

Henri Keränen

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö lämpökuvauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

30.11.2017

Tekijä Otsikko	Henri Keränen Miehittämättömien ilma-alusten käyttö lämpökuvauksessa
Sivumäärä Aika	39 sivua 30.11.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	Lehtori Timo Junell
<p>Insinööriyön tavoitteena oli tutkia miehittämättömillä ilma-aluksilla suoritettavan lämpökuvauksen tekniikkaa, käyttöä ja tyypillisiä käyttökohteita sekä perehtyä kaupallisten UAV (Unmanned Aerial Vehicle) -lämpökuvausjärjestelmien valintaprosessiin. Työ perustuu kirjallisuus- ja internetlähteistä koostettuun tietoon.</p> <p>Työssä käytiin läpi miehittämättömien kuvauskoptereiden ja lämpökameroiden tekniikkaa sekä lämpökuvauksen teoriaa ja niiden pohjalta selvitettiin kuvaukseen vaikuttavia tekijöitä. Perehdyttiin kauko-ohjattuja ilma-aluksia koskevaan lainsäädäntöön ja selvitettiin mitä ammattitoimijan tulee sen kannalta ottaa huomioon. Lisäksi annettiin ohjeistusta UAV-lämpökuvausjärjestelmän valintaan esimerkkeineen ja valintaperusteineen.</p> <p>Todettiin, että oikeassa tehtävässä UAV-lämpökuvauksella on tehokas ja turvallisuutta lisäävä kunnossapitotarkastusmenetelmä jolla on useita sopivia sovelluksia käytettäväksi perinteisten menetelmien lisänä tai sellaisenaan. Tarkastelun tuloksena huomattiin useiden tekijöiden vaikuttavan kuvaustuloksen luotettavuuteen ja onnistumiseen, minkä vuoksi tekniikka vaatii siihen perehtyneen kuvaajan ja pilotin tuekseen. Arvioitiin nykyisen kaupallisesti saatavan tekniikan olevan ominaisuuksiensa puolesta tarpeeksi kehittyntä ja soveltuvaa ammattimaiseen lämpökuvaukseen. Todettiin myös miehittämättömien ilma-alusten käyttöä koskevan lainsäädännön olevan kattavaa mutta elävän vielä kehityskautta ja nähtäväksi jää kuinka se tulee vaikuttamaan toimintaan tulevaisuudessa.</p> <p>Lämpökameraa vaativien UAV-tehtävien toimijamäärä on Suomessa vielä toistaiseksi pieni, mutta tehdyn selvitystyön perusteella vaikuttaa siltä, että tekniikan käytöllä on kasvupotentiaalia ja tulevaisuudessa tullaan näkemään yleistyvissä määrin UAV-tekniikkaa korvaamassa tai avustamassa perinteisesti suoritettavia tehtäviä yrityksissä.</p> <p>Työn tuloksena syntyi miehittämättömien ilma-alusten lämpökuvauksen käyttöä koskeva selvitys, ja siitä voi olla apua laitteistoa valitseville ja toimintaa suunnitteleville toimijoille ja tekniikasta kiinnostuneille henkilöille.</p>	
Avainsanat	UAV, miehittämätön ilma-alus, Drone, RPAS, lämpökuvauks

Author Title	Henri Keränen Thermal Imaging with Unmanned Aerial Vehicle
Number of Pages Date	39 pages 30 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Energy and Environmental Engineering
Instructor	Timo Junell, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to study the use and technology of commercial unmanned aerial vehicles for thermal imaging tasks and to discover potential applications for them. The study was carried out by studying topic-related literature and examining Internet sources.</p> <p>Firstly, the components and the functions of unmanned multicopters and thermal cameras were studied. Secondly, the theory of thermography and imaging techniques were examined. Thirdly, the legislation concerning the use of unmanned aerial vehicles in Finland was explored. Also the selection process of UAV-systems was specified by suggesting tips and recommendations on issues to consider before acquisition.</p> <p>It was discovered that UAV-Thermography is an efficient and safety enhancing method for thermal inspections with multiple suitable applications in the maintenance field. It was found out that it is critical to be familiar with the techniques and factors that affect the thermal imaging process to achieve successful and reliable results. The study shows that the legislation concerning unmanned aviation is comprehensive but needs further discussion.</p> <p>In conclusion, the number of operators and companies using UAV-thermal imaging as part of their operations will grow in the near future. This thesis gives a comprehensive view of the field and works as a guide for professionals and companies considering unmanned thermal imaging as part of their operations.</p>	
Keywords	UAV, Unmanned Aerial Vehicle, Drone, RPAS, Thermal Imaging

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Miehittämätön ilmailu	2
3	Lainsäädäntö	6
3.1	Kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttöä koskevia yleisiä määräyksiä	6
3.2	Vaara- ja rajoitusalueet	8
3.3	Vakuutukset	9
4	UAV-tekniikka	10
4.1	Multikopterit	10
4.2	Materiaalit	12
4.3	Moottorit ja potkurit	12
4.4	Kameravakain	13
4.5	Akku	14
4.6	Lennonohjausjärjestelmä	15
5	Lämpökuvaus	16
5.1	Käyttö	16
5.2	Lämpösäteily	18
5.3	Emissiivisyys	19
5.4	Lämpökameran tekniikka	20
5.5	Optiikka	22
5.6	Käyttöominaisuudet	23
5.7	Kuvaukseen vaikuttavat tekijät	24
6	UAV- lämpökuvaussovellukset	27
6.1	Tyypilliset käyttöalueet	27
6.2	Kaukolämpöverkko	28
6.3	Sähköverkko	29

7	UAV-lämpökuvausjärjestelmän valinta	30
8	Yhteenveto ja päätelmät	34
	Lähteet	36

Lyhenteet

BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight.</i> Epäsuoraan näköyhteyteen perustuva lennätystoiminta.
ESC	<i>Electronic Speed Controller.</i> Elektroninen nopeudensäädin.
FOV	<i>Field of View.</i> Kameran näkymäalue.
GCU	<i>Gimbal Control Unit.</i> Kameravakaimen ohjausyksikkö.
GPS	<i>Global Positioning System.</i> Satelliittipaikannusjärjestelmä.
IMU	<i>Inertial Measurement Unit.</i> Inertianmittausyksikkö.
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft.</i> Miehitämätön kauko-ohjattu ilma-alus.
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System.</i> Vastaava termi UAS.
UA	<i>Unmanned Aircraft.</i> Miehitämätön kauko-ohjattu ilma-alus.
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle.</i> Miehitämätön kauko-ohjattu ilma-alus.
UAS	<i>Unmanned Aircraft System.</i> Miehitämättömän ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä.
VLOS	<i>Visual Line of Sight.</i> Suoraan näköyhteyteen perustuva lennätystoiminta.

1 Johdanto

Insinööriyön aiheena on miehittämättömien ilma-alusten tekniikka ja käyttö lämpökuvaustehtävissä.

Vaikka lämpökuvausta on ollut mahdollista tehdä ilmasta jo vuosia esimerkiksi helikopterilla, on sen käyttö tarkastustehtävissä ollut rajoitettua johtuen sen korkeista käyttökustannuksista. Ammattikäyttöön soveltuvien edullisten kauko-ohjattujen ilma-alusten ja kevyiden lämpökameroiden tulo markkinoille ovat tehneet tekniikasta edullista ja mahdollista myös pienemmille toimijoille.

Miehittämättömän ilmailun suosion kasvun myötä selvitystyölle UAV-toiminnan soveltuvuudesta ja valmiuksista teollisuuden ja infrastruktuurin ammattimaiseen lämpökuvaustyöhön on tarvetta. Aika on otollinen tekniikan alkaessa olla tarpeeksi kehittynyttä ja helposti saatavilla tähän toimintaan sekä yritysten ollessa aina kiinnostuneita uudesta tehokkuutta ja turvallisuutta parantavasta tekniikasta. UAV-multikopterit ovat jo hyväksi todettu menetelmä ilmakuvaukseen, minkä myötä sen käyttö useissa tehtävissä kasvaa jatkuvasti. Lämpökuvauksen yhdistäminen jo olemassa olevaan tekniikkaan luo runsaasti uusia käyttökohteita.

Työn tavoitteena on tutkia miehittämättömien ilma-alusten soveltuvuutta lämpökuvauskäyttöön, selvittää niiden potentiaalisia käyttökohteita ja sitä, millaista ammattikäyttöön soveltuvaa tekniikkaa on saatavilla. Työssä käydään läpi miehittämättömien kuvauskoptereiden ja lämpökameroiden tekniikan osalta niiden toimintaa ja tärkeimmät komponentit. Perehdytään lämpökuvauksen teoriaan tukemaan tekniikan ymmärrystä ja tyyppillisten kuvauskohteiden luonnetta sekä vaatimuksia kuvaamiselle ja kalustolle, jotta osataan valita kuhunkin tehtävään lämpökuvaustyön kannalta toimiva UAV-ratkaisu. Lisäksi perehdytään kauko-ohjattuja ilma-aluksia koskevaan lainsäädäntöön ja selvitetään mitä asioita ammattitoimijan tulee sen kannalta ottaa huomioon. Painopisteenä on erityisesti infrastruktuurin kuten energiaverkkojen ja rakennusten kunnossapitotarkastustoiminta.

Insinööriyö toteutetaan kirjallisuustutkimuksena nojautuen tuoreisiin tutkimuksiin, projekteihin sekä artikkeleihin. Lisäksi laitevalmistajilta ja -toimittajilta saadaan tietoa ja suosituksia laitteistoista ja niiden ominaisuuksista sekä hintatietoja. Liikenteenturvallisuusvirasto Trafilta saadaan tietoa käyttöä ja tekniikkaa koskevasta lainsäädännöstä. Näiden tietojen pohjalta on tarkoitus laatia selvitys, joka voisi toimia myös tukimateriaalina toimintaa suunnitteleville tai aloitteleville toimijoille ja UAV-lämpökuvauksesta kiinnostuneille henkilöille.

2 Miehittämätön ilmailu

Tässä luvussa perehdytään miehittämättömän ilmailun perusteisiin, sen sovelluksiin ja termistöön.

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) -ilmailu on ilmailun laji, jossa käytetään miehittämätöntä kauko-ohjattua ilma-alusta esimerkiksi kuvaukseen tai mittaamiseen. UAV on mahdollista varustaa lentotehtävää varten erilaisilla sensoreilla ja hyötykuormilla, kuten digitaalikameralla, lämpökameralla tai vaikkapa päästöjen mittaamiseen soveltuvalla tekniikalla. Ilma-aluksen ohjaamiseen käytetään radio-ohjainta ja videokuvalla varustettua järjestelmää. [1.]

Alan termistö on elävää johtuen tekniikan nopeasta kehityksestä ja voi aiheuttaa sekaannusta asiaan tarkemmin perehtymättömälle. Sanat lennokki ja kauko-ohjattu ilma-alus voivat tarkoittaa monelle samaa asiaa, vaikka esimerkiksi lainsäädännöllisesti niillä on omat merkityksensä. Lennokilla tarkoitetaan harrastus- ja kuluttajakäyttöön suunnattuja laitteita ja niiden käyttöä. Kauko-ohjatulla ilma-aluksella viitataan johonkin ammattimaiseen käyttöön eli lentotyöhön käytettävää laitetta. Lentotyötä on siis kaikki muu kuin pelkkä harrastuslennättäminen. Drone on näiden kansanomaisen ilmaisu, jolla tarkoitetaan kaikkia miehittämättömiä kauko-ohjattuja laitteita. [1.]

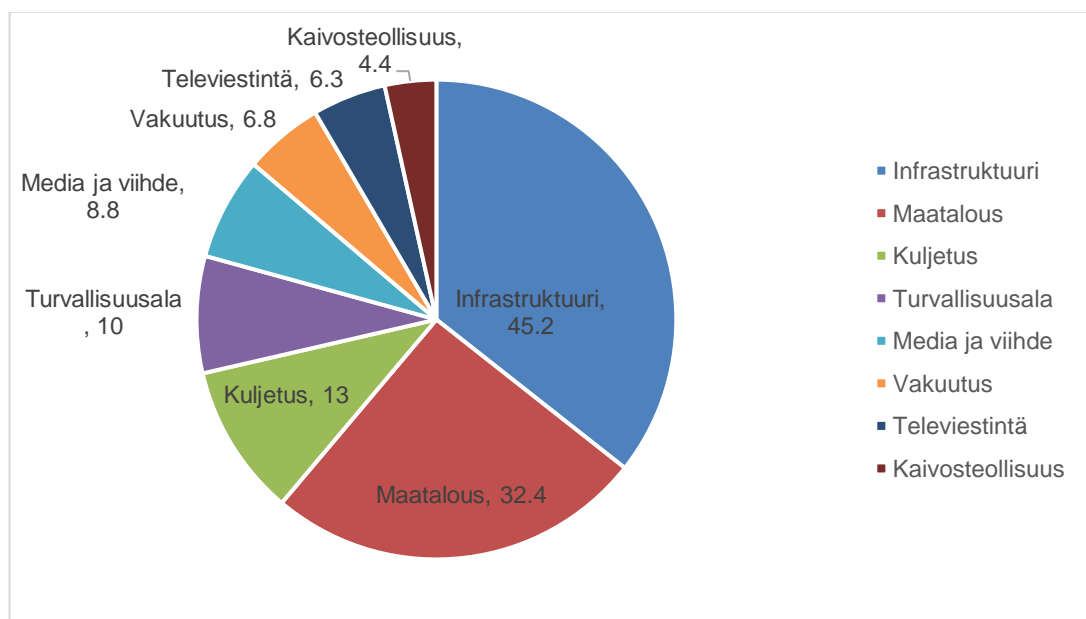
Vakiintuneimpia miehittämättömistä ilma-aluksista käytettäviä kansainvälisiä termejä ovat UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) ja RPA (*Remotely Piloted Aircraft*). Nykyään käytetään myös lyhennettä UA (*Unmanned Aircraft*) ja koko lentojärjestelmästä ilma-aluksineen ja ohjausjärjestelmineen termiä UAS (*Unmanned Aircraft System*) ja vastaavasti RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Tässä insinööriyössä UAV-laitteista puhuttaessa käytetään myös nimitystä multikopteri tai yksinkertaistaen kopteri,

joilla viitataan yleisimmin käytettävään miehittämättömien ilma-alusten tyyppiin. Multikopterissa on nimensä mukaisesti monta nostovoimaa tuottavaa roottoria. [7.]

Miehittämättömät ilma-alukset eivät ole tekniikkana uusi, ja lähihistoriassa ne ovat tulleet tutuiksi esimerkiksi sotilaskäytöstä. Miehittämätön ilmailu on nopeasti kasvava ja kehittyvä ala, jolla on jo lukuisia käyttösovelluksia teollisuuden kunnossapitotarkastuksista elokuvaukseen. Viime vuosina tekniikan ja markkinoiden kehittyminen on johtanut hintojen laskemiseen ja saatavuuden parantumiseen, mikä on mahdollistanut harrastaja- ja ammattikäyttäjien määrän suuren kasvun. [3; 4.]

