

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**PIENTEN KAUPALLISTEN MULTIKOPTERIEEN SUORITUSKYKY TAISTELU-  
KENTÄN VALVONNASSA**

Pro Gradu-tutkimus

Yliluutnantti  
Sampo Nurmio

Sotatieteiden maisterikurssi 7  
Maasotalinja

Huhtikuu 2018

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

Kurssi <b>Sotatieteiden maisterikurssi 7</b>	Linja <b>Maasotalinja</b>
Tekijä <b>Yliluutnantti Sampo Nurmio</b>	
Tutkimuksen nimi <b>PIENTEN KAUPALLISTEN MULTIKOPTERIEN SUORITUSKYKY TAISTELUKENTÄN VALVONNASSA</b>	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2018	Tekstisivuja 79 Liitesivuja 1
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Kaupallisten multikoptereiden saatavuus ja käyttö on lisääntynyt räjähdysmäisesti viimeisen 10 vuoden aikana. Tutkimuksessa selvitettiin pienten kaupallisten multikoptereiden suorituskykyä kohteiden havaitsemisessa taistelukentällä. Suorituskykyä lähestyttiin tarkastelemalla multikoptereiden ja niiden kanssa käytettäväksi suunniteltujen sensoreiden ominaisuuksia sekä niiden kykyä toimia Suomen olosuhteissa.</p> <p>Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta, simulointia ja kenttäkoetta. Tutkimuksessa esitellään nykyisten kaupallisten multikoptereiden rakenne ja tekniikka sekä arvioidaan eri hintaluokan tuotteiden suorituskykyä niiden teknisten ominaisuuksien perusteella. Sensoreista tarkasteltiin näkyvän valon alueen kameroita ja lämpökameroita. Sensoreiden suorituskykyä tutkittiin simuloimalla niille havaitsemisetaisyyksiä ihmiseen ja sotilasajoneuvoon. Kenttäkokeella tutkittiin tarkemmin Phantom 4-multikopterin suorituskykyä ja täydennettiin muilla tutkimusmenetelmillä tehtyjä havaintoja.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena oli multikoptereiden osalta, että 1000 euron hintaluokan kaupalliset multikopterit soveltuvat hintaansa nähden hyvin joukkojen valvontakyvyn kehittämiseen. Tuotteiden toiminta-ajat, hyötykuorma ja ohjausyhteyden kantama ovat riittävät, jotta niitä voidaan hyödyntää valvontakyvyn ulottamisessa maastoesteiden taakse ja muihin kohteisiin joita ei kyetä tähtystämään maahan sijoitetuilla sensoreilla. Kalliimmissa tuotteissa on mahdollisuus käyttää lämpökameraa ja suurentavaa optiikkaa, jolla lisätään valvontakykyä pimeällä sekä mahdollistetaan kohteiden havaitseminen korkealta. Sääolosuhteista jäätämisen ja sateen todettiin haittaavan multikopterien käyttöä, kun sen sijaan alhaiset lämpötilat ja sisämaassa tyypilliset tuuliolosuhteet eivät tutkimusten perusteella estä multikoptereiden käyttöä.</p> <p>Tutkimus keskittyy multikoptereiden suorituskyvyn arviointiin niiden teknisten ominaisuuksien perusteella. Mahdollisina jatkotutkimusaiheina esille nousevat sensoreiden arvioimiseen käytettävän kriteeristön tarkempi tutkiminen sekä multikopterien soveltuvuus pioneeri- ja suojelutiedusteluun.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> Multikopterit, kaupalliset tuotteet, COTS-tuotteet, sensorit, miehittämätön ilmailu	

# KAUPALLISTEN MINILENNOKKIEN JA KOPTERIEN SUORITUSKYKY

<b>1.</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1.	Tutkimuksen taustaa .....	1
1.2.	Tutkimustehtävä .....	3
1.3.	Tutkimusote ja tutkimusmenetelmät .....	3
1.4.	Käsitteet, näkökulmat ja rajaukset .....	5
<b>2.</b>	<b>MULTIKOPTERIEN TEKNIikka</b> .....	<b>7</b>
2.1.	Lentotekniikka .....	7
2.2.	Multikopterin rakenne .....	9
2.3.	Runko .....	12
2.4.	Propulsiojärjestelmät .....	14
2.5.	Ohjausjärjestelmät .....	18
2.6.	Ohjausjärjestelmien alttius elektroniselle häirinnälle .....	24
2.7.	Olosuhteiden vaikutus multikopterien käytettävyyteen .....	28
2.8.	Multikopterien suorituskyvyn arviointi .....	33
2.9.	Yhteenveto multikoptereiden suorituskyvystä .....	39
<b>3.</b>	<b>MULTIKOPTERIEN SENSORIT</b> .....	<b>41</b>
3.1.	Sensoreiden suorituskyvyn määrittäminen Johnsonin kriteerien avulla .....	42
3.2.	Näkyvän valon alueen sensorit .....	46
3.3.	Lämpökamerat .....	48
3.4.	Nykyiset multikopterien sensorit .....	51
3.5.	Sensoreiden suorituskyvyn arviointi .....	54
3.6.	Yhteenveto multikoptereiden sensorien suorituskyvystä .....	59
<b>4.</b>	<b>MULTIKOPTERIN SUORITUSKYVYN ARVIOINTI KENTTÄKOKEELLA</b>	<b>61</b>
4.1.	Kenttäkokeen suunnittelu .....	61
4.2.	Kenttäkokeen toteutus .....	63
4.3.	Sensorin yleis- ja tyyppitunnistusetäisyydet .....	64
4.4.	Multikopterin toiminta alhaisissa lämpötiloissa .....	67
4.5.	Multikopterin havaittavuus äänen perusteella .....	68
4.6.	Metsämaaston vaikutus ohjausyhteyteen .....	69
4.7.	Kaupallisten sovellusten käyttö alueiden ilmakehässä .....	71
4.8.	Yhteenveto kenttätestin tuloksista ja tulosten luotettavuuden arviointi .....	73
<b>5.</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>75</b>
5.1.	Tutkimuksen tulokset .....	75
5.2.	Tutkimuksen validiteetin arvioiminen .....	77
5.3.	Jatkotutkimusehdotuksia .....	78

## **PIENTEN KAUPALLISTEN LENNOKKIEN JA KOPTERIEN SUORITUSKYKY TIEDUSTELULAVETTEINA**

### **1. JOHDANTO**

#### 1.1. Tutkimuksen taustaa

Puolustusministeriön vuonna 2004 julkaisemassa tulevaisuuskatsauksessa todetaan modernin puolustusmateriaalin hankinta- ja ylläpitokustannuksen kaksinkertaistuvan aina seitsemässä vuodessa. Kehittyneen aseteknologian kehittämisen, hankinnan ja ylläpidon todetaan aiheuttavan tulevaisuudessa ongelmia puolustusministeriön hallinnonalan resurssien riittävyyden kannalta. Raportin mukaan sotilasteknologian kustannusten nopea kasvu pakottaa etsimään tulevaisuudessa uusia ratkaisuja, joissa hyödynnetään kustannustehokkaita kaupallisia järjestelmiä. [80] Raportissa tehdyt havainnot ovat edelleen ajankohtaisia, ja puolustusmäärärahoihin tehdyt leikkaukset vain korostavat puolustusmateriaalin nopean kallistumisen aiheuttamaa ongelmaa.

Sotatalouden professori Juha-Matti Lehtosen ja sotatieteiden tohtori Jukka Anteroisen mukaan teknologinen kehitys on johtanut puolustusmateriaalissa yksikköhinnan kasvamiseen, kun taas kaupallisissa kuluttajatuotteissa teknologinen kehitys ei ole välttämättä aiheuttanut vastaavaa hinnannousua [61, s. 161]. Kansantajuisesti ilmaistuna voidaan todeta, että aikaansa nähden ”ihan hyvän television” hinta pysyy samana, kun taas ”ihan hyvän torjuntahävittäjän” hinta nousee merkittävästi ajan kuluessa. Myös kapteeni Mika Kärämä toteaa kaupallisten tuotteiden käytettävyyttä käsittelevässä esiupseerikurssin tutkielmassaan kaupallisten tuotteiden halpenevan niiden suorituskyvyn lisääntyessä, kun taas sotilasjärjestelmien hinnat nousevat merkittävästi [59, s. 1]. On siis perusteltua tutkia kaupallisten tuotteiden käytettävyyttä sotilastoiminnassa.

Pienempien hankinta- ja elinkaarikustannusten lisäksi kaupallisten tuotteiden etuja sotilasjärjestelmiin nähden ovat ainakin käyttövalmiiden tuotteiden ja varaosien hyvä saatavuus, yleensä sotilasjärjestelmiä helpompi käytettävyys ja uusien tuotteiden nopea kehityssykli. Miehitettömän ilmailun yleistyessä Suomessa niin harraste- kuin ammattikäytössä kasvaa myös reserviläisten hallussa olevien laitteiden määrä, joten niiden hyödyntäminen on myös mahdollista poikkeusoloissa.

Miehittämättömän ilmailun merkitys sotilastoiminnassa on lisääntynyt viimeisen 15 vuoden aikana merkittävästi. Teknologian kehittymisen ja samalla komponenttien hintojen laskun seurauksena myös pienikokoisten, kauko-ohjattavien ilma-alusten käyttö on lisääntynyt kaupallisessa- ja harrastustoiminnassa. Etenkin multikoptereiden käyttö ilmakuvauksessa ja on yleistynyt. Markkinoilla onkin saatavilla tuhansien eurojen hintaluokassa verrattain suorituskykyisiä järjestelmiä, ja tuotteiden kehittymisen ja määrän kasvun voidaan olettaa jatkuvan edelleen.

Puolustusvoimilla on käytössään kaksi miehittämätöntä lennokkijärjestelmää, taktinen lennokkijärjestelmä RUAG Ranger sekä minilennokkijärjestelmä Orbiter. Järjestelmät ovat kaupallisia järjestelmiä suorituskykyisempiä, mutta niiden hankinta- ja ylläpitokustannukset ovat merkittävästi kaupallisia lennokeita suuremmat. Suurikokoinen järjestelmä vaatii lennättämistä ja ylläpitoa varten useita henkilöitä, jonka lisäksi järjestelmän operointi vaatii käyttäjiltä paljon ammattitaitoa. On siis perusteltua tutkia, voidaanko pienikokoisilla kaupallisilla lennokeilla saavuttaa edullisesti taistelulentä valvontaa täydentävää suorituskykyä etenkin ryhmä- ja joukkueetasolla.

Kaupallisten välineiden hyödyntämistä taistelulentä valvonnan apuvälineenä on tutkinut Maanpuolustuskorkeakoululla kapteeni Mika Kärämä esiupseerikurssin tutkielmassaan ”Kaupallisten tuotteiden käyttö taistelulentä valvontajärjestelminä”. Tutkielma keskittyy kuitenkin kamerajärjestelmiin ja erilaisiin kiinteästi asennettaviin antureihin ja sensoreihin, ja lennokeita käsitellään vain pintapuolisesti. [59] Kadetti Jalmari Paakala on tutkinut kandidaatin tutkielmassaan kaupallisten komponenttien käyttöä taktisen tiedustelulennokin rakentamisessa. Työn aihealue on tämän tutkimuksen kannalta kiinnostava, mutta kandidaatin työnä sen laajuus ei ole riittävä. [74]

Kadetti Jari Kananen on tutkinut Pro Gradu-tutkielmassaan miehittämättömien ilma-alusten kehitystä ja käyttöä viimeaikaisissa sodissa. Tutkimus käsittelee kuitenkin pääasiassa sotilaslennokkijärjestelmiä. Lisäksi työ on tehty vuonna 2007, jonka jälkeen on tapahtunut merkittävää kehitystä varsinkin kaupallisten järjestelmien osalta. [49]

Kaupallisten järjestelmien hyödyntämistä on siis tutkittu Maanpuolustuskorkeakoululla, mutta ei lennokeiden näkökulmasta. Lennokeiden käyttöä taas on tutkittu lähinnä sotilaskäyttöön suunniteltujen järjestelmien osalta. Suoranaisesti kaupallisten lennokeiden soveltumista sotilaskäyttöön ei siis ole vielä tutkittu Maanpuolustuskorkeakoulussa.

## 1.2. Tutkimustehtävä

Tutkimuksen päätutkimuskysymys on:

- Mitä suorituskykyjä kaupallisilla multikoptereilla on taistelulentän valvonnassa?

Päätutkimuskysymykseen pyritään vastaamaan kolmen apututkimuskysymyksen avulla, jotka ovat:

1. Mikä on nykyisten kaupallisten multikopterien rakenne ja suorituskyky eri hintaluokissa?
2. Millaisia sensoreita kaupallisiin multikoptereihin on saatavilla ja mikä on niiden suorituskyky?
3. Mikä on kaupallisten multikoptereiden käytettävyys Suomen olosuhteissa?

Tutkimuksen tavoitteena on perehdyttää lukija nykyisten kaupallisten multikoptereiden tekniikkaan ja suorituskykyyn. Multikoptereiden käyttö on lisääntynyt nopeasti harraste-, ammattilais- ja viranomaistoiminnassa. Silti niiden toimintaperiaatteista on vähän suomenkielistä tieteellistä tutkimusta. Yksi tämän tutkimuksen tavoite onkin tarjota lukijalle perusteet multikopterien teknisestä toiminnasta ja komponenteista.

Multikopterin suorituskyky taistelulentän valvonnassa perustuu sen kykyyn tuottaa havaintoja halutuista kohteista sensorillaan tai sensoreillaan. Sensorien suorituskyvyn lisäksi tähän kykyyn vaikuttavat multikopterialustan suorituskyky ja käytettävyys eri olosuhteissa. Kaupallisten multikopterien suorituskyvyn tarkastelu on jaettu alatutkimuskysymyksillä kolmeen osaan. Kaupallisten tuotteiden etuna sotilaskäyttöön suunniteltuihin tuotteisiin verrattuna on alhaisempi hinta. Suorituskyvyn tarkastelussa on aiheellista huomioida tuotteiden hintaluokka ja määrittää millaista suorituskykyä on saatavilla eri hintaluokissa.

## 1.3. Tutkimusote ja tutkimusmenetelmät

Tutkimus tehdään enimmäkseen kvalitatiivisella eli laadullisella tutkimusotteella, kuitenkin hyödyntäen kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusotetta sensorien suorituskyvyn laskennallisessa arvioimisessa. Kirjallisuustutkimuksella selvitetään kahdessa ensimmäisessä pääluvussa kaupallisten multikoptereiden ja niiden sensoreiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta taistelulentän valvontaan. Kirjallisuustutkimuksen avulla saatuja tuloksia käytetään perusteena kenttäkokeen suunnittelussa. Kenttäkokeen tarkoituksena on täydentää kirjallisuustutkimuksen avulla tehtyjä havaintoja.

Tutkimuksessa käytetään kirjallisuustutkimusta aihepiirin perehtymiseen ja tarvittavan tiedon etsintään. Kirjallisuustutkimuksella pyritään selventämään tutkijalle tutkimuksen aihepiiriä ja rajaamaan täsmällisemmin tutkittavaa ilmiötä. Kirjallisuustutkimuksella pyritään muodostaman tutkijalle riittävä asiantuntemus ja pohjatiedot, joita hyödynnetään tutkimuksen empiirisessä osuudessa. Kirjallisuustutkimuksella selvitetään multikopterien ja sensorien tekniset toimintaperiaatteet ja ominaisuudet. Tähän tarkoitukseen kirjallisuustutkimus soveltuu hyvin.

Sensorien suorituskykyä tutkitaan simuloinnilla. Jormakan mukaan simulointia voidaan verrata matemaattisten mallien numeeriseen ratkaisemiseen kuitenkin siten, että simuloimalla pyritään imitoimaan todellisen järjestelmän käyttäytymistä. Riittävän tarkalla järjestelmän mallintamisella voidaan saada riittävän tarkkoja tuloksia todellisesta suorituskyvystä. [60, s. 64] Simuloinnilla lasketaan havaintoetäisyyksiä erilaisille multikoptereiden sensoreille ja pyritään arvioimaan niiden suorituskykyä. Simulointi perustuu sensoreiden valmistajien ilmoittamiin ominaisuuksiin ja simulointi toteutetaan Microsoft Excel-ohjelmalla.

Tutkimuksen empiirisessä osuudessa toteutettiin kenttäkoe. Kaupallisten tuotteiden valmistajien ilmoittamissa teknisissä tiedoissa mainitaan usein tuotteen käyttöön liittyviä raja-arvoja esimerkiksi tuulen nopeuden tai lämpötilan osalta. Muita tärkeitä ilmoitettuja tietoja ovat maksimikantama, lentoaika ja sensorien ominaisuudet. Nämä valmistajan ilmoittamat arvot ovat usein suuntaa antavia, ja on valmistajan edun mukaista kaunistella kyseisiä arvoja. Suorittamalla kenttäkoe- tai kokeita rajatulla määrällä tuotteita, saadaan totuudenmukaisempi käsitys kyseisten tuotteiden suorituskyvystä kuin pelkästään valmistajan ilmoittamista arvoista.

Kenttäkokeet tulee yhteen sovittaa Maavoimien Tutkimuskeskuksen testaustoiminnan kanssa. On epätodennäköistä, että tutkimuksen puitteissa olisi resursseja järjestää täysin erillistä kenttäkoetta, joten on edullista toteuttaa halutut testit muun harjoitustoiminnan yhteydessä. Testiasetelma, käytettävä kalusto ja dokumentointi on suunniteltava tarkkaan ennen varsinaisia testejä. Lisäksi ennen testejä on perehdyttävä tarkkaan aiempaan testaustoimintaan ja testeistä saatuihin tuloksiin, jotta vältyttäisiin päällekkäisyyksiltä ja saataisiin parempi käsitys testien toteutustavasta [60, s. 128].

Termiä ”kenttäkoe” ei pidä sekoittaa laajoihin, usein aselajikoulujen toimeenpanemiin testeihin. Kyseessä on tutkimusmenetelmä, jossa haluttuja teknisiä ominaisuuksia todennetaan ja mitataan käytännön olosuhteissa. Tutkimuksen kannalta oleellisinta on aikaisempiin testituloksiin perehtyminen ja uusien testien mahdollisimman tarkka suunnittelu, jotta testeistä saadaan luotettavaa ja tutkimuksen kannalta hyödyllistä dataa.

#### 1.4. Käsitteet, näkökulmat ja rajaukset

Kaupallisilla tuotteilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa multikopterijärjestelmiä, joita ei ole suunniteltu pelkästään sotilaskäyttöön ja jotka ovat yksityishenkilön tai yrityksen vapaasti hankittavissa. Käsitteeseen sisällytetään myös vaativampaan ammattikäyttöön ja viranomaiskäyttöön suunniteltuja tuotteita. Ensisijaisesti sotilaskäyttöön suunnitellut, yleensä vähintään satojen tuhansien arvoiset järjestelmät rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

Suomalaisessa miehittämätöntä ilmailua koskevassa määräyksessä OPS M1-32 käytetään termiä miehittämätön ilma-alus kuvaamaan ilma-alusta, joka on suunniteltu toimimaan ilman ilma-aluksessa mukana olevaa ohjaajaa ja joka on tarkoitettu ammattikäyttöön. Lennokilla vuorostaan tarkoitetaan laitetta, jota käytetään harraste- ja urheilukäyttöön.[52] Jako on varsin keinotekoinen, koska sama tuote voi olla käyttötarkoituksesta riippuen sekä miehittämätön ilma-alus että lennoki. Sotilaallisessa toiminnassa käytetään termiä sotilaslentolaite, jolla tarkoitetaan ”miehittämättömään sotilasilmailuun käytettävää laitetta, joka saa nostovoimansa ilman reaktioista lukuun ottamatta ilman reaktiota maan tai veden pintaa vastaan”[53]. Sama kaupallinen tuote voidaan siis myös lukea sotilaslentolaitteeksi, mikäli sitä käytetään sotilaallisessa tarkoituksessa.

Sensori on maalin lähettämän tai siitä heijastuvan fyysisen suuren vastaanottoon ja tulkinnaan tarkoitettu laite [57, s. 187]. Sensorien toiminta voidaan jakaa maalin havaitsemisen, paikantamisen, tunnistamisen, yksilöinnin ja seurannan välillä [57, s. 188]. Tämän tutkimuksen kannalta kiinnostavimmat sensorien toiminnan vaiheet ovat maalin havaitseminen, tunnistaminen ja yksilöinti. Tässä tutkimuksessa käsitellään sellaisia sensoreita, jotka soveltuvat käytettäväksi edellä mainitun kokoluokan kaupallisissa lennokeissa. Tällöin esimerkiksi akustiset sensorit ja fyysisesti suurikokoiset tai painavat sensorit jäävät tarkastelun ulkopuolelle.



Suorituskyky on Puolustusvoimien määritelmärekisterin mukaan ”suorituskyky on henkilön, joukon, materiaalin tai järjestelmän kyky täyttää sen olemassaolon tarkoitus ja toiminnalle asetetut vaatimukset. Suorituskyky on yleensä useiden yksittäisten osatekijöiden (suorituskykytekijöiden) tulo. Suorituskykyä voidaan mitata kertomalla sen yksittäisiä osatekijöitä ja painottaen niitä osatekijöiden tärkeyden ja merkityksen mukaisesti”. [93]

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan otsikon mukaisesti kaupallisten pienien lennokkien ja kopterien suorituskykyä tiedustelulavettina. Tällöin suorituskyvyn tarkastelu tulee ulottaa lavetin ohella myös sensorin suorituskykyyn. Lavetin suorituskyky käsittää sen kyvyn kuljettaa eri olosuhteissa hyötykuorma eli sensori tai sensorit sellaiseen paikkaan, jossa sensorilla kyetään tekemään haluttuja havaintoja. Lavetin suorituskyvyn arvioinnin kriteereinä voidaan käyttää nopeutta, ohjattavuutta ja kantamaa, lentoaikaa, havaittavuutta ja robustisuutta. Sensorin suorituskyvyn kriteerejä ovat sensorin optiset ominaisuudet kuten suurennos, kuvien ja videoiden resoluutio, pimeätoimintakyky, kyky toimia huonoissa sää-olosuhteissa sekä kyky tallentaa sensordataa sekä lähettää sitä mahdollisimman hyvälaatuisena käyttäjälle tehtävän aikana.

Käytettävyys on Kosolan ja Solanteen mukaan järjestelmän valmiuden mittari, joka määrittää kyetäänkö järjestelmää käyttämään halutulla tavalla ja haluttuna aikana [57, s. 36]. Käytettävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa toimintaympäristön välitön ja välillinen vaikutus järjestelmään, operaattorin kyky käyttää järjestelmää tarkoituksenmukaisesti sekä ulkoisten uhkatekijöiden, kuten vihollisen toiminnan vaikutus järjestelmään [57, s. 37].

Tässä tutkimuksessa tutkitaan kolmannen alatutkimuskysymyksen mukaan kaupallisten lennokkien käytettävyyttä eri olosuhteissa. Käytettävyyden tarkastelu rajataan koskemaan ensisijaisesti toimintaympäristön vaikutuksiin järjestelmiä kohtaan. Kiinnostavia tutkimuskohteita ovat ainakin ilmankosteuden, sateen, lämpötilan ja tuuliolosuhteiden vaikutus järjestelmien käytettävyyteen. Lisäksi tutkitaan mahdollisuuksia toimia vihollisen elektronisen vaikuttamisen piirissä.

## 2. MULTIKOPTERIEN TEKNIikka

Ilmaa raskaammat lennokit voidaan jakaa karkeasti toimintaperiaatteidensa mukaan kiinteäsiipisiin lennokkeihin, yhden pääroottorin omaaviin helikoptereihin sekä multikoptereihin, joissa on 3 tai useampi roottori [82, s. 3]. Ennen 2000-luvun loppua miehittämätön ilmailu painottui enimmäkseen lennokkiharrastukseen ja sotilaskäyttöön. Kiinteäsiipiset lennokit ja helikopterit olivat käytetyimpiä lennokkityyppejä niin ilmakuvauksessa kuin harrastekäytössä. 2010-luvulla markkinoille on tullut suorituskykyisiä ja edullisia multikoptereita, jotka ovat helppokäyttöisyytensä ansiosta nousseet suosituimmaksi lennokkityypiksi etenkin ilmakuvauksessa. [82, s. 1]

Tässä pääluvussa selvitetään, mihin luonnontieteellisin ilmiöihin ja tekniikkoihin kaupallisten multikoptereiden toiminta perustuu. Tarkoituksena on perehdyttää lukija multikoptereiden tekniikkaan. Lisäksi tarkastellaan teknisestä näkökulmasta nykyisten lennokkityyppien keskeisimpiä käytön rajoitteita ja riskejä. Pääluvun tarkoituksena on vastata apututkimuskysymykseen 1: ”Mikä on nykyisten kaupallisten lennokkien rakenne ja suorituskyky?”

### 2.1. Lentotekniikka

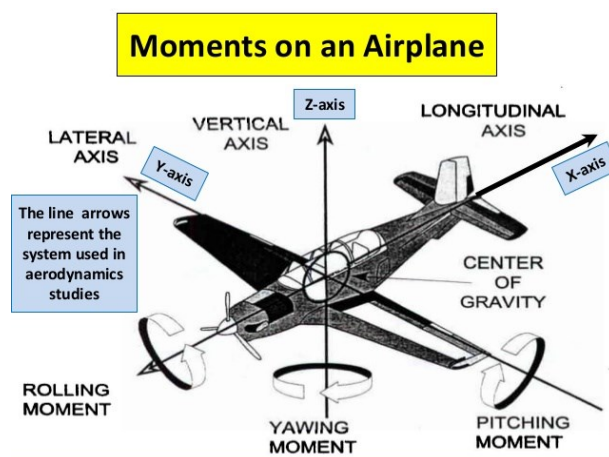
Kaikki miehitetyt ja miehittämättömät lentolaitteet toimivat koostaan ja käyttötarkoituksestaan riippumatta samojen fysikaalisten lainalaisuuksien puitteissa. Lentomekaniikan ja aerodynamiikan tuntemus on välttämätöntä lentolaitteiden suunnittelussa. Nykyaikaisten kaupallisten multikopterien menestyksenkäs lennättäminen ei välttämättä vaadi juurikaan lentotekniikan tuntemusta, koska lennokkien lennonhallinta on pitkälti automatisoitua. Suunniteltaessa lennokkien käyttöä on kuitenkin hyödyllistä tietää ainakin lentotekniikan perusteet, jotta ymmärtäisi mihin lennokkien lento ja suorituskykyarvot perustuvat.

Ilmaa raskaampiin lentolaitteisiin voidaan karkeasti todeta vaikuttavan neljä voimaa: painovoiman aiheuttama lentolaitteen paino, lentolaitteen siipien aikaansaama noste, lentosuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan vaikuttava ilmanvastus sekä moottorien lentosuuntaan tuottama työntövoima. Minkä tahansa lentolaitteen on ilmaan noustakseen kyettävä tuottamaan painoan suurempi noste. [44, s. 9]

Nostovoima syntyy kun siipi saa sen ohi virtaamaa ilmaa kääntymään alaspäin. Siipi siis kohdistaa ilmassaan voiman, joka saa sen kiihtymään alaspäin. Tällöin siipeen vaikuttaa vastakkaisuuntainen reaktiovoima, joka on siis lentolaitteen nostovoima. Nosteen voimakkuus riippuu siiven pinta-alasta, sen kohtauskulmasta ilmassaan nähden sekä ilma-massan liikenopeudesta siipeen nähden. Myös lentokorkeuden mukaan määräytyvä ilman tiheys vaikuttaa siiven synnyttämään nosteeseen.[44, s. 11–12]

Kiinteäsiipisissä lentolaitteissa nosteen saamiseen tarvittava ilman virtausnopeus syntyy itse lentolaitteen liikkeestä, kun taas pyöriväsiipisissä lennokeissa roottorin tai roottoreiden pyörivät lavat toimivat siipinä, jotka työntävät ilmaa suoraan alaspäin ja aiheuttavat tällöin koneen nosteen. Käytettäessä yhtä pääroottoria syntyy väistämättä sivuvaikutuksena suuntamomentti, joka pyrkii kääntämään konetta vastakkaiseen suuntaan roottorin pyörimissuuntaan nähden. Koneen pitämiseksi vakaassa asennossa on siis joko käytettävä kääntömomentin kumoavaa roottoria tai useampaa vastakkaisiin suuntiin pyörivää pääroottoria. [44, s. 185] Multikoptereissa puolestaan useamman vastakkaisiin suuntiin pyörivän roottorin kääntömomentit kumoavat toisensa jolloin saavutetaan vakaa lento.

Nosteen ja vastuksen ohella lentolaitteeseen kohdistuu momentteja, jotka vaikuttavat koneen asentoon. Momentit voidaan sitoa lentolaitteen massakeskiöstä lähtevistä kolmesta akselista muodostettuun koordinaatistoon. [44, s. 19]



Kuva 1: Aerodynaamiset momentit [71]

Kuvassa esitetyn x-akselin ympäri vaikuttava kallistusmomentti (rolling moment) pyrkii koneen kallistamiseen. Y-akselin ympäri vaikuttava pituusmomentti (pitching moment) taas pyrkii nostamaan tai laskemaan lentolaitteen nokkaa. Z-akselin ympäri vaikuttava suuntamomentti (yawing moment) vuorostaan pyrkii kääntämään lentolaitetta sivuttain. [44, s. 19]

Aerodynaamisten momentit ovat ratkaisevassa asemassa kun puhutaan lentolaitteen vakavuudesta ja ohjattavuudesta. Momenttien summien ollessa nolla lentolaite on tasapainotilassa, ja lentolaitteen ohjaaminen perustuu tasapainotilan muuttamiseen halutulla tavalla. Kiinteäsiipisissä lennokeissa tämä momenttien muuttaminen perustuu pyrstössä ja siivissä olevien ohjauspintojen kääntelemiseen [44, s. 20]. Helikopterissa momenttien muuttaminen perustuu pääroottorin lapojen kohtauskulman muuttamiseen, ja multikoptereissa vuorostaan roottorien keskinäisten kulmanopeuksien suhteiden muuttamiseen [44, s. 186][82, s. 6]

Multikopteri on aerodynaamisten momenttien hallinnan kannalta yksinkertainen lennokkityyppi, sillä kaikkia aerodynaamisia momenteja pystytään tuottamaan pelkästään roottorien keskinäisiä kulmanopeuksia varioimalla. Tämä selittää osaltaan lennokkityypin kasvanutta suosiota.

