mutta tämä olisi todennäköisesti aiheuttanut ongelmia värinöiden ja epäsymmetrisyyden vuoksi. Lopulta käyttöön päätyi kuviossa 10 nähtävä antenni, joka on erittäin kevyt ja tarkoitettu esimerkiksi UAV-käyttötapauksiin. Näitä antennia sijoitettiin kaksi dronen katolle ja antennien välisestä etäisyydestä tingittiin, jotta ne eivät aiheuttaisi ylimääräisiä häiriöitä.



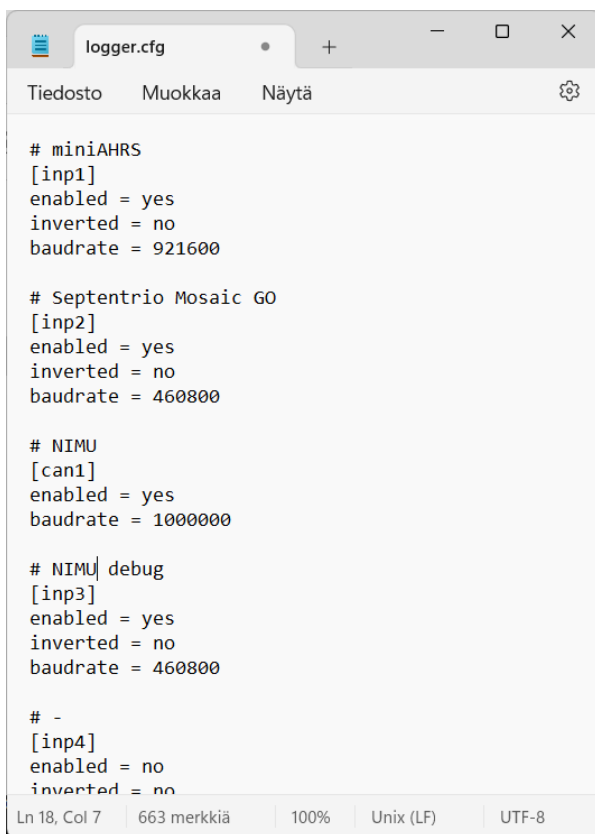
Kuvio 10. GNSS-antenni (HX-CU7603A Helix Antenna n.d., muokattu)

Jotta kaikki antureiden lähettämä tieto saatiin talteen jälkikäsitteilyä varten, tarvittiin myös data-loggeri. Tähän valittiin Pacific Inertialin valmistama PI-logger (kuvio 11). PI-logger on pienikokoinen laite, joka tallentaa synkronoidusti seitsemää UART-kanavaa ja kahta CAN-väylää. Jokainen tallennustapahtuma saa aikaleiman 10 mikrosekunnin tarkkuudella ja laitteen sisäinen RTC-piiri (real-

time clock) sitoo tapahtumat oikeaan aikaan. Laitteen UART-kanavat voidaan konfiguroida toisistaan riippumatta ja ne pystyvät toimimaan korkeintaan 3 Mbaudin nopeudella. UART-kanavien asetukset tehdään laitteen sisäisessä muistissa olevaan konfigurointitiedostoon (kuvio 12). Sallitut signaalitasot ovat RS-232, RS-422 ja RS-485 standardien mukaisia. (Data logger n.d.)



Kuvio 11. Pacific Inertial PI-logger (Data logger n.d.)

A screenshot of a text editor window displaying the configuration file 'logger.cfg'. The window has a title bar with standard OS controls and a menu bar with 'Tiedosto', 'Muokkaa', and 'Näytä'. The configuration file contains settings for four input channels: miniAHRS, Septentrio Mosaic GO, NIMU, and NIMU debug. Each channel is configured with 'enabled', 'inverted', and 'baudrate' parameters. The status bar at the bottom shows 'Ln 18, Col 7', '663 merkkiä', '100%', 'Unix (LF)', and 'UTF-8'.

```
# miniAHRS
[inp1]
enabled = yes
inverted = no
baudrate = 921600

# Septentrio Mosaic GO
[inp2]
enabled = yes
inverted = no
baudrate = 460800

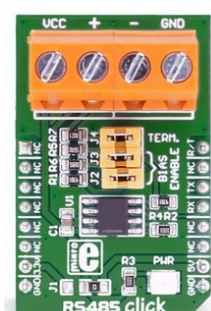
# NIMU
[can1]
enabled = yes
baudrate = 1000000

# NIMU debug
[inp3]
enabled = yes
inverted = no
baudrate = 460800

# -
[inp4]
enabled = no
inverted = no
```

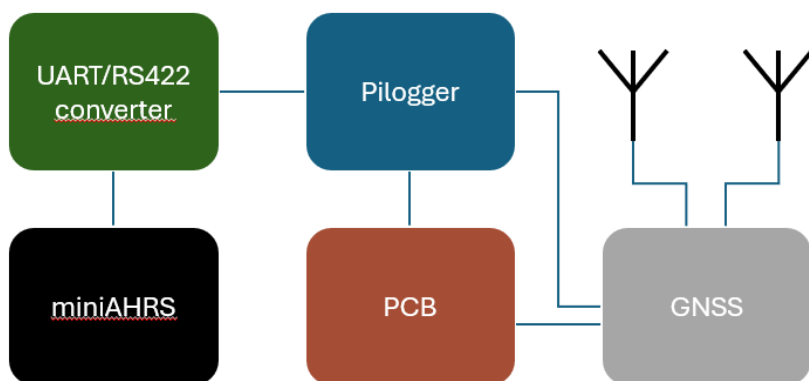
Kuvio 12. Piloggerin konfigurointitiedosto

Käytetty versio dataloggerista ei ollut työn suorituksen aikana enää saatavilla vaan kyseessä oli toimeksiantajan aikaisemmin hankkimia laitteita. Valmistaja tarjoaa sivuillaan kuitenkin ennakkomyyntiä loggerin seuraavalle versiolle. Laitteen käyttöön ei myöskään ollut saatavilla teknistä tukea. Vaikka loggerin pitäisi toimia RS-422 signaaleilla, ei tämä kuitenkaan onnistunut luotettavasti. Edellä mainittu miniAHRS käyttää RS-422 väylää kommunikointiin, joten tähän väliin laitettiin valmis moduuli, joka rakentuu RS-485/422 lähetin-vastaanotin-piirin ympärille (kuvio 13). Tämän avulla saatiin luettua miniAHRS:än lähettämä data PI-loggerin muistiin, sillä RS-485 väylän tallentamisessa ei ollut ongelmia.



Kuvio 13. RS-485/422 moduuli (RS485 CLICK 5V n.d.)

Kuviossa 14 nähdään yksinkertaistettu lohkokaavio mittalaitteistosta. PI-logger ottaa vastaan dataa UART- ja CAN-väylien kautta ja huolehtii eri lähteistä tulevien tietojen tallennuksesta. GNSS-vastaanotin ja miniAHRS on kytketty PI-loggerin UART kanaviin ja anturipiirilevy lähettää tietoa CAN-väylää pitkin. GNSS-vastaanotin ja anturipiirilevy ovat myös toisiinsa yhteydessä, jotta tapah-  
tumille saadaan aikaleimat joilla saadaan synkronoitua kaikki yhteen.

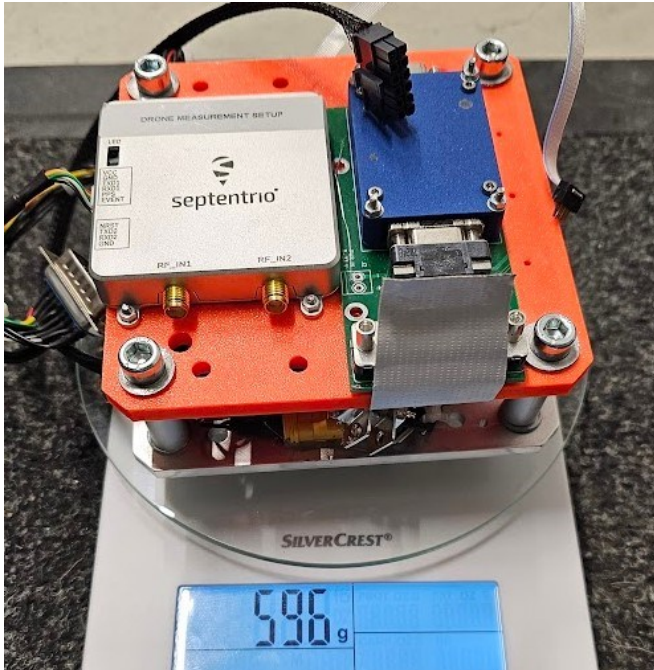


Kuvio 14. Lohkokaavio mittalaitteistosta

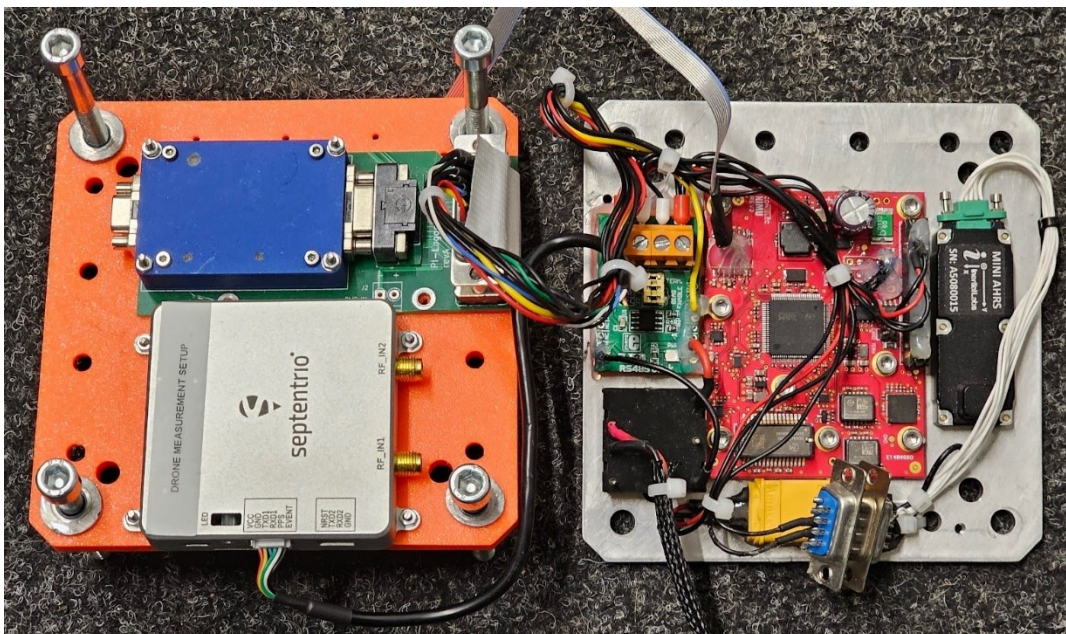
Mittalaitteisto piti saada tukevasti kiinni dronen runkoon, jotta antureiden mittaamat liikkeet ja värinät vastaavat todellisia liikkeitä eikä kiinnityksen mahdollista vääntyilyä tai tärinää. Piirilevyssä itsessään oli jo huolehdittu jäykästä rakenteesta, mutta koko laitteisto piti vielä saada luotettavasti kiinni. Dronen alapuolella oli käytettävissä neljä kiinnityspistettä, joiden mukaan laitteisto piti suunnitella. Jotta rakenteesta tuli riittävän tukeva ja jäykkä, suunniteltiin alumiinista koneistettava levy laitteiden kiinnitykseen. Tämä levy kiinnittyi ruuveilla dronen runkoon ja mittalaitteet tähän alumiinilevyyn. Lentoon mukaan lähteviä osia oli kuitenkin paljon levyn pinta-alaan nähden, joten päädyttiin tekemään kerrosrakenne, jossa osa laitteista sijoitettiin toiseen levykerrokseen kauemmas dronen rungosta.

Suunnitellussa levyssä oli paikat ja tarvittavat ruuvikiinnitykset kaikille laitteille, mutta joidenkin osien kohdalla kiinnityskohdat olivat osin päällekkäisiä. Kaikkien laitteiden ei siis lopulta ollutkaan tarkoitus mahtua samaan aikaan levyille vaan levyjä tehtiin kaksi, jotka kiinnitettiin päällekkäin. Osa laitteista oli sellaisia, joiden ei kuitenkaan tarvitse olla suoraan dronen rungossa kiinni koska näiden laitteiden mahdolliset tärinät eivät vaikuta kerättävään dataan. Päädyttiin teettämään vain yksi alumiinilevy ja toinen levy 3D-tulostettiin itse, joka myös vähensi hieman mittalaitteiston lopullista painoa. Laitteet, joiden oli tärkeää olla jäykästi kiinni dronen rungossa kiinnitettiin alumiinilevyyn eli käytännössä anturipiirilevy ja miniAHRS. GNSS-vastaanotin ja PI-loggeri sijoitettiin 3D-tulostettuun levyyn, joka tuli sopivan pituisilla holkeilla alumiinilevyyn kiinni. Mittalaitteiston paino oli noin 600 grammaa, joka ei aiheuttanut ongelmia dronen kantokyvyille. Tämän lisäksi oli vielä

dronen katolla olevien kahden antennin paino noin 40 grammaa yhteensä. Kahden kerroksen levy-rakenne tuli dronen alapuolelle neljällä ruuvilla, jotka kiinnittyivät suoraan runkoon. Kuvioissa 15, 16 ja 17 nähdään mittalaitteiston rakennetta.

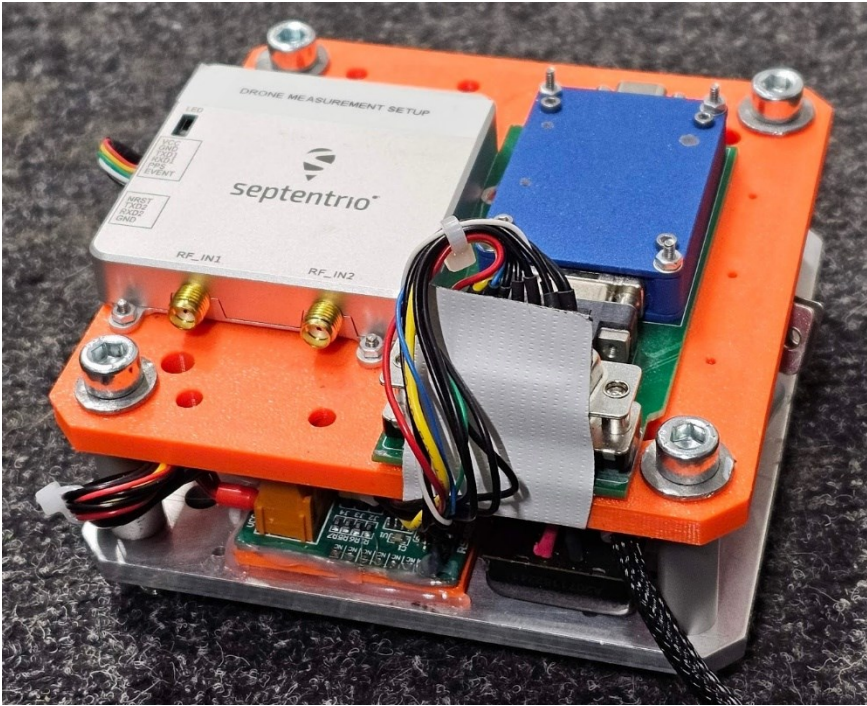


Kuvio 15. Mittalaitteiston paino



Kuvio 16. Mittalaitteiston kaksi kerrosta





Kuvio 17. Mittalaitteisto kasattuna

## 12.2 Testilento 1 isolla dronella

Mittalaitteiston valmistelun jälkeen päästiin tekemään ensimmäinen datankeräyslento yhteistyökumppanin dronella. Pilottina testilennolla toimi valmistajan edustaja. Lennon suorittamista oli mietitty etukäteen sen mukaan millaisista tilanteista halutaan kerätä anturidataa. Testille oli määritetty kuusi erilaista toimintaa, joista pyrittiin saamaan antureiden näkökulmasta erilaista tietoa. Lisäksi tehtiin muistiinpanoja lennon tapahtumista kellonaikoihin minuutin tarkkuudella, jotta eri tilanteiden erottaminen datasta olisi helpompaa. Taulukossa 3 nähdään lennosta kirjatut tapahtumat aikaleimoinen.

Taulukko 3. Lennon 1 loki

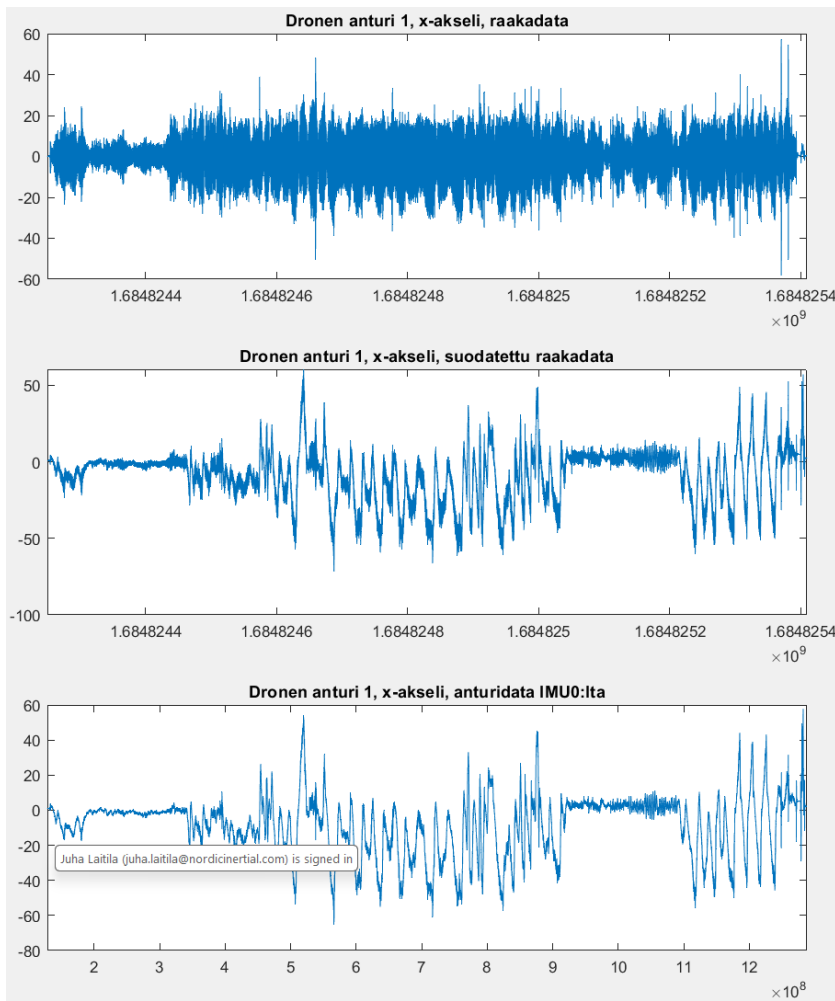
klo	min	tapahtuma
9.44	0	Maassa paikoillaan, moottorit käynnissä
9.45	1	Paikallaan leijuminen
9.48	4	Nopeaa lentoa, ei maksiminopeuksia
9.50	6	Maksiminopeudella lentoa
9.52	8	Maksiminopeus ja samalla korkeuden muutos
9.57	13	Nousu ja lasku
10.00	16	Paikallaan leijuminen
10.01	17	Nopeat kiihdytykset ja jarrutukset

Lennon aikana suoritettiin kuusi erilaista vaihetta. Ensimmäiseksi drone nostettiin ilmaan ja sen annettiin leijua paikoillaan koskematta ohjaimiin. Seuraavassa vaiheessa pilottia pyydettiin lentämään edestakaisin reippaammalla vauhdilla kuin olisi tyypillisen lento-operaation lentonopeus. Korkeus pyrittiin pitämään suurin piirtein samana. Seuraavaksi toistettiin sama, mutta nyt lennettiin dronen maksiminopeuksilla. Neljäntenä vaiheena jatkettiin maksiminopeuksilla, mutta mukaan otettiin samalla myös korkeuden muutokset niin nopeasti kuin mahdollista. Seuraavaksi dronen lentokorkeutta nostettiin ja laskettiin pysyen muuten paikoillaan. Viimeisenä tehtiin vielä maksiminopeudella kiihdytyksiä sekä jarrutuksia. Lento kesti yhteensä noin 18 minuuttia.

### 12.3 Testilennon 1 tulokset

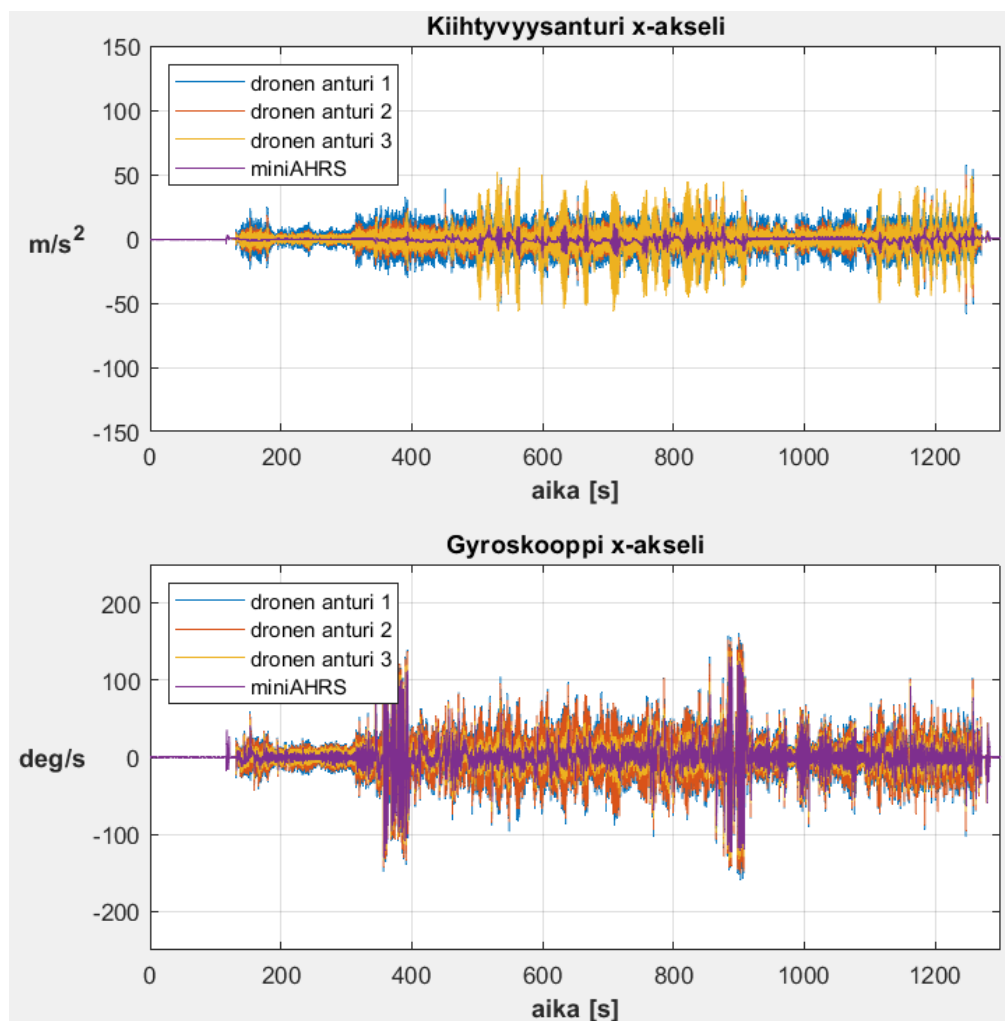
Ardupilot tallentaa paljon dataa muistiin lennon aikana ja esimerkiksi kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien tallentamat tiedot löytyvät kahdesta paikasta logista. Antureiden raakadataan, jota ei ole käsitelty mitenkään, pääsee käsiksi lukemalla logista suoraan kunkin anturin osiosta näiden tallentamat tiedot. Nämä tiedot löytyvät ardupilotin logista myös inertiamittayksiköiden alta, jossa on muitakin IMUjen tallentamia tietoja. Täältä saatavat antureiden tiedot eivät kuitenkaan ole samanlaista raakadataa, vaan näitä on alipäästösuodatettu. Kuviossa 18 nähdään esimerkki kiihtyvyyssanturin x-akselin raakadatasta sekä inertiamittayksikön tietojen alta haetusta samasta datasta. Kuviossa keskimäinen kuvaaja on saatu, kun raakadataa on Matlabissa suodatettu liukuvalla keskiarvolla, jolloin lopputulos alkaa muistuttamaan alinta kuvaajaa. Tulevissa datan vertailuissa ja kuvioissa on käytetty antureiden raakadataa.