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi pitää ammatillisten toimijoiden ilmoitusvelvollisuuden perusteella tilastoa toimijamääristä. Trafien [2] mukaan ammattilaistoimijoita on Suomessa jo yli 1 800 kappaletta ja lentotyöhön käytettäviä ilma-aluksia yli 2 300 kappaletta. Harrastelennättäjiä on tähän verrattuna varmasti kymmenkertaisesti mutta tarkkaa määrää on hankala arvioida, sillä harrastelennättäjiä ei ainakaan vielä nykyisen lainsäädännön mukaan koske lennokeiden rekisteröinti tai ilmoitusvelvollisuus lentotoiminnasta.

UAV-ilmailun kaupallisten sovellusten maailmanlaajuisesti markkina-arvoksi on arvioitu yli 127 miljardia dollaria. Tällä tarkoitetaan liiketoimintapalveluiden ja työn arvoa, jonka UAV-tekniikka tulee todennäköisesti korvaamaan lähitulevaisuudessa. [3.]



Kuva 1. UAV- ratkaisuiden arvioitu liiketoiminta-arvo toimialoittain (mrd. \$).

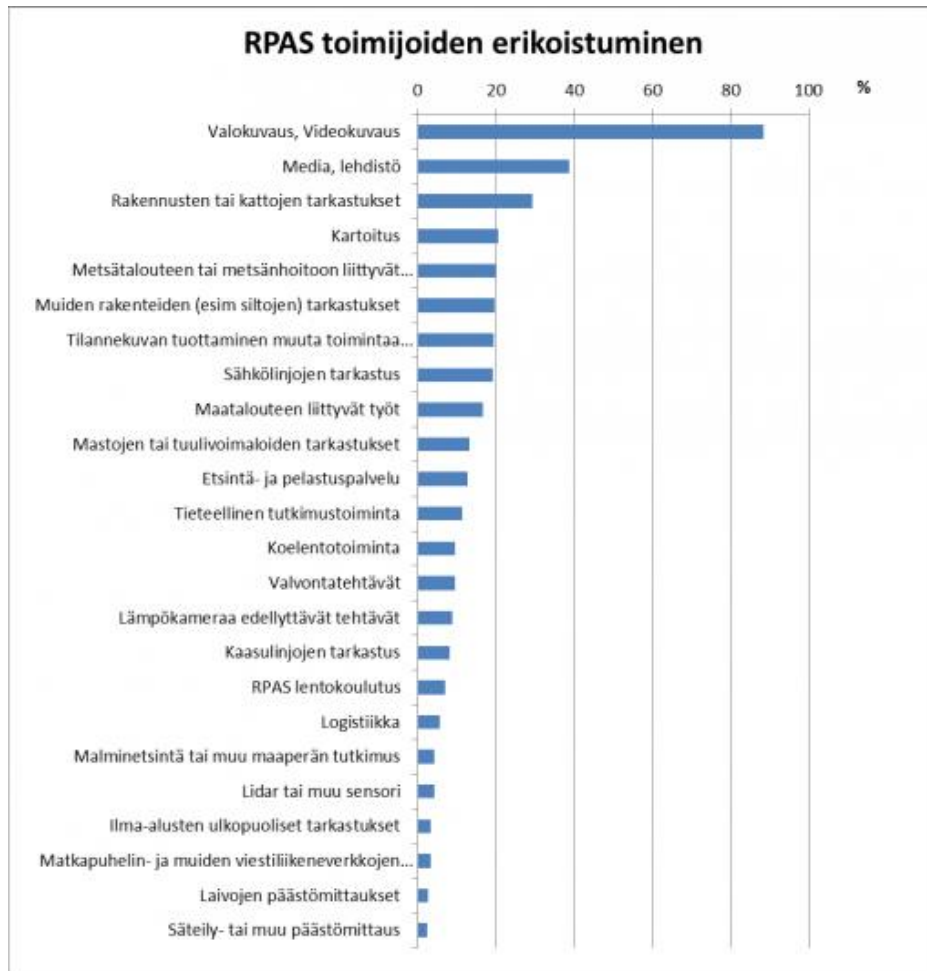
Vahvimmat näkymät UAV-käytössä ovat kuvan 1 mukaan infrastruktuurin toimialalla, jonka markkinaosuudeksi on arvioitu noin kolmasosa eli 45 miljardia dollaria [3]. Infrastruktuurilla tarkoitetaan yhteiskunnan perusrakenteita ja palveluita, kuten rakennuksia, liikenne- ja energiaverkkoja, tietoliikenneverkostoa sekä vesi- ja jätehuoltoa.

Miehittämättömällä ilma-aluksella on mahdollista suorittaa monia perinteisiä tehtäviä nopeammin, turvallisemmin ja vaivattomammin. Niillä voidaan joissain tapauksissa esimerkiksi korvata kalliin helikopterin tai nostureiden käyttöä kuvaus- ja tarkastustehtävissä. Kuvausta voidaan suorittaa laajalta alueelta, hankalapääsyisissä paikoissa tai vaarallisissa ympäristöissä, joissa kuvaaminen muuten olisi hankalaa tai jopa mahdotonta. [3, s. 4; 18, s. 10-13; 39.]

Esimerkkejä käyttösovelluksista

- rakennusten ja kattojen kuntotarkastukset
- lämpövuotojen toteaminen
- sähkö- tai kaukolämpöverkkojen tarkastukset
- tuulivoimaloiden tarkastus
- maanmittaus ja kartoitukset
- 3D-kuvantamiset
- pelastus- ja etsintätehtävät
- radiomastojen tarkastus
- videokuvaukset
- siltojen rakenteiden kuntotutkimukset
- aurinkopaneeleiden tarkastus
- teollisuusputkistojen saostumat ja vuodot
- metsäpalojen havainnointi.

Trafin [2] tilaston mukaan suurin osa UAV-toimijoista on erikoistunut valokuvaus- ja videokuvaustoimintaan (kuva 2). Tältä sektorilta löytyykin varmasti tekniikan suurin kaupallinen potentiaali. Ilmasta saadaan näyttäviä kuvia ja kohteet on mahdollista nähdä eri perspektiivistä. Kohteita voivat olla esimerkiksi viihdetuotanto tai kiinteistö- ja tapahtumakuvaukset.



Kuva 2. Trafin laatima diagrammi UAV-toimijoiden toimialueista Suomessa [2].

Noin 25 % toimijoista on erikoistunut rakennusten sekä kattojen tarkastamiseen ja noin 20 % yrityksistä tarjoaa sähkölinjojen tarkastusta. Lämpökuvaustehtäviin on erikoistunut noin 10 % toimijoista, eli arviolta toimijoita olisi lähes 200 kappaletta. [2.] Rakennusalalta löytyy varmasti kiinnostusta toimintaa helpottavalle ja turvallisuutta lisäävälle tekniikalle, kun tarkastustoiminta onnistuu ilman telineitä tai nostimia. UAV-tekniikalla etenkin pienempien alueiden tarkastaminen on perinteistä helikopterikuvausta edullisempaa ja jalkaisin tehtävää tarkastusta vaivattomampaa. UAV-lämpökuvaus soveltuu muun muassa rakennusten lämpövuotojen tarkastamiseen, teollisuuden putkistojen vuotojen ja tukkeumien havaitsemiseen tai esimerkiksi pelastus- ja etsintätehtäviin. [39.]

Alalle on syntynyt paljon kaupallista liike- ja lentotoimintaa. Tämän hetken suurimmat valmistajat tulevat Kiinasta [4]. Myös eurooppalaisia ja ainakin yksi kotimainen UAV-valmistaja löytyy.

3 Lainsäädäntö

Tässä lainsäädäntöä koskevassa luvussa keskitytään lähinnä kauko-ohjatun ilma-aluksen, eli lentotyöhön käytettävän laitteen käyttöä koskeviin määräyksiin.

3.1 Kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttöä koskevia yleisiä määräyksiä

Miehittämättömän ilmailun toimintaa Suomessa säätelee Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, joka on luonut kauko-ohjattuja ilma-aluksia ja lennokkeja koskevan ilmailulakiin perustuvan määräyksen OPS M1-32, jonka viimeisin versio astui voimaan 1.1.2017. Näiden säädöksiä tarkoituksena on taata turvallinen lennätystoiminta sivullisia ajatellen sekä turvata muu ilmailuliikenne. OPS M1-32:n lisäksi miehittämättömästä ilmailusta koskevat jotkin yleisen kansallisen ilmailulain (864/2014) artiklat. On jokaisen lennättäjän vastuulla ja velvollisuutena perehtyä lainsäädäntöön. [1.]

Suomessa miehittämättömästä ilmailusta koskeva lainsäädäntö on tähän asti ollut melko kevyttä moneen muuhun EU-maahan verrattuna, mikä on ollut hyväksi esimerkiksi liiketoimintaa ajatellen. Yhteiseurooppalaisia sääntöjä kauko-ohjattujen ilma-alusten käytöstä ei vielä ole. EU:n tasolla kaavaillaan kuitenkin lisärajoituksia. Lentokorkeuden lisärajoitus, laitteiden rekisteröinti ja lennättäjien mahdollinen koulutus ovat olleet esillä kaavaillussa lakimuutoksessa. Taustalla ovat käyttäjämäärän suuri kasvu ja läheltä piti -vaaratilanteet. Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA:n kaavailema asetus astuisi voimaan vuoden 2018 alkupuolella. [5.]

Kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttäjän on ilmoitettava Trafille ennen ensimmäistä käyttökertaa

- tiedot käyttäjästä
- tekniset perustiedot ilma-aluksesta
- toiminnan laatu ja laajuus
- se, aiotaanko toimintaa harjoittaa asutuskeskuksen tiheästi asutulla alueella
- se, aiotaanko toimintaa harjoittaa ulkosalle kokoontuneen väkijoukon yläpuolella. [6, s. 3.]

Kauko-ohjattujen ilma-alusten on aina väistettävä muita ilma-aluksia, ja lentotyö on suoritettava siten, että siitä aiheutuva vaara ja meluhaitta ulkopuolisille on mahdollisimman pieni, eikä se häiritse pelastus- tai muun viranomaisen toimintaa. Kauko-ohjatusta lennosta vastaavan on oltava täysi-ikäinen ja ilma-aluksesta on käytävä ilmi sen käyttäjän nimi ja yhteystiedot. Lisäksi siinä on oltava järjestelmä tai kauko-ohjaajalla menettely ilma-aluksen vikaantumisten, ohjauksen ongelmien tai valvontaan tarvittavien yhteyksien katoamisen varalta. [6, s. 3.]

Jokaisesta lentotyöstä on tallennettava seuraavat tiedot ja säilytettävä ne kolmen vuoden ajan:

- päivämäärä
- lennätyspaikka
- ilma-aluksen päällikkö
- ilma-aluksen valmistaja ja malli
- lennätyksen tai lennätysjärjelmän alkamis- ja päättymisaika
- se, onko kyseessä suoraan näköyhteyteen perustuva toiminta (VLOS, *visual line of sight*) vai suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta (BVLOS, *beyond visual line of sight*)
- lennätystehtävän luonne ja se, käytetäänkö kauko-ohjaustähystäjää. [6, s. 3–4.]

Käytettäessä kauko-ohjattua ilma-alusta alueilla, jotka eivät ole muulta ilmailulta kielletty on noudatettava seuraavia ehtoja:

- Ilma-aluksen (UAV:n) lentoalähtömassa saa olla enintään 25kg,
- Käytön on oltava näköyhteyteen (VLOS) perustuvaa toimintaa
- Kauko-ohjaustähystäjällä ja ilma-aluksen ohjaajalla on oltava yhteydenpitomahdollisuus, puheyhteys joko suoraan tai esimerkiksi radiopuhelimen välityksellä.
- Lennätyskorkeuden on oltava alle 150 m. Rajoitus ei koske kiinteän esteen kuten radiomaston läheisyydessä tapahtuvaa lennättämistä kohteen omistajan toimeksiannosta eikä lennättämistä lennokeille määritellyillä lennokkien lennätyspaikoilla. Ehto ei myöskään koske erikseen määriteltyjä vaara- ja rajoitusalueita. [6, s. 4.]

Edellä mainittuihin vaatimuksiin on mahdollista hakea Trafilta tilapäistä poikkeuslupaa turvallisuusarvioineen esimerkiksi yllättävien ja ajallisesti rajattujen toiminnallisten tarpeiden vuoksi tai tilapäiseen testaus- ja tutkimustoimintaan, jos toiminta ei vaaranna turvallisuutta.

Ulkosalle kokoontuneen väkijoukon tai asutuskeskuksen tiheästi asutun osan yläpuolella lennättäminen on sallittua vain, kun

- ilma-aluksen suurin lentoonlähtömassa on enintään 7kg
- lennätys tapahtuu suorassa näköyhteydessä (VLOS)
- käytetään sellaista lentokorkeutta tai turvaominaisuuksilla varustettua ilma-alusta, että hätätilanteessa lasku voidaan suorittaa niin, että siitä aiheutuva vaara on ihmisille ja heidän omaisuudelleen mahdollisimman pieni
- ilma-aluksen käyttäjä on laatinut kirjallisen toimeksiantokohtaisen turvallisuus- ja riskienarvioinnin sekä toimintaohjeistuksen normaali- ja häiriötilanteissa. [6, s. 5.]

Näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta on suoritettava tarkoitusta varten erikseen varatulla alueella ja ilma-aluksen käyttäjän on laadittava toiminnasta turvallisuus- ja riskienarviointi sekä toimintaohjeistus normaali- ja häiriötilanteissa. Kaikki edellä mainitut dokumentit tulee säilyttää vähintään kolmen kuukauden ajan toiminnan päättymisestä. [6, s. 5.]

Kauko-ohjatuille ilma-aluksille sattuneista onnettomuuksista ja vakavista vaaratilanteista on ilmoitettava Trafille poikkeama-asetuksen ja ilmailuohjeen GEN T1-4 mukaisesti.