## 2.2. Multikopterin rakenne

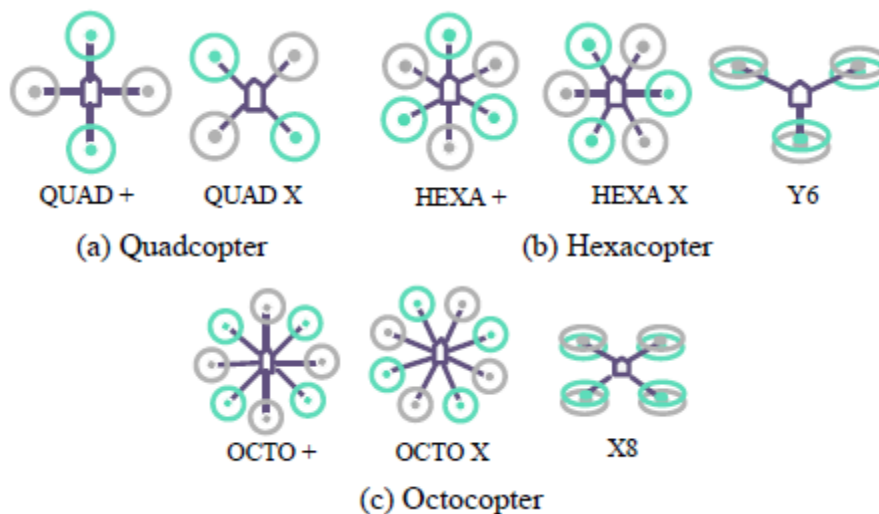
Multikopteria voidaan pitää yhden tyyppisenä helikopterina, jossa on kolme tai useampi roottori. Multikoptereiden ainoat ohjaussyötteen ovat roottorien kulmanopeudet, joita säätämällä voidaan muokata nosteen määrää ja multikopterin liikesuuntaa. Roottoreiden synnyttämät vääntömomentit kumoutuvat toisiinsa nähden, jolloin helikopterista poiketen erilliselle pyrstöroottorille ei ole tarvetta. [82, s. 3]

Multikopterin yksinkertainen rakenne mahdollistaa helpon ohjattavuuden ja hyvän luotettavuuden. Helikopteriin verrattuna multikopterissa ei ole monimutkaisia pääroottorin kulman säätelyyn tarvittavia mekanismeja. Multikopterin heikkous muihin lennokkityyppeihin nähden on kuitenkin heikompi hyötykuorma ja toiminta-aika. [82, s. 3]

Multikopteri skaalautuu huonosti suurempiin kokoihin, sillä sen ohjaaminen perustuu roottoreiden kulmanopeuksien nopeisiin muutoksiin. Pidemmällä roottorilla on suurempi dynaaminen vaste, joka vaikeuttaa kulmanopeuden nopeaa muuttamista. Lisäksi pidempi roottori väpättää pyörimisen aikana voimakkaammin edestakaisin pyörimissuunnan vastaisesti, mikä voi aiheuttaa moottoria rasittavia voimia. Näitä voimia voidaan kompensoida roottorin lapojen kiinnityskohtaan asennettavilla sarananivelillä, mutta näin lisätään myös modifioidun multikopterin monimutkaisuutta. Roottorien kokoa ei siis voida lisätä merkittävästi ongelmitta, mutta lisäosetta kyetään tuottamaan lisäämällä roottorien määrää [82, s. 12-13]

Multikoptereita on saatavilla useissa eri konfiguraatioissa. Konfiguraatiot vaihtelevat roottorien määrän sekä sijainnin osalta. Yleensä multikoptereissa on parillinen määrä roottoreita, koska tällöin puolet roottoreista voi pyöriä toiseen suuntaan ja puolet vastakkaiseen suuntaan. Tällöin roottorien aiheuttamat suuntamomentit kumoavat toisensa. Roottorien lisääminen ei juuri muuta multikopterin toimintaperiaatetta tai ohjattavuutta. Roottoreiden lisääntyvä määrä kasvattaa kokonaisnostetta, mutta nostaa myös samalla tarvittavien moottoreiden, ESC-piirien ja tarvittavien akkujen määrää ja samalla järjestelmän kokonaispainoa ja tietysti hintaa. Yleisimpiä kaupallisia multikoptereita ovat neliroottoriset multikopterit eli nelikopterit [82, s. 3].

Parittomalla määrällä varustettu multikopteri on myös teknisesti mahdollista toteuttaa. Esimerkiksi kolmiroottorisia multikoptereita on rakennettu, mutta tämä vaatii erillisen, suuntamomenttia säätelevän servomoottorin asentamista kolmanteen roottoriin tukivarteen. Näin saadaan kumottua useamman samaan suuntaan pyörivän roottorin aiheuttama suuntamomentin epätasapaino. Servon lisääminen tekee tosin järjestelmästä monimutkaisemman ja helpommin vikaantuvan. [9] Kolmiroottorisia multikoptereita olekaan juuri saatavilla kaupallisilla markkinoilla.



Kuva 2: Erilaisia multikoptereiden konfiguraatioita [81]

Yleisimmissä multikopterimalleissa yhden tukivarren päähän on asennettu yksi roottori. Samaan tukivarteeseen voidaan asentaa myös kaksi roottoria, jolloin saavutetaan lisää nostetta. Tällöin ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että roottorien tuottamat ilmavirtaukset häiritsevät toisiaan ja yksittäisen propellin tuottama noste on pienempi kuin perinteisissä malleissa. [82, s. 60].

Multikopterin roottorit voivat olla asennettu tasoon verrattuna horisontaalisesti tai kulmaan. Pääosassa multikoptereista roottorit on asennettu horisontaalisesti, jolloin kopterin ollessa tasisella pinnalla roottorien lavat osoittavat pinnan suuntaisesti. Tällöin roottorien tuottama noste on aina kohtisuorassa multikopterin runkoon nähden, joten kopterin on muutettava pituuskulmaansa (pitch angle) saavuttaakseen horisontaalisen liikkeen. Roottorien asentaminen tällä tavalla on yksinkertaista ja lennonhallinnan kannalta helpompaa, mutta toisaalta haluttaessa käyttää kameraa eteenpäin suuntautuvan lennon aikana on kameran vakauttavan gimbaalin kyettävä kääntämään kameraa korkeussuunnassa. [82, s. 60–61]

Toinen vaihtoehto roottorien asennukselle on asentaa ne kopterin tasoon nähden kulmaan, jolloin noste suuntautuu kopteriin nähden yläviistoon ja horisontaalinen liike on mahdollista ilman, että kopteri kallistuu [82, s. 61]. Asennustapa on suosittu muun muassa kilpalentämiseen tarkoitetuissa multikoptereissa, joissa nopean lennon aikana kopterin liiallinen kallistuminen pituussuunnassa ei ole haluttua [63].

Pääosassa multikoptereita roottorit osoittavat ylöspäin. Tällöin roottorit kohdistavat multikopteriin vetävän voiman. Roottorit on myös mahdollista asentaa osoittamaan alaspäin, jolloin ne työntävät kopteria ylöspäin. Roottorien rakentaminen osoittamaan ylöspäin mahdollistaa yleensä multikopterin alle rakennetun kameran paremman näkökentän ja rakenne suojaa myös hajoamisherkkiä propelleja multikopterin laskeutuessa. Alaspäin osoittavat roottorit voivat olla hyödyllisiä esimerkiksi haluttaessa suojata kopterin sähkömoottoreita sateelta, mutta multikoptereiden yleisimmän käyttötarkoituksen ollessa ilmakehuus on roottoreiden asentaminen osoittamaan ylöspäin yleisempää. [82, s. 61]



Kuva 3 & 4: DJI Mavic ja Ehang Ghost, ensimmäisessä roottorit asennettu osoittamaan ylöspäin ja toisessa alaspäin [68] [34]

Yllä on kuvattu erilaisia rakennetyyppejä multikoptereille. Sotilas- ja viranomaiskäyttöä ajatellen kaikki parillisilla roottorimäärillä varustetut multikopterit soveltuvat yksinkertaisuutensa puolesta hyvin, ja haluttu hyötykuorman paino määrittää lopulta tarvittavan roottorimäärän. Kolmiroottorinen multikopteri ei sovellu monimutkaisuutensa ja pienemmän hyötykuormansa takia viranomaiskäyttöön yhtä hyvin.

Poikkeavista roottorien asennustavoista- ja määristä huolimatta kaikkien multikopterien rakenne ja komponentit ovat suunnilleen samanlaisia. Multikopterin komponentit voidaan jakaa karkeasti kolmeen toiminnalliseen kokonaisuuteen: runkoon, propulsiojärjestelmään sekä ohjausjärjestelmään [82, s. 33–34].

### 2.3. Runko

Multikopterin tuottama kokonaisnoste on pieni verrattuna muihin lennokkityyppeihin. Nosteen määrä vaikuttaa suoraan käytössä olevaan hyötykuormaan, joten multikoptereita suunniteltaessa pyritään minimoimaan komponenttien paino. Rungon materiaalia valittaessa pyritäänkin valitsemaan mahdollisimman kevyt materiaali, jonka lujuusominaisuudet ovat kuitenkin riittävät.

Multikopterin rungon (airframe) voidaan todeta sisältävän varsinaisen rungon (fuselage) lisäksi myös laskutelineet sekä mahdolliset roottorikanavat (ducts) [82, s.34]. Varsinaisen rungon tehtävänä on kannatella multikopterin muita osia ja suojata rungon sisään asennettuja herkempiä komponentteja kuten autopilottia ja GPS-vastaanotinta.

Laskutelineiden tehtävänä on luonnollisesti kannatella riittävästi maan yläpuolella kopterin liikuvia osia, kuten kameraa ja roottoreita sekä suojata niitä nousujen ja laskeutumisten yhteydessä. Laskutelineet eivät yleensä ole kovin raskarakenteisia, sillä niiden on oltava kevyitä ja tarvittaessa rikkouduttava liian nopeassa laskeutumisessa, jolloin nopean pysähtymisen aiheuttaman iskun aiheuttama voima rikkoo laskutelineet eikä kohdistu kopterin hajoamisherkempiin komponentteihin. [82, s. 36]

Roottorikanavat suojaavat roottoreita ja lisäksi ne lisäävät roottoreiden tehokkuutta ja nostetta. Nosteen lisäys perustuu siihen, että Bernoullin periaatteen mukaan ilman virratessa nopeammin kanavan sisäpuolella kuin ulkopuolella, on myös ilmanpaine alhaisempi kanavan sisäpuolella. Näin saavutetaan suurempi noste kuin ilman kanavien käyttöä. Kanaviin tarvittava materiaali kuitenkin painaa ja siten vähentää multikopterin toiminta-aikaa. [82, s. 37] Roottorikanavia ei juurikaan löydy yleisimmistä kaupallisista multikoptereista, mutta erillisiä propellisuojia on saatavilla.



Kuva 5: Quadrokopterin runko roottorikanavilla varustettuna [85]

Runkomateriaaleissa haluttuja ominaisuuksia ovat pieni tiheys sekä suuri jäykkyys ja kestävyys. Materiaalin tulisi olla myös mahdollisimman edullista. Kaikkia haluttuja ominaisuuksia on käytännössä mahdotonta yhdistää samassa materiaalissa. Multikoptereiden tuottaman nosteen ollessa rajallinen korostuu materiaalin keveys, jolloin soveltuvia materiaaleja ovat lähinnä hiilikuitu, lasikuitu ja erilaiset muovimateriaalit kuten polykarbonaatti ja akryyli. Myös alumiinia ja erilaisia metalliseoksia käytetään. [82, s. 35-36]

Kalliimmissa tuotteissa suositaan hiilikuitua sen tiheyteensä nähden suuren elastisen kertoimen eli käytännössä jäykkyyden sekä vetolujuuden takia [82, s. 36]. Hiilikuitua käytetään niin rungoissa, roottorien tukivarsissa, laskutelineissa kuin propelleissakin ja se on ominaisuuksiltaan hyvin soveltuva käytettäväksi multikoptereissa. Hiilikuitu soveltuu jäykkyytensä takia varsinkin propellien ja erilaisten tukivarsien materiaaliksi [82, s. 35]. Käyttöä rajoittavat hiilikuidun valmistamisen vaikeus ja siten korkea hinta.



Kuva 6: DJI:n Matrice 200, jossa hiilikuituiset laskutelineet ja roottorien tukivarret [12]



Hiilikuidun lisäksi multikoptereiden runkomateriaalina käytetään muun muassa alumiinia, erilaisia muoveja kuten akryyliä ja myös lasikuitua [82, s. 36]. Muovin valmistaminen oikeaan muotoon ja hinta ovat alhaisia, mutta sen jäykkyys ja murtolujuus ovat selvästi hiilikuitua huonompia. Koptereiden rungot voivat myös koostua useammasta eri materiaalista. Kevyempiä muovirakenteita on voitu vahvistaa esimerkiksi magnesiumilla, kuten DJI:n Phantom 4-multikopterin rungossa [13].

Sotilaskäyttöä ajatellen erilaiset runkomateriaalit eivät keveytensä takia ole erityisen taistelunkestäviä. Hiilikuidun, erilaisten muovimateriaalien tai alumiinin ei voida olettaa säilyvän ehjänä, mikäli multikopteri törmää johonkin tai putoaa hallitsemattomasti maahan. Suoranaisen hajoamisen lisäksi tällaisissa onnettomuuksissa materiaaliin voi tulla pieniä, mahdollisesti havaitsemattomissa olevia halkeamia jotka saattavat lennättämisen aikana aiheuttaa ei-haluttua toimintaa. Materiaalin huono kestävyys on siis otettava huomioon multikoptereiden käsittelyssä, kuljetuksessa ja lennättämisessä.

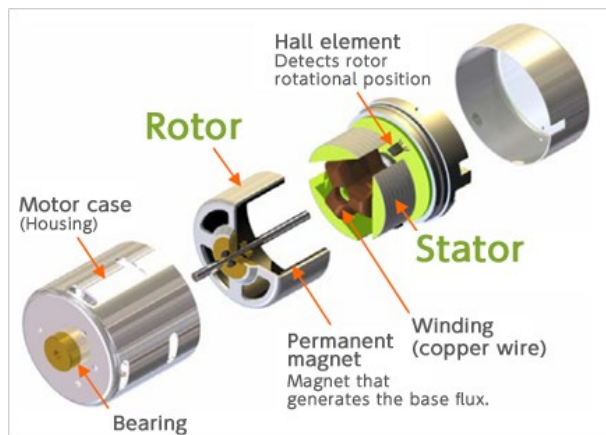
## 2.4. Propulsiojärjestelmät

Propulsiojärjestelmä sisältää kaikki ne komponentit, joiden avulla multikopterin roottoreita pyöritetään ja siten tuotetaan lentoon tarvittava noste. Järjestelmään kuuluvat varsinaiset roottorit eli propellit, moottorit, ESC-piirit (electronic speed controller) eli moottorien sähköiset nopeudensäätimet sekä akku. Näiden komponenttien perusteella määrittyvät pitkälti kopterin lento-ominaisuudet, eli lentonopeus ja liikehtimiskyky, hyötykuorma sekä lentoaika. [82, s. 37]

Multikopterin propellien tehtävänä on luonnollisesti tuottaa riittävä noste multikopterin lennättämiseen sekä mahdollistaa multikopterin liikehdintä. Propellien valmistusmateriaaleja ovat muovin ohella hiilikuitu ja puu. Muoviset propellit ovat edullisia ja helppoja valmistaa, mutta ne värähtelevät materiaalin taipuisuuden takia pyöriessään ja aiheuttavat paljon melua. Hiilikuituiset propellit sen sijaan ovat kevyitä ja jäykkiä, ja ovat siten tehokkaampia ja hiljaisempia muovipropelleihin verrattuna. Haittapuolena hiilikuitupropelleissa on korkeampi hinta sekä rikkoutuneen propellin terävyyden käyttäjälle aiheuttama vaara. [82, s. 37–39]

Kaupalliset tuotteet sisältävät yleensä valmistajan kyseiselle mallille suunnittelemat propellit, jotka on optimoitu kopterin ominaisuuksiin ja moottoreihin sopivaksi. Edullisemmat tuotteet myydään usein muovipropelleilla varustettuna, mutta niihin on saatavilla lisävarusteena hiilikuituiset propellit. Hiilikuitupropellien käyttö on perusteltua, koska niillä saadaan verrattain edullisesti tehostettua multikopterin lento-ominaisuuksia ja vähentämään lentämisestä aiheutuvaa melua. Pienempi melutaso on tärkeää sotilas- ja viranomaistoiminnassa, mikäli multikopteria ei haluta havaittavan lennon aikana.

Moottorin tehtävänä multikopterissa on muuntaa akkuun varastoitu sähkövirta mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi. Tähän tarkoitukseen soveltuvat hyvin harjattomat tasavirtamoottorit, joiden toiminta perustuu moottorin pyörivässä osassa oleviin pysyviin magneetteihin ja moottorin staattiseen osaan asennettuihin, eri vaiheissa kytkettäviin käämeihin. Harjallisiin moottoreihin verrattuna harjattomien moottoreiden edut ovat pienempi melutaso sekä suurempi vääntö ja tehokkuus. [43, s. 23] Harjattoman tasavirtamoottorin pyörivä osa voi olla joko moottorin keskellä tai ulkoreunalla, ja multikoptereissa käytetään yleisesti jälkeen mainittua (outer rotor tai outrunner) niiden paremman väännön ja tasaisemman nopeuden takia [82, s. 40]



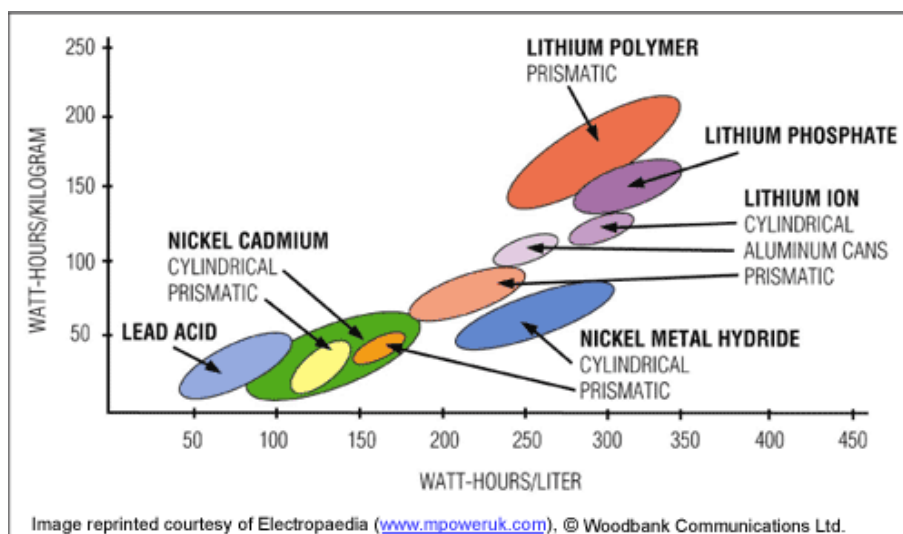
Kuva 7: Harjaton tasavirtamoottori, jossa pyörivä komponentti moottorin ulkoreunalla [8]

Moottorin ja käytettävän propellin tulee soveltua käytettäväksi keskenään ja niiden on kyettävä tuottamaan tarvittava noste multikopterin massaansa ja haluttuun hyötykuormaan nähden [82, s. 37]. Kaupallisissa, valmiita tuotteita hankittaessa valmistajat ovat lähes aina valinneet käytettävät moottorit ja laitteeseen saatavilla olevat propellit siten, että ne soveltuvat hyvin käytettäväksi yhteen. Varaosien hankinnassa tulee siis suosia valmistajan laitteeseen suosittelemia moottoreita ja propelleja.

Multikopterin autopilotti ei yleensä kykene tuottamaan riittävää jännitettä suoraan moottoreille asti, joten autopilotin ja moottorin välillä käytetään ESC-piirejä eli moottorin sähköisen pyörimisnopeuden säätimiä. Harjattomia tasavirtamoottoreita käyttävässä multikopterissa ESC-piiri saa komentoja autopilotilta, joiden perusteella se muuntaa akusta saatavan tasavirran kolmivaiheiseksi. ESC-piirejä tulee käyttää niiden kanssa yhteensopivien moottorien kanssa, jotta vältetään moottorien pysähtymistä kesken lennon. [82, s. 43–45] Valmiissa tuotteissa ESC-piirien ja moottoreiden yhteensopivuus on lähtökohtaisesti huomioitu valmistajan toimesta.

Käytännössä kaikki nykyiset kaupalliset multikopterit ovat sähköllä toimivia, ja saavat käyttövoimansa multikopteriin asennetusta akusta tai akuista. Polttomoottorin käyttö multiroottorilennokeissa olisi hankalaa useasta syystä. Polttomoottori ja sen tarvitsema polttoaine ovat painavia, ja usean roottorin pyörittämiseksi pitäisi joko olla käytössä useampia moottoreita tai jonkinlainen voimansiirtojärjestelmä, mikä olisi painonhallinnan kannalta haastavaa. Polttomoottorin käyttö soveltuu paremmin perinteisiin lennokkeihin, joissa moottorin tulee pyörittää ainoastaan yhtä propellia.

Yksi nykyisten multikoptereiden pullonkauloista on akuteknologia ja sen aiheuttamat rajoitteet koptereiden maksimaalisille toiminta-ajoille. Sähkömoottoreiden, autopilotin sekä erilaisten sensoreiden käyttö lennon aikana vaatii paljon tehoa. Samalla akun paino ei saa olla liian suuri, jotta lento-ominaisuudet säilytetään. Akun kyky varastoida energiaa painoonsa nähden onkin tärkein kriteeri, kun valitaan multikopterin akku. Yleisin akkutyyppejä nykyisissä kaupallisissa multikoptereissa on litium-polymeeriakku juuri hyvän kapasiteetti-painosuhteensa takia. [82, s. 45]



Kuva 8: Eri akkutyyppeiden tehosuhteita, W/kg ja W/l [64]

Multikopterin akkujen ominaisuuksista huomionarvoisimpia ovat jännite ja kapasiteetti. Yhden litium-polymeeriakkuyksikön nimellinen jännite on 3,7 voltia. Näin alhainen jännite ei riitä kuin aivan pienimpien multikoptereiden tarpeisiin, joten useimmiten akuissa on kytketty sarjaan useampia akkuyksiköjä tarpeeksi suuren jännitteen saavuttamiseksi. [82, s. 45–46] Esimerkiksi kiinalaisen yrityksen DJI:n Phantom 4-multikopterin akun nimellinen jännite on 15.2 voltia, joten akun valmistamiseen on käytetty neljää sarjaan kytkettyä litium-polymeeriakku-yksikköä [24].

Akun kapasiteetti ilmaisee akun kyvyn varastoida sähkövarausta. Kapasiteetin yksikkö on ampeeritunti, ja multikopterien akkujen kapasiteetit ilmoitetaan yleensä milliampeeritunteina (mAh). [82, s. 46] Akun kapasiteetin kasvattaminen käytännössä lisää aina akun painoa, ja tästä syystä multikoptereiden akuissa kapasiteetin lisäämisestä saatava hyöty häviää lisääntyvän painon takia [62]. Multikopterin toiminta-aikaa ei siis voida lisätä loputtomiin käyttämällä varavampia ja painavampia akkuja.

Akun kapasiteetin purkautuessa myös akusta saatava jännite laskee. Jännitteen lasku on purkautumisen aikana melko suorassa suhteessa jäljellä olevaan kapasiteettiin, mutta jännite saattaa laskea nopeasti kapasiteetin ollessa alhainen [82, s. 46] Liian matala jännite ei välttämättä riitä pyörittämään moottoreita riittävän nopeasti, mikä saattaa johtaa multikopterin putoamiseen. Lämpötila vaikuttaa oleellisesti litium-polymeeriakkujen toimintaan. Liian kylmässä lämpötilassa akun kemiallinen toiminta häiriintyy ja sen sisäinen resistanssi kasvaa. Kylmä akku ei välttämättä tuota riittävää jännitettä lento-oloihin. Esimerkiksi DJI:n uusimmissa tuotteissa kopteri kykenee mittaamaan akun lämpötilan ja estämään lento-oloihin, jos akku on liian kylmä [14].

Akkujen varaustilaa tulee tarkkailla lennättämisen aikana ja multikopterin tulisi laskeutua hyvissä ajoin ennen akun varaustilan laskemista liian alhaiseksi. Esimerkiksi DJI:n tuotteissa käytettävät akut kykenevät arvioimaan jännitteen perusteella jäljellä olevan lentoajan ja multikopteri kykenee tämän perusteella varoittamaan käyttäjää, kun akun varaustilanne on kriittinen [25]. Lisäksi liian alhaiseksi laskenut jännite saattaa vahingoittaa litium-polymeeriakkuja, jolloin niiden kapasiteetti laskee pysyvästi tai ne saattavat olla kokonaan käyttökelvottomia [62] [82, s. 47]. Akun ominaisuudet tuntemalla ja järkevällä toiminnalla käyttäjä kykenee välttämään mahdolliset lennätysten aikaiset onnettomuudet sekä lisäämään akkujen käyttöikä.

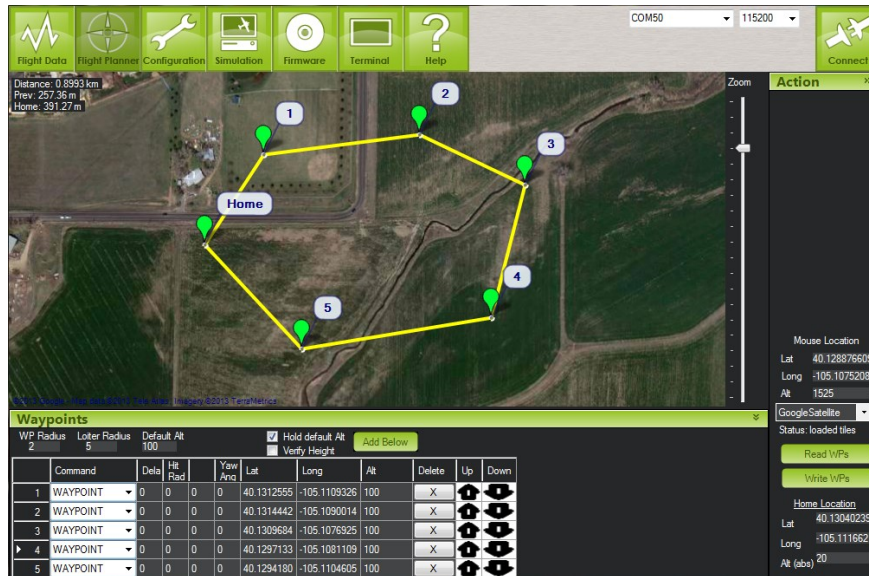
Propulsiojärjestelmä koostuu siis useista komponenteista, joiden tulee olla keskenään yhteensopivia ja kyettävä tuottamaan multikopterin massaansa ja haluttuun hyötykuormaan nähden riittävä noste. Nykyisten multikopterien propulsiojärjestelmät kykenevät varsin suorituskykyiseen lentoon ja suhteellisen suuretkin lentolaitteet kuten DJI:n Inspire 2 kykenevät jo lähes 100 km/h nopeuksiin [19]. Hyötykuormat riittävät nykyisissä tuotteissa jopa usean suorituskykyisen sensorin asentamiseen samaan multikopteriin, ja esimerkiksi DJI:n Matrice 200-multikopteriin kyetään asentamaan kaksi suorituskykyistä kameraa [20]. Suurin ongelma propulsiojärjestelmien osalta on akkujen rajallinen kapasiteetti, joka rajoittaa lentoaikoja. Nykyisillä litium-polymeriakuilla suorituskykyä ei voida enää merkittävästi lisätä johtuen multikoptereiden painorajoituksista, joten lentoajat rajoittuvat tuotteesta ja hyötykuormasta riippuen noin 20–30 minuuttiin.