Kuvio 18. Kiihtyvyyssanturin data eri lähteistä

Kuviossa 19 nähdään esimerkkeinä dronen autopilotin sekä miniAHRS:n kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien x-akselien kuvaajat. Kaikkien akselien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien kuvaajat löytyvät liitteistä 1–2. Autopilotin omat anturit vaikuttavat mitanteen erittäin paljon tärinää verrattuna referenssinä toimivaan miniAHRS:ään. Gyroskooppien vastaavissa kuvaajissa nähdään samanlaista dronen omien antureiden mittaamaa tärinää, mutta esimerkiksi noin 400 sekunnin kohdalla nähdään kaikkien antureiden mitanteen melko hyvin samoja nopeuksia. Ajanhetki osuu yhteen nopean lennon ja maksiminopeudella lennon aikoihin, ks. taulukko 3.



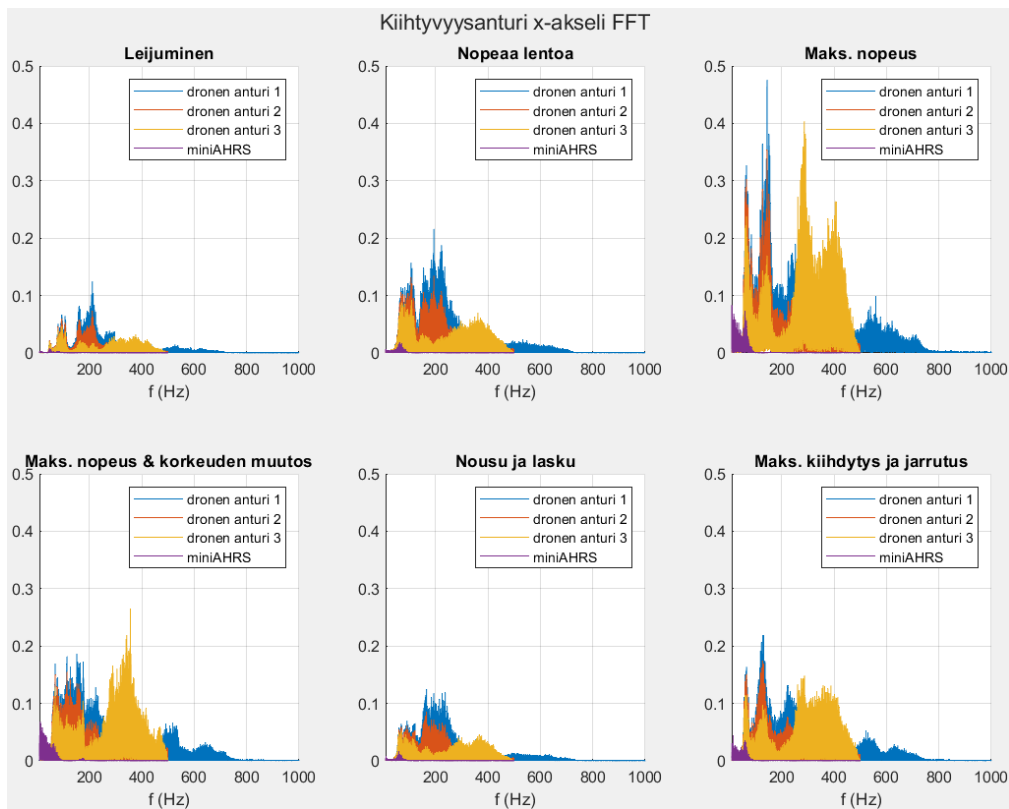
Kuvio 19. Kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit, x-akseli

Suurimmat kiihtyvyyssanturin tallentamat arvot ovat yllättävän isoja. Tältä lennolta autopilotin anturi 1 taltioi suurimman absoluuttiarvon  $147 \text{ m/s}^2$ , joka vastaisi 15 g:tä ja lähestyy jo antureiden mitta-alueen yläpäättä, ks. taulukko 2. Tämä kuitenkin poikkeaa selvästi autopilotin kahden muun anturin taltioimista suurimmista arvoista. Kaksi suurinta absoluuttiarvoa osuivat "maksimi lento- nopeus & korkeuden muutos" ja "maksimi lentonopeus" lentotilanteisiin, tässä järjestyksessä. MiniAHRs:n kiihtyvyyssanturit ovat tallentaneet hyvin pienet maksimi-arvot verrattuna autopilotin antureihin. Gyroskooppien arvoissa ei nähdä samanlaisia piikkejä vaan sekä autopilotin omat anturit että miniAHRs ovat taltioineet suurin piirtein saman suuruusluokan maksimit. MiniAHRs:ään verrattuna autopilotin kuvaajissa näkyy kuitenkin huomattavasti enemmän tärinää. Taulukossa 4 nähdään tältä lennolta taltioidut maksimi-arvot.

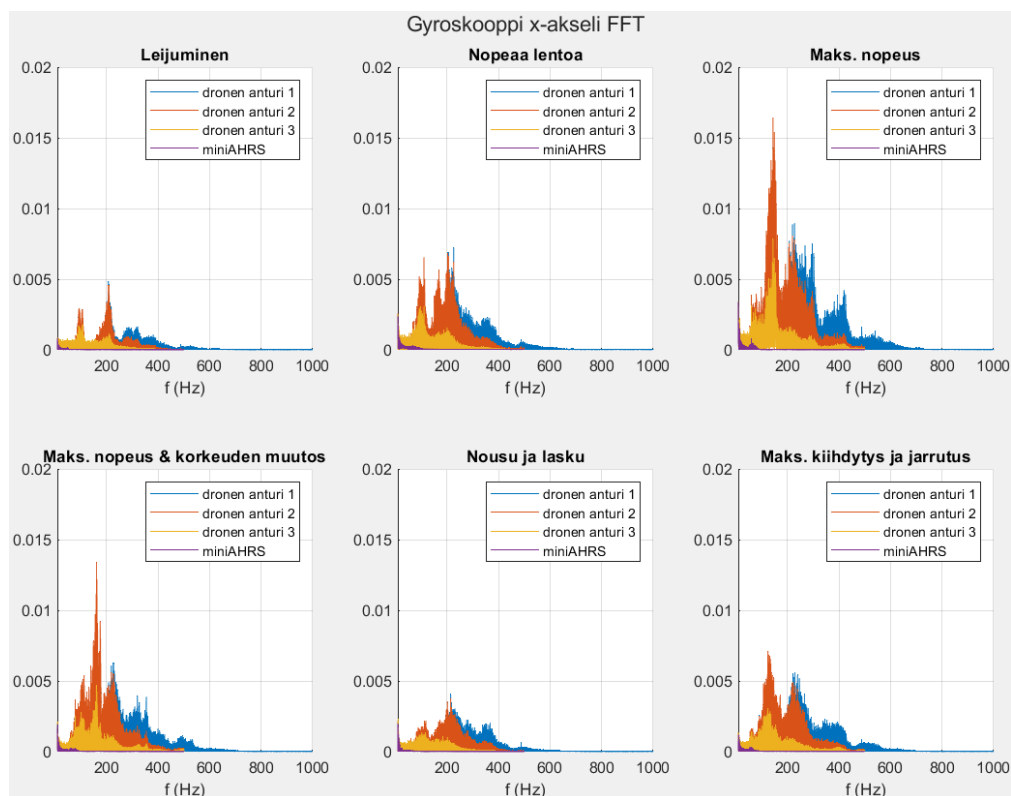
Taulukko 4. Testilento 1, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot

		Kiihtyvyyssanturi			Gyroskooppi		
		x[m/s <sup>2</sup> ]	y[m/s <sup>2</sup> ]	z[m/s <sup>2</sup> ]	x[deg/s]	y[deg/s]	z[deg/s]
Dronen anturi 1	maks.	57,1	57,2	125,5	159,7	189,1	205,0
	min.	-58,2	-55,2	-147,0	-158,5	-195,7	-196,2
Dronen anturi 2	maks.	50,1	40,8	61,0	154,4	204,8	195,5
	min.	-50,5	-38,8	-77,3	-150,8	-202,9	-198,9
Dronen anturi 3	maks.	55,1	65,9	50,3	138,0	133,4	135,8
	min.	-56,7	-60,3	-67,0	-133,7	-120,5	-139,5
MiniAHRS	maks.	18,3	15,3	13,9	130,5	121,1	130,9
	min.	-16,1	-18,9	-24,1	-129,2	-111,7	-129,6

Anturidata muutettiin aikatasosta taajuustasoon käyttäen nopeaa Fourier-muunnosta (Fast Fourier Transform, FFT), jotta datan sisällöstä sai selkeämmän kuvan. Kuvioissa 20 ja 21 nähdään esimerkkeinä kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien x-akseleiden FFT-kuvaajat eri lentotilanteisiin jaoteltuina. Kaikkien akselien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien taajuustason kuvaajat löytyvät liitteistä 3–8.



Kuvio 20. Kiihtyvyyssanturit, x-akseli, FFT, testilento 1



Kuvio 21. Gyroskoopit, x-akseli, FFT, testilento 1

FFT-kuvaajista nähdään, että värinän taajuuksat keskittyvät pääsääntöisesti alle 500 Hz taajuuksiin. Suurimpia piikkejä nähdään suurin piirtein 100–300 Hz taajuuksilla. Kiihtyvyyssantureiden z-akselilla nähdään nopean lennon ja maksimilentonopeuden datoissa muutama piikki, jotka osuvat 150, 300 ja 450 Hz kohtiin ja saattavat olla jonkin värinän monikertoja. Muista datoista ei löydy samanlaisia selkeitä kohtia, joissa piikit osuvat yhtä tarkasti monikertoihin. Myös näitä kuvaajia katsoessa vaikuttaa siltä, että miniAHRS ei jostain syystä ole nähnyt kaikkia samoja värinöitä kuin dronen omat anturit.

## 12.4 Testilento 2 isolla dronella

Toimeksiantajalla oli yhteistyössä olleen anturivalmistajan kautta pääsy uuteen vielä virallisesti julkaisemattomaan anturiin, joka oli erityisesti kiinnostuksen kohteena ja siitä haluttiin kerätä lento-dataa. Mittalaitteistossa mukana olleessa piirilevyssä ei ollut paikkaa tällaiselle anturille, mutta sen vaatimat käyttöjännitteet ja kommunikointilinjat olivat olemassa. Anturi saatiin yhdistettyä piirilevyyn pitkällä kaapelilla. Kaapelin käyttö mahdollisti samalla sen, että tämä anturi voitiin sijoittaa erilleen haluttuun kohtaan dronessa eikä koko piirilevyn sijainti määrittänyt anturin sijaintia.

Edellisellä lennolla miniAHRS ei näyttänyt mitanneen samanlaista tärinää kuin autopilotin anturit. Epäiltiin voisiko tämä johtua sen sijainnista autopilottiin nähden. Autopilotti oli kiinnitetty dronen sisälle suoraan runkoon. MiniAHRS oli sen sijaan dronen ulkopuolella sen pohjassa, mutta kuitenkin runkoon kiinnitetyssä alumiinilevyssä. Tämä uusi anturi päätettiin kiinnittää suoraan autopilot-tietyksikön päälle, jotta se kokisi samat tärinät kuin autopilotti. Tämän mahdollisti anturin ja levyn välinen pitkä kaapeli. Tähän anturiin viitataan jatkossa nimellä vertailtava\_anturi\_2. Tältä lennolta kerättiin tämän ja miniAHRS:än lisäksi tiedot myös vertailtava\_anturi\_1:stä.

Myös tälle lennolle oli mietitty etukäteen sen toteuttamista ja lentotilanteita. Neljä erilaista toimintaa oli määritelty tälle lennolla sekä selkeät paikallaan leijumiset näiden välissä, jotta tilanteet on helpompi erottaa datasta. Tämän lisäksi tehtiin myös muistiinpanot minuutin tarkkuudella lennon tapahtumista. Taulukossa 5 nähdään lennosta kirjatut tapahtumat aikaleimoinen.

Taulukko 5. Lennon 2 loki

klo	min	tapahtuma
14.13	0	Maassa paikoillaan
14.18	5	Maksiminopeudella edestakaisin, sama korkeus
14.20	7	Paikallaan leijuminen
14.20	7	Maksiminopeus ja samalla korkeuden muutos
14.23	10	Paikallaan leijuminen
14.23	10	Nousu ja lasku
14.25	12	Paikallaan leijuminen
14.25	12	Nopeat kiihdytykset ja jarrutukset
14.27	14	Maassa paikoillaan

Ensimmäisenä oli maksiminopeudella lentämistä pitäen korkeus samana. Seuraavaksi samanlaiset nopeudet, mutta samalla lentokorkeuden muutos. Viimeiset kaksi toimintaa olivat pelkkä lento-korkeuden muutos ja maksiminopeudella kiihdytykset ja jarrutukset. Lento kesti yhteensä noin 14 minuuttia.

## 12.5 Testilennon 2 tulokset

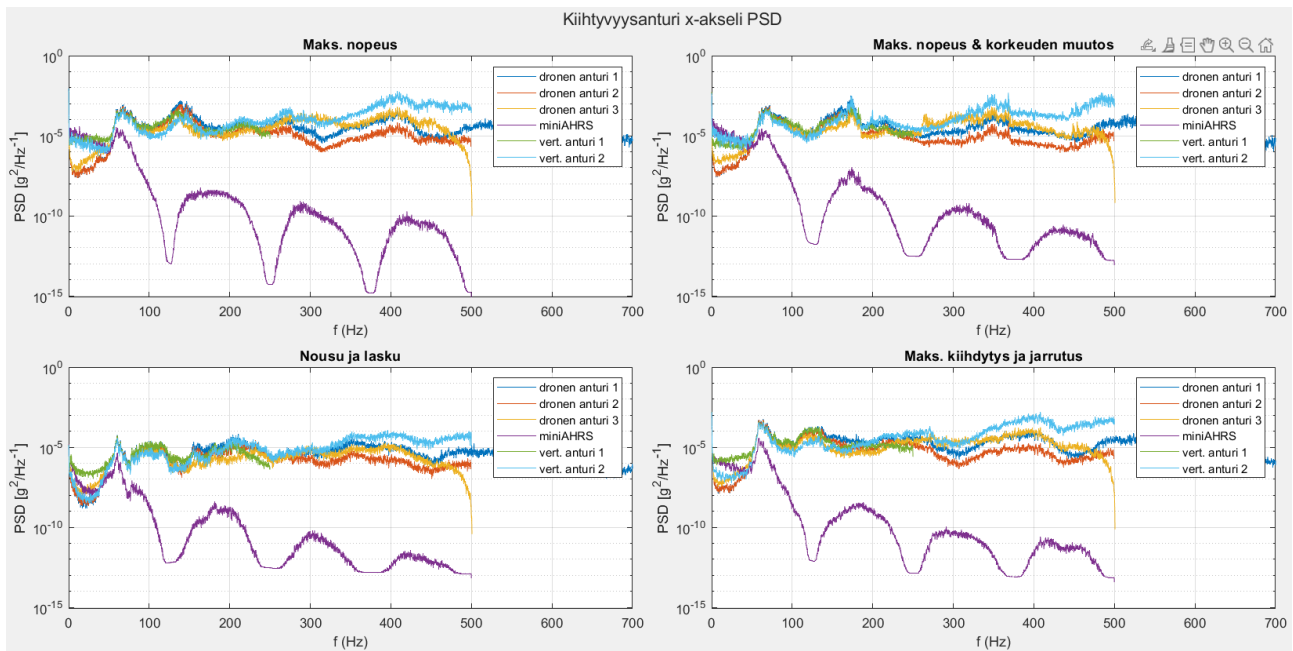
Taulukossa 6 nähdään antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot tältä lennolta. Huomataan, että miniAHRS on edelleen mitannut vaimeampia tärinöitä kuin muut anturit. Vertailtava

anturi 1 on suurin piirtein samalla tasolla autopilotin antureiden kanssa. Autopilotin päälle kiinnitetty vertailtava anturi 2 on mitannut osin pienempiä osin suurempia värinöitä autopilottiin nähden ja on myös logannut koko lennon suurimmat arvot. Taajuustasossa tilanne näyttää verrattain samalta kuin testilennolla 1. Kaikkien akselien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien taajuustason kuvaajat löytyvät liitteistä 9–14.

PSD (Power Spectral Density, tehospektritiheys) kuvaa signaalin tehon jakautumista taajuusalueella eli kuinka paljon jokaisella signaalin sisältämällä taajuuskomponentilla on suhteellista tehoa. Antureiden datasta laskettiin PSD:t ja kuviossa 22 nähdään kiihtyvyyssantureiden x-akselien PSD-kuvaajat. Kaikkien akselien kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien PSD-kuvaajat löytyvät liitteistä 15–20.

Taulukko 6. Testilento 2, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot

		Kiihtyvyyssanturi			Gyroskooppi		
		x [m/s <sup>2</sup> ]	y [m/s <sup>2</sup> ]	z [m/s <sup>2</sup> ]	x [deg/s]	y [deg/s]	z [deg/s]
Dronen anturi 1	maks.	69,2	85,7	144,7	185,9	253,1	137,7
	min.	-84,5	-102,1	-138,6	-178,3	-250,0	-160,4
Dronen anturi 2	maks.	65,4	78,3	82,5	190,0	268,6	148,2
	min.	-71,1	-89,6	-59,8	-180,8	-261,8	-166,7
Dronen anturi 3	maks.	69,4	59,4	71,3	131,0	130,1	94,2
	min.	-74,2	-52,0	-59,8	-127,6	-144,8	-60,2
MiniAHRS	maks.	16,1	18,1	31,4	126,4	122,8	86,8
	min.	-16,6	-19,2	-17,6	-118,1	-133,8	-55,2
Vert. anturi 1	maks.	63,0	66,6	77,2	135,8	125,7	97,3
	min.	-54,4	-65,5	-57,4	-127,6	-144,1	-82,1
Vert. anturi 2	maks.	140,5	117,0	82,1	138,6	137,5	99,2
	min.	-163,8	-110,6	-62,3	-131,9	-172,8	-73,7



Kuvio 22. Kiihtyvyysanturit, x-akseli, PSD, testilento 2

Taulukosta ja kuviosta (sekä liitteistä 16–20) nähdään, että miniAHRS on mitannut tämänkin lennon ajalta muihin verrattuna hyvin vaimeita tärinöitä. Pienillä taajuuksilla se on mitannut muiden kanssa vertailukelpoisesti, mutta taajuuden kasvaessa tapahtuu voimakasta vaimentumista. Tämä vaimentuminen näyttää alkavan selvästi alle 100 Hz taajuudesta.

Vaikutti siltä, että anturin asetuksissa oli jotain pielessä. MiniAHRS:llä on tietokoneella käytettävä konfigurointiohjelma, jolla voi muun muassa säätää anturin asetuksia. Näistä ei kuitenkaan löytynyt mitään ongelmaa, joka selittäisi saadut tulokset. MiniAHRS:n valmistajalle lähetettiin kysymys, että mikä voisi selittää saadut tulokset. Valmistajan vastauksesta selvisi, että anturin asetuksissa oli alipäästösuodattimen arvona 66 Hz eikä 260 Hz kuten oli oletettu. Samalla selvisi, että valmistajalla oli olemassa uudempi versio konfigurointiohjelmasta, jossa alipäästösuodattimen arvoa oli mahdollista säätää. Tämä ohjelma oli kuitenkin mahdollista saada vain valmistajaan yhteyttä ottamalla sillä sitä ei ollut julkisesti jaossa. Alipäästösuodattimen matalaksi asetettu arvo selitti miksi miniAHRS ei ollut mitannut korkeamman taajuuden tärinöitä kuten kaikki muut anturit.

## 12.6 Testilento 3 pienellä dronella

Isommalla dronella tehtyjen testilentojen lisäksi päätettiin kerätä hieman vertailevaa dataa myös aivan eri kokoluokan laitteella. Tästä saatiin tietoa onko kahden hyvin eri kokoisen dronen välillä nähtävissä huomattavaa eroa antureiden tallentamissa arvoissa. Lisäksi tämän testilennon aikana kerättiin tietoa poikkeavista lentotilanteista, joiden tekeminen suurella dronella olisi saattanut aiheuttaa sekä vaaratilanteita että suurempia kustannuksia mahdollisen hallinnan menetyksen vuoksi. Käytössä oli DJI:n valmistama 249 grammaa painava kuluttajille suunnattu kuvausdrone. Tähän laitteeseen ei ollut mahdollisuutta kiinnittää ylimääräisiä mittalaitteistoja johtuen dronen erittäin pienestä koosta. Valmistaja ei myöskään salli mitään ylimääräistä kiinnitettäväksi, sillä dronen paino on vain yhden gramman droneja koskevan C0-luokituksen maksimi painon alapuolella. Lisäpaino rikkoisi säädöksiä, sillä dronesta tulisi painon puolesta C1-luokan alus, mutta se ei kuitenkaan täytä kaikkia tämän luokan vaatimuksia.

Tällä dronella kerättiin tavallisen lennon lisäksi dataa simuloituista törmäyksistä. Ajatuksena oli kokeilla saadaanko aikaan tilanteita, joissa antureiden mitta-alueet loppuvat kesken tai nähdäänkö jotakin muuta poikkeavaa. Näiden kokeilemiseksi käytettiin kahta lähestymistapaa: laskeutumalla maata kohti törmäten samalla esteeseen, jota drone ei näe sekä horjuttamalla dronen tasapainoa sen leijuessa paikallaan. Tässä dronessa oli esteentunnistusantureita eteen-, taakse- ja alaspäin ja jotta dronella voitiin yrittää törmätä esteeseen sen laskeutuessa, sen alaspäin osoittavat anturit peitettiin teipillä. Jos näin ei olisi tehty, drone ei olisi suostunut laskeutumaan lainkaan huomatesaan vastassa olevan esteen.

Antureiden peittäminen kuitenkin vaikeutti huomattavasti tarkoituksellista esteeseen törmäystä. Monet dronet osaavat pitää itsensä automaattisesti melko tarkasti paikoillaan samoissa koordinaateissa perustuen joko satelliittipaikannukseen tai dronen omiin antureihin. Myös käytössä olleessa dronessa paikoillaan pysyminen perustui näihin samoihin menetelmiin, mutta dronen ollessa riittävän matalalla, tähän käytetään pääsääntöisesti alas suunnattuja kameroita ja antureita (DJI Mini 3... 2024, 18–20). Kun nämä anturit oli peitetty, drone ei osannut pysyä paikoillaan vaan sen sijainti vaelteli sattumanvaraisesti.