3.2 Vaara- ja rajoitusalueet

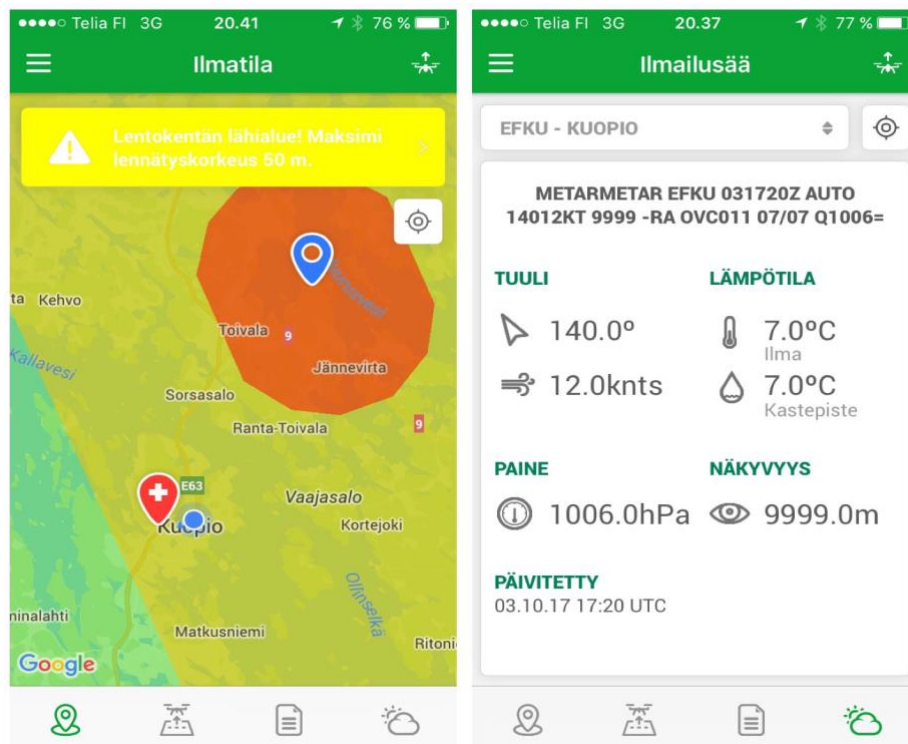
Lentokentän läheisyys tiukentaa kauko-ohjattavien ilma-alusten lentämistä koskevia rajoituksia huomattavasti. Myös jotkin muut alueet asettavat tiukkoja rajoituksia toiminnalle. Määräyksen OPS-M1-32 [6, s. 4] mukaan:

Kauko-ohjatun ilma-aluksen lennättäminen lentoaseman läheisyydessä eli lähialueella (CTR, Control Zone), lentopaikan lentotiedotusvyöhykkeellä (FIZ, Flight Information Zone) tai radiovyöhykkeellä (RMZ, Radio Mandatory Zone) on sallittua enintään 50 metrin korkeudella maan tai veden pinnasta, kun vaakasuora etäisyys kiitotiestä on vähintään viisi kilometriä. Mikäli on tarve lennättää lähempänä kiitotietä tai korkeammalla kuin 50 metriä edellä luetelluilla alueilla, lennätyksistä on sovittava erikseen ilmaliikennepalvelun tarjoajan kanssa. Jyväskylän (EFJY) ja Utin (EFUT) lentoasemien lähialueella lennättämisestä on kuitenkin kaikissa tapauksissa sovittava erikseen ilmaliikennepalvelun tarjoajan kanssa. Lisäksi EFHK CTR SOUTH alapuolisella alueella lennättämisestä on sovittava kaikissa tapauksissa Helsinki-Vantaan (EFHK) ilmaliikennepalvelun tarjoajan kanssa. [6, s. 4.]

Lisäksi aina tulisi kiinnittää erityistä huomiota ilmaliikenteeseen toimittaessa valvomattomien lentopaikkojen ja helikopterilentopaikkojen kuten sairaaloiden

läheisyydessä. Esimerkiksi öljynjalostamot ja varusmies- ja ydinvoimala-alueet estävät lentämissä niiden läheisyydessä. Trafi voi myöntää erityisistä syistä luvan ilmailuun kieltoalueella lupahakemuksella. Lupaa ei vaadita, jos kysymyksessä on kieltoalueella sijaitsevan laitoksen huoltoon tai muuhun sen toimintaan liittyvä ilmailu. Ilmailukartoista selviää sallitut, luvanvaraiset ja kielletyt lento-alueet. [44.]

Trafin julkaiseman Droneinfo-mobiiliapplikaation (kuva 3) avulla käyttäjät voivat saada sijaintiin perustuvaa tietoa alueen lentokieltoalueista ja rajoituksista sekä tietoa määräyksistä ja paikallisista sääolosuhteista. Kuvakaappaus Droneinfo-aplikaatiosta Kuopion keskustan tuntumassa osoittaa selkeästi, laitteen sijainnin olevan lentokentän lähialueella ja siten maksimilentokorkeuden olevan 50 m. Applikaatiolla on myös mahdollista tehdä lennätysilmoitus, jolloin muut sovellusta käyttävät voivat nähdä laitteen sijainnin lennätysten ajan.



Kuva 3. Droneinfo-aplikaation ilmatila- ja säänäkymä.

3.3 Vakuutukset

Koska lentotyötä tekevä on aina vastuussa vahinkojen sattuessa niin sanotun ankaran vastuun mukaan, on vakuutusten oltava kunnossa. Lentotyöhön eli ammattitoimintaan

käytettävällä ilma-aluksella tulee olla EU:n asetus (EY) N:o 785/2004:n mukainen vastuuvakuutus eli vakuutus ulkopuolisille aiheutuneita vahinkoja varten [7]. Jos vakuutusten saaminen kotimaisilta vakuutusyhtiöiltä on hankalaa, voi vakuutuksia katsella myös muista EU-maista. Jotkin vakuutusyhtiöt saattavat myös vaatia todistusta koulutuksesta tai osaamisesta. Suomessa on aloitettu järjestämään jonkin verran UAV- ja lennökkikoulutusta toimintaa kohtaan kasvaneen kiinnostuksen myötä. Koulutuksissa käydään läpi perusasiat lentotyöstä, turvallisuudesta ja lainsäädännöstä harrastuksen tai ammatinharjoittamisen aloittamista varten.

4 UAV-tekniikka

Tässä luvussa rajoitutaan tarkastelemaan yleistä miehittämättömien ilma-alusten tyyppiä, multikopteria ja sen rakenteellisia ominaisuuksia. Sen lennätystapahtumaa ja lennätystekniikkaa koskeva sisältö on rajattu pois.

4.1 Multikopterit

Multikopterit soveltuvat monipuolisiin kuvaustehtäviin ja tarkastuksiin ohjattavuutensa vuoksi ja niillä päästään kuvaamaan paikkoihin, joihin muilla UAV-tyypeillä ei ketterästi päästä. Niillä voidaan lentää hitaasti, nousta ja laskeutua pystysuoraan ja kuvata niin sanotusti paikallaan leijuen. Lisäksi laitteet ovat kevyitä ja helppo kuljettaa. Multikopterissa on nimensä mukaisesti 4–8 roottoria, joista joka toinen pyörii myötäpäivään ja joka toinen vastapäivään. Sen ohjaus tapahtuu moottoreiden kierroslukua säätämällä. [18, s. 13.]

Multikopterit jaetaan niiden roottoreiden lukumäärän mukaan kolmeen tyyppiin, jotka ovat

- quad- eli nelikopteri - neljä roottoria
- hexakopteri - kuusi roottoria
- octokopteri- kahdeksan roottoria.

Jokaisella kopterityypillä on omat vahvuutensa. Esimerkiksi quad-kopterit ovat kevyitä ja nopeita ohjata, hexa- ja octokoptereilla taas voidaan kuljettaa painavampaa hyötykuormaa, ja ne ovat hieman stabiilimpia nelikopteriin verrattuna. Hexa- tai octocopterin etuna on myös se, että yhden moottorin tai potkurin vikaantuessa se voi vielä turvallisesti laskeutua maahan ilman putoamista. Tämä voi olla huomioon otettava seikka, kun dronessa on kiinni esimerkiksi 10 000 €:n hyötykuorma, joka voi pudotessaan vahingoittua käyttökelvottomaksi. [32.]

Yleisesti kuvauskäyttöön tarkoitetut multikopterit ovat kevyitä. Trafin [2] RPAS-tilaston mukaan ammatilliseen ilmakuvaukseen käytettäviä ilma-aluksia on yli 2 300 kappaletta ja niiden keskimääräinen kopterikohtainen massa on 2,6 kg. Kaupallisten multikoptereiden hinnat vaihtelevat ominaisuuksista ja hyötykuormasta riippuen harrastajille tarkoitetuista 100 €:n hintaisista lennokeista aina vaativaan ammattikäyttöön tarkoitettuihin yli 25 000 €:n hintaisiin miehittämättömiin kuvauskopterikokonaisuuksiin.

Kuvauskoptereiden lentoaika on riippuvainen monesta tekijästä kuten lento-olosuhteista, kopterin painosta ja ominaisuuksista sekä akusta. Kuvauskoptereiden keskimääräinen lentoaika nykytekniikalla yhdellä akulla noin 25 minuutin luokkaa. Useimmat kopterit eivät ole vedenkestäviä, joten sateella lennättämistä tulee välttää komponenttien vahingoittumisen estämiseksi. Suositeltu käyttölämpötila-alue on usein välillä -10°C ... $+40^{\circ}\text{C}$. Koptereiden komponentit eivät ole ikuisia ja vaativat huoltoa ja varaosia. Esimerkiksi potkureita joutuu vaihtamaan usein ja niiden kuntoa kannattaa tarkkailla ennen jokaista lentoa. Valmistaja saattaa esimerkiksi antaa propulsiojärjestelmälle ja akuille 6 kk: n takuun [20].

Laitteiston komponenttien ja niiden toiminnan tuntemus auttaa UAV-laitteiston käyttäjää ymmärtämään kopterin toimintaa, ja siitä on apua mahdollisten vikatilanteiden tunnistamisessa. Näin tiedetään myös, mitkä osat vaativat säännöllistä tarkkailua ja mahdollista vaihtoa.

4.2 Materiaalit

UAV-multikoptereiden rungon materiaalina käytetään yleensä kestäviä muoveja ja erilaisia komposiittimateriaaleja kuten hiilikuidulla vahvistettuja muoveja. Niiden avulla kopterista saadaan kevyt ja sillä voidaan kantaa painavampaa hyötykuormaa. Kevyemmällä kopterilla on myös mahdollista lentää pidempään, kun akkujen energiaa ei kulu ylimääräisen painon kannattelemiseen. Kevyemmän ja kestävämmän materiaalin käytöllä propelleissa on myös etunsa. Keveydestä on apua painavien potkureiden inertian aiheuttaman värinän vähentämiseen. Hiilikuidun huonona puolena tosin on sen sähkönjohtavuus, mikä tekee siitä epäsojivan joihinkin sovelluksiin. [35; 18.]

4.3 Moottorit ja potkurit

Multikoptereiden moottoreina käytetään harjattomia sähkömoottoreita. Niiden etuna ovat niiden hyötysuhde, hiljaisuus ja kestävyys verrattuna harjallisiin malleihin. Paremman hyötysuhteen ansiosta ilma-alukselle saadaan pidempi lentoaika. Kopteria ohjataan säätämällä sen moottoreiden kierrosnopeutta nopeudensäätimellä. Jokaiselle moottorille on oma nopeudensäädin eli ESC (*Electronic Speed Controller*). Sen tehtävänä on muuttaa moottoreiden nopeutta lento-ohjaimelta saatujen käskyjen mukaan. Koneen suuntaa muutetaan esimerkiksi nostamalla myötäpäivään pyörivien moottorien kierroksia, ja samalla pienentämällä vastapäivään pyörivien kierroksia [18; 27].

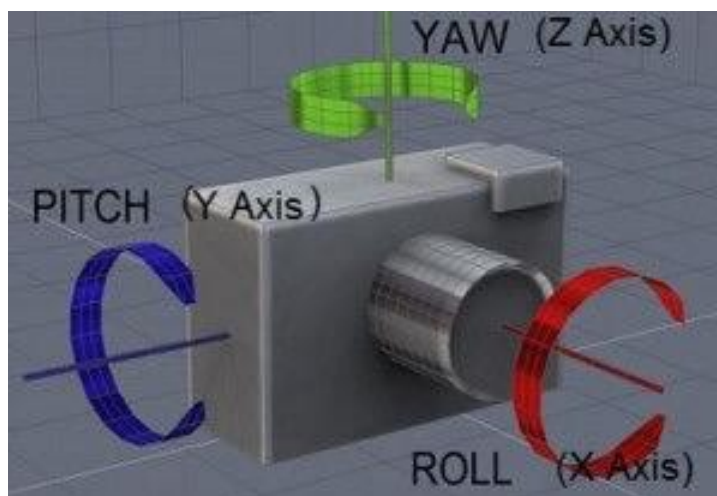
Moottorin Kv-luvulla tarkoitetaan sen pyörimää kierros määrää minuutissa (rpm) per voltti (V) jännitettä. Yksinkertaistaen esimerkiksi moottorin, jonka kv-luku on 650 ja akun jännite 22.8V, maksimi pyörimisnopeus on 14 820 kierrosta minuutissa ilman kuormaa. Moottori jolla on matala kv-luku omaa suuremman vääntömomentin, jolloin sitä voidaan käyttää isommilla potkureilla, jotka puolestaan tuottavat enemmän nostetta. Tämä on normaali järjestely esimerkiksi kuvauskäyttöön, kun on tarpeen nostaa raskaampaa kuormaa. Pienet potkurit taas soveltuvat nopeasti pyöriville moottoreille sekä nopeaan lentämiseen ja ohjaukseen. Moottoreita ja potkureita valittaessa yleisenä ohjeena on, että nostovoimaa tulee olla vähintään kaksi kertaa UAV-systeemin painon verran, jotta kopterin suorituskyky on hyvä ja turvallinen. [27.]

UAV-kopterin potkurit valmistetaan yleensä muovista tai hiilikuidusta. Epätasapainoiset potkurit aiheuttavat kopterin värinää ja ovat haitaksi kuvauksen kannalta. Potkurit voivat olla epätasapainoiset jo tehtaalta tullessa, jolloin ne voi joutua itse tasapainottamaan. [18.] Kopterin roottorit ovat hankalassa maastossa alttiita osumille, mikä voi pahimmassa tapauksessa pudottaa kopterin. Kopteri on mahdollista varustaa roottorisuojaimilla, jotka suojaavat potkureita osumilta.

4.4 Kameravakain

Vakaaja eli gimbaali on kamerakäyttöön tarkoitettu laite, jonka avulla saadaan vakaata ja värinätöntä kuvaa. Gimbaali toimii kamerapidikkeenä UAV-kopterissa. UAV-kuvauksen luonteesta johtuen sen on UAV-käytössä välttämätön komponentti, jos halutaan laadukasta kuvaa. Tuuli aiheuttaa kopterin heilumista ja kopteri välittää värinöitä kameralle, jolloin seurauksena on kuvan vääristymiä. Vakain pitää kameran suorassa ja halutussa asennossa sensoreiden ja moottoreiden avulla kopterin asennosta huolimatta. [18, s. 50; 26.]

