



SAVONIA

Tekniikka

Palopäällystön koulutus

OPINNÄYTETYÖ

UAV PELASTUSTOIMINNAN JOHTAJAN TUKENA - LAITTEISTON
TEKNISET VAATIMUKSET

Jyri Jännti

25.11.2014 Matti Honkanen

SAVONIA–AMMATTIKORKEAKOULU - TEKNIikka, KUOPIO

Koulutusohjelma

Palopäälylystön koulutusohjelma

Tekijä

Jyri Jäntti

Työn nimi

UAV Pelastustoiminnanjohtajan tukena - laitteiston tekninen vaatimusmäärittely

Työn laji

Päiväys

Sivumäärä

Opinnäytetyö

20.11.2014

56 + 6

Työn valvoja

Yrityksen yhdysenkilö

yliopettaja Matti Honkanen

Yritys

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä määritettiin teknisiä vaatimusmäärittelyjä pelastustoimen johtamiseen soveltuvalla miehittämättömälle ilma-alukselle, myöhemmin UAV. UAV:n käyttämistä pelastustoiminnan johtajan tilannekuvan muodostuksessa on käsitelty palopäälylystön opinnäytteessä jo 2011, mutta teknisiä yksityiskohtia ei aiemmin ole juurikaan huomioitu. Voimassa oleva lainsäädäntö ei vielä tunne käsitettä miehittämätön ilma-alus, mutta nyt ansiotarkoituksessa tehtävää miehittämätöntä lentoa käsittelevä ohjeistus on tekeillä. Todelliset rajoitteet käytännön kokeiluille ovat siis viimein poistumassa.

Eräs opinnäytteen ongelmista oli se, että vaikka UAV-laitteita on tutustumismielessä jo käytetty, niistä on kertynyt vielä hyvin vähän käyttökokemuksia pelastustoiminnassa. Aloituskynnys hankkia kalustoa on suuri, kun laitteistovaatimuksia ei tunneta riittävän hyvin. Toisaalta käyttökokemusta ei synny, ennen kuin laitteistoa käytetään riittävän todellisessa käyttöympäristössä. Alun perin tarkoituksena oli ottaa UAV mukaan operatiiviseen pelastustoiminnan johtamiseen, mutta laitteisto oli siihen liian epäluotettava. Opinnäytetyössä kuitenkin rakennettiin kaksi ilmakuvaukseen soveltuvaa prototyyppilaitetta ja arvioitiin niiden soveltuvuutta pelastustoimen johtajan käyttöön. Lentoja ei kuitenkaan lennetty todellisilla onnettomuuspaikoilla osana pelastustoiminnan johtamista.

Lentävä multi-kopteri on aina kompromissi eri ominaisuuksista ja yhden ominaisuuden optimoiminen haittaa usein toista ominaisuutta. Tässä työssä koetettiin avata muutamia ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia ja siten helpottaa laitteistoa tuntemattoman henkilön hankintapäätöstä. Työssä myös kuvailtiin ihanteellista laitteistoa ja tällä hetkellä tehtävään sopivia tuotteita. Alan nopean kehitystahdin vuoksi nämä suositukset vanhenevat nopeasti, mutta tekstissä kuvatut periaatteet säilyvät.

Avainsanat

UAV, miehittämätön ilma-alus, vaatimusmäärittely

Luottamuksellisuus

julkinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Fire Officer (Engineer)

Author

Jyri Jäntti

Title of Project

Usage of Unmanned Aerial Vehicles by Rescue Service Authorities - Technical Specifications

Type of Project

Final Project

Date

20 November, 2014

Pages

56 + 6

Academic Supervisor

Mr Matti Honkanen, Senior Inspector

Company Supervisor

Company

Abstract

The aim of this final project was to gain experience of the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and complete system of Unmanned Aerial System (UAS) for the assistance purposes of the commander of rescue services. Some early studies of such devices exists but practical knowledge of the system in fire and rescue services is still divided. Most of the UAV reconnaissance in fire and rescue services has been on demonstration level only. The lack of practical knowledge hinders early use and experimenting of UAV's. Another limitation has been the legislation of aeronautics that has not recognized the difference between aircrafts and UAV's. Some early legislative proposals of the operation of UAV's have now been made and practical experiments can proceed.

Two prototype UAV's for the aerial reconnaissance were built for this research. One with fixed wings and another with quad-rotor helicopter layout. These prototype UAV's were flown in a simulated environment. Several test flights were flown to determine specifications of an optimal UAS. The whole UAV system also needs a wide range of support equipment to operate successfully. This support equipment is also described briefly in the report.

A multicopter type flying platform is a considerable compromise of different features presented in this final project. Also, silent know-how from the Radio Control (RC) -hobbyists was collected for this study. The features of UAVs described should help to decide what kind of equipment to choose from the very wide supply of UAV systems.

Keywords

UAV, Unmanned Aerial Vehicle, technical specification

Confidentiality

public

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| LYHENTEET | 6 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 2 UAV:N KÄYTTÖ PELASTUSTOIMINNASSA | 10 |
| 2.1 UAV osana pelastustoiminnan johtamista | 11 |
| 2.2 Vaaratilanne Vihtavuorella | 13 |
| 3 LAINSÄÄDÄNTÖ | 16 |
| 3.1 Ilmailulaki | 16 |
| 3.2 Määräys OPS M1-1: Lentosäännöt | 17 |
| 3.3 Määräysluonnos OPS M1-23: Lentotyö | 17 |
| 3.4 Työturvallisuus | 20 |
| 4 OPINNÄYTTEESSÄ RAKENNETUT UAV:T | 22 |
| 4.1 Kiinteäsiipinen lentolaite ”Läpsykkä” | 23 |
| 4.1.1 Lentotehtävä 1 | 24 |
| 4.1.2 Lentotehtävä 2 | 25 |
| 4.1.3 Lentotehtävä 3 | 26 |
| 4.1.4 Lentotehtävä 4 | 27 |
| 4.2 Pyöriväsiipinen lentolaite ”Proto” | 29 |
| 4.2.1 Runko | 31 |
| 4.2.2 Autopilotti | 31 |
| 4.2.3 Akku | 34 |
| 4.2.4 Moottorit | 37 |
| 4.2.5 Nopeudensäätimet | 38 |
| 4.2.6 Potkurit | 40 |

| | |
|--------------------------|----|
| 5 KAMERAT JA APULAITTEET | 43 |
| 5.1 Kameran vakautus | 45 |
| 5.2 Videolähetin ja OSD | 47 |
| 5.3 Antennit | 48 |
| 5.4 Maa-asetat | 49 |
| | |
| 6 POHDINTA | 52 |
| | |
| LÄHTEET | 55 |
| | |
| LIITTEET | 57 |

LYHENTEET

| | |
|--------|---|
| APM | Ardupilot Mega. Arduino-pohjainen harrastelijoiden kehittämä autopilot-järjestelmä. |
| B-VLOS | Beyond Line Of Sight. Lennättäminen, ilman jatkuvaa näköyhteyttä. |
| ESC | Electronic Speed Controller. Elektroninen sähkömoottorin nopeuden säädin |
| EPO | Expanded Polyalkene. Yleisnimitys kulutuskestäville muovivaahto-laaduille. Sisältää useita eri materiaaleja. |
| EPP | Expanded Polypropylene. Vaahdotettua muovia, materiaalia, joka on kemikaalikestävää ja erittäin kimmoisaa ja kestävä. Yleinen rakennusmateriaali lennokkien rungoissa. |
| E-VLOS | Extended Visual Line Of Sight. Näköyhteyden (VLOS) jatkamisen menetelmä, jossa käytetään ohjaajaan jatkuvassa radioyhteydessä olevia tähystäjiä |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor. Yleinen kanavatransistoripareihin perustuva puolijohdetekniikka. |
| FPV | First Person View Videokamerasta ja kuvaa maahan välittävästä elektroniikasta koostuva laitekokonaisuus, jolla lennättäjä saa eteensä videokuvaa kuin istuisi itse koneessa |
| I2C | Sarjaportti standardi, jossa sarjadata siirtyy tiettyä protokollaa noudattaen kahta johdinta pitkin. |
| IFR | Instrument Flight Rules. Suomeksi mittarilentosäännöt. Käytetään, kun näkyvyys ulos ei ole riittävä turvalliseen lentämiseen. |
| IMU | Inertia Measurement Unit. Ardupilot Mega järjestelmän anturikokonaisuus, jolla se aistii asentoa ja kiihtyvyyttä |
| INS | Inertia Navigation System. Suunnistusjärjestelmä, joka arvioi lentoreittiä kiihtyvyyssdatan perusteella. |
| LHCP | Left Hand Circular Polarisation. Vasenkätinen ympyräpolarisoitu radiolähete. |
| LIPO | Lithium Polymer. Akkukemia, joka perustuu litium polymeereihin. Suuri energiatiheys massaa kohti. |
| LOS | Line of Sight. Etäisyys UAV:hen suorinta reittiä. |

| | |
|-------|--|
| NOTAM | Notice for Airmen. Ilmailijoille jaettava tiedote, jossa kerrotaan ilmatilarajoituksista, ilmatilavarauksista tai muutoksista lentopaikkojen aukioloaikoihin. |
| OSD | On-screen display. Tapa lähettää UAV:n lentoarvot pilotille videosignaalin välityksellä. Vrt. televisiolähetysten tekstitykset. |
| PCB | Printed Circuit Board. Suom. piirilevy. |
| PID | Proportional/Integral/derivative control method. Säätojärjestelmä, joka perustuu kolmeen vahvistustermiin – suhteellinen/integroiva/derivoiva. |
| RHCP | Right Hand Circular Polarisation. Oikeakätinen ympyräpolarisoitu radiosignaali. Vrt. LHCP. |
| ROV | Remotely Operated Vehicle. Kauko-ohjattu laite. Lyhennettä käytetään yleensä maassa tai vedessä liikkuvista, napanuora-johdollisista laitteista. |
| RPA | Remotely Piloted Aircraft. Toinen nimitys UAV:lle eli miehittämättömälle ilma-alukselle. |
| RPAS | Remotely Piloted Aircraft System. Miehittämättömästä ilma-aluksesta, sen hallinta- ja suunnistuslaitteistosta, maa-asemasta ja apulaitteista koostuva kokonaisuus. |
| RSSI | Receiver Signal Strength Indicator. Radiovastaanottimen vahvistinta ohjaava saapuvan signaalin voimakkuutta kuvaava signaali. |
| RTL | Autopilotin lentotila, jossa se palaa ennalta ohjelmoidulla lentokorkeudella suorinta reittiä takaisin lennon alkupisteeseen. |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle. Miehittämätön ilma-alus |
| UAS | Unmanned Aerial System. UAV:n ja sen tukijärjestelmän muodostava kokonaisuus |
| VFR | Visual Flight Rules. Ilmailun tila, jossa lennetään vain näköhavaintoja käyttäen. |
| VLOS | Visual Line Of Sight. Lennättäminen jatkuvassa näköyhteydessä alle 500 m etäisyydellä. |
| VTOL | Vertical Take-off and Landing. Pystysuoraan lentoonlähtöön kykenevä lentolaite. |
| WAAS | Wide Area Augmentation System. GPS-järjestelmän paikannustarkkuutta parantava järjestelmä. |

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee miehittämättömiä ilma-aluksia ja etäohjattuja lentäviä laitteita osana pelastustoimen johtamista. Miehittämätöntä ilma-alusta voidaan käyttää pelastustoiminnan johtamisessa tiedusteluun ja tilannekuvan ylläpitämiseen. Ilmasta otettu kuva on erinomainen työkalu myös työturvallisuuden valvonnassa ja helpottaa johtajaa reagoimaan työympäristön muutoksiin ja yllättäviin vaaratekijöihin. Ilmakuvan edut korostuvat varsinkin suuremmissa ja laaja-alaisissa pelastustehtävissä.