Ensimmäinen törmäykestesti yritettiin joka tapauksessa suorittaa edellä kuvatulla tavalla niin, että dronella aloitettiin laskeutuminen, mutta maahan oli asetettu este, jonka reunaan dronen pohjan



etu- tai takaosa yritettiin saada osumaan. Riittävällä laskeutumisnopeudella aikaansaadun osuman seurauksena drone kallistuisi äkillisesti eteen- tai taaksepäin. Tämä voisi edellyttää antureilta enemmän kuin normaali lento. Lisäksi visuaalisesti voitiin tarkastella miten drone käyttäytyy tällaisen yllättävän tilanteen seurauksena.

Antureiden peittämisen seurauksena ilmennyt vaeltelu teki esteen reunaan laskeutumisesta lähes mahdotonta. Laskeutumista yritettiin useita kertoja ja useimmiten seurauksena oli jonkinlainen osuma moottorivarsiin tai potkureihin. Tämä aiheutti dronen välittömän hallinnan menetyksen, kiepsahduksen ylösalaisin ja maahansyöksyn. Useiden yritysten jälkeen esteeseen osuttiin oikealla tavalla yhden kerran, mutta tätä ei onnistuttu tekemään erityisen suurella laskeutumisnopeudella.

Koska esteeseen laskeutuminen todettiin niin haastavaksi, päätettiin kokeilla toista lähestymistapaa saada nopeita liikkeitä aikaiseksi. Dronen annettiin leijua paikoillaan ja sen tasapainoa yritettiin horjuttaa tönäisemällä sitä nopeasti eri suunnista. Nopean asennon muutoksen ja sitä seuraavien dronen tekemien korjausliikkeiden toivottiin saavan parempia tuloksia aikaan kuin liian haastavaksi todettu laskeutuminen. Drone onnistui välillä vakauttamaan itsensä pakotetun asennon muutoksen jälkeen, mutta useampia kertoja seurauksena oli myös autopilotin hallinnan menetys. Joinakin kertoina kauko-ohjaimella annetut ohjauskomennot ehtivät palauttaa hallinnan, ja toisina seurauksena oli maahansyöksy. Nämä eivät silti välttämättä liity antureiden mitta-alueiden rajoituksiin vaan kyse voi olla autopilotin ohjelmiston ja algoritmien toiminnasta ja huonosta reagoinnista yllättäviin tilanteisiin.

Useasta maahansyöksystä huolimatta suuremmilta vahingoilta säästyttiin varmastikin sen vuoksi, että drone itsessään on hyvin kevyt. Isolla dronella vastaavanlaisten tilanteiden aikaansaaminen olisi ollut vaarallista sen painosta, potkureiden koosta ja moottoreiden voimasta johtuen. Mahdollinen törmäys olisi todennäköisesti johtanut suurempiin vaurioihin. Vaikka drone itsessään säilyi ehjänä kaikkien törmäysten jälkeen, kuitenkin seitsemän sen kahdeksasta potkurista vaati uusi- mista niihin tulleiden murtumien ja lohkeilujen vuoksi.

Lennosta tehtiin muistiinpanot, jotta dataa käsiteltäessä kuvaajissa näkyvät tapahtumat voidaan helpommin sitoa todellisen lennon aikana tapahtuneisiin asioihin. Taulukossa 7 näkyy testilen-

nosta 3 tehdyt muistiinpanot. Tapahtumat on kirjattu kellon minuuttilukeman tarkkuudella muistiin eli kuvaajissa nähtävät asiat osuvat noin minuutin aikavälille kirjatusta ajasta. Tallennus on käynnistynyt, kun droneen on kytketty virrat ja tämän jälkeen on odotettu 2 minuuttia ennen moottorien käynnistämistä ja lentoon lähtöä. Välillä 2–7 minuuttia on ollut normaalia lentoa sisältäen myös mahdollisimman nopeita kiihdytyksiä ja jarrutuksia.

Taulukko 7. Lennon 3 loki

klo	min	tapahtuma
14.44	0	Maassa paikoillaan
14.46	2	Moottorit käyntiin ja lentoon
14.51	7	Laskeutuessa huono osuma esteeseen, maahansyöksy
14.52	8	Laskeutuessa huono osuma esteeseen, maahansyöksy
14.54	10	Laskeutuessa onnistunut törmäys esteeseen, drone jatkaa lentoa
14.56	12	Laskeutuessa huono osuma esteeseen, maahansyöksy
14.59	15	Laskeutuessa huono osuma esteeseen, maahansyöksy
15.00	16	Laskeutuessa huono osuma esteeseen, maahansyöksy
15.01	17	Tönäisy kyljestä, autopilotti sekaisin
15.02	18	Pyöräyttäminen kyljestä, autopilotti sekaisin
15.03	19	Tönäisy pohjasta ylöspäin, autopilotti sekaisin, maahansyöksy

## 12.7 Testilennon 3 tulokset

DJI:n kuluttajapuolen dronet tallentavat lennosta kolme eri lokitiedostoa, joiden sisällöt poikkeavat toisistaan. Ohjaimeen tai ohjaimena toimivaan puhelimeen tallentuu kaksi lokia sekä DAT että TXT muodossa ja lisäksi itse droneen tallentuu toinen DAT muotoinen tiedosto. Riippuen dronesta ja käytössä olevasta ohjelmistoversiosta jotkin näistä lokitiedostoista saattavat olla salattuja ja niihin on pääsy vain DJI:llä. Asiakas voi kuitenkin ladata tällaisen tiedoston dronesta erillisellä ohjelmalla ja lähettää sen DJI:in tukeen, jos lokista on tarve selvittää esimerkiksi takuuseen liittyviä asioita.

Käytössä olleesta DJI Mini 3 Pro dronesta oli mahdollista saada kaksi salaamatonta lennon lokitiedostoa talteen kauko-ohjaimen muistista. Dronen muistiin tallentuva loki oli tässä tapauksessa salattu eikä sen sisällöstä ole tietoa. Työn aikana käytössä olivat dron ohjelmistoversio 01.00.0700, ohjaimen ohjelmistoversio 01.03.1200 ja sovelluksen ohjelmistoversio 1.12.8.

Dronella suoritettujen lentojen tiedot on mahdollista synkronoida DJI:in pilvipalveluun, jolloin lentoihin liittyviä perustietoja voi tarkastella mistä tahansa, mutta tästä saattaa olla seurauksena ohjaimeen tallentuneiden lokitiedostojen häviäminen synkronoinnin jälkeen. Tämän vuoksi synkronointitoiminto poistettiin käytöstä ja varmistettiin näin, etteivät tiedostot häviä, vaikka ohjain sattuisi yhdistämään verkkoon lennon jälkeen tiedostoja etsiessä.

Ohjaimeen tallentuvat lokitiedostot saattavat olla vaikeita löytää ja niiden sijainti riippuu myös käytetystä ohjaimesta ja lentosovelluksen versiosta. Tiedostojen löytämiseksi on kuitenkin ohjeita esimerkiksi DJI Flight Log Viewer (DJI Flight Log Viewer n.d.) verkkosivulla. Kumpikaan ohjaimesta saatu loki ei ollut suoraan luettavassa muodossa, vaan molemmat vaativat ensin prosessoinnin ohjelmalla, joka osaa tulkita näitä tiedostoja. TXT-tiedostojen käsittely onnistuu helposti edellä mainitulla DJI Flight Log Viewer verkkosivulla, jonne TXT-loki ladataan ja tämän jälkeen sivusto näyttää joitakin perustietoja lennosta. Prosessoinnin jälkeen on myös mahdollista ladata CSV-tiedosto, jossa on vielä yksityiskohtaisempaa lentodataa. Käytetyn dronen tapauksessa CSV-tiedostoon tuli 190 saraketta tietoa. Näiden tietojen joukossa ei kuitenkaan ollut minkäänlaista hyödyllistä inertiaantureiden tai dronen asentoon liittyvää tietoa. Lisäksi noin 22 minuuttia kestäneen lennon TXT-loki jakautui 11 erilliseen tiedostoon. Nämä pitäisi kaikki prosessoida erikseen ja yhdistää lopuksi yhteen tiedostoon, jotta jälkikäsittely olisi helpompaa.

Toinen ohjaimesta saatava loki oli DAT-tiedosto. Tämä vaati myös prosessointia ohjelmalla, joka osaa tulkita lokin sisältöä. Tähän löytyy DatCon (DatCon Introduction n.d.) niminen ohjelma (kuvio 23), joka osaa lukea DJI:n DAT-tiedostoja. Ohjelma osaa kuitenkin lukea vain salaamattomia DAT-tiedostoja eli itse droneen tallentuvaa DAT-lokia tällä ei pystytä lukemaan. Ohjelma osaa prosessoida DAT-tiedoston CSV-muotoon, jonka käsittelyä voi jatkaa haluamallaan ohjelmalla. Tästä tiedostosta saatiin DatCon käsittelyn jälkeen datapaketti, joka sisälsi 785 saraketta tietoa. Mittausten eli rivien määrä riippuu lennon pituudesta ja tässä tapauksessa lokitiedosto oli 92797 riviä noin 22 minuutin lennosta. Tästä datapaketista löytyivät TXT-lokista puuttuneet kiihtyvyyssanturin ja gyrokoopin tiedot, jotka tästä lennosta haluttiin saada selville.

DatCon Version 4.3.0

File Preferences Signal Groups Help

.DAT file C:\Users\JuhaLaitila\2024-03-14\_22-49-49\_FLY187.DAT

Output Dir C:\Users\JuhaLaitila\dji View It

**Time Axis**

Offset - time axis 0 point

☒ Recording Start

☐ Motor Start

☐ Flight Start

Lower Time .000 2806882

Upper 1047.995 4027106816

☒ Recording Start

☐ Motor Stop

☐ Recording Stop

☐ GPS Lock

**CSV**

Sample Rate 200 Hz

☒ .CSV 2024-03-14\_22-49-49\_FLY187.c View It

☒ Event Log (column in .csv)

**Log Files**

☐ Event Log File 2024-03-14\_22-49-49\_FLY18 View It

☐ Config Log File 024-03-14\_22-49-49\_FLY187 View It

☐ RecDefs File 24-03-14\_22-49-49\_FLY187.r View It

**KML**

KML File 2024-03-14\_22-49-49\_FLY187.k View It

☐ Ground Track

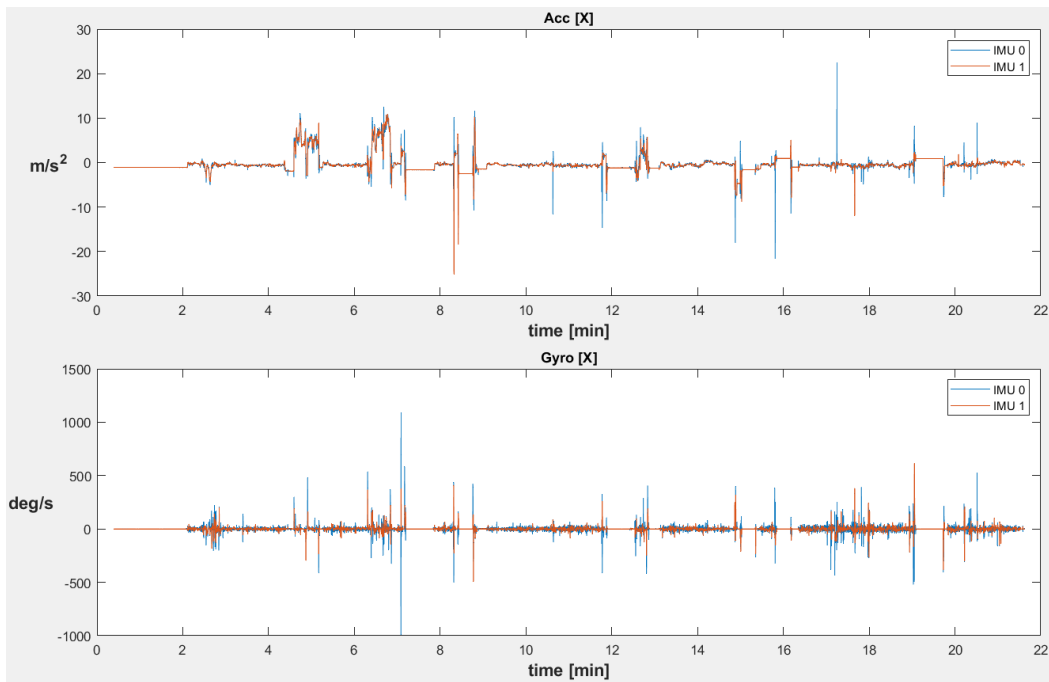
☐ Profile Enter HP Elevation Meters

GO!

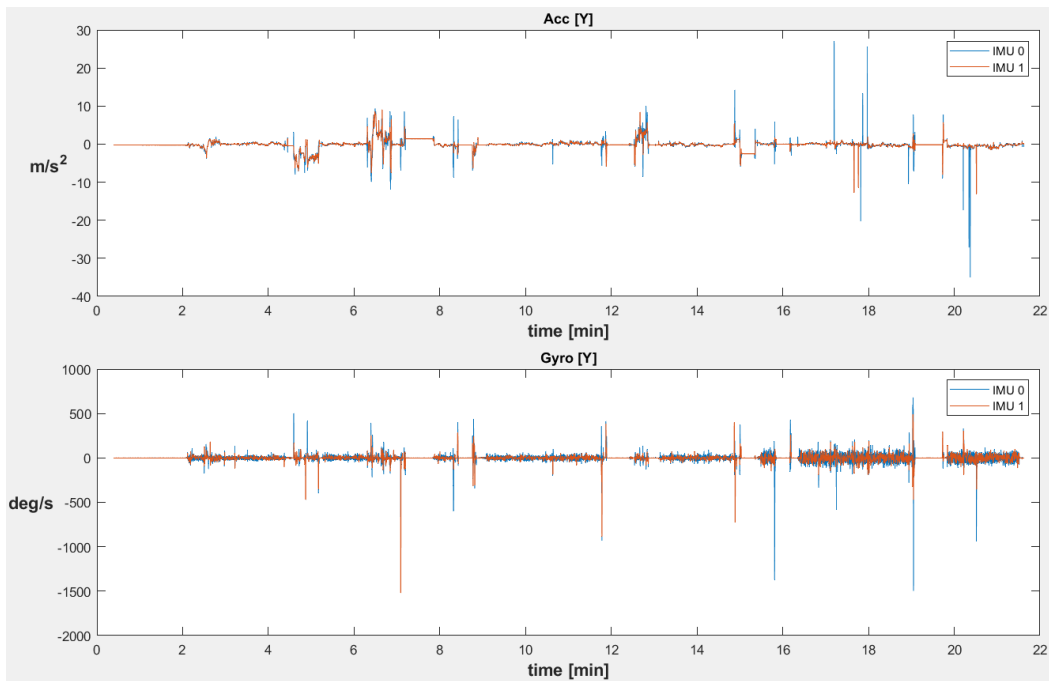
Aircraft type unknown: Assuming 4 cells per battery

Kuvio 23. DatCon ohjelma

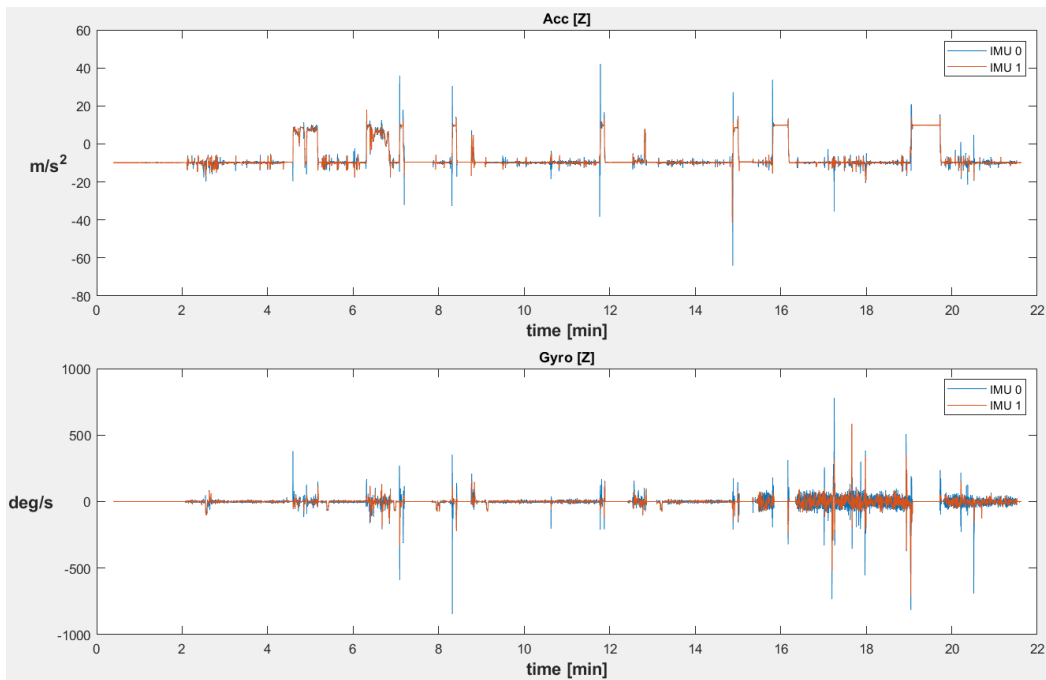
Antureiden data vaikutti olevan alipäästösuodatettua eikä samanlaista raakadataa, jollaista saatiin lennoilta 1 ja 2. Datasta tehdyt kuvaajat muistuttavat paljon Ardupilotin logissa ollutta inertia-mittayksikön tietojen alta haettua anturidataa, joka nähtiin kuviossa 18. Kuvioissa 24, 25 ja 26 nähdään kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien mittaamat arvot x-, y- ja z-akselien suhteen. Dronessa on kaksi inertiamittayksikköä IMU 0 ja IMU 1 ja nämä molemmat sisältävät kolmiakseliiset kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit. Tässä on kyseessä kahdennettu järjestelmä, jotta lennonohjausyksikkö voi turvautua vara-antureihin, jos ensisijaisen inertiamittayksikön toiminnassa olisi häiriöitä. DJI:n järjestelmä on suljettu, toisin kuin Ardupilot, ja sen vuoksi antureista ja niiden ominaisuuksista ei ollut tarkempaa tietoa.



Kuvio 24. Kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit, x-akseli

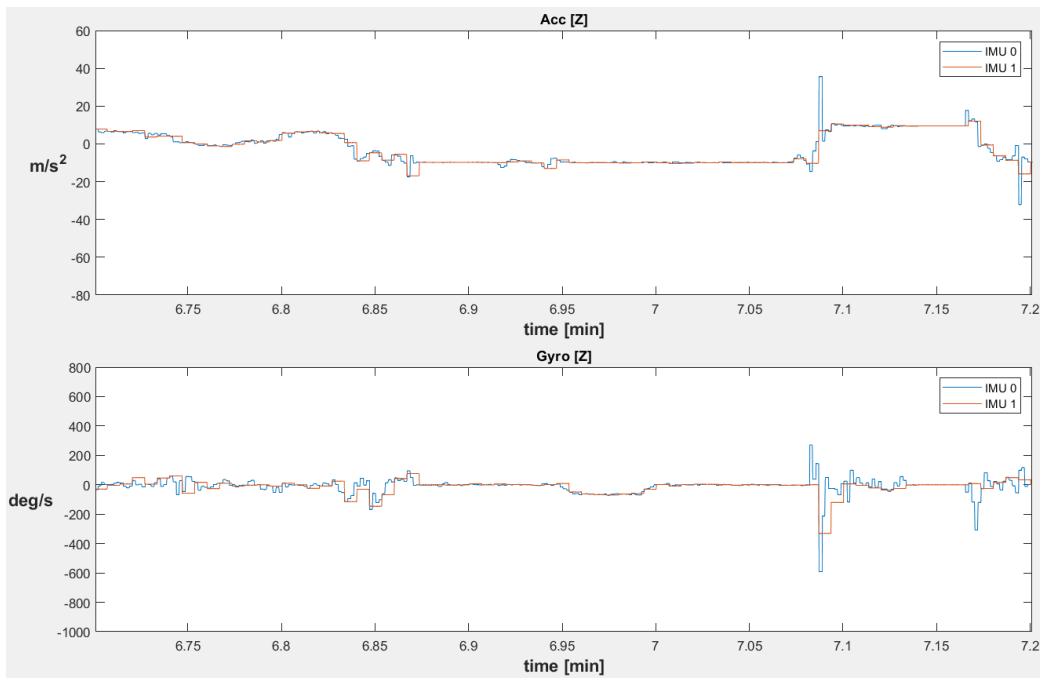


Kuvio 25. Kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit, y-akseli



Kuvio 26. Kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit, z-akseli

Edellä olevista kuvioista huomataan, että IMU 0 ja IMU 1 anturit eivät näytä rekisteröineen lennon tapahtumia täsmälleen samoin. Kuviossa 27 on lyhyemmän aikavälin kuvaajat z-akselin kiihtyvyysanturista ja gyroskoopista. Näistä nähdään, että IMU 0 ja IMU 1 näyttävät yleisesti ottaen samaa, mutta niiden välillä vaikuttaa olevan eroa näytteenottotaajuudessa. X- ja y-akselien anturit käyttäytyivät samoin. Tämä selittää miksi kuvaajissa ei nähdä molempien antureiden osalta samoja piikkejä kuvaajien y-akseleilla. Joissakin kohdissa näyttää siltä, että vain IMU 1 olisi tallentanut korkean piikin, mutta tämä johtuu kuvaajien piirtymisestä päällekkäin niin, että IMU 0 kuvaaja peittyy.



Kuvio 27. Kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit, z-akseli, 30 sekuntia

Kuvioissa 24, 25 ja 26 nähdään korkeita piikkejä kiihtyvyyksissä ja kulmanopeuksissa, jotka osuvat ajallisesti hyvin yhteen maahansyöksyjen kanssa, vrt. taulukko 7. Vastaavasti kuitenkin 10 minuutin, kuvaajissa noin 10,5 minuutin, kohdalla saatu ainoa onnistunut osuma esteeseen ei saanut aikaan kovinkaan suuria arvoja. Normaali lennon, aikavälillä 2–7 minuuttia, kovat kiihdytykset, jarrutukset ja käännökset ovat saaneet aikaan suurempia kiihtyvyyksiä ja kulmanopeuksia. Esteeseen laskeutumista ei lopulta onnistuttu tekemään suurella nopeudella ja antureiden tiedot vahvistavat tämän.

Taulukossa 8 nähdään antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot. On vaikea todeta varmasti ovatko kaikki absoluuttisesti suurimmat arvot tallentuneet vasta maahan osumisen yhteydessä vai jo hetki aikaisemmin autopilotin tehdessä nopeita liikkeitä. Antureiden mitta-alueiden loppuminen ei todennäköisesti ollut syynä maahansyöksyihin vaan ennemminkin kyseessä oli autopilotin reagoinnin ongelmat nopeaan ja voimakkaaseen tasapainon horjuttamiseen.