Yleensä vakaimet ovat 3-akselisia, ja ne ovat suositeltavampia 2-akselisiin verrattuna, koska se eliminoi värinät ja tahattomat liikkeet kaikilla kolmella liikeakselilla. Edullisemmista harrastajakoptereista vakainta ei välttämättä löydy ollenkaan, vaan kamera on integroitu suoraan laitteeseen. Kameran kuvauskulmaa saadaan muutettua ohjaamalla gimbaalia ohjausyksikön ja harjattomien moottoreiden avulla kolmen akselin suhteen kuvan 4 osoittamalla tavalla. [26.]



Kuva 4. Gimbaalin liike-akselit [26].

Gimbalin ohjausyksikkö GCU (*Gimbal Control Unit*) saa tarvittavan tiedon kopterin lento-ohjaimen inertianmittausyksikkö IMU:n gyroskooppiantureilta joiden perusteella se ohjaa gimbaalin moottoreita ja pitää kameran suorassa. Gimbaalissa voi olla myös inertianmittausyksikkö sisäänrakennettuna. Gimbaalit on yleensä optimoitu tietyille kameramallille, jolloin ne on hienosäädetty ja tasapainotettu toimimaan kyseisen kameran kanssa. Markkinoilta löytyy myös kiinteitä kamera-gimbaali-yhdistelmiä. [26.]

4.5 Akku

UAV-koptereissa käytettävät akut ovat useimmiten LiPo-eli litiumpolymeeriakkuja. Syynä on niiden sisältämä hyvä energiatiheys, jolloin saadaan pitkä lentoaika pienellä painolla. Ne koostuvat useista yksittäisistä akkukennoista, jotka kytketään sarjaan. Esimerkiksi akkumerkinnällä 3s tarkoitetaan kolmea sarjaan kytkettyä akkukennoa, ja jos yhden kennon jännite on 3,7 V, niin koko akun jännite on 11,1 V. [19.] Akun kapasiteetti on yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista. Se ilmaistaan milliampeeritunteina (mAh). Yksinkertaistaen esimerkiksi 4200 mAh:n akku 10 A:n tasaisella kulutuksella kestäisi noin 25 minuuttia. [27; 18, s. 38.]

LiPo-akkujen huonoja puolia ovat väärinkäytettäessä niiden vaarallisuus, jolloin ne voivat paisua ja pahimmassa tapauksessa jopa räjähtää. LiPo-akkuja ei tulisi koskaan yliladata, sillä ne sietävät huonosti ylilatausta ja ylijännitettä. Useimmat uudet akut on varustettu turvapiirillä, joka estää niiden ylilatauksen. LiPo-akkujen latauksessa tulee käyttää niille tarkoitettua laturia, jossa on tasaus toiminto. Se lataa akun kaikki kennot tasaisesti eikä aiheuta yksittäisen kennon ylilatausta. Akkua ladattaessa tulee varmistua, ettei ylitetä akun maksimilatausvirtaa. Se ilmoitetaan C-arvona, jolla akun kapasiteetti kerrotaan, jolloin saadaan maksimilatausvirta. Esimerkiksi jos akun kapasiteetti on 4200 mAh ja C-arvo on 1, ei akkua saisi ladata yli 4.2 A:n virralla. C-arvon avulla ilmoitetaan myös akun maksimipurkuvirta. LiPo-akut sietävät myös huonosti kosteutta johtuen niiden sisältämästä litiumista. Kosteuden kanssa tekemisiin joutuneet akut vaurioituvat pysyvästi eikä niitä tulisi enää käyttää. [18, s. 38.]

Useimmissa kaupallisissa UAV-laitteissa on valmiina valmistajan teettämä akkupaketti, minkä takia niihin eivät sovellu muiden valmistajien akut. Niissä on kuitenkin valmiina akun turvallisuutta parantavia ominaisuuksia kuten ylilataus- ja virtasuoja, jolloin väärinkäyttöä ei pääse tapahtumaan. Lisäksi käyttäjällä voi olla mahdollisuus

seurata akkujen tilaa kuten lämpötilaa, jännitettä ja jäljellä olevaa varaustasoa applikaation kautta lennon aikana. Kopteri myös hälyttää akun olevan vähissä ja tahdottaessa palaa automaattisesti lähtöpaikkaan. UAV-multikoptereiden lentoajat ovat keskimäärin noin 25 minuutin luokkaa [37]. Lentoaika riippuu akun kapasiteetista sekä kopterin ja hyötykuorman virrankulutuksesta. Virtaa kuluu esimerkiksi moottoreiden ja kameran käyttöön. LiPo-akkujen kemia heikkenee käytössä eivätkä ne siis kestä ikuisesti. [18, s. 38–39; 36.]

4.6 Lennonohjausjärjestelmä

UAV-kopterit on varustettu erilaisilla sisäänrakennetuilla lentotyön kannalta oleellisilla komponenteilla ja sensoreilla. UAV-kopterin tärkein osa on sen lennonohjausjärjestelmä eli lento-ohjain. Lennonohjausjärjestelmä sisältää GPS-moduulin, vastaanottimen sekä erilaisia liikeantureita sisältävän IMU:n (*Inertial Measurement Unit*) eli inertianmittausyksikön. Inertianmittausyksikössä on yleensä kolme kiihtyvyyssanturia, jotka mittaavat multikopterin asentoa X-, Y- ja Z-suunnissa. Lisäksi se sisältää kolme suunnan muutoksia mittaavaa gyroskooppiä. Näiden antureiden tiedon perusteella kopterin asento tietyllä hetkellä voidaan laskea ja sen toiminta ja ohjaaminen on turvallista ja sulavaa. [18, s. 24.]

Lento-ohjain korjaa gyroskooppien havaitsemien esimerkiksi tuulesta johtuvan kopterin suunnan muutosten mukaan kopterin asentoa tekemällä pieniä säätöjä satoja kertoja sekunnissa. Tämä tekee muun muassa paikallaan leijumisen mahdolliseksi. Useimmat lento-ohjaimet käyttävät PID-säätöä korjauksien tekemiseen. [18; 25.]

UAV-koptereista löytyy magnetometri tai kompassi, jonka avulla UAV ja kauko-ohjausjärjestelmä tietävät tarkan lentosijainnin. Kompassi täytyy kalibroida valmistajan ohjeiden mukaan esimerkiksi pyöräyttämällä kopteria ympäri, kun laitteeseen on tehty muutoksia tai lentopaikka on muuttunut. Kompassin kalibroinnilla asetetaan kotipiste eli ns. *home-point*, johon kopteri palaa signaalin kadotessa kopterin ja kauko-ohjainsysteemin väliltä. [25.]

Lennonohjausjärjestelmään sisältyvältä GPS-satelliittipaikanrimelta saadaan kopterin sijaintitiedot. GPS päivittää sijainnin noin sekunnin välein tai useammin laitteesta riippuen. UAV-koptereiden GPS-laitteiden tarkkuudet vaihtelevat muutamista metreistä

tarkimpiin noin 0.1 m:n tarkkuuksiin riippuen GPS-moduulista ja paikannettujen satelliittien määrästä. Yksi keino lisätä paikannuksen tarkkuutta on käyttää GPS:llä varustettua maa-asemaa kopterin GPS:n tukena. Gps:llä saadaan myös korkeuslukema, mutta sen lisäksi UAV-koptereissa käytetään näkösensoreita ja ilmanpaineanturia mittaamaan korkeutta. GPS mahdollistaa erilaiset autopilot-toiminnot kuten ennalta suunnitellut lentoreitit, jolloin lennättäjän tehtäväksi jää vain tarkkailla toimintaa kopterin lentäessä autonomisesti ennalta määritetyn reitin. Myös useimmissa kameroissa on GPS, jolloin kuvien tietoihin tallennetaan kuvauspaikan koordinaatit. Tämä on kätevä ominaisuus jälkeenpäin kuvauskohteen tarkan sijainnin määrittämisessä. [18, s. 24, 46.]

UAV:n manuaaliseen ohjaamiseen ja ominaisuuksien käyttöön tarvitaan monikanavainen radio-ohjain. Kopterissa on vastaanotin, joka muuttaa käskyt lento-ohjaimelle ja edelleen nopeudensäätimelle ja moottoreille. Nykyisin ohjaimissa käytetään 2.4 GHz: tai 5.8 GHz:n taajuuksia. Kantavuus niillä on usein parhaimmillaan noin viiden kilometrin luokkaa. [18, s. 41.]

5 Lämpökuvaus

5.1 Käyttö

Lämpökuvaus on ainetta rikkomaton mittausmenetelmä, jota käytetään erilaisissa kuntotutkimuksissa kuten rakennusten ja koneiden tarkastuksissa. Sillä voidaan pyrkiä esimerkiksi energiakustannusten pienentämiseen tai kunnossapidon työkaluna vaurioiden ja vuotojen paikallistamiseen. Lämpökuvauksella on lukuisia eri sovelluksia rakennustekniikassa, teollisuudessa ja esimerkiksi pelastustoiminnassa kadonneiden etsimisessä. Lämpökuvauksen toiminta perustuu lämpötilaerojen muodostaman kuvan tulkintaan (kuva 5).



Kuva 5. Flir-lämpökamera [8].

Lämpökuvauksen työkaluna käytetään lämpökameraa joka mittaa kuvattavan pinnan lähettämän lämpösäteilyn voimakkuutta. Tätä säteilyä kutsutaan myös infrapunasäteilyksi. Kameran ilmaisin muuttaa mitatun lämpösäteilyn lämpötilatiedoksi, josta muodostetaan lämpökuva digitaalisesti reaaliajassa [9, s. 12]. Lämpökuvasta voidaan havainnoida lämpötilaeroja ja lämpötilapoikkeamia. Lämpökamerakuvaus on osaltaan mullistanut kunnossapitokenttää ainetta rikkomattomana tutkimusmenetelmänä, ja sen käyttösovellukset ovat monipuoliset.

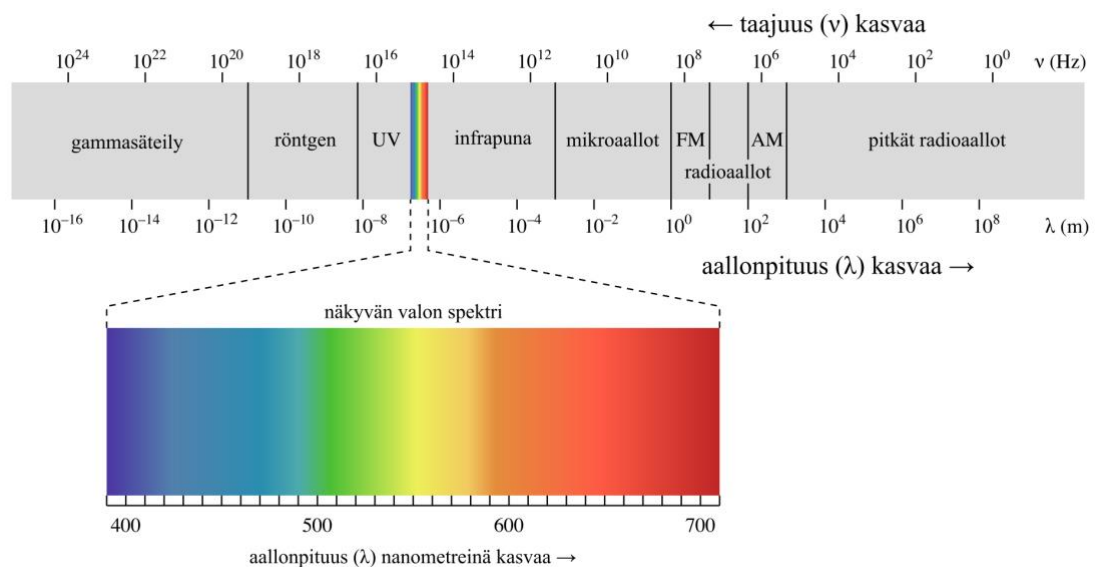
Kuvien oikea tulkinta, kameran ominaisuuksien tuntemus ja sovellusohjelmien käyttö vaativat perehtymistä tehokkaan ja onnistuneen käytön saavuttamiseksi. Lämpökuvien tulkinnassa tulee esimerkiksi ottaa huomioon pintalämpötiloihin mahdollisesti vaikuttaneet tekijät kuten taustasäteily ja tarvittaessa tukea mittaustapahtumaa muilla mittauksilla [9, s. 14].

Rakennustekniikassa ja tarkastuksissa lämpökameran käyttö on arkipäivää esimerkiksi rakenteiden lämpötekniistä toimivuutta tutkittaessa ja lämpöpoikkeamia kuten ilmapuotoja etsittäessä. Lämpökameroiden kehityksen myötä niiden ominaisuudet ovat parantuneet sekä koot ja hinnat pienentyneet viime vuosikymmeninä huomattavasti. [9, s.13.] Nykyään hyvillä ominaisuuksilla varustettu lämpökamera saadaan mahtumaan jo

kevyen kauko-ohjatun ilma-aluksen kyytiin. Se että lämpökuvaus voidaan yhdistää ilmasta kuvaamisen kanssa luo uusia mahdollisuuksia kunnossapitotarkastuksiin.

5.2 Lämpösäteily

Lämpökuvaus on pintojen lähettämän infrapuna-alueen lämpösäteilyn mittaamista lämpökameralla. Lämpösäteily on osa infrapunakaistaa, joka kuuluu sähkömagneettiseen spektriin. Sähkömagneettinen spektri jaetaan kuvan 6 mukaisesti aallonpituusalueisiin, jotka erotetaan niiden tapojen perusteella, joilla kyseistä säteilyä voidaan tuottaa ja havaita. Näitä ovat esimerkiksi näkyvä valo, mikroaallot ja infrapunasäteily. [45, s. 1.]



Kuva 6. Sähkömagneettinen spektri [11].

Ihmissilmä ei pysty havaitsemaan infrapunasäteilyä mutta voimme tunkea sen lämpönä, johtuen sen pidemmästä aallonpituudesta. Infrapunasäteilyä syntyy atomien ja molekyylien lämpöliikkeen muutoksissa. [13, s. 313–315.] Kaikki pinnat, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen ($-273,15^\circ\text{C}$, $0,00\text{K}$), lähettävät lämpösäteilyä, jonka voimakkuus riippuu pintalämpötilasta ja pinnan emissiokertoimesta [12]. Tähän säteilyyn sisältyy siten myös tutkittavasta pinnasta heijastunut säteily.