UAV on lyhenne englannin kielen sanoista Unmanned Aerial Vehicle. Suomennettuna tämä tarkoittaa miehittämätöntä ilma-alusta. Hieman laajempi määritelmä UAS (Unmanned Aerial System) eli miehittämätön ilma-alus järjestelmä huomioi myös onnistuneelle miehittämättömälle lennolle vaadittavan maakaluston olemassaolon. Yleisesti käytetään myös lyhennettä RPV (Remotely Piloted Vehicle) tai USA:ssa suosittua termiä drone. Joissain yhteyksissä käytetään myös termejä RPA ja RPAS eli Remotely Piloted Aircraft ja Remotely Piloted Aircraft System. Tässä opinnäytteessä käytetään kuitenkin termiä UAV, koska se tuntuu vakiintuneen miehittämätöntä ilma-alusta tarkoittavaksi termiksi pelastusalalla. Termiä UAV on myös käytetty alalle aiemmin tehdyssä opinnäytetyössä.

UAV voi lentää joko suorassa ihmisen ohjauksessa tai automaattisesti etukäteen ohjelmoitua reittiä pitkin. UAV:tä voidaan lennättää joko harrastustarkoituksessa tai palkkiota vastaan. Mikäli UAV-laitetta käytetään työtehtävässä, josta maksetaan palkkio, on kyse ansiolentämisestä ja vaatimukset lentotoiminnalle ovat selvästi harrastustoimintaa tiukemmat.

Miehittämätön ilma-alus ei ole lennokki, vaikka termiä käytetäänkin miehittämättömään ilmailuun liittyvässä uutisoinnissa ja yleisesti puhekielessä. Lennokki lentää aina suorassa ihmisen ohjauksessa ja näköyhteydessä. Lisäksi lennokkia lennätetään aina kilpailu- tai harrastustarkoituksessa.

Työn tavoitteena on laatia listaus pelastustehtävän tiedusteluun soveltuvan UAV-laitteiston ominaisuuksista ja teknisistä vaatimuksista. Listauksen tarkoituksena on auttaa lentävän kaluston hankinnassa ja lisätä tietämystä etukäteen sovittavista

yksityiskohdista ennen UAV-toiminnan aloittamista. Ominaisuuslistaukset löytyvät raportin osuuksista 4 ja 5 kappaleiden lopusta.

Laajaa kirjallista tutkimusta tässä ei työssä tavoiteltu, sillä tarkoituksena oli lyhyt listaus mitä laitteiston hankkimista pohtivan tulee tietää ennen ostopäätöstä. Työssä on myös huomioitu mahdollisuus hankkia ilmatiedustelu ostopalveluna joko toiselta viranomaiselta tai ilmakeuhayritykseltä. Tällöin ominaisuuslistaus ei suoraan sovellu, mutta tekstin lukija saa vihjeitä myös yrittäjän kanssa tehtävän palveluntuotantosopimuksen yksityiskohtiin.

2 UAV:N KÄYTTÖ PELASTUSTOIMINNASSA

Tätä kirjoittaessa pelastustoimella ei tietääkseni ole omaa UAV- kalustoa Suomessa. Mielenkiintoa kalustoon kuitenkin on, ja varhaisia kokeita eri toiminnanharjoittajien kanssa on tehty. Opinnäytteitä UAV-toiminnasta on tehty pelastustoimessa vain yksi. Teemu Veneskarin työssä keskitytään tilannekuvan muodostamiseen UAV-laitteen avulla. Opinnäyte on julkaistu 2011, ja siinä on kattava listaus sen hetkisistä julkaisuista alalla. Tämä opinnäytetyö keskittyy kirjallisen taustatutkimuksen sijaan käytännön kokemusten kokoamiseen.

UAV-tiedustelua on käytetty yksittäisissä tehtävissä, joista suurimman julkisuuden lienee saanut Vihtavuoren taajaman evakuointiin johtanut räjähdönonnettomuus heinäkuussa 2013. Suuren räjähdysen mahdollisuuden vuoksi tiedustelu haluttiin aloittaa miehittämättömillä laitteilla, kunnes todellinen räjähdysvaara selviäisi.

Kansainvälisestikin on nähtävissä, että UAV-laitteita käytetään pääasiassa suuririskisessä tiedustelussa ja tilannekuvan muodostuksessa suurissa onnettomuuksissa. Tällaisesta tiedustelusta voidaan mainita esimerkkinä Fukushima ydinvoimalaonnettomuuden tiedustelukuvat. (Associated Newspapers Ltd. 2011.) Kuva 1 on yksi onnettomuudesta julkaistuista kuvista.



Kuva 1. UAV:n ottama kuva tuhoutuneesta ydinlaitoksesta

2.1 UAV osana pelastustoiminnan johtamista

Voimassa oleva pelastuslaki 379/2011 määrittelee pelastustoiminnan sisällön 32 §:ssä. Pelastustoimintaan kuuluvat

- hälytysten vastaanottaminen
- väestön varoittaminen
- uhkaavan onnettomuuden torjuminen
- onnettomuuden uhrien ja vaarassa olevien ihmisten, ympäristön ja omaisuuden suojaaminen ja pelastaminen
- tulipalon sammuttaminen ja vahinkojen rajoittaminen
- edellä mainittuihin tehtäviin liittyvät johtamis-, viestintä-, huolto- ja muut tukitoimet.

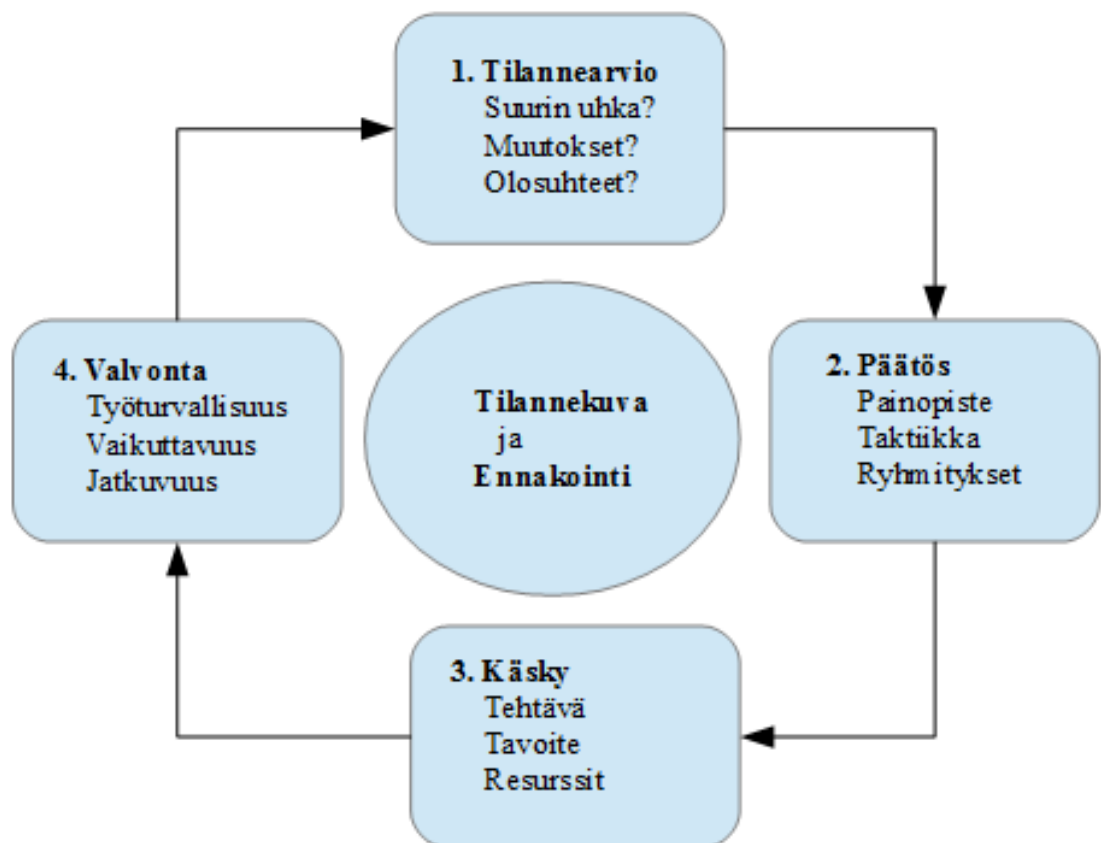
Pelastuslaki antaa edellä mainittujen tehtävien hoitamiseen varsin laajat toimivaltuudet pelastustoiminnan johtajalle. Mikäli tehtävän hoitaminen niin edellyttää, hän voi määrätä ihmisiä suojautumaan tai evakuoida ihmisiä ja omaisuutta onnettomuuspaikalta. Hänen sallitaan myös ryhtyä toimenpiteisiin, joista voi aiheutua omaisuusvahinkoja. Hän voi myös ottaa käyttöönsä toisen omaisuutta kuten viestivälineitä, elintarvikkeita ja polttoaineita. Lisäksi hänelle annetaan oikeus ryhtyä muihinkin pelastustoiminnassa tarpeellisiin toimenpiteisiin, kunhan toiminnan tavoitteena on ihmisten, omaisuuden ja ympäristön pelastaminen ja onnettomuuden vahinkojen vähentäminen. (Pelastuslaki 379/2011, 36 §.)

Pelastusopiston tutkimus- ja kehittämissyksikön julkaisema Pelastustoiminnan johtaminen -nimellä julkaistu johtamisopas kuvaa pelastustoiminnan johtajan yleiset tavoitteet seuraavasti. (Pelastusopisto 2005, 45):

- toiminnan nopea käynnistäminen
- käytössä olevien voimavarojen tarkoituksenmukainen jakaminen
- eri toimialojen, organisaatioiden ja yksiköiden yhteistoiminnan järjestely
- johtamisjärjestelmän selkeä ja yksinkertainen toimeenpano
- tilanteen ja operaatioiden seuranta sekä päätöksenteko.

Pelastustoiminnan johtajan tehtävänä kaikin käytettävissä olevin voimin ja tarpeen vaatiessa omia toimivaltuuksiaan apuna käyttäen johtaa toimintaa niin, että onnettomuus tai sen uhka saadaan torjuttua ja sen aiheuttamat vahingot minimoitua. Mikäli pelastustoimintaan osallistuu myös muita viranomaisia, voi pelastustoiminnan johtaja käyttää apunaan myös näiden muiden paikalla olevien viranomaisten valtuuksia niitä kuitenkin asianmukaisessa järjestyksessä käyttäen. (Pelastusopisto 2005, 45.)