Taulukko 8. Testilento 3, antureiden tallentamat suurimmat ja pienimmät arvot

		Kiihtyvyyssanturi (acc)			Gyroskooppi (gyro)		
		x[m/s <sup>2</sup> ]	y[m/s <sup>2</sup> ]	z[m/s <sup>2</sup> ]	x[deg/s]	y[deg/s]	z[deg/s]
Inertiamittayksikkö 0 (IMU0)	maks.	22,5	27,1	42,0	1087,0	678,7	778,7
	min.	-21,7	-35,1	-64,1	-990,3	-1496,5	-846,3
Inertiamittayksikkö 1 (IMU1)	maks.	10,8	9,1	17,8	613,4	489,6	585,1
	min.	-25,1	-13,0	-41,3	-491,5	-1517,7	-698,7

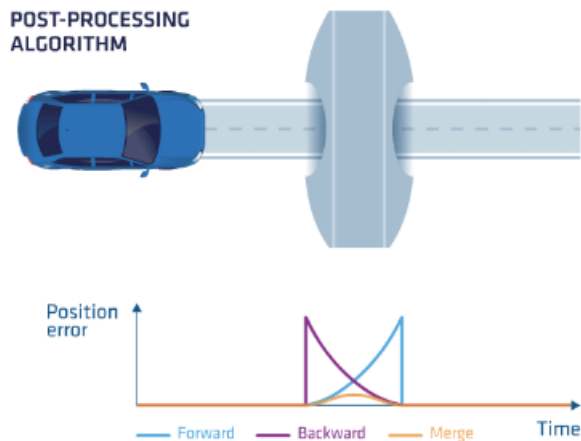
### 13 Jälkiprosessointi

Navigointijärjestelmät käyttävät yleisesti inertia-antureita sekä GNSS-vastaanottimia aika- ja paikkatiedon määrittämiseen sekä suotimia, joilla estimoidaan tilatietoa sen hetkisten ja aikaisempien tulosten perusteella. Vastaanotettavien GNSS-signaalien perusteella laskettuun aika- ja paikkatietoon vaikuttaa moni virhelähde ja usein on käytettävä erillistä korjausdataa, jolla kompensoidaan näitä virheitä. On mahdollista käyttää tällaisia korjauksia myös reaaliajassa, jos järjestelmässä on mahdollisuus niiden vastaanottoon ja reaaliaikaiseen prosessointiin. Jos kuitenkin tehtävän aikana korjausdatan vastaanotossa tulee esimerkiksi katkoksia niin ratkaisun tarkkuus kärsii. Jälkikäteen haettava korjausdata mahdollistaa joustavamman jälkiprosessoinnin, jolloin parametreja voidaan optimoida ja jälkikäsitteilyä ajaa useita kertoja sekä eteen että taaksepäin ajassa. Tämä kuitenkin edellyttää, että sovellus ei tarvitse tarkkaa paikkatietoa reaaliaikaisesti vaan tarkka ratkaisu voidaan laskea vasta jälkikäteen. (Forwards/backwards processing 2014; PPK – Post-Processing Data; What’s IMU/GNSS Post-Processing... n.d.)

Jos järjestelmä menettää GNSS-signaalin, niin inertia-antureihin perustuvan navigoinnin virhe alkaa kasvaa hyvin nopeasti. Kun signaali saadaan takaisin voidaan GNSS-ratkaisun perusteella määrittää oikeat koordinaatit uudelleen ja nollata kertynyt virhe. Ajassa eteen- ja taaksepäin prosessoineissa on se etu, että signaalikatkoksen aikana antureiden virheet kumuloituvat eri suuntiin. Yhdistämällä eteen- ja taaksepäin laskennat voidaan virheen vaikutusta pienentää ja määrittää todellinen kuljettu reitti tarkemmin. Virhe on suurimmillaan ajallisesti GNSS-katkoksen keskellä. Jälkikäsitteilyssä voidaan eteen- ja taaksepäin prosessointien ansiosta saavuttaa tarkempi ratkaisu reaaliaikaiseen korjausdatan käyttöön verrattuna. (Forwards/backwards processing 2014; PPK –



Post-Processing Data; What's IMU/GNSS Post-Processing... n.d.) Kuviossa 28 nähdään havainnollistava kuva GNSS-katkon aiheuttamasta virheen kasvusta ja sen vaikutuksen pienentämisestä ajassa molempiin suuntiin laskien.



Kuvio 28. Virheiden kompensoiminen jälkiprosessoinnilla (What's IMU/GNSS Post-Processing... n.d.)

Inertial Explorer on ohjelmisto, joka on suunniteltu GNSS- ja inertia-anturidatan jälkikäsittelyyn. IE:llä voidaan suorittaa edellä mainitun kaltaisia jälkiprosessointeja, kunhan tiedot ovat ohjelmiston ymmärtämässä muodossa. IE tarjoaa paljon vaihtoehtoja laskennan suorittamiseksi. Ohjelmasta voidaan valita esimerkiksi vain eteenpäin, vain taaksepäin tai molempiin suuntiin laskennat. Yleensä kuitenkin käytetään molempiin suuntiin laskentaa ja pelkkää eteen- tai taaksepäin laskentaa voidaan kokeilla, jos molempien suuntien ratkaisussa ilmenee ongelmia. Lisäksi voidaan käyttää multi-pass-prosessointia, joka parantaa vielä ratkaisun tarkkuutta käyttämällä peräkkäin molempien suuntien laskennassa niitä Kalman-suotimen tiloja, jotka lähestyvät oikeita arvoja. (DGNSS Fundamentals 2011; Precise Point Positioning 2011; Waypoint Software 2024.)

Korjausdatan käyttämiseen voidaan valita joko PPP (Precise Point Positioning) tai DGNSS (Differential GNSS). PPP tarvitsee GNSS-tiedot vain yhdeltä vastaanottimelta ja korjausdata saadaan lasketua laajasta referenssiasemien verkostosta niiden tietoja hyödyntäen. DGNSS vaatii erillisen tukiasematiedon, jonka sijainti tiedetään tarkasti ja tästä voidaan laskea korjaukset liikkuvalla vastaanottimella. Ohjelma voi hyödyntää periaatteessa minkä tahansa inertia-anturin dataa, kunhan se on järjestelty ohjelman odottamaan muotoon. IE:stä löytyy useampia valmiita virhemalleja

eri antureille, mutta omien mallien tekeminen on myös mahdollista, jos mikään valmiista profiileista ei ole sopiva. (DGNSS Fundamentals 2011; Precise Point Positioning 2011; Waypoint Software 2024.)

Testilennoista kerättyä dataa prosessoitiin Inertial Explorerilla, jotta selviäisi nähdäänkö eri antureiden välillä selkeitä eroja virheiden kertymisessä, kun satelliittipaikannuksessa on ongelmia. Tavoitteena oli simuloida GNSS-signaalien katkosta ja prosessoida tällaisia dataa, jotta nähdään miltä lopullisen lasketun ratkaisun paikkatieto näyttää. Ohjelma mahdollistaa yksityiskohtaisen katkosten simuloinnin esimerkiksi jättämällä huomiotta satelliittitiedot vain tiettyjen konstellaatioiden halutuista satelliiteista ja lisäksi katkosten aikavälejä voi määrittää useita. Näiden lisäksi löytyy paljon muitakin asetuksia GNSS ja IMU valintoihin liittyen. Ohjelmalla on siis mahdollista prosessoida valtava määrä erilaisia tilanteita. Tässä työssä päätettiin simuloida yksinkertaista 20 sekunnin katkosta ajallisesti suurin piirtein keskellä lentoa. Katkos koski kaikkia satelliitteja ja tämä tehtiin testilennoille 1 ja 2.

Inertial Explorer käsittelee GNSS-dataa vain omassa GPB-tiedostomuodossaan ja GNSS-vastaanottimelta saatu tieto pitää siksi ennen jälkikäsitteilyn aloittamista muuntaa GPB-tiedostoksi. Ohjelmassa on sisäänrakennettu konvertointityökalu useiden GNSS-vastaanottimien tuottamien tiedostomuotojen muuttamiseksi GPB-muotoon. Septentrion vastaanottimien uutta tiedostoformaattia IE ei kuitenkaan ymmärrä ja sitä varten näiden laitteiden tuottama tiedosto pitää ensin konvertoida RINEX-muotoon. (NI Guide for... n.d.) RINEX (Receiver INdependent EXchange) on avoin standardimuotoinen formaatti GNSS-datalle, joka mahdollistaa tietojen käsittelyn ilman valmistajakohtaisia ohjelmia (RINEX service n.d.).

Septentriolla on ohjelma tiedostojen muuntamiseksi RINEX-muotoon, mutta tässä ilmenee välillä ongelmia ja toinen konvertoinnin tuloksena syntyvistä RINEX-tiedostoista ei sisällä kaikkea tarvittavaa tietoa. RTKLIB on avoimen lähdekoodin ohjelmistopaketti paikannustietojen käsittelyyn. RTKLIB käsittelee tietoja myös RINEX-muodossa ja siitä löytyy sen vuoksi konvertointityökalu. Standardiversio tästä työkalusta ei kuitenkaan osaa käsitellä näitä Septentrion tiedostoja. Tästä löytyy kuitenkin mukautettu versio, jolta näiden tiedostojen muuntaminen onnistuu. (NI Guide for... n.d.; Rtklibexplorer/RTKLIB n.d.)

Lennoista saadut antureiden tiedot oli synkronoitu Matlab ohjelmassa sekä keskenään että GPS-aikaan. Näitä dataa siirrettiin RINEX-tiedostojen kanssa Inertial Exploreriin jälkiprosessointia varten. Kuten edellä mainittiin, ohjelmassa on hyvin paljon säätömahdollisuuksia ja asetuksia ja alkuun oli vaikeuksia saada prosessointia onnistumaan lainkaan. Laskennan saa alkamaan ja se voi jatkua pitkäänkin, mutta jossakin vaiheessa laskenta saattaa kuitenkin epäonnistua.

Ratkaisun löytäminen oli aikaa vievää, sillä jokainen laskentakerta vei asetuksista riippuen muutamasta minuutista lähemmäs 15 minuuttia ja säädettävää oli paljon. Käytettävissä olevaa aineistoa oli yhteensä kahden lennon GNSS-tiedot sekä kymmenen anturidataa (lento1 / 4 anturia, lento2 / 6 anturia). Ongelma saattaisi olla IE:n asetusten lisäksi mahdollisesti myös tuodussa datassa. Anturit olivat kohinaisia eikä ollut varmaa voisiko tämäkin aiheuttaa ongelmia ratkaisun laskemiselle. GPS Worldin (What's IMU/GNSS Post-Processing... n.d.) sivulla todetaan, että jälkiprosessointiohjelmat on yleisesti ottaen tarkoitettu high-end-järjestelmille. Vaikka lennoissa mukana ollut GNSS-vastaanotin oli kyllä laadukas, antureiden data saattaisi olla ongelma.

Inertial Explorerissa on useita valmiita IMU profiileja sekä mahdollisuus tehdä myös omia. Näissä profiileissa määritellään kiihtyvyyssanturin ja gyroskoopin virheiden suuruuksia ja ne vaikuttavat lasketun ratkaisun tarkkuuteen ja siihen kuinka paljon laskennassa painotetaan inertia-anturin tietoja verrattuna GNSS-tietoon. (Waypoint Software 2024.)

Profiilien arvot vaikuttavat kuitenkin olevan enemmän tai vähemmän valistuneita arvauksia kyseisen anturin toiminnasta. Tarkasteluun otettiin satunnaisesti muutamia antureita, joille oli valmistajan tekemä profiili olemassa. Kun näiden antureiden datalehtiä tutkittiin selvisi, että IE:n asetukset ja datalehden arvot useimmiten eivät olleet samat. Kaikkia arvoja ei aina antureiden datalehdistä löytynyt mutta niiden kohdalla, jotka oli ilmoitettu, arvot olivat usein poikkeavat.

Suuri osa valmiista profiileista, joita ohjelmaan on tehty ovat sellaisista antureista, joita valmistaja suosittelee käytettäväksi yhdessä heidän GNSS-vastaanottimiensa kanssa. Näillä saadaan valmistajan mukaan toteutettua tarkat GNSS+INS-järjestelmät ja oleellinen osa tätä on myös jälkiprosessointi käytötapauksesta riippuen. Valmiit profiilit vaikuttavat siis olevan tiedon ja kokemuksen kautta määriteltyjä.

Luvussa 12.3 kuviossa 18 esiteltiin antureiden tietojen löytyminen valmiiksi suodatetussa muodossa. Myös tällainen data valmisteltiin kahdesta anturista ja tuotiin Inertial Exploreriin. Molemmat näistä antureista olivat sellaisia, joiden aikaisemman datan kanssa laskentaa ei saatu loppuun asti. Uudelleenprosessointia yrittäessä toinen näistä meni onnistuneesti läpi, mutta toisen anturin tiedoilla laskenta päättyi edelleen virheeseen.

Prosessointia kokeiltiin muutamilla valmiilla profiileilla, jonka lisäksi tehtiin yksi oma. Tämän oman profiilin tiedot perustuivat yhden vertailtavan anturin tietoihin siltä osin kuin niitä datalehdessä oli ilmoitettu. Laskentaa ei kuitenkaan saatu kaikilla antureilla menemään läpi. Näihin ongelmiin liittyen lähetettiin myös tukipyyntö ohjelman valmistajalle ja asian käsittely ehtikin alkaa, mutta vastausta ei saatu ajoissa. Valmiista profiileista löytyi kuitenkin lopulta sellainen, jolla laskenta onnistui useimpien antureiden raakadatan kanssa. Prosessoinneissa käytettiin molempiin suuntiin laskettavaa ratkaisua multi-pass-ominaisuudella.

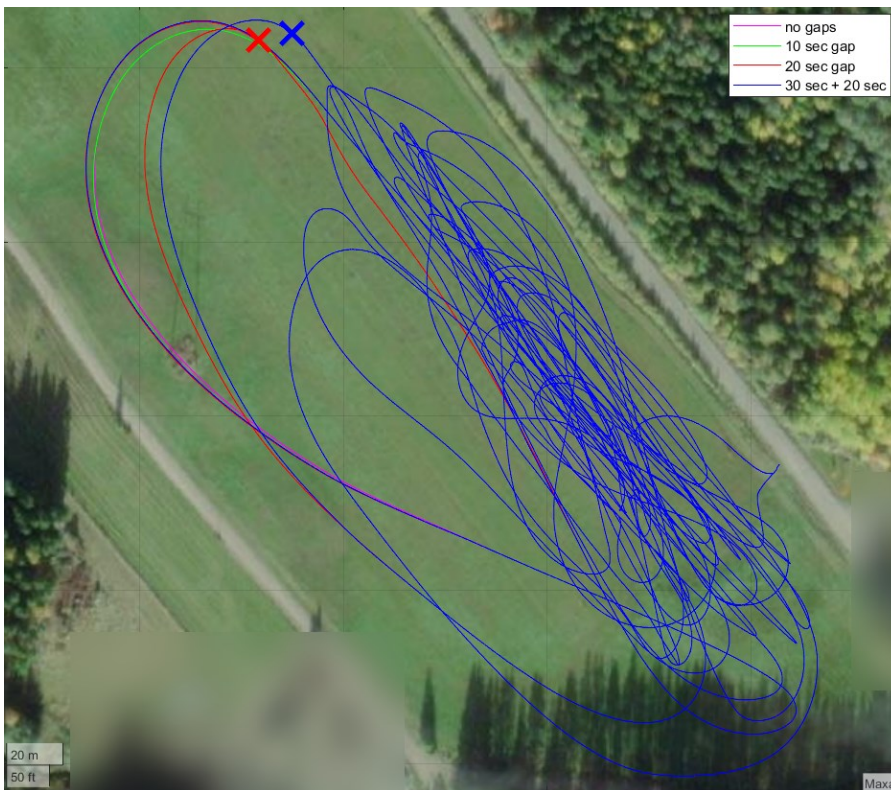
Jälkiprosessoinnista saadut datat vietiin takaisin Matlab ohjelmaan, jossa niiden käsittely oli helppompaa. Referenssinä toimi pelkkä GNSS-data ilman signaalikatkoksia. GNSS+INS-datojen jokaisen pisteen koordinaatteja verrattiin referenssidataan laskien näiden pisteiden väliset etäisyydet samalla ajanhetkellä. Näin selvitettiin paljonko tietyn anturin käyttäminen signaalikatkoksen sisältävässä datassa vaikutti lopulliseen laskettuun paikan tarkkuuteen.

Koordinaattien etäisyyksien laskentaan käytettiin Vincentyn kaavaa ja Matlab koodi tätä varten generoitiin tekoälyllä. Laskennan tuloksista poimittiin pistokokeena muutamia, joita verrattiin internetistä löytyviin valmiisiin GNSS-koordinaattien etäisyyslaskureihin (ks. Calculate distance, bearing... n.d.; Distance Between Coordinates n.d.) ja todettiin, että koodin tulokset pitivät paikkansa. Kettle (2017) kertoo, että Vincentyn kaava on iteratiivinen prosessi, joka olettaa Maapallon olevan ellipsoidi eikä täydellisen pyöreä. Tässä menetelmässä edellisen laskun tulos syötetään uudelleen samaan laskukaavaan tavoitteena minimoida nykyisen ja edellisen iteraation välinen ero. Tätä jatketaan, kunnes tulos on halutun rajan alle. Vincentyn kaavalla voi päästä jopa 0,5 mm tarkkuuteen. (Kettle 2017.)

Osalla antureista, jotka menivät helpommin laskennasta läpi, kokeiltiin myös toista tarkempaa profiilia, mutta näistä ei saatu johdonmukaisia selkeitä tuloksia. Tämän jälkiprosessoinnin perusteella

on hankala vetää johtopäätöksiä antureiden välisistä eroista. Tämä vaatii vielä lisää perehtymistä aiheeseen sekä kokeiluja ja valistuneita arvauksia antureiden virheisiin liittyen.

Jälkilaskennasta saatu yksi onnistunut tulos on samasta anturista tehdyt kuvaajat muutamalla eri pituisella GNSS-katkolla, ks. kuvio 29. Tässä nähdään visuaalisesti, kuinka reitti alkaa harhautumaan mitä pidempään ollaan ilman satelliittien tarjoamaa paikkatietoa. Kuvio ei kuitenkaan kuvasta sitä miten dronen reitti olisi reaaliaikaisesti edennyt, vaan kertoo jälkikäteen lasketun paikan tarkkuuksien suhteesta. Kuvion tekemiseen käytetyssä datassa GNSS-katkos alkaa kaikissa kuvaajissa samasta kohtaa, mutta sen pituus vaihtelee 10–30 sekunnin välillä. 30 sekunnin tapauksessa data sisältää myöhemmin vielä 20 sekunnin toisen katkoksen.



Kuvio 29. Dronen lasketut reitit

## 14 Työn tulokset

### 14.1 Tutkimuskysymysten vastaukset

Tutkimus keskittyi kahteen kysymykseen, jotka liittyvät antureiden toimintaan nelikopterimallisen dronen ohjausjärjestelmässä.

#### **Ensimmäinen tutkimuskysymys: Mitkä ovat inertia-antureiden mitta-alueen vaatimukset drone-käytössä?**

Tavoitteena oli selvittää kokeellisesti minkälaisia kiihtyvyyksiä ja kulmanopeuksia inertiamittayksiköiden kiihtyvyysanturit ja gyroskoopit kokevat lentodynamiikaltaan erilaisissa tilanteissa. Kokeisiin käytettiin kahta erilaista dronea, joista toinen oli ultrakevyt kuluttajille suunnattu kuvausdrone ja toinen isompi ammattikäyttöön tarkoitettu drone. Pääosa aineistosta kerättiin tällä isolla dronella, sillä tämän kyytiin saatiin mukaan oma mittalaitteisto. Lennoilta kerättiin dataa dronen oman autopilotin antureista, mutta myös tästä mukana olleesta mittalaitteistosta, joka sisälsi vertailtavia antureita. Kokeellisten menetelmien lisäksi tutustuttiin muutamiin satunnaisesti valittuihin autopilotteihin ja selvitettiin niissä käytettyjen antureiden suoritusarvoja.

Muiden antureiden dokumenttien perusteella vaikutti siltä, että antureiden mitta-alueiden tulisi olla melko laajat. Lennoista saadut datat eivät kuitenkaan täysin tukeneet tätä ajatusta. Isolla dronella tehdyissä molemmissa lennoissa suurimmat mitatut kulmanopeudet jäivät selvästi alle 300 °/s lukemiin. Antureiden kokema värinä aiheutti suuria kiihtyvyyksiä ja vertailtava anturi 2 oli mitannut toiselta lennolta suurimmat arvot, hieman yli 16 g:tä. Anturin normaali lineaarikiihtyvyyden mitta-alue on noin 8,15 g:tä, mutta se pystyy kuitenkin mittaamaan jopa 26,5 g:tä.

Pienellä dronella tehdyissä testeissä saatiin aikaan selvästi suurempia kulmanopeuksia, jopa 1500 °/s, mutta nämä saattavat olla dronen maahansyöksystä seuranneita. Toisaalta pienellä dronella logattiin myös normaalilennon aikana yli 500 °/s huippuarvo sekä useampi lähes 500 °/s piikki. Nämä olisivat saattaneet aiheuttaa ongelmia autopilotin toiminnassa, jos käytössä olisi ollut vertailtava anturi 2:n mukainen mitta-alue gyroskoopille.

Tämän aineiston perusteella vaikuttaa siltä, että gyroskoopeilla ei kuitenkaan tarvita 2000 °/s mitta-aluetta, joka vaikuttaa olevan hyvin yleinen nykyisissä antureissa. Sen sijaan 16 g:tä kiihtyvyyssanturin mitta-alueena voi olla perusteltua saatujen tulosten perusteella. Vaihtoehtoisesti autopiloteissa voisi kiinnittää enemmän huomiota antureiden mekaaniseen vaimennukseen, jotta ne eivät koe niin suuria tärinöitä.

Näistä tuloksista on saatu alustavaa tietoa dronejen käyttäytymisestä ja antureiden vaatimuksista. Näiden pohjalta voidaan miettiä tulevia testejä ja kehitystarpeita.

### **Toinen tutkimuskysymys: Nähdäänkö antureiden välillä selkeitä eroja?**

Kerätystä aineistosta selvisi, että anturit altistuivat suurelle määrälle tärinää, eikä tehdyistä aika- ja taajuustason kuvaajista pysty helposti toteamaan selviä eroja antureiden välillä. MiniAHRS oli tässä poikkeus ja mittasi selvästi muita pienempiä tärinöitä, mutta syyksi selvisi lopulta alipäästösuotimen ja näytetaajuuden väärät asetukset. Nämä saatiin korjattua, kun valmistajalta saatiin uudempi versio anturin konfigurointiohjelmasta, mutta molemmat suunnitellut testilennot isolla dronella oli tässä vaiheessa jo suoritettu. Dataa tarkemmin tutkittaessa nähdään jonkin verran eroja antureiden välillä, mutta toisaalta antureiden paikat ja kiinnitykset erosivat toisistaan testilennessä 2, joka voi tähän vaikuttaa.

Kerättyä dataa yritettiin myös jälkiprosessoida tähän tarkoitukseen kehitetyllä ohjelmalla. Tässä yleisesti ottaen ajatuksena on fuusoida tiedot anturista, satelliittipaikannuksesta ja paikannuksen korjausdatasta tarkemman lopullisen reitin laskemiseksi. Tässä tapauksessa menetelmää yritettiin käyttää antureiden välisten erojen korostamiseen. Satelliittipaikannuksen tietoihin tehtiin tarkoituksella kaikki satelliitit kattava katkos, jotta nähtäisiin kuinka paljon paikkaratkaisuun tulee virhettä eri antureilla.

Tässä törmättiin kuitenkin ongelmiin ohjelman käytössä ja riittävän tarkkojen antureiden virhemallien tekemisessä. Ohjelman valmistajalle lähetettiin myös tukipyyntö, mutta vastausta ei ehditty saada ajoissa. Suurin osa antureiden tiedoista saatiin lopulta menemään prosessoinnista läpi, mutta tämä tehtiin kaikilla antureilla samaa virhemallia käyttäen, josta ei saatu yhdenmukaisia ja luotettavia tuloksia.