## 2.5. Ohjausjärjestelmät

Yksi syy kaupallisten multikopterien lisääntyvään suosioon on niiden helppo lennätettävyyden verrattuna vanhempiin harrastelennokkeihin. Multikopterin lennättäminen ei vaadi juurikaan aerodynaamisten momenttien, nosteen tai muiden lentoon vaikuttavien tekijöiden tuntemusta, vaan kopterin ohjaaminen nojaa pitkälti automatiikkaan. Multikopterin ohjaaminen manuaalisesti roottoreiden kulmanopeuksia muuttamalla olisi käytännössä mahdotonta, joten multikopterin ohjausjärjestelmässä löytyy aina ohjaimen ja vastaanottimen lisäksi autopilotti sekä sen käyttöön vaadittavat sensorit. Lisäksi ohjausjärjestelmään kuuluu yleensä ohjauspääte ja järjestelmä telemetriatietojen välittämiseen [82, s. 34, 50]

Multikopterin tärkein komponentti on autopilotti (autopilot tai flight controller), jonka tehtävänä on muuntaa kauko-ohjaimelta tulevat komennot sekä erilaisista sensoreista koostettu data ja muuntaa ne komennoiksi moottorien pyörimisnopeutta sääteleville ESC-piireille. Autopilotti koostuu fyysisestä laitteistosta ja ohjelmistosta. Multikoptereihin on saatavilla useita avoimen lähteen autopilotteja, mutta kaupalliset valmistajat käyttävät yleensä omia autopilottejaan myymissään tuotteissa. [82, s. 50]

Autopilotteja voidaan useimmissa tuotteissa käyttää joko puoliautomaattisessa tai täysautomaattisessa moodissa. Puoliautomaattisessa moodissa autopilotti vastaanottaa komentoja lennättäjältä kauko-ohjaimen välityksellä ja pyrkii sensoridatan avustamana liikuttamaan multikopteria haluttuun suuntaan. Täysautomaattisessa moodissa kopteri lentää autonomisesti jonkin ennalta ohjelmoidun reittisuunnitelman perusteella. [82, s. 50] Yksi yleisimmistä avoimen lähteen autopiloteista on ArduPilotin APM, joka kykenee toteuttamaan sille suunniteltuja tehtäviä autonomisesti [33, s. 14]



Kuva 9: ArduPilotin APM-autopilotin Mission Planner-sovellus, jossa multikopterille voidaan suunnitella reittipisteisiin perustuva lentosuunnitelma [5]

Autopilotin laitteistoon kuuluu varsinainen piirilevy, jossa ajetaan lennonhallintaan tarvittavaa ohjelmistoa. Lisäksi autopilotti tarvitsee joukon sensoreita, joiden avulla se määrittää kopterin paikan, vauhdin, kiihtyvyyden, suunnan ja asennon. Nykyisissä multikoptereissa on yleensä tätä tarkoitusta varten GPS/GLONASS-vastaanotin, inertianmittausyksikkö (IMU) joka koostuu gyroskoopista, kiihtyvyyssensorista ja sähköisestä kompassista sekä korkeudentunnistin, joka voi koostua paineen muutosta mittaavan barometrin lisäksi visuaalisista ja ultraäänisensoreista. [82, s. 50]

Sensorien tuottama data on edellytys multikopterin vakaalle ja hallitulle lennättämiselle, joten sensoreihin vaikuttavat häiriötekijät on otettava lennätystoiminnassa huomioon. Rakennetuilla alueilla korkeat rakennukset voivat estää riittävän GPS-sijainnin saannin. Rakennusten välissä lentäminen saattaa aiheuttaa myös GPS-signaalin monitie-etenemistä vastaanottimeen ja siten signaalin vaimenemista. Suurikokoiset metallirakenteet vuorostaan saattavat häiritä kompassia. Ongelmaksi saattaa muodostua esimerkiksi lentoonlähtö laivan kannelta tai rakennuksen katolta, jossa on paljon metallirakenteita. Myös ajoneuvot, kontit ja muut suuret metalliset rakenteet saattavat muodostua ongelmaksi. [10]

Nykyisten multikopterien autopiloteissa on jo jonkin verran autonomisuutta eli ne kykenevät suorittamaan tiettyjä toimintoja itsenäisesti. Täydestä autonomiasta ei voida puhua, koska järjestelmät suorittavat yleensä ennalta suunniteltuja tai määrämuotoisia tehtäviä. Hyvä esimerkki tämän kaltaisesta toiminnosta on useammasta kaupallisesta lennokista löytyvä Return To Home (RTH)-toiminto, jonka avulla lennokka palaa automaattisesti lähtöpisteeseensä. Toiminto perustuu nousupaikan GPS-koordinaattien tallentamiseen sekä GPS-signaalin puuttuessa mahdollisesti inertiapaikannukseen. Toiminto voidaan yleensä aktivoida manuaalisesti tai se voi aktivoitua itsestään lennokin menettäessä ohjaussignaalin. Toimintoa käytettäessä tulee ottaa huomioon maastoesteet, koska kopteri lentää yleensä kohti lähtöpistettä lyhintä mahdollista reittiä. Useassa autopilotissa, kuten Ardupilotin APM:ssä, on mahdollisuus määrittää korkeus, johon multikopteri nousee ennen lentämistään kohti lähtöpaikkaansa [86]. Tällöin vähennetään puihin tai muihin korkeisiin esteisiin törmäämisen vaaraa.

Muita autopilottien autonomisuutta muistuttavia toimintoja ovat esimerkiksi erilaiset optisiin ja ultraäänisensoreihin perustuvat törmäyksenesto-ominaisuudet, joita löytyy jo uusimmista kaupallisista lennokeista kuten DJI:n Phantom 4-multikopterista [36]. Tällaisen järjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa lennätys ahtaissa paikoissa ja sisätiloissa ilman, että törmäyksen riski on liian suuri. Järjestelmät perustuvat yleensä sekä optisiin että ultraäänisensoreihin, jotka varoittavat autopilottia lähellä olevista maastoesteistä, seinistä ja vastaavista. Tällöin autopilotti pyrkii automaattisesti muuttamaan lennokin liikesuuntaa siten, että lennokka ei törmää esteeseen. Optisten ja ultraäänisensorien käyttö parantaa myös multikopterin kykyä toimia paikoissa, jossa se ei saa GPS-signaalia. Optisten sensorit tunnistavat parhaiten riittävän hyvin valaistuja selkeitä pintoja, ja esimerkiksi DJI:n Inspire 2-multikopterin ominaisuuksissa ilmoitetaan ominaisuuden vaativan yli 15 luxin valaistuksen [19]. Tutkimuksissa on käytetty myös kolmiulotteisesti skannaavia lasereita ympäristön kartoittamiseen, mutta tekniikan ongelmana on laserskannereiden paino ja virrankulutus [6].

Sensorien tuottaman datan lisäksi autopilotti tarvitsee komentoja lennättäjältä kauko-ohjauksen välityksellä. Myös täysiautomaattisessa toimintamoodissa lennättäjän on kyettävä ottamaan kopteri haltuunsa milloin tahansa lennon aikana. Tähän tarkoitukseen lennättäjä käyttää kauko-ohjainta, joka välittää komennot multikopterissa olevan vastaanottimen välityksellä autopilotille. [33, s. 13] [82, s. 47–48] Useisiin kaupallisiin multikoptereihin kuuluu juuri sen kanssa käytettäväksi tarkoitettu kauko-ohjain, mutta koptereiden kanssa on mahdollista käyttää myös kolmannen osapuolen kauko-ohjaimia mikäli autopilotti, vastaanotin ja kauko-ohjain ovat yhteensopivia keskenään.



Kuva 10: DJI Phantom 4-multikopterin kauko-ohjain, jossa pidike älylaitteelle [84]

Multikoptereiden ohjaaminen on mahdollista ainoastaan kahden ohjaussauvan avulla. Yleensä vasemmalla ohjaussauvalla säädetään moottorien pyörimisnopeutta ja siten korkeutta sekä kopterin suuntaa (yaw). Oikealla ohjaussauvalla puolestaan säädetään kallistus- ja pituusmomentteja (pitch ja roll). Ohjaaminen on yleensä toteutettu siten, että ohjaussauvat palautuvat keskiasentoon kun niihin ei kosketa ja multikopteri pyrkii pysymään paikallaan. [82, s. 49]

Nykyisissä kaupallisissa lennokeissa ohjausyhteydet on toteutettu ISM (Industrial, Scientific, Medical)-taajuuskaistoilla, joiden käyttöön liittyy vähemmän rajoituksia kuin muilla kaistoilla. Käytetyimmät taajuusalueet ovat 2,4 GHz sekä 5,8 GHz taajuuskaistat. Näille taajuusalueille on tyypillistä voimakas vaimeneminen, joka vähentää häiriöitä kanavilla verrattuna esimerkiksi VHF-taajuuksiin. Toisaalta vaimeneminen aiheuttaa myös hyötysignaalin kantaman lyhene mistä, ja taajuusalueella esiintyy herkästi häiriöitä ja yhteyden katkeamista, kun kauko-ohjaimen ja multikopterin välillä on maastoesteitä. Korkeiden taajuuksien käyttäminen mahdollistaa myös lyhempien antennien käytön. [82, s. 48]

Multikoptereiden ohjausyhteydet toimivat taajuuksilla, joilla toimii muita IEEE:n 802.11-standardin mukaisia WLAN-laitteita, joten taajuusalueella on paljon lähetteitä etenkin tiheästi asutulla alueella. Tämän vuoksi useissa kaupallisissa lennokeissa hyödynnetään DSSS- ja FHSS-suorasekvenssi- ja hajaspektritekniikoita, joilla saadaan ohjausyhteydelle parempi häiriönsietokyky ja mahdollistetaan useiden samalla taajuusalueella toimivan järjestelmän käyttö samalla alueella, ilman, että laitteet häiritsevät toisiaan. [82, s. 48]



DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) eli suorasekvenssimenetelmä on hajaspektrimodu-laatiotekniikka, jossa signaalin energia levitetään laajalle taajuusalueelle. Nykyisin kaupallises-sa käytössä yleisillä, 2 Mbps järjestelmillä signaali levitetään 22 MHz taajuusalueelle. Useat DSSS-tekniikkaa käyttävät järjestelmät eivät voi toimia päällekkäisillä taajuuksilla. Tästä joh-tuen 2,4 GHz:n ISM-bandilla voi toimia samanaikaisesti kolme DSSS-tekniikkaa hyödyntävää järjestelmää. [42] FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) eli taajuushyppely on vuoros-taan hajaspektritekniikka, jolla signaalin kaistanleveys on 1MHz ja signaalia hypytetään taa-juudelta toiselle vähintään 2,5 ker-taa sekunnissa. 2,4 GHz ISM-bandilla käytössä on 79 kana-vaa, joita voidaan käyttää. Tällöin taajuusalueella voi olla useita järjestelmiä, jotka hyppivät eri parametrien mukaan eivätkä siten häiritse toisiaan. Onnistunut tiedonsiirto perustuu kahden keskenään toimivan laitteen hyppyparametrien synkronointiin. [42]

Multikopterien ohjausyhteyksien kantama on riippuvainen kauko-ohjaimen lähettimen tehosta. Eri markkina-alueiden säädökset asettavat eri vaatimuksia ISM-kaistoilla toimivien laitteiden lähetystehoille, joten eri markkinoiden versioissa kantamat voivat olla erilaiset. Esimerkiksi DJI:n Cendence-kauko-ohjaimessa isotrooppinen lähetystehon (EIRP) on ilmoitettu olevan Pohjois-Amerikan markkinoille suunnatussa, FCC:n säädösten mukaisessa versiossa 2,4 GHz:n taajuusalueella 26 dBm ja 5,8 GHz:n taajuusalueella 28 dBm, kun taas CE-hyväksytyssä, eu-rooppalaisille markkinoille hyväksytyssä versiossa vastaavat lähetystehot ovat 17 ja 14 dBm [16]. Maksimaaliset yhteysetäisyydet ovat näillä lähetystehoilla valmistajan mukaan ensin mai-nitussa 7 kilometriä ja jälkeen mainitussa 3,5 kilometriä. [46] Etäisyyksiin pitää kuitenkin suh-tautua teoreettisina maksimeina, ja pienetkin maastoesteet lyhentävät kantamaa merkittävästi. Halutessaan lennättää multikopteria pitkien etäisyyksien päähän lennättäjän tulisikin pyrkiä va-litsemaan lennätyspaikka siten, että näköyhteys kopterin ja kauko-ohjaimen välillä säilyy koko lennon aikana.

Joissain kauko-ohjaimissa voi olla integroitu näyttö, josta voidaan seurata multikopterin kameran tai kameroiden lähettämää kuvaa sekä lentotelemetriatietoja. Esimerkiksi kiinalaisen Yuneecin Typhoon H-multikopterin mukana toimitetaan kauko-ohjain, jossa on sisäänrakennettu Android-käyttöjärjestelmä [97]. Näyttölaitteena voidaan käyttää useissa malleissa myös älypuhelin tai tabletti. Tällöin älylaitteeseen asennetaan valmistajan ohjelmisto ja se liitetään yleensä kaapelilla kauko-ohjaimeen. Näyttölaitteeksi voidaan hankkia myös erikseen multikoptereiden kanssa käytettäväksi suunniteltuja näyttöjä, kuten esimerkiksi DJI:n CrystalSky. Vaahtivaa käyttöä ajatellen tarkoitukseen suunnitellun näytön käyttäminen on perusteltua niiden suuremman valotehon ansiosta. Esimerkiksi aiemmin mainitun CrystalSky-näyttölaitteen valoteho on valmistajan mukaan mallista riippuen joko 1000 tai 2000 candelaa/neliometri, kun taas esimerkiksi iPhone 6-älypuhelimien vastaava arvo on vain vähän alle 600 candelaa/neliometri [17][51]. Suurempi valoteho helpottaa näyttölaitteen käyttöä kirkkaassa auringonpaisteessa ja tarkoitukseen suunnitellut laitteet ovat yleensä paremmin sään- ja iskunkestäviä verrattuna tavallisiin älypuhelimiin ja tabletteihin. Sotilaskäyttöä ajatellen tarkoitukseen soveltuvan näyttölaitteen valinta onkin hyvin olennaista.

Käytettäessä älylaitteita osana ohjausjärjestelmää syntyy myös mahdollisuus käyttää älylaitteissa kolmannen osapuolen sovelluksia jonkin uuden toiminnon lisäämiseksi. Sovelluksia on paljon ja niiden toiminnot ja laatu vaihtelevat. Joillakin sovelluksilla lennättäjä voi tarkistaa mahdolliset lentokieltoalueet ja laitteensa lennättämiseen vaikuttavat sääolosuhteet [3]. Suomessa liikenteen turvallisuusvirasto Trafi ylläpitää Droneinfo-sovellus, joka mahdollistaa lennätysilmoituksen tekemisen ja lentokieltoalueiden tarkistamisen [33]. Jotkut sovellukset mahdollistavat myös reittipisteisiin perustuvan automaattisen lentoreitin ohjelmoinnin multikoptereissa, joissa ei tätä ominaisuutta luonnostaan ole [3]. Esimerkiksi Pix4D-sovelluksella on mahdollista luoda multikopterin avulla 3D-malleja halutusta alueesta [78]. Android- tai iOS-käyttöjärjestelmällisten näyttölaitteiden käyttö osana multikoptereiden ohjausjärjestelmää mahdollistaa siis toiminnan tehostamisen ja täysin uusien ominaisuuksien lisäämisen kaupallisten multikoptereiden käytössä.

Multikoptereiden ohjausjärjestelmä sisältää siis kauko-ohjaimen lisäksi paljon komponentteja, jotka ovat välttämättömiä multikopterin lennättämiselle. Sensorien ja autopilotin toimiessa halutulla tavalla on multikopterin lennättäminen erityisen yksinkertaista verrattuna perinteisempiin harrastelennokkeihin. Lennättäjän tulee kuitenkin huomioida, että menetettäessä esimerkiksi GPS-signaali muuttuu lennättäminen huomattavasti haastavammaksi. Mahdollisten automaattisten törmäyksenestojärjestelmien toimintaan ei myöskään voi luottaa kaikissa tilanteissa. Multikopterin helppo lennätettävyyden ei saa aiheuttaa liikaa itsevarmuutta, joka voi johtaa vaaratilanteisiin. Multikopterin lennättäjältä vaaditaan teknisen lentotaidon sijaan enemmän suunnitelmallisuutta sekä harkinta- ja ennakkointikykyä.

Sotilaskäytön kannalta kaupallisten multikopterien ohjausjärjestelmien etuna on yksinkertaisuus, joka mahdollistaa järjestelmien nopean kouluttamisen käyttäjälle. Ohjausyhteyksien ollessa 2,4 GHz:n ja 5,8 GHz:n taajuusalueella ne vaimenevat nopeasti, joka vaikeuttaa niiden elektronista tiedustelua tai niihin elektronisesti vaikuttamista. Toisaalta ohjausyhteydet vaimenevat nopeasti kohdatessaan maastoesteitä tai rakennuksia, mikä rajoittaa multikopterien käytettävyyttä metsämaastossa, mäkien taakse tai rakennetulla alueella. Lisäksi multikopterin ohjaaminen on hyvin riippuvaista GPS-signaalin saamisesta, joten GPS-signaalin häirintä tai katve-alueella olemisen rajoittaa kopterien käytettävyyttä.

## 2.6. Ohjausjärjestelmien alttius elektroniselle häirinnälle

Multikoptereiden sotilaskäyttöä ajatellen on syytä tarkastella niiden ohjausyhteyksien alttiutta elektroniselle häirinnälle. Lennokkeiden lisääntyessä markkinoille on tullut lennokkeiden paikantamiseen ja häirintään tarkoitettuja järjestelmiä, joiden tarkoituksena on esimerkiksi lentokenttien, vankiloitten ja muiden suojattavien kohteiden suojaaminen. Tässä alaluvussa tarkastellaan lyhyesti yksittäisen, suosituksen multikopterin ohjausjärjestelmän alttiutta elektroniselle häirinnälle. Tarkoituksena on arvioida, millaisen uhan elektroninen häirintä asettaa multikopterin käytölle sotilastoimintaa ajatellen.

Työn näkökulmaksi on valittu yksittäisen lennokkityypin ohjausjärjestelmän häiritävyyden tarkastelu. Videolinkin tai GPS/GLONASS-signaalin häirintää ei käsitellä, koska niiden häiritseminen ei teknisesti eroa merkittävästi ohjausjärjestelmän häiritsemisestä. Näitä häiritsemällä ei myöskään päästä yhtä merkittävään vaikutukseen kuin ohjausjärjestelmää häiritsemällä.

Tarkasteltavaksi lennokkityypiksi on valittu kiinalaisen DJI:n Phantom 4-multikopteri. Tuote on hyvin tyypillinen oman tuoteryhmänsä edustaja, ja se on yksi markkinoiden suosituimmista multikoptereista. Lisäksi kyseistä multikopteria on hankittu Puolustusvoimille testikäyttöön, joten sen tarkastelu on perusteltua tässäkin mielessä. Kyseisen multikopterin ohjausjärjestelmää tarkastelemalla voidaan päätellä muidenkin vastaavien ja samalla taajuudella toimivien multikoptereiden ohjausjärjestelmien ominaisuuksia.

Tarkasteltava häirintäjärjestelmä on geneerinen 2,4 GHz-taajuusalueen häirintäjärjestelmä, jonka parametrien määrittämiseen käytetään referenssinä kaupallisesti saatavilla olevia 2,4 GHz-alueen häirintälähtimiä. Häirintäjärjestelmän lähetinantennin osalta tarkastellaan ympärisäteilevää antennia ja geneeristä, suuntaavaa logaritmisperiodista antennia. Tarkastelu pidetään suppeana, eikä esimerkiksi kopterin, kauko-ohjaimen tai häirintälähtimen korkeuksia tai maastoesteiden vaikutusta oteta huomioon. Lähettimien ja vastaanottimien voidaan siis olettaa olevan vapaassa tilassa.

Häirinnän simulointia varten ohjausjärjestelmästä on tiedettävä ainakin seuraavat tiedot:

- Taajuusalue
- Lähetelaji (OFDM, FHSS, DSSS yms.)
- Kauko-ohjaimen lähetysteho ja mahdollinen antennin suuntaavuus

Phantom 4-multikopterin ohjaussignaali toimii 2,4 GHz:n taajuusalueella. Tarkemmin taajuusalue on 2400-2483 MHz eli käytännössä lähes koko ISM-käyttöön varattu 2,4 GHz taajuusalue. Tarkempaa taajuusalueen määrittelyä ei ole valmistajalta saatavissa. [77] Ohjaimen lähetysteho on versiosta riippuen joko 23 tai 17 dBm. Ensin mainittu on USA:n ilmailuviranomaisen FCC:n standardin mukainen, kun taas pienempi lähetysteho on CE-merkitty ja soveltuu siten myytäväksi ja käytettäväksi EU-maissa. [76] Tässä työssä tarkasteltavana lähetystehona käytetään 17 dBm:ää. Kauko-ohjaimen antennina on lyhyt piiska-antenni, jonka oletetaan oleva ympärisäteilevä.



$P_{LS} = 17 \text{ dBm}$

$G_{LJ} = 0 \text{ dBi}/6,5 \text{ dBi}$

$G_{LS} = 0 \text{ dBi}$

$R_s = 50 \text{ m}, 100 \text{ m}, 200 \text{ m}, 500 \text{ m}, 1000 \text{ m}, 2000 \text{ m}$  ja  $3000 \text{ m}$

$G_{VJ}$  ja  $G_{VS}$  ovat molemmat  $0 \text{ dBi}$

$B_{RX} = 1 \text{ MHz}$  ja  $22 \text{ MHz}$

$B_J = 83 \text{ MHz}$

Häirinnän simulointi suoritetaan yksinkertaistetusti olettaen, että häirintälähteen ollessa multikopterin vastaanottimessa yhtä voimakas tai voimakkaampi kuin hyötylähete, on häirinnällä vaikutuksia kopterin normaaliin toimintaan. Häirintä- ja hyötysignaali-entehojen ollessa yhtä voimakkaita saa  $J/S$ -suhde arvon yksi. Kun halutaan laskea maksimihäirintäetäisyys, häirintäyhtälö voidaan johtaa muotoon:

$$R_J = R_S \sqrt{\frac{P_{LJ} G_{LJ} G_{VJ} B_{RX}}{P_{LS} G_{LS} G_{VS} B_J}}$$

Simulointi toteutetaan Microsoftin Excel-ohjelmalla. Tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa:

Häirintälähteen antennin vahvistus = 0 dBi								
Hyötylähteen etäisyys vastaanottimesta (m)								
Hyöty-yhteyden kaistanleveys (MHz)	50	100	200	500	1000	2000	3000	
1	9	18	36	89	178	356	534	
22	42	84	167	418	835	1671	2506	
Häirintäetäisyys min (m)								
Häirintälähteen antennin vahvistus = 6,5 dBi								
Hyötylähteen etäisyys vastaanottimesta (m)								
Hyöty-yhteyden kaistanleveys (MHz)	50	100	200	500	1000	2000	3000	
1	19	38	75	188	376	753	1129	
22	88	177	353	883	1766	3532	5297	
Häirintäetäisyys min (m)								

## Taulukko 1: Häirintäetäisyyksien simuloinnin tulokset

Tuloksista nähdään, että hyöty-yhteyden etäisyyden kasvaessa myös pienin mahdollinen häirintäetäisyys kasvaa. Tuloksista on myös nähtävissä, että suuntaavaan antennin käytöllä pientehoisessa häirintälähtetimestä on erittäin suuri merkitys sille, miltä etäisyydeltä häirintäjärjestelmä kykenee häiritsemään ohjaussignaalia.

Simuloinnin tuloksista voidaan päätellä, että pienitehoinen häirintäjärjestelmä ei ole erityisen tehokas joutuessaan häiritsemään koko 2,4 GHz ISM-taajuusaluetta. Toisaalta mikäli häirintälähetintä käytetään hyvin lähellä häiritsevää kopteria, saattaa pieni häirintäteho olla riittävä. Suuntaavan antennin käytöllä häirintälähtetimestä on erittäin suuri merkitys sille, miltä etäisyydeltä häirintä onnistuu. Mikäli häirintäjärjestelmää on tarkoitus käyttää näkyvissä olevia lennokkeja vastaan, on antennina syytä käyttää suuntaavaa yagi- ta logperiodista suuntaavaa antennia. Ympärisäteilevää antennia käyttävissä aluevaikutteisissa järjestelmissä on simuloinnin perusteella käytettävä korkeampaa lähetystehoä.

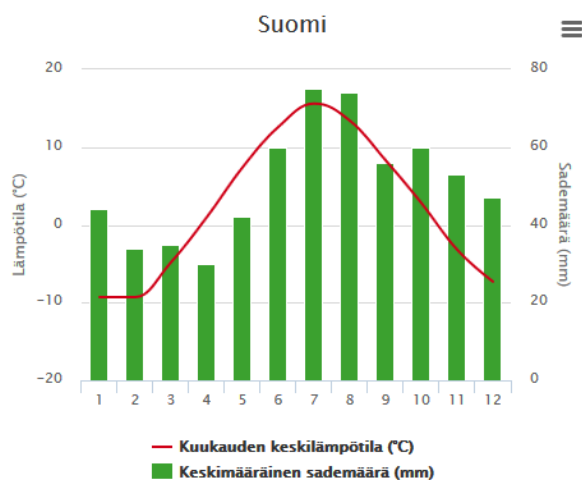
Simuloinnin perusteella kaupallisten multikopterien ohjausyhteyden häirintä on mahdollista pienikokoisilla, liikuteltavilla häirintäjärjestelmillä. Tulosten perusteella menestyksekkäs häirintä vaatii kuitenkin havainnon häiritsevästä multikopterista ja suuntaavan antennin käyttöä. Multikoptereiden ohjausyhteyksien häirintä ympärisäteilevällä antennilla laajalla alueella on tulosten mukaan haastavaa.

### 2.7. Olosuhteiden vaikutus multikopterien käytettävyyteen

Kaupallisten multikoptereiden säänkestävyys ei ole samalla tasolla kuin sotilasilmailuun tarkoitetuissa lentolaitteissa, joten luonnon olosuhteet rajoittavat niiden käyttöä. Multikoptereiden käyttöä rajoittavia tekijöitä voivat olla lämpötila, tuuliolosuhteet, sade ja kosteus sekä hiekka tai pöly. Myös ukkonen saattaa aiheuttaa riskin multikopterien käytölle. Multikoptereiden säänkestävyys riippuu tuotteesta, mutta hintaluokasta riippumatta rajoitteita on enemmän kuin esimerkiksi sotilasilmailuun suunnitelluilla lentolaitteilla. Suomessa vuodenaikojen välillä olevat erot ovat merkittäviä ja kunkin vuodenajan säätyypit eroavat toisistaan paljon.







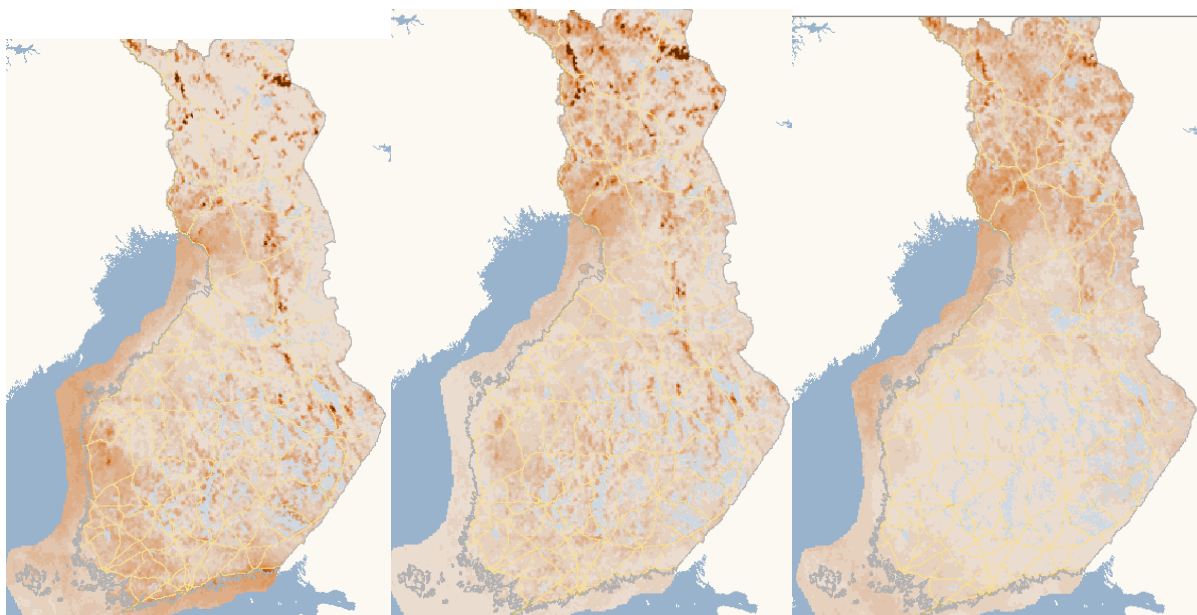
Kuva 11: Suomen kuukausittainen keskilämpötila ja sademäärän keskiarvo jaksolla 1981-2010 [58]

Valmistajien ilmoittamat käyttölämpötilat ovat vain viitteellisiä, ja multikopterin lennätys voi olla mahdollista kylmemmissäkin olosuhteissa kunhan akun lämpötila on riittävän korkea. Lisäksi vaikka tuotteen olisi ilmoitettu kestävän  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :sta matalampia lämpötiloja, on niiden akut silti pidettävä lämpiminä ennen lento-olentoa.

Alhaista lämpötilaa suurempi ongelma on jäätäminen. Jäätäminen tarkoittaa sitä, että kappaleen pinnalle muodostuu jäätä. Jäätämistä tapahtuu, kun lämpötila on alle  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja ilmassa on pieniä vesipisaroita. Näiden pisaroiden kohdatessa kylmän pinnan ne jäätyvät heti. Jäätämistä voi esiintyä jäätävän vesisateen aikana, mutta myös matalalla olevan pilven pisarat voivat aiheuttaa jäätämistä. Voimakas tuuli lisää pisaroiden liikettä ja siten jäätämisen riskiä. [46, s. 86]

Jäätäminen voi aiheuttaa jään kertymistä multikopterin pinnoille, jolloin sen massa kasvaa ja lento-ominaisuudet huononevat. Suurin riski on jään kertyminen moottoreihin ja propelleihin. Jään kertyminen propelleihin lisää niiden massaa, joka häiritsee lennonhallinnan normaalia toimintaa. Jäätynyt moottori saattaa pyöriä haluttua hitaammin, jolloin multikopterin lennonhallinta ei toimi. Useamman moottorin hidastuessa tai pysähtyessä multikopteri saattaa pudota enustamattomasti maahan.

Jäätämisolosuhteita mitataan ja tilastoidaan Suomessa kattavasti lähinnä tuulivoimaloiden jäätämisen seuraamiseksi. Suomen Tuuliatlas-nimisessä palvelussa on saatavilla kuukausittaiset jäätämisen intensiteetit tunteina kuukaudessa. Sivuston tarjoaman tiedon perusteella jäätämistä esiintyy Etelä-Suomessa marraskuusta maaliskuuhun etenkin Varsinais-Suomessa ja vesistöjen läheisyydessä. Pohjois-Suomessa jäätämistä puolestaan esiintyy kesäkuukausien ulkopuolella. Jäätämistä voi tietyillä paikoilla esiintyä enimmillään yli satana tuntina kuukaudessa talvikuu-kausien aikana.