Infrapuna on aallonpituusjakaumassa lähellä näkyvää valoa mutta tätä pitkäaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä. Infrapunasäteilykin voidaan jakaa

aallonpituuksiensa mukaan eri alueisiin, joita ovat lähinnä näkyvää valoa oleva lähi-infrapuna (*NearInfraRed* =NIR) ja lähi-infrapunaa pitkäaaltoisempi lämpösäteily (SW, LW). Käytännössä lämpösäteilystä puhuttaessa puhutaan lyhytaaltoalueesta 3–5 μm (*Short Wave*, SW) ja pitkäaaltoalueesta 8–12 μm (*Long Wave*, LW). Pinnan lähettämän säteilyn tehoa pinta-ala yksikköä kohti kutsutaan säteilemisvoimakkuudeksi M , jonka yksikkö on $[\text{W}/\text{m}^2]$. Yhtälöstä

$$M = \varepsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

jossa ε on pinnan emissiivisyys, $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ on Stefanin ja Boltzmannin vakio ja T pinnan lämpötila, huomataan että säteilyvoimakkuus kasvaa jyrkästi lämpötilan funktiona ja riippuu pinnan laadusta eli emissiivisyydestä. Lisäksi mitä lämpimämpi pinta on, sitä pienemmällä aallonpituudella pinta säteilee tehokkaimmin. [12; 14, s. 461.]

Lämpökamerat toimivat valmiiksi määritellyllä aallonpituusalueella ja lämpötila-alueella välillä $-40 \text{ }^\circ\text{C} \dots +1500 \text{ }^\circ\text{C}$. Yleisimmin käytetään infrapunakaistan pitkäaaltoaluetta. Pitkäaaltokamerat soveltuvat hyvin matalien lämpötilojen kuvaamiseen, vaikka kohteiden lähettämä lämpösäteily on alhainen, sillä alle $100 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa pitkäaaltoalueella on käytettävissä huomattavasti enemmän lämpösäteilyenergiaa kuin lyhytaaltoalueella. Lämpökameroiden kalibroinnilla kamerat saadaan kuitenkin mittaamaan lämpötiloja oikein aallonpituusalueesta huolimatta. [12; 9, s.19.]

5.3 Emissiivisyys

Kaikilla materiaaleilla on emissiokerroin e , jolla on arvo 0–1 välillä. Se tarkoittaa materiaalin kykyä säteillä ja ottaa vastaan säteilyä suhteessa täydelliseen säteilijään eli mustaan kappaleeseen, jonka emissiokerroin $e = 1$. Täydellinen musta kappale absorboi kaiken tulevan säteilyn eikä heijasta sitä lainkaan. Taulukon 1 mukaan materiaalit, joilla on kiiltävä ja heijastava pinta kuten alumiini ja kiiltävät metallit, omaavat alhaisen emissiokertoimen (0–0,5). Tällöin suuri osa pinnan lämpösäteilystä voi olla heijastuksista johtuvaa ulkopuolista säteilyä. Tällaisen pinnan tarkan lämpötilan mittaaminen lämpökuvauksella on hankalaa etenkin matalissa lämpötiloissa. Mitä suurempi pinnan emissiokerroin on, sitä suurempi osa on pinnan omaa lämpösäteilyä. Emissiivisyyteen vaikuttavat pinnan materiaali, lämpötila ja kuvauskulma. [9, s. 16–17.]

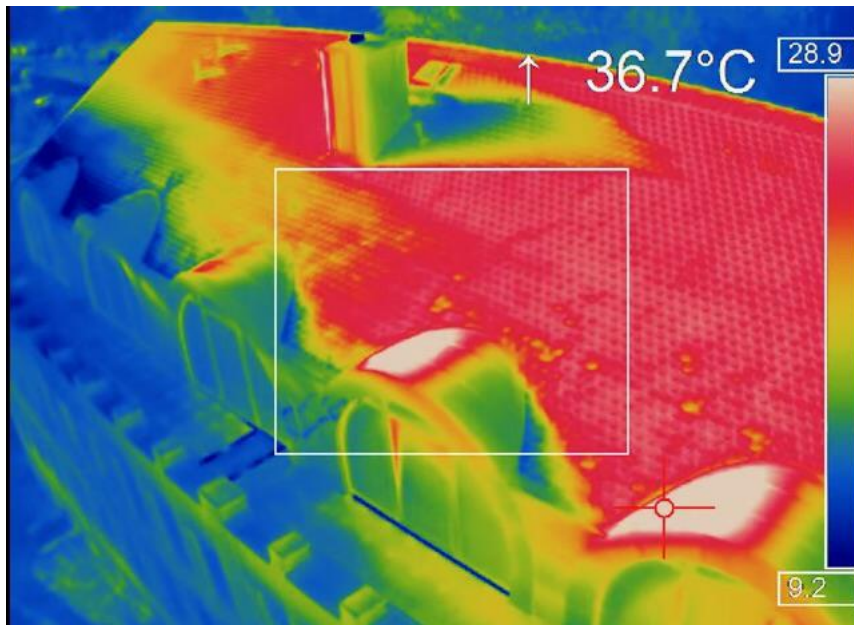
Taulukko 1. Eräiden yleisten materiaalien emissiokertoimia eri lämpötiloissa [14, s. 464].

Materiaali	Lämpötila (C*)	Emisiivisyys e
Alumiini, kiiltävä	227	0,039
Betoni	20	0,92
Ihmisen iho	32	0,98
Jää		0,97
Lasi		0,92
Lumi		0,8
Maaperä, kuiva	20	0,92
Maaperä, märkä	20	0,95
Rappaus	20	0,91
Vesi		0,98
Öljymaali		0,94
Sora		0,28
Rautapelti, kaupallinen	100	0,07
Puu, höylätty		0,85
Punatiili	20	0,93

Jotta lämpökameran mittaustulokset olisivat tarkkoja, tulee käyttäjän määritellä kuvattavan pinnan emissiokerroin, muutoin kiiltävät pinnat näyttävät kylmemmiltä kuin saman lämpöiset korkean emissiivisuuden omaavat pinnat. Kiiltävien pintojen mittaamista voi helpottaa esimerkiksi maalamalla tai teippaamalla mitattavan kohdan estämään materiaalin heijastusta. Esimerkiksi sähköverkkojen ja aurinkopaneeleiden UAV-lämpökuvaustarkastuksissa kuvattavat pinnat voivat olla kiillotettua metallia tai lasia, jolloin niiden emissiivisyys on erittäin alhainen. [9, s. 16–17.]

5.4 Lämpökameran tekniikka

Lämpökameran toiminta perustuu siihen, että se erottaa erilämpöiset kohteet niiden lähettämän infrapunasäteilyn aallonpituuden ja säteilemisvoimakkuuden perusteella. Kameran ilmaisimien muuttama mitatun lämpösäteilyn lämpötilatiedoksi ja muodostaa kuvattavasta kohteesta lämpökuvan kuten kuvassa 7 on havainnollistettu. Pintojen lämpötilajakauma nähdään kuvassa eri väreinä tai harmaan sävyinä. Lämpökamera soveltuu ainoastaan kohteen pintalämpötilojen mittaamiseen. [12.]



Kuva 7. Lämpökameran muodostama kuva [15].

Lämpökameroiden kokonaistarkkuus ja lämpökuvien laatu ovat riippuvaisia kameran resoluutiosta, eli matriisi-ilmaisimen mittapisteiden määrästä. UAV-käyttöön soveltuvat lämpökamerat ovat usein resoluutioltaan 336X256 tai 640X512 kuvapistettä ja hinnaltaan noin 10 000 €:n luokkaa. Näiden kahden radiometrisen muutoin samoilla ominaisuuksilla varustetun kameran välinen hintaero on noin 3000–4000 €. [38.] Edullisimmissa lämpökameroissa resoluutio voi olla vain 80X60 kuvapistettä. Pienempiresoluutioisella kameralla etenkin kauempaa kuvattaessa yksityiskohdat jäävät epäselviksi tai kokonaan havaitsematta. Lämpökameran resoluutio tulisikin valita mittauksen tarkoituksesta, kohteesta ja yleisesti käytettävästä mittausetäisyydestä riippuen. Ammattimaiseen UAV-lämpökuvaukseen on poikkeuksetta suositeltava mahdollisimman korkearesoluutioista kameraa, jos yksityiskohtien havainnointi on tärkeää. Tällöin myös kameran käyttöalue on laaja ja pienetkään poikkeamat eivät jää havaitsematta. [12; 21; 9, s. 20.]

Kameran resoluution suositellaan olevan vähintään 320x240 pikseliä eli 76 800 mittapistettä selkeiden ja havainnollistavien kuvien ottamiseksi [9, s. 9]. Yleisenä ohjeena on, että kuvausetäisyys olisi 2–4 m:n etäisyydellä kuvattavasta pinnasta mutta lämpökameraobjektiivien avulla kuvaus onnistuu UAV-käytössä tarkasti kauempaakin [9, s. 20].

Nykyiset lämpökamerat perustuvat matriisitekniikkaan. Lämpökameran matriisi-ilmaisimessa eli detektorissa jokaisella kuvapisteellä on oma ilmaisimensa. Lämpökuvan muodostetaan näiden yksittäisten rinnakkain ja päällekkäin olevien mittapisteiden antaman lämpösäteilytiedon pohjalta. Mittaus perustuu kohteen lämpösäteilyn ilmaisimeen aiheuttamaan resistiiviseen muutokseen. [9, s. 20.]

Lämpökameroita on mittaavia sekä ei-mittaavia. Ei-mittaavissa lämpökameroissa olevat infrapunasensorit voivat ainoastaan erottaa lämpötilaeroja ja muodostaa niistä lämpökuvan erilaisten väripalettien tai filttareiden kautta. Mittaava eli radiometrinen lämpökamera taas pystyy näyttämään tarkan lämpötilalukeman jokaiselta kuvan pikseliltä. Radiometrinen lämpökamera onkin ehdoton valinta teollisuuden ja kunnossapidon mittaaviin lämpökuvaussovelluksiin. Ei-mittaavia lämpökameroita käytetään muun muassa pelastus- ja valvontatehtävissä. [17.]

Useimpien lämpökameroiden tarkkuus on ± 2 °C tai 2 % lukemasta eli esimerkiksi 100 °C ± 2 °C tai 200 °C ± 4 °C. Lämpökameroiden ominaisuuksia verrattaessa puhutaan myös kuvataajuudesta (*frame rate*). Se määrittää, kuinka nopeasti kameran detektori muodostaa kuvia. 9 Hz:n kamera muodostaa 9 kuvaa sekunnissa ja 60 Hz:n kamera puolestaan 60 kuvaa sekunnissa. [16.] Tällä on lähinnä merkitystä videota kuvattaessa ja liikkuvaa kuvaa seurattaessa, jolloin kuva näyttää sulavammalta etenkin nopeassa liikkeessä. Kameroissa on myös kuvien ja videon tallennusmahdollisuus muistikortille kuvien jälkikäsitteilyä ja analysointia varten.

Lämpökamerat suositellaan kalibroitavaksi noin kahden vuoden välein, jotta mittaustulokset pysyvät luotettavina. Muita säännöllisiä huoltoja lämpökamerat eivät tarvitse. Kalibroitopalveluiden hinnat liikkuvat 300–600 €:n välillä kalibroinnin lämpötila-alueesta riippuen. [12.]

5.5 Optiikka

Lämpökameran linssit on valmistettu germaniumista sen lasia paremman infrapunalämpösäteilyn läpäisykyvyn vuoksi. Erilaisella optiikalla eli linseillä voidaan vaikuttaa lämpökameran FOV:iin (*field-of-view*) eli näkymäalueeseen ja lämpökameran erotuskykyyn, jolla tarkoitetaan pienintä pinta-alan kokoa, jonka kamera pystyy

erottamaan. [12.] Mitä pidempi polttoväli optiikalla on, sitä pienempi on sen näkymäalue mutta sitä parempi erotuskyky.

Infradexin lämpösäteily- ja infrapuna-verkkodokumentin [12] mukaan

Pienin eroteltava pinta eli pikselinerottelukyky voidaan laskea kertomalla mittausetäisyys kameran geometrisellä erottelukyvällä: geometrinen erottelukyky ilmaistaan yksittäisen pisteen mittauskulmana milliradiaaneissa.

Lämpökameroihin ei normaalisti ole ollut saatavilla optista zoomausta johtuen lämpökameran optiikkamateriaalien kalleudesta, optisten pintojen vaikeasta lämpötilahallittavuudesta ja läpäisyprosentin heikentymisestä [12]. Digitaalinen zoomaus lämpökameroista kuitenkin yleensä löytyy. Digitaalinen zoomaus näyttää halutun kohteen suurempana, mutta se ei auta parantamaan mittaustarkkuutta tai kuvan resoluutiota. Käytettäessä se siis heikentää kuvanlaatua. On suositeltavaa ennemmin kuvata kohdetta lähempää kuin käyttää digitaalista zoomausta. Kuvien digitaalinen käsittely ja rajaus on mahdollista myös jälkikäteen kuvankäsittelyllä. Digitaalinen zoomaus voi olla hyödyllinen toiminto esimerkiksi kadonneiden etsintätehtävissä ja pelastustehtävissä, jolloin saadaan suurennettua mahdollinen kohde, eikä kuvan tarkkuudelle ole suurempia vaatimuksia.

5.6 Käyttöominaisuudet

Rakenteiden virheet tai poikkeavuudet voidaan havaita lämpökuvasta muusta ympäristöstään poikkeavina lämpötilaeroina. Tietyissä tilanteissa nämä lämpötilaerot syntyvät vain silloin, kun ulko- ja sisälämpötilanerotus muuttuu [9, s. 19]. Kameran ominaisuuksista riippuen lämpökuvassa voidaan näyttää esimerkiksi kohteen pistelämpötila, alueiden keskilämpötila, maksimi- ja minimilämpötila tai asetetun lämpötilatason ylittäviä alueita.

Isotermi-toiminnon avulla voidaan helpottaa lämpötilapoikkeamien havaitsemista määrittelyllä lämpötila-alueella. Isotermisessä kuvaustilassa eli ns. hälytystilassa, näytetään määritettyjen lämpötilavälien yli, alle tai väliin jäävät osat korostettuna. Esimerkiksi etsintätehtävissä voidaan asettaa isotermiseksi arvoksi ihmisen lämpö, jolloin se näkyy kirkkaimmin hälytysvärillä lämpökuvassa. Samaista periaatetta käytetään hyväksi muun muassa rakennusten lämpövuotoja etsittäessä tai

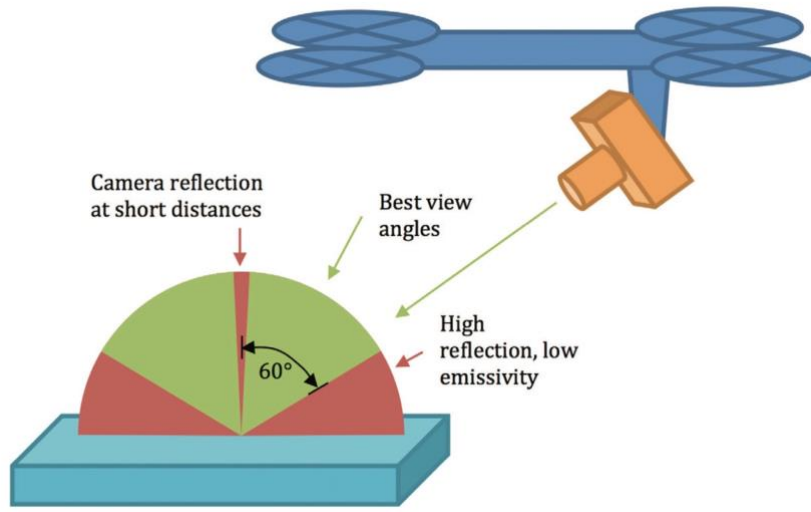
energialaitosten lämmönsiirtolinjoja tarkastettaessa. Näin halutut kohteet havaitaan huomattavasti paremmin hälytysvärin ja isothermisen asetuksen avulla. [19.]

