

Tom Niinimäki

# PIENOISKOPTERIN ANTUREIDEN SOVELTUVUUS LENTOKORKEUDEN MITTAUKSESSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tuomas Salomaa  
Helmikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Tom Niinimäki: Pienoiskopterin antureiden soveltuvuus lentokorkeuden mittauksessa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Helmikuu 2022

---

Tämän insinöörityön tarkoituksena on tutkia multikoptereissa käytettäviä lukuisia antureita, joiden avulla sen on mahdollista tuottaa sijainti- ja asentotietoja suhteessa ympäristöönsä. Työssä erityisenä näkökulmana on multikopterin lentokorkeuden määrittäminen kyseisten antureiden avulla.

Työssä tutustutaan ensin lyhyesti multikopterin toimintaperiaatteeseen, jonka jälkeen esitellään antureiden toimintaa. Tutkimuksessa anturit jaotellaan kahteen ryhmään, sisäisiin ja ulkoiisiin. Sisäisillä antureilla tarkoitetaan passiivisia antureita, jotka eivät emittoi ympäristöönsä lainkaan signaaleita, kuten IMU-yksikköä tai GNSS-järjestelmää. Ulkoisista antureista työssä esitellään aktiiviset LiDAR-, RADAR- ja SONAR-anturit. Tutkimuksessa esitellään antureiden teoreettisen taustan lisäksi niiden teoreettinen suorituskyky sekä minkälainen vaikutus ympäristön olosuhteilla on antureiden toimintaan.

Lopuksi työssä esitellään eräs aiheeseen liittyvä tutkimus, jolla pyritään selvittämään, kuinka anturit suoriutuvat käytännönsovelluksessa. Kyseisestä tutkimuksesta käy ilmi, miten ympäristön olosuhteet, kuten auringonvalo ja muut häiriötekijät, aiheuttavat antureille haasteita tai saattavat estää niiden toiminnan kokonaan.

Tässä työssä esitellyillä antureilla on kaikilla omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Oikean anturin valinta multikopterin korkeuden mittaukseen ei siis aina ole itsestään selvää, vaan todellisuudessa antureita on oltava useita, jotka tarvittaessa paikkaavat toistensa heikkouksia.

Avainsanat: drone, IMU, MEMS, LiDAR, RADAR, SONAR, GNSS, barometri.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. DRONE .....	3
2.1 Pienokopterin sisäiset anturit .....	3
2.1.1 GNNS .....	4
2.1.2 Barometri .....	6
2.1.3 IMU .....	6
2.2 Lennonohjain .....	9
3. DRONEN ULKOISET ANTURIT .....	10
3.1 LiDAR .....	10
3.1.1 CW LiDAR .....	10
3.1.2 Pulssitettu LiDAR .....	11
3.1.3 Signaalinlähde ja vastaanotin .....	12
3.2 Millimetriaaltotutka .....	13
3.2.1 FMCW-millimetriaaltotutka .....	13
3.2.2 Toimintaperiaate .....	13
3.2.3 Millimetriaaltojen eteneminen väliaineessa .....	14
3.3 SONAR .....	15
3.3.1 SONAR-anturin rakenne ja toiminta .....	15
3.3.2 Ultraäänisignaali .....	16
4. KÄYTÄNNÖN SOVELLUS .....	18
5. YHTEENVETO .....	20
LÄHTEET .....	21

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

MEMS	Mikromekaaninen systeemi (engl. Micro Electrical Mechanical System)
UAV	Miehittämätön ilma-alus (engl. Unmanned Aerial Vehicle)
LiDAR	Valon avulla etäisyyttä mittaava järjestelmä (engl. Light Detection and Ranging)
RADAR	Radioaaltojen avulla etäisyyttä mittaava järjestelmä (engl. Radio Detection And Ranging)
SONAR	Äänen avulla etäisyyttä mittaava järjestelmä (engl. Sound Detection and Ranging)
FMCW	Taajuusmoduloitu jatkuva-aaltainen signaali (engl. Frequency Modulated Continuous Waveform)
AMCW	Amplitudimoduloitu jatkuva-aaltainen signaali (engl.
IMU	Inertiaalinen mittaussyksikkö (engl. Inertial Measurement Unit)
GNSS	Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (engl. Global Navigation Satellite System)

# 1. JOHDANTO

Miehittämättömiä ilma-aluksia UAV:ita (Unmanned Aerial Vehicle) on ollut olemassa jo pitkään, mutta vasta viimeisen vuosikymmenen aikana niiden kehityksessä on edistytty huomattavasti. Kevyiden MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) komponenttien ja tehokkaiden mikrokontrollereiden kehityksen vuoksi ovat UAV:t tehokkaampia ja autonomisempia kuin koskaan (Kosola & Solante, 2013). Samaan aikaan edistysaskeleet materiaali- ja akkuteknologiassa ovat tehneet UAV:sta tehokkaampia ja suorituskykyisempiä pidentäen niiden lentoaikoja ja samalla myös käyttömahdollisuuksia. Englanninkielinen miehittämätöntä lennokkia tarkoittava sana drone on varmasti monelle tuttu termi, mutta todellisuudessa se on yleisnimitys kaikista miehittämättömistä lennokeista. Voidaan kuitenkin sopia termin helppouden vuoksi, että tässä työssä käytetään sitä kuvaamaan miehittämätöntä multikopteria.

Dronejen kehityksen myötä ovat niihin liittyvät käyttökohteet laajentuneet. Tällä hetkellä suurimpia sovellusalueita sotateollisuuden lisäksi ovat maanviljely, kaivostoiminta, rakennusala jne. Drone-teknologian kehittyessä ja hankintakustannusten laskiessa keksitään niille jatkuvasti uusia käyttökohteita. Vuonna 2019 drone-markkinoiden arvon ollessa noin 19,3 miljardia on niiden arvioitu kasvavan vuoteen 2025 mennessä 45,8 miljardiin (Markets and Markets , 2019).

Kaikissa droneihin liittyvissä sovelluksissa, oli kyse sitten harrastekäytöstä tai sokkeloisen kaivoksen kartoittamisesta, on usein välttämätöntä pystyä määrittämään dronen tarkka sijainti ja asento suhteessa ympäristöön. Tämän mahdollistavat siihen sulautetut lukuisat anturit. Tässä työssä esitellään yleisimmin droneissa käytettyjä antureita ja vertaillaan niiden ominaisuuksia ja hyötyjä. Antureita pyritään vertailemaan erityisesti lentokorkeuden määrittämisen näkökulmasta. Droneissa käytettävät anturit ovat tässä työssä jaettu kahteen ryhmään, sisäisiin ja ulkoisiin.

Sisäisillä antureilla tarkoitetaan droneissa usein vakiovarusteina olevia mittalaitteita, kuten IMU-yksikköä (Inertial Measurement Unit) tai digitaalista barometriä. IMU-yksikön tehtävänä on mitata dronen asentoa ilmassa ja mahdollistaa yhdessä lennonohjaimessa

olevan automaation kanssa sen vakaus (Castillo-Garcia, et al., 2017). Digitaalisen barometrin tehtävänä on määrittää ilmanpaineen avulla dronen absoluuttinen lentokorkeus ja siten mahdollistaa stabiilin lentokorkeuden ylläpito. Usein valmistajat ovat lisänneet droneihinsa myöskin GNSS (Global Navigation Satellite System) järjestelmän, joten tässä työssä se on laskettu dronen sisäisiin antureihin. Kyseiset anturit voitaisiin luokitella myös niin kutsuttuihin passiivisiin antureihin, sillä ne eivät emittoi signaaleita ympäristöönsä.