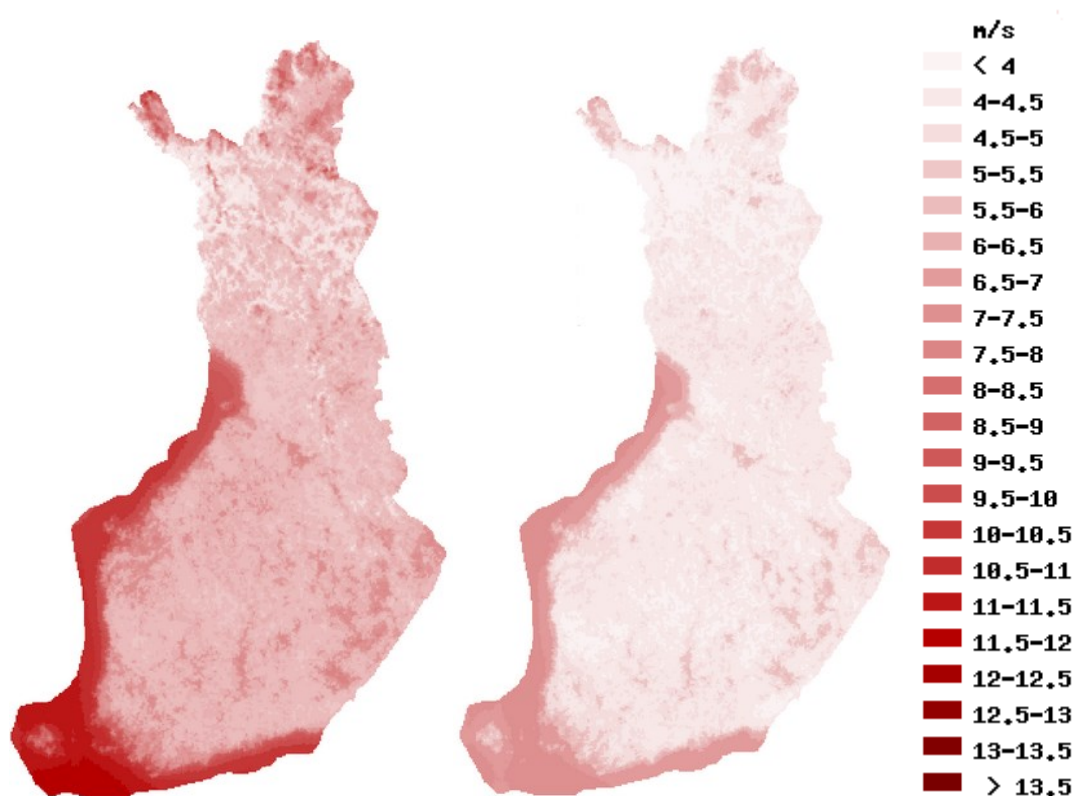


Kuva 12: Keskimääräinen aktiivisen jäätämisen intensiteetti tammikuussa, maaliskuussa ja huhtikuussa [92]

Vesi- ja lumisade ovat sääoloja arvioitaessa huomioon otettavia tekijöitä. Suurta osaa kaupallisista multikoptereista ei ole suunniteltu vesitiiviiksi. Tuotteiden vesitiiveyttä kuvaavaa IP-luokitusta ei löydy kuin kalleimmista tuotteista, kuten DJI:n Matrice 200:sta [20]. Halvemmat tuotteet saattavat kyllä kestää ainakin hetkellistä käyttöä sateessa, mutta tuotteiden ei voida odottaa kestävän pitkäaikaista altistumista sateelle.

Tuuliolosuhteet on otettava huomioon kevyiden multikoptereiden käytössä. Tuotteiden valmistajien ilmoittamat tuulenkestävyysarvot vaihtelevat hintaluokan ja multikopterin koon mukaan 7-12 m/s välillä. Yleisimmissä, noin 1000 € hintaluokan laitteissa kuten DJI:n Phantom 4:ssä tuulenkestävyydeksi on yleensä ilmoitettu 10 m/s. Kopterit saattavat toki toimia kovemminkin tuulilla, mutta niiden käyttäytyminen voi muuttua ennustamattomaksi ja lentämistä suoritusta kovemmilla tuulilla tulisikin välttää.

Suomessa tuulisinta on merellä ja rannikolla. Sisämaassa puolestaan tuulen nopeus ylittää 10 m/s vain harvoin. Alla on esitetty tuulen nopeuden keskiarvot koko maassa tammikuussa ja heinäkuussa. Kuvista nähdään, että tuulisuus on huomattavasti voimakkaampaa rannikolla kuin sisämaassa ja tuulen keskinopeus on koko maassa kesällä pienempi kuin talvella. Tuulen nopeus nousee sitä mukaa, mitä korkeammalle nouseaan. [92]



Kuva 13: Keskimääräiset tuulen nopeudet 50 m korkeudella tammikuussa ja heinäkuussa [92]

Multikopterin käytettävyyteen vaikuttavat eniten yli 10 m/s puhaltavat tuulet. Tuulitietoja on saatavilla parhaiten saariston mittausasemilta, ja alla on esitetty tuulisten päivien keskiarvot kuukausittain. Näiden perusteella multikoptereiden käyttömahdollisuudet rannikko- ja merialueilla ovat tuulen vuoksi rajoittuneet varsinkin talvi- ja syyskuukausina. Varsinaisia myrskypäiviä eli päiviä, jolloin 10 minuutin keskituulen nopeus on vähintään 21 m/s, on Suomessa keskimäärin 19 vuodessa. Myrskypäivinäkin tuuli on sisämaassa yleensä ainoastaan navakkaa (8 – 12 m/s) [96]. Tuulen ei siis rajoita nykyisten kaupallisten multikoptereiden käyttöä sisämaassa kuin yksittäisinä päivinä vuodessa.



- 1) *Helppokäyttöisyys* eli kuinka helppoa kopterin käyttöönotto ja lentäminen on
- 2) *Luotettavuus*, jota mitataan toimintahäiriöiden välisenä aikana
- 3) *Huollettavuus* eli kuinka nopeasti, helposti ja todennäköisesti vikaantunut laite saadaan tietyn ajan sisällä toimintakuntoiseksi
- 4) *Toiminta-aika* eli kuinka pitkään kone kykenee toimimaan sille määritetyllä hyötykuormalla
- 5) *Hyötykuorma* eli suurin paino, jolla kone kykenee nousemaan ilmaan ja suorittamaan sille määritetyn tehtävän. [82, s. 10-11]

Multikopterit ovat kiinteäsiipisiin lennokkeihin ja perinteisiin helikoptereihin verrattuna huomattavasti helppokäyttöisempiä. Autopilotin avustamana multikopterin lennättämisen oppii helposti jo muutamassa tunnissa. Multikopterit ovat yksinkertaisen mekaanisen rakenteensa vuoksi myös luotettavampia ja helpommin huollettavissa muihin lennokkityyppeihin verrattuna, koska niissä ei käytetä kääntyviä niveliä kuten kiinteäsiipisissä lennokeissa tai helikoptereissa. Toiminta-ajassa ja hyötykuormassa puolestaan multikopteri häviää sekä kiinteäsiipisille lennokeille että helikoptereille. [82, s. 12]

Multikopterien keskinäistä suorituskykyä vertailtaessa kolme ensimmäistä kriteeriä ovat kaikissa tuotteissa suunnilleen samat, koska lähes kaikki kaupalliset tuotteet ovat pääosiltaan samanlaisia. Ohjattavuus on kaikissa kaupallisissa multikoptereissa toteutettu lähes samalla tavalla, eikä niiden helppokäyttöisyydessä voida olettaa olevan merkittävää eroa. Lisäksi luotettavuuden arviointi vaatisi kaikkien multikopterien komponenttien vikaantumisherkkyiden tuntemista, eikä näitä tietoja todennäköisesti ole saatavilla.

Multikopterien toiminta-aikaa ja hyötykuormaa on sen sijaan helpompi tarkastella. Hyötykuorman tarkastelu sellaisenaan on haastavaa, koska useissa kaupallisissa tuotteissa on kiinteä hyötykuorma ja niitä ei ole suunniteltu käytettäväksi minkään muun hyötykuorman kanssa. Tällöin hyötykuormaa ei ole yleensä ilmoitettu. Hyötykuorma on lähes aina jokin kamera tai muu sensori, joten hyötykuormaa voidaan tarkastella siihen kiinteästi kuuluvan tai siihen asennettavissa olevien sensoreiden kautta. Hyötykuorman muokattavuus on tärkeä osa suorituskykyä. Edullisemmissä malleissa on yleensä mukana valmistajan oma hyötykuorma, jota ei kyetä vaihtamaan. Useimmissa kalliimmissa laitteissa puolestaan voidaan vaihtaa hyötykuormaa ja käyttää esimerkiksi suurentavaa optista sensoria tai lämpökameraa. Jotkin tuotteet mahdollistavat myös kahden sensorin samanaikaisen käytön. Hyötykuorman osalta suorituskyky muodostuu siis siihen kuuluvasta sensorista sekä mahdollisuudesta käyttää erilaisia sensoreita sekä useita sensoreita samanaikaisesti.

Näiden lisäksi suorituskykyyn vaikuttaa olosuhteiden sietokyky, eli kuinka kylmissä ja kosteissa olosuhteissa multikopteri kykenee toimimaan ja onko tuotteelle määritetty IP-luokitusta. IP-luokitus kertoo, millä tasolla tuote sietää vierasesineitä ja pölyä sekä kosteutta. Luokituksen ensimmäinen numero kertoo asteikolla 0-6 tuotteen pölynkestävyyden, numeron 6 ollessa täysin pölytiivis. Jälkimmäinen numero kertoo asteikolla 0-8 tuotteen kyvyn sietää kosteutta numeron 8 tarkoittaen tuotteen kestävän jatkuvaa upotusta veteen. [47]

Ohjausyhteyden maksimikantama on myös tärkeä osa suorituskykyä sotilaskäyttöä ajatellen. Pitkä kantama mahdollistaa suuremman alueen valvonnan samalta lennätyspaikalta, ja se mahdollistaa myös kohteen tai alueen valvonnan turvallisemman etäisyyden päästä. Pitkällä ohjauskantamalla varustetun tuotteen lennätyspaikkaa on myös vaikeampi päätellä multikopterista tehdyn havainnon perusteella.

Alla olevassa taulukossa on esitetty eri hintaluokan kaupallisten multikoptereiden suorituskykyä yllä esitettyjen kriteerien mukaisesti. Hyötykuorman osalta on ilmoitettu tuotteeseen kuuluva sensori sekä mahdollisuus käyttää muita sensoreita tai useata sensoria samanaikaisesti. Multikoptereiden ohjausyhteyksien kantamat on esitetty CE-hyväksytyjen versioiden arvojen mukaisesti. Vertailtaviksi tuotteiksi on valittu lähinnä markkinaosuudeltaan suurimpien valmistajien tuotteita. Tarkoituksena on määrittää eri hintaluokan multikoptereille tyypillisiä suorituskykyarvoja.

Tuote	Toiminta-aika	Hyötykuorma	Olosuhteiden sieto	Kantama (CE-versio)	Hintaluokka
DJI Spark	16 min	4K-kamera (1/2.3" CMOS) Ei muokattavissa	0° - 40° C Ei IP-luokitusta	500 m	500 €
Yuneec Breeze 4K	12 min	4K-kamera (1/3.06" CMOS) Ei muokattavissa	0° - 40° C Ei IP-luokitusta	Kantamaa ei ilmoitettu, max. lentokorkeus 80 m	500 €
Yuneec Typhoon 4K	25 min	4K-kamera (1/2.3" CMOS) Ei muokattavissa	-5° - 50° C	400 m	900 €
Parrot Bebop 2	25 min	14MP kamera (1/2.3" CMOS) Ei muokattavissa	Ei ilmoitettu	2000 m	1000 €
DJI Phantom 4 Pro	~30 min	4K-kamera (1/2.3" CMOS) Ei muokattavissa	0° - 40° C Ei IP-luokitusta	3500 m	1000 €
DJI Mavic Pro	27 min	4K-kamera (1/2.3" CMOS) Ei muokattavissa	0° - 40° C Ei IP-luokitusta	4000 m	1000 €
Yuneec Tornado H920	24 min	16 MP kamera (4/3" CMOS), 3x optinen zoom	5° - 40° C	1600 m	3500 €
DJI Inspire 2	27 min	20 MP kamera (1" CMOS) Mahdollisuus käyttää lämpökameraa	-20° - 45° C Ei IP-luokitusta	3500 m	5000 €
DJI Matrice 200/210	24 min	Mahdollisuus käyttää kahta sensoria samaan aikaan.  Esim. 30x zoomilla varustettu kamera + lämpökamera	-20° - 45° C IP43	3500 m	20 000-30 000 €
ELIX XL	45 min	1280 x 720 HD-kamera 12x zoomilla + 640x512 resoluution lämpökamera	-20° - 50° C	6000 m	50 000 €

Taulukko 2: Joidenkin kaupallisten multikopterien suorituskykyvertailu. Taulukon tiedot valmistajien ilmoittamia [26][23][21][105][35][19][104][22][102][75]

Suorituskyvyn osalta taulukon perusteella voidaan nähdä, että kaupalliset tuotteet voidaan jakaa karkeasti niiden suorituskyvyn ja hinnan perusteella neljään ryhmään:

- 1) 500 € (DJI Spark, Yuneec Breeze)
- 2) 1000 € (DJI Phantom 4, DJI Mavic, Yuneec Typhoon 4K, Parrot Bebop 2)
- 3) 3000-5000 € (DJI Inspire 2, Yuneec Tornado H920)
- 4) Yli 10 000 € (DJI Matrice 200, ELIX XL)

500 euron hintaluokassa on saatavilla lähinnä leluiksi luokiteltavia multikoptereita, jotka eivät lyhyen lentoaikansa ja toimintaetäisyytensä puolesta sovellu hyvin sotilastoimintaan. Tuotteissa on kiinteät näkyvän valon alueen sensorit, eikä niissä voida käyttää muunlaisia sensoreita. Tuotteita ei ole suunniteltu käytettäväksi alle 0 °C lämpötiloissa, eikä niitä ole IP-luokiteltu. Tämän hintaluokan tuotteiden etuna voidaan pitää niiden pientä kokoa ja painoa, joka voi tehdä niiden kuljetuksesta ja käytöstä jossain tapauksissa helpompaa verrattuna kalliimpiin tuotteisiin.

1000 euron hintaluokassa on saatavilla monipuolisesti tuotteita eri valmistajilta. Tuotteiden suorituskyvyn osalta selkeänä erona 500€ hintaluokan tuotteisiin on kantaman ja toiminta-ajan merkittävä lisääntyminen. Tarkasteltujen tuotteiden osalta ilmoitetut toiminta-ajat olivat 25–30 minuuttia ja ohjausyhteyksien kantamat useita kilometrejä. Tässä hintaluokassa hyötykuormana on enimmäkseen 4K-kamera, jonka vaihtaminen toisenlaiseen sensoriin ei ole mahdollista. Tuotteille ilmoitettu alin käyttölämpötila on -5° C - 0 °C, eikä hintaluokassa ole tarkastelun perusteella saatavilla IP-luokituksen omaavia tuotteita.

3000–5000 euron hintaluokassa tuotevalikoima on huomattavasti suppeampi kuin edellisemmissä tuotteissa. Tuotteiden olosuhteiden kestävyys, lentoaika ja ohjausyhteyden maksimikantama eivät juuri eroa 1000€ hintaluokan tuotteista. Suurin ero on tuotteiden suuremmassa kantokyvyssä ja siten mahdollisuudessa käyttää laadukkaampia sensoreita. Suorituskyvyn näkökulmasta suurin etu verrattuna 1000 euron hintaluokan tuotteisiin on mahdollisuus käyttää lämpökameraa. Koptereihin soveltuvien lämpökameroiden hinnat ovat kuitenkin yleensä kalliimpia kuin tämän hintaluokan koptereiden.



Yli 10 000 euron hintaluokassa ei ole tarjolla DJI:n Matrice 200:n lisäksi juurikaan valmiita kapallisia COTS-tuotteita. Useat yritykset, kuten virolainen ELI, markkinoivat vaativaan viranomaiskäyttöön suunniteltuja multikoptereita [35]. Tällaiset tuotteet valmistetaan kuitenkin yleensä tilaajan vaatimusten mukaan ja niiden tarkat ominaisuudet ja suorituskyky saattavat vaihdella, eikä niistä aina ole saatavilla hintaa. Tämän hintaluokan multikoptereissa on edullisempiin tuotteisiin verrattuna suurempi hyötykuorma, joka mahdollistaa useamman sensorin samanaikaisen käytön. Esimerkiksi DJI:n Matrice 200-kopterissa on mahdollista käyttää 30-kertaisella suurennuksella varustettua kameraa sekä lämpökameraa samanaikaisesti. Lisäksi tuotteita markkinoidaan säänkestävinä ja esimerkiksi aiemmin mainitulle DJI:n Matrice 200:lle on valmistajan toimesta luvattu IP43-tason suojaus pölyä ja kosteutta vastaan. Tämän hintaluokan tuotteissa tulee huomioida niiden suuri koko ja paino verrattuna halvempiin tuotteisiin, eivätkä ne välttämättä sovellu käytettäväksi jalan liikkuville joukoille.

Sotilaskäyttöä ajatellen kiinnostavimpia ovat 1000 euron hintaluokan sekä yli 10 000 euron tuotteet. 1000 euron hintaluokassa on tarjolla suuri valikoima toiminta-ajaltaan ja kantamaltaan suorituskykyisiä tuotteita, joissa on laadukkaat 4K-sensorit. Tämän hintaluokan multikopterit varusteineen on myös mahdollista kuljettaa helposti repussa. Suurentavaa optiikkaa tai lämpökameroita ei sen sijaan voida tämän hintaluokan multikoptereissa toistaiseksi käyttää. Suorituskykyisempiä lennokeita harkittaessa 10 000 euron tuotteet ovat kiinnostavimpia. Mahdollisuus käyttää suurentavaa optiikkaa ja lämpökameraa samanaikaisesti sekä mahdollisuus toimia saateella ovat erittäin käyttökelpoisia ominaisuuksia.

Valmistajista DJI:n markkinaosuus on ylivoimaisesti suurin. Yhdysvalloissa sen markkinaosuus oli vuonna 2017 72 prosenttia [98]. Tarkasteltujen tuotteiden ominaisuuksien perusteella DJI:n tuotteet ovat muiden valmistajien tuotteita suorituskykyisempiä etenkin 1000–1500 euron hintaluokassa. Suomessa Poliisin viimeisimmät hankinnat ovat kohdistuneet juuri DJI:n tuotteisiin [79]. Ainakin toistaiseksi DJI:n tuotteet vaikuttavat kaupallisista tuotteista sotilaskäyttöä ajatellen kiinnostavimmilta. DJI:n, kuten muidenkin kaupallisten valmistajien tuotteiden käytössä tulee huomioida kyberturvallisuus. Muun muassa Yhdysvaltain asevoimat ovat poistaneet DJI:n tuotteet käytöstään kyberturvallisuusuhkiin vedoten [72]. DJI on tosin myöhemmin julkaissut tuotteisiinsa yksityisen toimintamoodin, jossa multikopteri ja sen ohjaamiseen käytettävä sovellus eivät ole yhteydessä internetiin [18].

## 2.9. Yhteenveto multikoptereiden suorituskyvystä

Tässä pääluvussa on tarkasteltu modernien kaupallisten multikopterien rakennetta ja suorituskykyä sekä käytettävyyttä eri olosuhteissa ja elektronisen häirinnän alaisuudessa. Multikopteri on lennokkityyppinä kiinteäsiipisiin lennokkeihin ja helikoptereihin verrattuna rakenteeltaan yksinkertainen ja sen lennättäminen on helppoa kehittyneen lennonhallinnan ansiosta. Multikoptereiden heikkous muihin lennokkityyppeihin nähden on pienempi hyötykuorma ja toiminta-aika.

Kaupallisten multikoptereiden rakenne on tuotteesta riippumatta yhdenmukainen. Tuotteissa on parillinen määrä roottoreita neliroottorisen multikopterin ollessa yleisin konfiguraatio. Multikoptereiden rungot ja propellit on valmistettu hintaluokasta riippuen muovista tai hiilikuidusta, eivätkä ne kestä törmäyksiä hyvin. Tuotteiden propulsiojärjestelmät ovat lähes poikkeuksetta sähkökäyttöisiä, ja niissä hyödynnetään harjattomia sähkömoottoreita ja litiumpolymeeriakkuja. Suorituskyvyn kannalta akkuteknikka rajoittaa tuotteiden toiminta-aikaa ja käytettävyyttä kylmissä lämpötiloissa. Nykyiseillä litium-polymeeriakuilla multikoptereiden toiminta-ajat ovat harvoin yli 30 minuuttia, eikä toiminta-aikaa saada merkittävästi kasvatettua ilman akkuteknologian kehitystä.

Multikopterien ohjausjärjestelmissä hyödynnetään autopilottia, joka muuntaa lennättäjän antamat ohjauskomennot sekä GPS-paikannuksen ja inertiatunnistuksen antamat tiedot komennoiksi moottorien pyörimisnopeutta sääteleville ESC-piireille. Multikopterin lennättäminen onkin helppoa ja nopeasti opeteltavissa. Kauko-ohjauksen radioyhteys on toteutettu joko 2,4 GHz tai 5,7 GHz:n taajuusalueella, jolla säteilyn vaimeneminen on voimakasta. Tämä rajoittaa koptereiden ohjausyhteyksien maksimikantamat alle neljään kilometriin ilman suunta-antennin käyttämistä, mutta tekee samalla kopterien ohjausyhteyden häirinnän haastavaksi. Kaupallisissa tuotteissa on yleensä suunniteltu käytettävän näyttölaitteena älypuhelin tai tabletti, jotka eivät kenttäkelpoisuutensa ja näytön kirkkautensa osalta sovellu hyvin sotilaskäyttöön. Hankittaessa multikoptereita sotilaskäyttöön tulisi kiinnittää huomiota tarkoitukseen soveltuvan näyttölaitteen valintaan.

Suomen olosuhteissa eniten multikopterien käytettävyyteen vaikuttava tekijä on jäätäminen, jota esiintyy eniten rannikkoalueilla ja ajallisesti eniten talvikuukausina. Toinen vaikuttava tekijä on sade, joka estää alle 10 000 euron hintaluokassa olevien tuotteiden turvallisen käytön. Kalliimpien tuotteiden IP-suojaus ei vaikuta jäätämisen aiheuttamiin ongelmiin, mutta lisää niiden käytettävyyttä sateisissa olosuhteissa halvempiin tuotteisiin verrattuna. Tuulisuus ei tämän tutkimuksen perusteella rajoita multikopterien käyttöä sisämaassa kuin yksittäisinä myrskypäivinä vuodessa.

Sotilaskäyttöä ajatellen multikopterin suorituskyvyn kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat hyötykuorma, toiminta-aika, ohjausyhteyden kantama sekä olosuhteiden sietokyky. Kaupallisista tuotteista kaikkein edullisimmat soveltuvat huonosti sotilaskäyttöön pienen ohjausyhteyden kantamansa ja toiminta-aikansa takia. Sen sijaan 1000 euron hintaluokassa tuotteiden toiminta-ajat ja ohjausyhteyden kantamat nousevat merkittävästi, ja niissä on yleensä kohtuulliset näkyvän valon alueen 4K-kamerat. Kalliimmissa tuotteissa toiminta-ajat ja ohjausyhteyden maksimikantamat eivät kasva merkittävästi, mutta niissä on mahdollista käyttää laadukkaampia sensoreita kuten optisella suurennuksella varustettuja kameroita sekä lämpökameroita. Kymmenien tuhansien eurojen arvoisissa tuotteissa erona halvempiin on mahdollisuus käyttää kahta sensoria samanaikaisesti sekä parempi matalien lämpötilojen ja kosteuden sietokyky. Tuotteiden suuri koko tekee niistä hankalia jalan liikkuvan joukon käytettäväksi.

### 3. MULTIKOPTERIEN SENSORIT

Sensori on jonkin havainnoitavan kohteen lähettämän tai siitä heijastuvan fyysikaalisen suureen havaitsemiseen tarkoitettu laite. Mitattavia suureita voivat olla esimerkiksi akustiset heijasteet, paine tai sähkömagneettinen säteily. Sensorijärjestelmillä pyritään havaitsemaan ja tulkitsemaan havainnoitavaa kohdetta tai kohteita tehokkaammin kuin mihin kyetään ihmisen näkö- tai kuuloaistilla. [57, s. 187]

Tässä kappaleessa käsitellään sähkömagneettisen säteilyn vastaanottoon tarkoitettuja sensoreita, jotka soveltuvat käytettäväksi multikoptereissa. Akustisten sensoreiden käyttö multikoptereissa on epärealistista kopterin tuottaman melun takia. Kemialliseen emissioon perustuvia sensoreita olisi todennäköisesti mahdollista käyttää multikoptereissa esimerkiksi kemikaalivuotojen tai kemiallisten aseiden käytön tiedustelussa, mutta tutkimuksen selkeyden takia käsiteltävät sensorit rajataan sähkömagneettisiin sensoreihin.

Sähkömagneettista säteilyä hyödyntävät sensorit toimivat havaitsemalla maalin itse säteilemää tai siitä heijastuvaa säteilyä. Sensorit voidaan luokitella sen perusteella, millä spektrin alueella ne toimivat. Sensori voi olla aktiivinen tai passiivinen, eli sen toiminta perustuu joko sensorin itsensä lähettämän säteilyn heijastusten vastaanottamiseen tai pelkästään kohteen itsensä säteilemän tai sitä heijastuvan muun säteilyn vastaanottamiseen [57, s. 187]. Aktiiviset sensorit ovat lähettämänsä säteilyn vuoksi havaittavissa sopivalla tiedusteluvastaanottimella, kun taas passiivisia sensoreita ei voida havaita elektronisen tiedustelun keinoin.

Tutkimuksessa on valittu tarkasteltaviksi sensorityypeiksi näkyvän valon alueella toimivat optiset sensorit sekä lämpökamerat. Valinta perustuu kyseisiä sensorityyppejä edustavien ja multikoptereihin sopivien tuotteiden hyvään saatavuuteen kaupallisilla markkinoilla. Muista sensorityypeistä ainakin SAR-tutkien ja laserskannereiden käyttöä multikoptereissa on tutkittu, mutta tekniikat eivät vielä ole yleistynyt kaupallisissa tuotteissa.




Luvun tarkoituksena on tarkastella näkyvän valon alueen sensoreiden ja lämpökameroiden suorituskykyä sekä niiden soveltuvuutta asennettaviksi kaupallisiin multikoptereihin. Luvun tarkoituksena on vastata apututkimuskysymykseen: ”Mikä on kaupallisiin lennokkeihin saatavilla olevien sensoreiden suorituskyky?”

### 3.1. Sensoreiden suorituskyvyn määrittäminen Johnsonin kriteerien avulla

Sensoreiden suorituskyvyn arviointi objektiivisesti on haastavaa. Tähystettävien kohteiden havaitseminen, luokittelu ja tunnistaminen riippuvat ainakin tähystäjältä, havainnoitavan kohteen ja sen taustan kontrastierosta, valon määrästä, kuvan signaali-kohinasuhteesta, taistelukentän optisista olosuhteista, katsomiskulmasta ja tähystettävän kohteen liikkeestä [57]. Sensoreiden objektiivinen vertailu pelkästään niiden teknisten ominaisuuksien perusteella on haastavaa. Vertailu testaamalla kenttäolosuhteissa on hyvä tapa verrata sensoreiden suorituskykyä, mutta on haastavaa järjestää testejä missä useita sensoreita voidaan verrata hallituissa olosuhteissa ja vertailukelpoisesti keskenään.

Johnsonin kriteeri on Yhdysvaltojen asevoimien tutkimukseen liittyen 1950-luvun lopussa kehitetty menetelmä, jonka avulla alun perin pyrittiin selvittämään ja vertaamaan valonvahvistimien suorituskykyä [31]. Kriteerit perustuvat kokeelliseen tutkimukseen, ja kriteerien avulla voidaan arvioida sensorin kykyä havaita, tunnistaa ja yksilöidä tähystettävä kohde. Kriteerejä ei ollut alun perin suunniteltu käytettäväksi valonvahvistinten suorituskykyä tutkivan tutkimuslaitoksen ulkopuolella, mutta niitä on sovellettu muidenkin sensoreiden suorituskyvyn arviointiin paremman kriteeristön puutteessa [89, s. 9]. Kriteerejä sovellettaessa on hyvä pitää mielessä niiden syntyhistoria arvioitaessa niiden käyttökelpoisuutta.

Havaitsemisella tarkoitetaan havaintoa siitä, että kohde on läsnä. Tunnistamisella tarkoitetaan kykyä tunnistaa kohteen tyyppi eli onko se esimerkiksi mies, ajoneuvo vai panssarivaunu. Yksilöinnillä tarkoitetaan kykyä määrittää onko havaittu henkilö esimerkiksi ase kädessään oleva sotilas tai onko havaittu panssarivaunu rynnäkköpanssarivaunu vai taistelupanssarivaunu. [31] Näistä tasoista tunnistaminen vertautuu Puolustusvoimissa käytettävään termiin yleistunnistus ja yksilöinti vertautuu termiin tyyppitunnistus. Johnsonin kriteerien mukaan haluttaessa saavuttaa 50% todennäköisyys näiden havainnoinnin tasojen täyttymiselle, vaaditaan sensorin ilmaisimella tietty määrä jaksoja eli toisistaan erotettavissa olevaa kahta elementtiä. Jaksojen määrät ovat:

	<p>Havaitseminen: 1 jakso</p> <p>Kuvassa havaitaan, että urheilukentän laidalla metsän reunalla on jotain taustasta erottuvia kohteita, mutta niiden tarkempi tunnistaminen ei onnistu</p>
	<p>Tunnistaminen: 4 jaksoa</p> <p>Urheilukentällä havaitaan kolme seisovaa ihmishahmoa, mutta kuvan perusteella ei kyetä määrittämään ovatko kyseiset hahmot esimerkiksi sotilaita.</p>
	<p>Yksilöinti: 7 jaksoa</p> <p>Havaitaan kolme henkilöä, jotka yksilöimään maastopukuisiksi sotilaksi. Kuvasta nähdään, ettei hahmoilla esimerkiksi ole rynnäkkökiiväärejä käsissään.</p>

Taulukko 3: Havainnollistavat kuvat havaitsemisesta, tunnistamisesta ja yksilöinnistä. Kuvat otettu Workswell WIRIS-lämpökameralla [57, s. 320] [2]

Nykyisiä sensoreita tarkasteltaessa on jaksojen sijaan havainnollisempaa puhua pikseleistä eli kuva-alkioista. Pikseli on pienin selkeästi eroteltavissa oleva komponentti digitaalisesti muodostetussa kuvassa, kuten tietokoneen näytöllä tai sensorin ilmaisemalla. Nykyisillä optronisilla sensoreilla ja lämpökameroilla otettuja kuvia ja videoita tarkasteltaessa niistä on helppoa laskea kohteen päällä olevien pikselien määrä ja siten arvioida niiden suorituskykyä.