Jälkiprosessoinnin osalta ei saatu luotettavia eroja aikaan, vaan tämä vaatii jatkotutkimuksia, jossa perehdytään enemmän antureiden virhemalleihin ja ohjelman säätömahdollisuuksiin. Jonkinlaisia eroja löydettiin antureiden mittauksista, mutta toisaalta antureiden kiinnitykset ja sijainnit eivät olleet yhdenmukaiset, joka myös saattaa vaikuttaa asiaan. Tämäkin vaatii vielä lisätutkimuksia.

## 14.2 Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys

Työn aikana on noudatettu hyvää tieteellistä käytäntöä ja ohjeistuksia tutkimusetiikan suhteen. Tiedonhankinnassa ja tutkimusmenetelmissä käytettiin ohjeistuksen mukaisia menetelmiä ja aineistoa käsiteltiin riittävällä tarkkuudella ja puolueettomasti. Ennen työn aloitusta on tehty opinäytetyösopimus, ja työn julkisuudesta on sovittu toimeksiantajan kanssa. Työssä ei ole käsitelty sellaisia asioita, jotka olisivat edellyttäneet tutkimuslupaa tai eettistä ennakoarviointia. Työn aikana ei käsitelty minkäänlaisia henkilötietoja eikä raportoinnissa tuotu ilmi yhteistyökumppaneiden tai toimeksiantajan salassa pidettäviä tai muuten arkaluontoisia tietoja.

Työn teoriaosuudessa saman aihepiirin asioita on selvitetty useammasta lähteestä luotettavuuden lisäämiseksi ja lähteiden laatuun on myös kiinnitetty huomiota. Kerätty aineisto koostui julkisesti saatavilla olevista lähteistä siltä osin kuin niistä on yksityiskohtaisesti raportoitu. Jotkin työssä käsitellyt tiedot eivät kuitenkaan ole julkista tietoa eikä niitä ole tästä syystä käsitelty raportissa. Mittalaitteiston kokoonpano ja asetukset on dokumentoitu samoin kuin testilentojen suoritustavat, joten työ on tältä osin toistettavissa samanlaisena. Testilennoista kerätyt datat, niin dronen autopilotista kuin omasta mittalaitteistosta saadut, säilöttiin toimeksiantajan omiin järjestelmiin ja niitä käsiteltiin tietoturvalisätoimilla. Tietoja analysoitiin puolueettomasti ja johtopäätökset on tehty näiden analyysien perusteella.

Työssä käsiteltiin erityisesti ammattikäyttöön tarkoitettua nelikopteria, sen autopilottia ja antureita. Osa aineistosta kerättiin käyttäen myös pientä kuluttajille suunnattua nelikopteria. Tämä on kuitenkin suljettu järjestelmä, eikä sen sisältämistä antureista ole sen tarkempaa tietoa. Vertailuun käytettävien antureiden mallimerkintöjä ja valmistajia ei myöskään tuotu ilmi. Nämä seikat saattavat rajoittaa saatujen tulosten hyötyä muille dronejen kanssa tekemisissä oleville. Myös toisen tyyppisten dronejen tapauksessa hyöty voi jäädä pieneksi, sillä ne saattavat olla lentodynamiikaltaan täysin poikkeavia tässä työssä käytettyihin nähden.



## 15 Yhteenveto

Työssä käytettiin testilentojen tekemiseen kahta eri kokoluokan nelikopteria. Suurin osa kerätystä datasta perustuu yhteistyökumppanin isolla dronella tehtyihin lentoihin, joista saatiin samalla kertaa sekä dronen oman autopilotin, että Nordic Inertialin mittalaitteiston anturitiedot talteen. Vertaileva lento suoritettiin myös pienellä kuluttajaluokan dronella ja vaikka tästäkin saatiin jonkinlaista tietoa niin aivan vastaavaa anturidataa ei kuitenkaan DJI:n suljetun järjestelmän vuoksi saatu kerättyä. Tällä dronella yritettiin kerätä tietoa myös erikoisemmista tilanteista, joissa anturit ja lennonohjausyksikkö saattaisivat joutua äärirajoille. Tällaisista tilanteista isommalla ja painavammalla dronella kerätty tieto voisi myös olla arvokasta ja paljastaa ongelmia antureiden kyvykkyydessä ja siitä mahdollisesti seuraavassa autopilotin yllättävässä toiminnassa.

Pienellä dronella saatiin logattua joidenkin antureiden osalta melko suuria arvoja, vaikka nämä suurella todennäköisyydellä aiheituivatkin vasta maahan törmäyksistä. Anturivalmistaja oli kiinnostunut lähinnä ammattikäytön droneista ja niiden tuomista mahdollisuuksista sekä antureiden vaatimuksista. Näin ollen pikkudronella saadut tulokset eivät välttämättä ole relevantteja, mutta osoittavat kuitenkin mitä tällaisissa tilanteissa voi tapahtua ja mitä se tarkoittaa antureiden osalta. Isommalla kopterilla jonkin vastaavanlaisen tilanteen tapahtuminen voi hyvinkin saada aikaan tilanteita, joissa anturit joutuvat äärirajoille. Tällainen tilanne saattaisi olla esimerkiksi raju laskeutuminen kovalle alustalle.

Tulevaisuudessa droneliikenteen vain lisääntyessä alukset saattavat altistua enemmän ja enemmän yllättäville tilanteille. Jossakin vaiheessa tulevaisuudessa autonomisten ja tavaroita kuljettavien dronejen ilmaantuessa taivaalle autopilottien pitää selviytyä yhä itsenäisemmin kaikista tilanteista. Tärkeää on, että anturit ovat riittävän laadukkaita ja mahdollistavat dronen ohjausalgoritmien sujuvan toiminnan kaikissa tilanteissa.

## Lähteet

1.6 Attitude & Heading Reference System (AHRS). N.d. Koulutusmateriaali VectorNav verkkosivulla. Viitattu 21.2.2024. <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-ahrs>.

3.1 IMU Specifications. N.d. Koulutusmateriaali VectorNav verkkosivulla. Viitattu 12.2.2024. <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications--and--error-budgets/specs-imuspecs>.

About DJI. N.d. Yritysesittelysivu DJI verkkosivulla. Viitattu 4.1.2024. <https://www.dji.com/fi/>, Who We Are.

Agricultural Drone Industry Insight Report (2021). 2022. Uutinen DJI Agriculture verkkosivulla. Julkaistu 27.7.2022. Viitattu 6.1.2024. <https://ag.dji.com/newsroom/ag-news-en-ag2022>.

AHRS - Attitude and Heading Reference Systems. N.d. Tuote-esittelysivu SBG Systems verkkosivulla. Viitattu 21.2.2024. <https://www.sbg-systems.com/attitude-heading-reference-systems-ahrs/#documentation>.

Alvarado, E. 2022. What are the Top Drone Applications? Artikkelin Drone Industry Insights verkkosivulla. Julkaistu 27.4.2022. Viitattu 6.1.2024. <https://droneii.com/top-drone-applications>.

An Introduction to GNSS. N.d. Kirjan lataussivu Novatel verkkosivulla. Viitattu 11.5.2024. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss>, Download book now.

Anatomy of A Drone - What's inside a DJI Phantom Drone. N.d. Tietosivu Dronefly verkkosivulla. Viitattu 13.3.2024. <https://www.dronefly.com/the-anatomy-of-a-drone>.

ArduPilot. Versatile, Trusted, Open. 2024. Ardupilot verkkosivun aloitussivu. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/>.

ArduPilot AntennaTracker. 2024. AntennaTracker dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot>, AntennaTracker.

ArduPilot Blimp. 2024. Blimp dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot>, Blimp.

ArduPilot Copter. 2024. Copter dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot>, Copter.

ArduPilot Plane. 2024. Plane dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot>, Plane.

ArduPilot Rover. 2024. Rover dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot>, Rover.

ArduPilot Sub. 2024. Sub dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/ardupilot, Sub>.

Austin, R. 2010. Unmanned aircraft systems. UAVS design, development and deployment. Chichester: John Wiley & Sons. Viitattu 28.10.2023. <https://janet.finna.fi, ProQuest>.

Becher, B. 2023. 18 Types of Drones to Know. Artikkelin Built In verkkosivulla. Julkaistu 10.8.2023. Viitattu 21.2.2024. <https://builtin.com/drones/types-of-drones>.

Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. N.d. GNSS-koordinaattien etäisyyslaskuri Movable Type Scripts verkkosivulla. Viitattu 16.5.2024. <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

Certified Category - Civil Drones N.d. Tietosivu European Union Aviation Safety Agency verkkosivulla. Viitattu 3.11.2023. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/certified-category-civil-drones>.

Data logger. N.d. Pacific Inertial PI-logger datalehti. Yrityksen sisäinen dokumentti. Viitattu 24.2.2024.

DatCon Introduction. N.d. Ohjelmiston esittelysivu datfile.net verkkosivulla. Viitattu 17.3.2024. <https://datfile.net/DatCon/intro.html>.

DGNSS Fundamentals. 2011. Tietosivu Euroopan avaruusjärjestön verkkosivulla. Viitattu 19.5.2024. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=DGNSS\\_Fundamentals](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=DGNSS_Fundamentals).

Different Types of Drones and Uses (2024 Full Guide). 2024. Blogi JOUAV verkkosivulla. Julkaistu 3.1.2024. Viitattu 21.2.2024. <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>.

Different Types of Drones Explained with Photos. N.d. Artikkelin Aero Corner verkkosivulla. Viitattu 21.2.2024. <https://aerocorner.com/blog/types-of-drones/>.

Distance Between Coordinates. N.d. GNSS-koordinaattien etäisyyslaskuri GPS Coordinates verkkosivulla. Viitattu 16.5.2024. <https://gps-coordinates.org/distance-between-coordinates.php>.

DJI. N.d. DJI internetsivut, aloitussivu. Viitattu 4.1.2024. <https://www.dji.com/fi>.

DJI Flight Log Viewer. N.d. Lokitiedostojen prosessointi Phantom Help verkkosivulla. Viitattu 17.3.2024. <https://www.phantomhelp.com/logviewer/upload/>.

DJI Mini 3 Pro User Manual v1.6. 2024. Käyttöohjekirja DJI verkkosivulla. Viitattu 16.3.2024. [https://dl.djicdn.com/downloads/DJI\\_Mini\\_3\\_Pro/UM/20240105/2/DJI\\_Mini\\_3\\_Pro\\_User\\_Manual\\_v1.6\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mini_3_Pro/UM/20240105/2/DJI_Mini_3_Pro_User_Manual_v1.6_EN.pdf).

Drone heavyweights DJI and XAG compete to take the lead in China's agriculture industry. 2023. Uutinen KrAsia verkkosivulla. Julkaistu 26.12.2023. Viitattu 6.1.2024. <https://kr-asia.com/drone-heavyweights-dji-and-xag-compete-to-take-the-lead-in-chinas-agriculture-industry>.

Drone racing and flying a drone with goggles - First Person View (FPV). N.d. Tietosivu European Union Aviation Safety Agency verkkosivulla. Viitattu 20.4.2024. <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/drone-racing-and-flying-drone-goggles-first-person-view-fpv>.

Dronejärjestelmät vaatimaan ammattikäyttöön. N.d. Nordic Drones verkkosivu. Viitattu 13.3.2024. <https://nordicdrones.fi/>.

Drones (UAS). 2023. FAQ (usein kysytyt kysymykset) European Union Aviation Safety Agency verkkosivulla. Viitattu 28.10.2023. <https://www.easa.europa.eu/en/the-agency/faqs/drones-uas#category-regulations-on-uas-drone-explained>.

Electronic Speed Controller (ESC): Everything You Need to Know. 2023. Blogikirjoitus JOUAV verkkosivulla. Julkaistu 8.12.2023. Viitattu 13.3.2024. <https://www.jouav.com/blog/electronic-speed-controller-esc.html>.

Elmenreich, W. 2002. An Introduction to Sensor Fusion. Julkaistu 19.11.2002. Viitattu 28.4.2024. [https://www.researchgate.net/profile/Wilfried-Elmenreich/publication/267771481\\_An\\_Introduction\\_to\\_Sensor\\_Fusion/links/55d2e45908ae0a3417222dd9/An-Introduction-to-Sensor-Fusion.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wilfried-Elmenreich/publication/267771481_An_Introduction_to_Sensor_Fusion/links/55d2e45908ae0a3417222dd9/An-Introduction-to-Sensor-Fusion.pdf).

Enterprise. Drone Solutions for a New Generation of Work. N.d. Ammattikäytön dronet DJI verkkosivulla. Viitattu 6.1.2024. <https://www.dji.com/fi/, Specialized, Enterprise, Products, Drones>.

European Drones Outlook Study. 2016. Tutkimusraportti Sesar verkkosivulla. Viitattu 4.1.2024. [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European\\_Drones\\_Outlook\\_Study\\_2016.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/European_Drones_Outlook_Study_2016.pdf).

FAQ n. 116465. 2020. Tietosivu European Union Aviation Safety Agency verkkosivulla. Päivitetty 13.10.2020. Viitattu 20.2.2024. <https://www.easa.europa.eu/en/faq/116465>.

Firefighting. N.d. Käyttötapausten esittely DJI verkkosivulla. Viitattu 6.1.2024. <https://www.dji.com/fi/, Specialized, Enterprise, Industries, Firefighting>.

Forwards/backwards processing. 2014. Tietosivu OXTS verkkosivulla. Julkaistu 3.4.2014. Viitattu 25.5.2024. <https://www.oxts.com/technical-notes/forwards-backwards-processing/>.

Free images of Drone. N.d. Pixabay kuvapalvelu. Viitattu 21.2.2024. <https://pixabay.com/images/search/drone/>.

Gustafsson, F. 2018. Statistical Sensor Fusion. 3. p. Lund: Studentlitteratur.

Harris, S. 2023. Inertial Measurement Unit (IMU) – an introduction. Artikkel Advanced Navigation verkkosivulla. Päivitetty 7.7.2023. Viitattu 3.11.2023. <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/>.

Hietalahti, K. 2024. Gps-häirinnästä varoittava kartta hohkaa punaisena – Ilmoitusten määrä rajassa kasvussa. Uutinen Helsingin Sanomat verkkosivulla. Julkaistu 5.4.2024. Viitattu 8.5.2024. <https://www.hs.fi/kotimaa/art-2000010336711.html>.

How to choose Quadcopter Frame. 2018. Blogikirjoitus GensTattu verkkosivulla. Julkaistu 19.12.2018. Viitattu 13.3.2024. <https://genstattu.com/blog/how-to-choose-quadcopter-frame>.

HX-CU7603A Helix Antenna. N.d. Antennin datalehti TerrisGPS verkkosivulla. Viitattu 24.2.2024. <https://www.terrisgps.com/wp-content/uploads/2021/06/harxon-hx-cu7603a-datasheet.pdf>.

Itseopiskelumateriaalit EU-asetuksen mukaisiin kauko-ohjaajan kokeisiin. 2023. Opiskelumateriaalia Droneinfo verkkosivulla. Viitattu 28.10.2023. <https://droneinfo.fi/fi/itseopiskelumateriaalit-eu-asetuksen-mukaisiin-kauko-ohjaajan-kokeisiin>.

Kedadouche, M., Yulan, S., Liu, Z., Thomas, M., Charland-Arcand, G., Beck, A. 2018. Design of a Vibration Isolator for the Inertial Navigation System of an Autopilot Dedicated to the Operation of Light Drones. Viitattu 10.4.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Xplore Digital Library.

Kettle, S. 2017. Distance on an ellipsoid: Vincenty's Formulae. Blogiteksti Esri verkkosivulla. Julkaistu 10.10.2017. Viitattu 16.5.2024. <https://community.esri.com/t5/coordinate-reference-systems-blog/distance-on-an-ellipsoid-vincenty-s-formulae/ba-p/902053>.

Kirkkala, A. 2024. Useiden laivojen GPS lakkasi toimimasta Itämerellä. Uutinen Verkkouutiset verkkosivulla. Julkaistu 29.4.2024. Viitattu 8.5.2024. <https://www.verkkouutiset.fi/a/useiden-laivojen-gps-lakkasi-toimimasta-itamerella/>.

Kumar, A. 2020. A Technical Overview of Drones and their Autonomous Applications. Artikkel Control Automation verkkosivulla. Julkaistu 25.6.2020. Viitattu 4.12.2023. <https://control.com/technical-articles/a-technical-overview-of-drones-and-their-autonomous-applications/#:~:text=,Videos%20Datasheets%20Giveaways%20Latest%20Projects>.

Lehto, M., Hutchinson, W. 2021. Mini-drones swarms and their potential in conflict situations. Artikkel. Jyväskylän yliopisto, informaatioteknologian tiedekunta. Viitattu 7.1.2024. <https://finna.fi>.

Lennättäminen avoimessa kategoriassa. N.d. Tietosivu Droneinfo verkkosivulla. Viitattu 29.10.2023. <https://www.droneinfo.fi/fi/lennattaminen-avoimessa-kategoriassa?toggle=A1%20alakategoria&toggle=A2%20alakategoria&toggle=A3%20alakategoria&toggle=C-merkit-tyjen%20dronejen%20ominaisuuksia&toggle=Lennokkikerhot>.

Matrice 300 RTK Redundant Systems Report. 2020. Matrice 300 RTK -dronen dokumentti järjestelmien kahdennuksesta. Viitattu 6.1.2024. [https://terra-1-g.djicdn.com/851d20f7b9f64838a34cd02351370894/Matrice\\_300RTK\\_Redundant\\_Systems\\_Report.pdf](https://terra-1-g.djicdn.com/851d20f7b9f64838a34cd02351370894/Matrice_300RTK_Redundant_Systems_Report.pdf).

McGriffy, D. 2016. Make: Drones. Teach an Arduino to Fly. San Francisco: Maker Media.

Miniature Attitude & Heading Reference System. N.d. Datalehti Inertial Labs verkkosivulla. Viitattu 18.2.2024. [https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2023/03/MiniAHRS-Datasheet-rev2.10\\_October\\_2021.pdf](https://inertiallabs.com/wp-content/uploads/2023/03/MiniAHRS-Datasheet-rev2.10_October_2021.pdf).

Mission Planner Overview. 2024. Ohjelmiston dokumentaatio Ardupilot verkkosivulla. Viitattu 26.5.2024. <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>.

Mosaic-go heading GNSS module evaluation kit. N.d. Tuotesivu Septentrio verkkosivulla. Viitattu 23.2.2024. <https://shop.septentrio.com/en/shop/mosaic-go-heading-gnss-module-evaluation-kit>.

NI Guide for Inertial Explorer. N.d. Yrityksen sisäinen dokumentti. Viitattu 19.5.2024.

Open Category - Low Risk - Civil Drones N.d. Tietosivu European Union Aviation Safety Agency verkkosivulla. Viitattu 3.11.2023. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/open-category-civil-drones>.

PPK – Post-Processing Data. N.d. Tietosivu SBG Systems verkkosivulla. Viitattu 25.5.2024. <https://www.sbg-systems.com/ppk-post-processing-data/>.

Precise Point Positioning. 2011. Tietosivu Euroopan avaruusjärjestön verkkosivulla. Viitattu 19.5.2024. [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Precise\\_Point\\_Positioning](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Precise_Point_Positioning).

Rescue Services. N.d. Käyttötapauksien esittely DJI verkkosivulla. Viitattu 6.1.2024. <https://www.dji.com/fi/, Specialized, Enterprise, Industries, Rescue Service>.

RINEX service. N.d. Tietosivu Maanmittauslaitoksen verkkosivulla. Viitattu 19.5.2024. <https://www.maanmittauslaitos.fi/en/finpos/rinex>.

RS485 CLICK 5V. N.d. Tuotesivu MikroElektronika verkkosivulla. Viitattu 24.2.2024. <https://www.mikroe.com/rs485-5v-click>.

Rtklibexplorer/RTKLIB. N.d. Ohjelman Github-sivu. Viitattu 19.5.2024. <https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB/releases>.

Shevchenko, V. 2023. Ukraine fears drone shortages due to China restrictions. Uutinen BBC news verkkosivulla. Julkaistu 22.10.2023. Viitattu 7.1.2024. <https://www.bbc.com/news/world-europe-67078089>.

The 4 Grades Of IMUs (Inertial Measurement Units). 2023. Tietosivu Inertial Sense verkkosivulla. Julkaistu 28.4.2023. Viitattu 10.1.2024. <https://inertialsense.com/4-grades-of-imus/>.

The Complete Guide to Buying an FPV Quadcopter Frame. 2017. Blogikirjoitus Unmanned Tech verkkosivulla. Viitattu 13.3.2024. <https://blog.unmanned.tech/fpv-quadcopter-frame-buying-guide/>.

Tyystjärvi, I. 2024. Media: Finnairin kone ei pystynyt laskeutumaan Tarttoon gps-häirinnän takia. Uutinen Helsingin Sanomat verkkosivulla. Julkaistu 27.4.2024. Viitattu 8.5.2024. <https://www.hs.fi/ulkomaat/art-2000010389882.html>.

Underwater Navigation & Robotics. N.d. Tieto-/tuotesivu Advanced Navigation verkkosivulla. Viitattu 28.4.2024. <https://www.advancednavigation.com/subsea-navigation-systems/>.

Unmanned Systems News & Articles. N.d. Uutiset Unmanned Systems Technology verkkosivulla. Viitattu 18.4.2024. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/news/>.

Valvottu lisäteoriakoe toiminnan alakategoriaan A2. 2023. Opiskelumateriaalia Droneinfo verkkosivulla. Viitattu 5.1.2024. <https://www.droneinfo.fi/fi/valvottu-lisateoriakoe-toiminnan-alakategoriaan-a2>.

Velocity Magazine. 2018. Farming smarter. Novatel vuosittainen julkaisu, 24–28. Viitattu 7.1.2024. [https://www.calameo.com/read/00191579615c965bb5d17?authid=V5FEkVdZ-QsaR&page=24&utm\\_source=print-ads&utm\\_medium=book&utm\\_content=farming-smarter&utm\\_campaign=intro-to-gnss-2023](https://www.calameo.com/read/00191579615c965bb5d17?authid=V5FEkVdZ-QsaR&page=24&utm_source=print-ads&utm_medium=book&utm_content=farming-smarter&utm_campaign=intro-to-gnss-2023).

Waypoint Software. 2024. Inertial Explorer käyttöohjekirja Novatel verkkosivulla. Julkaistu 02/2024. Viitattu 19.5.2024. [https://docs.novatel.com/Waypoint/Content/PDFs/Waypoint\\_Software\\_User\\_Manual\\_D100513.pdf](https://docs.novatel.com/Waypoint/Content/PDFs/Waypoint_Software_User_Manual_D100513.pdf).

What is an inertial measurement unit? 2023. Artikkelin Vectornav verkkosivulla. Viitattu 3.11.2023. <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-articles/what-is-an-inertial-measurement-unit-imu>.

What's IMU/GNSS Post-Processing and VBS? N.d. Tietosivu GPS World verkkosivulla. Viitattu 25.5.2024. <https://www.gpsworld.com/sponsoredcontent/whats-imu-gnss-post-processing-and-vbs/>.

Woodman, O. 2007. An introduction to inertial navigation. Tekninen raportti Cambridgen yliopiston verkkosivulla. Julkaistu 08/2007. Viitattu 28.4.2024. <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>.

Zucconi, A. 2022a. Kalman Filters: From Theory to Implementation. Julkaistu 24.7.2022. Viitattu 28.4.2024. <https://www.alanzucconi.com/2022/07/24/kalman-filter-1/>.