Sisäisten antureiden avulla drone voi lentää tasaisesti, mutta niiden avulla sillä ei ole mahdollisuutta havainnoida ympäristöään. Tässä työssä viitataan ulkoisilla antureilla kontaktittomiin ja aktiivisiin etäisyysmittauslaitteisiin, joiden avulla on mahdollista määrittää dronen asema suhteessa ympäristöönsä. Työssä tutkitaan sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvien LiDAR (Light Detection and Ranging) ja RADAR (Radio Detection And Ranging) -anturien ja ääniaaltoihin perustuvan SONAR (Sound Detection and Ranging) -anturin toimintaa.

## 2. DRONE

Drone on lentävä systeemi, jossa on tyypillisesti kolmesta kahdeksaan kiinteälapaista propellia, jotka tuottavat nostetta. Kuvassa 1 on havainnollistettuna tyypillinen drone. Drone on mekaanisesti melko yksinkertainen laite, jossa säätämällä moottoreiden pyörimisnopeutta voidaan hallita sen liikkeitä ilmassa. Yksinkertaisuudestaan huolimatta ne ovat aerodynaamisesti hyvin epävakaita ja jotta niiden lennättäminen olisi mahdollista, on oltava antureita, jotka tarkkailevat niiden asentoa ja sijaintia ympäristössään. Tärkein osa droneissa on lennonohjain, joka vastaanottaa antureiden mittaustiedot sekä ohjajan radiolähtetimestä antamat käskyt ja muuntaa ne oikeanlaisiksi moottoreiden pyörimisnopeuksiksi. Tässä luvussa esitellään hieman tarkemmin lennonohjaimen toimintaa sekä yleisimmin droneissa käytettyjä antureita, kuten barometriä ja GNSS-järjestelmää. Lisäksi pyritään selvittämään, kuinka tarkasti näiden avulla on mahdollista määrittää dronen lentokorkeus. (UST, ei pvm)



**Kuva 1.** Neljä -potkurinen drone. (UST, ei pvm)

### 2.1 Pienoiskopterin sisäiset anturit

Tässä luvussa käsitellään IMU-yksikön, barometrin ja GNSS-järjestelmän toimintaa ja teoreettista taustaa. Lisäksi esitellään lyhyesti dronen aivojen, eli lennonohjaimen roolia dronen navigoinnissa.

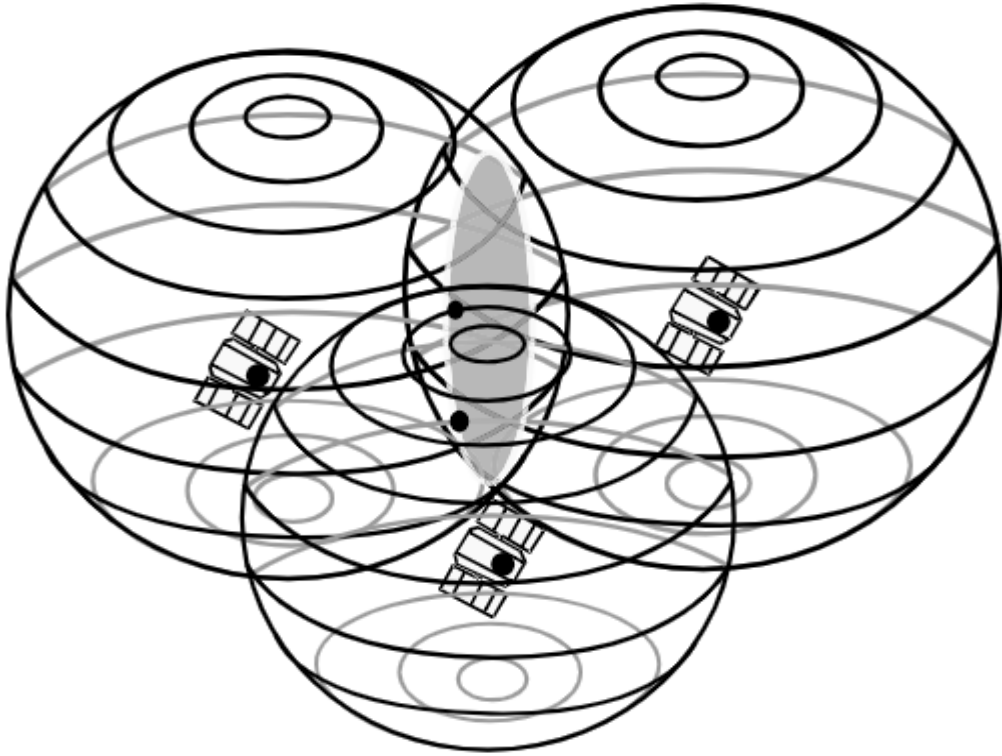
## 2.1.1 GNSS

GNSS on yleiskäsite satelliittijärjestelmistä, jotka mahdollistavat kolmiulotteisen vastaanottimen paikannuspalvelun. GNSS järjestelmiä on neljä kappaletta. Näistä vanhin ja samalla myös tunnetuin on yhdysvaltalainen GPS (Global Positioning System). Uudempia ovat eurooppalainen Galileo, Kiinalainen BeiDou ja venäläinen GLONASS. (Traficom Liikenne- ja viestintävirasto, 2020)

GNSS järjestelmä koostuu kolmesta osasta: satelliitit, maa-asemat ja vastaanotin. Satelliitit lähettävät maahan signaaleja, jotka sisältävät satelliitin sijainnin sekä atomikellolla tuotetun tarkan aikatieon. Maa-asemat tarkkailevat satelliittien sijaintia kiertoradoilla sekä tarvittaessa päivittävät niiden muutokset satelliitteihin. Tämän lisäksi maa-asemat varmistavat, että satelliiteissa olevat atomikellot ovat synkronoituja. Vastaanotin vastaanottaa satelliiteilta tulevia signaaleita ja tuottaa käyttäjälle aika-, nopeus- ja sijaintitietoja. (Groves, 2013)

GNSSn toiminta perustuu satelliittien lähettämiin radiosignaaleihin, jotka sisältävät niiden sijainti- ja aikatieon. Vastaanotin vertaa signaalin mukana tulevaa lähetyssaikaa omaan sisäiseen kelloonsa vastaanottohetkellä määrittääkseen signaalin lentoajan. Lentoajan avulla vastaanotin laskee etäisyytensä satelliittiin kertomalla lentoajan valonnopeudella. Yhden satelliitin avulla vastaanotin pystyy siis paikantamaan itsensä pallon muotoiselle alueelle, jonka säde on vastaanottimen ja satelliitin välinen etäisyys. Lisäämällä toisen satelliitin etäisyystiedon pystytään vastaanotin paikantamaan ympyrälle, joka muodostuu kahden pallon leikkauskohdassa. Kolmannen satelliitin avulla mahdollinen sijainti supistuu kahteen pisteeseen, joista toinen voidaan rajata pois sen epärealistisen sijainnin perusteella. Tätä menetelmää kutsutaan kolmiomittaukseksi. Kuvassa 2 on havainnollistettuna GNSSn toimintaperiaate visuaalisesti. Saadut etäisyystiedot satelliitteihin ovat kuitenkin epätarkkoja, koska vastaanottimien sisäiset kellot ovat huomattavasti epätarkempia kuin satelliittien tarkat atomikellot. Tämän takia on aina oltava vähintään neljäs satelliitti, jonka avulla saadaan tarvittava korjaus vastaanottimien kelloihin. (Groves, 2013)