Tehokkaan ja turvallisen pelastustoiminnan johtamisen edellytyksenä on hyvä tilannekuva onnettomuuden sen hetkisestä tilasta. Lisäksi tilanteen muutosten arvioiminen ja muutoksiin reagoiminen tarpeeksi etupainotteisesti kuuluvat hyvään johtamiseen. Mukailleen johtamisprosessin neliportaista kiertoa ja P3-kansion taktisia yleisperiaatteita pelastustoiminnan johtaminen tiivistyy seuraavaan kuvassa 2 esitettyyn kaavioon (Neuvonen, Honkanen, Lerssi ja Leppioja. 2007, 2)



Kuva 2. Pelastustoiminnan johtamisprosessi. (Mukailleen Neuvonen ym. 2007, 2.)

2.2 Vaaratilanne Vihtavuorella

Laukaan Vihtavuoren räjähdetehtaalla tapahtui räjähteisiin liittyvä vaaratilanne 9.7.2013. Myöhään illalla havaittiin räjähdetarastointialueella, että yksi prosessointia odottava emulsioräjähdetehtokontista savuaa. Savuava kontti aiheutti suuren evakuoimisoperaation, mutta ei lopulta räjähdystä. Kontista aiheutui ilmeinen räjähdysvaara, minkä vuoksi läheinen Vihtavuoren taajama evakuoitiin ihmisistä.

Tapaus on siinä mielessä mielenkiintoinen, että räjähdetehtokontin tilaa tiedusteltiin alkuvaiheessa UAV-multikopterilla ja videokameralla. Myöhemmin kontin kylkeen tehtiin reikä puolustusvoimien miehittämättömällä pomminpurkurobotilla. (Keski-Suomen pelastuslaitos, 2013.)

Yksityisen valokuvausta tarjoavan yrityksen kuvauskopteri reagoi pelastuslaitoksen pyyntöön ripeästi ja teki useita tiedustelulentoja vaara-alueelle. Ennakkotietojen mukaan alueella olevan räjähdysainemäärän suojaetäisyys on 350 metriä. Osa lennoista lennettiin yöllä hämärässä, mitä varten UAV:n kameroita ei ollut säädetty. Lennättäjä ohjasi lennot noin 380 metrin etäisyydeltä, mitä pidettiin turvallisena etäisyytenä maastonmuotojen takia. Tiedustelussa muun muassa selvisi, että räjähdetehtokontteja on alueella huomattavasti alkuperäistä tehtaan edustajalta tullutta tietoa enemmän. (Onnettomuustutkintakeskus 2014, 13.)

Vaaratilanteen jälkeen 9.9.2013 Jyväskylän Paviljongissa järjestetyssä palautetilaisuudessa kävi myös ilmi, että UAV-toiminnassa on vielä paljon etukäteissuunnittelua ja sopimuksia vaativia yksityiskohtia. Tilanteessa käytetyssä kopterissa ei esimerkiksi ollut mahdollisuutta videokuvan suoraan välittämiseen johtopaikalle, minkä vuoksi tiedustelun tulos eli videot siirrettiin johtopaikalle USB-muistitikulla. Siirrosta aiheutui turhaa viivettä. Lisäksi tiedostot olivat tilanteeseen nähden tarpeettoman suurikokoisia. Tiedostonsiirtotapa on selvästi yksi standardisoitava yksityiskohta nopean ja tehokkaan UAV-tiedustelun saavuttamiseksi. Samalla on sovittava materiaalin käyttöoikeuksista ja mahdollisesti toiminnassa syntyvän salassa pidettävän materiaalin hävittämisestä.

Kopterissa ei myöskään ollut mahdollisuutta infrapunakameralla, jolla mitata räjähdetehtokontin senhetkinen lämpötila turvallisen etäisyyden päästä. Pelastustoiminnan

johtaja piti lämpötilamittauksia erityisen tärkeinä, ja mittaukset jouduttiin tekemään pelastusparilla vain osittain maavallin suojaamana aiemmin määritetyn 350 metrin suoja-alueen sisältä. Lämpökameralla tehtyjen mittauksien jälkeen pelastustoiminnan johtaja päätti, ettei suoja-alueelle ei enää mennä. (Onnettomuustutkintakeskus 2014, 14.)

Lämpötilamittausten ja toistuvien UAV-tiedustelulentojen perusteella havaittiin, että räjähdetontin pintalämpötila on nousussa ja sen savu muuttumassa tummemmaksi. Suoja-aluetta laajennettiin myöhemmin 900 metriin. Suoja-alueelle sai mennä vain suojarusteissa. Tämän lisäksi määrättiin välittömän vaaran alueeksi 500 metriä, ja alueen sisälle menoa tuli välttää kaikissa tapauksissa. (Onnettomuustutkintakeskus 2014, 16.)

Seuraavana aamuna paikalle saatiin Puolustusvoimien virka-apuna räjähteiden raivaamiseen erikoistunut partio ja sen mukana telaketjuilla kulkeva kauko-ohjattava raivausroboti. Myöskään raivausrobotin kuvaa ei voitu välittää suoraan johtokeskukseen. Robotilla onnistuttiin kuitenkin tekemään lämpötilamittauksia pelastuslaitoksen lämpökameralla. Robotilla ammuttiin myös reikä vesi-impulssin avulla kuumenneen räjähdetontin yläosan ilmatilaan sen jäähdyttämiseksi. (Onnettomuustutkintakeskus 2014, 18 ja 19.)

Konttia päätettiin myös valella vesisuihkulla ulkopuolelta. Vesitykin vaatimat letkuselvitykset joutui tekemään suoja-asuun pukeutunut pioneeripari. Myöhemmin myös kontin sisälle päätettiin johtaa vettä läpilyöntisuihkuputkella robotin ampumasta reiästä. Tehtävä epäonnistui robotilta ilmeisesti vesisuihkun aiheuttaman näköhaitan vuoksi. Näin myös läpilyöntiputken pujottaminen jäi pioneerien itsensä tehtäväksi. (Onnettomuustutkintakeskus 2014, 19.)

Etäohjattavista laitteista oli siis selvästi apua vaaratilanteen hoitamisessa, mutta aivan täysin ongelmitta ne eivät tehtävästään vielä suoriutuneet. Hyvin pienin muutoksin lentolaitteesta olisi voitu saada enemmän irti pelastustoimintaan ja sen johtamiseen. Infrapunavideokamera olisi voinut tehdä tärkeät lämpötilamittaukset ilman, että henkilöiden olisi tarvinnut tunkeutua suoja-alueelle. Myös tiedustelukuvan välittäminen langattomasti johtopaikalle on teknisesti mahdollista. Myös pomminpurkurobotin onnistumisessa jäi vielä parannettavaa. Räjähdessäiliön kannen puhkaiseminen vesi-impulssilla epäonnistui, ja toiminnassa tuli muutoin ilmi harjoittelun ja yhteistyön

kautta poistuvia ongelmia. Viranomaisyhteistyötä tälläkin sektorilla kannattaa lisätä.

3 LAINSÄÄDÄNTÖ

UAV-toimintaan vaikuttavat useat eri säädökset, mutta keskityn tässä työssä ilmailumääräysten, pelastuslain ja työturvallisuuslain vaatimuksiin. Tarkastelen samalla pelastustoiminnan johtajan oikeuksia ja velvollisuuksia. Kuvaamisen rajoituksia julkisilla paikoilla ja kodeissa ei käsitellä, koska pelastusviranomaiselle tehtävän hoitamiseen liittyvä kuvaaminen on sallittua ja näin saatua kuvamateriaalia ei yleensä jaeta julkisesti. Jos pelastuslaitoksen omaan käyttöön kuvaamaa materiaalia julkaistaan, sen julkisuus arvioidaan aina tapauskohtaisesti.

3.1 Ilmailulaki

Voimassa oleva ilmailulaki on peräisin vuodelta 2009. Lisäksi siihen on tehty joitakin miehittämättömiä ilma-aluksia koskevia tarkennuksia vuonna 2013. Laki käsittelee kuitenkin pääasiassa miehitettyjä ilma-aluksia. Miehittämätön lentolaite ei useimmiten ole ilmailulain mukainen ilma-alus. Miehittämättömästä ilma-aluksesta tulee ilma-alus, jos se painaa yli 150 kg, lentää autonomisesti ilman suoraa näköyhteyttä lennättäjään tai jos se ei lennä omassa, muulta ilmaliikenteeltä suljetussa, ilmatilassa (Ilmailulaki 1194/2009, 6 §).

Yli 150 kg painoisen UAV:n lennättäminen vaatii aina Liikenteen turvallisuusviraston luvan miehitetyn lentotyön tavoin. Lisäksi tällainen lentolaite on rekisteröitävä Suomen ilma-alusrekisteriin kuten miehitetytkin ilma-alukset. (Ilmailulaki 1194/2009, 77 §.)

Alle 150 kg painaville miehittämättömille ilma-aluksille sallitaan poikkeuksia lentosäännöistä muulta ilmailulta kielletyllä alueella, kunhan muun lentotoiminnan turvallisuutta ei vaaranneta. Poikkeavaan toimintaan vaaditaan kuitenkin oma lupansa. (Ilmailulaki 1194/2009, 6 §.)

Vuonna 2009 kirjoitettu ja myöhemmin tarkennettu ilmailulaki ei tunne kevyitä autonomisesti lentäviä UAV-laitteita vielä riittävän hyvin. Lain tarkennuksissa annetaan kuitenkin mahdollisuus Liikenteen turvallisuusvirastolle (Trafi) oikeus antaa tarkempia ohjeita harrasteilmailuun liittyviin teknisiin ja toiminnallisiin sekä lentäjän taitoon, kokemukseen ja ikään liittyviin määräyksiin. Määräyksiä annettaessa on kuitenkin

kuultava valtakunnallisia harrastejärjestöjä. (Ilmailulaki 1194/2009, 6 §.)

Juuri edellä mainitut tarkemmat ohjeet ovatkin tätä kirjoittaessa lausuntokierroksella. Trafin määräysluonnos OPS 1M-23 lentotyöstä määrittelee tarkemmin lennokin, UAV:n ja ilma-aluksen eroavaisuudet sekä ansiolentämiseen liittyvät vaatimukset.

3.2 Määräys OPS M1-1: Lentosäännöt

Kaikkien siviili-ilmailijoiden on aina noudatettava Trafin lentosääntöjä ilmaillessaan Suomen alueella. Poikkeuksen muodostaa sotilasilmailu, sillä sitä varten on olemassa oma sotilasilmailuasetuksensa. Yleisten ilmailusääntöjen lisäksi on noudatettava joko näkölentosääntöjä tai mittarilentosääntöjä. Määräyksen on vuonna 2006 antanut silloinen Ilmailuhallinto, joka on nykyisin osa Liikenteen turvallisuusvirastoa Trafia. (OPS M1-1, 2.1 ja 2.2.)

Vastuu lentosääntöjen noudattamisesta on aina ilma-aluksen päälliköllä. Päällikön vastuu säilyy myös silloin, kun päällikkö itse ei ohjaa konetta. Ilma-aluksen päällikkö voi poiketa säännöistä, jos se on turvallisuuden vuoksi ehdottoman välttämätöntä. Huomioitavaa on, että myöhemmin esitettävä lentotyötä ohjaava määräysluonnos rinnastaa UAV:n ohjaajan tämän määräyksen ilma-aluksen ohjaajaan (OPS M1-1, 2.3.1).

