

Teemu Taponen

LÄMPÖKUVAUS MIEHITTÄMÄTTÖMÄLLÄ ILMA-ALUKSELLA

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

2014

LÄMPÖKUVAUS MIEHITTÄMÄTTÖMÄLLÄ ILMA-ALUKSELLA

Taponen, Teemu
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Automaation koulutusohjelma
Tammikuu 2014
Ohjaaja: Asmala, Hannu
Ohjaaja: Kortelainen, Joonas
Sivumäärä: 27

Asiasanat: lämpökuvaus, lämpökamera, octokopteri, lennokki, ilmakuvaus

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia lämpökuvauksen hyödyntämistä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Miehittämättömät ilma-alukset suuntautuivat tutkielmassani kahden osaan, multikoptereihin ja radio-ohjattaviin lennokkeihin. Sivusin myös työssäni, mihin miehittämättömiä ilma-aluksia voidaan yleisesti käyttää.

Tutkimukseni tavoitteena oli saada muutama esimerkkikuva lämpökameralla ilmasta käsin, mikä jäi vain haaveeksi tiukan aikataulun vuoksi. Myöskään ei ollut mahdollista saada vuokrattua oikeanlaista lämpökameraa. Pystyäkseni näyttämään, millaisesta kuvauksesta tässä olisi kyse, ja päästäkseni analysoimaan muutamaa lämpökuvaa, minun oli etsittävä internetistä muutama vastaavanlainen lämpökuva.

Työni kirjallisessa osiossa selvitin yksityiskohtaisesti ilma-alusten tekniikkaa ja lainsäädäntöä. Myös lämpökameroiden tekniikka, tarkkuudet ja optiikan vaikutus olivat keskeisiä asioita. Teoreettisen osuuden tueksi löysin internetistä paljon julkaisuja, joita pystyin hyödyntämään työssäni.

THERMAL IMAGING USING UAVS

Taponen, Teemu

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Automation technology

January 2014

Supervisor: Asmala, Hannu

Supervisor: Kortelainen, Joonas

Number of pages: 27

Keywords: thermal camera, thermal imaging, octocopter, drone, aerial photography

The purpose of this thesis was to research the utilization of thermal imaging in aerial photography with UAVs. In addition, this thesis outlines the basic use-cases and purposes for using an UAV. The UAV's researched are divided into two main categories; multicopters and radio-controlled model airplanes.

The main objective of this thesis was to capture thermal imagery with UAV mounted camera. However, in the end this wasn't possible due to the very tight schedule and unavailability of suitable thermal imaging cameras. In order to simulate things thermal imaging stock footage was utilized instead.

In the written part the UAV technology and the related legal questions were discussed. The thermal imaging technology was also researched especially the accuracies and optics. The research was supported by multiple publications found from various sources.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	MIEHITTÄMÄTÖN ILMA-ALUS	7
2.1	Tekniikka	7
2.2	Yleiset käyttötarkoitukset	11
2.3	Lainsäädäntö	11
3	LÄMPÖKAMERAN TOIMINTA	12
3.1	Lämpökamerat miehittämättömiin ilma-aluksiin.....	15
3.2	Datan siirto lämpökamerasta.....	17
3.3	Optiikan vaikutus	18
4	MIHIN LÄMPÖKUVAUSTA VOIDAAN HYÖDYNTÄÄ?	21
4.1	Tilanne maailmalla.....	22
4.2	Tilanne Suomessa	23
5	ESIMERKKI CASE	23
6	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET.....	27

TERMEJÄ

UAV – Unmanned Aerial Vehicle, radio-ohjattava lennokka jolla tehdään ennalta määrättyä lentotyötä

Multikopteri – monimoottorinen radio-ohjattava kopteri

Octokopteri – kahdeksan moottorinen radio-ohjattava kopteri

RC-lennokka – Radio Controlled eli radio-ohjattava lennokka

LiPo – Litiumpolymeeri

FPV – First Person View

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni käsittelee lämpökuvausta miehittämättömällä ilma-aluksella. Työssä selvitetään, missä ja miten lämpökuvausta voidaan hyödyntää. Puhuessani miehittämättömästä ilma-aluksesta, puhun joko radio-ohjattavasta octokopterista tai lennokista.

Lähden työssäni liikkeelle ”ilma-alusten” tekniikasta ja niiden muuttuvasta lainsäädännöstä. Sivuan myös niiden yleisimpiä käyttötarkoituksia. Lämpökuvausta tutkiesani selitän lämpökameran toimintatavan, kerron eri tarkkuuksista ja optiikan vaikutuksesta. Lopuksi pyrin selvittämään datan käsittelyä ja mahdollisuudet lähettää dataa maahan reaaliajassa. Tavoitteena oli saada muutama lämpökuva ilmasta ja analysoida sitä, mutta jouduin tyytymään internetistä löydettyihin lämpökuviin.

Teen opinnäytetyöni itselleni omaan yritykseeni (AirAction). Mukana on myös Porin kaupungin tekninen palvelukeskus. Työni aihetta on tutkittu maailmalla jo jonkin verran ja päästy myös toteuttamaan. Suomessa lämpökuvaus miehittämättömällä ilma-aluksella on vasta alkumetreillä. Opinnäytetyöni tarkoituksena on myös saada itselleni tietämystä lämpökuvauksesta ja tulevaisuudessa tuoda lämpökuvaus myös omiin palveluihini.

Lähden tutkielmassani liikkeelle miehittämättömien ilma-aluksien tekniikasta. Käyn läpi yleisiä käyttötarkoituksia sekä lainsäädäntöä. Seuraavassa luvussa käyn läpi lämpökameran toimintaperiaatetta. Sivuan aiheessa erilaisia lämpökameroita, datan siirtoa maahan sekä optiikan vaikutusta. Neljännessä luvussa selvitän mihin lämpökuvausta voidaan hyödyntää. Selvitän tilanteet maailmalla sekä Suomessa. Viidennessä luvussa analysoin muutamaa lämpökuvaa, jotka on otettu ilmasta käsin ja viimeisenä tulee lyhyt yhteenveto koko tutkielmastani.

2 MIEHITTÄMÄTÖN ILMA-ALUS

Puhuttaessa miehittämättömästä ilma-aluksesta eli UAV:sta, tarkoitetaan käytännössä jotakin radio-ohjattavaa lennokkia tai kopteria. Virallisesti UAV:lla tarkoitetaan lennokkia, jolla tehdään ennalta määrättyä lentotyötä. Yhdysvallat ovat kokeilleet ensimmäisen kerran näitä jo I maailmansodan aikana. Nykypäivänä suurimpaan suosioon ovat nousseet multikopterit, joita voidaan hyödyntää monissa tarpeissa. Suosituimpia multikoptereita ovat quad- ja octokopterit. Työssäni syvennyn pääsääntöisesti octokopterin (Kuva 1) tekniikkaan, mutta otan kantaa myös tavallisen RC-lennokin hyötyihin (Kuva 4). Mitä eroa on multikopterilla ja lennokilla? Multikopteri vastaa enemmän helikopteria, mutta siinä on useampia moottoreita. Esimerkiksi quadkopterissa on neljä moottoria kun taas octokopterissa on kahdeksan moottoria. Lennokki puolestaan vastaa normaalia lentokonetta, mutta pienemmässä koossa. Mitä eroa on quadkopterilla ja octokopterilla? Octokopteri on lento-ominaisuuksiltaan paljon stabiilimpi sekä turvallisempi kahdeksan moottorin ansiosta, kuin quadkopteri. Jos octokopterista sammuu ennalta arvaamattomasta syystä yksi moottori, se ei vaikuta lentoon juurikaan. Mikäli quadkopterista sammuu yksi moottori, sitä ei saada enää hallitusti laskettua alas.