**Kuva 2.** Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate. (Kaplan & Hegarty, 2017)

GNSS on monimutkainen järjestelmä ja sen paikannustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on monia. Satelliittien sijaintia kiertoradoilla ei koskaan täysin tarkasti tunneta, jonka lisäksi satelliittien kellot eivät aina ole täysin synkronoituja järjestelmään. Tämän lisäksi satelliittien lähettämien signaaleiden on kuljettava ilmakehän läpi, joka aiheuttaa radioaaltojen epätoivottua taittumista. Myös maan pinnalla olevat kohteet, kuten rakennukset ja kasvit, aiheuttavat häiriöitä tai estävät signaalin kokonaan. Myös vastaanottimen komponenttien ja ohjelmistojen tarkkuus on rajallinen. (Quan, et al., 2015) Satelliittien saatavuudella ja geometrialla, eli sijainnilla avaruudessa, on merkittävä vaikutus paikannustarkkuuteen. Satelliittien sijainnin vaikutusta kuvataan DOP-luvulla (Dilution of Precision), josta on erikseen määriteltävissä VDOP-luku (Vertical Dilution of Precision). (Kaplan & Hegarty, 2017, p. 680)

Avoimessa maastossa GNSS järjestelmien peruspalveluiden tarkkuus voi ylittää muutamia metreihin, mutta erilaisilla tukipalveluilla on mahdollista päästä jopa senttimetriluokan tarkkuuksiin. Jos alueella on paljon signaalin kulkua häiritseviä esteitä, kuten taloja tai puita, saattaa paikannustarkkuus olla kuitenkin huomattavasti heikompi. Tämän takia sisätiloissa paikannuspalvelua ei ole käytännössä mahdollista käyttää. (Maanmittauslaitos, ei pvm)

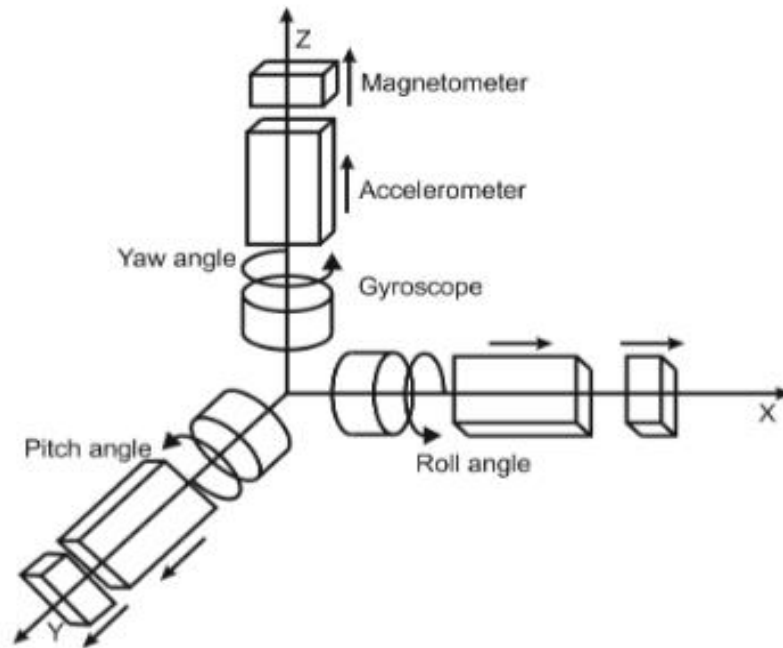
## 2.1.2 Barometri

Digitaalinen MEMS-barometri on sensori, joka mittaa absoluuttista ilmanpainetta. Koska ilmanpaine vaihtelee eri korkeuksilla, on dronen lentokorkeuden muutos mahdollista määrittää, käyttäen esimerkiksi ISA (International Standard Atmosphere) -mallia. Mallit ovat approksimaatioita ja edellyttävät muun muassa tarkkaa lämpötilamittausta, koska lämpötilalla on vaikutusta ilman tiheyteen ja täten myös ilmanpaineeseen. Tämän takia barometrit ovat yleensä varustettu lämpötila-antureilla. Millimetri kokoluokkaa olevien MEMS-barometrien toiminta perustuu ohueen kalvoon, joka taipuu ulkoisen paineen vaikutuksesta ja tämä taipuma muunnetaan sähköiseksi signaaliksi. Droneissa käytettävät barometrit ovat toimintaperiaatteeltaan usein joko pietsoresistiivisiä tai kapasitiivisia paineantureita. (Rantanen, et al., 2019)

Barometri on herkkä olosuhdemuutoksille, kuten ilmvirtauksille tai kosteus- ja lämpötilamuutoksille. Tämän takia barometrin mittaukset ovat usein meluisia ja epätarkkoja. Myöskin sisätiloissa, missä lämpötilajakauma on usein päinvastainen kuin ulkona ja ilmastointi saattaa olla voimakasta, ovat barometrin mittaukset usein epätarkkoja. MEMS-barometreissä olevat paineanturit ovat kuitenkin erittäin herkkiä ja niillä on teoriassa mahdollista päästä senttimetriluokan resoluutioon absoluuttisen lentokorkeuden muutoksen määrittämisessä. (TE Connectivity, ei pvm) (Sabatini & Genovese, 2013)

## 2.1.3 IMU

IMU-yksikkö koostuu yleensä kolmesta toisiinsa nähden ortogonaalisesti sijoitetusta kiihtyvyyssanturista, gyroskoopista ja magnetometristä. Kiihtyvyyssantureiden tehtävänä on mitata dronen lineaarista kiihtyvyyttä akseleidensa suhteen, kun taas gyroskoopit mitaavat dronen kiertymistä akseleidensa ympäri. IMU-yksiköllä on siis mahdollista saavuttaa mittaustietoa dronen liikkeistä kaikilla kuudella vapausasteella. Magnetometri toimii, kuten kompassi. Se mittaa maapallon magneettikenttiä ja tuottaa lennonohjaimelle horisontaalista suuntatietoa. Kuvassa 3 on IMU-yksikön toimintaperiaatteen havainnollistus. Seuraavaksi esitellään lyhyesti IMU-yksikössä olevien MEMS-antureiden toimintaperiaatteet ja tutkitaan niiden ominaisuuksia. Lopuksi esitellään, miten IMU-yksikkö toimii kokonaisuutena. (Collin, et al., 2019)