Väistämissäännöt ilmailussa poikkeavat tieliikenteessä totutuista säännöistä. Ilmailun väistämissäännöt muistuttavat ehkä enemmän meriliikenteen sääntöjä. Väistämisvelvollisuus riippuu ilma-alusten korkeuserosta, niiden kohtaamissuunnista ja liikehtimiskyvystä. Lisäksi ilma-aluksen lennon vaihe tai sillä meneillään oleva pakko- tai vaaratilanne vaikuttaa väistämissääntöihin. Huomioitavaa kuitenkin on, että ilmailusäännökset eivät lainkaan tunne tieliikennelain hälytysajoneuvon tapaista etuajo-oikeutta. (OPS M1-1, 3.2.)

3.3 Määräysluonnos OPS M1-23: Lentotyö

Uusi Trafin julkaisema kansallinen kevyet etäohjattavat UAV-laitteet huomioiva määräys on tätä kirjoittaessa valmistelussa, joten se ei ole vielä lainvoimainen.

Lausuntokierroksella olevassa säännösluonnoksessa tehdään radio-ohjattavan lennokin ja UAV:n välille selvä ero. Harrastus- ja kilpailutarkoituksessa lennättäminen ja kuvaaminen omaan käyttöön tulevat edelleenkin olemaan sallittuja tietyin, lähinnä turvallisuuteen liittyvin rajoituksin. (OPS M1-23luonnos, 1.3.1.)

Vaikka pelastustoimen käytössä oleva UAV ei täyttäisikään ilma-aluksen määritelmää eikä sen ohjaaja siten olisi ilma-aluksen päällikkö, on sen ohjaajaa vastuussa lentosääntöjen noudattamis- ja vahingonkorvausvastuussaan verrattavissa ilma-aluksen päällikköön. Lisäksi velvollisuus tehdä kaikki mahdolliset toimenpiteet yhteentörmäyksen välttämiseksi on edelleen voimassa, vaikka ohjaaja ei lentolaitteessa istukaan. (OPS M1-23luonnos, 1.3.1.)

Radio-ohjattavan autonomiseen lentämiseen kykenevän lentolaitteen käyttäminen ansiotarkoituksessa on tulevaisuudessa selvästi tarkemmin säännösteltyä toimintaa kuten kaikki muukin ansiolentotoiminta. Määräysluonnos kuitenkin sallii UAV-ansiolentotoiminnan myös miehitetulle ilmaliikenteelle avoimessa ilmatilassa.

Ansiotarkoituksessa lennätettävältä UAV-laitteelta ja sen ohjaajalta vaaditaan määräysluonnoksen kohdassa 1.3.2 seuraavaa:

- UAV:n maksimi lentoonlähtömassa on 20 kilogrammaa.
- Lentäminen on tehtävä aina näköyhteydessä, joka vallitsevista olosuhteista riippumatta mahdollistaa ilmatilan tarkkailun näköyhteydellä ja muun ilmaliikenteen väistämisen.
- Ohjaajan tai häntä avustavan tähyistäjän on aina oltava alle 500 m etäisyydellä lentolaitteesta.
- Lennätyskorkeuden tulee olla alle 120 m ja minikorkeus tulee sovitaa niin, etteivät maassa olevat henkilöt tai omaisuus vahingoitu, eikä toiminnasta aiheudu meluhaittaa.
- Ohjaajan on oltava pätevä lentämään lentolaitetta ja sekä ohjaajan että tähyistäjän on oltava vähintään 18-vuotiaita.
- UAV:n on väistettävä kaikkia muita ilma-aluksia.
- UAV:n lennättäminen valvotussa ilmatilassa vaatii aina lennonjohdon luvan ja kaksisuuntaisen radioyhteyden lennonjohtoon.

Nämä vaatimukset ovat voimassa aina miehittämättömässä ansiolentotoiminnassa. Lisäksi radio-ohjainlaitteiston häiriötilanteiden varalta on täytyttävä seuraavat ehdot:

- Ohjaajalla on oltava käytössään jatkuva näyttölaite, josta hän näkee ohjaussignaalin voimakkuuden, ja ohjaajan on keskeytettävä lento, ennen kuin signaalin heikkeneminen johtaa ohjaushäiriöön tai signaalivoimakkuus näytön häiriöön.
- Jos ohjaajan ja UAV:n välimatkaa on jatkettu yli 500 m vaatimuksen lähemmäksi sijoittuneen tähystäjän avulla, on ohjaajan ja tähystäjän välillä oltava kaksi toisistaan riippumatonta viestiyhteyttä.
- Mikään yksittäinen ohjaus- ja valvontajärjestelmän yksittäinen vika ei saa estää ohjaamista.
- Ohjaus- ja valvontayhteys on suojattava sähkömagneettisilta häiriöiltä.
- Mikäli ohjainjärjestelmä jostain syystä pettää, on laitteistossa oltava lennon hallitusti keskeyttävä ominaisuus.
- Mikäli lentoonlähtöpaino on yli 5 kg, on UAV:ssä oltava automaattinen törmäysenergiaa vähentävä ominaisuus ja sen on tuotettava häiriön ajan varoitusääntä.

Edellä olevien vaatimusten lisäksi tavanomaisessa ilmakehässä UAV:n lennättäminen asutuskeskuksen tiheästi asuttujen osien tai ulkosalle kokoontuneen väkijoukon läheisyydessä alle 150 m etäisyydellä on kiellettyä. Myös UAV:n lennättäminen yöllä on kielletty. Näistä kahdesta viimeisimmästä vaatimuksista voidaan kuitenkin poiketa, mikäli UAV lentää viranomaistehtävässä poliisin, tullin, pelastuslaitoksen tai rajavartiolaitoksen tehtävässä. (OPS M1-23 1.3.2.8 ja 9.)

Erillisellä Trafín myöntämällä luvalla on mahdollista ylittää ainakin suurin sallittu lentokorkeus. Lisäksi voidaan sallia muita poikkeuksia edellä lueteltuihin vaatimuksiin. Aivan täyttä varmuutta erillisellä luvalla saataviin poikkeuksiin ei ole, koska määräsluonnoksen viitteet eivät ole vielä lopullisia. (OPS M1-23 1.3.3 ja 6.1.)

Mielestäni määräsluonnoksen vaatimukset lisäävät toiminnan turvallisuutta. Samalla ne selkeyttävät tällä hetkellä UAV-alalla vallitsevaa epätietoisuutta ja kannustavat ilmakehässä myyviä yrityksiä panostamaan toiminnan turvallisuuteen. Pelastustoiminnan johtamisen tukemista UAV:llä edellä asetetut rajoitteet etäisyyksistä

ja korkeuksista eivät estä. Pelastustehtävät tapahtuvat usein rajatulla alueella ja ovat luonteeltaan staattisia.

3.4 Työturvallisuus

Pelastustoiminnassa on aina noudatettava työturvallisuuslakia. Voimassa oleva työturvallisuuslaki pyrkii ennaltaehkäisemään ja torjumaan työtaturmia, ammattitautteja sekä työstä ja työympäristöstä aiheutuvia terveyshaittoja. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 1 §.)

Laki velvoittaa kaikkia virkasuhteisia tai siihen verrattavissa olevia palvelussuhteita. Pelastustoimintaan saattaa osallistua myös henkilöitä, jotka eivät ole suorassa virkasuhteessa, kuten työharjoittelua suorittavat oppilaat, kohteen toiminnanharjoittajan asiantuntijat, ostopalvelua tuottavia henkilöt tai vaikkapa varusmiehet, mutta Työturvallisuuslaki koskee myös heitä. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 3 - 4 §.)

Pelastustoimintaa avustamaan voidaan myös pelastustoiminnanjohtajan toimivallalla määrätä pelastuslain 37 § mukaisesti tehtävään työkykyinen henkilö. Pelastustoimintaan on mahdollista osallistua myös vapaaehtoisesti ja omasta halusta. Pelastustoiminnan johtajan on huolehdittava myös heidän turvallisuudestaan onnettomuuspaikalla. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 55 §.)

Pelastustoimintaan liittyy useita vaaratekijöitä, ja kaikkia niistä ei voida poistaa työn etukäteissuunnittelulla. Haitta- ja vaaratekijöinä voidaan ainakin pitää onnettomuustilanteiden yllätyksellisyyttä, tehtävän kiireellisyyttä, hankalia työaikoja ja keliolosuhteita, huonoa valaistusta ja onnettomuuspaikalla usein vallitsevaa melua.

Pelastustoiminta onkin usein erityistä vaaraa aiheuttavaa työtä, johon työntekijä on etukäteen koulutettava ja johon hänen tulee olla pätevä. Pelastustoiminnan kelpoisuusvaatimukset ovatkin siksi tiukat. Samasta syystä sivullisten henkilöiden pääsy vaara-alueelle on estettävä. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 11 §.)

Pelastustoimintaan osallistuvalla palokuntalaisella on aina annettu työturvallisuuslain 14 ja 15 § mukainen riittävä koulutus ja hänelle on pelastuslaitoksen puolesta varattu

tehtävään tarvittavat suojarusteet ja henkilösuojaimet. Työntekijä on puolestaan velvollinen noudattamaan saamiaan määräyksiä ja ohjeita. Työntekijän tulee tehdä työnsä turvallisella tavalla sekä itsensä että toisten työntekijöiden turvallisuuden kannalta. Pelastustoiminnan johtajan on siis osaltaan huolehdittava, että hänen määräämänsä tehtävät voidaan suorittaa turvallisesti. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 18 §.)

Pelastustoiminnan johtajan on myös työterveyslain tarkoittamana työnantajan edustajana jatkuvasti tarkkailtava työympäristöä, työyhteisön tilaa ja työtapojen turvallisuutta. Hänen on myös varauduttava yllättäviin työturvallisuutta vaarantaviin muutoksiin ja reagoitava niihin viipymättä. (Työturvallisuuslaki 738/2002, 8 §.)

UAV:n tuottama ilmakehä onnettomuuspaikalta voi auttaa suuresti pelastustoiminnan johtajaa tekemään oikeita ja turvallisia päätöksiä pelastustoimintaa aloittaessa. Lisäksi UAV:n avulla pelastustoiminnan johtaja voi nopeasti tarkistaa onnettomuuskohteen muutokset aika ajoin ja siten varmistaa turvallisen työskentelyn. Määräajoin tehdyllä tarkkailulennolla pelastustoiminnan johtaja voi myös havaita vaaratilanneuhan ajoissa, ennen sen toteutumista.

Lentävän UAV:n käyttäminen tavanomaisella onnettomuuspaikalla ei vaadi suuria lisäjärjestelyjä työturvallisuuslain edellyttämän onnettomuuden ennaltaehkäisyn kannalta. Onnettomuuspaikalla on kypärin ja sammutusasuin varustautuneita palomiehiä, ja sivullisten henkilöiden pääsy paikalle on jo estetty. Kevyt, alle viiden kilogramman painoinen UAV ei aiheuta heille kohtuutonta vaaraa edes virhetoiminnan seurauksena.

Pelastuslaitoksen ulkopuoliselle ja pelastustoiminnan etenemistä maksusta kuvaavalle UAV-ohjaajalle on kuitenkin kerrottava onnettomuuspaikalla vallitsevat vaarat. Alaan tottumaton henkilö ei esimerkiksi osaa mieltää paineellisen letkun rikkoontumisen aiheuttamaa vaaraa. Lisäksi UAV:n lento- ja laskeutumiseen on varattava oma, muusta toiminnasta rauhoitettu alueensa.