Jaksot tulee siis muuntaa pikseleiksi, jotta kriteerien käyttö sensorien arvioimisessa olisi yksinkertaisempaa. Johnsonsin kriteereissä käytetty jakso tarkoittaa kahta toisistaan erotettavissa olevaa elementtiä. Teoriassa jakso voitaisiin tulkita olevan kaksi pikseliä, mutta käytännössä erottaakseen kaksi tietyn sävyistä pikseliä toisistaan niiden välillä täytyy olla yksi erisävyinen pikseli [57, s. 320]. Yhdessä jaksossa on siis kolme pikseliä. Tällöin kriteerien mukaan 3 vertikaalista pikseliä kohteen päällä riittää havaitsemiseen, 12 tunnistamiseen ja 21 yksilöimiseen.

Johnsonin kriteerejä voidaan pitää optimistisina. Johnsonin alkuperäiset kokeilut on suoritettu laboratorio-olosuhteissa ja käyttäen ainoastaan elektro-optisia sensoreita. Kriteerejä määrittäessä ei ole otettu huomioon esimerkiksi kontrastieron ja kohinatason vaikutuksia. [31] Kriteerejä on jälkeenpäin sovellettu siten, että tarvittavien pikselien määrä kohteen päällä on huomattavasti suurempi. Alla olevassa taulukossa on esitetty muutama esimerkki kriteeristön tulkinnoista perusteluineen:

<b>Alkuperäiset Johnsonin kriteerit</b>	Havaitseminen: 3 pikseliä Tunnistaminen: 12 pikseliä Yksilöinti: 21 pikseliä
<b>Bob Mesnikin määrittämät kriteerit:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mahdollisuus pikselien ilmestymiseen väärään paikkaan ilmaisemilla (Kell Factor)</li> <li>- Linssin ominaisuudet</li> <li>- Matalien valaisuolosuhteiden aiheuttama kohina [69]</li> </ul>	Havaitseminen: 8 pikseliä Tunnistaminen: 32 pikseliä Yksilöinti: 64 pikseliä
<b>White paper on long-range surveillance cameras</b> (kriteerit 90% havaitsemistodennäköisyydelle) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mm. sääolosuhteet</li> <li>- Kontrastierot</li> <li>- Signaali-kohinasuhde [67]</li> </ul>	Havaitseminen: 10 pikseliä Tunnistaminen: 30 pikseliä Yksilöinti: 120 pikseliä

Kriteerien eroavaisuus on helpompaa esittää kuvina. Alla on kaksi kuvaa viidestä henkilöstä eri etäisyydeltä otettuna. Vasemmanpuoleisessa kunkin ihmishahmon päällä on keskimäärin 20 vertikaalista pikseliä ja oikeanpuoleisessa vastaava määrä on noin 70. Vasen kuva vastaa

siis Johnsonin kriteerien mukaista yksilöinnin pikselimäärää ja oikeanpuoleinen Mesnikin mukaan yksilöintiin riittävää pikselimäärää.



Kuvat 15 & 16: Kuvat henkilöistä eri etäisyyksiltä. Kuvat otettu GoPro 4-kameralla [2]

Vasemmasta kuvasta ei pystytä yksilöimään hahmoja, kun taas oikeasta kyetään esimerkiksi erottamaan maastopukuun ja Rajavartiolaitoksen asuun pukeutuneet sotilaat. Mesnikin käyttämät pikselimäärät ovatkin todennäköisesti käyttökelpoisempia kuin suoraan Johnsonin kriteereistä johdetut. Mikään ei kuitenkaan kykene ottamaan kaikkia mahdollisia muuttujia huomioon, joten niitä tulee pitää apuvälineinä sensorien havaintoetäisyyksiä arvioitaessa.

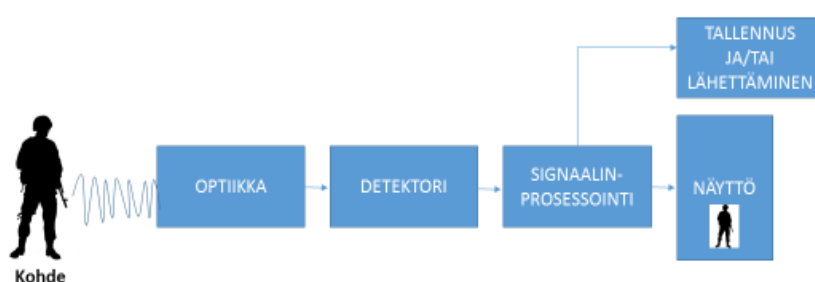
Sensorin ilmaisimesta nähtävä pikselimäärä kohteen päällä vaikuttaa siis oleellisesti kykyyn havaita, tunnistaa ja yksilöidä kohde. Suurempi määrä pikseleitä mahdollistaa tarkemman tunnistuksen. Pikseleiden määrä kohteen päällä riippuu kohteen koosta, etäisyydestä sekä sensorin ilmaisinelementtien määrästä ja optiikan polttovälistä. Haluttaessa kasvattaa havaitsemisetäisyyksiä on lisättävä sensorin ilmaisinelementtien määrää tai kasvatettava polttoväliä. Polttoväliä kasvatettaessa näkökenttä kuitenkin pienenee, mikä ei kaikissa sensoreissa ole tarkoituksenmukaista. Tiedettäessä sensorin ilmaisinelementtien koko ja määrä sekä optiikan polttoväli voidaan laskea halutulle etäisyydelle tietyn kokoisen kohteen päälle asettuvien pikseleiden määrä ja siten arvioida laskennallisesti sensorilla saavutettavia havainnoimisetäisyyksiä. [57, s. 321]



### 3.2. Näkyvän valon alueen sensorit

Sähkömagneettisen spektrin optinen osa-alue voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: ultravioletialue, näkyvän valon alue ja infrapuna-alue. Ultraviolettisäteily koostuu aallonpituudeltaan 10–390 nanometriä, näkyvän valon säteily 390–770 nanometriä ja infrapunasäteily 770 nanometriä – 1000 mikrometriä olevasta säteilystä. [70, s. 8] Keskimääräinen ihmissilmä havaitsee aallonpituudeltaan 390–770 nanometrin säteilyä, ja eri aallonpituisen säteily havaitaan eri väreinä [70, s. 11]. Näkyvän valon alueella toimivan sensorin toiminta perustuu kyseisellä aallonpituudella olevan valon keräämiseen ja esittämiseen ilmaisimella siten, että tähyistäjä kykenee havainnoimaan haluamaansa kohdetta paremmin kuin paljaalla silmällä. Perinteiset kiikarit ovat oiva esimerkki näkyvän valon alueen sensorista.

Nykyisten näkyvän valon alueen sensorien kohdalla puhutaan useimmiten optroniikasta. Optroninen sensori koostuu säteilyä keräävästä optiikasta, säteilyn sähköiseksi signaaliksi muuttavasta detektorista sekä signaalin prosessointiin tarkoitettusta elektroniikasta [96]. Yksinkertainen esimerkki optroniikasta on digitaalikamera, joka muuntaa kuvausalueelta keräämänsä säteilyn digitaalisesti kuvaksi tai videoksi. Digitaalisessa muodossa olevaa kuvaa ja videota voidaan esittää erilaisilla näytöillä ja lähettää tarvittaessa eteenpäin.



Kuva 17: Optronisen sensorin toimintaperiaate [88]

Sensorin optiikalla tarkoitetaan lasista tai muusta haluttua aallonpituutta läpäisevästä aineesta valmistettua linssiä tai linssejä, joiden tehtävänä on kerätä mahdollisimman paljon kohteesta tulevaa säteilyä ja suunnata se ilmaisimelle. Solanteen ja Kosolan mukaan optiikan toiminnan kannalta merkittävät ominaisuudet ovat polttoväli sekä objektiivin tehollinen läpimitta, valovoima ja läpäisy. [57]

Polttoväli kuvaa käytännössä sitä, kuinka paljon objektiivi suurentaa kuvaamaansa kohdetta. Optiikan polttovälin kasvaessa suurennos kasvaa, mutta samalla kuvasuhde pienenee [57, s. 319]. Suuren polttovälin omaavat sensorit soveltuvat hyvin kohteiden tarkkaan kuvaamiseen, mutta laajojen alueiden yleiskuvaaminen on haastavaa. Optisella zoomilla eli tarkennuksella varustetuissa kameroissa polttoväliä kyetään muuttamaan tarpeen mukaan. Optiikan osalta kanalta erittäin merkityksellistä on objektiivin läpimitta. Suuremmalla linssillä kyetään luonnollisesti keräämään enemmän valoa. Suuret linssit ovat kuitenkin kalliita ja lisäävät sensorin kooka.

Optiikan keräämän säteilyn muuntaminen digitaaliseen muotoon tehdään nykyisissä optronisissa sensoreissa CCD (Charge-Coupled Device)- ja CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)-tekniikoiden avulla. Kummassakin tekniikassa sensorelementtiin tuleva säteily muunnetaan sen aallonpituudesta ja intensiteetistä riippuen kunkin ilmaisinelementin osalta jännitteeksi, jotka voidaan muuntaa kuvanmuodostusta varten kunkin pikselin RGB-arvoiksi. CCD-kennossa ilmaisinelementteihin kertynyt lataus muunnetaan kootusti ulos johdettavaksi jännitteeksi, kun taas CMOS-kennossa jännitemuutos tehdään kussakin ilmaisinelementissä. [65]

CCD-tekniikan etuna CMOS-tekniikkaan verrattuna on parempi kuvanlaatu etenkin vähävaloisissa olosuhteissa. CMOS-järjestelmät puolestaan ovat pienikokoisempia ja kuluttavat vähemmän virtaa CCD-kennoihin verrattuna. 256 x 256 pikselin CCD-kennon tehontarve on noin 1-2 wattia vastaavan CMOS-kennon tehontarpeen ollessa vain 10–20 milliwattia [4]. CCD-kennojen käyttö on yleistä esimerkiksi digitaalivalokuvauksessa ja korkean vaatimustason teollisessa kuvauksessa. CMOS-kennoja vuorostaan käytetään muun muassa älypuhelimien kameroissa, turvakameroissa ja muissa sovelluksissa, missä pieni koko ja virrankulutus ovat tärkeitä. [65] Lähes kaikissa kaupallisissa lennokeissa käytetään CMOS-tekniikkaan perustuvia kameroita niiden pienemmän painon, koon ja virrankulutuksen ansiosta.

Näkyvän valon sensorit toimivat samalla taajuusalueella ihmissilmän kanssa, joten niiden taistelukentän valvontaan tuoma lisäarvo perustuu mahdollisuuden sijoittaa niitä paikkoihin joista ei muuten kyettäisi tähystämään. Korkealta tähystettäessä kyetään tähystämään maastoesteiden ja rakennusten taakse. Lisäksi voimakkaasti suurentavalla optiikalla varustetulla sensorilla kyetään tekemään havaintoja paljasta silmää kauempaa. Lisäarvoa saadaan myös mahdollisuudesta tallentaa sensorin kaappaamaa kuvaa tai jakaa sensorin kuvaa reaaliajassa eteenpäin.

### 3.3. Lämpökamerat

Kaikki luonnossa esiintyvät kappaleet säteilevät jonkin verran lämpöä. Kohteen säteilemä lämpöenergia riippuu kohteen emissiivisyydestä ja reflektiivisyydestä, eli siitä miten paljon kohde itse säteilee tai paljonko se heijastaa lämpöenergiaa ympäristöönsä. Emissiivisyys ja reflektiivisyys ovat toisiinsa nähden kääntäen verrannollisia, eli voimakkaasti lämpöä säteilevä kohde heijastaa lämpöä huonosti ja päinvastoin. Kappaleen emissiivisyys riippuu aallonpituudesta, jota tarkastellaan. [57, s. 325–326]

Optroniset lämpösensorit ovat passiivisia sensoreita, jotka toimivat infrapunaa taajuusalueella [45, s. 175]. Lämpösensorien toiminta perustuu lämpötilaerojen havaitsemiseen. Havainto voi perustua kohteen säteilemään lämpöön, joka erottuu kontrastina taustastaan. Myös voimakkaan heijastava pinta, kuten ikkuna voi heijastaa ympärillä olevaa lämpöä tai sen puutetta ja täten erottua taustastaan. Maali on mahdollista havaita sensorilla vain, jos kohteen ja sen taustan lämpötilaero eli kontrasti on riittävän suuri. Ilmakehän absorptio ja sironta sekä sensorin ja kohteen välillä olevat väliaineet kuten pöly tai kosteus pienentävät kontrastia etäisyyden funktiona. [57, s. 326] Lämpötilaerojen havaitseminen ei ole riippuvainen valoisuudesta, joten lämpösensorien käyttökelpoisuus näkyvän valon sensoreihin verrattuna korostuu vähävaloisissa olosuhteissa.

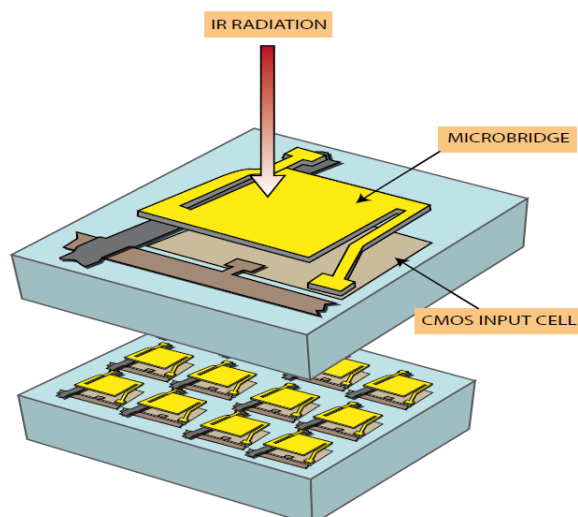
Lämpösensorien toiminnassa hyödynnetään niin sanottuja ilmakehän transmissioikkunoita. Pääosa lämpöensoreista toimii termisen infrapunaa alueella, eli transmissioikkunoilla 3-5  $\mu\text{m}$  ja 8-12  $\mu\text{m}$ . Näillä aallonpituuksilla kohteiden säteilyintensiteetti on voimakkaampi ja ilmakehän vaimennus pienempi kuin lähi-infrapunaa alueella, joka kattaa aallonpituudet 1-2,2  $\mu\text{m}$ :iin. [57, s. 328] Termisen infrapunaa transmissioikkunoista 3-5  $\mu\text{m}$  käytetään jäähdyttämättömissä lämpökameroissa. 8-12  $\mu\text{m}$  alueella fotonin energia on pienempi, ja jäähdyttämättömissä järjestelmissä esiintyvä suurempi kohinataso estää niiden käytön tällä taajuusalueella. [57, s. 329]

Lämpösensorien toiminta perustuu joko termiseen tai fotoniperiaatteella toimiviin kvantti-ilmaisimiin. Termiseen toimintaperiaatteeseen perustuvissa sensoreissa kohteesta ja ympäristöstä tuleva lämpösäteily lämmittää suoraan ilmaisinelementtiä. Elementin lämpeneminen aiheuttaa muutoksia jossain sen ominaisuudessa, jota mittaamalla kyetään havaitsemaan lämpösäteilyä. Fotoniseen toimintaperiaatteeseen perustuvissa kvantti-ilmaisimissa taas ilmaisimeen tulevat fotonit aiheuttavat muutoksen kunkin ilmaisinelementin sähköisessä varauksessa, jota kyetään mittaamaan. [57, s. 330] [55, s. 71]

Fotoniperiaatteella toimivat ilmaisimet ovat huomattavasti termisiä ilmaisimia herkempiä. Fotonin energian ollessa erittäin pieni on kyseiset sensorit kuitenkin jäähdytettävä laitteen sisäisen kohinatason laskemiseksi. [57, s. 330] Termisissä ilmaisimissa taas jäähdyttäminen ei paranna merkittävästi ilmaisimen toimintaa, joten ne soveltuvat paremmin jäähdyttämättömiin sensoreihin. [48, s. 46]

Pohdittaessa lämpösensorien soveltuvuutta pieniin multikoptereihin voidaan nykyiset jäähdytetyt järjestelmät rajata pois. Multikoptereiden hyötykuorma ja kyky varastoida energiaa on rajallinen. Jäähdytettyjen lämpökameroiden suorituskyky on jäähdyttämättömiä parempi, mutta niiden jäähdyttämiseen kuluu paljon energiaa ja ne ovat myös painavampia. [83, s. 15] Jäähdytettyjen lämpösensorien käyttö multikopterissa ei siis niiden suuren massan ja energiankulutuksen tähden ole nykytekniikalla mahdollista. Jäähdyttämättömät järjestelmät soveltuvatkin kevyemmän rakenteensa, pienemmän virrankulutuksensa ja edullisuutensa takia paremmin käytettäväksi multikoptereissa. Jäähdyttämättömien lämpösensorien käyttö on jo yleistä esimerkiksi lämpötähtäimissä, älykkäiden ampumatarvikkeiden hakupäissä sekä miehittämättömien lennokkien optiikassa. Jäähdyttämättömien sensorien alhainen hinta on myös synnyttänyt useita kaupallisia sovellutuksia kyseisille sensoreille. [48, s. 44]

Jäähdyttämättömistä ilmaisimista multikopterikäyttöä ajatellen kiinnostavimpia ovat bolometriset ilmaisimet. Bolometrisen ilmaisimen toiminta perustuu ilmaisinelementin sähkönjohtavuuskyvyn muutokseen. [57, s. 332] Bolometrinen ilmaisimien koostuu resistoreista, joita ilmaimeen tuleva säteily lämmittää ja tällöin niiden resistanssi muuttuu. Resistoreiden läpi kulkevan sähkövirran avulla mitataan resistanssin muutos. [48, s. 50] Yleensä bolometriset ilmaisimet ovat rakenteeltaan monoliittisia, ja ilmaisimia voidaan valmistaa helposti suoraan koneistamalla samalle mikropiirille, jossa on ilmaisimen toimintaa ohjaava elektroniikka. Monoliittinen rakenne on mekaanisesti kestävä sekä helppo ja edullinen valmistaa [57, s. 332] [48, s. 50]. Bolometrinen sensoreiden valmistuksessa yleisimpiä materiaaleja ovat vanadiinioksidi (VO<sub>2</sub>) ja amorfinen silikoni (a-Si) [48, s. 52].



Kuva 18: Bolometrinen ilmaisinelementti ja piirilevy, jossa useita ilmaisimia [38]

Lämpösensorien suorituskykyä arvioitaessa on otettava huomioon sensorin optiset ominaisuudet kuten objektiivin polttoväli, läpimitta sekä lämpösäteilyn läpäisy halutulla taajuusalueella. Tämän lisäksi suorituskykyyn vaikuttavat ilmaisinelementtien lämpötilaherkkyys ja ilmaisimien määrä eli resoluutio. Nykytekniikalla valmistettavissa ilmaisimissa voi olla jopa 1024 x 1024 elementtiä, jolloin sensoreissa ei tarvitse käyttää pyyhkäisymekaniikkaa [57, s. 334].

Lämpösensorien lämpöerottelukykyä voidaan arvioida sen pienimmällä havaittavissa olevalla lämpötilaerolla eli MRTD:llä (Minimum Resolvable Temperature Difference). Kyseinen ominaisuus on riippuvainen muun muassa sensorin lämpöherkkyydestä ja erottelukyvystä, ja siinä huomioidaan myös muita ominaisuuksia kuten sensorin sisäinen kohinataso, resoluutio sekä signaalinkäsittelyn vaikutukset ja optiikan virheet. Suorituskykyä voidaan myös ilmaista myöskin vertaamalla lämpötilaeron suhdetta sensorin ilmaisimen kohinatasoon, jolloin saadaan NETD eli Noise Equivalent Temperature Difference. NETD ilmaisee käytännössä, millä kohteen lämpötilalla ilmaisimessa saadaan signaali-kohinasuhteeksi 1. [57, s. 327–328] NETD-arvoon vaikuttavat optiikan tehollinen läpimitta eli polttovälin ja valotusaukon suhde, kohteen säteilyn intensiteetin muutos tarkasteltavalla taajuusalueella ja taustamelu [48, s. 47]. Nykyisien jäähdyttämättömien bolometrinen ilmaisimien resoluutiot ovat yleensä 320 x 240 tai 640 x 480 pikseliä pikselien koon ollessa 25 x 25 tai 35 x 35  $\mu\text{m}$ . NETD-arvot ovat alle 60 mK ja joissain järjestelmissä jopa 30 mK. Tulevaisuudessa resoluutio tulee kasvamaan pikselikoon ja NETD-arvojen samalla pienentyessä. [48, s. 56]

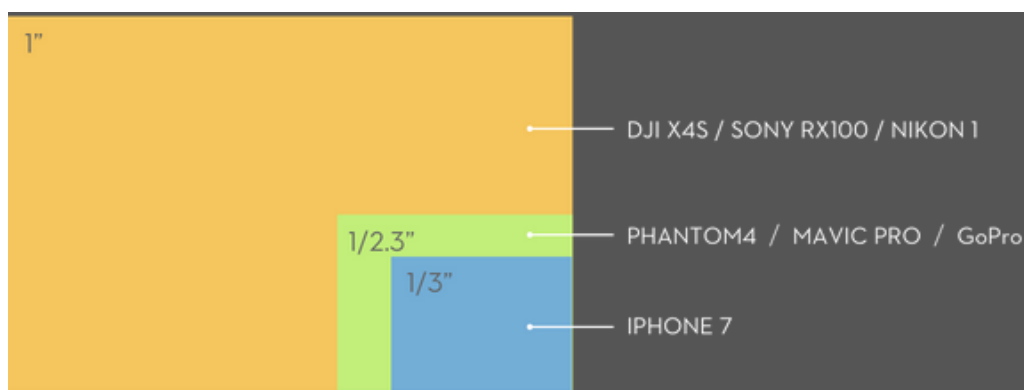
Jäähdyttämättömien lämpöenssoreiden suorituskykyä arvioitaessa tulee siis kiinnittää huomiota ennen kaikkea resoluutioon, NETD-arvoon sekä optiikan linssin läpimittaan ja polttoväliin. Resoluutio linssin läpimitta löytyvät yleensä valmistajan ilmoittamissa teknisissä spesifikaatioissa. NETD-arvoa taas ei ole välttämättä ilmoitettu valmistajan toimesta suoraan, vaan sensorin ominaisuuksissa on ilmoitettu lämpötilan mittauksen tarkkuus asteina tai prosentteina.

Suuri resoluutio ja optiikan koko parantavat sensorin suorituskykyä. Korkea resoluutio vaatii kuitenkin enemmän ilmaisinelementtejä, mikä lisää hintaa. Suuri linssin läpimitta ja siten suuri valotusaukko mahdollistavat suuremman infrapunasäteily määrän keräämisen ilmaisimeen, mikä edelleen parantaa sensorin suorituskykyä. Linssit on valmistettu kalliista germaniumista, joten linssien kasvattaminen lisää merkittävästi sensorin hintaa [38]. Erityisen suurten linssien käyttö lisää sensorin painoa. Linssin polttoväli määrittää sensorin suurennuksen ja näkökentän kokoon, ja moniin sensoreihin on saatavilla eri polttovälillä olevia linsejä. Voimakkaasti suurentavan linssin käyttö kaventaa näkökenttää ja vaikeuttaa siten laajan alueen valvontaa.

### 3.4. Nykyiset multikopterien sensorit

Multikopterien käytön yleistyessä yksityis- ja ammattikäytössä ovat niihin suunniteltujen sensorien määrä ja laatu lisääntyneet. Aikaisemmin multikoptereissa ei välttämättä ollut omia sensoreita, vaan niiden kanssa oli suunniteltu käytettävän esimerkiksi GoPro-kameroita. Multikopterivalmistajista esimerkiksi DJI julkaisi ensimmäisen kiinteällä sensorilla varustetun tuotteen Phantom Visionin vasta vuonna 2013 [37]. Multikopterien hyötykuormien kasvaminen ja sensortekniikan kehittyminen mahdollistavat jo varsin suorituskykyisten sensorien käytön multikoptereissa. Sensorit ovat lähes poikkeuksetta asennettu vakauttavaan gimbaaliin, joka pitää sensorin vakaana multikopterin liikkeestä ja värinästä huolimatta.

Multikoptereissa yleisimpiä ovat pienillä CMOS-ilmaisimilla varustetut 4K-kamerat. Täysikokoista 35 millimetrin kennoa ei kokorajoitusten takia ole mahdollista käyttää, ja nykyisissä sensoreissa ilmaisimien koot ovat 1/3", 1/2.3", 1" tai 4/3" tuotteen hintaluokasta riippuen. Ilmaisimen koko vaikuttaa yksittäisen ilmaisinelementin eli pikselin kokoon. Suurempi ilmaisinelementti kykenee keräämään enemmän valoa, ja suurempi ilmaisin kykenee parempaan kuvaalaatuun.



Kuva 19: Eri ilmaisimien suhteellinen kokoverailu [11]

Hankittavan multikopterin hintaluokka määrittää, minkälaisia sensoreita siihen on saatavilla. Multikoptereita käsittelevässä pääluvussa sivuttiin aiemmin jo eri hintaluokkien hyötykuorimia. 1000 euron hintaluokan multikoptereiden sensorit ovat pääosin 1/2.3" CMOS-ilmaisimella varustettuja 4K-kameroita. Näitä sensoreita löytyy esimerkiksi DJI:n Phantom 4- ja Mavic-multikoptereista sekä Yuneecin Typhoon 4K:sta ja Parrotin Bebob 2:sta. Näille sensoreille on tyypillistä suhteellisen laaja, 70 – 90 asteen näkökenttä ja 4096 x 2160:sta pikselin videoresoluutio [1]. Sensorit ovat yleensä integroituja multikopteriin, eikä niitä ole suunniteltu vaihdettavaksi.

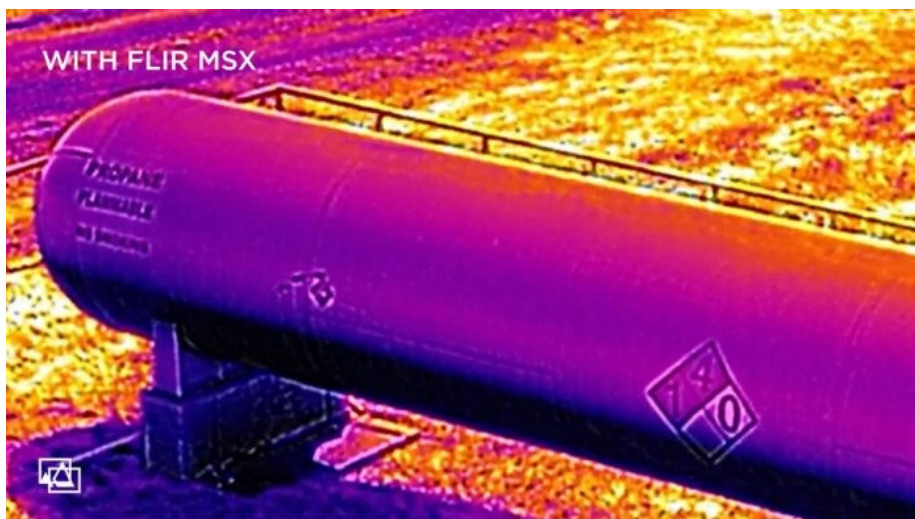
3000- 5000 euron hintaluokan multikoptereihin on saatavilla huomattavasti monipuolisemmin erilaisia sensoreita. Näkyvän valon alueella toimivissa sensoreissa sensoreiden ilmaisimien koot ja resoluutiot ovat suurempia. DJI:n X4S- ja X5S-kamerat ovat hyviä esimerkkejä laadukkaammista sensoreista. Tämän hintaluokan sensorit on tarkoitettu ammattimaiseen video-kuvaamiseen, ja niihin on myös vaihdettavissa normaaleihin digitaalikameroihin tarkoitettuja linsejä eri polttoväleillä [27][28]



Kuva 20: DJI X5S-gimbaali [101]

Hyötykuormaltaan suorituskykyisimpiin multikoptereihin on saatavilla optisella suurennoksella varustettuja kameroita. Optinen suurennos mahdollistaa hyvän yleiskuvan saamisen laajalla näkökentällä ja haluttuun kohteeseen tarkentamisen tarvittaessa. Esimerkiksi DJI:n Matrice 100- ja 200-malleihin on saatavilla Z30-gimbaali, jossa on 30-kertainen optinen suurennos. Pelkän Z30-gimbaalin hinta on tällä hetkellä 10 000 €, joten optisella suurennoksella varustetun sensorin käyttö multikopterissa on toistaiseksi kallista [15].

Multikoptereihin on saatavilla myös lämpökameroita. Multikoptereissa käytettävät lämpökamerat ovat jäähdyttämättömiä mikrobolometrisiä ilmaisimia, ja parhaimmillaan niiden resoluutiot ovat 640 x 512. Merkittävien multikoptereihin suunniteltujen lämpökameroiden valmistaja on FLIR, jonka valmistamia ilmaisimia käytetään myös DJI:n omissa Zenmuse XT- ja XT2-gimbaaleissa [29]. Lisäksi mielenkiintoisia ovat tuotteet, joissa on lämpökamera ja näkyvän valon alueen kamera samassa sensorissa. Esimerkki tällaisesta tuotteesta on FLIR:n Duo Pro, jossa on näkyvän valon alueen 4K-kameran lisäksi mallista riippuen 640 x 512 tai 336 x 256-resoluution lämpökamera. FLIR:n tuotteissa on myös mahdollista käyttää yrityksen omaa MSX-tekniikkaa, jossa lämpökameran ja näkyvän valon alueen kamerasuoritus yhdistetään [41].



Kuva 21: DJI:n Zenmuse XT2-sensorin kuva, jossa on yhdistetty optisen ja lämpökameran kuva FLIR:n MSX-tekniikalla [7]

Tutkimuksen aikana ei löytynyt kaupallista multikopteriin suunniteltua sensoria, jossa olisi mahdollisuus halutun pisteen koordinaatin määrittämiseen sotilaslennokkien tapaan. Multikoptereissa on kuitenkin GPS-vastaanottimet ja kopterin paikkatieto on useimmissa tuotteissa saatavilla lennon aikana. Osoittamalla kameralla suoraan alaspäin voidaan arvioida milloin



kopteri on suoraan halutun pisteen yläpuolella ja pyrkii täten määrittämään pisteen paikka-tieto.