Pistemittaustyökalulla voidaan määrittää halutun pinnan tarkan pisteen lämpötila. Pistemittaus käyttää vain yhden pikselin arvoa. Kamera näyttää myös kuumat ja kylmät pisteet kuvasta, ja lämpötilajakauma on mahdollista esittää vaaka- tai pystysuorana profiilina lämpökuvassa kameran ominaisuuksista riippuen. Kuvien Exif-tietoihin lisätään myös GPS-sijaintitiedot, jolloin kuvauspaikan määrittäminen jälkeenpäin on helpompaa [18, s. 46].

Lämpökuvauksen jälkeen kuvia tarkastellaan ja muokataan kuvankäsittelyohjelmistolla, jolloin niistä saadaan mahdollisimman tarkasti haluttua tietoa. Kuvankäsittelyohjelmistot ovatkin erittäin tärkeä lisävaruste, ja niiden käyttö osa lämpökuvausprosessia. Yleensä lämpökameraan kuuluu valmistajan tarjoama ohjelmisto, jolla kuvia on mahdollista tarkastella, muokata ja luoda raportteja. Ohjelmistolla on mahdollista esimerkiksi jälkikäteen muuttaa emissiivisyyttä, kohteesta heijastuvaa lämpötilaa, lämpötila-aluetta ja väriskaalaa sekä muokata lämpötilan mittauspisteitä. Myös kuvan suurentaminen, tasoittaminen ja suodatus ovat mahdollisia. Kuvien tarkastelua voidaan helpottaa näkyvän valon ja lämpökuvan yhdistelmällä tai rajauksella, jolloin kuvauskohteesta saadaan selkeämpi kuva. [10.]

5.7 Kuvaukseen vaikuttavat tekijät

Tärkeimmät kuvaustulokseen vaikuttavat tekijät ovat pintojen emissiivisyys, kuvauskulma, kuvausetäisyys sekä sääolosuhteet. Jotta mittaukselliset tulokset olisivat tarkkoja, on kuvaajan määritettävä kuvauskohteen emissiivisyys ja taustan eli ympäristön lämpötila kameran asetuksissa. Käytännössä ympäristön vaikutus tulee esiin talvella ulkokuvauksissa, jolloin kuvausympäristön lämpötila poikkeaa huomattavasti esimerkiksi kiinteistön lämpötilasta. Ympäristön lämpötilalla on sitä suurempi vaikutus mitä matalampi kuvattavan kohteen emissiivisyys on. Pinnan emissiivisyys muuttuu kuvauskulmaa muutettaessa. Vinosta kulmasta kuvattaessa materiaalin emissiivisyys ja lämpötila laskevat. Mittauksen luotettavuuden vuoksi mittauskulman kuvauskohteeseen tulisi olla korkeintaan +/- 60 astetta. [16.] Myös kohtisuoraa kuvauskulmaa tulee välttää läheltä kuvattaessa kameran aiheuttaman heijastuksen vuoksi. Kuvassa 8 havainnollistetaan oikea kuvauskulma UAV-kopterilla.



Kuva 8. Kuvauskulma [22].

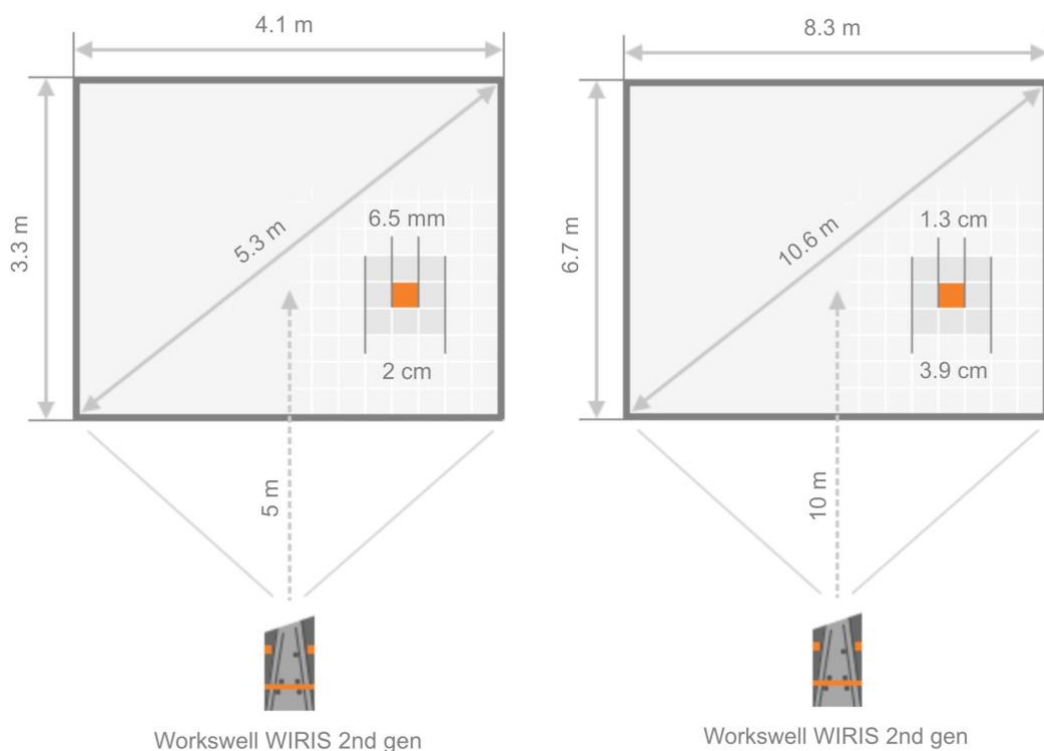
Auringon heijastuminen lämpökuvassa voi vääristää mittaustulosta jopa sadoilla asteilla. Onkin suositeltavaa ottaa kuvia useasta eri kulmasta, jolloin voidaan vähentää heijastuman vaikutusta. Ilman suhteellinen kosteus ja erilaiset ilman partikkelit, kuten sade, lumi, pöly, savu ja muut väliaineet haittaavat mittaustulosta erityisesti pidemmällä mittausetäisyyksillä. Pintojen lämpötila voi olla myös herkkä koville tuulille. Paras tapa vähentää ympäristöstä johtuvia häiriöitä mittaukselle on minimoida UAV-laitteiston ja pinnan välinen mittausetäisyys. Ympäristön vaikutuksia voidaan vähentää jo huomattavasti kuvattaessa UAV-kopterilla korkeintaan 10 m:n korkeudella tai lähempänä kuvauskohdetta sekä kuvattaessa viileällä ja selkeällä kelillä. [21.]

Mitä kauempaa kuvataan, sitä suurempaa aluetta yksi kuvapiste eli pikseli edustaa. Tällöin yksittäinen ympäristöään kylmempi tai kuumempi kohta voi jäädä havaitsematta, koska lämpökamera mittaa aina kuvapisteen kokonaissäteilyä. Pikselinerottelukyky, eli yhden kuvapisteen edustama alue etäisyyden funktiona saadaan laskettua kameran ominaisuuksista [9, s.18]. Yhden kuvapisteen edustamaan alueeseen voidaan vaikuttaa kuvausetäisyyden lisäksi myös muuttamalla optiikalla kameran polttopistettä, kun oletetaan kuvausetäisyyden pysyvän samana.

Erittäin pienen alueen mittaamisesta tarkasti voi tulla kohtuuttoman vaikeaa ja epätarkkaa edellä mainitusta syystä. UAV-kuvauksessa tämä tulee erityisesti huomioida, kun kuvausetäisyydet kasvavat, jolloin aluetta kuvaavien pikselien määrä vähenee ja erotuskyky huononee. Lämpökameravalmistaja Flirin testien mukaan UAV-lämpökamerakuvauksen halutun mittauskohteen halkaisijan tulisi olla vähintään 10

pikseliä, jotta saadaan järkeviä mittaustuloksia, ja mielellään yli 20 pikseliä luotettavan mittaustuloksen varmistamiseksi [21].

Havainnollistetaan seuraavaksi kuvausetäisyyden vaikutusta mittaukseen ja sen tarkkuuteen. Kuvasta 9 nähdään että kuvattaessa Workswell UAV-lämpökameravalmistajan 650X512 resoluutioisella Wiris-lämpökameralla 10 m:n etäisyydellä ja 13 mm:n linssillä, yhden pikselin koko on 1.3 cm. Tällöin kymmenen pikselin minimisuositusta vastaavan alueen koko on 13 cm ja luotettavan 20 pikseliä vastaavan alueen koko jo 26 cm. Tämä kuvausetäisyys ei siis sovellu kovinkaan pienten kohteiden luotettavaan mittaamiseen ainakaan kyseisellä linssillä.



Kuva 9. Kuvausetäisyyden vaikutus mittaustarkkuuteen [30].

Lyhennettäessä kuvausetäisyyttä 5 m:n, kymmentä pikseliä vastaavan alueen koko on enää puolet eli 6,5 cm. Tämä sopii jo huomattavasti pienempien kohteiden kuvaamiseen, samalla kokonaisnäkyväalue FOV:n pienenentyessä. Samaiseen vaikutukseen päästään vaihtamalla kameraan suurempipolttovälinen linssi. Tätä laskinta käyttämällä on helppo havainnoida kyseisellä resoluutiolla ja linssillä varustetun lämpökameran luotettavan mittauksen kuvausetäisyys, kun pienin haluttu mitattava kohde tunnetaan, ja valita käyttökohteeseen soveltuva linssi.

6 UAV- lämpökuvaussovellukset

UAV-lämpökuvauksella päästään turvallisesti ja helposti tarkastamaan kohteita ja laajoja alueita, joiden tarkastaminen käsikameralla voi olla hankalaa, työlästä tai jopa vaarallista, kuten telemastot, korkeat rakennukset ja tuuliturbiinit. Kun tarkastuksia tehdään usein ja tarkastettavat alueet ovat suuria, ovat myös tarkastusten kustannukset suuria. Oikeassa tehtävässä miehittämättömällä ilma-aluksella suoritettulla kuvauksella voidaan saavuttaa säästöjä pienentyneinä miestyötunteina ja ilman nostureiden, helikoptereiden tai muiden kalliiden apuvälineiden käyttöä tarkastuksissa. Rakenteesta saadaan nopeasti kokonaiskuva, jota voidaan jälkepäin tarkastella tarkemmin lämpökuvausohjelmiston avulla. [33; 34]

6.1 Tyypilliset käyttöalueet

Esimerkkejä tyypillisistä UAV-lämpökuvaussovelluksista:

- rakennusten lämpövuotojen ja kosteusvaurioiden havaitseminen
- voimalinjojen ja vioittuneiden komponenttien tarkastukset
- kaukolämpölinjastojen vuotojen paikallistaminen
- vikaantuneiden aurinkopaneeleiden havaitseminen
- säiliöiden pinnan havaitseminen
- kaasuvuodot
- pelastus- ja etsintätehtävät
- teollisuuden putkistojen vuotojen ja tukkeumien havaitseminen.

Esimerkiksi energiateollisuus jolle käyttövarmuus ja tehokkuus ovat tärkeitä tekijöitä, on yksi tyypillisimmistä UAV-lämpökuvaamisen käyttöalueista. Energiateollisuuden tarkastuksiin kuuluvat esimerkiksi lämpö-, kaasu- ja sähköverkkojen tarkastukset. Niiden ennakoivalla kunnossapidolla on suuri taloudellinen merkitys tuotantovarmuuden kannalta, jotta vauriot havaitaan ajoissa ja vältetään suuremmat vahingot kuten energianjakeluhäiriöt. Yksi kuva voi olla tuhansien eurojen arvoinen, jos sillä havaitaan ongelma ajoissa ja se voidaan estää. [43.]

Multikopteritekniikka on kehittyntä ja laitteissa on sovelluksiin sopivia ominaisuuksia kuten törmäyksenesto- ja esteentunnistustekniikkaa, autopilot-reittikuvausmahdollisuus

ja sähkömagneettisilta häiriöiltä suojaavaa tekniikkaa, joka sopii erityisesti sähköverkkojen komponenttien tarkastamiseen [43].

Suunnittelu kuuluu oleellisesti lämpökuvaustapahtumaan. Ennen aloitusta tulee ottaa selvää kuvauskohteen mahdollisista rajoituksista ja hankittavista kuvaus -ja lentoluvista. Mitkä ovat kohteen lento-olosuhteet, kuinka korkealla on tarve lentää ja mihin aikaan päivästä toimintaa on tarkoitus suorittaa. Lämpökuvaustapahtuma suoritetaan useimmiten kahden henkilön yhteistyöllä, toisen vastatessa ohjaamisesta ja toisen kuvaamisesta. Seuraaminen tapahtuu suoralla näköyhteydellä ja videoyhteyden kautta monitorilla tai videolaseilla. Lämpökuvaamisen kannalta tulee valita otollinen hetki päivästä sääolosuhteet huomioon ottaen. Lämpötila, pilvisuus ja aurinkoisuus ovat kaikki omalla tavallaan vaikuttavia ja huomioitavia tekijöitä lämpökuvauksessa. Tuulisella tai sateisella säällä lennättämistä ei suositella. Tuulessa kopterin hallinta ja kuvaaminen on hankalaa. Yleensä maksimi tuulen nopeudeksi lennätettäessä suositellaan n. 10 m/s kopterista riippuen. Tuulen nopeuden voi mitata tarvittaessa esimerkiksi anemometrillä. [21; 18, s. 50.]

Lopuksi suoritetaan kuvien tulkinta ja analysointi sekä esimerkiksi tutkimustulosten raportointi asiakkaalle.

6.2 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkoston UAV-tarkastusta käsiteltäessä Suomi on hyvä esimerkki sen kehittyneen ja laajan verkoston vuoksi. Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto ja sen verkostopituus on lähes 15 000 km:ä. Kaukolämpöjohdot asennetaan yleensä 0,5–1 m:n syvyyteen maahan katujen alle tai puistomaalle. Osa isoista johdoista kulkee tunneleissa, jolloin niiden tutkiminen ei UAV-tekniikalla ole mahdollista. Putkien halkaisija vaihtelee voimalaitokselta lähtevistä 1000 mm:n päälinjoista pientalojen 20 mm:n liityntäjohtoihin. Vuosittain verkko kasvaa noin 250–500 km:llä. [23.]