**Kuva 3.** IMU-yksikön mittaukset koordinaattiakseleiden suhteen. (Tomaszewski, et al., 2017)

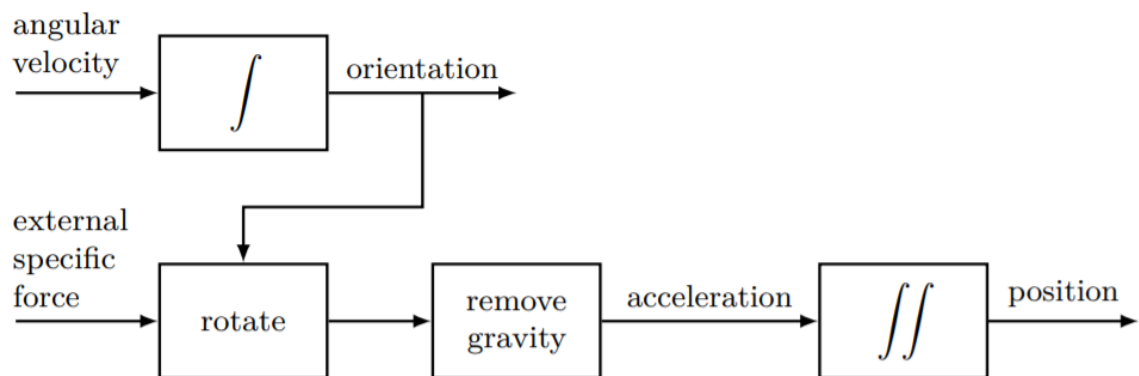
MEMS-kiihtyvyyssantureita on monenlaisia, mutta niiden toimintaperiaate voidaan kiteyttää koteloon sijoitetulla jousimassasysteemillä, jossa massan liike on rajoitettu akselinsa suuntaisesti. Dronen kiihdyttäessä kohdistuu antureissa oleviin massoihin sama kiihtyvyyden, joka saa aikaan Hooken lain mukaisen venymän ja puristuksen jousiin. Jousien muodonmuutoksen määrästä on mahdollista päätellä antureiden kokema kokonaiskiihtyvyyden. Toisaalta, jotta dronen todellinen kiihtyvyydenvektori voidaan määrittää, on maan vetovoimasta aiheutuva kiihtyvyydenkomponentti otettava huomioon ja vähennettävä kokonaiskiihtyvyydestä. (Collin, et al., 2019) Jos kiihtyvyyssantureiden asento on tarkasti tunnettu, on mahdollista määrittää maan vetovoimavektorin suunta, jonka lisäksi tuplain-tegointi todellisesta kiihtyvyydenvektorista tuottaisi tiedon kuljetusta matkasta. (Kok, et al., 2017)

Useimmat MEMS-gyroskoopit toimivat hieman saman tyyppisellä jousimassasysteemillä kuin kiihtyvyyssanturitkin. Anturin toimintaperiaate voidaan kuvata seuraavanlaisesti. Joustavien palkkien varassa oleva massa saatetaan edestakaiseen värähtelevään liikkeeseen. Kun anturi kiertyy tietyllä kulmanopeudella, joka on kohtisuorassa massan värähdysliikettä, aiheutuu massaan coriolis-voima. Tämä voima, joka on kohtisuorassa sekä värähdysliikettä että kulmanopeuskomponenttia, on mitattavissa. Coriolis-voiman suuruus on verrannollinen kulmanopeuteen, joten Coriolis-voimaa mittaamalla voidaan päätellä dronen kulmanopeudet akseliensa ympäri. Lopulta dronen kokonaiskiertymä

voidaan määrittää integroimalla kulmanopeutta. MEMS-gyroskoopeissa Coriolis-voiman mittausta on yleisimmin toteutettu kapasitiivisesti. (Effa, 2018)

MEMS-magnetometrien toiminta perustuu Lorentzin-voimaan ja se voidaan kuvailla seuraavanlaisesti. Magneettikentässä olevaan johteeseen, jossa kulkee sähkövirta, aiheutuu voima, joka on kohtisuorassa sekä sähkövirtaa että magneettikenttää. Voiman seurauksesta anturielementin rakenteessa tapahtuu muodonmuutos, joka on mitattavissa yleensä joko kapasitiivisella anturilla tai elementin piezoresistiivisten ominaisuuksien avulla. (Buffa, 2017)

Jos dronen lähtöasema ja asento olisi täysin tunnettu, niin gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin avulla olisi teoriassa mahdollista laskea sen kokonaissiirtymä ja lopullinen asento kuvan 4 esittämällä tavalla.



**Kuva 4.** IMU-yksikön mittauksille suoritettavat matemaattiset operaatiot paikan määrittämisessä. (Kok, et al., 2017)

Tämä ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollista, sillä kyseisten antureiden tarkkuus on rajallinen ja lisäksi ne ovat alttiita monenlaisille häiriöille. (Kok, et al., 2017) Gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin virhelähteet voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään, systemaattisiin ja satunnaisiin. Systemaattisilla virheillä tarkoitetaan anturien suorituskykyyn ja ominaisuuksiin liittyviä epätarkkuuksia, kuten AD-muuntimen tai anturin resoluutiota. (Collin, et al., 2019) Satunnaisilla virheillä voidaan tarkoittaa esimerkiksi olosuhteista riippuvia tekijöitä, kuten värinää tai lämpötilamuutoksia. Joskus IMU-yksiköissä näitä pyritäänkin vähentämään, asentamalla anturikoteloon lämmitin ja värinää hillitseviä eristeitä (Ardupilot, 2020). Lisäksi kyseiset anturit tulisi kalibroida tasaisin väliajoin. Myös magnetometri on altis häiriöille ja sen toimintaa häiritsevät välittömässä läheisyydessä olevat

komponentit, jotka synnyttävät ympärilleen magneettikenttiä. Lisäksi maan magneettikentän inkliinaatio vaihtelee eri leveysasteilla, joka on syytä ottaa huomioon. Magnetometrin häiriöiden vaikutusta voidaan vähentää ajoittaisella kalibroinnilla. (Goryanina, et al., 2017)

## 2.2 Lennonohjain

Kuten aikaisemmin jo mainittiin, ovat dronet aerodynaamisesti epävakaita ja ilman toimivaa lennonohjainta ja siihen liittyvää automatiikkaa, olisi dronen lennättäminen käytännössä mahdotonta. Toisin sanoen dronet toimivat aina enemmän tai vähemmän lennonohjaimen ohjelmoitujen algoritmien eli autopilotin varassa. Lennonohjaimessa on yleensä muutamia erilaisia moodeja, joilla käyttäjän on mahdollista määrittää kuinka paljon autopilotti avustaa lennossa.

Lennonohjaimen toiminta perustuu takaisinkytkettyyn säätöön, jonka sisäänmenoina ovat sensoreiden mittaukset, radiolähettimellä vastaanotetut käskyt ja valmiiksi ohjelmoitunut autopilotin asetukset. Lennonohjaimen ohjelmoitu algoritmi laskee näiden avulla tarvittavat moottoreiden pyörimisnopeudet ja lähettää ne moottoreita ohjaaville ESC-piireille (Electronic Speed Controller). Lennonohjaimessa oleva säätöalgoritmi perustuu yleensä PID (Proportional Integral Derivative) -tyyppiseen säätöön. (Quan, 2017)

Onnistunut säätöjärjestelmä edellyttää laadukkaita mittauksia ja kuten edellä todettiin ovat IMU- ja GNSS-yksiköiden mittaukset ajoittain epäluotettavia tai kokonaan käyttämättömissä. Tämän ongelman ratkaisuun on kehitetty erilaisia suodinalgoritmeja, joiden idea perustuu antureilta tulevien mittaustietojen yhdistämiseen ja käsittelyyn. Esimerkiksi integrointi gyroskooppien kulmamittauksista aiheuttaa ajan myötä kasvavaa anturin epätarkkuuksista johtuvaa virheen kasaantumista. Sen sijaan kiihtyvyyssantureilta ja magnetometreiltä saatavat mittaukset ovat meluisia ja hetkellisesti epätarkkoja, mutta pitkällä tähtäimellä niiltä on saatavissa luotettavia mittauksia dronen asennosta ilmassa. Korkeuden määrittämisessä lennonohjain hyödyntää mittaustietoja GNSS-järjestelmästä, IMU-yksiköltä sekä barometrilta. Näistä algoritmi laskee kullakin hetkellä parhaan arvon todellisesta korkeudesta. Antureiden mittaustietoja yhdistämällä pyritään siis saamaan aikaan luotettavampi ja robustimpi arvio dronen asennosta ja paikasta. Tyypillisiä dronen lennonohjaimessa käytettyjä suotimia ovat esimerkiksi complementary suodin ja hieman monimutkaisempi Kalman suodin, sekä tämän eri versiot. (Quan, 2017)