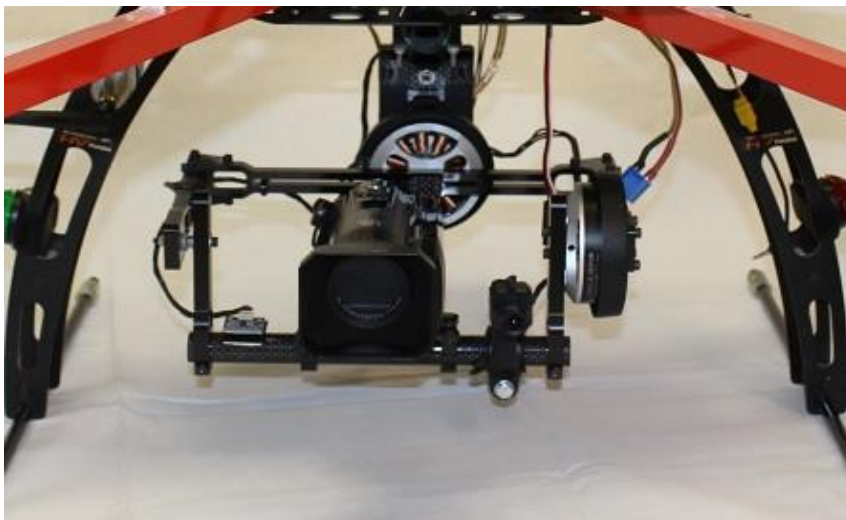
2.1 Tekniikka

Multikopterin tekniikka on monimutkaisempi verrattuna tavallisen RC-lennokin tekniikkaan. Koptereissa käytetään harjattomia sähkömoottoreita hyvän hyötysuhteen ja käyttövarmuuden takaamiseksi. Multikopterien ohjaus perustuu radio-ohjauksen lisäksi GPS-paikannukseen ja gyro-stabiloituun toimintaan. Kerron seuraavaksi tässä tutkimuksessa käytettävän octokopterin teknisiä tietoja.

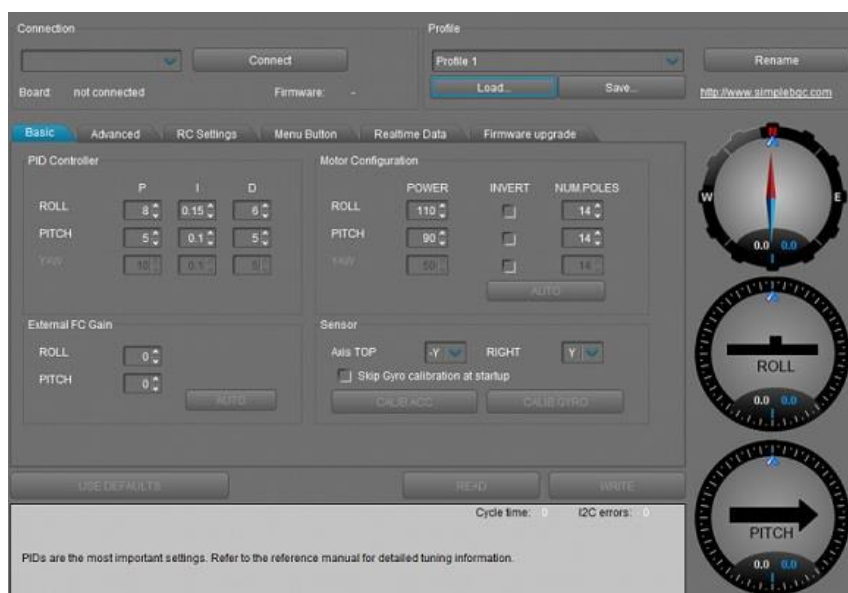


Kuva 1. Octokopteri (AirActionin www-sivut 2013)

Kopterin ohjaus tapahtuu 2.4 GHz:n taajuuden radio-ohjaimella. Tämän ohjaimen perusantenneilla pystytään toimimaan laillisesti 150 metrin korkeudelta. Lentoetäisyys on aina silmän kantamaan asti eli noin 500 metriä. Kopteri käyttää kahdeksaa 500 watin harjatonta sähkömoottoria, jolloin moottoreiden yhteistehoksi tulee neljä kilowattia. Virtalähteenä toimii kaksi kappaletta 5000 mAh:n LiPo akkua. Potkureina toimivat kahdeksan kappaletta muovi-komposiittipotkureita. Kopterilla voidaan nostaa noin kahden kilogramman hyötykuorma. Kopteri pitää sisällään myös GPS-lukituksen, jolla saadaan kopteri pysymään tarpeen tullen täysin paikallaan. Käytössä on myös FPV -monitori, eli kopterista saadaan reaaliajassa langattomasti videokuvaa maahan. Kameratelineenä toimii harjattomilla sähkömoottoreilla varustettu täysin stabiili teline. Kameratelineen säätö perustuu PID-algoritmiin sekä asentoanturiin. Tämä teline pitää kameran täysin stabiilina kovassakin tuulessa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kamerateline korjaa aina vastakkaiseen suuntaan tarvittavat liikkeen muutokset verrattuna kopteriin. Kameratelinettä pystytään säätämään maasta käsin vertikaalisesti 90 astetta alaspäin ja kopteria kääntämällä saadaan kamera kääntymään sivuille. Kuvassa 2 nähdään esimerkki kameratelineestä.



Kuva 2. Kamerateline (Taponen henkilökohtainen tiedonanto 14.4.2014)



Kuva 3. Kameratelineen PID-säädön PC-ohjelma (Taponen henkilökohtainen tiedonanto 14.4.2014)

Miten kopterin tekniikkaa tulisi kehittää lämpökuvauksen hyödyksi? Kopterin lentoaikaa tulisi saada huomattavasti pidemmäksi. Käytännössä tämä tarkoittaa akkujen kapasiteetin nostoa, esim. kaksi kappaletta 10 Ah akkuja. Kopterin runko tulisi korvata hiilikuituisella mallilla, jolla saadaan painoa pudotettua. Myös kopterin potkurilla on suuri merkitys lentoaikaan. Kopterissa tulisi olla valmiiksi tasapainotetut hiilikuitupotkurit, sillä niissä on huomattavasti suurempi hyötysuhde. Hiilikuitupotkurit ovat myös kevyemmät ja niiden tulisi olla muutaman tuuman pidemmät ja lapakulmat suuremmat. Täten saadaan kasvatettua kopterin kuorman kantokykyä. Tut-

kimusten mukaan laadukkailla hiilikuitupotkureilla on saatu lentoaikaa kasvatettua puolitoistakertaiseksi sekä kantokyky tuplattu. Ehdoton lisälaite kopteriin olisi Dji Waypoint -autopilottijärjestelmä, jonka ansiosta kopterille voidaan piirtää lentoreitti kannettavalla tietokoneella. Tällöin kopteria voidaan ajaa autopilotilla, jolla taataan huomattavasti pidemmät ja tarkemmat lentoreitit. Autopilottijärjestelmän maksimi toimintaetäisyys on noin 15 kilometriä. (Dji:n www-sivut 2014)



Kuva 4. Radio-ohjattava lennokki (Aircopin www-sivut 2010)

Lennokin tekniikka puolestaan eroaa huomattavasti octokopterista. Lennokin tulisi olla rakenteeltaan kevyttä, esimerkiksi epp -solumuovimateriaalia, kärkiväliltään noin kaksi metriä ja kantokykyä tulisi olla noin kaksi kilogrammaa. Lennokkiin riittäisi esimerkiksi yksi 500 watin harjaton sähkömoottori ja yksi 10 Ah akku. Tällöin lentoaika saadaan huomattavasti pidemmäksi kuin octokopterilla. Lennokkiin tulisi asentaa myös autopilottijärjestelmä, jolla voidaan piirtää myös oma lentoreitti. Lennokilla saataisiin operoitua samankokoisia alueita, kuin kopterilla, mutta ajallisesti pidempään. Lennokin kokonaishinnaksi tulisi paljon pienempi, kuin octokopterin. Tähän tulisi myös asentaa harjattomilla sähkömoottoreilla varustettu kamerateline stabiilin kuvan takaamiseksi.