### 3.5. Sensoreiden suorituskyvyn arviointi

Tämän pääluvun ensimmäisessä kappaleessa käsiteltiin sensorin suorituskyvyn mittaamista Johnsonin kriteereihin perustuen. Paras tapa verrata sensorien suorituskykyä olisi suorittaa käytännön testausta kullakin sensorilla vertailukelpoisissa olosuhteissa. Käytännössä eri sensoreiden testaaminen vertailukelpoisissa olosuhteissa on usein vaikeaa järjestää, joten suorituskykyä tulee pystyä arvioimaan muilla tavoin. Yhtenä vaihtoehtona on arvioida sensorien suorituskykyä niiden teknisten ominaisuuksien perusteella. Sensorille voidaan laskemalla määrittää pikselin koko maastossa tietyltä etäisyydeltä kuvattuna. Pikselin kokoa maastossa voidaan puolestaan verrata kohteen tiedettyyn kokoon, jolloin tiedetään montako pikseliä kohteen päälle asetuu sensorin tuottamassa kuvassa. Näitä pikselimääriä voidaan verrata tämän pääluvun alussa esitettyihin Johnsonin kriteereihin ja niiden eri sovelluksiin.

Laskeminen tulee suorittaa sellaisilla arvoilla, jotka ovat helposti saatavilla valmistajilta. Yleensä sensoreille on aina ilmoitettu kuvasuhde sekä resoluutio. Pelkästään näiden kahden ominaisuuden perusteella voidaan määrittää pikselin koko maastossa halutulle etäisyydelle. Lasketaan ensin yksittäisen pikselin näkökenttä eli IFOV (Instantaneous Field of View). Yhden pikselin IFOV milliradiaaneilla saadaan kaavasta:

$$\frac{hFOV}{hRES} \times \frac{\pi}{180} \times 1000, \text{ jossa:}$$

hFOV= Sensorin horisontaalinen näkökenttä

hRES= Sensorin horisontaalinen resoluutio

Esimerkiksi DJI:n Phantom 4-multikopterin sensorin horisontaalinen näkökenttä on 94 astetta ja sen horisontaalinen resoluutio on 4096 pikseliä [23]. Täten sensorin IFOV on:

$$\frac{94}{4096} \times \frac{\pi}{180} \times 1000 = 0,400540 \text{ mRAD}$$

Tiedettäessä sensorin IFOV voidaan laskea etäisyys, jolloin korkeudeltaan tiedetyn kohteen päällä on sensorin tuottamassa kuvassa haluttu määrä pikseleitä. Tähän voidaan käyttää kaavaa:

$$\frac{h}{\frac{IFOV}{1000} \times n}, \text{ jossa:}$$

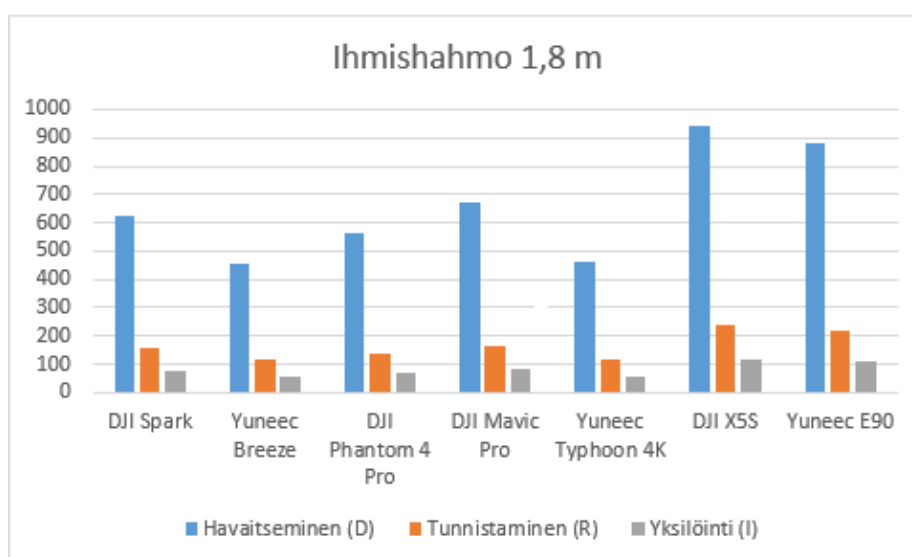
h= Tähystettävän kohteen koko

n= Kohteen päälle haluttu pikselimäärä

Alkuperäisistä Johnsonin kriteereistä johdetut tarvittavat pikselimäärät kohteen päällä ovat havaitsemiseen 3, tunnistamiseen 12 ja yksilöintiin 21 pikseliä. Haluttaessa laskea nämä etäisyydet 1,8 metriä pitkälle ihmiselle voidaan kaavat kirjoittaa muotoon:

$$\text{Havaitseminen: } \frac{1,8}{\frac{IFOV}{1000}} \times 3 \quad \text{Tunnistaminen: } \frac{1,8}{\frac{IFOV}{1000}} \times 12 \quad \text{Yksilöinti: } \frac{1,8}{\frac{IFOV}{1000}} \times 21$$

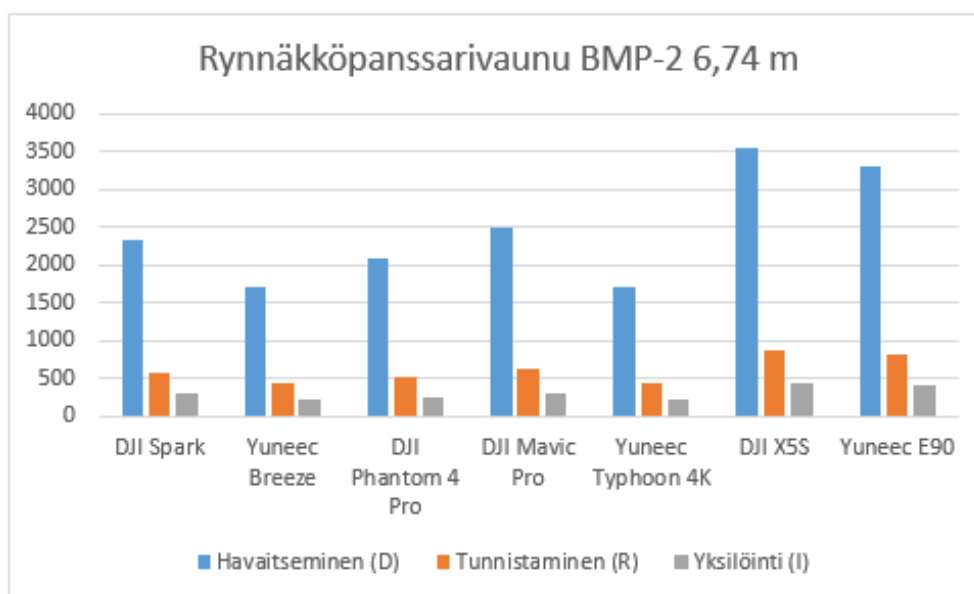
Esimerkiksi DJI:n Phantom 4-multikopterin sensorin arvioidut havaitsemis- tunnistamis- ja yksilöintietäisyydet ihmishahmole ovat 1498 metriä, 374 metriä ja 214 metriä. Aiemmin todettiin Johnsonin kriteereistä suoraan johdettujen pikselimäärien olevan liian optimistisia. Käytettäessä aiemmin esiteltyjä Bob Mesnikin soveltamia pikselimääriä saadaan vastaaviksi etäisyyksiksi 562 metriä, 140 metriä ja 70 metriä. Näitä lukuja voidaan pitää realistisempina. Vertaillaan eri hintaluokille tyypillisten sensorien suorituskykyä. Vertailuun on valittu muutama eri valmistajan sensori kustakin hintaluokasta. Vertailussa on laskettu sensorien oletetut DRI-etäisyydet ihmishahmole sekä BMP-2-panssariajoneuvolle, jonka pituus on 6,74 metriä [87]. Vertailussa on käytetty Mesnikin esittämiä pikselimääriä, eli 8 pikseliä havaitsemiseen, 32 pikseliä tunnistamiseen ja 64 pikseliä yksilöimiseen. Vertailussa perustuu pelkästään kuva-suhteeseen ja resoluutioon, eikä esimerkiksi sensorin ilmaisimen kokoa, valaisuolosuhteita tai kohteen ja taustan välistä kontrastiero oteta huomioon.



Taulukko 4: Arvioidut DRI-etäisyydet ihmishahmole [Liite 1]

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että 500-1000 euron hintaluokassa olevien multikoptereiden 4K-suorituskyvyt eivät eroa merkittävästi toisistaan. Laskennalliset havaitsemisetäisyydet vaihtelevat sensorin näkökentän leveyden mukaan 450-670 metrin välillä. Tunnistusetäisyydet vaihtelevat noin 110-170 metrin välillä ja yksilöintietäisyydet noin 60-80 metrin välillä. Kalliimman hintaluokan koptereissa käytettäväksi suunnitelluissa X5S- ja E90-sensoreissa vastaavat etäisyydet olivat noin 900, 200 ja 100 metriä. Etäisyydet ovat siis noin 65 prosenttia suuremmat kuin 1000 euron hintaluokan multikoptereiden sensoreissa.

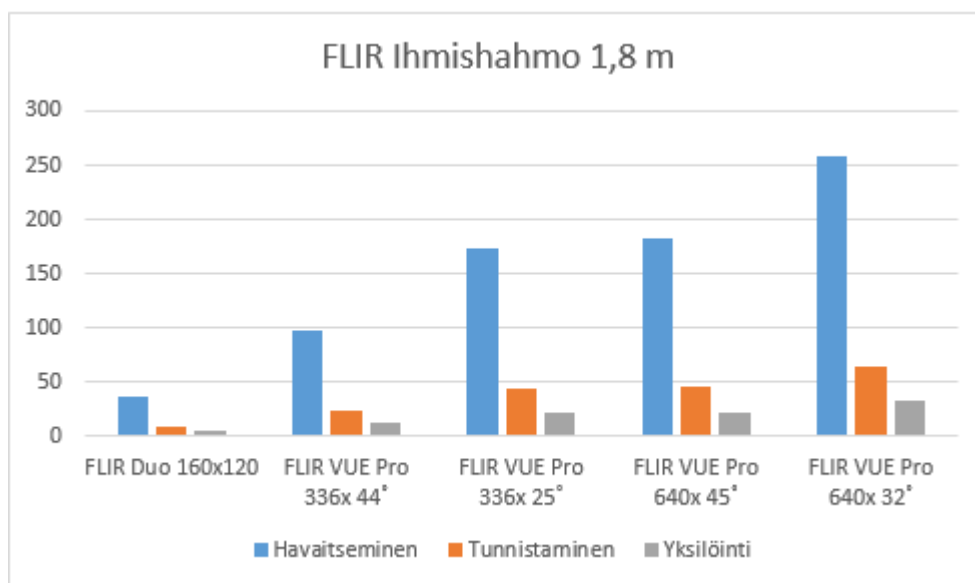
Optisella suurennoksella varustetun DJI:n Z30-sensorin etäisyydet maksimisuurennoksella ovat omaa luokkaansa, eikä niitä ole esitetty yllä olevassa taulukossa sen selkeyttämiseksi. Ihmiskohteelle laskemalla Z30:n havaitsemisetäisyydeksi saatiin lähes 11 kilometriä. Tunnistus- ja yksilöintietäisyydet olivat pyöristettynä 2700 metriä ja 1350 metriä. Etäisyydet ovat 500-1000 euron hintaluokan 4K-sensoreihin verrattuna 20-kertaisia ja X5S- ja E90-sensoreihin verrattuna yli kymmenkertaisia. Tulosten perusteella kyseisellä sensorilla varustetulla multikopterilla voidaan lentää yli kilometrin korkeudessa ja silti tehdä käyttökelpoisia havaintoja.



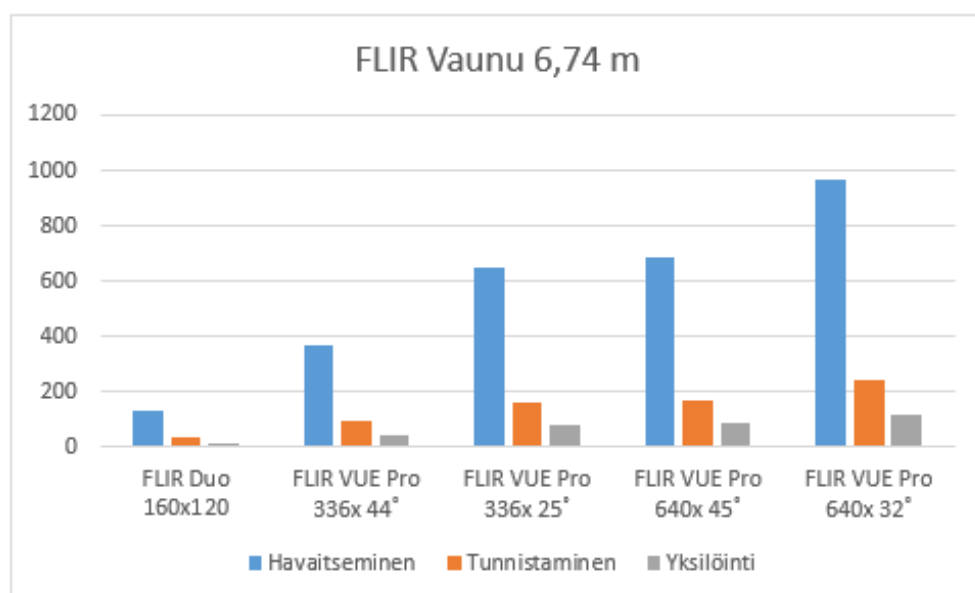
Taulukko 5: Arvioidut DRI-etäisyydet panssariajoneuvolle [Liite 1]

Panssariajoneuvon osalta etäisyydet olivat 4K-sensoreiden osalta keskimäärin hieman yli 2000 metriä, 500 metriä ja 250 metriä. X5S- ja E90-sensoreilla etäisyyksiksi saatiin noin 3500 metriä, 800 metriä ja 400 metriä. Z30:n osalta etäisyydet olivat 40 kilometriä, 10 kilometriä ja 5 kilometriä. Optisella suurennoksella varustetun kameran suorituskyky kohteiden havaitsemisessa, tunnistamisessa ja yksilöinnissä on siis täysin omaa luokkaansa.

Lasketaan yllä olevalla menetelmällä vastaavat etäisyydet multikoptereissa käyttöön soveltuvilla lämpökameroilla. Vertailuun on valittu FLIR:n lämpökameroita kolmella eri resoluutiolla sekä Vue Pro:n osalta kahdella eri linsсивaihtoehdolla kullekin versiolle. Laskenta on hyvin yksinkertaistettu, eikä siinä ole otettu huomioon lämpökameroiden NETD-arvoja. Etäisyydet on esitetty alla olevassa taulukossa:



Taulukko 6: Arvioidut DRI-etäisyydet ihmishahmolle lämpökameroilla [Liite 1]



Taulukko 7: Arvioidut DRI-etäisyydet panssariajoneuvolle lämpökameroilla [Liite 1]

Laskennan perusteella lämpökameroiden havaitsemis-, tunnistus-, ja yksilöintietäisyydet ovat pienemmät kuin edullisimmissakin näkyvän valon alueen sensoreissa. Lämpökameran etuna näkyvän valon sensoreihin on kuitenkin hyvä kontrasti lämpimän kohteen ja taustan välillä, jonka avulla pystytään havaitsemaan kohde helpommin kuin näkyvän valon alueen sensoreilla. Näin ollen yllä olevien taulukoiden laskennallisia havaitsemisetäisyyksiä ei voida pitää vertailukelpoisina. Sen sijaan tunnistamiseen ja yksilöintiin tarvitaan lämpökameroilla yhtä laadukasta kuvaa kuin näkyvän valon alueen kameroillakin, joten taulukoiden tunnistamis- ja yksilöintietäisyydet ovat vertailukelpoisia.

Lämpökamerat ovat siis suorituskykyisimpiä havainnon tekemisessä, mutta kohteen matalan resoluutionsa takia ne eivät sovellu hyvin kohteen tunnistamiseen ja yksilöintiin. Laskennan perusteella voidaan myös todeta kaikkein halvimpien lämpökameroiden suorituskyvyn olevan erittäin heikko niiden matalan resoluution takia. Tutkittujen jäähdyttämättömien lämpökameroiden suorituskyvyt ovat selvästi Puolustusvoimissa käyttämää jäähdytettyä MATIS-lämpökameraa tai jäähdyttämätöntä Phantom-lämpökameraa heikommat [83, s. 75]. Multikopteriin asennetun lämpökameran etuna käsikäyttöisiin onkin mahdollisuus ulottaa tähystys kauemmas ja mahdollistaa tähystys korkeilta kulmilta.

Yllä suoritettujen laskennan avulla saatujen tulosten käytettävyys riippuu menetelmän luotettavuudesta. Tarkastellaan miten laskemalla saadut tulokset eroavat käytännön testeissä saaduista tuloksista yhden lämpökameran osalta. Maanpuolustuskorkeakoulun Sotatekniikan laitoksen opintojakson 4C08D – Tekninen kenttäkoe ja analyysi” aikana tutkija suoritti osana työryhmää sensoritestejä Santahaminassa. Testauksessa oli Workswell-nimisen valmistajan WIRIS-lämpökamera, jonka näkökenttä on 45 astetta ja resoluutio 640 x 512. Testattu WIRIS-lämpökameran näkökenttä ja resoluutio ovat siis samat kuin laskennassa 45 asteen linssillä varustetun FLIR VUE Pro 640x-lämpökameran. WIRIS-kameralla suoritetuissa testeissä tunnistamis- ja yksilöintietäisyyksiksi saatiin 120 metriä ja 28 metriä. [2]



Kuva 22 & 23: WIRIS-lämpökameralla otetut kuvat 120 metristä ja 28 metristä. [2]

Tunnistusetäisyys oli laskemalla saatua 46 metrin etäisyyttä selkeästi suurempi, mutta yksilöintietäisyys erosi laskemalla saadusta 23 metrin tuloksesta vain vähän. WIRIS-kameralla tehdyissä kokeissa katsojat tiesivät mitä kohdetta etsivät, ja lisäksi kohteina olevat ihmiset seisovivat keskellä urheilukenttää, josta heidät oli helppo havaita. Tämä saattaa selittää suuremman tunnistusetäisyyden. Yksilöintietäisyys oli käytännön kenttätetstissä lähes sama kuin laskemalla saatu, joten laskemalla saatuja arvoja voidaan pitää suhteellisen luotettavina ainakin yksilöintietäisyyksien osalta.

### 3.6. Yhteenveto multikoptereiden sensorien suorituskyvystä

Multikoptereihin saatavilla olevat sensorit ovat lähes poikkeuksetta näkyvän valon alueen kameroita tai lämpökameroita. Näkyvän valon alueen kameroissa käytetään CMOS-kennoja, ja edullisemmissakin multikoptereissa on 4K-resoluutioon kykenevä kamera. Multikopterien kanssa käytettäväksi suunnitellut lämpökamerat ovat jäähdyttämättömiä mikrobolometrisiä ilmaisimia, joiden resoluutiot ovat enimmillään 640 x 512.

Sensorien suorituskykyä voidaan arvioida Johnsonin kriteereillä muuntamalla kriteerien alkuperäiset jaksomäärät pikseleiksi. Tietämällä sensorin näkökentän koko ja resoluutio voidaan laskemalla arvioida, miltä etäisyyksiltä kyetään sensorin avulla havaitsemaan, tunnistamaan ja yksilöimään kohde. Laskennalla saadut tulokset vastasivat melko hyvin käytännön testauksella saatuja tuloksia yhden sensorin osalta, joten muitakin laskemalla saatuja tuloksia voidaan pitää melko luotettavina.

Kopterin hintaluokka ja hyötykuorma määrittävät, kuinka suorituskykyisiä sensoreita siinä pystytään käyttämään. 500–1000 euron hintaluokan multikoptereissa on kiinteät 4K-sensorit, kun taas kalliimmissa tuotteissa voidaan käyttää laadukkaampia suuremman resoluution kameroita, suurentavalla optiikalla varustettuja kameroita sekä lämpökameroita. Suoritetun laskennan perusteella 500–1000 euron hintaluokan multikoptereiden 4K-sensorien suorituskyky ei ole merkittävästi heikompä kuin kalliimpien korkearesoluutioisten kameroiden. Optisella suurennoksella varustetulla kameralla voidaan sen sijaan merkittävästi lisätä kykyä havaita, tunnistaa ja yksilöidä kohde.

Lämpökameran käytöllä saavutetaan pimeätoimintakyky, sekä sillä kyetään havaitsemaan muuten vaikeasti havaittavia kohteita paremmin. Nykyisten multikoptereiden kanssa käytettäväksi suunniteltujen lämpökameroiden resoluutiot ovat kuitenkin niin pieniä, että niiden kyky tunnistaa ja yksilöidä kohteita on heikko. Laskennan perusteella tulisi käyttää vähintään 336 x 256 resoluutioisia lämpökameroita. Paras suorituskyky saavutetaan multikopterilla, jossa voidaan käyttää samanaikaisesti lämpökameraa ja optisella suurennuksella varustettua näkyvän valon alueen kameraa. Tällöin lämpökameralla voidaan havaita kohde peitteisessäkin maastossa, jonka jälkeen se kyetään tunnistamaan tai yksilöimään suurentavalla kameralla.

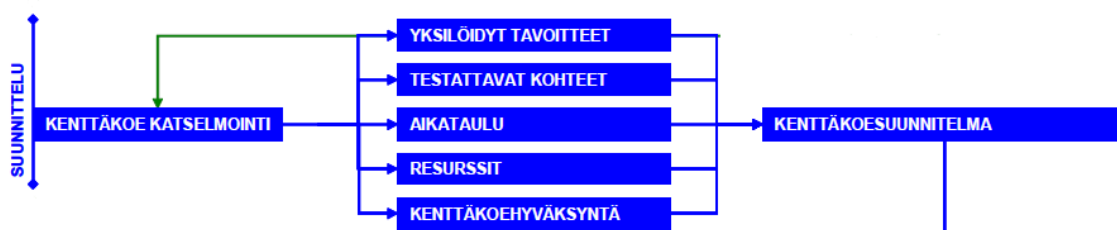
## 4. MULTIKOPTERIN SUORITUSKYVYN ARVIOINTI KENTTÄKOKEELLA

### 4.1. Kenttäkokeen suunnittelu

Aikaisemmissa kappaleissa on tutkittu kaupallisten multikoptereiden ja niihin soveltuvien sensorien suorituskykyä tuotteista saatavilla olevien tietojen perusteella. Pelkästään valmistajan ilmoittamien teknisten ominaisuuksien perusteella on kuitenkin vaikeaa saada hyvää kuvaa tuotteiden käytännön suorituskyvystä. Käytännön testauksella pyritään tarkentamaan ja vahvistamaan teorialuvuissa havaittuja seikkoja.

Kenttäkokeen käsitettä ei ole kuvattu Puolustusvoimien määritelmärekisterissä, ja termin tarkka merkitys vaihtelee käsiteltävän tapauksen ja näkökulman mukaan. Harri Nuutisen mukaan kenttäkokeessa tutkitaan materiaalin soveltuvuutta joukkojen käyttöön käytännön olosuhteissa. Nuutinen on diplomityössään esittänyt kenttäkokeen määritelmäksi seuraavaa: “hankittavan laitteen tai järjestelmän vaatimusten todentaminen käyttäjäorganisaatiolla operatiivisen konseptin määrittämissä käyttöolosuhteissa. Kenttätestit tulee suorittaa sekä kesä- että talviolosuhteissa. Kenttätestin tavoitteena on laitteen tai järjestelmän vaatimusten todentaminen siten, että ko laite / järjestelmä voidaan hyväksyä siltä osin sotavarusteeksi”. [73, s. 49–50]

Yllä olevan määritelmä ei sovellu sellaisenaan tämän tutkimuksen käyttöön. Hankittavaa laitetta tai järjestelmää ei ole tiedossa, eikä käyttäjän vaatimuksia tai operatiivista käyttökonseptia ole tehty. Tässä tutkimuksessa kenttätestauksen näkökulmana on tutkia yhden tuotteen ominaisuuksia kenttäolosuhteissa ja tarkentaa teorialuvuissa aikaisemmin saatuja havaintoja. Testausta suoritettiin ainoastaan talviolosuhteissa, jotka ovat multikopterien käytön kannalta haastavimpia.



Kuva 24: Kenttäkokeen suunnitteluprosessi [73, Liite 3]



Nuutisen mukaan kenttätestauksen suunnittelussa tulee määrittää testattavat kohteet, laatia tavoitteet, selvittää käytössä olevat resurssit sekä laatia aikataulu[73, Liite 3]. Tässä tutkimuksessa käytettävät resurssit olivat verrattain rajalliset, ja testausta suoritettiin Phantom 4-multikoptereilla yhtenä viikkona vuoden 2018 helmikuussa. Phantom 4-multikopteri on kuitenkin hyvä esimerkki hintaluokkansa tuotteesta, joten sitä testaamalla voidaan saada yleisiä havain-toja noin 1000 euron multikoptereiden suorituskyvystä. Aikataulun osalta käytettävissä oli kaksi testipäivää.

Testien tavoitteina oli tarkentaa kirjallisuustutkimuksen perusteella ilmenneitä seikkoja. Testien tavoitteiksi valittiin seuraavat:

- Yleis- ja tyyppitunnistusetäisyydet Phantom 4-multikopterin 4K-kameralle
- Kopterin toimintakyky alhaisissa lämpötiloissa
- Kopterin havaittavuus sen tuottaman roottorimelun perusteella
- Metsämaaston vaikutus ohjausyhteyteen
- Kolmannen osapuolen kehittämien sovellusten käyttö alueiden kuvaamisessa

Aikaisemmassa pääluvussa laskettiin havaitsemis-, tunnistus- ja yksilöintietäisyydet Phantom 4-multikopterin sensorille. Testaamalla sensorin suorituskykyä käytännössä pyrittiin saamaan parempi käsitys noin 1000€ hintaluokan kopterille tyypillisen sensorin suorituskyvystä sekä vertaamaan käytännön tuloksia laskemalla saatuihin tuloksiin.

Phantom 4-multikopterin alhaisimmaksi käyttölämpötilaksi on ilmoitettu monen saman hintaluokan tuotteen tavoin 0 °C. Multikopterin käytettävyyden kannalta suomalaisissa olosuh-teissa on tärkeää määrittää, toimiiko multikopteri myös matalammissa lämpötiloissa mikäli sen akku kyetään lämmittämään ennen lennätystä vai vaikuttaako kylmyys myös multikopte-rin muiden komponenttien toimintaan.

Sotilaskäyttöä ja kohteiden tiedustelua ajatellen multikopterin tuottama roottorimelu on oleel-linen tekijä. Multikopterin tuottama ääni on helposti tunnistettavissa, ja se voi paljastaa tähys-tämisen vastustajalle. Näin ollen on perusteltua selvittää, kuinka kaukaa ja korkealta multi-kopterin tuottama ääni on kuultavissa ja verrata tätä etäisyyttä sensorin suorituskykyyn. Näin saadaan selville, kyetäänkö multikopterin sensorilla tekemään havaintoja sellaisen etäisyyden päästä, josta sen tuottama ääni ei ole kuultavissa.

Testattavan Phantom 4-multikopterin ohjausyhteys ja videolinkki toimivat 2,4 GHz:n taajuusalueella. Aikaisemmin tutkimuksessa todettiin, että tällä taajuusalueella maastoesteet aiheuttavat ohjausyhteyden voimakasta vaimenemista. Yleensä suositellaankin suoraa näköyhteyttä kauko-ohjaimen ja multikopterin välillä. Tuotteiden käytön kannalta Suomen oloissa on tärkeää tutkia, millä tavoin metsämaasto vaikuttaa ohjausyhteyteen. Mikäli pienikin puusto kauko-ohjaimen ja kopterin välillä estää ohjausyhteyden muodostumisen rajoittuvat mahdolliset lennätyspaikat huomattavasti. Sen sijaan mikäli puusto ei täysin estä ohjausyhteyden muodostumista voidaan lennätyspaikka perustaa suojaisempiin paikkoihin.

Kaupallisten multikoptereiden käytön etuna on mahdollisuus käyttää kolmannen osapuolen kehittämää kaupallista sovellusta suorituskyvyn lisäämiseksi. Pääosa kaupallisista multikoptereista käyttää Android- tai iOS-käyttöjärjestelmällä varustettua älylaitetta ohjausjärjestelmänsä osana, ja näihin laitteisiin on saatavilla useita sovelluksia, jotka on suunniteltu ortokuvien ja 3D-mallien luomiseen multikopterin sensoria hyväksikäyttäen. Testissä oli tarkoitus kokeilla muutamaa kaupallista sovellusta ja määrittää alustavasti niiden soveltuvuutta sotilas-toimintaan.

#### 4.2. Kenttäkokeen toteutus

Pahkajärvellä toimeenpantiin tutkimukseen liittyen multikopteritesti 20.–21.2.2018. Testi suoritettiin Pahkajärven ampuma-alueella ampumarjoituksen johdosta suljetussa ilmatilassa, mikä mahdollisti toiminnan yli 150 m lentokorkeudessa sekä lennätysten ilman tähytystä. Testit suoritettiin kahdella DJI Phantom 4-multikopterilla. Valmistajan ilmoittamat ominaisuudet multikopterille ovat:

- Paino: 1380 g
- Maksiminopeus 20 m/s
- Lentoaika: Noin 28 min
- Käyttölämpötila: 0° - 40 °C
- Kauko-ohjain: 2,4 GHz, lähetysteho 17 dBm (kantama 3500 m)
- Sensori: 1/2.3” CMOS, FOV 94°. Videoresoluutio 4096x2160

Testit suoritettiin Pahkajärven ampuma-alueella Emäntälahden tien alueella molempina päivinä klo 09.00-15.00. Testiolosuhteet mahdollistivat testien toteuttamisen hyvin. Ensimmäisenä testipäivänä lämpötila oli aamupäivällä -15 ja -10 °C välillä laskien iltapäiväksi -10 ja -5 °C välille. Sää oli koko päivän selkeä ja poutainen näkyvyyden ollessa erinomainen. Tuulta ei ollut havaittavissa. Toisena testipäivänä sääolosuhteet olivat lähes samanlaiset. Lämpötila oli aamupäivällä -20 ja -15 °C välillä ja iltapäivällä -15 ja -10 °C välillä. Testien aikana olosuhteet olivat siis kylmät ja selkeät. Tarkemmat kuvaukset testien toteutuksesta ja tuloksista on esitetty kutakin testin osaa käsittelevässä alaluvussa.