Kaukolämpöverkoston vuotojen ja eristevaurioiden etsintä UAV-lämpökuvauksella voisi olla kustannustehokas menetelmä. Kaukolämpöverkon vuotojen kartoittamista UAV-lämpökuvauksella käytetään jo jonkin verran sekä sitä on pilotoitu Suomessa, ja tulokset ovat olleet rohkaisevia. Todettiin, että koska UAV-kopterilla voidaan kuvata matalammalta kuin perinteisellä helikopterilla, saadaan huomattavasti tarkempia

lämpökuvia ja vuotojen paikallistaminen siten tarkemmaksi, mikä vähentää turhien kaivantojen määrää ja vuotojen aiheuttamat menetykset saadaan minimoitua nopealla toiminnalla. Järjestelmän avulla olisi mahdollista kartoittaa etenkin rajattuja alueita nopeasti käsin tarkastamiseen verrattuna ja edullisemmin kuin helikopterilla. Ilmasta kuvaamalla vuodon sijainti on helpompi määrittää tarkasti kuumimman kohdan perusteella kuin maasta, jos vuoto on levinnyt laajalle. [24; 34; 39.]

Kaukolämpöverkosto on tiheimmillään kaupungissa, jolloin useimmiten toimitaan asutuskeskusten tiheästi asutun osan alueella. Tätä koskevat rajoitukset lainsäädännön mukaan ovat ilma-aluksen 7 kg maksimi lentoonlähtömassa sekä se, että toiminnan on oltava näköyhteyteen (VLOS) perustuvaa. Toiminnasta tulee myös laatia toimintasuunnitelma turvallisuusohjeistuksineen ja riskienarvioiteineen. [6.]

6.3 Sähköverkko

Häiriötön sähköverkko on erittäin tärkeä osa nyky-yhteiskunnassa, ja sen toimintavarmuuden on oltava korkea. Siitä syystä sähköverkkojen kuntoa seurataan ja tarkastuksia tehdään aktiivisesti, jotta esimerkiksi vioista syntyvät sähkönjakeluhäiriöt voidaan estää. Sähköverkkoa Suomessa on yhteensä yli 400 000 km:ä, josta osa on maakaapeleina [29].

Perinteisesti sähköverkkoja tarkastetaan helikopterikuvauksella, mikä on erittäin kallis tarkastusmenetelmä. Vaihtoehtoinen ratkaisu voisi olla käyttää sähköverkkojen vikojen ja kunnan tutkimiseen multikopteria. Sillä tarkastus onnistuisi turvallisesti ja helposti eikä henkilöiden tarvitse työskennellä lähellä korkeita jännitteitä. Tarkastus on myös tarkempaa, kun kuvaus voidaan suorittaa useasta eri kulmasta ja lähempää kuin perinteisellä kopterikuvauksella. [40; 42.]

UAV-tekniikalla etenkin pienempien ja rajattujen alueiden tarkastaminen ja vian etsiminen olisi perinteistä helikopterikuvausta edullisempaa ja jalkaisin tehtävää tarkastusta vaivattomampaa. Suurempien alueiden tarkastaminen on edelleen kätevämpää helikopterilla johtuen multikoptereiden lyhyemmästä lentoajasta ja yhteyksien kantavuudesta. Myös tuuliset sääolosuhteet ja lumi- tai vesisade haittaavat toimintaa. [40.] UAV-tarkastus voisi soveltua erityisesti harvaanasuttujen ja

metsikköisten alueiden sähköverkkojen tarkastuksiin. Kaupungeissa sähkölinjat kulkevat jo suurelta osin maan alla [41].

Suomessa on pilotoitu kauko-ohjattavien miehittämättömien UAV-koptereiden käyttöä sähköverkkojen kunnossapidossa ja sähköjakelun toimintavarmuuden parantamisessa. Tavoitteena toiminnalla on ollut estää sähkökatkoja ja lyhentää niiden kestoja nopeamman vikapaikkojen löytymisen ansiosta sekä pienentää tarkastuskustannuksia. Toiminnan ajurina on ollut sähkömarkkinalain noudattaminen, jossa sähkökatkojen enimmäispituudeksi harvaan asutulla alueella on määritelty 36 tuntia ja taajamissa 6 tuntia. [28.]

Sähköverkkojen komponenttien tarkastamisessa on suositeltavaa käyttää lämpökameran lisäksi näkyvän valon kameraa, jolloin saadaan enemmän informaatiota kohteesta. Lainsäädäntö rajoittaa UAV-koptereiden käyttöä pitkillä etäisyyksillä, kun määräyksen mukaan ilma-alukseen on oltava näköyhteys. Erikseen varatulla alueella näköyhteyden ulkopuolellakin tapahtuva tarkastustoiminta on tarvittaessa mahdollista. [6.]

7 UAV-lämpökuvausjärjestelmän valinta

Tässä luvussa perehdytään UAV-lämpökuvausjärjestelmän valintaprosessiin ja siihen, mitä asioita tekniikkaa ammattimaiseen lämpökuvaustyöhön valittaessa tulee ottaa huomioon. Rajoituttiin tutkimaan lentovalmiin kaupallisen multikopteri-tyyppisen UAV-laitteiston hankintaa ja rajattiin pois itse rakentamisen mahdollisuus.

UAV-lämpökuvauskaluston valinta voi olla haastava prosessi jossa tulee ottaa useita asioita huomioon. Tärkeintä on, että tavoitteet ja kuvaustehtävien vaatimukset laitteiston osalta määritellään tarpeeksi tarkasti, kun tavoitellaan esimerkiksi toiminnan tehokkuuden kasvua ja halutaan varmistaa sijoitetun pääoman tuotto. UAV-lämpökuvauskokonaisuuden hankkiminen voi olla kallis sijoitus laitteistoiheen ja koulutuksineen.

Markkinoilla on paljon multikoptereita, ja joka vuosi tulee uusia ja kehittyneempiä malleja. Huolellinen selvitystyö siis kannattaa sen selvittämiseksi, mitkä ominaisuudet ovat omaan toimintaan tärkeitä. Yleensä on kannattavaa valita uusin mahdollinen

toimintaan soveltuva malli, jolloin saadaan viimeisimmät ominaisuudet ja taataan varaosien saanti pitkälle. Ammattimaiseen lämpökuvaukseen sopivan lentovalmiin UAV-järjestelmän voi saada noin 25 000 €:lla. Hintaan voi kuulua myös koulutus valmistajasta tai laitetoimittajasta riippuen. Koulutus on yritysten arvostama tekijä, jolla varmistetaan tehokas ja oikeaoppinen kuvaustoiminta ja minimoidaan vahingot. Koulutukseen voi sisältyä esimerkiksi laitteiden toiminta, lennättäminen ja mahdollisesti ohjelmiston opettelu.

Yritykselle tai palveluntuottajalle hyvä vaihtoehto voi olla myös kuvauskohterin hankkiminen leasing-sopimuksella. Nopeasti kehittyvällä alalla ei välttämättä kannata hankkia laitteistoa omaan omistukseen, koska teknologia voi muutaman vuoden kuluttua olla jo vanhaa. Näin yritys voi myös helposti jakaa investointikustannukset usealle vuodelle, jolloin tekniikka saadaan heti tuottavaan käyttöön. [22.]

Kaupallisia UAV-järjestelmiä koskevan käyttäjätutkimuksen mukaan käyttäjät arvioivat kameran laadun (29 % vastaajista) ja kohterin lentoajan (28 % vastaajista) ylivoimaisesti tärkeimmiksi ominaisuuksiksi laitteistoa valittaessa [31].

Yrityksen sisäiset UAV-tarkastustehtävät esimerkiksi energiayhtiössä voivat rajoittua luonteeltaan vain muutamaan tai jopa yhdenlaiseen tarkastustoimintaan, jolloin tarvittavat ominaisuudet ja vaatimukset on helpompi määrittää. Jos toimintaa suoritetaan esimerkiksi alihankintana useille yrityksille ja erilaisiin lämpökuvaustehtäviin, tulisi valita paras mahdollinen kalusto, jolloin sillä voidaan suorittaa monipuolisia tehtäviä erilaisissa kohteissa. Voidaan esimerkiksi hankkia useampi laitteisto ja tai yksi muokattava laitteisto vähintään useammalla hyötykuormavaihtoehdolla.

Valinnassa tulee miettiä suunniteltavien kuvauskohteiden luonnetta ja olosuhteita. Aiotaanko toimintaa suorittaa kosteissa tai pölyisissä olosuhteissa, jolloin tulisi kiinnittää huomiota laitteiston suojattuun rakenteeseen ja mikä sen IP-luokitus mahdollisesti on. Millaisella lämpötila-alueella toimintaa suoritetaan, onko tarkoituksena esimerkiksi lennättää talvella tai kuumassa teollisuustilassa, jolloin tulee kiinnittää huomiota valmistajan ilmoittamaan toimintalämpötila-alueeseen kohterin ja kameran osalta. Jotkin kohterit soveltuvat paremmin käytettäväksi kylmissä olosuhteissa. Kaikkien UAV-kohtereiden lentoaika kärsii kuitenkin kylmästä johtuen sen akkutekniikasta.

Jos tarkoituksena on lennättää ahtaissa kohteissa tai lähellä kuvauskohdetta, olisi kopteri hyvä olla varustettu törmäyksenesto- ja esteentunnistussensoreilla ja tarkalla GPS:llä, sekä mahdollisesti potkurisuojuimilla.

Hankinnalle ja laitteistolle asetettavia kysymyksiä:

- Millainen on budjetti?
- Mitä hankintaan sisältyy?
- Millaista kuvausta laitteistolla on tarkoitus toteuttaa?
- Millaisia tuloksia sillä halutaan saavuttaa?
- Millaisia ovat laitteistolla suoritettavat tehtävät, niiden käyttökohteet ja olosuhteet?
- Millainen on laitteiston takuu?
- Tarvitaanko koulutusta ja onko sitä saatavilla?

Millaisia ominaisuuksia kopterista olisi löydyttävä tehtävän suorituksen kannalta ja niitä helpottamaan. Laitteistosta ja sen ominaisuuksista saadaan kattavasti tietoa valmistajan spesifikaatioista. Uusissa UAV-kopterimalleissa on erilaisia esteentunnistus tekniikoita, joiden avulla voidaan lentää lähellä tarkastuskohdetta ilman pelkoa, että esimerkiksi tuuli heilauttaa kopterin liian lähelle kuvauskohdetta. Jotkin mallit voivat olla varustettu myös sähkömagneettisilta häiriöiltä suojaavilla ominaisuuksilla, jotka tekevät niistä erityisen hyvin soveltuvia esimerkiksi voimalinjojen lähellä työskentelyyn. Turvallinen lähtöpaikkaan paluutoiminto on hyödyllinen ominaisuus tehtävässä kuin tehtävässä.

Useissa tarkastustehtävissä on suositeltavaa käyttää lämpökameran lisäksi näkyvän valon kameraa, jolloin kuvauskohteesta saadaan enemmän informaatiota. Modulaarinen rakenne helpottaa osien vaihtoa ja päivittämistä sekä hyötykuormien vaihtamista ja lisäämistä jälkeenpäin. Jos lämpökameraan ei ole integroitu valmiiksi digitaalista kameraa, niin onko sen asentaminen kopteriin mahdollista painorajoituksista ja liitännöistä riippuen.

Tekniikkaa tarkentavia kysymyksiä:

- Miten suurta kuormaa UAV-kopterilla on tarve kantaa ja mikä on sen kuormankantokyky?
- Millainen lentoaika tehtävään vaaditaan yhdellä akulla?

- Millainen tarkkuus ja kuvanlaatu lämpökameralta vaaditaan haluttujen tulosten saavuttamiseksi?
- Onko rakenne modulaarinen? Voidaanko myöhemmin vaihtaa osia ja hyötykuormaa tai lisätä niiden määrää?
- Millaisia kuvausominaisuuksia lämpökameralta vaaditaan?
- Millaisia lisäominaisuuksia UAV-kopterilta vaaditaan?
- Kuinka suojattu rakenne tarvitaan?
- Mikä on laitteiston toimintalämpötila-alue?
- Ohjausjärjestelmän yhteyksien kantavuus?
- Millainen gimbaali ja sen ominaisuudet tarvitaan?
- Tarvitaanko lämpökuvan lisäksi näkyvän valon kamera, jos sellaista ei ole lämpökameraan integroitu?

Kameran vaatimukset määritellään kuvauskohteen ja käytön mukaan. Tehtävän kannalta vaaditun mittaustarkkuuden mukaan määritetään tarvittava kameran resoluutio ja tarkkuus. Kuten aikaisemmin mainittiin, on suositeltavaa valita suurimmalla resoluutiolla budjetin puitteissa varustettu kamera ja useimmiten radiometrinen, jolloin lämpökuvasta saadaan eniten tietoa. Myös lämpökameran ominaisuudet kuten isotermiasetus, erilaiset väripaletit ja automaattinen kuuma- ja kylmänpisteen mittaus ovat erittäin hyödyllisiä toimintoja useiden lämpökuvaussovellusten kannalta.

Kameravalinnan tärkeimmät kriteerit ovat

- kuvan laatu eli resoluutio
- lämpöherkkyys
- tarkkuus
- kameran kuvaustoiminnot
- kuvankäsittelyohjelmisto.

Laitteisto voi vikaantua ennen pitkään, minkä vuoksi jo laitetta hankkiessa tulisi miettiä, onko sen korjaaminen itse mahdollista vai tuleeko se lähettää huoltoon. Huolloista tulee aina viivästyä toimintaan. Siksi olisi hyvä olla useampi UAV-lämpökuvausjärjestelmä käytössä. Joihinkin laitteistoihin sisältyy myös määräaikaishuoltoja, joiden mukaan ne on lähetettävä valmistajalle huoltoon. [18.] Lämpökamerat tarvitsevat myös säännöllistä kalibrointia.

Laitteistoa hankittaessa tulisi myös ottaa huomioon seuraavanlaisia seikkoja:

- Onko varaosia ja huoltoa helposti saatavilla ja tarvittaessa läheltä?
- Onko teknistä tukea saatavilla ongelmatilanteissa?

Laitteistoa hankittaessa voi olla hyvä idea valita ison valmistajan tuote, jolloin varaosien, huollon ja teknisen tuen saatavuus ongelmatilanteissa on taattu. Tällöin Internetistä saa helposti tietoa laitteistosta ja käyttäjäkokemuksista. Isolla yrityksellä on lisäksi paljon tuotekehitystä ja käyttöä tukevia sovellusohjelmia. Se voi myös helpottaa yhteensopivuutta erilaisten hyötykuormien kanssa.