4 OPINNÄYTTEESSÄ RAKENNETUT UAV:T

Opinnäytetyöprosessin aikana rakennettiin kaksi prototyyppilaitetta, joilla selvitettiin laitteiden vaatimuksia ja kerrytettiin suunnittelu- ja käyttökokemusta UAV-toiminnasta. Lisäksi useita erimerkkisiä videokameroita lennätettiin useassa eri lennoksissa tällä hetkellä markkinoilta soveltuvimpien löytämiseksi.

Kiinteäsiipiselle koneelle on tyypillistä, että sen on jatkuvasti edettävä ilmassa pysyäkseen ilmassa ja ollakseen ohjattavissa. Koelentoilla keskityttiin jatkuvan eteenpäin liikkeen aiheuttamiin ongelmiin sekä koneen suuremman koon etuihin ja haittoihin.

Pyöriväsiipisen lentolaitteen kohdalla työ pyrkii kuvaamaan juuri multikoptereille tunnusmaisesti eri komponenttien valinnan vaikutuksia lopullisen kopterin suorituskykyyn. Tutkimuksessa rakennetut UAV:t ovat yhteiskuvasta lennättäjän käyttämän radio-ohjaimen kanssa kuvassa 3.



Kuva 3. Työssä käytetyt UAV-laitteet.

4.1 Kiinteäsiipinen lentolaite ”Läpsykkä”

Ensimmäiset kuvauslennot opinnäytettä silmällä pitäen tehtiin jo vuoden 2011 heinäkuussa. Lennot tehtiin kiinteäsiipisellä EPP FPV-koneella. Koneen kärkiväli on 180 cm, lentoaika noin 45 minuuttia ja lentopaino noin 1,8 - 2,5 kg. Kiinteäsiipinen konetyyppi on tarkoitettu jo alun perin kuvauskäyttöön. Kuvauskäyttöön rakenne soveltuu työntöpotkurinsa ja ylätasaisuutensa johdosta. Kone varustettiin Ardupilot 1.4 -autopilotilla ja FlyCamOne 720p -videokameralla sekä siihen kuuluvalla 5,8 GHz 25mW:n videolinkillä. Muutamalla lennolla mukana oli myös Canon Ixus still -kamera, etäohjauksen mahdollistavalla CHDK -ohjelmistolla muokattuna.

Rakensin lisäksi koneesta osiin purettavan, jotta se mahtuu kuljetuskunnossa takaisin myyntipakkaukseensa. Kuljetuskunnossa kone vei tilaa 90x30x25 cm. Se oli vielä varsin suurikokoinen esimerkiksi johtoautoissa kuljetettavaksi, mutta prototyypikelpoinen. Lentokunnossa kone mahtui juuri ja juuri Toyota Hilux Crew Cab -miehistöauton tavaratilaan. Vastaava kone on mahdollista pakata pienempäänkin tilaan. Kone peri lentoakkunsa jo käytöstä poistetusta vaativasta puhallinlennokkikäytössä olleesta akusta. Koneen lentoaika on mahdollista nostaa tuntiin muutaman kymmenen euron sijoituksella. Prototyypin koelentoja kulunut akku ei kuitenkaan haitannut.

Kone on pääasiallisesti EPP-vaahtoa, jota on tuettu hiilikuituputkillla. Rakenne kestää hyvin törmäyksiä. Materiaali on kuitenkin joustavaa suurilla lentonopeuksilla. Koneen suunnittelija ei ole todennäköisesti koskaan lennättänyt luomustaan, sillä koneen suuntavakavuus oli hyvin marginaalinen. Koneen sivuvakainpinta-ala oli aivan liian pieni. Suurentamalla sivuvakainta ja jäykistämällä runkoa koneesta saa kuitenkin välttävän kuvauskoneaihion. Markkinoilta löytyy tosin parempiakin vaihtoehtoja, kuten harrastuspiireissä hyvin suosituksi nousseet Skywalker tai sitä hieman pienempi Easyglider.

CCD-kameroiden kuvakennot ja pyörivät potkurit sopivat huonosti yhteen, joten kuvauskäytössä kameralle on järjestettävä laaja potkuriton katselusektori. Työntöpotkuri tai siipiin kiinnitetty kaksimoottorirakenne vapauttavat tilaa koneen keulaan, josta on helppo järjestää kameralle esteetön 180° katselukulma. Hieman vaativampi, mutta kuvausalaltaan huomattavasti parempi tapa on kameran sijoittaminen rungon alle

ympäri pyörivään koteloon. Kamera on kuitenkin silloin suojattava laskutilanteissa esimerkiksi rungon sisään suojaan vedettävällä kamerahissillä.

Testilennot kesällä 2011 tein kesämökillä. Lento-ohjelma tehtiin marjapelloilta noin 1000 m varsinaiselta kuvauspaikalta. Lento-ohjelma tehtiin kädestä heittämällä mustaherukkapensaiden välistä ja sähkölinjan alta. Laskeutuminen tehtiin samaan paikkaan juuri ja juuri auton levyiselle mökkitielle. Kuvausalueen korkea puusto tekee lento-ohjelmien niemen kärjessä mahdottomaksi ja haittaa näkyvyyttä. Lähtö- ja kuvausalueiden puolesta välissä sijaitsevaa hakkuuaukeaa ei tarkoituksella käytetty lento-ohjelmaan. Koelentoja tuli koelentopäivinä yhteensä neljä. Kaksi lentoa suoritettiin poutasäällä ja kaksi lentoa vesisateessa. Tehtävänä oli tiedustella onnettomuusalue niemen kärjessä.

4.1.1 Lentotehtävä 1

Ensimmäisellä lennolla lennättäjä käveli koneensa perässä kuvauspaikalle ja takaisin. Kone ajettiin videolinkin luotettavan kantaman rajalle noin 300 m päähän lennättäjästä noin 100 m korkeuteen ja autopilotti asetettiin lentotilaan Loiter. Videolähtimen antenni oli alkuperäinen ympärisäteilevä 2-3 dBi kumipatukka-antenni. Kun lennättäjä pääsi koneen lähelle, ajettiin konetta taas lähemmäs kuvausaluetta, kunnes autopilotti asetettiin taas odotukseen.

Loiter-lentotilassa lennättäjällä ei ollut UAV-laiteeseen jatkuvaa näköyhteyttä vaan kone oli autopilotin hallinnassa. Myös 5,8 GHz videolinkki oli välillä lukukelvoton tiheän kuusikon vuoksi. Kuvauspaikan lähtöalueen välimatkan ollessa 1000 m välille tarvittiin kaksi Loiter-tilaa lennättäjän kävellessä toisen odotuskohdan alitse suoraan kuvausalueelle. Paluumatka laskualueelle lennätettiin samalla menetelmällä.

Menetelmä toimii hyvin, mutta siirtymä kävellessä koneen perässä syö koneen tehokasta kuvausaikaa. Laskennallisesti edestakainen 2000 m kävely vie 4 km/h kävelynopeudella 30 minuuttia. Käytetyllä akulla koneen luotettava lentoaika on noin 45 minuuttia. Pitkä siirtyminen koneen perässä kävellessä on tehotonta.

Todellisessa tilanteessa lento-önlähtö olisi tehty kapealta mökkitieltä huomattavasti lähempää. Laskeutuminen olisi tehty hakkuuaukealle korkeaan taimikkoon ja mahdolliset vauriot olisi korjattu jälkikäteen. Korjaamiskulut olisivat olleet korkeintaan joitain kymmeniä euroja.

4.1.2 Lentotehtävä 2

Tehtävänanto oli identtinen, kuten myös lentosää. Lento tehtiin samana päivänä lyhyen lataustauon jälkeen. Erona ensimmäiseen tehtävään oli se, että lennättäjän siirtymään oli käytössä mönkijä.

Siirtyminen kuvausalueelle tapahtui kuten edellä kahdella Loiter-odotuskaaviolla. Siirtymäaika lyheni kävellen suoritetusta noin 15 minuutista alle viiteen minuuttiin. Mönkijän käytöllä koneen tehokas kuvausaika kohteessa siis kaksinkertaistui.

Paluumatkalla kokeiltiin odotuskaavioiden jättämistä kokonaan pois ja kone suunnattiin videokuvan perusteella karkeasti kohti lähtöpaikkaa Stabilize-lentotilassa. Matkalento vaati kuitenkin hieman suunnan korjailua käsin. Mönkijän polttoainetankin päälle sijoitettuna ohjain on hyvin epätarkka ja koneen ohjaaminen röykkyisellä tiellä vaikeaa. Videolinkki oli ajon aikana pääosin lukukelvoton huonon vastaanotinantennin suuntauksen vuoksi. Koneen ohjaamisen lisäksi oli keskityttävä myös mönkijän tiellä pitämiseen.

Kone etenee tyynessä varsin nopeasti (noin 60 km/h), ja jäin mönkijällä huomattavasti siitä jälkeen. Videolta jälkikäteen tarkasteltuna kone oli jo 300 m ohi laskeutumispaikan, kun tulin mönkijällä laskualueen reunaan. Alemman autonomian lentotilat eivät missään nimessä ole suositeltavia lentotiloja, mikäli lennättäjän on hallittava samanaikaisesti myös maakulkuneuvoa.

Suosittelavin tapa palata takaisin lähtöpaikkaan on antaa autopilotin hoitaa suunnistaminen RTL-lentotilassa. Tämä Return To Launch -lentotila on täysin autonominen. Se ohjaa koneen ennalta määrätyllä vakiokorkeudella takaisin paikkaan, jossa laitteen GPS on viimeksi käynnistetty. Lähtöpaikkansa saavutettuaan se kytkeytyy automaattisesti Loiter-lentotilaan ja jää kiinteäsiipisen lentolaitteen tapauksessa

kaartelevaan vakiokorkeudella paikalle, kunnes se ohjataan alas tai ajoakku tyhjenee lopullisesti.

4.1.3 Lentotehtävä 3

Sama lentotehtävä lennettiin myös kovassa vesisateessa (Kuva 4). Heti lentoalähdön jälkeen kävi selväksi, että lentotehtävä on mahdollista lentää, mutta 5,8 GHz videolinkki kärsi ilmankosteudesta ja sen kantama puolittui. Myös kameran videokuvan kantama ja yksityiskohtien erottuvuus oli huono. Kameran linssiin osuvat vesipisarat heikensivät kuvaa kuitenkin vain hetkellisesti. Kiinteäsiipinen UAV etenee ilmassa jatkuvasti ja viima puhdistaa linssin nopeasti. Pyöriväsiipisessä lentolaitteessa tätä etua ei ole.



Kuva 4. Kuvankaappaus sateiselta lennolta. Vesipisarat näkyvät keskellä harmaina juovina. Laskualue on kuvan oikeassa reunassa.

Tehtävässä onnistuminen oli mahdollista, mutta lentokorkeutta oli rajoitettava. Lisäksi Loiter- lentotilaan oli mentävä huomattavasti useammin ja lennättäjän ja UAV:n välimatka oli pidettävä huomattavasti lyhyempänä.