2.2 Yleiset käyttötarkoitukset

UAV- koneiden käyttö on lisääntynyt yleisesti kaikilla osa-alueilla. Multikoptereiden pääasiallinen käyttö on ilmakuvauksessa. Ilmakuvaus voidaan jakaa kahteen osaan, video- tai valokuvaukseen. Ilmakuvausta voidaan hyödyntää muun muassa erilaisten tapahtumien ja kiinteistöjen kuvaamisessa, sekä esimerkiksi rakennussuunnittelussa. Myös myrskytuhojen kartoittamisessa, metsä- ja maanviljelyn seurannassa voidaan hyödyntää ilmavalokuvia. Ilmasta kuvattua videokuvaa voidaan taas hyödyntää musiikki-, televisio- ja elokuvatuotannossa. Korkeiden mastojen, tuulimyllyjen ja rakennusten kuntotarkastukseen voidaan hyödyntää molempia kuvausmuotoja. Ilmakuvausta voidaan hyödyntää myös pelastustehtävissä, esim. kesällä 2013 Laukaan ruutitehtaalla olleessa räjähdysvaaratilanteessa. Uusimpia käyttötarkoituksia multikoptereilla ovat laserkeilaus sekä tulevaisuudessa pakettien kuljettaminen.

RC -lennokin käyttö ei ole yhtä suosittua kuin koptereiden, koska niiden käyttötarkoitukset ovat huomattavasti pienemmät sekä lennokki vaatii isomman tilan lento-oloihin. Osaa kopterilla tehtävistä ilmakuvauksista voidaan myös toteuttaa lennokilla, esim. luonnon seuranta. Lennokkia käytetään pääosin laajamittaisempiin ilmakuvaustehtäviin, esimerkiksi kartoituksessa ortokuvauksiin tai laajamittaisiin etsintätehtäviin.

2.3 Lainsäädäntö

UAV -toiminnan suurimpina ongelmina on tällä hetkellä lainsäädäntö. Tällä hetkellä laissa on määrätty, että lentokorkeus pitää olla alle 150 metriä ja lentoetäisyys saa olla maksimissaan 500 metriä ja näköyhteys puolestaan jatkuvasti koneeseen. Miehittämättömän ilma-aluksen on kyettävä väistämään kaikkia muita ilma-aluksia eikä lennättäminen ole sallittua tiheästi asuttujen asuinalueiden yläpuolella. Valvotussa ilmatilassa lennättäessä asiasta on sovittava ja kommunikoidava erikseen aluelennonjohtoon kanssa. Esimerkiksi, jos toimii Porin keskustan tuntumassa UAV -tehtävissä ja vaikka lentokorkeus on alle 150 metriä, pitäisi tällöin olla yhteydessä aluelennonjohtoon. Esimerkiksi koko Porin keskustan alue kuuluu Porin lentokentän lähialue-

seen, jossa lentokoneiden alarajana on maanpinta. Seuraavassa kappaleessa on otteita hallituksen esityksestä eduskunnalle ilmailulain muuttamisesta.

”Ilmailulain 6 §:n 3 momentissa on nykyisellään säädetty, että kokeilu- tai tutkimustarkoituksiin käytettävä miehittämätön ilma-alus saa poiketa lentosäännöistä muulta ilmailulta kielletyllä tai tarkoitusta varten perustetulla tilapäisellä vaara-alueella, jos poikkeava menettely on suunniteltu tai toteutetaan siten, että lentoturvallisuutta ei vaaranneta. Tällaiseen menettelyyn on pyydettävä lupa Liikenteen turvallisuusvirastolta. Voimassa olevan ilmailulain säännöksen rajaus kokeilu- tai tutkimustarkoituksiin käytettäviin miehittämättömiin ilma-aluksiin on katsottava liian rajoittavaksi, ja siksi ehdotuksessa esitetään 6 §:n 3 momenttiin esitetyn kaltaista tarkistusta. Rajaus kokeilu- ja tutkimustarkoituksesta poistettaisiin, kunhan miehittämättömän ilma-aluksen käyttö rajattaisiin muulta ilmailulta kielletylle tai tarkoitusta varten perustetulle tilapäisesti erotetulle alueelle. Liikenteen turvallisuusviraston tarkoituksena on antaa lentotyöstä miehittämättömillä ilma-aluksilla määräys, joka vastaisi sisällöltään Euroopassa jo vuodesta 2004 vallalla olevia linjauksia, kuten muun muassa, että miehittämätöntä ilma-alusta voidaan käyttää, kunhan alus on koko ajan lennättäjän tai lennättäjään suorassa yhteydessä olevan tarkkailijan näköpiirissä korkeintaan 500 metrin etäisyydellä ja korkeintaan 120 metrin korkeudessa. Miehittämätön ilma-alus saa poiketa lentosäännöistä muulta ilmailulta kielletyllä tai tarkoitusta varten tilapäisesti erotetulla alueella, jos poikkeava menettely on suunniteltu ja toteutetaan siten, ettei lentoturvallisuutta vaaranneta. Ilma-aluksen käyttäjän on saatava poikkeavaan menettelyyn lupa Liikenteen turvallisuusvirastolta.” (Finlexin [www-sivut](http://www.finlex.fi) 2013)

3 LÄMPÖKAMERAN TOIMINTA

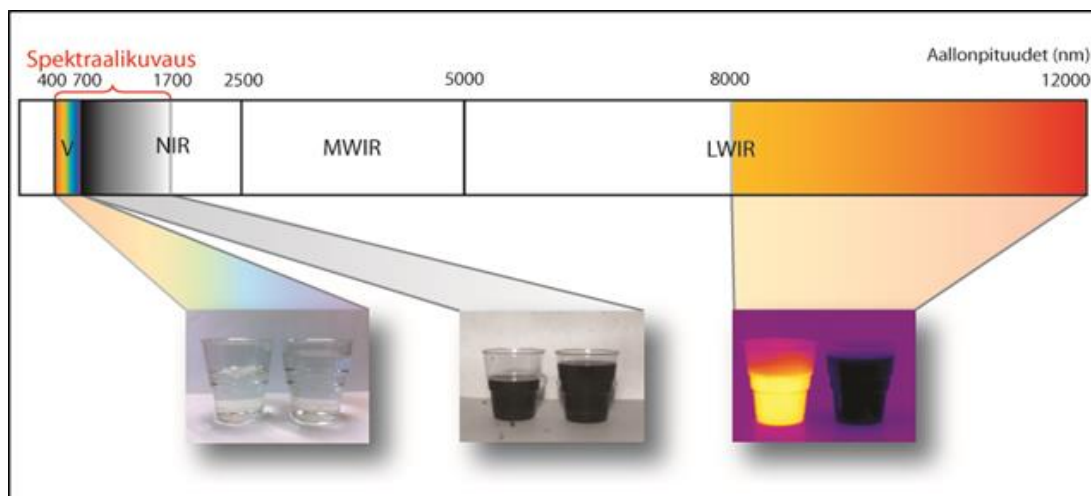
Lämpökameran historian juuret alkavat vuodesta 1840, kun englantilainen matemaatikko John Herschel kehitti ensimmäisenä maailmassa infrapunakuvan haihduttamalla alkoholia hiilipäällysteiseltä pinnalta. AGA infrared AB, nykyään FLIR, aloitti lämpökameroiden sarjavalmistuksen vuonna 1958 ja toi lämpökamerat myös siviilien markkinoille. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)

Lämpökuvauksessa tutkitaan kohteen lähettämää lämpösäteilyä eli infrapunasäteilyä. Kaikki kohteet joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen ($-273,15\text{ °C}$), säteilevät lämpösäteilyä. Lämpösäteily johtuu atomien ja molekyylien värähtelystä kappaleessa eli lämpöliikkeestä. Lämpökamera vastaanottaa infrapunasäteilyä, mittaa säteilyn voimakkuuden ja muuttaa sen lämpötilajakauman mukaiseksi kuvaksi. Lämpökameroita on kahdenlaisia, mittaavia ja ei-mittaavia. Ei-mittaavia lämpökameroita käytetään suurimmaksi osaksi etsintä- ja valvontatehtävissä, joissa ei tarvita tarkkaa lämpötilaa kohteesta. Mittaavia lämpökameroita käytetään esimerkiksi teollisuudessa, joissa taas tarvitaan tarkka lämpötila kohteesta. Lämpökamera ei tarvitse valoa toimiakseen, vaan sen toiminta perustuu kohteen infrapuna-alueella emittoiman säteilyn mittaamiseen. Lämpökamerat toimivat $8\text{-}14\text{ }\mu\text{m}$ aallonpituusalueella. Lämpökameroilla pystytään mittaamaan parhailaan -40 °C :sta aina $+1500\text{ °C}$:seen. Tallennus lämpökameroissa tapahtuu suoraan tietokoneelle, kameran sisäiseen muistiin tai muistikortille. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)