## 3. DRONEN ULKOISET ANTURIT

Tässä kappaleessa tutustutaan droneissa etäisyysantureina käytettäviin LiDAR-, RADAR- ja SONAR-tekniikoihin ja esitellään niissä yleisimmin käytettäviä erilaisia variaatioita. Kaikilla tekniikoilla on mahdollista tuottaa ympäristöstä 3D-malli, mutta tämän työn kannalta tekniikoiden tutkimus on rajattu pistemäiseen etäisyyden mittaukseen. Antureita pyritään esittelemään pitämällä silmällä ominaisuuksia, kuten maksimi toimintaetäisyys ja aksiaalinen tarkkuus. Myös tekniikoiden soveltuvuus erilaisiin olosuhteisiin on arvioitavana.

### 3.1 LiDAR

LiDAR-järjestelmä on aktiivinen ja kontaktiton mittausmenetelmä, jossa optisten signaalien avulla määritetään kohteiden etäisyyksiä, nopeuksia ja sijaintikulmia. LiDAR on tarkka, monipuolinen ja suosituin anturiratkaisu autonomisissa ajoneuvoissa. Tässä kappaleessa tutustutaan yleisimpiin LiDAR-järjestelmissä käytettyihin tekniikoihin ja laitteistoihin. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

LiDAR-järjestelmät voidaan jakaa kahteen valosignaalin modulointiperiaatteeseen, joita LiDAR-järjestelmissä käytetään etäisyyden määrittämiseen. Kyseiset menetelmät ovat pulssitettu LiDAR ja hieman harvinaisempi jatkuva aaltainen CW (Continuous Wave) LiDAR. Seuraavaksi esitellään kyseiset periaatteet, sekä tutustutaan LiDAR-järjestelmissä käytettäviin signaalilähteisiin ja vastaanottimiin eli detektoreihin. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

#### 3.1.1 CW LiDAR

CW LiDARit voidaan jakaa kahteen eri variaatioon AMCW (amplitude modulated continuous wave) ja FMCW (frequency modulated continuous wave). (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

AMCW LiDAR lähettää jatkuvaa valosignaalia, jonka intensiteettiä moduloidaan sini- tai neliöaaltomaisesti. Lähtevän ja palaavan signaalin vaiheiden erotuksen avulla on moduloidun signaalin kulkema matka mahdollista määrittää. AMCW LiDARin resoluutio ja toimintaetäisyys ovat riippuvaisia intensiteetin modulaatiotaajuudesta. Taajuutta kasvattamalla pystymme parantamaan tarkkuutta, mutta samalla heikennämme anturin maksimietäisyyttä, sillä vaihe-ero on rajoitettu  $2\pi$ :in. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

AMCW LiDARilla on mahdollista saavuttaa senttimetri luokkaa olevia tarkkuuksia sekä maksimissaan 100 metrien etäisyyksiä, mutta kuten edellä mainittiin, on niiden välillä tehtävä kompromissi. AMCW LiDAR on altis ulkoisille häiriöille ja se soveltuukin parhaiten sisätiloihin, missä häiriöt ovat yleensä vähäisiä. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

FMCW LiDARin toiminta perustuu valosignaalin taajuuden modulointiin intensiteetin pysyessä vakiona. Kohteesta detektorille palaavan signaalin taajuutta verrataan samalla hetkellä lähtevän signaalin taajuuteen ja tästä signaalien välisestä taajuuserosta voidaan laskea etäisyys kohteeseen. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

FMCW LiDARin suuren kaistanleveyden ansiosta on mahdollista saavuttaa millimetriluokan etäisyydeltä tarkkuuksia pitkälläkin matkoilla. FMCW LiDARin elektroniikka on kuitenkin herkkä olosuhdemuutoksille, kuten lämpötilan tai valaistuksen vaihtelulle. Tästä huolimatta sillä on mahdollista päästä parempaan suorituskäyttöön myös ulkotiloissa, kuin pulssitetulla LiDARilla tai AMCW LiDARilla. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019) (Behroozpour, et al., 2017)

### 3.1.2 Pulssitettu LiDAR

Pulssitetun LiDARin perustoimintaperiaate on yksinkertainen. Anturi emittoi mahdollisimman voimakkaan ja nopean valopulssin, joka osuessaan kohteeseen siroaa takaisin anturin vastaanottimelle. Kun valonlentoaika mitataan, on etäisyys kohteeseen mahdollista laskea kaavalla (1),

$$d = \frac{ct}{2}, \quad (1)$$

jossa  $c$  on valonnopeus ja  $t$  signaalin kokonaislentoaika. Anturin aksiaalinen resoluutio on riippuvainen siinä olevan elektronisen kellon tarkkuudesta. Joten kaavan 1 mukaan, anturin  $\Delta d_{min}$  on suoraan verrannollinen järjestelmässä olevan elektronisen kellon tarkkuuteen  $\Delta t_{min}$ . Pulssitetun LiDARin maksimitoimintaetäisyys on riippuvainen muutamista seikoista. Ensinnäkin emittoitujen pulssien lähetystaajuus, toisin sanoen etäisyyden päivitysnopeus, saattaa olla rajoittava tekijä maksimietäisyyteen. Tämä johtuu siitä, että lähettimen on odotettava viimeiseksi lähetetyn signaalin paluuta ennen uuden lähettämistä, koska detektori voi käsitellä ainoastaan yhden signaalin kerrallaan. Loppu viimein LiDARin toimintaetäisyys on rajoitettu signaalin ja häiriöiden suhteella SNR (Signal to Noise Ratio). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että etäisyyden kasvaessa paluusignaalin voimakkuus heikkenee ja detektorin suuren kaistanleveyden vuoksi sen on vaikeaa erottaa heikentyneitä palaavaa signaalia ympäristöstä tulevista häiriöistä. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

Pulssitetun LiDARin etuina ovat sen toiminnan yksinkertaisuus ja robustisuus ympäristöstä tuleviin häiriöihin, kuten auringonvaloon tai sateeseen. Tämän takia pulssitettu LiDAR on toimiva anturi ulkokäyttöön. Sillä on mahdollista saavuttaa senttimetriluokan tarkkuuksia ja satojen metrien kantama. Pulssitettu LiDAR on toimiva ja suosituin etäisyysanturi kaikissa autonomisissa ajoneuvoissa. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)

### 3.1.3 Signaalinlähde ja vastaanotin

Joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta yleisin signaalin lähde LiDAR-järjestelmissä on jonkin tyyppinen laser tai hohtodiodi. Tyypillisin autonomisissa laitteissa käytetyn LiDARin signaalin aallonpituus sijaitsee ilmakehän siirtoikkunassa 800–1550 nanometriä, jossa signaalin sironta on vähäistä. Infrapuna-alueella olevan signaalin etuina ovat myöskin sen näkymättömyys ja turvallisuus ihmissilmälle. Aallonpituus yleensä määrittelee sen, minkälaista tekniikkaa signaalin lähteenä kulloinkin käytetään.