Zucconi, A. 2022b. The Extended Kalman Filter. Julkaistu 24.7.2022. Viitattu 28.4.2024. <https://www.alanzucconi.com/2022/07/24/extended-kalman-filter/>.

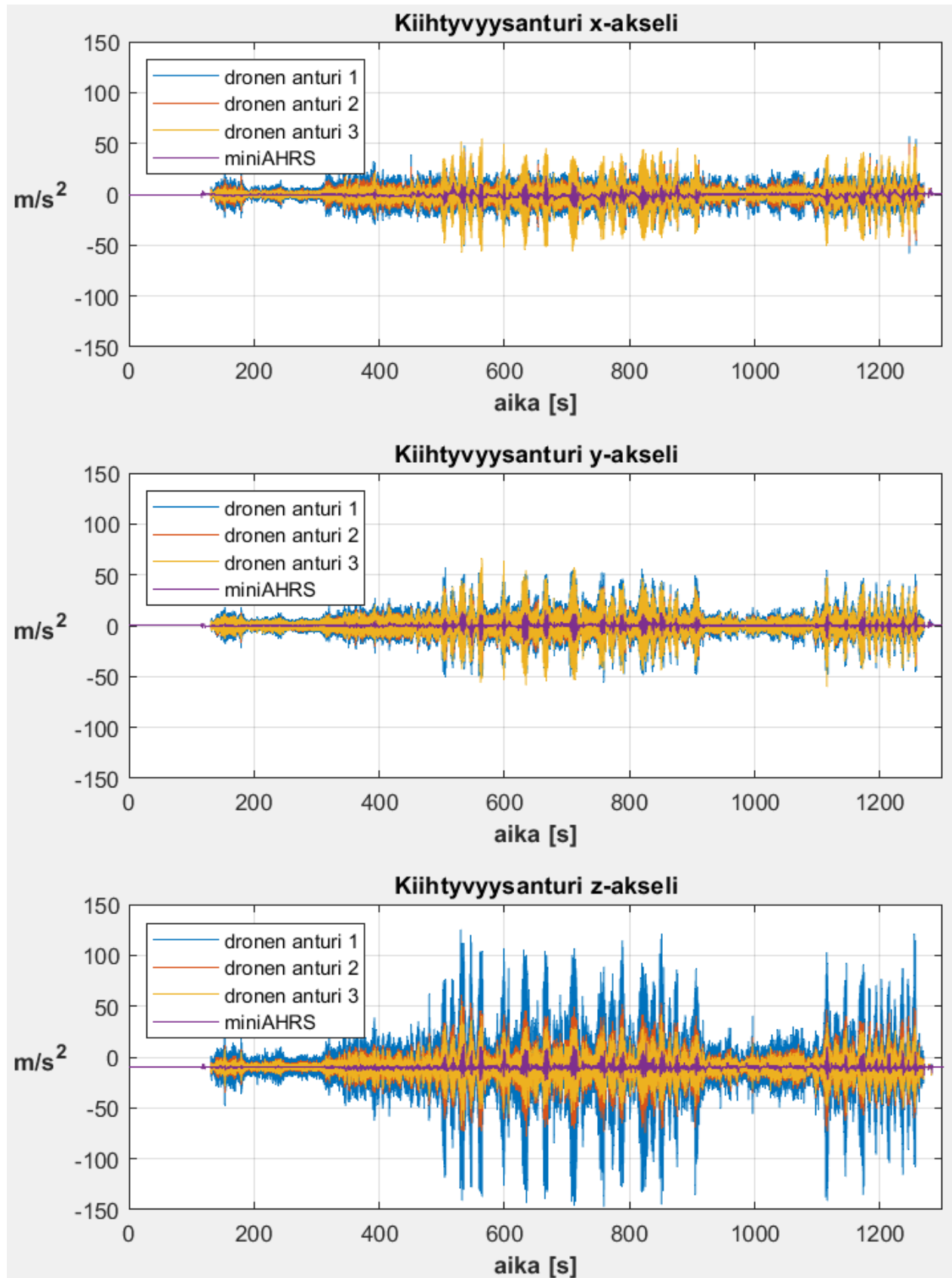
Race Rules & Format. N.d. Kilpailun säännöt DCL verkkosivulla. Viitattu 20.4.2024. <https://dcl.aero/races/rules/>.

The 2018 DRL Allianz World Championship at BMW Welt on July, 28. One of the largest international drone racing series is coming to Munich. 2018. Uutinen Automotive World verkkosivulla. Julkaistu 13.7.2018. Viitattu 20.4.2024. <https://www.automotiveworld.com/news-releases/the-2018-drl-allianz-world-championship-at-bmw-welt-on-july-28-one-of-the-largest-international-drone-racing-series-is-coming-to-munich/>.

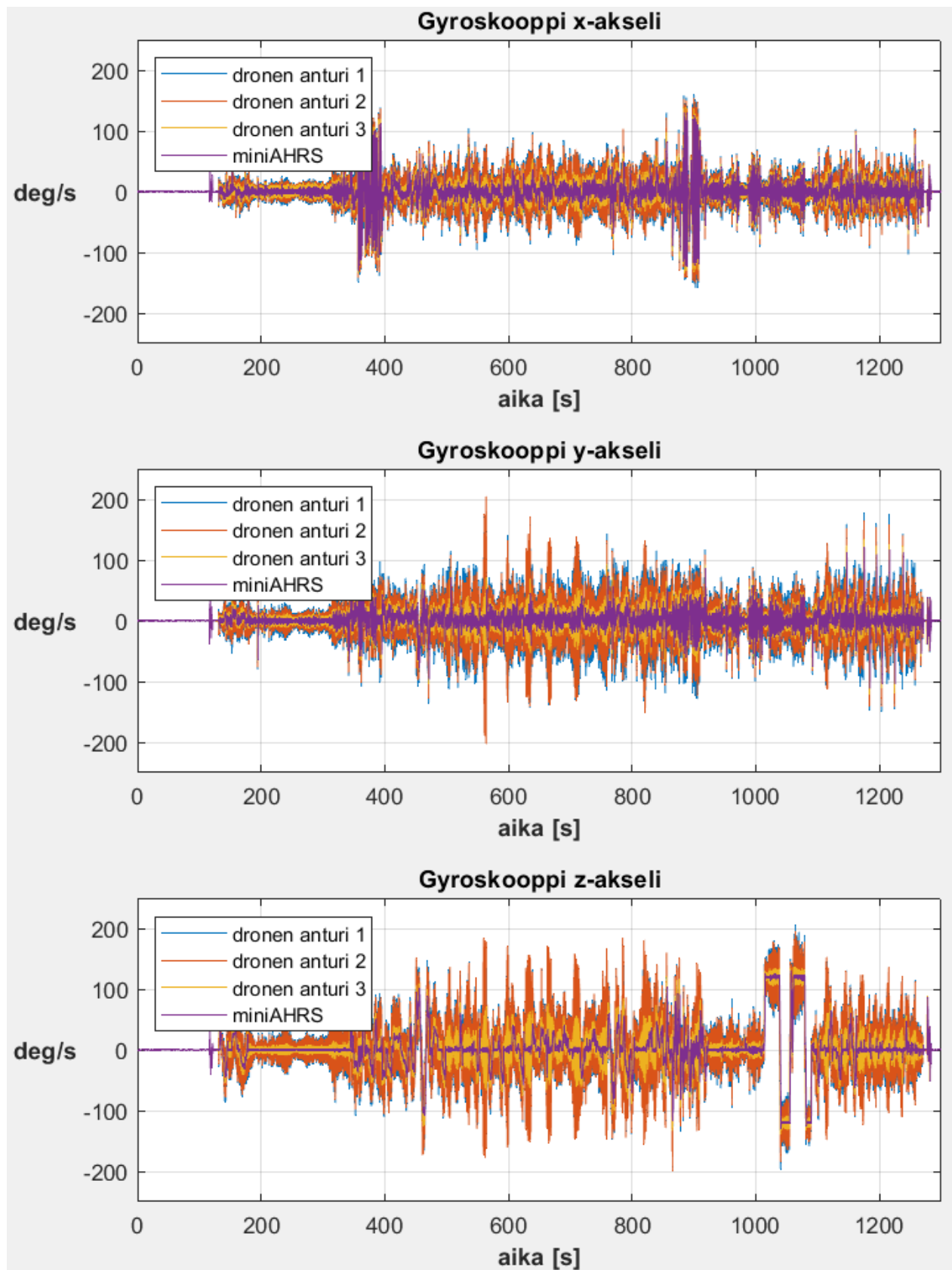
What is drone racing? N.d. DRL verkkosivu. Viitattu 20.4.2024. <https://www.drl.io/about-drl>.

## Liitteet

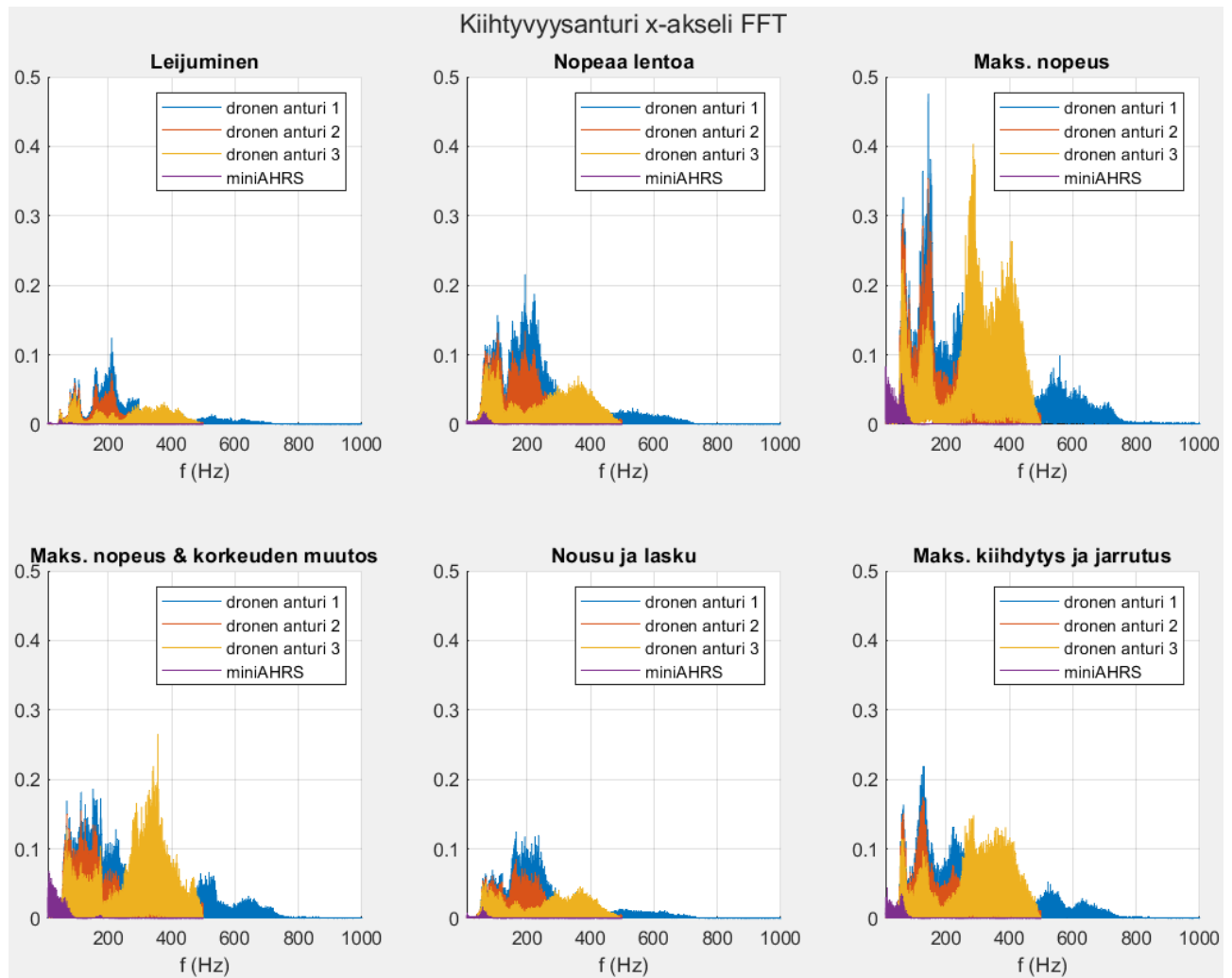
### Liite 1. Kiihtyvyyssantureiden x-, y- ja z-akseleiden aikatazon kuvaajat, testilento 1



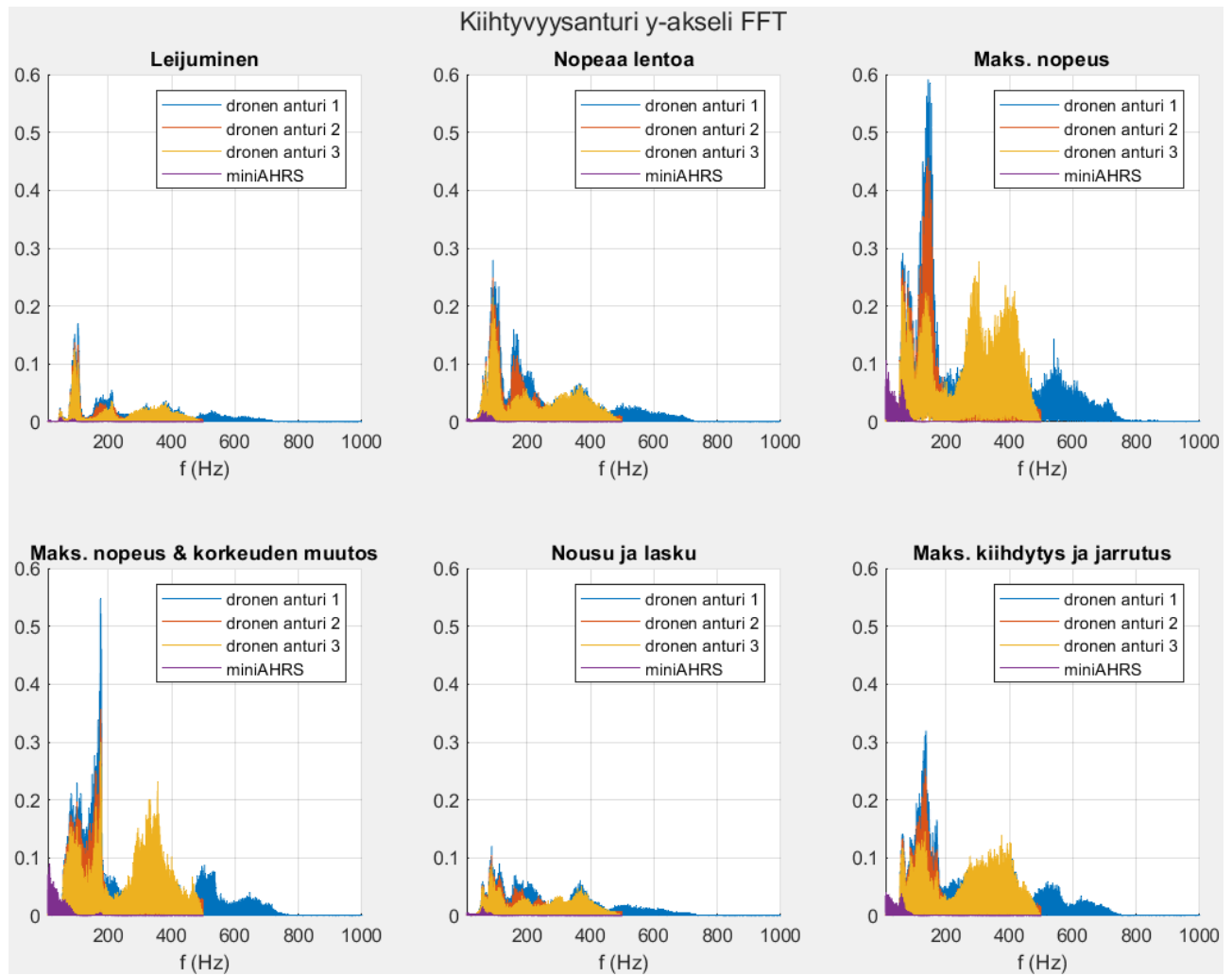


**Liite 2. Gyroskooppien x-, y- ja z-akseleiden aikatazon kuvaajat, testilento 1**

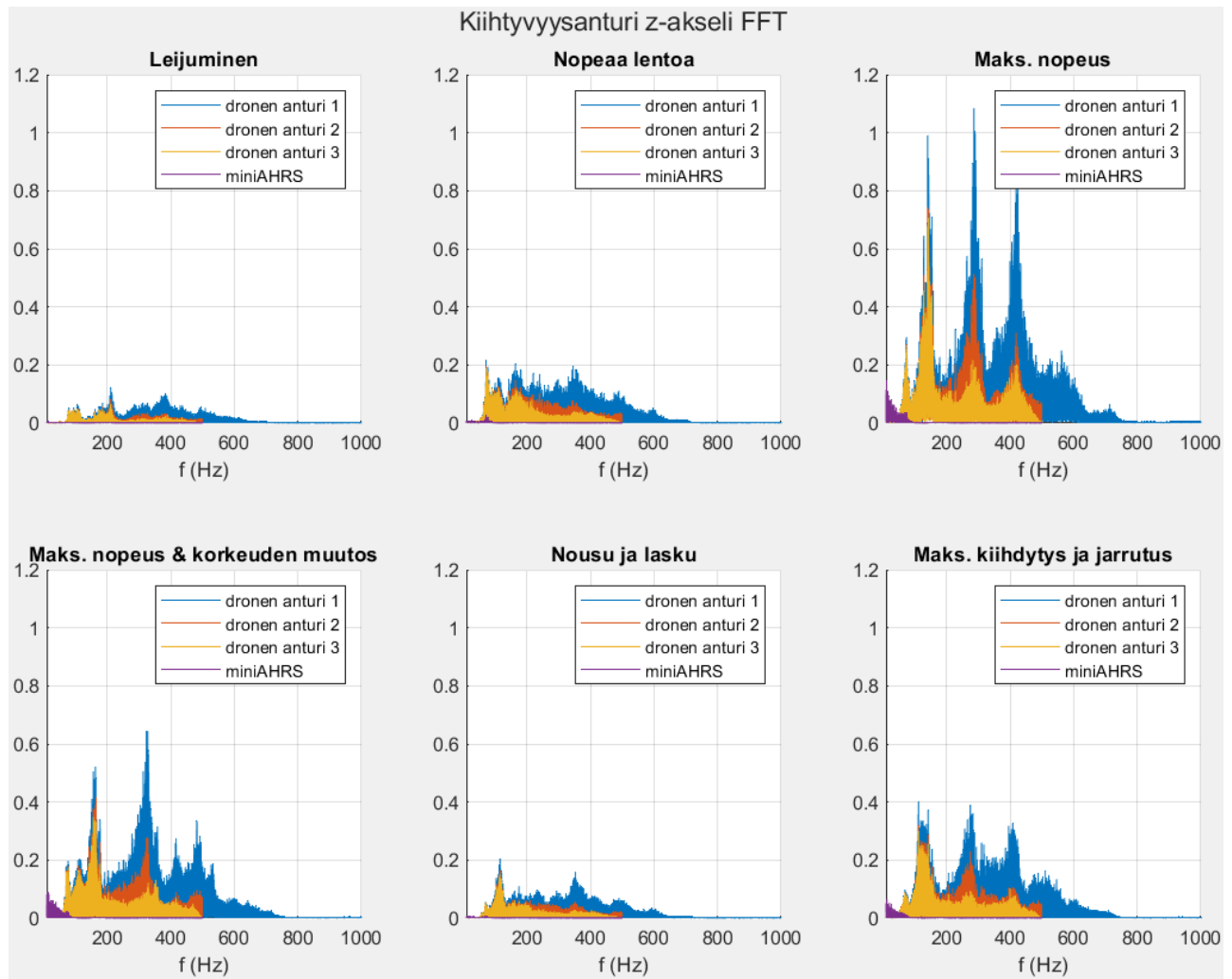
### Liite 3. Kiihtyvyyssantureiden x-akselien taajuustason kuvaajat, testilento 1



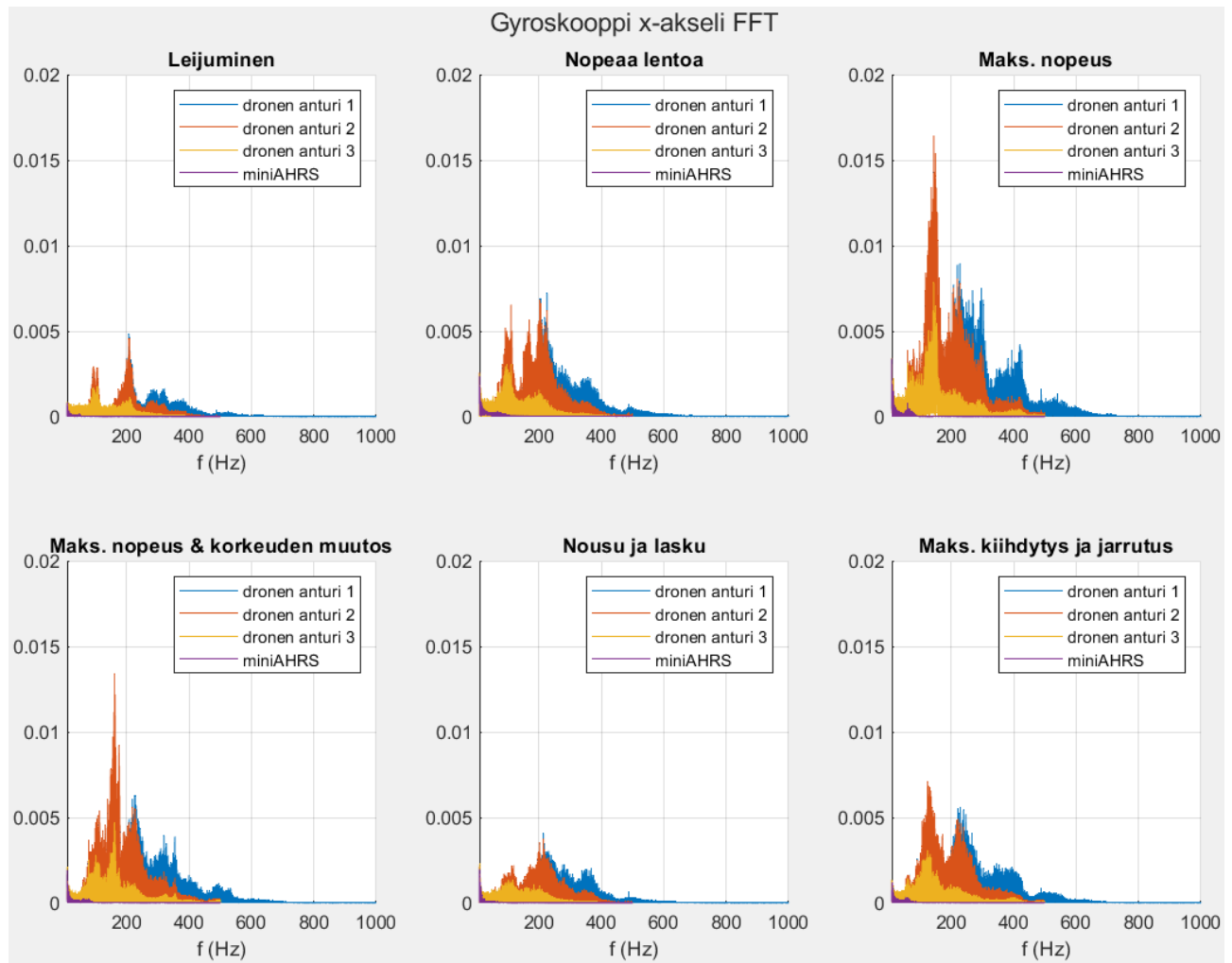
## Liite 4. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1