Lentoa ei lopulta lennetty loppuun nämä asiat havaittuani, vaan päätin kokeilla simuloida radiohäiriötä. Lentotehtävän alkuvaiheessa siirtymäosuudella sammutin

radio-ohjaimen virrat. Kone toimi kuten se on ennalta käsketty tehdä ja kytkeytyi RTL-lentotilaan. Tämän jälkeen se hakeutui mahdollisimman nopeasti 50 m lentokorkeudelle ja suuntasi takaisin lähtöpaikalle.

Suunnistaminen RTL-tilassa oli varsin ontuvaa huonosti asetettujen PID-säätimen suunnistusarvojen takia, mutta parin minuutin hakemisen jälkeen kone kaarteli lähtöpaikan päällä ja odotteli lisäohjeita. Kytkin lähettimen virrat takaisin ja laskeuduin manuaalisesti kuten aina. Ardupilot mahdollistaa myös automaattisen laskeutumisen, mutta tiedän suoriutuvani ahtaassa paikassa sitä paremmin, sitä ei tässä työssä kokeiltu.

RTL-lentotila on ehdottomasti kytkettävä kaikkien UAV-lentolaitteiden autopilotin Fail-Safe tilaksi. Mikäli radioyhteys koneen ja lennättäjän välillä katkeaa, palaa kone lähtöpisteeseen, se ei esimerkiksi jää vaakalentoan sattumanvaraiseen suuntaan niin kauaksi aikaa kuin virtaa riittää.

Tämä itsestäänselvältä tuntuva asia ei tunnu olevan tiedossa kaikilla laitevalmistajillakaan, sillä esimerkiksi Itä-Lapin ammattiopiston Infotron- UAV on radiohäiriötilanteessa sammuttanut moottorinsa ja pudonnut pystysuoraan taivaalta. Tämä tuli esille keskustelussa Itä-Lapin ammattiopiston UAV-koulutuksessa viranomaisille Kemijärvellä syksyllä 2012.

RTL-ominaisuus on myös huomioitava kaikessa UAV-toiminnassa, sillä mikäli lennolla tapahtuu radiohäiriö, kone palaa suorinta tietä lähtöpaikalle. Paluureitin korkeus on syytä asettaa riittävän korkealle ja lentämistä tätä korkeutta korkeampien esteiden, kuten mastojen taakse tulee välttää.

4.1.4 Lentotehtävä 4

Tehtävä oli sama kuin edellä, mutta säätilana tällä kertaa oli heikko tihkusade ja sumuinen sää. Kameraa sumu haittasi jopa enemmän kuin reilu vesisade. Sumu tiivistyy kameran linssiin, ja pienet pisarat eivät pyyhkiydy viiman mukana. Ne poistuvat linssistä vasta, kun ovat ensin kasaantuneet isommaksi pisaraksi. Ongelmaan voisi löytyä ratkaisu autojen tuulilaseihin tarkoitetuista vahoista. Vahausta ei kuitenkaan tässä yhteydessä kokeiltu. Toinen ainakin sotilaslentokoneissa käytetty keino on voimakas

ilmapuhallus puhtaana pidettävän pinnan yli.

Koneeseen ei tehty muutoksia edellisen sateisen lennon jäljiltä, mutta maa-aseman videolinkin vastaanotinantennin vaihdoin suuntaavampaan malliin. Kokeessa käytetty suurempi 23 dBi patch-antenni osoittautui liian kapeaksi suunnattavaksi lennättäjän vartaloliikkeillä. Muissa kokeissa videota vastaanottanut 13 dBi lisää kantamaa huomattavasti verrattuna alkuperäiseen 3 dBi kumipatukka-antenniin, mutta on kuitenkin 33 asteen keilallaan riittävän epätarkka suunnattava lennätyksen ohessa vartalolla. Antenni oli suunnattu lennättäjän radio-ohjaimen alle hieman yläviistoon, joten sivusuuntainen kohdistus tulee miltei luonnostaan, kun lennättäjä kääntyy UAV:tä kohti.

Huomattavasti edellä mainittuja suuntaavampi ja fyysisesti isompi 23 dBi antenni lisää kyllä videolinkin kantamaa kaikissa olosuhteissa, mutta vaatii jo varsin tarkkaa suuntaamista kohti lentolaitetta. Valmistajan ilmoittama tehokas antennikeila on 10 astetta sekä vaaka- että pystysuunnassa.

Näin vahvasti suuntaavat antennit tarvitsevat aktiivista antennin suuntausta. Vahvasti suuntaavalla antennilla maa-aseman taakse muodostuu myös sokean alue, jota on paras torjua kahdennetulla vastaanottimella.

Ihanteellisessa maa-asemassa onkin kaksi antennia, joista toinen on automaattisella suuntaimella varustettu ja voimakkaasti suuntaava ja toinen matalan antennivahvistuksen ympärisäteilevä antenni. Vastaanotinten lisäksi tarvitaan vielä elektroniikka, joka valitsee kahdesta tulosignaalista kullakin hetkellä paremman ja jakaa sen eteenpäin halutuille näytöille ja tallentimille. Paras kuvanlaatu saadaan aina suoraan lentävän kameran muistikortilta, mutta sen toimittamiseen johtopaikalle syntyy viivettä. Johtamistoiminnan pohjaksi riittävän hyvälaatuinen kuva saadaan ylimääräisellä videovastaanottimella ja kuvankaappauksen mahdollistavalla ohjelmalla. Videolinkillä johtopaikalle toimitettu kuva on viiveetön.

Näiden varhaisten koelentojen jälkeen kiinteäsiipisen koneen kehitystyö keskittyi lähinnä kuvan vakautuksen ja videolinkin kuvanlaadun parantamiseen. Valittu lentolaite huteralla ohjaustuntumallaan tuntui olevan suurin este vakaalle etenemiselle pyörteisessä säässä. Varsin pian edellä mainittujen testilentojen jälkeen siirryinkin

taustatiedon keräämiseen multikoptereista.

Havainnot kiinteäsiipisen lentolaitteen testeistä:

- Käveleminen koneen perässä syö paljon tehokasta lentoaikaa tiedustelulta.
- Mönkijä nopeuttaa siirtymistä, mutta vaatii korkeamman autonomia-asteen lentotiloja UAV:lta.
- Vesisade ei juuri haittaa UAV-lentämistä.
- Vesisumu rajoittaa tuntuvasti videolinkin kantamaa ja haittaa kameran näkyvyyttä.
- Mahdollinen radio-ohjaimen häiriö ja siitä seuraava RTL-lentotila tulee aina huomioida lentotoiminnassa.
- Suuren suuntaavuuden antennit vaativat aktiivisen antennisuuntaimen käyttöä.

4.2 Pyöriväsiipinen lentolaite ”Proto”

Osa opinnäytettä oli rakentaa prototyyppikopteri ja käyttää sitä UAV-kokemuksen saamiseksi. Alkuperäinen tavoite integroida kopteri hälytystoimintaan pelastustoimen johtamisen ohessa oli liian optimistinen. Lentotoimintaa harjoitusolosuhteissakin kertyi niukalti. Kopteri kyllä lensi paljon - satoja lyhyitä trimmauslentoja ja kymmeniä pidempiä kuvauslentoja.

Autopilotti ei saavuttanut mielessäni siltä vaadittavaa luotettavuutta, jotta olisin ottanut laitteen mukaan onnettomuuspaikoille. Myös erääseen suuronnettomuusharjoitukseen suunnitellut UAV-tiedustelulennot peruuntuivat tehdasympäristön poikkeuksellisen vaativuuden ja kopterin testaamattomuuden vuoksi. Liitteessä 3 on kuitenkin teollisuuden edustajia varten laadittu harjoitussuunnitelma.

Tutkimusta varten rakennettu Proto-kopteri on nelimoottorinen niin sanottu quadro-kopteri (Ks. kuva 5). Sen komponentit on koottu maailmalta eri lähteistä. Toimintaa aloittaessa kaupallisia valmiita paketteja ei ollut saatavilla tai niitä ei voinut pitää kelvollisina tehtävään. Tätä kirjoittaessa esimerkiksi kaupallinen DJI Phantom 2 on ominaisuuksiltaan lähellä Proto-kopteria, mutta pienempi ja kuormauskyvyltään rajoittuneempi. Oranssina näkyvä kamera kuvaa eteenpäin. Kameran päällä on videolähetin ja sen patukka-antenni. Ajoakku oli vielä tässä vaiheessa alimpana. Myös

laskutelineet vaihtuivat pian korkeampiin.



Kuva 5. Proto-kopteri varhaisessa muodossaan keväällä 2012.

Proto-kopteri on nelimoottorinen, sillä se on yksinkertaisin konfiguraatio, joka ei tarvitse servo-ohjattua moottorin kääntömekanismia. Nelimoottorinen kopteri koostuu kahdesta vastakkain pyörivästä potkuriparista, jotka kumoavat toistensa vääntömomentit. Quadro-kopteri ei kuitenkaan kestä edes hetkittäistä moottorin tai potkurin vikaantumista, vaan menettää hallittavuutensa heti ja putoaa maahan saakka.

Kahdesta runkokonfiguraatiosta valinta osui X-tyyppiin, koska tällöin kameran kuvaussuuntaan eteen ei tarvita runkopuomia. Toinen vaihtoehto, tyypiltään +, on ehkä lentoasennoltaan ehkä hieman helpompi hahmottaa, mutta yksi moottoreista on kameran edessä ja saattaa rajoittaa kameran kuvakulmaa. Hahmotusongelmaa korjasin asentamalla puomeihin värilliset purjehdusvalot. Valaistulla kopterilla voi lentää myös täysin pimeässä, tosin Proto-kopterin kamerat eivät pysty silloin tuottamaan aidosti hyödyllistä informaatiota.

Kahden lisämoottorin tuoma vikasietoisuus puoltaa kuusimoottorisen niin sanotun heksa-kopterin hankintaa. Yleisesti ottaen heksakopteri kestää yhden moottorin vikaantumisen säilyttäen vielä alentuneen hallittavuuden ja vakauden. Kuusimoottorisuus ei monimutkaista tekniikkaa liikaa, ja pidän sitä optimiratkaisuna.

4.2.1 Runko

Protokopterin runkona toimi halpa rakennussarja Talon Quadcopter V2. Hankin ensin Talon-kopterin ensimmäisen version, mutta en pitänyt sen rakennetta riittävän tukevana koelentoihin. V2-runko on moduulirakenteinen, kevyt ja yksinkertainen. Se on myös helposti muokattavissa, sillä se sisältää vain kopterirungon keskeisimmät osat.