Vastaanottimia eli detektoreita on monenlaisia. Niissä käytetyn tekniikan valintaan vaikuttavat parametrit, kuten signaalin aallonpituus tai tarvittava suorituskyky. Aallonpituudella on vaikutusta myös detektoreissa käytettävään materiaaliin. Detektorin vastaanottaman signaalin vahvistus on tärkeä parametri etenkin olosuhteissa, joissa on paljon häiriöitä. (Royo & Ballesta-Garcia, 2019)



## 3.2 Millimetriaaltotutka

Nimensä mukaisesti millimetriaaltotutka toimii lähellä millimetriluokkaa olevia aallonpituuksia. Millimetriaaltotutka on laajasti käytetty sensori teollisuudessa ja autoissa, mutta sille löytyy jatkuvasti uusia käyttötarkoituksia muualtakin. Millimetritutkat on mahdollista valmistaa erittäin pieniksi, koska niissä ovat antennit, jotka säteilevät sähkömagneettisia aaltoja ympärilleen, ovat kooltaan millimetriluokkaa. Lisäksi moderni piirilevytekniikka mahdollistaa millimetritutkissa tarvittavien komponenttien integroimisen yhdelle piirilevyille (Iovescu & Rao, 2020). Siksi se onkin pienen kokonsa ja keveytensä vuoksi varteenotettava anturiratkaisu myöskin droneen. Tässä luvussa pyritään selvittämään, minkälaista tekniikkaa droneille tarkoitetuissa millimetritutkissa käytetään ja minkälaiset ovat niiden ominaisuudet.

### 3.2.1 FMCW-millimetriaaltotutka

Millimetriaaltotutkat toimivat LiDARin tavoin kahdella eri aaltomuodolla. Nämä kaksi muotoa ovat pulssitettu sekä jatkuva-aaltainen. Tässä työssä keskitytään taajuusmoduloituun jatkuva-aaltoiseen tutkatekniikkaan, koska se on yleisesti esiintyvä tutkatekniikka drone-käytöissä. FMCW (Frequency Modulated Continuous Waveform) -tutka on monipuolinen sensori, ja sillä on mahdollista mitata kohteen etäisyys, nopeus. Lisäämällä siihen useampia antennia voidaan määrittää myös kohteen sijaintikulma (Iovescu & Rao, 2020). Tässä työssä kuitenkin riittää, että arvioidaan etäisyyden määrittämiseen liittyviä asioita. Tästä eteenpäin käytetään sovelluksesta nimitystä FMCW-tutka.

### 3.2.2 Toimintaperiaate

Seuraavaksi esitellään muutama oleellinen kaava FMCW-tutkalle, jotta voidaan ymmärtää paremmin sen suorituskykyä. FMCW-tutka lähettää vakioamplitudisia, lineaarisesti kasvavataajuisia signaaleita, joiden avulla se pystyy mittaamaan etäisyyden kohteeseen. Näitä signaaleita kutsutaan chirp-signaaleiksi. FMCW-tutkan resoluutio eli kyky erottaa lähekkäin olevia kohteita toisistaan on kääntäen verrannollinen chirp-signaalin kaistanleveyteen, ja se voidaan määrittää kaavalla (2)

$$d_{res} = \frac{c}{2B}, \quad (2)$$

jossa  $B$  on signaalin kaistanleveys ja  $c$  valonnopeus. Tutkan maksimitoimintaetäisyys saadaan kaavalla (3)

$$d_{max} = \frac{f_s \tau c}{4B}, \quad (3)$$

jossa  $\tau$  on yhden pulssin kesto ja  $f_s$  AD-muuntimen näytenopeus. (Seifallah, et al., 2019; Iovescu & Rao, 2020)

Eurooppalainen European Telecommunications Standards Institute ja Yhdysvaltalainen U.S. Federal Communications Commission määrittävät standardit, jotka rajoittavat droneissa käytettävien FMCW-tutkien taajuusalueita. Tämän vuoksi suurin osa kaupallisista FMCW-tutkista toimii 24–24,25 GHz:n ISM (Industrial, Scientific and Medical) -taajuusalueella. (Jacobi & Artem, 2018) 250 MHz:n kaistanleveys rajoittaa kaupallisten tutkien tarkkuutta, mutta samalla se tarkoittaa matalampia valmistuskustannuksia mahdollistaen kuitenkin melko suorituskykyisen etäisyysanturin.

### 3.2.3 Millimetriaaltojen eteneminen väliaineessa

Sääolosuhteilla, kuten sateella ja sumulla, on negatiivinen vaikutus millimetriaaltojen kulkuun ilmassa. Mutta koska millimetriluokkaa olevien aaltojen pituus on yleensä suurempi kuin ilmassa olevien partikkelien koko, on sironta melko vähäistä ja toimintaetäisyydet voivat tästä huolimatta olla satoja metrejä. Myöskään valaistusolosuhteet, kuten kirkas auringonvalo tai pimeys eivät vaikuta FMCW-tutkan toimintaan. (Kosola, 2013) Siksi se onkin varteenotettava anturiratkaisu erityisesti ulkokäyttöön ja haastaviin olosuhteisiin.

### 3.3 SONAR

SONAR on signaalin lentoaikaan perustuva kontaktiton mittausmenetelmä, joka mahdollistaa kohteen etäisyyden ja nopeuden määrittämisen. SONARin toimintaperiaate on samankaltainen kuin LiDAR- ja RADAR-järjestelmissä, mutta sähkömagneettistenaaltojen sijaan sen toiminta perustuu ilmassa eteneviin ääniaaltoihin. SONAR on yleisesti käytetty sensori erityisesti teollisuudessa ja liikkuvien koneiden törmäyksenestojärjestelmissä. Sen suosio perustuu muun muassa alhaiseen hintaan, laitteiston keveyteen ja alhaiseen virran kulutukseen. Tässä kappaleessa tutustutaan ultraäänialueella toimiviin SONAR-antureihin ja niiden ominaisuuksiin. (Siciliano & Khatib, 2016)

#### 3.3.1 SONAR-anturin rakenne ja toiminta

SONAR-anturin toiminta perustuu kaikuluotaukseen ja se voidaan kuvailla seuraavanlaisesti. Signaalin lähde tuottaa akustisia pulsseja, jotka osuessaan kohteeseen kimpoavat takaisin vastaanottimelle. Kun äänennopeus ilmassa on tunnettu ja aikaero lähetyksen ja vastaanoton välillä määritetty, voidaan etäisyys kohteeseen laskea kaavalla (4)

$$s = \frac{vt}{2}, \quad (4)$$

jossa  $t$  on signaalin kokonaislentoaika ja  $v$  äänennopeus väliaineessa. Merenpinnalla 25:n Celsius asteen lämpötilassa, äänen nopeus on noin 343 m/s. SONAR-sensoreiden lähettämiä ja vastaanottimia kutsutaan myös muuntimiksi, sillä niiden toiminta perustuu sähköisen energian muuntamiseen mekaaniseksi energiaksi ja päinvastoin. Tyypillisimmät muuntimet perustuvat pietsosähköiseen ilmiöön, jossa kiteinen materiaali saatetaan värähtelyyn tietyllä taajuudella johtamalla asianmukainen vaihtojännite sen elektrodeihin. Värähtely saa aikaan kiteen pinnasta irtoavia pulssimuotoisia äänisignaaleja. Päinvastaisesti kohteesta kimmonneet aallot aiheuttavat kiteessä mekaanista värähtelyä, joka synnyttää mitattavan jännitteen kiteen elektrodeihin. Yksittäisen muuntimen on siis mahdollista toimia sekä vastaanottimena että lähettimenä, mutta erillisillä muuntimilla on