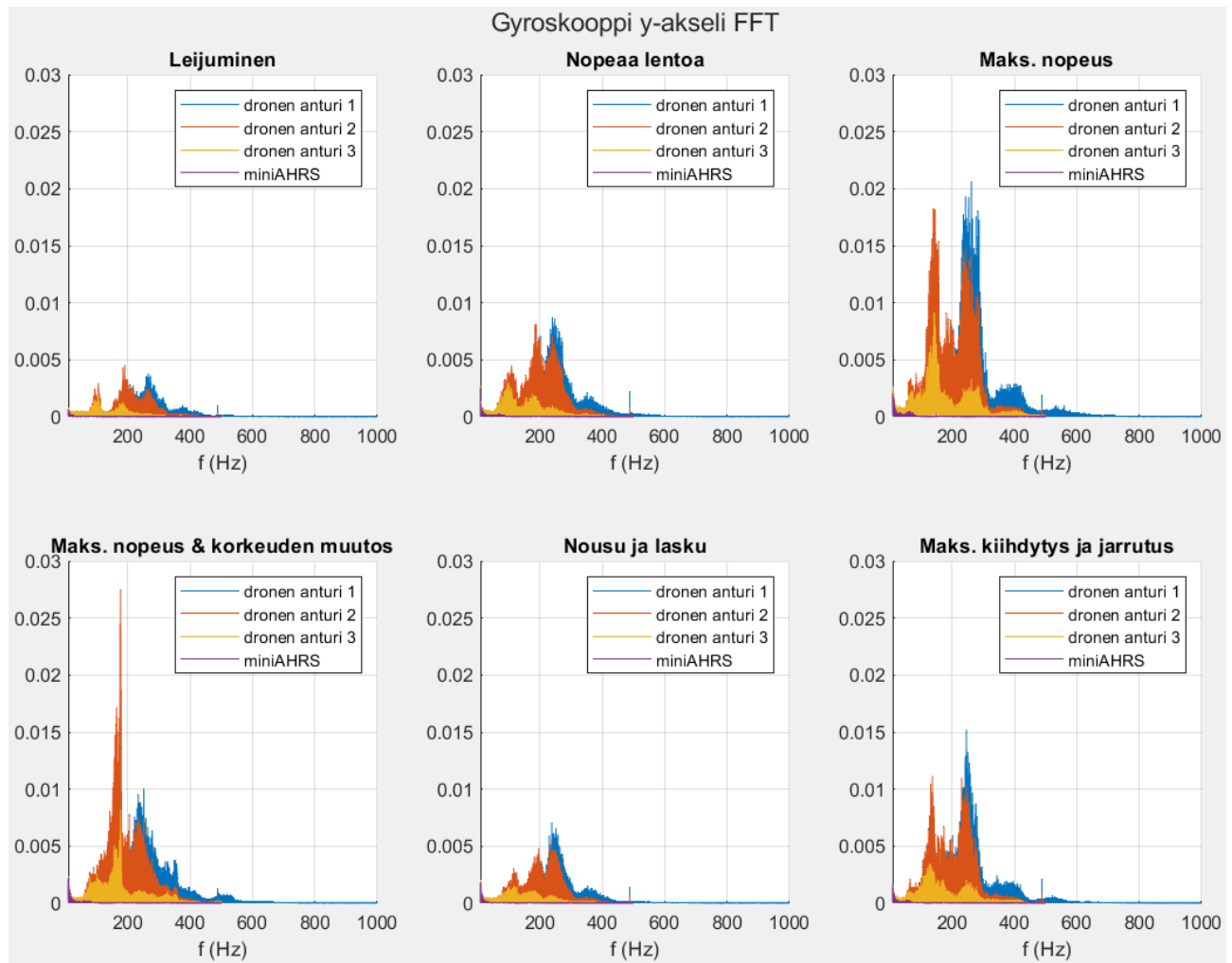
## Liite 5. Kiihtyvyyssantureiden z-akselien taajuustason kuvaajat, testilento 1



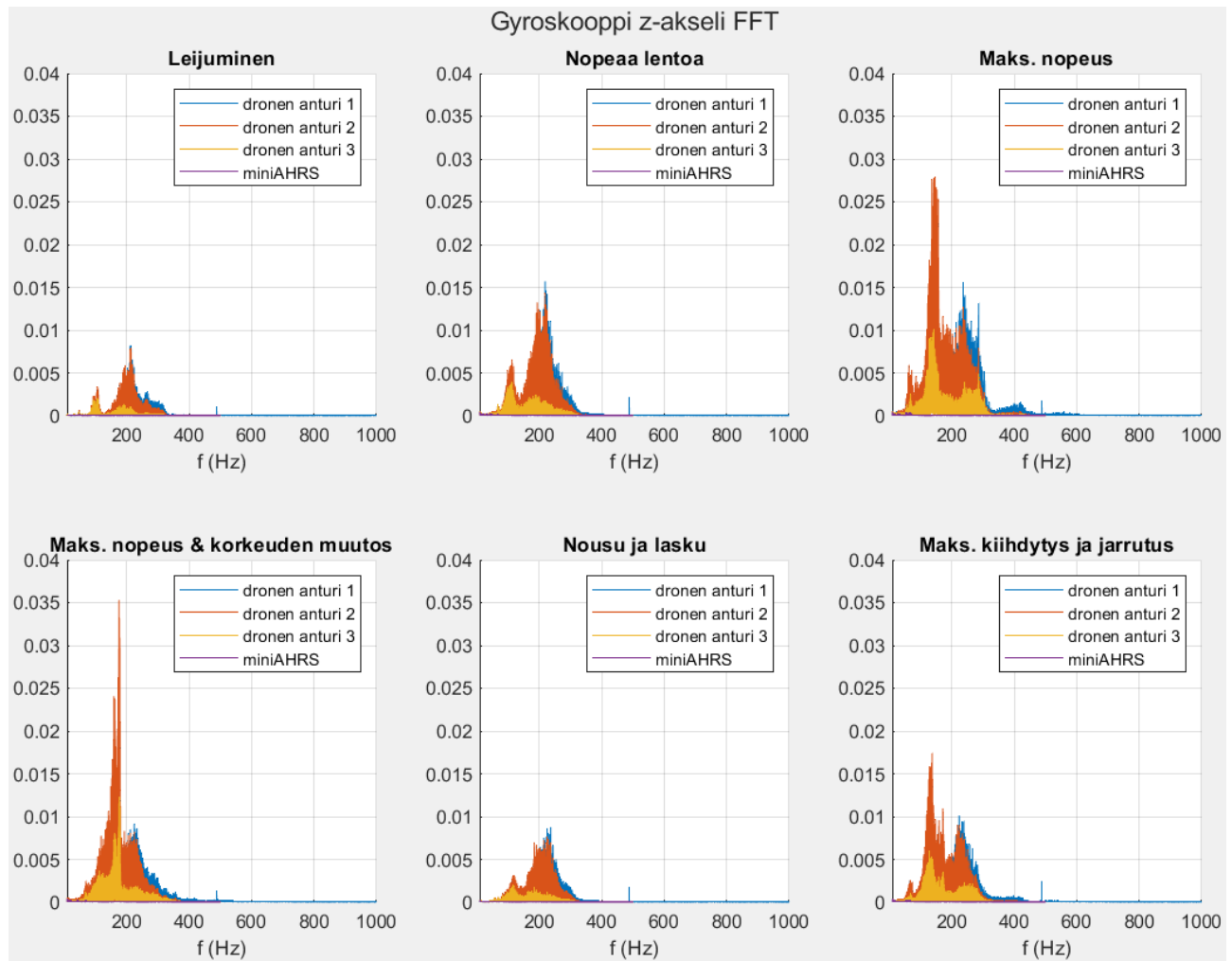
## Liite 6. Gyroskooppien x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1



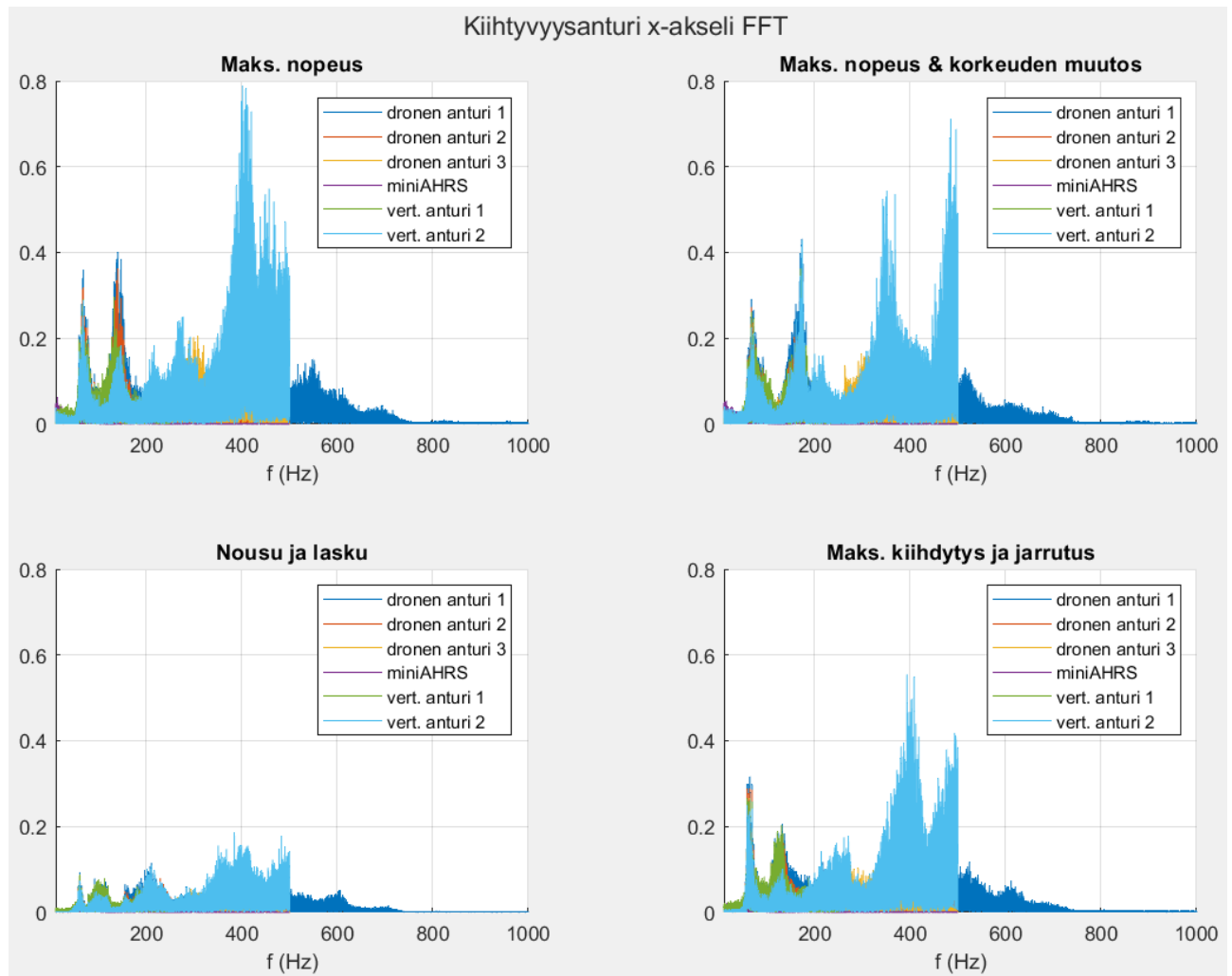
## Liite 7. Gyroskooppien y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1



## Liite 8. Gyroskooppien z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 1

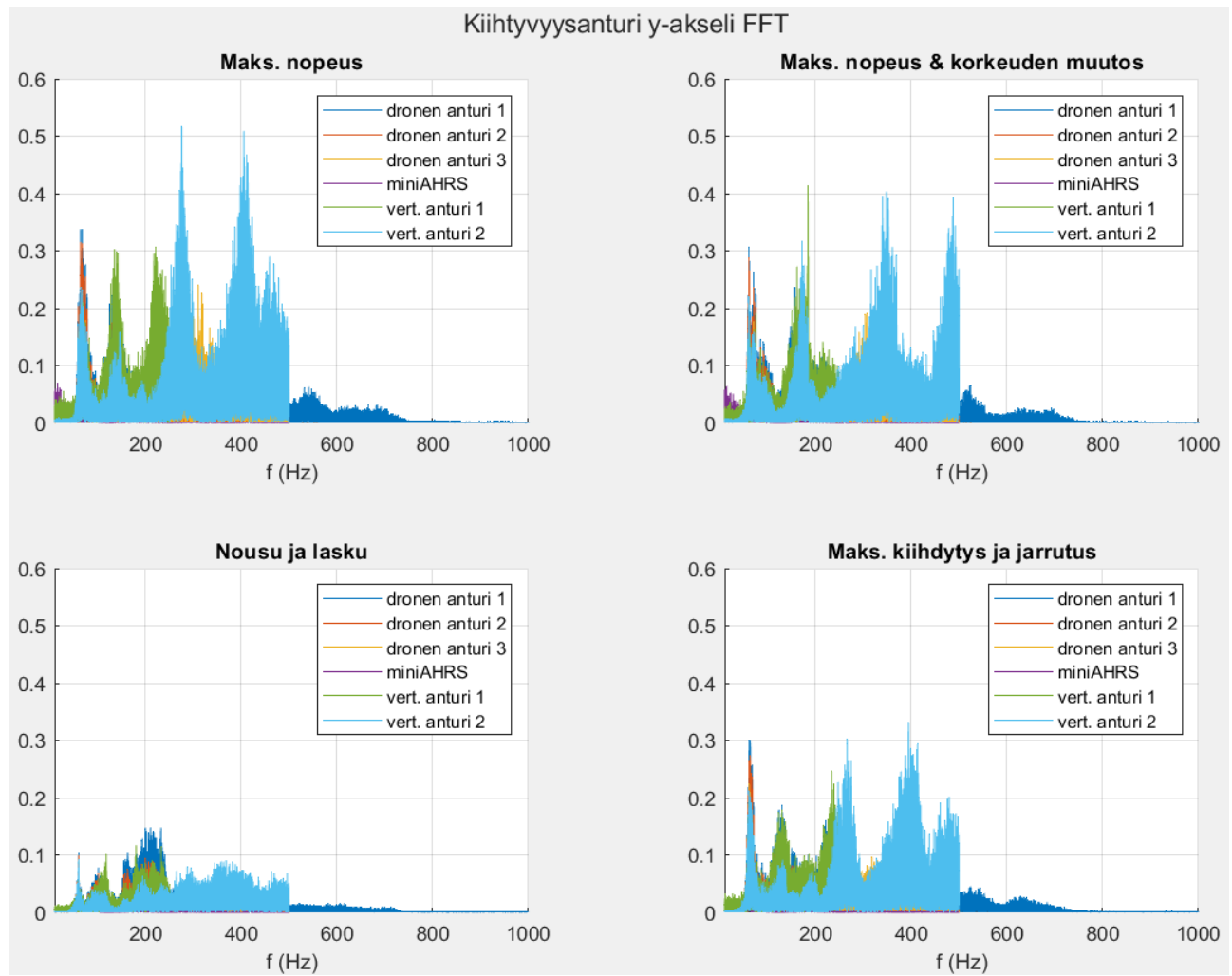


## Liite 9. Kiihtyvyyssantureiden x-akselien taajuustason kuvaajat, testilento 2

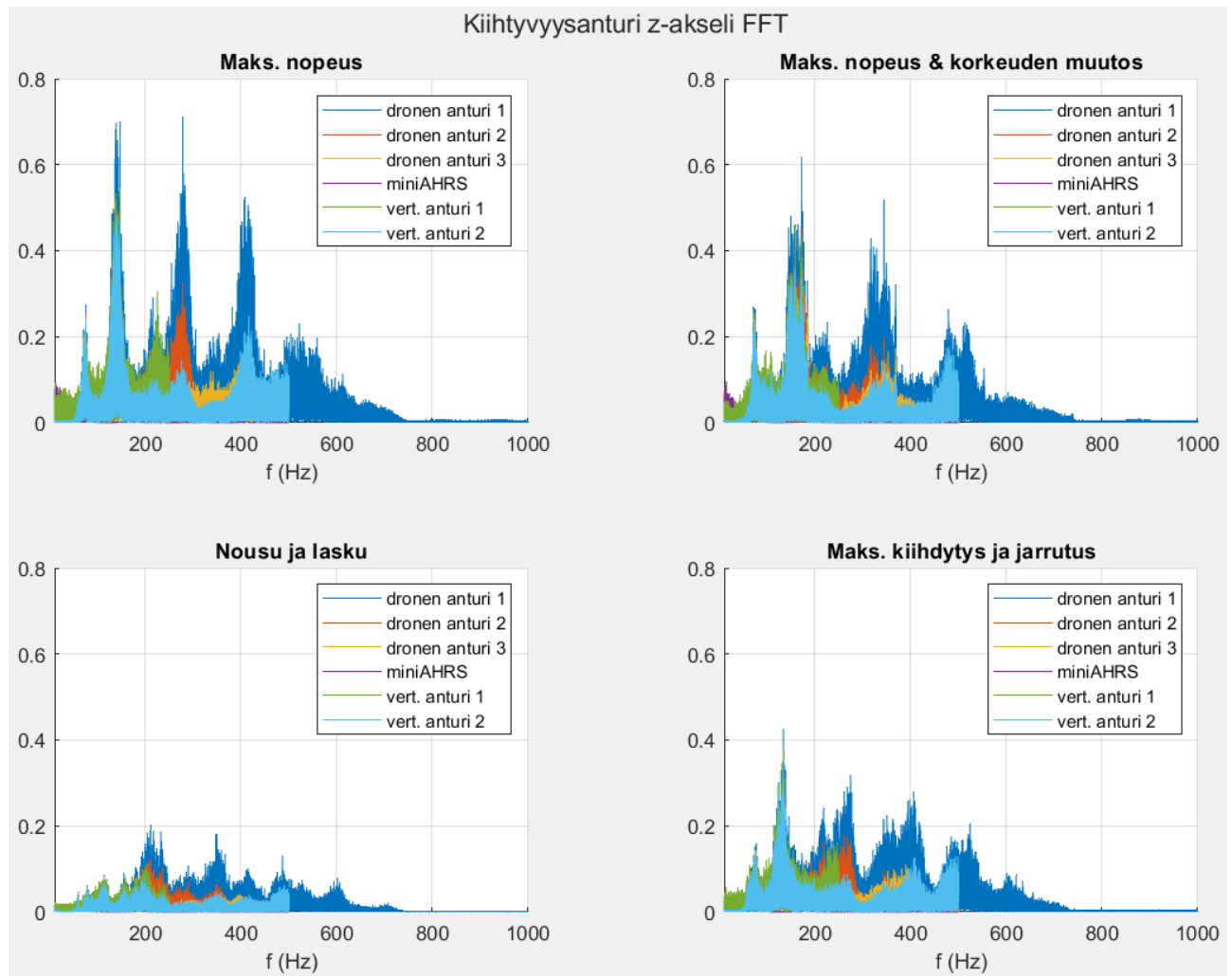




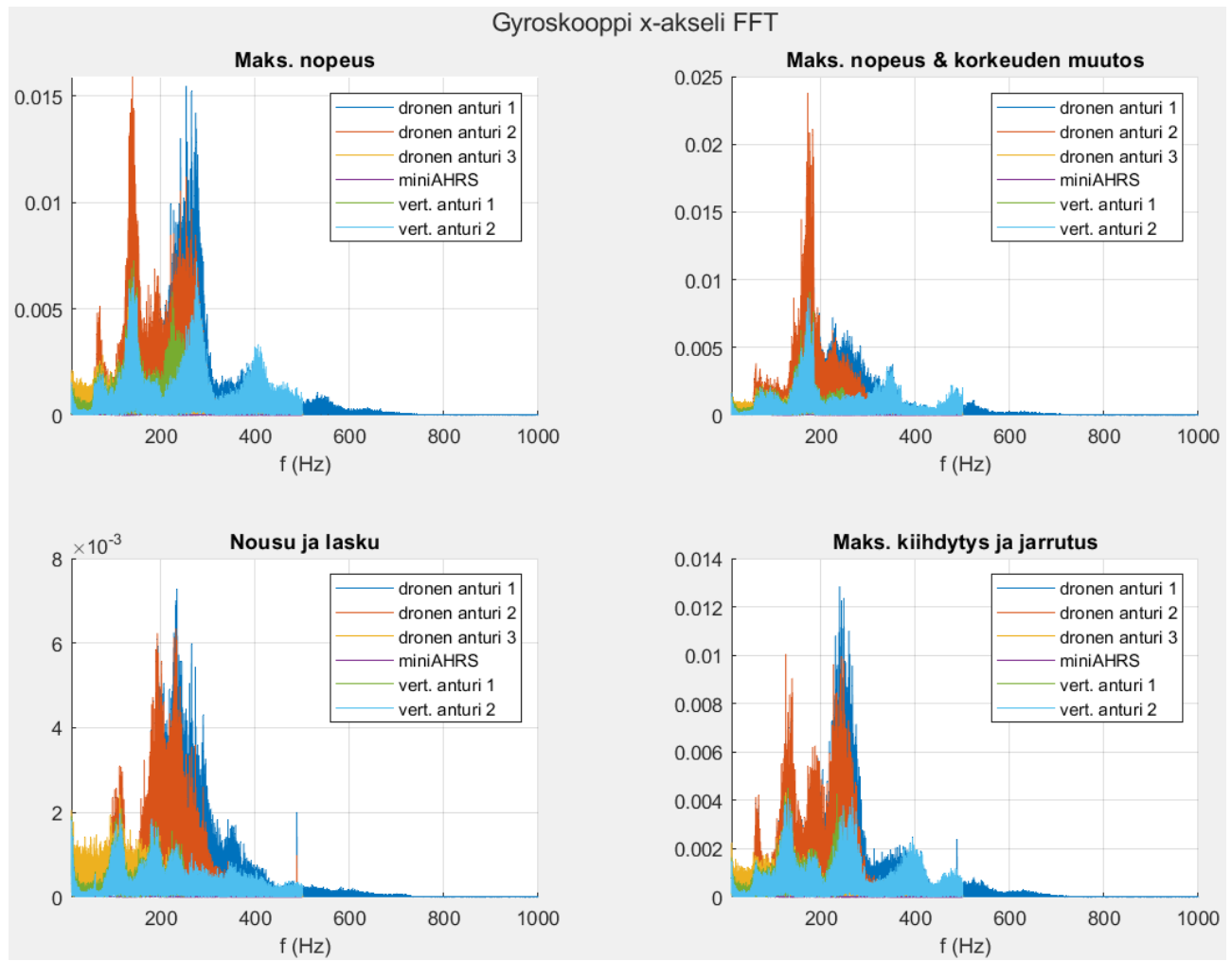
## Liite 10. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2