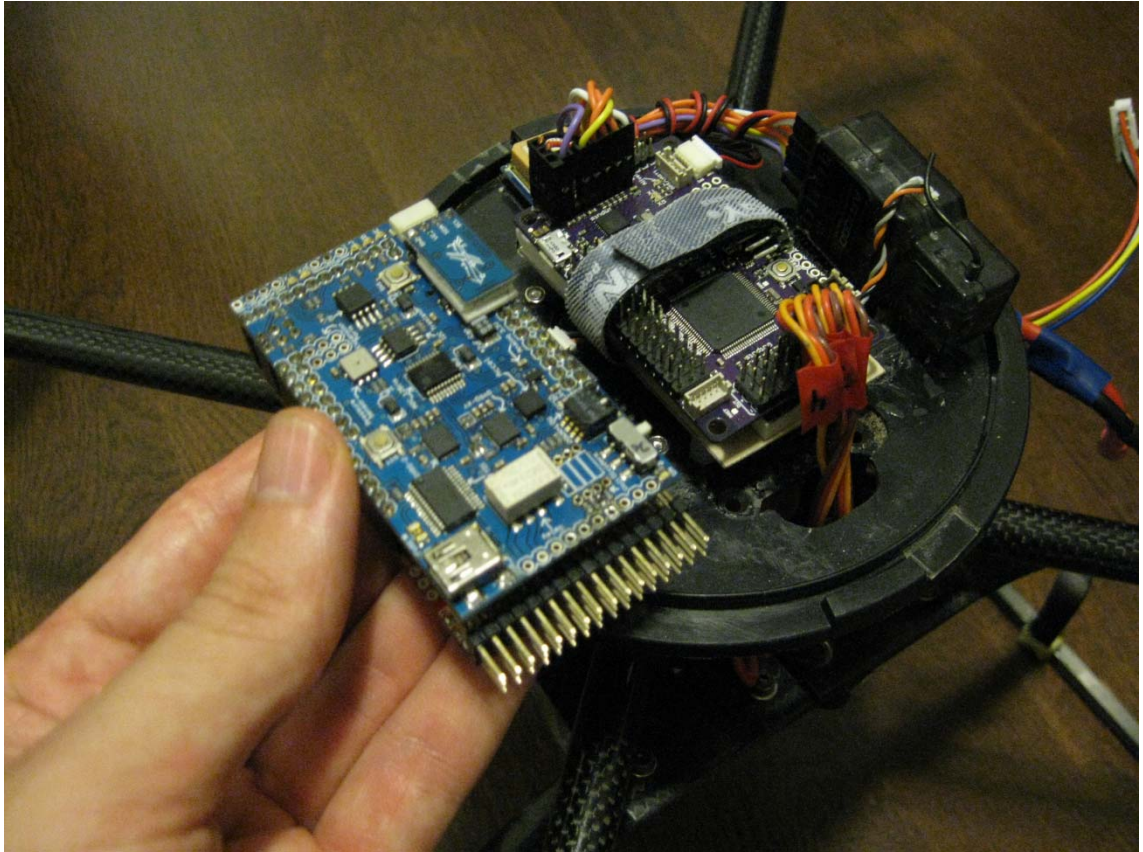
Runko koostuu yksinkertaisesti hiilikuituisista runkolevyistä ja runkopuomeista sekä koneistetuista alumiiniosista. Pian rungon hankinnan jälkeen hankin toisen rungon ja kasan keskeisiä osia varaosiksi. Ne osoittautuivatkin myöhemmin tarpeellisiksi. Varaosilla on muun muassa laajennettu runkoa, jotta kaikki tarvittava tekniikka on saatu kiinnitettyä riittävän tukevasti kopteriin. Osia on jouduttu myös vaihtamaan maahansyöksyjen jälkeen. Kopteriin on saatava varaosia, sillä ilman niitä se ei kauaa lennä.

Soveltuva kopterirunko on

- neli- tai kuusiroottorinen
- kevyt ja jäykkä
- rakenteeltaan modulaarinen ja helposti laajennettavissa
- sen jatkuvuus on turvattu ja siihen on helposti saatavilla varaosia.

4.2.2 Autopilotti

Autopilotiksi valikoitui aluksi Ardupilot V1.4. Myöhemmin laite päivittyi versioon 2.5, lähinnä paremman paineanturin resoluution vuoksi. Ardupilot on harrastelijoiden yhdessä tekemä kokonaisuus, johon kuka vain voin ohjelmoida omia koodinpätkiään, toisin sanoen avoimen lähdekoodin projekti. Kuvassa 6 ovat tutkimuksessa käytetyt autopilotin kehitysversiot.



Kuva 6. Autopilottin kehitysversiot yhteiskuvassa

Ominaisuuksiltaan autopilotti on huomattavasti ammattilaislaitteita suppeampi, mutta se riittää koekäyttöön. Ardupilottin tutkimuskäytössä suuri ongelma lienee sen nopea kehitystahti, uusia ominaisuuksia kehitetään useassa ryhmässä ympäri maailman ja käyttöohjeistus seuraa aina hieman jäljessä. Törmäsinkin jatkuvasti ominaisuuksiin, joita ei käsitelty ohjeistuksessa mitenkään.

Kehitysvauhtia voi kuvailla vaikka niin, että protoni aikana lentävä autopilotti elektroniikka eli ”rauta” kävi läpi kuusi suurempaa muutosta, uusia maa-aseman ohjelmisto versioita tuli noin kymmenen ja autopilottin firmware-ohjelmistoja jo useita kymmeniä. Yritin aluksi pitää ohjelmistoversioni aina uusimmassa versiossa, mutta huomasin pian, ettei se onnistu. Pitäydyin myöhemmin versiossa, johon ohjeita oli jo saatavilla. Projekti on myös vaihtanut nimensä ja tunnetaan nykyisin nimellä ArduCopter.

Autopilotti saa informaatiota kolmelta kiihtyvyyssanturilta, joilla se aistii kiihtyvyyksiä pituus-, leveys- ja pystysuunnissa. Suoraviivaisen kiihtyvyyden lisäksi kiihtyvyyttä mitataan myös kaikkien kolmen pyörähdys akselin suuntaan. Kuuden kiihtyvyystiedon lisäksi autopilotti tarvitsee myös paikkatiedon, jota toimittaa pieni GPS-anturi sekä

suuntatietoa magneettiselta kompassilta. Kaiken tämän lisäksi kopterin korkeutta mitataan ilmanpaineanturilla, koska GPS on korkeussuunnassa liian epätarkka.

Kiihtyvyyssantureiden vuoksi autopilottia ei voi kiinnittää kopterin runkoon jäykästi. Proto-kopterissa tärinää vaimennettiin usealla eri kiinnitysmateriaalilla. Autopilotin alla oli joustava vanerilevy, johon lisäksi vaahtomuovipalat vaimentimiksi. Vaahtomuovin päällä oli vielä tarrakiinnitys, joka paitsi vähentää tärinää myös suojaa elektroniikkaa maahansyöksyssä. Autopilotille tulevien johtojen tulee olla riittävän taipuisia, jotta ne eivät kuljeta tärinöitä muutoin hyvin suojatuille antureille. Autopilotin on kuitenkin joka tilanteessa käännyttävä rungon mukana, koska kaikki lennonvakautus perustuu sen asentotietoon.

Autopilotti on varustettu myös GPS-antennilla, jolle on järjestettävä jatkuva näkyvyys taivaalle. GPS-antennin päällä ei saa olla metallisia tai hiilikuituisia esineitä. Sama sähköjohtamaton rakenne on ympäröitävä myös pieniä 2,4 GHz radio-ohjaimen antennia. Kannen läpinäkyvyydestä myös on huomattavasti etua, sillä autopilotin tila ilmaistaan muutamalla merkkivalolla, joita joutuu tarkkailemaan lähes jatkuvasti. Proto-kopterin elektroniikan kotelona toimi CD-levyjen niin sanottu cake-box -muovikotelo.

Autopilotin paineanturille on järjestettävä myös mahdollisimman häiriötön mittausympäristö. Kopterin rungon on siis oltava riittävän epätiivis ilmapainevaihteluiden tasaantumisen vuoksi, mutta kuitenkin riittävän vesitiivis. Lisäksi ilmassa liikkuva kopteri ei saa kerätä patopainetta rungon sisään aiheuttaen mittavirhettä. Esimerkiksi rungon alapinnalla olevia läpivientejä on vastattava samankokoiset reiät yläpinnalla.

Näiden kopterikäytössä pakollisten tietojen lisäksi voidaan mitata esimerkiksi akkujen jännitteitä, virtaa, eri lämpötiloja ja ilmanopeutta. Lisälaitteilla näitä voidaan lähettää esimerkiksi maa-asemalle tai videokuvan mukana vaikka pelastustoiminnan johtopaikalle. Koetin saada integroitua lentoarvot videokuvaan OSD-lisäosalla. Pitkään näyttikin siltä, ettei lentodataa saada videokuvan mukaan. Vasta kesällä 2014 OSD-lisälaite suostui toimimaan ilmeisesti samalla autopilotille asentamani uuden ohjelmiston ansiosta. Erillistä datalähetintä ei Proto-kopteriin hankittu, ja kannettavassa tietokoneessa toimiva maa-asema ohjelmisto jäi vain ohjelmointia ja lentodatan jälkianalyysiä varten.

Koska multikopterit ovat luonteeltaan epävakaita lentolaitteita, on lentoa vakauttavan autopilotin valintaa pidettävä ehdottomasti tärkeimpänä yksittäisenä valintana koko järjestelmässä. Oma valintani meni siinä mielessä pieleen, että Ardupilot on säädettävissä hyvin monipuolisesti, mutta se ei ole markkinoiden helpoimpia saada vakaaksi. Lisäksi yhdistin sen kopterirunkoon, jota ei lainkaan käsitelty sen ohjeistuksessa ja jouduin hakemaan kaikki säätöarvot itse. Kaikkien PID-arvojen säätäminen lähelle täydellisyyttä vaati satoja lyhyitä trimmauslentoja. Autopilotin säätäminen veikin suurimman osan ajastani ja käytännön kuvauslentoja realistisissa tilanteissa tuli valitettavan vähän.

Autopilotti:

- Pitää luonnollisesti epävakaaan kopterin hallittavissa.
- Kaikki ohjaussignaalit menevät sen läpi, joten sen tulee olla hyvin luotettava.
- Autopilotin antureille on järjestettävä häiriötön mittausympäristö.
- Autopilotin sen hetkinen tila tulee olla helposti nähtävissä ulkopuolelta.
- Autopilotin on lähetettävä lentoarvoja ohjaajalleen joko OSD-lisäosan välityksellä tai erillisellä järjestelmän tilaa tarkkailevalla maa-aseamalla.
- Lentoarvoja tallentava ominaisuus on erittäin suositeltava (mustalaatikko).

4.2.3 Akku

Protossa käytetyt akut ovat litium polymeeri -tyyppiä, tästä eteenpäin lyhennettynä LiPo. Akkutyypillä on hyvä energiatiheys ja varauksen säilytyskyky, mutta se on vaativa ladattava ja vikatilanteissa arvaamaton. Vikaantuneella LiPo-akulla on jo kaksi kolmesta palon edellytyksistä, ja syttymisen vaara on maahansyöksyssä aina olemassa. Vikaantunut akku syttyy heti kuoren puhjettua ja hapen päästessä sen sisälle. Koelentojen aikana tapahtui muutamia maahansyöksyjä, joista pahimmassa akku vääntyi mutkalle kameran ympärille. Tulipaloja koelentoilla ei syttynyt.

Proton arvioidun lentopainon ja simuloinnin perusteella päädyin 4-kennoiseen akkuun ja noin 250 W leijuntatehoon. Kopteri olisi voinut pohjautua myös 3-kennoiseen akkuun, mutta arvelin hyötykuorman vaativan myöhemmin hieman lisätehoa. Tämä osoittautui myöhemmin oikeaksi valinnaksi.