8 Yhteenveto ja päätelmät

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia miehittämättömillä ilma-aluksilla suoritettavan lämpökuvauksen tekniikkaa, käyttöä sekä potentiaalisia käyttökohteita. Lisäksi tavoitteena oli määrittellä kaupallisen UAV-lämpökuvauksjärjestelmän valintaprosessi sekä ottaa selvää toimintaa koskevasta lainsäädännöstä.

Työn tuloksena saatiin yleiskuva miehittämättömien ilma-alusten toiminnasta ja tekniikasta lämpökuvaustehtävissä. Todettiin, että UAV-kuvauksella on useita potentiaalisia sovelluskohteita erityisesti infrastruktuurin saralla, jossa sen avulla on mahdollista suorittaa useita tehtäviä perinteisiä menetelmiä edullisemmin, nopeammin ja turvallisemmin. Työssä opittiin lämpökuvauksen teoriasta ja huomattiin useiden tekijöiden vaikuttavan luotettavan ja onnistuneen kuvaustuloksen aikaansaamiseksi. UAV-lämpökuvauks vaatii aina ammattitaitoisen ja tekniikkaan perehtyneen kuvaajan sekä pilotin tuekseen.

Nykyisin kaupallisesti saatavilla oleva tekniikka on soveltuvaa ammattimaiseen UAV-lämpökuvaukstyöhön useine käyttöä tukevine ominaisuuksineen. Valikoima ei ole vielä laaja UAV-käyttöön sovitettujen lämpökameroiden osalta, mutta parhaimmat UAV-lämpökamerat ovat ominaisuuksiltaan käsin käytettävien lämpökameroiden tasoa. Valintaprosessin kannalta ja multikopteritekniikan ymmärtämiseksi määriteltiin kopterin tärkeimmät komponentit ja käytiin läpi niiden toiminta ja ominaisuudet. Tekniikan kehittyminen takaa vielä pidemmät lentoajat tulevaisuudessa akkuteknologian kehittymisen myötä.

Todettiin että miehittämätöntä ilmailua koskeva lainsäädäntö on Suomessa kattavaa määräyksineen ja lupamenettelyineen mutta ei ammattitoimintaa haittaavasti rajoittavaa. Huomattiin myös, että uuden ja kasvavan toiminnan ollessa kyseessä, lainsäädäntö elää vielä kehityskautta ja nähtäväksi jää, kuinka se tulee vaikuttamaan toimialaan tulevaisuudessa. Toimintaan on saatavilla myös koulutusta, mikä on erittäin suositeltavaa aloitteleville UAV-lämpökuvaajille.

Työssä määritettiin UAV-lämpökuvausjärjestelmän valintaprosessi, jonka tuloksena saatiin kattava asialista huomioonotettavista asioista apuna valintatehtävään. UAV-lämpökuvausjärjestelmä voi olla hintava hanke, jonka tavoitteet ja käyttökohteet tulee määrittellä tarkasti saavutettavan hyödyn maksimoimiseksi. Tämä selvitystyö tarjoaa perustiedot UAV-lämpökuvaustekniikasta ja se voisi toimia tukimateriaalina toimintaa suunnitteleville tai aloitteleville yrityksille ja toimijoille sekä tekniikasta kiinnostuneille henkilöille.

Työn laajuuden vuoksi jouduttiin laitteistovertailuosio rajaamaan sen ulkopuolelle. Toisaalta tekniikan kehittyessä nopeasti markkinoille tulee joka vuosi uusia ja paremmilla ominaisuuksilla varustettuja malleja, jolloin vertailu vanhenisi nopeasti. Sen sijaan keskityttiin antamaan yleiskuva tekniikasta ja sen tärkeimmistä komponenteista, ominaisuuksista ja toiminnoista lämpökuvauksen kannalta. Lisäksi opinnäytetyöstä rajattiin pois miehittämättömän kuvauskopterin lentotapahtumaa ja lennätystekniikkaa käsittelevä osio sen yleisluontoisuuden vuoksi ja keskityttiin lämpökuvauksen teoriaan ja tekniikkaan.

Tutkimusta voitaisiin jatkaa ja syventää käytännössä toteutettavilla koelämpökuvauksilla tehtävän määrittelyn ja laitteiston valintaprosessiin jälkeen konkreettisten hyötyjen arvioimiseksi.

Multikopteri-lämpökuvaus on suhteellisen uusi ja pieni erikoisala, ja sen toimijamäärä on Suomessa vielä toistaiseksi vähäinen, mutta tehdyn selvitystyön perusteella uskon, että tekniikan kysyntä kasvaa ja tulevaisuudessa tullaan näkemään yleistyvissä määrin UAV-tekniikkaa korvaamassa tai avustamassa perinteisesti suoritettavia tehtäviä yrityksissä.

Lähteet

- 1 Miehittämätön ilmailu. 2017. Verkkoaineisto. Liikenteen turvallisuusvirasto. <https://www.trafi.fi/ilmailu/miehittamaton_ilmailu>. Päivitetty 7.6.2017. Luettu 3.10.2017.
- 2 RPAS tilastoja. 2017. Verkkoaineisto. Liikenteen turvallisuusvirasto. <https://www.trafi.fi/ilmailu/miehittamaton_ilmailu/rpas_tilastot>. Päivitetty 24.10.2017. Luettu 27.10.2017.
- 3 Silver, Brad; Mazur, Michal; Wisniewski, Adam & Babicz, Agnieszka. 2017. Communications Review. Verkkoaineisto. PWC. <<https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf>>. Luettu 5.11.2017.
- 4 Divya Joshi. 2017. Commercial Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Analysis. Verkkoaineisto. Business Insider. <<http://www.businessinsider.com/commercial-uav-market-analysis-2017-8?r=US&IR=T&IR=T>>. 8.8.2017. Luettu 28.10.2017.
- 5 Lehto, Tero. 2017. Lennokkien määräykset tiukentuvat Suomessakin. Verkkoaineisto. Tekniikka & Talous. <www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/lennokkien-maaraykset-tiukentuvat-suomessakin-eu-valmistele-droneille-uusia-rajoituksia-6663835>. 19.7.2017. Luettu 3.10.2017.
- 6 Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. 2016. OPS M1-32. Määräys. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi.
- 7 Usein kysyttyä. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Verkkoaineisto. <https://www.trafi.fi/tietopalvelut/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehittamattomat_ilma-alukset_ja_lennokit>. Luettu 6.11.2017.
- 8 FLIR E60 Infrared Compact Thermal Camera. 2016. <<https://www.tequipment.net/FLIRE60.html>>. Verkkoaineisto. Tequipment.net. Luettu 10.11.2017.
- 9 Paloniitty, Sauli; Paloniitty, Juho & Haimilahti Jouni. 2016. Lämpökuvaus rakentamisessa. Vaasa: OY FRAM AB.
- 10 Käyttäjän opas FLIR Tools/Tools+. 2015. <<https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/Tools5.3-fi-fi.pdf>>. Verkkoaineisto. Flir. Päivitetty 13.10.2015. Luettu 19.10.2016.
- 11 Sähkömagneettinen säteily. 2017. Verkkoaineisto. <[https://fi.m.wikipedia.org/wiki/Sähkömagneettinen_säteily](https://fi.m.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6magneettinen_s%C3%A4teily)>. Päivitetty 23.5.2017. Luettu 13.11.2017.

- 12 Lämpösäteily ja infrapuna. 2016. <<https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera/>>. Verkkoaineisto. Infradex Oy. Luettu 20.10.2017.
- 13 Suvanto, Kari & Laajalehto, Kari. 2008. Tekniikan fysiikka 2. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 14 Suvanto, Kari. 2010. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 15 Personaldrones. 2014. Verkkoaineisto. <<http://www.personal-drones.net/tag/thermal-camera>>. Päivitetty 2.7.2014. Luettu 14.11.2017.
- 16 Tukisivusto. 2016. Verkkoaineisto. Infradex Oy. <www.infradex.com/tuki/>. Luettu 16.10.2017.
- 17 Benefits of using thermal cameras for drones. 2017. <www.dronesglobe.com/guide/thermal-drones/>. Päivitetty 24.06.2017. Luettu 16.10.2017.
- 18 Hassinen, Alpo. 2016. UAV-lennokit ja -kopterit: Kokemuksia UAV- ja RPAS-laitteista. Mekrijärven tutkimusasema. Itä-Suomen yliopisto. <http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2244-1/urn_isbn_978-952-61-2244-1.pdf>. 30.12.2016. Luettu 20.11.2017.
- 19 Lämpökuvauus. 2016. Verkkoaineisto. Multicoptercenter. <<https://multicoptercenter.fi/blog/category/lampokuvaus/>>. Luettu 16.10.2017 Päivitetty 20.10.2016.
- 20 After-Sales Service Policie. 2017. Verkkoaineisto. Dji. <<https://www.dji.com/service/policy>>. Luettu 20.11.2017.
- 21 Technical note. 2016. Flir. Verkkoaineisto. <https://dl.djicdn.com/downloads/zenmuse_xt/en/sUAS_Radiometry_Technical_Note.pdf>. 14.6.2017. Luettu 20.11.2017.
- 22 Miksi UAV ratkaisu kannatta hankkia vuokraleasingilla. 2017. Dronefactory. Verkkoaineisto. <<https://www.dronefactory.fi/single-post/2017/08/10/Miksi-UAV-ratkaisu-kannattaa-hankkia-vuokraleasingilla>>. 10.8.2017. Luettu 10.11.2017.
- 23 Kaukolämpöverkkoja lähes 15 000 km. Energiateollisuus ry. Verkkoaineisto. <https://energia.fi/perustieto_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>. Luettu 20.11.2017.

- 24 MCS ja Tampereen Sähkölaitos Oy pilotoi. 2016. MultiCopterService MCS Oy. Verkkosivusto. <<http://helikopteri-ilmakuvaus.fi/2016/11/21/lampokuvat-dronella/>>. 21.11.2016. Luettu 20.11.2017.
- 25 Corrigan, Fintan. 2017. Drone Gyro Stabilization, IMU And Flight Controllers Explained. Verkkosivusto. <<https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/three-and-six-axis-gyro-stabilized-drones/>>. 5.6.2017. Luettu 23.11.2017.
- 26 Corrigan, Fintan. 2016. Drone Gimbal Design and Parts for Quality Aerial Filming. Verkkosivusto. <<https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/drone-gimbal-design-components-parts-technology-overview/>>. 20.2.2016. Luettu 23.11.2017.
- 27 Pönkkö, Jani. 2013. Tee-se-itse multikopteri. Verkkosivusto. <<http://metku.net/index.html?path=articles/diy-multicopter-part-1/index3>>. 7.4.2013. Luettu 25.11.2017.
- 28 Yli-Ketola, Liisa. 2014. Robottikopteri tarkistaa sähköverkon kunnon. Verkkosivusto. <<http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maaseutu/robottikopteri-tarkistaa-sahkoverkon-kunnon-katso-video-1.71008>>. 24.09.2014. Luettu 25.11.2017.
- 29 Energiaverkot Suomen selkärangan. Energiateollisuus ry. Verkkosivusto. <https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot>. Luettu 25.11.2017.
- 30 FOV Calculator. 2016. Workswell s.r.o. Verkkosivusto. <<https://www.workswell-thermal-camera.com/field-of-view-calculator/>>. Luettu 26.11.2017.
- 31 Uk Commercial Drone Report. 2017. Coptrz. Verkkosivusto. <<http://see.coptrz.com/Eyes-on-the-Sky-UK-Drone-Market-Report/Download.html>>. 20.5.2017. Luettu 26.11.2017.
- 32 Prodrone. Dronefactory. Verkkosivusto. <<https://www.dronefactory.fi/prodrone>>. Luettu 27.11.2017.
- 33 Lämpökuvauskopteri ja ilmakuvaus (UAV). Uudenmaan lämpökuvaus. <<http://www.uudenmaanlampokuvaus.fi/ilmalampokuvaus-ja-ilmakuvaus>>. Luettu 27.11.2017.
- 34 Lämpökamerakuvaus. MultiCopterService MCS Oy. Verkkosivusto. <<http://helikopteri-ilmakuvaus.fi/lampokamerakuvaus-dronella/>>. Luettu 27.11.2017.
- 35 Liamg, Oscar. 2017. Phantom Carbon Fiber Propellers. Verkkosivusto. <<https://www.dronethusiast.com/carbon-fiber-props-vs-plastic/>>. Luettu 28.11.2017.

- 36 Matrice 200 User Manual. 2017. Dji. Verkkoaineisto. <https://dl.djicdn.com/downloads/M200/20170930/M200_User_Manual_EN.pdf>. 19.9.2017. Luettu 28.11.2017.
- 37 Douglas, James. Professional Drones with the Best Flight Time. 2017. Verkkoaineisto. <<http://www.dronesglobe.com/guide/long-flight-time/>>. 24.10.2017. Luettu 28.11.2017.
- 38 Zenmuse XT. Multicoptercenter. Verkkoaineisto. <<https://multicoptercenter.fi/pro-multicopters/lampokamerat/zenmuse-xt.html?limit=all>>. Luettu 29.11.2017.
- 39 Applications. Workswell s.r.o. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.drone-thermal-camera.com/applications/>>. Luettu 29.11.2017.
- 40 Powerline/Cable Inspections. Rovdrone. 2017. Verkkoaineisto. <<http://rovdrone.eu/drone-en/industrial-inspections/power-linecable-inspections/>>. Luettu 30.11.2017.
- 41 Helsingin sähköverkkoa uusitaan ja laajennetaan. Helen Sähköverkko Oy. 2017. Verkkoaineisto. <<https://www.helensahkoverkko.fi/uutiset/2017/helsingin-sahkoverkkoa-uusitaan-ja-laajennetaan/>>. Päivitetty 12.4.2017. Luettu 30.11.2017.
- 42 Thermodiagnosics in the power engineering sector. Workswell s.r.o. 2016. Verkkoaineisto. <<https://www.drone-thermal-camera.com/drone-uav-thermography-inspection-highvoltage/>>. Luettu 30.11.2017.
- 43 Energiateollisuus. Dronefactory. Verkkoaineisto. <<https://www.dronefactory.fi/copy-of-maatalous>>. Luettu 27.11.2017.
- 44 Ilmailu kieltoalueilla. 2017. Verkkoaineisto. Liikenteen turvallisuusvirasto. <https://www.trafi.fi/ilmailu/lennonvarmistus_ja_ilmatila/ilmailu_kieltoalueilla>. Päivitetty 15.6.2017. Luettu 3.10.2017.
- 45 Lämpökuvauksen teoria. 2016. Infradex Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/teoria.pdf>>. Luettu 20.11.2017.