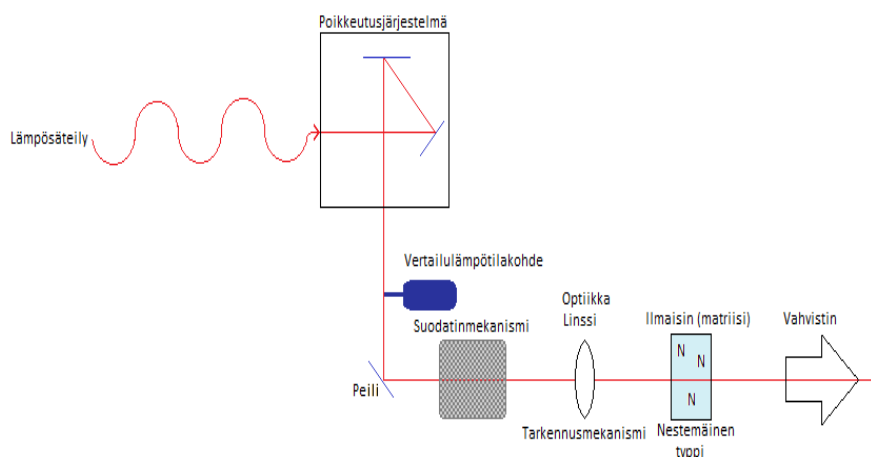
Normaalisti lasi ei läpäise tai taita lämpösäteilyä, siksi optiikkamateriaalina käytetään usein hiilipinnoitettua germaniumia. Optiikkaa vaihtamalla saadaan erilaisia näkymäalueita lämpökameralle. Suurella polttovälillä saadaan lähempi kuva kohteesta ja pienellä polttovälillä taas kauempaa otettu kuva. Lämpökamerassa erottelukyvyllä tarkoitetaan pienintä lämpötilaeroa, jonka se pystyy erottamaan. Nykyään pystytään erottamaan jopa $0,02\text{ °C}$:en lämpötilaerot, hyödyntäen kvanttikaivodetektorin ilmaisinta. Mittaustarkkuus riippuu sekä erotuskyvystä, että käytetyn lämpötila-alueen laajuudesta. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)

”On tärkeää ymmärtää ero infrapunakameran ja lämpökameran välillä. Kaikki lämpökamerat ovat infrapunakameroita, mutta kaikki infrapunakamerat eivät ole lämpökameroita. Tämä johtuu siitä, että halvat noin 200 € infrapunakamerat eivät näe tarpeeksi ”kauas” infrapunaspektriä, jotta niillä voitaisiin nähdä lämpötilajakaumia. Nämä kamerat näkevät juuri ja juuri silmälle näkymätöntä infrapunasäteilyä, mutta eivät näe kohteen itsensä lähettämää lämpösäteilyä.” (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014) Näkyvän valon aallonpituusalue on n. $400\text{ – }700\text{ nm}$ ja lyhytaaltoisen infrapuna-alueen aallonpituusalue on n. $700\text{ – }2500\text{ nm}$. Kun taas pitkäaaltoisen

infrapuna-alueen aallonpituusalue on n. 7000 – 15000nm. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)



Kuva 5. Sähkömagneettisen spektrin aallonpituudet (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)



Kuva 6. Lämpökameran toimintaperiaate (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)

Kuvassa 6 nähdään lämpökameran toimintaperiaate ja rakenne. Lämpökameran toiminta alkaa, kun optiikka ja keilain ohjaavat lämpösäteilyn kameran ilmaisimelle. Kun ilmaisim on vastaanottanut säteilyn, se välittää säteilyn tiedot sähköisenä eteenpäin. Ilmaisinelektroniikka vahvistaa sähköistä signaalia, jonka jälkeen signaali muutetaan digitaaliseen muotoon. Viimeisenä tapahtuu kuvankäsittely ja kuvan muodostaminen. (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014)

3.1 Lämpökamerat miehittämättömiin ilma-aluksiin

Tällä hetkellä ehdottomasti suosituin ratkaisu UAV -koneella tehtyyn lämpökuvaukseen on Flir Tau 2 -lämpökamera. Flir Tau -lämpökameraa löytyy kolmea eri mallia: Tau 640, Tau 336 ja Tau 324. Tau 640:n resoluutio on 640 x 512, Tau 336:n resoluutio on 336 x 256 ja Tau 324:n resoluutio on 324 x 256. Flir on ehdottomasti laadukain lämpökameravalmistaja ja myös kallein. Flir Tau:ssa on ehdottomasti yksinkertaisin ratkaisu datan siirtoon maahan. Tau:n suuri etu on myös pieni virrankulutus, sillä se vaatii ainoastaan 900mW toimiakseen. Tätä voi verrata esimerkiksi octokopterin yhden moottorin ottamaan tehoon, joka on 500W. Tau -lämpökameraan saa yhdeksän erilaista optiikkaa, joilla taataan monipuolinen kuvauskohteiden valinta. Tau:n kuvausalue on $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen ja erottelukyky on 50mK. (Flirin www-sivut 2014)



Kuva 7. Flir Tau -lämpökamera (Flirin www-sivut 2014)

Toinen vartenotettava vaihtoehto ja saman kokoluokan lämpökamera, kuin edellä mainittu, on Optriksen PL 400 ja PL 450. Molemmissa Optriksen PL- malleissa resoluutio on 382 x 288 pikseliä. PL- 450:ssä kuvausalue on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen, kun PL 400:ssa kuvausalue on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen. Kyseisiin Optriksen kameroihin löytyy tällä hetkellä kolmea erilaista optiikkaa. PL- 400:n erottelukyky on 80mK ja PL-450:n erottelukyky on 40mK. Molempien kameroiden paino on 320 grammaa. (Optriksen www-sivut 2009)



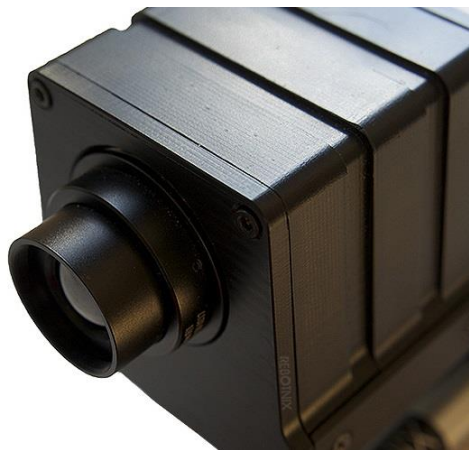
Kuva 8. Optris PL -lämpökamera (Optriksen www-sivut 2009)

Avio/Nec -nimiseltä yritykseltä löytyy myös muutama lämpökameramalli, joita on suosittu miehittämättömissä ilma-aluksissa. Avio/ Nec R300SR resoluution on 640 x 480 pikseliä. Kuvausalue on -40°C :sta $+500^{\circ}\text{C}$:seen. H -mallilla saadaan kuvausalue aina $+2000^{\circ}\text{C}$:seen asti. Erottelukyky kamerassa on 50 mK. R300Z -mallissa resoluutio ja kuvausalue ovat samat kuin edellä mainitussa kamerassa, mutta erottelukyky on 60 mK. Kyseisessä kamerassa on myös zoom -optiikka, joka parantaa pidempien etäisyyksien kuvauksia. Avio/Necin kameroissa korostuu helppokäyttöisyys, sillä kameran toiminta on lähes samanlainen kuin normaalissa videokamerassa, eli kamera kuvaa suoraan muistikortille. (Irpodin www-sivut 2014)



Kuva 9. Avio/ Nec R300SR- lämpökamera (Irpodin www-sivut 2014)