### 4.3. Sensorin yleis- ja tyyppitunnistusetäisyydet

Kameran suorituskyvyn testaamisen tarkoituksena oli määrittää yleis- ja tyyppitunnistusetäisyydet DJI Phantom 4-multikopterin kameralle. Kameran suorituskykyä testattiin kuvaamalla panssariajoneuvojen pienoismalleja sekä erilaisia kohteita maastossa. Testeissä ei tutkittu havaintoetäisyyksiä, koska testiryhmän tietäessä kohteiden sijainnit olisi havainnon tekemisen objektiivinen tarkastelu vaikeaa. Lisä

Ensimmäisessä sensoritestissä kuvattiin 1:100 mittakaavassa olevia panssariajoneuvojen pienoismalleja (BMD-1, BMP-2, 2S1, BTR-60) valkoista taustaa vasten. Kuvat otettiin 10 metrin - 0,5 metrin etäisyyksiltä puolen metrin porrastuksilla. Etäisyydet vastaisivat todellisessa mittakaavassa 1000 metrin – 50 metrin etäisyyksiä. Kuvat otettiin kopterin ollessa paikallaan pienen laatikon päällä, jolloin kamera oli noin samalla tasolla maalien kanssa. Yleis- ja tyyppitunnistamisen kriteereinä käytettiin testiryhmän jäsenten arviota siitä, kykenisivätkö he tekemään yleis- tai tyyppitunnistuksen kaikista kohteista kutakin kuvaa käyttäen.



Kuva 25: Pienoismallit kuvattuna 0,5 metrin päästä [54]

Toisessa sensoritestissä kuvattiin testiryhmän Hilux-maastohenkilöautoa, testaajia itseään sekä harjoitusalueella olevia käytöstä poistettuja T55M-vaunuja. Kohteita kuvattiin eri korkeuksissa sekä matalilla että korkeilla kulmilla eri korkeuksilta 50 metrin etäisyydestä aina 500 metriin. Kopterin tarkka etäisyys kuvattavasta kohteesta mitattiin laseretäisyysmittarilla. Harjoitusmaasto ja kuvattavien vaunujen sijainti ei mahdollistanut kuvaamista halutulla tavalla vaunun sivulta.

Ensimmäinen testissä havaittu seikka oli, että tunnistusetäisyydet videolinkin kautta iPadin näytölle välittyvästä kuvasta ovat selvästi pienemmät kuin tarkasteltaessa otettuja kuvia tietokoneen näytöltä. Lennon aikana saatuja tunnistusetäisyyksiä kyettiin kuitenkin parantamaan käyttämällä kuvien esikatseluominaisuutta. Pienoismallitestissä iPadin näytöltä tarkasteltaessa yleistunnistus saatiin 150 metriä vastaavalta etäisyydeltä ja tyyppitunnistus 100 metriä vastaavalla etäisyydellä. Käyttämällä kuvan esikatselua kyettiin kasvattamaan etäisyyksiä yleistunnistuksen osalta 250 metriin ja tyyppitunnistuksen osalta 200 metriin. Tarkasteltaessa kuvia tietokoneella saatiin yleistunnistus panssariajoneuvosta riippuen 400–500 metriä vastaavilta etäisyyksiltä. Tyyppitunnistus puolestaan saatiin 300–400 metriä vastaavilta etäisyyksiltä.



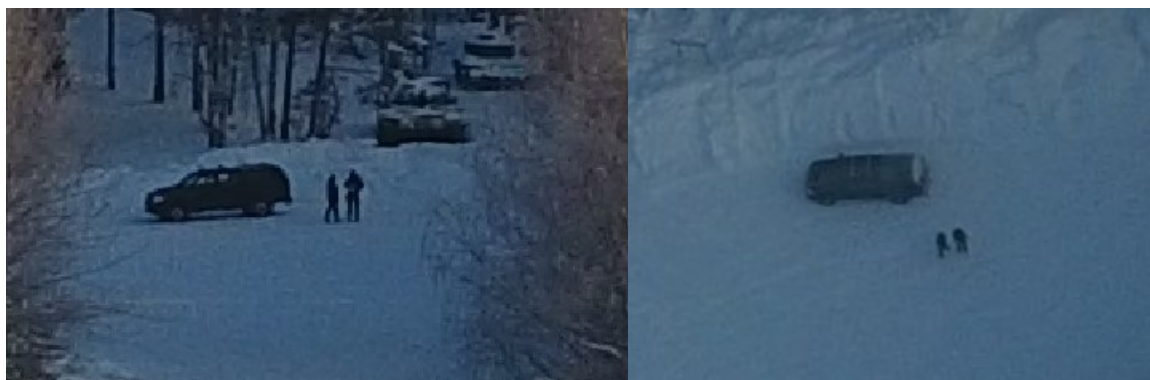
Kuva 26: Pienoismallit kuvattuna 350 metriä vastaavalta etäisyydeltä [54]

Sensoreita käsittelevässä pääluvussa tehdyssä laskennallisessa simulaatiossa Phantom 4:n 4K-kameralle saatiin BMP-2-vaunuun tunnistusetäisyydeksi 526 metriä ja yksilöntietäisyydeksi 263 metriä. Tunnistusetäisyyden vertautuessa yleistunnistukseen ja tyyppitunnistuksen yksilöintiin olivat erot siis varsin pienet. Pienoismallitestissä saatujen tulosten voidaan siis katsoa

tukevan simuloinnin uskottavuutta. Testin perusteella Phantom 4:n videolinkkiä käytettäessä tunnistusetäisyydet ovat merkittävästi pienemmät kuin kuvia jälkeenpäin tarkasteltaessa.

Realistisen kokoisiin kohteisiin tehtyjen testien tulosten analysointi osoittautui haastavaksi. Kuvia henkilöistä ja maastohenkilöautoista saatiin paljon eri kulmista, mutta sivulta kuvattua ja pienoismallitestiin nähden vertailukelpoista kuvaa panssariajoneuvosta ei onnistuttu saamaan. Kuvamateriaalin perusteella pystytään silti tekemään joitain huomioita sensorin suorituskyvystä.

Erittäin korkeilta kulmilta otetusta kuvamateriaalista on vaikeampaa tunnistaa kohteista kuin matalammilta. Monet ajoneuvojen ja ihmishahmojen tunnistettavat muodot ovat nähtävissä ainoastaan sivusta katsottuna. Auringon paistaessa kohteen varjo on korkeilta kulmilta hyvin nähtävissä, mikä saattaa helpottaa tunnistamista.



Kuva 27 & 28: Hilux-maastohenkilöauto ja kaksi henkilöä kuvattuna noin samalta kokonaisuudesta 40 metrin ja 200 metrin korkeuksista [54]

Sotilasajoneuvojen tunnistamisessa tunnistuskoulutus painottuu sivusta päin tai edestä otettuihin kuviin, jolloin ylhäältä kuvattua vaunua voi olla vaikeampi tunnistaa. Tunnistuskohdeista vaunun telapyörästä ja sivuprofiili eivät ole ylhäältä päin kuvattuna nähtävissä. Toisaalta vaunun tornin paikka runkoon nähden, mahdolliset katolla olevat luukut ja vaunun leveys ovat helpommin havaittavissa korkeilta kulmilta otetuissa kuvissa. Tunnistaminen ei siis välttämättä ole korkeilta kulmilta vaikeampaa, mikäli tunnistamista on harjoiteltu myös tästä kuvakulmasta.



Kuva 29: Käytöstä poistettu T55M-taistelupanssarivaunu kuvattuna 200 metrin korkeudelta [54]

#### 4.4. Multikopterin toiminta alhaisissa lämpötiloissa

Phantom 4-multikopterin valmistaja on ilmoittanut tuotteen toiminta-lämpötilaksi  $0^{\circ}\text{C}$  -  $40^{\circ}\text{C}$ . Testauksen tarkoituksena oli määrittää, miten multikopteri käyttäytyy huomattavasti kylmemmissä lämpötiloissa ja miten akun ja kopterin lämpötila lentoonlähdössä vaikuttaa toimintaa. Testipäivien lämpötilat vaihtelivat  $-5^{\circ}\text{C}$  ja  $-20^{\circ}\text{C}$  välillä, joten olosuhteet olivat testaukselle otolliset.

Kylmien olojen testaus aloitettiin lentämällä koelento autosta otetulla lämpimällä kopterilla ja akulla. Kopteria lennätettiin 21 minuuttia ja 34 sekuntia, jolloin akun varaus oli 18 %. Laskeutumisen jälkeen kopteri nostettiin vielä uudestaan ilmaan n. 20 sekunniksi, ja se käyttäytyi normaalisti. Kylmä ilma ei aiheuttanut havaittavia ongelmia kopterin toimintaan. Molempina päivinä muiden testien aikana lentoajat ja akkujen kestävyys noudattivat samaa linjaa käytettäessä lämpimiä akkuja. Akkujen varaus saavutti 30 % keskimäärin 18-19 minuutin lentoajan jälkeen. Valmistaja ilmoittama maksimilentoaika on 28 minuuttia, mutta testeissä ei turvallisuussyistä päästetty akun varausta laskemaan alle 30 prosenttiin. Laskennallisesti maksimilentoajat olisivat kuitenkin olleet n. 25 minuuttia. Lämpötilan vaihtelulla ei ollut merkittävää vaikutusta lentoaikoihin. Muutamalla kerralla lennon alussa GO-applikaatio ilmoitti akun lämpötilan olevan alle 15 astetta ja kehotti lämmittämään se yli 25 asteeseen ennen lentoonlähtöä. Ilmoituksia ei huomioitu ja lennot sujuivat ongelmitta.



Myöhemmin suoritettiin sama testi siten, että testaajien ajoneuvo oli käynnissä. Moottorin aiheuttaman taustamelun yli kopterin tuottaman äänen kykeni erottamaan vasta kopterin ollessa testaajien yläpuolella n. 150 metrin korkeudessa. Tämän lisäksi testauksen aikana lennettiin vaihtelevilla etäisyyksillä lähellä harjoittelevasta varusmiesjoukosta. Kopterin etäisyys on ollut lähimmillään noin 300 m korkeudella 100 metriä joukosta. Joukon kouluttajilta myöhemmin kysyttäessä he ilmoittivat, että kukaan harjoitusjoukosta ei ollut huomannut tai kuullut kopteria. Joukolla oli käynnissä polttotaisteluharjoitus, ja palava napalm aiheutti jatkuvaa kohinaa.

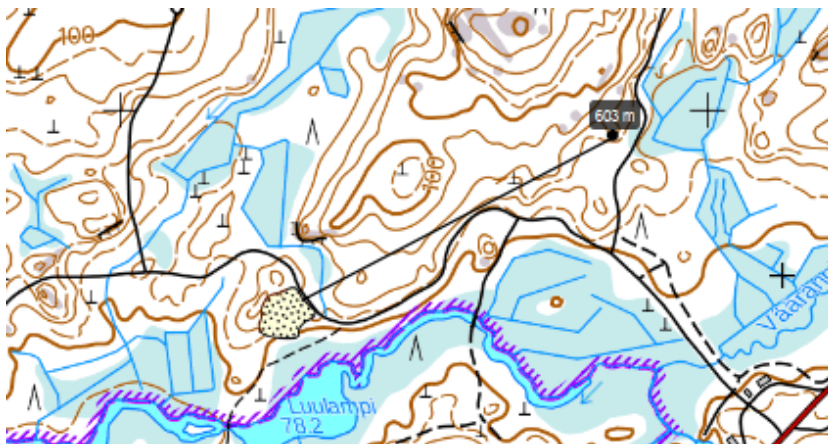
Tyynellä säällä ilman taustamelua Phantom 4:n kaltaisen multikopterin tuottama roottorimelu kuuluu erittäin kaukaa ja korkealta. Kopterin tuottama melu on omaperäistä ja helposti tunnistettavissa multikopterin tuottamaksi ääneksi, mikäli kuuntelija on kuullut sen aiemmin. Haluttaessa välttää paljastumista on kopteria lennätettävä niin kaukana kohteesta, ettei kopterin sensorilla pysty tekemään havaintoja. Taustamelun lisääntyessä kopterin tuottaman äänen havaittavuus pienenee merkittävästi.

Testin aikana ei tuullut merkittävästi, ja tuuliolosuhteiden vaikutusta ei tässä testissä otettu huomioon. Kokonaisuutena Phantom 4-multikopterin roottorien aiheuttama melu on sen sensorin suorituskykyyn ja tunnistusetäisyyksiin nähden merkittävä ja melu tulee ottaa huomioon, mikäli multikopterilla suoritettavan tiedustelun ei haluta paljastuvan.

#### 4.6. Metsämaaston vaikutus ohjausyhteyteen

Phantom 4-multikopterin ohjausyhteys ja videolinkki toimivat 2,4 GHz-taajuusalueella, jossa maastoesteet vaimentavat nopeasti säteilyn etenemistä. Testin tavoitteena oli todentaa ohjausyhteyden ja videolinkin toiminta, kun kopterin ja kauko-ohjaimen välissä on metsää. Testejä suoritettiin kaksi kappaletta. Molemmissa multikopteri asetettiin leijuntaan noin 4 metrin korkeudelle. Tähytjä jäi seuraamaan kopteria, ja lennättäjä lähti siirtymään ohjauslaitteen kanssa läheisen metsän läpi. Tähytjä ja lennättäjä kommunikoivat radiopuhelimen. Tavoitteena oli saavuttaa etäisyys, jolla videolinkki ja ohjaussignaali katkeavat. Metsätyyppi oli melko tiheää havumetsää.





Kuva 27: Ensimmäisen testin yhteyden katkeamispiste [50]



Kuva 28: Toisen testin yhteyden katkeamispiste [50]

Ensimmäisessä testissä ohjausyhteys katkesi 600m päässä kopterista. Yhteyden menetettyään kopteri laskeutui automaattisesti. Toisessa testissä päästiin 430 m päähän samoilla tuloksilla. Jälkimmäisessä testissä viimeisen ~30 metrin aikana yhteys katkesi, mikäli kauko-ohjain osoitti pois päin kopterista ja lennättäjä oli kauko-ohjaimen ja kopterin välissä. Lennättäjän kääntyessä ympäri yhteys palasi.

Tulokset olivat huomattavasti tutkijan odotettua paremmat. Yleisen ajattelun mukaan kopterin ja kauko-ohjaimen välillä pitää olla lähes suora näköyhteys. Ohjausyhteys ja videolinkki säilyivät kuitenkin testissä, vaikka ohjaimen ja kopterin välillä oli useita satoja metriä tiheää metsää. Paras kantama saadaan, kun kopterin ja kauko-ohjaimen välillä ei ole esteitä. Testin perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että ohjaussignaali ei häiriinny merkittävästi jos kopterin ja kauko-ohjaimen välillä on yksittäisiä puita tai oksia. Lennätyspaikan ollessa metsän keskellä lennätys onnistunee myös kohtuullisen etäisyyden päähän.

#### 4.7. Kaupallisten sovellusten käyttö alueiden ilmakehuvaamisessa

Viimeisenä testattiin kolmansien osapuolien eli muiden kuin laitevalmistaja DJI:n sovellusten käyttämistä alueiden automaattiseen ilmakehuvaamiseen sekä 3D-mallintamiseen. Tavoitteena oli selvittää, kyetäänkö sovelluksella tuottamaan kuvamateriaalia kartasta määritellyltä alueelta automaattisesti. Testeihin valittiin sellaiset sovellukset, joihin oli saatavilla ilmainen kokeilu.

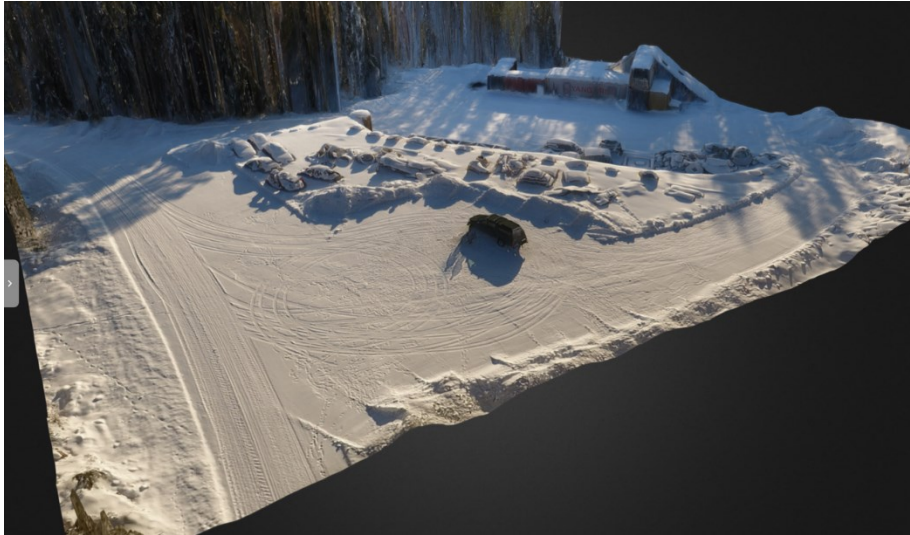
Testiä varten ladattiin Applen sovelluskaupasta kaksi sovellusta, DroneDeploy ja SkyCatch. Molemmissa on mahdollisuus määrittää karttakuvasta kuvattava alue, kuvauskorkeus ja muita asetuksia. Sovellukset käyttivät karttamateriaalina Google Mapsin tuottamia satelliittikuvia. Molemmissa sovelluksissa toiminta perustuu siihen, että ennalta ohjelmoitu kuvausohjelma käynnistetään ja sen jälkeen nousu, lento ja sen aikainen kuvaus sekä laskeutuminen ovat automaattisia. [32][90]

Testeissä ohjelmoitiin pienet kuvattavat alueet testipaikan päältä ja noin 700 m testipaikasta luoteeseen. Ennen lentoönlähtöä sovellus latsi kuvaustehtävän parametrit kopterin autopilotille. Kumpaakin sovellusta käytettäessä kopteri suoritti kuvaustehtävän täysin itsenäisesti operaattorin painettua tehtävän aloituspainiketta sovelluksessa. Lennot sujuivat ongelmitta, ja määritellyiltä alueilta saatiin kattava kuvamateriaali enimmäkseen kohtisuoraa ylhäältä kuvattuna.



Kuva 29: SkyCatch-sovelluksella tuotettu ilmakehuva sovitettuna Google Mapsin satelliittikuvan päälle [54]

Molemmissa sovelluksissa mainostettiin mahdollisuutta ladata otettu kuvamateriaali sovellustarjoajan verkkosivuille, jossa niistä koostetaan kuvatusta alueesta yhtenäinen ilmakehä ja 3D-malli. SkyCatch-sovelluksen nettisivuilla onnistuttiin tuottamaan hyvälaatuinen ilmakehä ja kelpollinen 3D-malli. DroneDeploy-sovelluksella saatiin puolestaan tuotettua erittäin laadukkaita ilmakehä ja 3D-malli.



Kuva 30: DroneDeploy-sovelluksella tuotettu 3D-malli [54]

Kaupallisella sovelluksella kyetään toteuttamaan karttapohjalta määritetyn alueen kuvaaminen automaattisesti. Sovelluksesta riippuen kopteri voi jatkaa tehtävänsä, vaikka ohjausyhteys katkeaisi. Täten saattaa olla maksimilentoajan puitteissa mahdollista suunnata kuvaustiedustelua sellaiselle alueelle, jonne kopterin ohjausyhteyden kantama ei riitä, vaikka tätä ei testeissä ehditty kokeilla.

Samaan tarkoitukseen suunniteltuja maksullisia sovelluksia on saatavilla iOS- ja Android-käyttöjärjestelmille useita. Pääosassa sovelluksia kuvien prosessointi tapahtuu sovellustarjoajan palvelimilla, mikä on tietoturvan kannalta ongelmallista. Sovelluksen avulla otettuja yksittäisiä kuvia kyetään kuitenkin tarkastelemaan suoraan kopterin muistikortilta.

#### 4.8. Yhteenveto kenttätestin tuloksista ja tulosten luotettavuuden arviointi

Phantom 4-multikopterin sensorin tunnistamisetäisyydet riippuvat monesta eri tekijästä. Testien perusteella voidaan arvioida, että kopterilla kyetään reaaliajassa tekemään yleistunnistus sotilasajoneuvosta noin 150 metrin päässä kohteesta ja tyyppitunnistus noin 100 metrin päästä. Kuvien esikatseluominaisuudella tunnistusetäisyyksiä voidaan merkittävästi lisätä. Tietokoneella kuvia lennon jälkeen tarkasteltaessa yleistunnistus voidaan tehdä maksimissaan 500 metrin päästä ja tyyppitunnistus maksimissaan 300–400 metrin päässä kohteista. Yläkulmilta otetuista kuvista tunnistaminen on haastavampaa, mikäli tunnistamista on harjoiteltu vain vaakatasosta otetuilla kuvilla.

Kopterin lentokorkeuden tulisi olla vähintään yli 150 metriä ja mielellään 300 metriä paljastumisen välttämiseksi. Täysin hiljaisissa olosuhteissa kopterin tuottama ääni kuuluu korkeallakin lennettäessä ainakin kilometrin päähän, ja se kuullaan ennen kuin sen sensorilla kyetään tuottamaan hyödyllistä tietoa. Multikopterien käyttöä tuleekin harkita tarkkaan, mikäli tiedustelun kohteen ei haluta havaitsevan olevansa tiedustelun kohteena.

Multikopterin olosuhteiden sietokyky osoittautui odotettua paremmaksi. Phantom 4-multikopterin käyttö kovillakin pakkasilla ei aiheuta ongelmia, mikäli akut saadaan lämmitettyä ennen lentoa. Sen sijaan kylmillä akuilla lentäminen ei ole mahdollista. Multikoptereiden käyttö pakkasella edellyttää mahdollisuutta lämmittää akut ajoneuvossa tai jollain muulla tavalla ennen lennätystä.

Sovelluskaupoista saatavilla olevien sovellusten avulla kyetään automaattisesti kuvaamaan alueita kaukana lennätyspaikasta, ja sovelluksen ominaisuuksista riippuen multikopteri voi kyetä suorittamaan kuvaustehtävän myös ohjausyhteyden katketessa. Kuvien prosessointi ilmakuviksi ja 3D-malleiksi vaatii kuvien lataamisen sovellustarjoajan palvelimille, mikä ei ole tietoturvallisuuden kannalta optimaalista.

Toteutettu kenttäkoe oli suppea, ja siitä saatuja tuloksia tulee pitää suuntaa antavina. Testejä tehtiin ainoastaan yhdellä multikopterimallilla, ja osakokeiden toistomäärät olivat pienet. Testiryhmä koostui tutkijan lisäksi ainoastaan yhdestä henkilöstä, jolloin subjektiiviseen näkemykseen perustuvat testit tunnistamisetäisyyksistä perustuivat ainoastaan kahden henkilön mielipiteeseen. Sensoritesteissä kuvattavia kohteita oli käytössä rajallisesti, eikä osaa kohteista kyetty kuvaamaan halutuista kulmista.

Kenttäkokeen toteutus pro gradu-tutkimuksen yhteydessä osoittautui haastavaksi tutkimusmenetelmäksi. Multikoptereita tutkivassa kenttäkokeessa tulisi olla käytössä riittävästi tuotteita eri hintaluokista, jotta niiden suorituskykyä voidaan vertailla samankaltaisissa olosuhteissa. Lisäksi sensoritesteissä kuvattavien kohteiden määrän tulisi olla monipuolisempi ja tunnistamista tulisi olla arvioimassa useampia henkilöitä. Multikopterin kykyä havaita ja tunnistaa kohteita eri maastoissa käytännössä tulisi tutkia havainnoimalla multikoptereiden käyttöä joukkojen harjoitustoiminnassa.

Kenttäkokeessa kerätty materiaali on puutteistaan huolimatta silti käyttökelpoista ja hyvän käsityksen 1000 euron hintaluokan multikopterin suorituskyvyn niistä osa-alueista, jotka eivät ole suoraan pääteltävissä laitteen teknisten ominaisuuksien perusteella. Kenttäkokeesta saadut tulokset sensorin tunnistusetäisyyksien osalta vastasivat sensoreja käsittelevässä pääluvussa Phantom 4:n sensorille laskettuja tunnistusetäisyyksiä, joten muillekin sensoreille laskettuja tunnistusetäisyyksiä voidaan pitää melko luotettavina.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 5.1. Tutkimuksen tulokset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia modernien, kaupallisten multikoptereiden suorituskykyä sotilaskäytössä ja tarkemmin niiden suorituskykyä tiedustelulavettina. Tutkimuksen pää-tutkimuskysymys oli: ”Mitä suorituskykyjä kaupallisilla multikoptereilla on taistelukentän valvonnassa?”. Pää-tutkimuskysymykseen pyrittiin vastaamaan kolmen apututkimuskysymyksen avulla.

Ensimmäinen apututkimuskysymys oli: ”Mikä on nykyisten kaupallisten multikopterien rakenne ja suorituskyky eri hintaluokissa?”. Multikopteri on kiinteäsiipisiin lennokkeihin ja perinteisiin helikopterimallisiin lennokkeihin verrattuna helppokäyttöinen ja mekaanisesti yksinkertainen lennokkityyppi. Multikopterin heikkoutena muihin lennokkityyppeihin verrattuna ovat sen sijaan pienempi hyötykuorma sekä toiminta-aika. Multikopterin liikehtiminen perustuu roottoreiden kulmanopeuksien nopeaan muuttamiseen, minkä johdosta multikopteri ei skaa-laudu hyvin suurempiin kokoluokkiin.

Tutkimuksen perusteella nykyisen kaupallisten multikoptereiden rakenne on yhdenmukainen hintaluokasta riippumatta. Multikopterin tuottama noste on rajallinen, joten hyötykuorman maksimoimiseksi niissä käytetään kevyitä ja herkästi rikkoutuvia materiaaleja kuten muoveja tai hiilikuitua. Suorituskyvyn kannalta kevyet runkomateriaalit vähentävät tuotteiden kenttäkel-poisuutta. Tuotteiden propulsiojärjestelmät ovat sähkötoimisia, ja nykyinen akkutekniikka on merkittävä kopterien lentoaikaa rajoittava tekijä. Multikoptereiden ohjausjärjestelmät toimivat taajuusalueilla, jolla radioaallon vaimeneminen on voimakasta ja tämä rajoittaa etäisyyttä, jolla kopterilla voidaan toimia samalta lennätyspaikalta. Toisaalta taajuusalueella ilmenevä nopea vaimeneminen tekee multikopterien elektronisen häirinnän haastavaksi ilman kohteen havaitsemista ja suuntaavan häirintäantennin käyttöä.

Eri multikopterien suorituskykyä voidaan verrata käyttämällä suorituskyvyn kriteereinä hyötykuormaa, toiminta-aikaa, olosuhteiden sietokykyä sekä ohjausyhteyden maksimikantamaa. Tämän tutkimuksen perusteella 500 euron hintaluokassa olevien tuotteiden suorituskyky on rajallinen niiden selkeästi heikomman kantaman ja toiminta-ajan takia. 1000 euron hintaluokassa nämä ominaisuudet paranevat merkittävästi, ja verrattain pienellä lisähinnalla saadaan merkittävä lisä suorituskykyyn halvempiin tuotteisiin verrattuna. 1000 euron hintaluokan multikopterit tarjoavatkin hintaansa nähden hyvän suorituskyvyn ja ne ovat pienen kokonsa ansiosta helposti kuljetettavissa. Seuraava merkittävä suorituskyvyn lisääntyminen on nähtävissä yli 10 000 euron hintaluokan tuotteissa, joiden olosuhteiden sietokyky on parempi ja niissä on mahdollisuus kahden laadukkaan sensorin samanaikaiseen käyttöön. Kokonsa takia ne eivät kuitenkaan sovellu hyvin jalan liikkuville joukoille.

Toinen apututkimuskysymys oli: ” Millaisia sensoreita kaupallisiin multikoptereihin on saatavilla ja mikä on niiden suorituskyky?”. Tutkimuksen perusteella kaupallisiin multikoptereihin on saatavilla lähinnä CMOS-kennoilla varustettuja näkyvän valon alueen sensoreita sekä jäähdyttämättömiä, mikrobolometrisillä ilmaisimilla varustettuja lämpökameroita. Halvemmissa multikoptereissa on kiinteä hyötykuorma, kun taas laadukkaammissa koptereissa voidaan käyttää tarpeen mukaan erilaisia sensoreita.

Sensoreiden suorituskykyä voidaan arvioida simuloimalla niille arvioidut havaitsemis-, tunnistamis- ja yksilöintietäisyydet eri kohteille sensorin resoluutiota ja näkökentän laajuutta hyödyntäen. Simuloimalla saadut arvot vastasivat hyvin yhden lämpökameran ja yhden optisen kameran käytännön suorituskykyä, joten simuloinnin tuloksia voidaan pitää melko luotettavina.

500–1000 euron hintaluokassa koptereissa on kiinteät 4K-kamerat, joilla kyetään keskimäärin yksilöimään panssariajoneuvo 250 metristä ja tunnistamaan se noin 500 metristä. Laadukkaammilla ja suurempiresoluutioisilla kameroilla voidaan parantaa näitä etäisyyksiä simuloinnin perusteella noin 60 prosenttia. Optisella suurennoksella varustetun kameran mahdollistamat havaintoetäisyydet ovat yli kymmenkertaisia kiinteällä polttovälillä varustettuihin kameroihin verrattuna.

Lämpökameran käytöllä luodaan multikopterijärjestelmälle pimeätoimintakyky ja mahdollistetaan kohteiden helpompi havaitseminen peitteisessä maastossa. Niiden kyky tunnistaa ja yksilöidä kohteita on niiden matalan resoluution takia selvästi näkyvän valon alueen kameroita heikompi. Lämpökameran resoluution tulisikin olla vähintään 336 x 256 ja mielellään 640 x 512, jotta sillä kyetään tekemään hyödyllisiä havaintoja. Paras suorituskyky saavutetaan lämpökameran ja optisella suurennoksella varustetun näkyvän valon alueen kameran käytöllä samassa järjestelmässä. Multikoptereiden sensoreiden suorituskykyä arvioitaessa tulee huomioida videolinkin tiedonsiirtokapasiteetti, joka heikentävät lennon aikana reaaliaikaista havaitsemiskykyä.