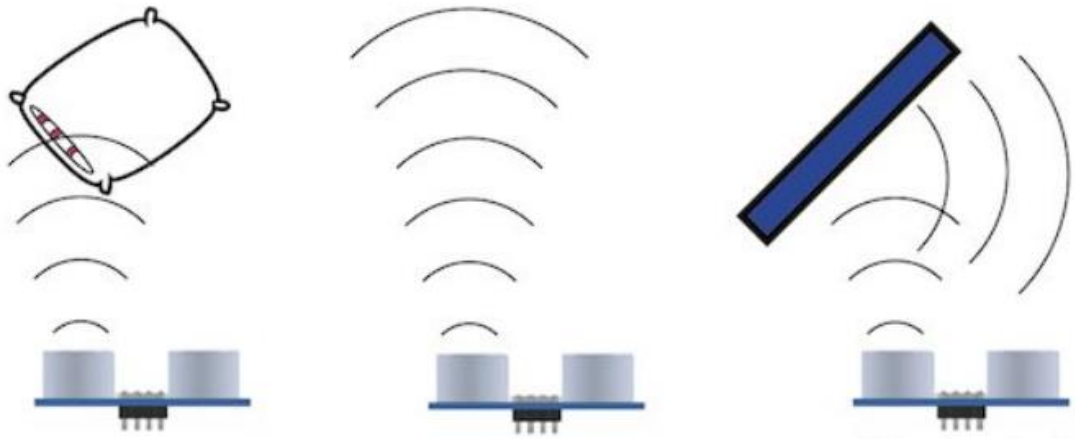
mahdollista päästä parempaan suorituskykyyn. Johtuen äänennopeuden ominaisuuksista ilmassa, ovat SONAR-sensoreiden päivitysnopeudet huomattavasti alhaisempia, kuin sähkömagneettiseensäteilyyn perustuvilla antureilla. Tämän takia sensoreissa olevan elektroniikan laskennalliset vaatimukset ovat melko alhaiset, ja tästä johtuen SONAR-sensorit eivät toimi esimerkiksi sovelluksissa, joissa liikutaan suurilla nopeuksilla. SONAR-antureita on saatavilla myös MEMS-järjestelminä. (Siciliano & Khatib, 2016)

### 3.3.2 Ultraäänisignaali

SONAR-sensorit operoivat ihmiskorvan kuulemattomissa yli 20 kHz:n ultraäänitaajuuksilla. Ultraääniaaltojen nopeus ilmassa vaihtelee lämpötilan ja väliaineen koostumuksen, kuten kosteuden mukaan vaikuttaen anturin mittaustarkkuuteen. Tämän takia SONAReissa on usein myös lämpötila-anturi, jonka avulla pystytään kompensoimaan lämpötilan vaikutusta äänennopeuden muutoksiin. (Burnett, 2019)

Ultraääniaaltojen amplitudi heikkenee kulkiessaan väliaineessa ja tämän ilmiön vaikutus voimistuu käytetyn taajuuden kasvaessa rajoittaen anturin toimintaetäisyyttä. Toisaalta taajuutta kasvattamalla anturin resoluutiota voidaan parantaa. Lisäksi SONAR-anturi on häiriöaltis ympäristöstä tuleville ääniaalloille, jotka koostuvat pääasiassa matalataajuisista komponenteista. Siksi ultraäänianturit toimivat usein noin 40 kHz:n taajuusalueella, joka on niin ikään sopiva kompromissi edellä esitetyille seikoille. (Massa, 1999)

SONAR-anturi toimii parhaiten sileillä ja laajoilla pinnoilla, jotka ovat kohtisuorassa signaalin kulkusuuntaan. Tämän takia se on suosittu anturi esimerkiksi pinnan korkeuden mittauksissa. SONAR-anturille ongelmia tuottavat ympäristöt, joissa on paljon vinoja tai pyöreitä pintoja, jotka saavat ääniaallot kimpoilemaan arvaamattomasti. Myös pinnanlaadulla on merkitystä ultraäänien heijastumisvoimakkuuteen. Epätasaiset ja pehmeät pinnat heikentävät signaalin kaikua tai saattavat vaimentaa sen kokonaan. Kuvassa 5 on kuvattuna SONAR-sensorin toimintaa vaikeuttavia tekijöitä. (Siciliano & Khatib, 2016)



**Kuva 5.** SONAR anturin toimintaa vaikeuttavia tekijöitä. (Arcbotics, ei pvm)

Edellä esitellyistä heikkouksista huolimatta SONAR on robusti ja toimintavarma anturi. Se kykenee toimimaan vaikeissakin olosuhteissa, kuten sateessa ja sumussa. Vaikka tietynlaiset pinnat aiheuttavat häiriötä sensorin toimintaan, kykenee se kuitenkin havaitsemaan joitakin hankalampia pintoja, kuten ikkunalaseja tai muita läpinäkyviä materiaaleja. Optimaalisissa olosuhteissa SONARilla on mahdollista saavuttaa senttimetriluokan tarkkuuksia, toimintaetäisyyksien jäädessä yleensä muutamiin metreihin.

## 4. KÄYTÄNNÖN SOVELLUS

Seuraavaksi esitellään eräs käytännön tutkimus liittyen dronen toimintaan. Tarkoituksena on selvittää, miten etäisyysanturit suoriutuvat käytännön olosuhteissa, jotka ovat todellisuudessa antureille usein haastavia ja vaihtelevia.

Hentschke (2018) on tutkinut dronen käyttömahdollisuutta lannoitteiden ja tuholaismyrkyjen levittäjänä maissipellolla. Kasvien suihkutuksessa on tärkeää ylläpitää tasaista lentokorkeutta, jotta aineet levittyvät riittävän hyvin kasvien lehdille. Testissä olosuhteet ovat antureille haasteelliset. Propellien nostattama pöly ja suihkutettavien aineiden muodostama pisarapilvi voivat aiheuttaa häiriöitä etenkin LiDAR-antureiden toiminnassa. Lisäksi kasvuston monimuotoisuus ja auringonvalo ovat ominaan aiheuttamaan ongelmia. Koejärjestelyssä käytetyt anturit ja niitä varten teetetty teline löytyvät kuvasta 6. Kokeessa testattiin dronen sisäisten antureiden lisäksi kolmea infrapuna-alueella toimivaa LiDAR-anturia ja yhtä millimetrialloilla toimivaa RADAR-anturia (Aerotenna  $\mu$ Landing). (Hentschke, et al., 2018)



**Kuva 6.** Koejärjestelyssä käytetyt anturit. (Hentschke, et al., 2018)

Testeissä dronen sisäiset anturit, joihin lukeutuivat barometri ja IMU osoittautuivat liian epätarkoiksi vertailukorkeuden määrittämisessä. Kyseisillä antureilla absoluuttinen kor-

keus oli mahdollista määrittää ainoastaan noin metrin tarkkuudella, joka kyseisessä tehtävässä on riittämätön. Lisäksi etäisyysantureista LeddarOne jouduttiin lopulta eliminoidaan testistä, sillä ulkoiset valonlähteet aiheuttivat liikaa häiriötä sen toimintaan. Tutkimuksissa  $\mu$ Landing osoittautui epätarkimmaksi anturiksi, kun taas molemmat SF11-C ja M16 anturit osoittivat kokeessa omat vahvuutensa. Tiheässä kasvustossa ja tiellä lennettäessä SF11-C tarjosi tarkimmat etäisyysmittaukset, mutta harvemmassa kasvustossa lennettäessä sen emittoimat kapeammat säteet osuivat enemmän maanpinnalle, vaikeuttaen oikean etäisyyden ylläpitämistä kasvuston latvoihin. Kokonaisuudessaan parhaimmaksi anturiksi osoittautui M16, joka kyseisessä sovelluksessa oli sopiva kompromissi tarkkuuden ja robustiuden välillä. (Hentschke, et al., 2018)