Huomattavasti helpoin ja monipuolisin ratkaisu on Rebotnixin IF-1 -lämpökamera, joka on saman kokoluokan kamera, kuin Flirin ja Optriksen. Rebotnixin kamerassa on valmiiksi langaton tiedonsiirto, joka helpottaa huomattavasti käyttöä. Resoluutio on 640 x 480 pikseliä ja erottelukyky 50 mK. (Rebotnixin www-sivut 2014)



Kuva 10. Rebotnix IF-1 -lämpökamera (Rebotnixin www-sivut 2014)

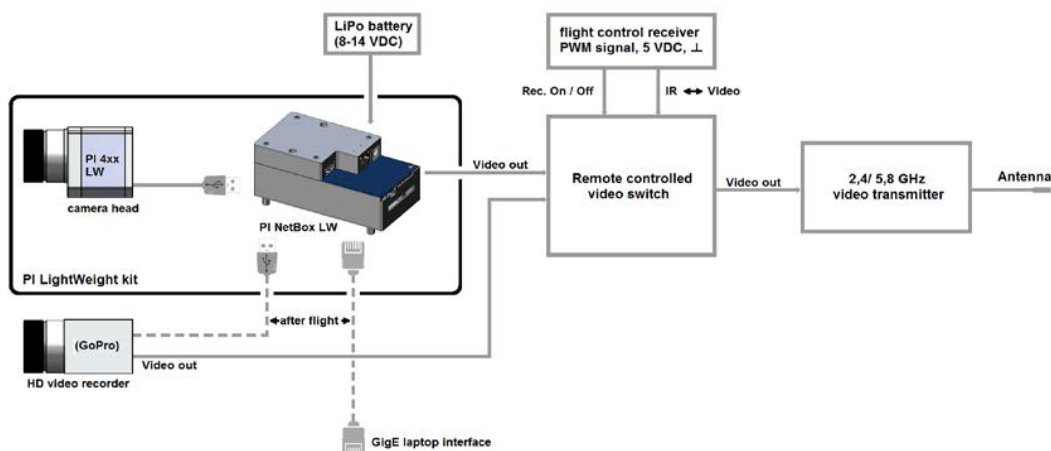
3.2 Datan siirto lämpökamerasta

Tiedonsiirto maahan on yksi monimutkaisimmista, mutta tärkeimmistä asioista lämpökuvauksessa miehittämättömällä ilma-aluksella. Tiedonsiirtoon löytyy erilaisia ratkaisuja eri kameroihin. Joissakin tehtävissä ei välttämättä tarvita suoraa live-kuvaa kuvattavasta kohteesta, jolloin riittää kamera, joka kuvaa suoraan esimerkiksi kameran muistikortille. Joissain tapauksissa, esim. etsintätehtävissä, vianetsinnässä tai huoltotoimenpiteissä voidaan tarvita live-kuvaa. Normaalisti ilmakuvauksessa live-kuva muodostetaan 5.8 GHz:n videolinkin avulla johonkin kannettavaan monitoriin tai kannettavaan tietokoneeseen. Jossain tapauksissa voidaan hyödyntää myös wifin käyttöä, jolloin kuva voidaan saada puhelimeen, tablettiin tai kannettavaan tietokoneeseen.

Flir Tau -lämpökameran tiedonsiirto maahan on toteutettu 5.8 GHz:n videolinkin avulla kannettavaan tietokoneeseen tai kannettavaan monitoriin. Toimintaetäisyydet ovat muutamia kilometrejä riippuen videolinkin antenneista. Mikäli videolinkki on yhdistetty kannettavaan tietokoneeseen, saadaan kuvaus tällöin tallennettua esimerkiksi kovalevylle tai muistitikulle. (Flirin www-sivut 2014)

Optriksen lämpökameran tiedonsiirto on jonkin verran monimutkaisempi kuin Flirilä, sillä se vaatii pienen ”tietokoneen” live-kuvan muodostamiseksi. Live-kuva saa-

daan muuten muodostettua 5.8 GHz:n videolinkin avulla. Kuvassa 11 nähdään Optriksen lämpökameran live-kuvan kytkentäkaavio. (Optriksen www-sivut 2009)



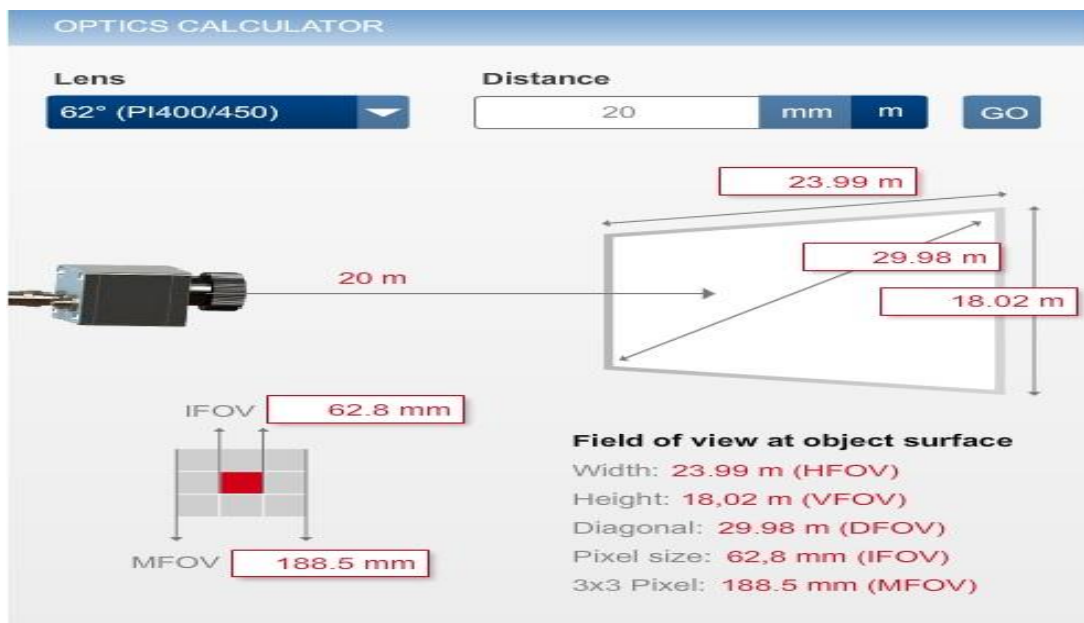
Kuva 11. Optriksen lämpökameran live-kuvan kytkentäkaavio (Optriksen www-sivut 2009)

Rebotnixin lämpökamerassa tiedonsiirto on toteutettu sisäisellä langattomalla lähettimellä. Kameralla voidaan lähettää esimerkiksi suoraan live-kuva Applen iPadiin. Live-kuva voidaan myös lähettää matkapuhelinverkkojen yli suoraan CDN -verkkoon. Toimintaetäisyydeksi saadaan noin kilometri. (Rebotnixin www-sivut 2014)