Tutkimuksen kolmas apukysymys oli ”Mikä on kaupallisten lennokkien käytettävyys Suomen olosuhteissa”. Kaupallisia multikoptereita ei ole suunniteltu toimimaan haastavissa sääolosuhteissa, eikä niiden olosuhteiden sietokyky vastaa sotilasjärjestelmiä. Multikopterin toimintaan vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, kosteus, jäätäminen ja tuuli sekä ukkonen. Tutkimuksen perusteella merkittävimmät multikoptereiden käyttöön Suomessa vaikuttavat sääilmiöt ovat jäätäminen ja sade, joista jäätäminen vaikuttaa kaikkiin multikoptereihin ja sade kaikkiin paitsi kalleimpiin tuotteisiin. Kenttäkokeen tulosten perusteella kovakaan pakkasen ei vaikuta multikopterien käytettävyyteen, mikäli akut kyetään lämmittämään ennen lennätystä. Tuuli ja ukkonen haittaavat multikopterien käyttöä vain yksittäisinä päivinä vuodessa.

Kaupalliset multikopterit ovat edullisia ja helppokäyttöisiä, ja niillä voidaan ulottaa nopeasti joukon valvontakykyä maastoesteiden taakse tai muihin paikkoihin, jonne ei kyetä tähystämään maahan sijoitetuilla sensoreilla. Koptereiden kenttäkelpoisuus ja olosuhteiden sietokyky ei ole sotilaslennokkeja vastaavalla tasolla, mutta tutkimuksen perusteella Suomen olosuhteet eivät rajoita käyttöä liikaa. Edullisempien kaupallisten tuotteiden sensorien suorituskyky ei ole paljasta silmää parempi, joten niiden valvontaan tuoma lisäarvo perustuu multikopterin liikehtimiskykyyn. Laadukkaampien kaupallisten multikopterien kanssa kyetään lämpökameroiden ja optisesti suurentavien sensoreiden avulla lisäämään valvontakykyä pimeässä sekä valvoa laajoja alueita korkealta

## 5.2. Tutkimuksen validiteetin arvioiminen

Tutkimuksessa ei määritelty tarkkaa tehtäväprofiilia multikoptereille, joten niiden suorituskykyä arvioitiin hyvin yleisellä tasolla. Määrittelemällä tarkemmin olosuhteet ja tehtävät, joissa multikoptereita suunnitellaan käytettävän, olisi niiden suorituskyvyn tarkasteluun saatu lisää konkreettisuutta. Multikopterien sotilaskäytön tarkempi tutkiminen jatkossa edellyttää tarkemman käyttöprofiilin luomista.



Merkittävä osa tutkimuksessa käytetyistä tiedoista on peräisin multikoptereiden valmistajilta. Valmistajien tavoitteena on myydä mahdollisimman paljon omia tuotteitaan, mikä saattaa johdattaa tuotteiden suorituskyvyn liioitteluun. Tutkimuksessa ei kuitenkaan ilmennyt käytännössä testattujen tuotteiden osalta merkittäviä eroja valmistajien ilmoittamien ominaisuuksien osalta.

Sensoreiden suorituskyvyn tutkiminen osoittautui haastavaksi havainnoinnin subjektiivisen luonteen vuoksi. Kohteen havaitseminen tai tunnistaminen riippuu lähes loputtomasta määrästä erilaisia tekijöitä eikä kaikkia tekijöitä kyetty huomioimaan tässä tutkimuksessa. Sensoreiden suorituskyvyn arviointi pelkästään niiden teknisten ominaisuuksien perusteella onkin suuntaa antavaa, ja tarkempi suorituskyvyn määrittäminen vaatii sensorin kattavaa testaaamista kenttäolosuhteissa.

Kenttäkokeen käyttö tutkimusmenetelmänä osoittautui haasteelliseksi. Kenttätesteissä osakokeiden toistomäärät olivat pieniä ja testejä suoritettiin vain yhdenlaisissa olosuhteissa. Testejä suoritettiin vain yhdellä multikopterimallilla, joten eri tuotteiden suorituskykyä ei kyetty vertaamaan käytännössä. Subjektiiviseen kokemukseen perustuvissa havaitsemistesteissä testaushenkilöstön pieni määrä vähentää tulosten luotettavuutta. Käytännön testaamisella saatiin kuitenkin käyttökelpoisia tuloksia testatun multikopterin toiminnasta. Kenttäkokeen havainnot täydensivät kirjallisuustutkimuksella ja simuloinnilla saatuja tuloksia.

### 5.3. Jatkotutkimusehdotuksia

Sensorin todellinen suorituskyky selviää parhaiten tutkimalla sen hyödyllisyyttä joukon käytössä harjoitustoiminnassa. Multikoptereiden käyttö yleistyy Puolustusvoimissa tulevaisuudessa ja käyttökokemuksia saadaan lisää. Jatkotutkimusaiheena esitetään multikoptereiden tutkimista havainnoimalla niiden käyttöä joukoissa tai haastatteleamalla niiden käyttäjiä. Näin saadaan parempi kuva tuotteiden hyödyllisyydestä käytännössä.

Sensoreiden suorituskyvyn määrittämisessä käytetään edelleen 1950-luvulla luotuja Johnsonin kriteerejä. Sensorien suorituskyvyn tutkimisessa olisi erittäin hyödyllistä luoda tarkemmat kriteerit sensoreiden suorituskyvyn arviointiin sotilaallisissa tehtävissä. Kiinnostava tutkimusaihe olisi esittää resoluutioltaan erilaatuisia kuvia tunnistuskoulutuksen saaneille sotilaille ja määrittää keskiarvot havaitsemiseen sekä tyyppi- ja yleistunnistukseen vaadittavista pikselimääristä. Tarkempi kriteeristö mahdollistaisi sensoreiden suorituskyvyn tarkemman arvioinnin niiden resoluution ja kuvasuhteen avulla.

Lisäksi jatkotutkimusta tulisi kohdistaa multikoptereiden soveltumisesta pioneeri- ja suojeleutiedusteluun. Multikopterin avulla on mahdollista tiedustella alueita turvallisen välimatkan

päästä. Multikopterin käyttö miinoitteiden tai tunnistamattomien räjähteiden tiedustelussa on yksi potentiaalinen jatkotutkimuskohde. Lisäksi tulisi tutkia mahdollisuutta käyttää suoje-  
luedusteluun tarkoitettuja välineitä ja mittareita multikopterin kanssa, jolloin laajan alueen tie-  
dustelu saattaisi onnistua nopeasti ja turvallisesti.

## LÄHTEET

- [1] 2017 Drone/Quadrocopter Comparison [Verkkajulkaisu]. The Drone Chart. [Viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: <https://www.thedronechart.com/>
- [2] 4C08D Tekninen kenttäkoe ja analyysi-opintojakso 2017. Työryhmä 5:n raportti. Materiaali tutkijan hallussa.
- [3] 5 Apps Every Drone Pilot Needs [Verkkoartikkeli] Drone Uplift. 2016. [Viitattu 11.2.2018]. Saatavissa: <http://www.droneuplift.com/5-apps-every-drone-pilot-needs/>
- [4] Agan, M.J., Olson, B., Pasqualino C.R., Stevens G.L. A Highly Miniaturized, Battery Operated, Commandable, Digital Wireless Camera. In: Military Communications Conference, 1998. MILCOM '98. Proceedings. IEEE, 1998. [viitattu 10.20.2018]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5850>. ISBN 0-7803-4506-1.
- [5] Arducopter APM [Valmistajan tiedote]. Ardupilot. [Viitattu 6.2.2018]. Saatavissa: [http://www.arducopter.co.uk/uploads/6/7/0/2/6702064/772312489\\_orig.PNG](http://www.arducopter.co.uk/uploads/6/7/0/2/6702064/772312489_orig.PNG)
- [6] Bachrach, A. Autonomous Flight in Unstructured and Unknown Indoor Environments [Verkkajulkaisu]. Massachusetts Institute of Technology, 2009. [Viitattu 13.2.2018] Saatavilla <http://groups.csail.mit.edu/rrg/papers/emav09.pdf>
- [7] Barnes, S. DJI Announce Zenmuse XT2 [Uutisartikkeli]. Heliguy. 28.3.2018. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.heliguy.com/blog/2018/03/28/dji-zenmuse-xt2-announced/>
- [8] Brushless DC Motor. [Verkkokuva]. Nidec. [Viitattu 9.2.2018]. Saatavissa: [http://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless/~/\\_media/nidec-com/en-global/technology/capability/brushless/img\\_brushless\\_01](http://www.nidec.com/en-NA/technology/capability/brushless/~/_media/nidec-com/en-global/technology/capability/brushless/img_brushless_01)
- [9] Build A Tricopter With Rotor Bits [Verkkajulkaisu] Instructables. 15.12.2018. [Viitattu 17.1.2018]. Saatavissa: <http://www.instructables.com/id/Build-a-Tricopter-with-Rotor-Bits/>
- [10] Common Magnetic Interference [Verkkajulkaisu] Ardupilot. [Viitattu 6.2.2018]. Saatavissa: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-magnetic-interference.html>
- [11] Dempsey, T. Digital Camera Sensor Sizes. [Verkkajulkaisu] Photoseek. [Viitattu 22.3.2018] Saatavissa: <http://photoseek.com/2013/compare-digital-camera-sensor-sizes-full-frame-35mm-aps-c-micro-four-thirds-1-inch-type/>

- [12] DJI Matrice 200 [Verkkokuva]. DJI [Viitattu 3.2.2018]. Saatavissa: <https://www2.djicdn.com/assets/images/products/m200s/index/s4/m200-538aa83e8f72946526a0d57625318342.png>
- [13] DJI Phantom 4 Basic Teardown : What's inside? [Verkköjulkaisu]. RC Geeks. 1.4.2018. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: <https://www.rcgeeks.co.uk/blog/phantom-4-basic-teardown-whats-inside>
- [14] DJI Support. Drone winter flying tips [Valmistajan tiedote]. DJI, 21.11.2017 [Viitattu 15.3.2018]. Saatavilla <https://store.dji.com/guides/winter-drone-flying-tips/>
- [15] DJI Zenmuse Z30 Kamera & Gimbal. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.digitarvike.fi/dji-zenmuse-z30-kamera--gimbal>
- [16] DJI. Cendence Specs [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/cendence/info#specs>
- [17] DJI. CrystalSky Specs [Valmistajan ilmoitus]. DJI. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/crystalsky/info#specs>
- [18] DJI. DJI Launches Privacy Mode For Drone Operations [Valmistajan tiedote][Viitattu 6.4.2018] Saatavissa: <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-launches-privacy-mode-for-drone-operators-to-fly-without-internet-data-transfer>
- [19] DJI. Inspire 2 Specs [Valmistajan ilmoitus]. DJI. [Viitattu 9.2.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/inspire-2/info#specs>
- [20] DJI. Matrice 200 Specs [Valmistajan ilmoitus]. DJI. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/matrice-200-series>
- [21] DJI. Matrice 200 Specs. [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/matrice-200-series/info#specs>
- [22] DJI. Mavic Pro Specs [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/mavic/info>
- [23] DJI. Phantom 4 Specs [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/phantom-4/info>
- [24] DJI. Phantom 4 Specs [Valmistajan ilmoitus]. DJI. [Viitattu 9.2.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/phantom-4/info>
- [25] DJI. Smart Battery [Valmistajan tiedote] DJI. 27.6.2017. [Viitattu 9.2.2018]. Saatavissa: <https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/introduction/component-guide-battery.html>

- [26] DJI. Spark Specs. [Valmistajan tiedote] DJI [Viitattu 14.3.2018] Saatavissa: <https://www.dji.com/spark/info>
- [27] DJI. Zenmuse X4S Gimbal [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/zenmuse-x4s>
- [28] DJI. Zenmuse X5S Gimbal [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 10.4.2018] Saatavissa: <https://www.dji.com/zenmuse-x5s>
- [29] DJI. Zenmuse XT Gimbal [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavilla: <https://www.dji.com/zenmuse-xt/info>
- [30] DJI. Zenmuse Z30 Gimbal Specs [Valmistajan tiedote] DJI. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.dji.com/zenmuse-z30/info>
- [31] Donohue, J. Introductory review of target discrimination criteria [Verkkójulkaisu]. US Air Force Systems Command, 31.12.1991. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: [www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a254954.pdf](http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a254954.pdf)
- [32] Drone Deploy. [Valmistajan tiedote]. DroneDeploy. [Viitattu 9.4.2018]. Saatavissa: <https://www.dronedeploy.com/>
- [33] DroneInfo-sovellus. Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi. 18.7.2017. [Viitattu 11.2.2018]. Saatavissa: [https://www.droneinfo.fi/fi/ala\\_lennata\\_taalla/lataa\\_droneinfo-sovellus](https://www.droneinfo.fi/fi/ala_lennata_taalla/lataa_droneinfo-sovellus)
- [34] Ehang Ghost [Verkkokuva]. UAS Vision. [Viitattu 28.1.2018]. Saatavissa: <https://www.uasvision.com/wp-content/uploads/2015/01/Ehang-620x258.png>
- [35] ELIX-XL Multicopter [Valmistajan tiedote]. ELI Airborne solutions. [Viitattu 5.4.2018]. Saatavissa <http://www.uav.ee/>
- [36] Fisher. J. DJI Adds Collision Avoidance System to Phantom 4 Drone [Uutisartikkeli]. PC News. 1.3.2016. [Viitattu 10.2.2018] Saatavissa: <http://uk.pcmag.com/dji-phantom-3-professional/75655/news/dji-adds-collision-avoidance-system-to-phantom-4-drone>
- [37] Fitzpatric, A. "Finally, a Drone You Can Own" [Uutisartikkeli]. Time Magazine. 30.1.2014. [Viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: <http://techland.time.com/2014/01/30/dji-phantom-vision-quadcopter-drone-review/>
- [38] FLIR Techical Note: Uncooled detectors for thermal imaging cameras [Verkkójulkaisu]. FLIR. [Viitattu 13.3.2018]. Saatavissa [www.flirmedia.com/MMC/CSV/App1\\_Stories/AS\\_0015\\_EN.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/CSV/App1_Stories/AS_0015_EN.pdf)

- [39] FLIR. FLIR Duo R [Valmistajan tiedote]. FLIR. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.flir.com/products/duo-r/>
- [40] FLIR. FLIR Vue Pro R [Valmistajan tiedote]. FLIR. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.flir.com/products/vue-pro/>
- [41] FLIR. Multi-Spectral Dynamic Imaging [Valmistajan tiedote] FLIR. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <http://www.flir.co.uk/cs/display/?id=56012>
- [42] Frequency Hopping Spread Spectrum Vs. Direct Sequence Spread Spectrum [Verkköjulkaisu] Raylink. [Viitattu 10.2.2017]. [https://people.cs.clemson.edu/~westall/851/fhss\\_dsss.pdf](https://people.cs.clemson.edu/~westall/851/fhss_dsss.pdf)
- [43] Harrington, A. Optimal Propulsion System Design For a Micro Quad Rotor [Verkköjulkaisu] University of Maryland. 2011. [Viitattu 14.1.2018]. Saatavissa: <https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/12029>
- [44] Hoffren, J ja Saarela, O. Lentotekniikan perusteet. Opetushallitus, Edita Prima Oy, Helsinki 2008. ISBN 978-952-13-3481-8
- [45] Hovanessian. S.A. Introduction to Sensor Systems. Norwood, Artech House Inc. 1988. ISBN 0-89006-271-4.
- [46] Iikkanen, T. Miehitämättömät ilma-alukset osana ilmaoperaatioita. Diplomityö. Helsinki 2015. Maanpuolustuskorkeakoulu.. Sotataidon Laitos. 105 s. STIV KÄYTTÖ RAJOITETTU
- [47] IP-luokitus [Verkköjulkaisu]. Sähköturvallisuuden Edistämiskeskus ry. [Viitattu 17.3.2018]. Saatavissa: [https://www.stek.fi/Perustietoa\\_sahkosta/Sahkojarjestelmat/fi\\_FI/IP\\_luokitus/](https://www.stek.fi/Perustietoa_sahkosta/Sahkojarjestelmat/fi_FI/IP_luokitus/)
- [48] Jormakka, J. Rissanen, A et al. State-Of-The-Art in Sensors. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos 2006. ISBN 951-25-1650-0
- [49] Kananen, J. Miehitämättömät ilma-alukset, niiden kehitys sekä käyttö viimeaikaisissa sodissa. Pro Gradu-tutkimus. Helsinki 2007. Maanpuolustuskorkeakoulu. Sotataidon Laitos.
- [50] Karttapaikka-palvelu [Verkköjulkaisu]. Maanmittauslaitos. [Viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/karttapaikka>
- [51] Katzmaier, D. Stein, S. Screens test: iPhone 6 vs. iPhone 6 Plus vs. Samsung Galaxy S5 [Uutisartikkeli]. CNET. 25.9.2014. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://www.cnet.com/news/screens-test-apple-iphone-6-vs-iphone-6-plus-vs-samsung-galaxy-s5/>

- [52] Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen OPS M1-32 [Verkkójulkaisu]. Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi. 1.1.2017. [Viitattu 10.9.2017]. Saatavissa: [https://www.trafi.fi/filebank/a/.../23514-OPS\\_M1-32\\_VAL-MIS\\_maarays\\_RPAS\\_fi.pdf](https://www.trafi.fi/filebank/a/.../23514-OPS_M1-32_VAL-MIS_maarays_RPAS_fi.pdf)
- [53] Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. Liikenteen Turvallisuusvirasto Trafi. TRAFI/4482/03.04.00.00/2015
- [54] Kenttäkoemateriaali. Pahkajärvi. 20. - 21. 2. 2018. Aineisto tutkijan hallussa
- [55] Keyes, R.J et al. Optical and Infrared Detectors. Berlin, Springer-Verlag. 1977. ISBN 3-540-08209-3
- [56] Kosola, J. Jokinen, J. Elektroninen sodankäynti Osa 1 - taistelun viides dimensio. MPKK Tekniikan Laitos, Julkaisusarja 5, No 2/2004. Edita Prima Oy. Helsinki 2005. ISBN 951-25-1619-5
- [57] Kosola, J. Solante, T. Digitaalinen taistelukenttä, 2. painos, MPKK. STEKNL:n julkaisusarja 1 n:o 13, 2. painos, Edita Prima Oy. Helsinki 2003. ISBN 951-25-1449-4.
- [58] Kuukausitilastot [Verkkójulkaisu]. Ilmatieteen Laitos. [Viitattu 14.3.2018]. <http://ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>
- [59] Kärämä, M. Kaupallisten tuotteiden käyttö taistelukentän valvontajärjestelminä. Helsinki, 2010. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos.
- [60] Lappalainen, E. Jormakka, J. Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa. Helsinki: Edita Prima Oy, 2004. 203 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [61] Lehtonen, J-M. Anteroinen, J. Puolustusmateriaalin hintakehitys - Tehokkuutta rahalla. Tiede ja ase vol. 71, 2003.
- [62] Liang, O. How To Choose Battery Capacity For Longer Flight Time. [Verkkójulkaisu]. 17.2.2014. [Viitattu 9.2.2018]. Saatavissa: <https://oscarliang.com/how-to-choose-battery-for-quadcopter-multicopter/>
- [63] Liang, O. Info About Angled Motor Mounts For Multicopters. [Verkkójulkaisu]. 8.9.2015. [Viitattu 27.1.2018]. Saatavissa: <https://oscarliang.com/tilted-angle-motor-mounts-racing-quadcopter/>
- [64] Lithium Watt Hours Vs Other Batteries [Verkkokuva]. [Viitattu 8.2.2018]. Saatavissa: <https://image.slidesharecdn.com/lithiuminnevada-170422141836/95/lithium-in-nevadappt-13-638.jpg?cb=1492870729>

- [65] Litwiller, D. CCD vs. CMOS: Facts and Fiction [Verkkajulkaisu] [Viitattu 2.3.2018]. Saatavissa: [http://wcours.gel.ulaval.ca/2013/a/GIF4100/default/8fichiers/Photonics\\_Spectra\\_CCDvsCMOS\\_Litwiller.pdf](http://wcours.gel.ulaval.ca/2013/a/GIF4100/default/8fichiers/Photonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf)
- [66] LOG-PERIODIC DIPOLE ARRAY LPD100-170 [Valmistajan tiedote] Aerial. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: [http://aerial.fi/wp-content/uploads/2014/08/aerial\\_lpd.pdf](http://aerial.fi/wp-content/uploads/2014/08/aerial_lpd.pdf)
- [67] Lumang, M. White Paper on Long Range Surveillance Cameras [Verkkajulkaisu] AIS Security Solutions. [Viitattu 26.2.2018]. Saatavissa: <http://www.aissecuritysolutions.com/white-paper-on-long-range-surveillance-cameras.pdf>
- [68] Mavic Pro [Verkkokuva]. [Viitattu 28.1.2018]. Saatavissa: <https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-9d9882472d6ca1382a2175c2b1da5237-c>
- [69] Mesnik, B. Detection, Recognition, Identification: The New Criteria [Verkkajulkaisu] Kintronics 19.9.2017 [Viitattu 26.2.2018] Saatavissa: <https://kintronics.com/detection-recognition-identification-new-criteria/>
- [70] Mims, F. Optoelectronics. Ensimmäinen painos. Indianapolis 1975. Howard W. Sams & Co., Inc. ISBN 0-672-21180-7
- [71] Moments On An Airplane. [Verkkokuva] [Viitattu 4.9.2017]. Saatavissa: <https://image.slidesharecdn.com/1-141012224339-conversion-gate01/95/1-introduction-aerodynamics-12-638.jpg?cb=1413154827>
- [72] Newman, L. The Army Grounds Its DJI Drones Over Security Concerns [Uutisartikkeli]. Wired. 8.7.2017. [Viitattu 6.4.2018]. Saatavissa: <https://www.wired.com/story/army-dji-drone-ban/>
- [73] Nuutinen, H. Kenttäkoeprosessi. Diplomityö. Helsinki 2005. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos. 86 s.
- [74] Paakala, J. Kaupallisten komponenttien käyttö taktisen tiedustelulennokin rakentamisessa. Helsinki 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos.
- [75] Parrot. Bebop 2 Specs. [Valmistajan tiedote]. Parrot. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <https://www.parrot.com/global/drones/parrot-bebop-2-fpv#technicals>
- [76] Phantom 4 Specs [Verkkokauppa] Drone World. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: <https://www.drone-world.com/dji-phantom-4-specs>
- [77] Phantom 4 User Manual v 1.2. [Valmistajan tiedote]. DJI. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: [https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4/en/Phantom\\_4\\_User\\_Manual\\_en\\_v1.2\\_20160805.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_en_v1.2_20160805.pdf)



- [78] Pix4D Capture [Valmistajan tiedote]. Pix4D. [Viitattu 11.2.2018]. Saatavissa: <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>
- [79] Poliisi hankkii ammattitason nelikoptereita. [Uutisartikkeli]. Uusi Teknologia. 2.10.2017. [Viitattu 5.4.2018]. Saatavissa: <https://www.uusiteknologia.fi/2017/10/02/poliisi-hankkii-ammattitason-nelikoptereita/>
- [80] Puolustusministeriön tulevaisuuskatsaus 2004 [Verkkajulkaisu]. Puolustusministeriö. 2004. [Viitattu 6.12.2016]. Saatavissa: [http://www.defmin.fi/files/693/Tulevaisuus-katsaus\\_PLM.pdf](http://www.defmin.fi/files/693/Tulevaisuus-katsaus_PLM.pdf)
- [81] Quan, Q. Basic Composition [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.1.2018]. Saatavissa: [rfly.buaa.edu.cn/course/en/Lesson\\_02\\_Basic\\_Composition.pdf](http://rfly.buaa.edu.cn/course/en/Lesson_02_Basic_Composition.pdf), viitattu 4.1.2018
- [82] Quan, Q. Introduction to multicopter design and control. Singapore 2017. Springer. ISBN 978-981-10-3381-0
- [83] Rantakari, R. Sensorien käyttö mekanisoidun taisteluosaston tilannekuvan muodostamisessa. Helsinki, 2013. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos. 78 s. STIV KÄYTTÖ RAJOITETTU
- [84] Remote Controller For Phantom 4 [Verkkokuva]. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavilla: [https://www.bhphotovideo.com/images/images2500x2500/dji\\_cp\\_pt\\_000603\\_remote\\_control\\_for\\_phantom\\_1298131.jpg](https://www.bhphotovideo.com/images/images2500x2500/dji_cp_pt_000603_remote_control_for_phantom_1298131.jpg)
- [85] Rotor ducts. [Verkkokuva][Viitattu 1.2.2018]. Saatavissa: <http://api.ning.com/files/DIpsX3jcHzNDVfR2W72i6mZcQonJTPJAoASGYPLRjE-QDvmJQLLE9T2GZUYb-GZggU5ihKIC2yuZ-CxKzPiK9hLVMRuUOd0uLp/DSC02141.JPG>,
- [86] RTL Mode [Verkkajulkaisu] Ardupilot. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <http://ardupilot.org/copter/docs/rtl-mode.html>
- [87] Rynnäköpanssarivaunu BMP-2 MD. [Verkkajulkaisu]. Maavoimat. [Viitattu 8.4.2018]. Saatavissa: <http://maavoimat.fi/bmp2>
- [88] Seyrafi, K. Hovanessian S.A. Introduction to Electro-Optical and Tracking Systems. Norwood 1993. Artech House Inc. ISBN 0-89006-672-8.
- [89] Sjaardema, T. Smith, C. Birch, G. History and Evolution of the Johnson Criteria. [Verkkajulkaisu]. Sandia National Laboratories. 2015. [Viitattu 26.2.2018]. Saatavilla <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2015/156368.pdf>
- [90] Skycatch [Valmistajan tiedote]. Scycatch. [Viitattu 9.4.2018]. Saatavissa <https://www.skycatch.com/>

- [91] Steen, T. Search and Rescue Using Multicopters [Verkkajulkaisu]. Norwegian University of Science and Technology, 2014. [Viitattu 21.2.2018]. Saatavissa: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/261313>
- [92] Suomen tuuliatlas. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>
- [93] Suorituskyky. Puolustusvoimien määritelmärekisteri, PVAH. Viitattu 14.12.2016
- [94] Sääennätyksiä. [Verkkajulkaisu]. Ilmatieteen laitos. [Viitattu 14.3.2018]. <http://ilmatieteenlaitos.fi/saaennatyksia>.
- [95] TSJ UAV6067 Jammer [Valmistajan tiedote]. The Signal Jammer. [Viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: <https://www.thesignaljammer.com/products/TSJ-UAV6067.html>
- [96] Tuulitilastot. [Verkkajulkaisu]. Ilmatieteen laitos. [Viitattu 20.3.2018]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulitilastot>
- [97] Typhoon H Remote [Valmistajan tiedote]. Yuneec. [Viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <http://us.yuneec.com/typhoon-h-remote>
- [98] Valentak, Z. Drone Market Share Analysis Predictions 2018 [Verkkajulkaisu] DronesGlobe. 24.12.2018. [Viitattu 5.4.2018]. Saatavissa <http://www.dronesGlobe.com/news/drone-market-share-analysis-predictions-2018/>
- [99] Walkera. Voyager 5 Specs [Valmistajan ilmoitus]. Walkera. [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <http://www.walkera.com/index.php/Goods/canshu/id/66.html>
- [100] Vuositulastot [Verkkajulkaisu]. Ilmatieteen laitos. [Viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositulastot>
- [101] X5S Gimbal [Verkkajulkaisu]. B&H Photovideo. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa [https://www.bhphotovideo.com/c/product/1298596-REG/dji\\_cp\\_zm\\_000496\\_zenmuse\\_x5s.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1298596-REG/dji_cp_zm_000496_zenmuse_x5s.html)
- [102] Yuneec. Breeze 4K Specs [Valmistajan tiedote]. Yuneec. [Viitattu 10.4.2018] Saatavissa: <http://us.yuneec.com/breeze-specs>
- [103] Yuneec. E90 Gimbal [Valmistajan tiedote]. Yuneec. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: [https://www.yuneec.com/en\\_GB/accessories/cameras/e90/specs.html](https://www.yuneec.com/en_GB/accessories/cameras/e90/specs.html)
- [104] Yuneec. Tornado H920 Plus Specifications [Valmistajan tiedote]. Yuneec. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <http://commercial.yuneec.com/comm-en-h920-plus-specifications>

[105] Yuneec. Typhoon 4K Specs [Valmistajan tiedote]. Yuneec. [Viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: <http://us.yuneec.com/typhoon-4k-specs>

LIITE 1 – SENSORIEN LASKENNALLISET HAVAITSEMIS-, TUNNISTUS- JA YKSI-  
LÖINTIETÄISYYDET

Optiset sensorit:	hFOV(astetta)	hRes (pikseliä)	IFOV (mRad)
DJI Spark	81,9	3968	0,360
Yuneec Breeze	117	4160	0,491
DJI Phantom 4 Pro	94	4096	0,401
DJI Mavic Pro	78,8	4096	0,336
Yuneec Typhoon 4K	115	4096	0,490
DJI X5S	72	5280	0,238
Yuneec E90	77	5280	0,255
Z30	2,3	1920	0,021

[26][23][105][28][103][30][102]

Optiset sensorit:	D (ihm)	R (ihm)	I (ihm)	D (vaunu)	R (vaunu)	I (vaunu)
DJI Spark	625	156	78	2339	585	292
Yuneec Breeze	458	115	57	1716	429	215
DJI Phantom 4 Pro	562	140	70	2103	526	263
DJI Mavic Pro	670	168	84	2509	627	314
Yuneec Typhoon 4K	459	115	57	1719	430	215
DJI X5S	945	236	118	3540	885	442
Yuneec E90	884	221	110	3310	828	414
Z30	10762	2690	1345	40296	10074	5037

Lämpökamerat:	hFOV(astetta)	hRes (pikseliä)	IFOV (mRad)
FLIR Duo 160x120	57	160	6,21773546
FLIR VUE Pro 336x 44°	44	336	2,285550211
FLIR VUE Pro 336x 25°	25	336	1,298608074
FLIR VUE Pro 640x 45°	45	640	1,22718463
FLIR VUE Pro 640x 32°	32	640	0,872664626

[39][40]

Lämpökamerat:	D (ihm)	R (ihm)	I (ihm)	D (vaunu)	R (vaunu)	I (vaunu)
FLIR Duo 160x120	36	9	5	135	34	17
FLIR VUE Pro 336x 44°	98	25	12	369	92	46
FLIR VUE Pro 336x 25°	173	43	22	649	162	81
FLIR VUE Pro 640x 45°	183	46	23	687	172	86
FLIR VUE Pro 640x 32°	258	64	32	965	241	121