## 5. YHTEENVETO

Dronet ovat voimakkaasti kasvava toimiala ja niiden ihmisille tuomat potentiaaliset hyödyt ovat valtavat. Dronejen käyttömahdollisuudet ovat lähes rajattomat. Tästä hyvänä esimerkkinä on NASAn (National Aeronautics and Space Administration) kaksiroottorinen helikopteri Ingenuity, joka vuonna 2021 suoritti neitsytlentonsa Marsin pinnalla. Voidaan siis sanoa, että taivas ei ole rajana dronejen kehitykselle. Dronejen kehitys kulkee käsi kädessä antureiden kehityksen kanssa. Kehitystä ovat vauhdittaneet tehokkaat ja äärimmäisen kevyet MEMS-sensorit, jotka yhdessä jatkuvasti tehokkaampien lennonohjaimien avulla mahdollistavat dronejen käytön koko ajan vaativammissa sovelluksissa. Tässä työssä droneissa käytettäviä antureita käsiteltiin monia erilaisia, mutta pintapuolisesti. Antureissa olevan teknisen taustan lisäksi työssä pyrittiin esittelemään niiden ominaisuuksia ja suorituskykyä erilaisissa olosuhteissa.

Jotta dronet voivat toimia erilaisissa sovelluksissa autonomisesti ja turvallisesti, tulee niiden pystyä tarkkailemaan ympäristöään tarkasti ja viiveettömästi. Tämän mahdollistavat erityyppiset etäisyysanturit. Tässä työssä niistä esiteltiin suppeasti kolme, LiDAR-, RADAR- ja SONAR-anturit. Lopuksi työssä tutustuttiin aiheeseen liittyvään tutkimukseen, jonka avulla pyrittiin luomaan ymmärrystä sille, että oikeanlaisen etäisyysanturin valinta ei aina ole itsestään selvää. Todellisuudessa jokaisella tässä työssä esitellyllä anturilla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Luotettavien etäisyystietojen saamiseksi dronessa onkin siis oltava useita antureita, jotka tilanteesta riippuen paikkaavat toistensa heikkouksia. Johtopäätöksenä voidaankin siis todeta, että luotettavin ja tarkin tapa mitata dronen lentokorkeus, on usean anturin yhdistäminen.



# LÄHTEET

Ardupilot , 2020. *Ardupilot - The Cube Overview*. [Online]

Available at: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecube-overview.html>

[Accessed 10 4 2021].

Behroozpour, B., Sandborn, P. A. M., Wu, M. C. & Boser, B. E., 2017. Lidar System Architectures and Circuits. *IEEE communications magazine*, Issue Vol.55, pp. 135-142.

Buffa, C., 2017. *MEMS Lorentz Force Magnetometers: From Specifications to Product*. s.l.:Cham: Springer International Publishing AG.

Burnett, R., 2019. *How Noise and Temperature Can Affect Sensor Operation*. [Online]

Available at: <https://www.maxbotix.com/articles/noise-temperature-sensor-operation.htm> [Accessed 12 05 2021].

Castillo-Garcia, P., Hernandez, L. E. M. & Gil, P. G., 2017. *Indoor navigation strategies for aerial autonomous systems*. First edition ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

Collin, J., Davidson, P., Kirkko-Jaakkola , M. & Leppäkoski, H., 2019. *Inertial Sensors and Their Applications*. s.l.:Springer.

Effa, D., 2018. *Design, Fabrication and Characterization of MEMS Gyroscopes Based on Frequency Modulation*, s.l.: UWSpace.

Goryanina, K. et al., 2017. Algorithm for increasing the accuracy of three-axis MEMS orientation sensors. *MATEC Web of Conferences*.

Groves, P. D., 2013. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*. Second edition ed. Boston: Artech House.

Iovescu, C. & Rao, S., 2020. The fundamentals of millimeter wave sensors. *Texax Instruments*.

Jacobi, R. & Artem, A., 2018. *Choosing 60-GHz mmWave sensors over 24-GHz to enable smarter industrial applications*. Dallas: Texas Instruments Incorporated.

Jankiraman, M., 2018. *FMCW Radar Desing*. Boston: Artech House .

Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J., 2017. *Understanding GPS/GNSS : principles and applications*. Third edition ed. Boston: Artech House.

Kok, M., Hol, J. D. & Schön, T. B., 2017. Using inertial sensors for position and orientation estimation. *Foundations and trends in signal processing*, Volume Vol.11 (1-2), pp. 1-153.

Kosola, J., Solante, T., 2013. *Digitaalinen taistelukenttä : informaatioajan sotakoneen tekniikka*. [Online] Available at: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-25-2503-4>

Maanmittauslaitos, n.d. *Satelliittipaikannus*. [Online] Available at: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittipaikannus> [Accessed 17 4 2021].

Markets and Markets , 2019. *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market*. [Online] Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html> [Accessed 11 3 2021].

Massa, D. P., 1999. Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement - Part 1: Acoustic Considerations. *Sensor Magazine*, pp. 1-8.

Menéndez, E. G., 2018. *Frequency-modulated continuous-wave radar in automotive applications*. [Online] Available at: [https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/195050/TFG\\_eloiguerreromenendez.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2018/195050/TFG_eloiguerreromenendez.pdf) [Accessed 11 3 2021].

Quan, Q., 2017. *Introduction to Multicopter Design and Control*. 1st. edition ed. Singapore: Springer Singapore.

Quan, W., Gong, X., Fang, J. & Li, J., 2015. Principle of INS/CNS/GNSS Navigation System. In: *INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology*. Berlin: Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 9-52.

Rantanen, J., Ruotsalainen, L., Kirkko-Jaakkola, M. & Makela, M., 2019. Height Measurement in Seamless Indoor/Outdoor Infrastructure-Free Navigation. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, Issue Vol.68 (4), pp. 1199-1209.

Royo, S. & Ballesta-Garcia, M., 2019. *An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles*. s.l.:Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Sabatini, A. M. & Genovese, V., 2013. A stochastic approach to noise modeling for barometric altimeters. *Sensors (Basel, Switzerland)*, Issue Vol.13 (11), pp. 15692-15707.

Seifallah, J. et al., 2019. Compact mmWave FMCW radar: Implementation and performance analysis. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Issue Vol.34.

Siciliano, B. & Khatib, O., 2016. *Springer Handbook of Robotics*. s.l.:Cham: Springer International Publishing AG.

TE Connectivity, n.d. *TE Connectivity*. [Online]

Available at: <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-BLPS0036.html>

[Accessed 10 4 2021].

Traficom Liikenne- ja viestintävirasto, 2020. *Satelliittipaikannuksen nykytila ja kehitysnäkymät*. [Online] Available at:

<https://www.traficom.fi/fi/satelliittipaikannuksen-nykytila-ja-kehitysnakymat>

[Accessed 17 4 2021].