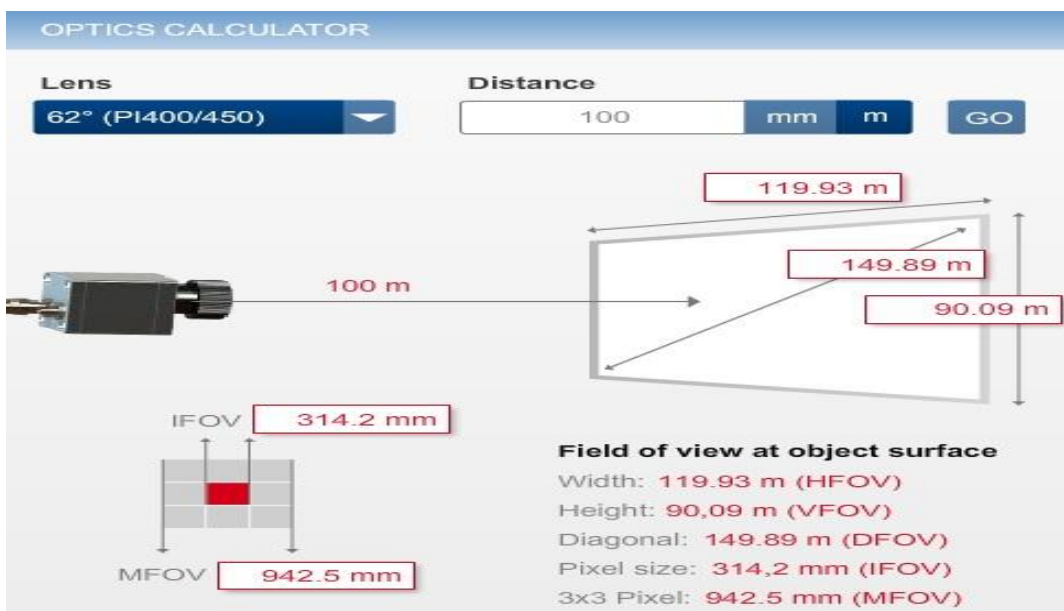
3.3 Optiikan vaikutus

Optiikalla on suuri vaikutus lämpökuvauksessa. Normaalisti lämpökameroihin ei ole saatavilla zoomausta, joten kuvan näkymäaluetta muutetaan erilaisilla optiikoilla. ”Lämpökameran erotuskyvyllä tarkoitetaan pienintä pinta-alan kokoa, jonka kuvausjärjestelmä pystyy erottamaan. Tähän voidaan vaikuttaa vaihtamalla optiikkaa. Pienin eroteltava pinta voidaan laskea kertomalla mittausetäisyys kameran geometrisella erottelukyvylä. Geometrinen erottelukyky ilmaistaan yksittäisen pisteen mittauskulmana milliradiaaneissa. Geometrisen erottelukyvyn määrittelyn lähtökohta on luonnollisesti ilmaismatriisin yksittäisen ilmaisimen koko. Mittaustarkkuus riippuu erotuskyvyn lisäksi käytetyn lämpötila-alueen laajuudesta.” (Leino henkilökohtainen tiedonanto 6.2.2014) Kuvissa 12 ja 13 nähdään Optriksen lämpökameran $62^{\circ} \times 49^{\circ}$

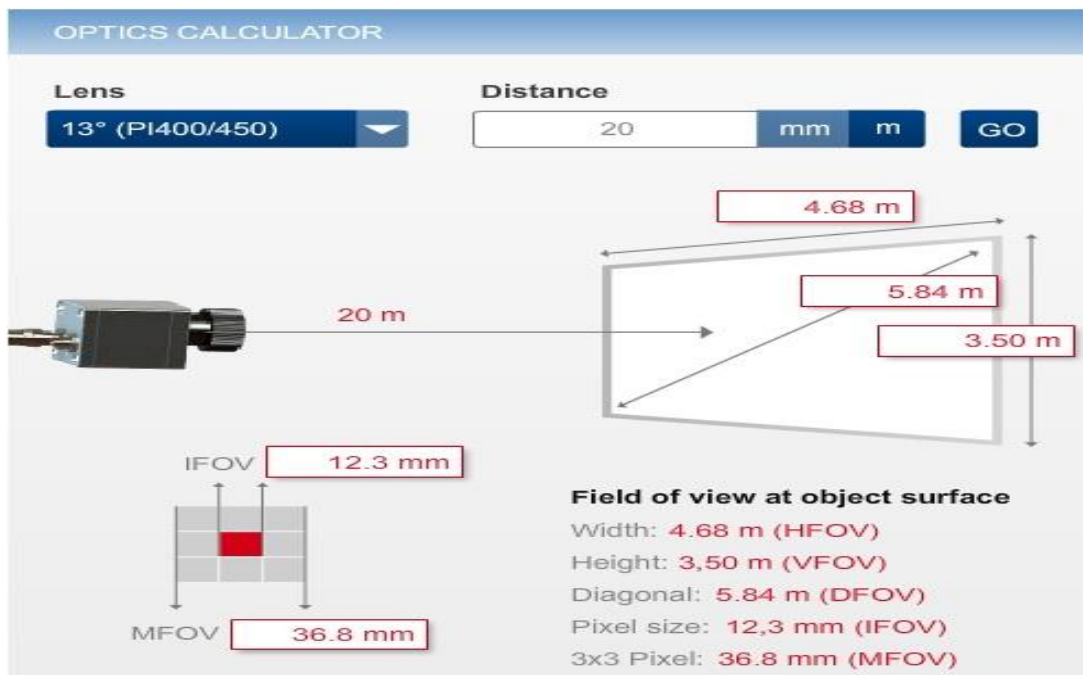
optiikan vaikutus kuva-alueeseen, ensin 20 metrin etäisyydeltä ja sen jälkeen 100 metrin etäisyydeltä. Tämän jälkeen kuvissa 14 ja 15 nähdään Optriksen lämpökameran $13^\circ \times 10^\circ$ optiikan vaikutus kuva-alueeseen, ensin 20 metrin etäisyydeltä ja sen jälkeen 100 metrin etäisyydeltä.



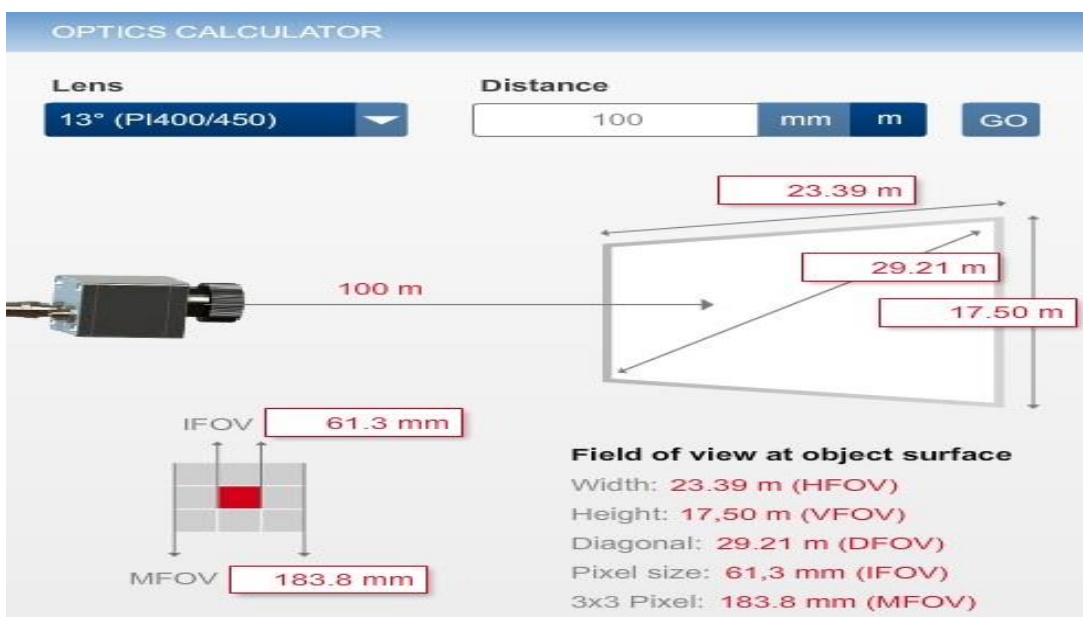
Kuva 12. Optriksen lämpökameran $62^\circ \times 49^\circ$ optiikan vaikutus kuva-alueeseen 20 metrin etäisyydeltä (Optriksen www-sivut 2009)



Kuva 13. Optriksen lämpökameran $62^\circ \times 49^\circ$ optiikan vaikutus kuva-alueeseen 100 metrin etäisyydeltä (Optriksen www-sivut 2009)