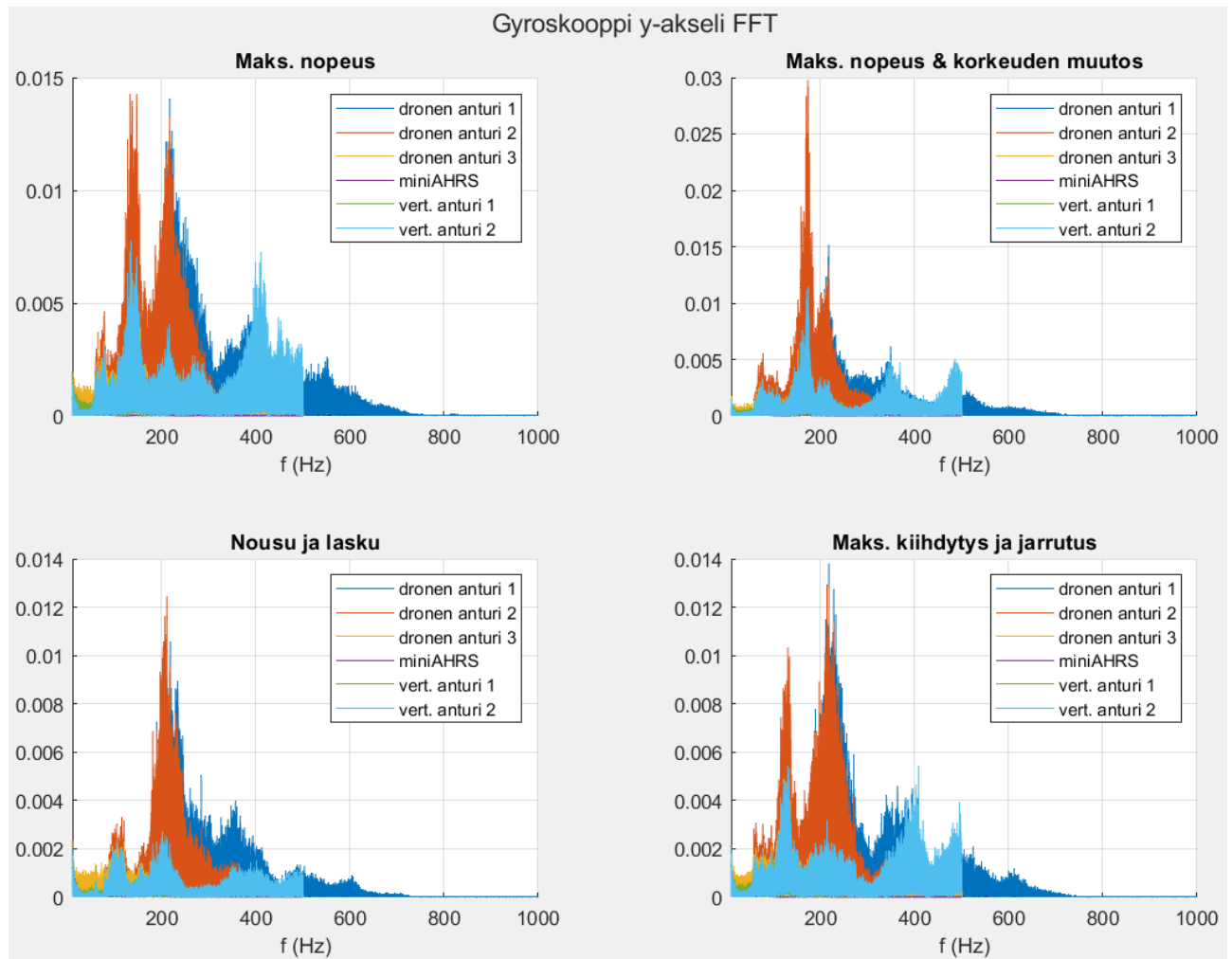
## Liite 11. Kiihtyvyyssantureiden z-akselien taajuustason kuvaajat, testilento 2



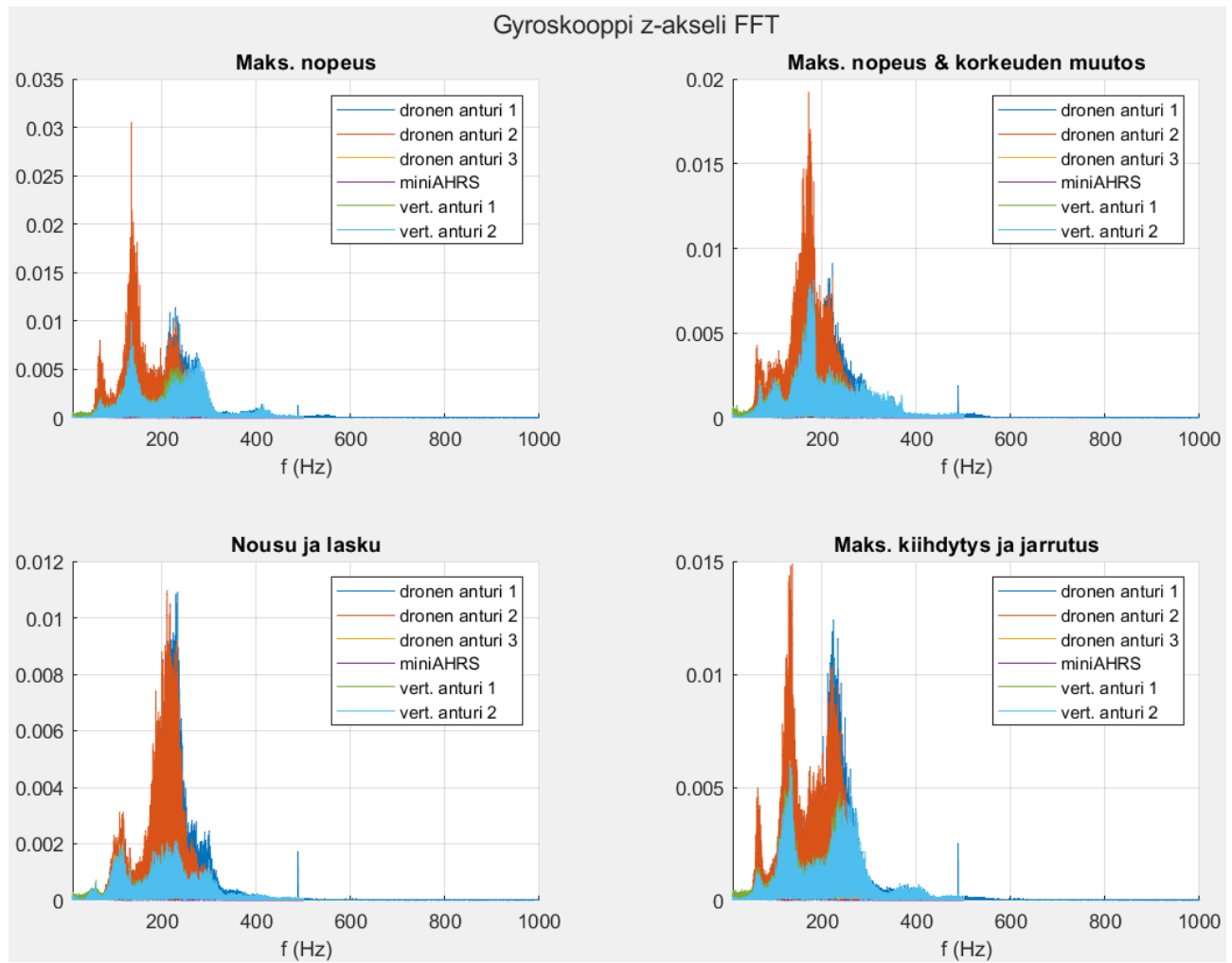
## Liite 12. Gyroskooppien x-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2



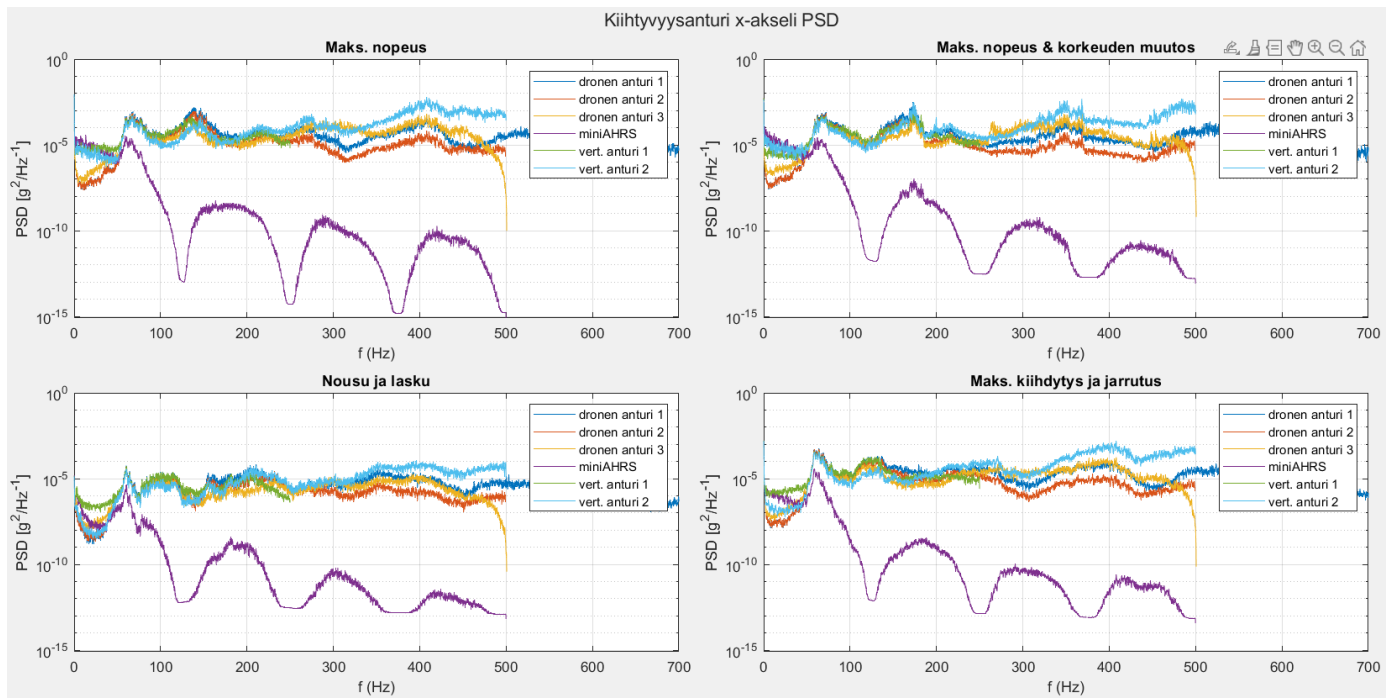
### Liite 13. Gyroskooppien y-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2



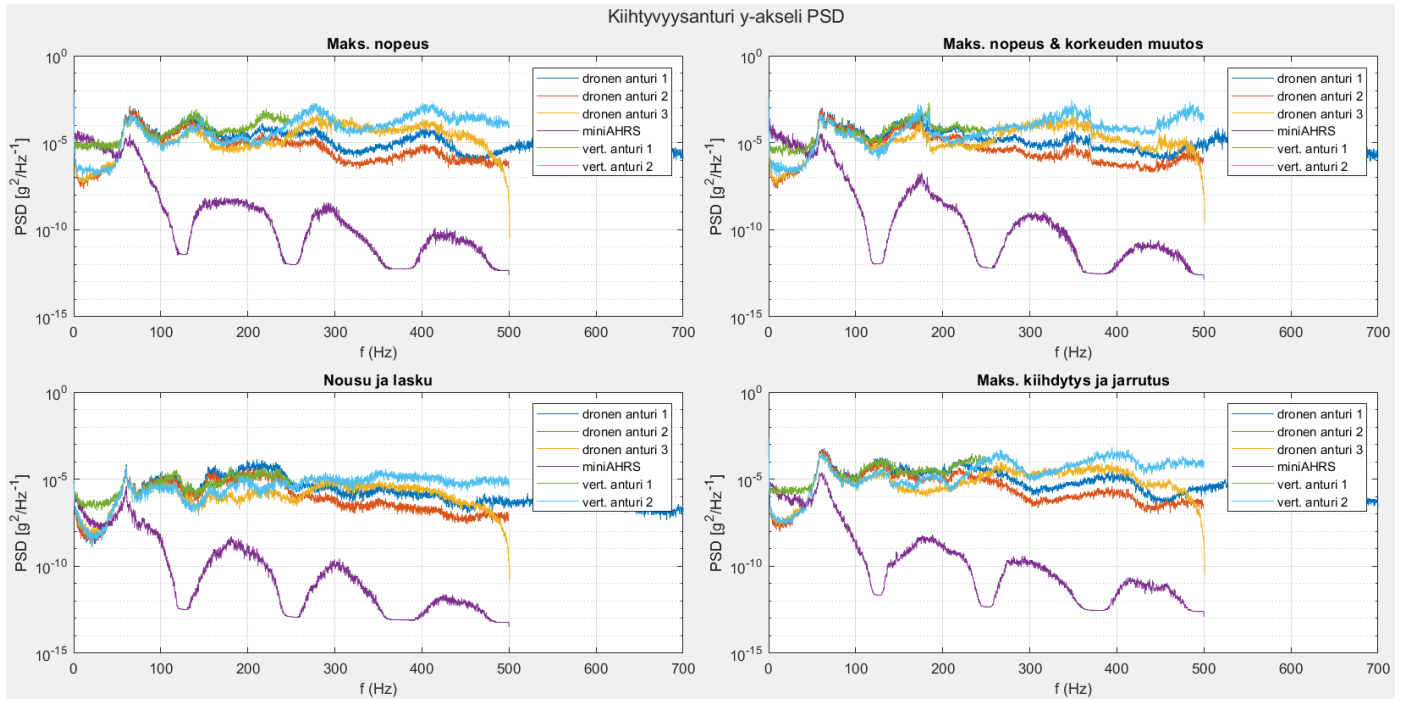
## Liite 14. Gyroskooppien z-akseleiden taajuustason kuvaajat, testilento 2



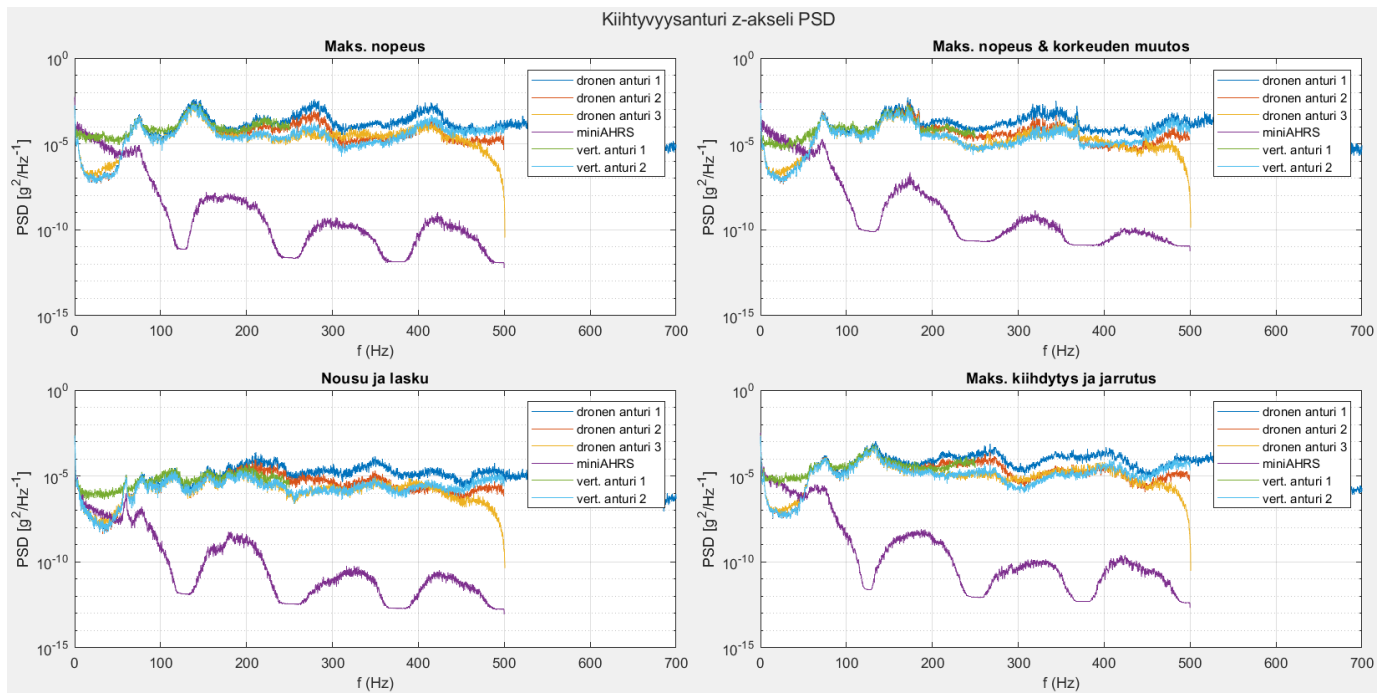
## Liite 15. Kiihtyvyyssantureiden x-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2



## Liite 16. Kiihtyvyyssantureiden y-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2

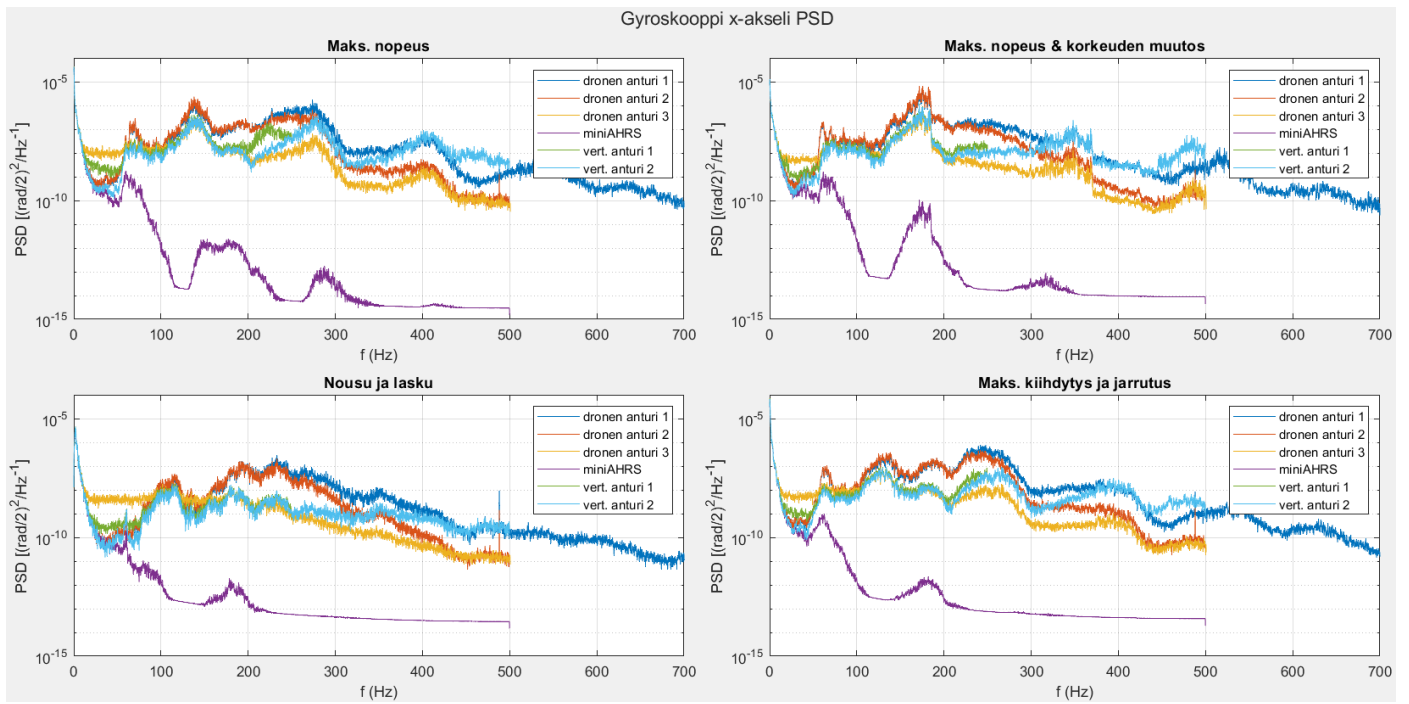


## Liite 17. Kiihtyvyyssantureiden z-akselien PSD-kuvaajat, testilento 2

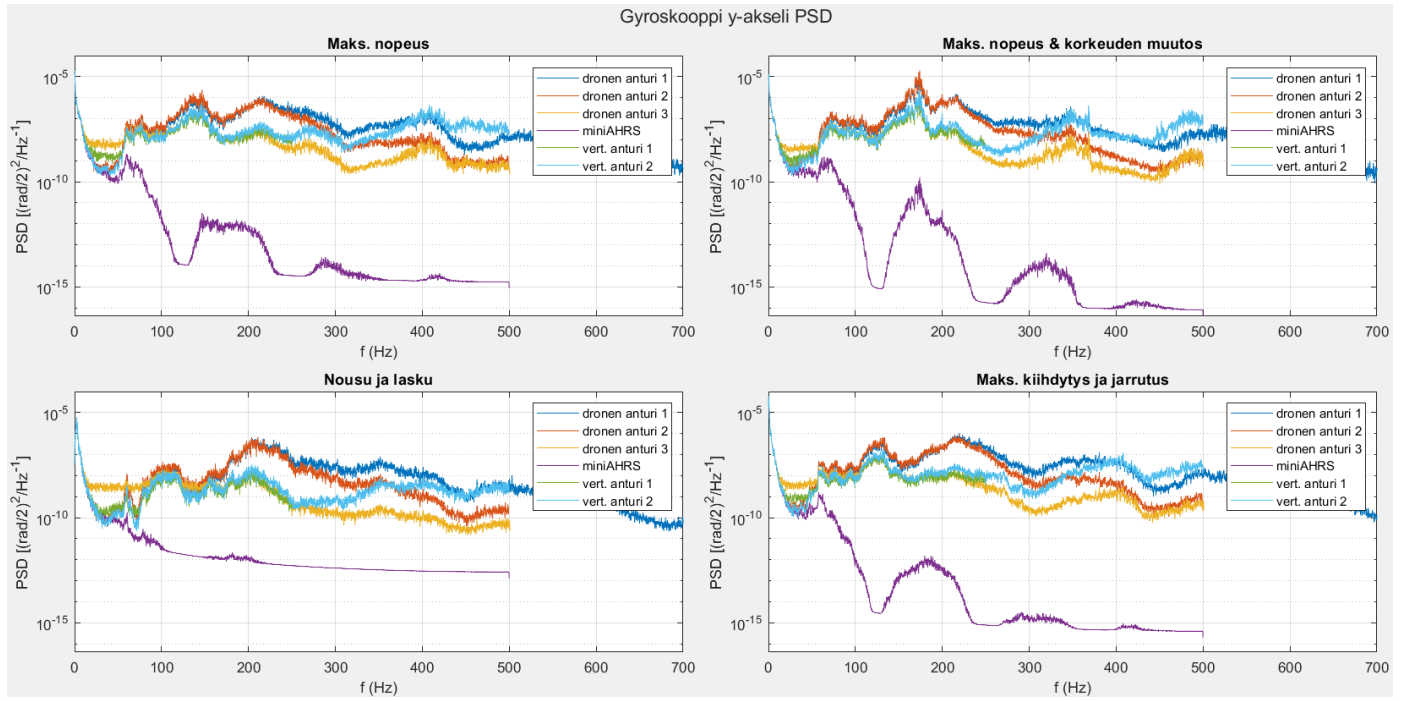




## Liite 18. Gyroskooppien x-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2



## Liite 19. Gyroskooppien y-akselien PSD-kuvaajat, testilento 2



## Liite 20. Gyroskooppien z-akseleiden PSD-kuvaajat, testilento 2