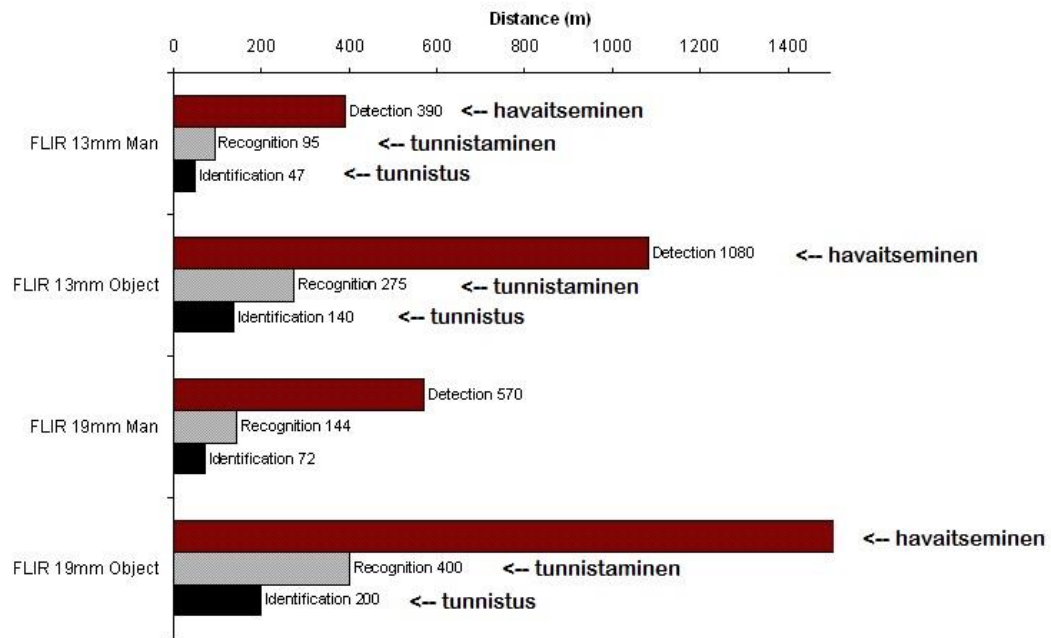
Kuva 14. Optriksen lämpökameran 13° x 10° optiikan vaikutus kuva-alueeseen 20 metrin etäisyydeltä (Optriksen www-sivut 2009)



Kuva 15. Optriksen lämpökameran 13° x 10° optiikan vaikutus kuva-alueeseen 100 metrin etäisyydeltä (Optriksen www-sivut 2009)

Kuvassa 16 nähdään miten Flirin 13mm ja 19mm objektiivit vaikuttavat kuvausetäisyyksiin ihmisen ja auton kokoihin kohteisiin. 19mm objektiivi havaitsee auton kokoisin kohteita melkein puolelta kilometrin etäisyydeltä, kun 13mm objektiivi havaitsee sen vasta reilun kilometrin etäisyydeltä. Tunnistamisetäisyyksillä ei ole

suurta eroa, sillä 19mm objektiivi tunnistaa auton kokoisen kohteen 200 metrin etäisyydeltä, kun 13mm objektiivi havaitsee saman kohteen 140 metrin etäisyydeltä. Kuvasta voidaan päätellä, että kun objektiivia kasvatetaan, havaitsemiskyky kasvaa huomattavasti enemmän, kuin tunnistuskyky.



* the above specifications are for the 640 x 480 imager.

Kuva 16. Flirin optiikkalaskuri (Aeryonin www-sivut 2014)

4 MIHIN LÄMPÖKUVAUSTA VOIDAAN HYÖDYNTÄÄ?

Nykyään lämpökamerat on saatu niin pieneen kokoon, että niitä voidaan hyödyntää myös UAV -toiminnassa. Lämpökamera ilmassa tuo aivan uusia ulottuvuuksia verrattuna normaaliin lämpökuvaukseen. Lämpökuvauksista on tehty jo pitkään ilmasta, mutta vain oikeilla helikoptereilla tai lentokoneilla, mikä on ollut varsin kallista.

Mihin lämpökuvauksista voidaan hyödyntää? Ensimmäiseksi tulisi miettiä, että tarvitaanko kohteesta tarkka lämpökuvauksella vai riittääkö pelkkä suuntaa antava kuva. Niin kuin aikaisemmin mainittiin, lämpökuvauksista jaetaan kahteen osaan, mittavaan ja ei mittavaan. Mittavalla lämpökuvauksella tarkoitetaan, että paikannetaan kuvattavan kohteen vika, esimerkiksi kaukolämpöputken lämpövuotoa tai muuntajassa ylikuumeneva komponentti. Tällaisessa kuvauksessa useimmiten halutaan tarkka läm-

pötilä kuvauskohteesta. Ei-mitattavalla tarkoitetaan taas, että lämpökameran avulla löydetään esimerkiksi ihminen maastosta. Tässä tapauksessa riittää vain suuntaa antava kuva eli pystytään erottamaan ihminen esimerkiksi maastosta.

Käyttämällä lämpökameraa octokopterissa pystytään kuvaamaan hankalissakin paikoissa. Kuvausta voidaan tehdä myös sisätiloissa, esimerkiksi korkeissa tehtaissa. Octokopterilla voidaan myös kuvata täysin paikallaan, joten saadaan hyvinkin tarkkoja kuvia todella läheltä kohdetta. Kopteria voidaan käyttää hyvin monipuolisesti lämpökuvauksessa. Voidaan nousta ylöspäin esimerkiksi korkeaa maston vieressä, kuvata täysin paikallaan tai opettaa lentoreitti esimerkiksi halutun sähkölinjan mukaisesti. UAV -lennokkia pystytään hyödyntämään vain laajamittaisessa kuvauskäytössä, esimerkiksi ihmisen etsinnässä tai laajamittaisissa sähkölinjojen tarkastustehävissä.

4.1 Tilanne maailmalla

Lämpökameran käyttöä UAV -koneessa hyödyntäen on tutkittu eri puolilla maailmaa jo useamman vuoden, muun muassa eri lämpökameroiden soveltuvuutta ja erilaisia käyttötarkoituksia. Myös datan lähetys lämpökamerasta maahan on ratkaistu erilaisin menetelmin. Käyttökohteita on keksitty useita ympäri maailmaa ja uusia kohteita keksitään jatkuvasti lisää. Lämpökuvauksella onkin saanut suuren suosion monilla teollisuuden aloilla. Pääosin lämpökameraa on käytetty erilaisiin laitteiden ja rakennusten tarkastuksiin ja huoltotoimenpiteisiin. Saksassa lämpökuvauksella ilmasta käsin on hyödynnetty muun muassa isojen aurinkopuistojen aurinkopaneelien kuntotarkistuksissa sekä rakennusten kattoeristeiden tarkastuksissa. Lämpökuvauksen kohteita muualla maailmassa on ollut esimerkiksi tuulimyllyjen, sähkölinjojen ja korkealla hankalissa paikoissa olevien sähkölaitteiden tarkastuksissa. Myös poliisit ja pelastuslaitokset ovat hyödyntäneet lämpökuvauksella ilmasta, esimerkiksi ihmisen etsintä- ja piiritystehävissä. (Thermografien [www-sivut 2013](#)) (Aibotixin [www-sivut 2014](#))

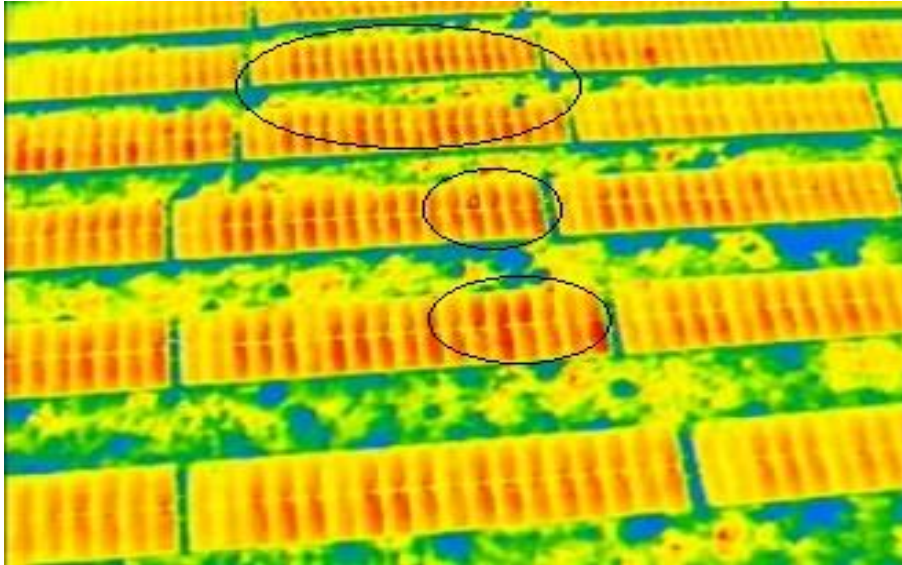
4.2 Tilanne Suomessa

Lämpökuvaus ilmasta on varsin haluttu ja kasvava palvelu tulevina vuosina myös meillä Suomessa. Tietävästi Suomessa on tällä hetkellä muutama lämpökuvaukseen erikoistunut ilmakehuvausyritys. Tehtyäni taustatutkimusta, heidän käyttökohteitaan ovat olleet kaukolämpöputkien vuotokohtien kartoittaminen, sähkölinjojen liitosten ja komponenttien ylikuumentuminen, sähkönjakelukeskukset, korkeat rakennukset ja rakennusten kattojen eristyksien tarkastaminen. Myös ihmisten etsintä, palopesäkkeiden paikantaminen palopaikalta ja erilaisten prosessien tarkkailu ovat olleet kohteina. Tulevaisuudessa kuvattavia kohteita voisivat olla myös tuulimyllyjen lapojen lämmittimet. (Lentosirkuksen www-sivut 2012) (VideoDronen www-sivut 2014)

5 ESIMERKKI CASE

Seuraavissa kuvissa 17, 18 ja 19 nähdään kahdella eri lämpökameralla otettuja kuvia ilmasta käsin. Jokaisesta kuvasta on ympyröity niin sanotut ”hotspot -alueet” eli käytännössä missä tapahtuu suurimmat ylikuumentumiset ja lämpövuodot. Kyseisiä kuvia ei pystytä vertaamaan mihinkään referenssilämpötilaan, koska sellaisia ei ollut annettu. Esimerkiksi kuvista 18 ja 19 pystytään tulkitsemaan suurimmat lämpövuodot. Kuvasta 17 voidaan päätellä, että osassa aurinkopaneeleiden komponenteista tapahtuu ylikuumentumisesta, joka voi johtua mm. laiteviasta tai tarvittavasta huoltotoimenpiteestä.

Miten ”hotspot-alueet” pystytään paikantamaan? Koska lämpökamerat ovat massaltaan ja fyysiseltä kooltaan hyvin pieniä tänä päivänä, pystytään kopterin kyytiin lisäämään myös pieni videokamera lämpökameran lisäksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kameratelineeseen lämpökameran viereen lisätään esimerkiksi GoPro-videokamera. Videokamera suunnataan samaan suuntaan, mihin lämpökamera kuvaa. Täten pystytään vertaamaan normaalia videokuvaa sekä lämpökuvaa keskenään, josta pystytään paikantamaan tarkasti erilaiset lämpövuodot sekä ylikuumentumiset kuvauskohteista.



Kuva 17. Optriksen PL450 lämpökameralla otettu kuva aurinkopaneelipuistosta (Ai-botixin www-sivut 2014)



Kuva 18. Flir Tau -lämpökameralla otettu kuva kerrostalon seinästä (Thermografien www-sivut 2013)



Kuva 19. Flir Tau -lämpökameralla otettu kuva kerrostalon kattorakenteista (Thermografien www-sivut 2013)

6 YHTEENVETO

Tutkimukseni tuloksina on hyvä todeta ensimmäisenä muutama fakta octokopterin tekniikasta. Tärkeimpiä kehitettäviä asioita tekniikassa ovat lentoajan pidentäminen sekä autopilottijärjestelmän käyttö. Näillä kahdella seikalla saadaan kuvauskohterin käyttöaluetta kasvatettua ja siten myös enemmän kuvauskohteita. Oleellista ovat myös kuvauskohterin keventäminen sekä hyötysuhteeltaan paremmat potkurit.

Lämpökameran hankintaa suunniteltaessa, tulisi ensimmäisenä pohtia hintalaatusuhdetta sekä kuvaustarkoitusta. Lämpökamera tulisi olla käyttäjälle helppo- ja varmakäyttöinen. Tarpeen tullen tulisi olla mahdollisuus monipuolisiin kuvauksiin käyttäen erilaisia optiikoita. Tutkimukseeni vedoten, paras lämpökameravaihtoehto on ehdottomasti Flir Tau -mallit. Näillä kameroilla on jo paljon näyttöä kyseisistä kuvaustoimenpiteistä ja voidaan todeta, että se on toimiva ratkaisu.

Miten tekniikka tulee kehittymään seuraavana viitenä vuotena? Lähdetään ensimmäiseksi liikkeelle multikopterien tekniikasta. Uusia multikopterivalmistajia tulee lisää markkinoille jatkuvasti ja sitä kautta hinnat putoavat samaan tahtiin. Esimerkkinä vuosi sitten servo-ohjatut kameratelineet olivat yleisempiä kuin harjattomilla sähkö-

moottoreilla ohjatut. Harjattomilla sähkömoottoreilla varustettuja kameratelineitä valmisti vain muutama yritys, jonka johdosta ne olivat hyvin kalliita. Tällä hetkellä kyseisiä valmistajia on tullut rutkasti lisää sekä hinnat ovat pudonneet roimasti alas. Kopterien akkuteknologian puolestaan luulisi kehittyvän seuraavan viiden vuoden aikana sen verran, että pystytään lentämään kerralla helposti puolikin tuntia. Lennätys puolestaan tulee kallistumaan enemmän ennalta määrättyihin lentoreitteihin käyttäen autopilottijärjestelmää. Seuraavan viiden vuoden aikana myös lainsäädäntö tulee kehittymään tarkemmaksi miehittämättömissä ilma-aluksissa.

Kamerat kehittyvät jatkuvasti yhä pienemmiksi. Tämä koskee normaaleja järjestelmäkameroita sekä lämpökameroita. Viimeisen kahden vuoden aikana markkinoille on saapunut minijärjestelmäkameroita. Lähivuosina tullaan korvaamaan normaalit järjestelmäkamerat pienempikokoisilla, kun saadaan kehityttyä kennoja pienempikokoisiksi. Luultavasti myös markkinoille saadaan uusia kompaktikokoisia lämpökameroita lähivuosina. Lämpökameratekniikassa kehitystä tulee tapahtumaan datan siirrossa maahan. Viime vuosina normaaleissa kameroissa on alettu hyödyntämään wifiä. Uskoisin, että wifin käyttö tulee myös yleistymään lämpökameroissa, täten saadaan helposti siirrettyä dataa maahan.

Työn tuloksia tullaan hyödyntämään lähivuosina yritykseni AirAction palveluissa kun rahoitus on ratkennut. Testikuvaukset tullaan aloittamaan rakennusten lämpökuvauksilla Porin kaupungin teknisen palvelukeskuksen toimesta.

LÄHTEET

- AirActionin www-sivut. 2013. Viitattu 1.2.2014. <http://www.airaction.fi/>
- Dji:n www-sivut. 2014. Viitattu 1.2.2014. <http://www.dji.com/>
- Airpixin www-sivut. 2010. Viitattu 1.2.2014. <http://www.airpix.net>
- Finlexin www-sivut. 2013. Viitattu 1.2.2014. <http://www.finlex.fi>
- Leino, M. 2014. Tutkijaopettaja, Satakunnan Ammattikorkeakoulu. Pori. Opintomateriaali 6.2.2014
- Flirin www-sivut. 2014. Viitattu 10.2.2014. <http://www.flir.com>
- Optirksen www-sivut. 2009. Viitattu 10.2.2014. <http://www.optris.com>
- Irpodin www-sivut. 2014. Viitattu 10.2.2014. <http://www.irpod.net>
- Rebotnixin www-sivut. 2014. Viitattu 10.2.2014. <http://rebotnix.com>
- Aeryonin www-sivut. 2014. Viitattu 13.2.2014. <http://www.aeryon.com>
- Lentosirkuksen www-sivut. 2012. Viitattu 14.2.2014. <http://www.lentosirkus.fi>
- Videodronen www-sivut. 2014. Viitattu 14.2.2014. <http://www.videodrone.fi/>
- Aibotixin www-sivut. 2014. Viitattu 17.2.2014. <http://www.aibotix.com>
- Thermografien www-sivut. 2013. Viitattu 17.2.2014. <http://www.thermografie.nl>
- Taponen, T. 2014. Ilmakuvaaja, AirAction. Pori. 14.4.2014