Kuvassa 7. näkyy alkuarvaukseni kopterin omamassalle ja sen perusteella valituille akuille, moottoreille ja potkureille. Tarkoituksena oli mitoittaa moottoreiden kuormitus hieman alle 50 % maksimitehosta, jotta tehoa jää myös kopterin vakauttamiseen ja liikehtimiseen sekä myöhemmin asennettavan hyötykuorman kannatteluun. Tutkimuksen loppuvaiheessa Proto-kopteri painoi noin 1800 g, jolloin moottorit toimivat hyvin lähellä optimihyötysuhdettaan noin 6 ampeerin virralla (sininen käyrä).

Akkukapasiteetissa päädyin 4400 mAh akkuun, koska sen paino suhteessa energiamäärään oli hiukan parempi kuin muiden kokojen. 4400 mAh akulla on odotettavissa noin 15 minuutin lentoaika, jota pidin riittävänä koelentoihin. Akun purkautumiskykyä kuvaava C-arvon valitsin aikaisemman kokemuksen ja nopean laskennan tuloksena. Päädyin hankinnassani 20C-akkuun, koska 15C-akku ei ollut yhtään kevyempi. Laskennallisesti kopteri vaatii vähintään 12C-akku.

Mitoitin tehon niin, että kopterin leijunta vaatii noin 50 % maksimitehosta. Jos kopteri optimoitaisiin mahdollisimman pitkää leijuntaan, olisi moottorien kuormitusastetta leijunnassa lisättävä. Nyt moottorit eivät vielä aivan ole vielä parhaimman hyötysuhteensa alueella. Korkeammin kuormitettu moottori leijunnassa syö toisaalta kopterin liikehtimiskykyä, eli mitoitus on aina useiden tekijöiden kompromissi.

Suoraviivaisesti ajateltuna lentoaikaa voi helposti lisätä suurentamalla akku, mutta ilmailussa tämä ajatus ei aina toimi. Kun olin ensin testannut simulaattorini arvion lentoajasta todenmukaiseksi myös käytännössä, simuloin, kuinka lentoaika kasvaa, kun akkukapasiteettia lisätään. Kun maksimi lentoaika yhdellä akulla on noin 15 minuuttia, on se kahdella akulla yhtä aikaa noin 20 minuuttia ja akkukapasiteetti kolminkertaistamalla vain alle 22 minuuttia. (Ks. liite 2.)

Kolme akku peräkkäin lennättämällä kopteri lentää siis 45 minuuttia, mutta kolmen akun massaa kannattelemalla saavutetaan vain 21 minuuttinen lento. Lentopainon vaikutus lentoaikaan on siis hyvin suuri. Kopterin akun tulee siis olla nopeasti vaihdettavissa ja akkuja tulee olla useita.

| | | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Design Fundamentals: | # of Rotors: 4 | xCopter Weight: 685 g without Drive | Field Elevation: 100 m ASL | Air Temp: 15 °C | Pressure (QNH): 1013 hPa | |
| Battery: (continuous / max. C) - charge state: LiPo 4500mAh - 20/30C normal | # serial: 4 s | # parallel: 1 P | Capacity: 4500 mAh | Resistance: 0.005 Ohm | Volt per Cell: 3.7 v | Weight per Cell: 118 g |
| Controller: Custom | Resistance: 0.010 Ohm | Continuous Current: A | max. Current: A | Weight: 10 g | | Motor Weight: 71 g |
| Motor: Manufacturer - Type (Kv in rpm/V): Turnigy 2217-20T (850) | Kv (w/o torque): 850 rpm/V | Resistance: 0.162 Ohm | no-load Current: 0.58 A @ 10 V | Limit (up to 20s): 22 A | # mag. Poles: 10 | Case length: 21 mm |
| Propeller: Type - yoke twist: Custom 0° | Diameter: 9 inch | Pitch: 4.7 inch | # Blades: 2 | Prop Const.: 1.18 | Gear Ratio: 1.00 :1 | <input type="button" value="calculate"/> |

Approx. Values:

Warning:

| | | | | | | |
|---|--|---------------------------------------|---------------------------------|---|--|------------------------------|
| Battery: | max. Load: 11.4 C | Voltage: 13.77 V | Rated Voltage: 14.8 V | Flight Time*: 5.25 min | Flight Time Hover: 13.16 min | Weight: 472 g |
| Motor @ Maximum: Values per Motor | max. Current: 12.86 A | Voltage: 13.64 V | Revolutions: 9941 rpm | el. Power (In): 175.44 W | mech. Power (out): 141.43 W | Efficiency: 80.6 % |
| Optimal Efficiency: | Current: 7.65 A | Voltage: 14.11 V | Revolutions: 11070 rpm | el. Power (In): 107.95 W | mech. Power (out): 89.89 W | Efficiency: 83.3 % |
| Motor @ Hover: Values per Motor | Current: 4.36 A | Voltage: 14.41 V | Throttle (linear): 56 % | el. Power (In): 62.82 W | mech. Power (out): 50.21 W | Efficiency: 79.9 % |
| Entire Drive: | Total Current: 17.44 A to hover 51.42 A maximum | Weight: 875.6 g Drive 1560.6 g AUW | add. Payload: 576 g 20.32 oz | P (In): 258.12 W to hover 761.31 W maximum | P (out): 200.83 W to hover 565.72 W maximum | Efficiency: 77.8 % 74.3 % |

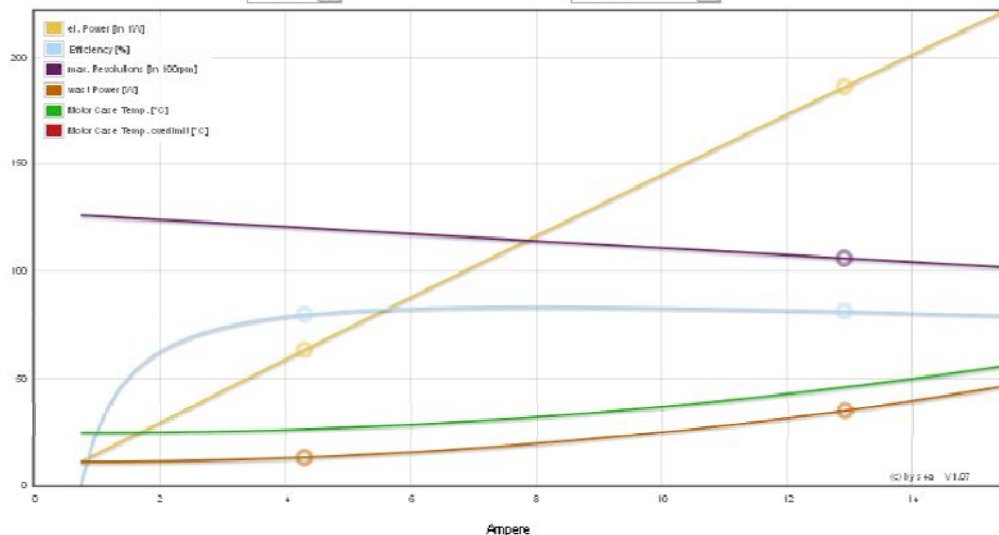
Motor Data:

Motor Cooling:

medium

Power Scale:

automatic



Kuva 7. Moottoreiden ja akkujen mitoituksessa käytetty simulaattori.

Polttimoottorin käyttäminen voimanlähteenä aiheuttaa paljon tärinää, jota on hyvin vaikea eristää kameralta. Polttomoottori ei mielestäni ole vaihtoehto pieneen kuvauskopteriin. Polttokennoja ja muita polttonesteisiin perustuvia vaihtoehtoja en tässä opinnäytteessä tarkastelut.

Proto-kopterin ajoakun vaihto kestää noin kahdesta kolmeen minuuttia. Aikaan on huomioitu jo lyhyt siirtymä kuvausalueelta turvalliseen paikkaan ja takaisin. Turhaa kopterin leijuttamista on syytä välttää, jos tiedustelutehtävää on mahdollista odottaa maassa lähellä onnettomuuspaikkaa.

Ajoakun vaihdossa suurin osa viiveestä aiheutuu GPS-satelliittien hakemiseen kuluva ajasta. Tätäkin viivettä voidaan helposti lyhentää käyttämällä akunvaihtohetkellä sijaisvirtalähdettä, jotta GPS ei hukkaa satelliittejaan. Ominaisuus tunnetaan varsin yleisesti nimellä Hot Swap.

Akun mitoitus:

- riittävä purkuvirta ja kapasiteetti, mutta mahdollisimman kevyt rakenne
- tarvitaan useita akkuja
- voitava ladata nopeasti myös kenttäolosuhteissa
- Hot Swap ja pitkä säilytysikä suositeltavia ominaisuuksia.

4.2.4 Moottorit

Proto-kopterin moottorit ovat harjattomia sähkömoottoreita, joista käytetään lyhennettä BLDC (Brushless Direct Current -motor). Tarkemmin kuvattuna moottorit ovat synkronisia kolmivaihekestmagneettisähkömoottoreita, joissa kuparikäämi on moottorin keskellä rautasydämen päälle käämittynä. Moottorin ulkokehälle sijoitetut kestmagneetit pyörivät akselin mukana. Moottorityyppiä kutsutaankin yleisesti ulkopyörijäksi.

Proto-kopteria varten hankin lopulta 10 kappaletta identtisiä moottoreita, koska kiinalaisilla valmistajilla on tapana kehittää tuotteitaan siitä etukäteen ilmoittamatta. Myöhemmin tilatut moottorit olisivat hyvin todennäköisesti olleet hieman erilaisia. Vain yksi moottori särkyi koelentojen aikana maahansyöksyssä.

Ulkopyörijä on luonnollinen valinta multikopterin voimanlähteeksi, koska rakenteensa takia moottorissa on sähkömagneettinen alennusvaihde ja suuri vääntömomentti. Potkuri, jolla on hyvä hyötysuhde leijunnassa, on aina suurikokoinen ja pyörii hitaasti. Proto-kopterin moottoreissa magneetteja on 14 kappaletta, ja ne pyörivät mekaanisesti seitsemän kertaa hitaammin kuin sähkökenttä niiden sisällä. Moottoreissa on siis sisäänrakennettuna 1:7 alennusvaihde.

Huippusuorituskykyisissä kilpaluokissa käytetään edelleen sisäpyörijöitä, sillä niiden hyötysuhde huipputehoilla on hieman parempi. Sisäpyörijä pyörii kuitenkin

huomattavasti suuremmilla kierrosluvuilla, joten se vaatii aina mekaanisen alennusvaihteen aerodynaamisesti tehokasta potkuria pyörittääkseen. Multikopterikäytössä tämä on kallis ja vaurioaltis rakenne.

Valitsemani moottorit olivat edullisia, mutta kiinalainen valmistaja ei ollut kiinnittänyt huomiota moottoreiden tasapainotukseen. Jouduin tasapainottamaan kaikki koelennoilla käytetyt moottorini dynaamisesti. Kotitekoisilla tasapainotusmenetelmillä kuuden moottorin dynaaminen tasapainotus vie useita työpäiviä. Tämä on kuitenkin välttämätöntä laadukkaan ja tarkan kuvan aikaansaamiseksi.

Moottorilta toivottavat ominaisuudet:

- hyvä hyötysuhde leijunnassa ja sitä suuremmilla tehoilla
- suuri vääntö yhdistettynä keveyteen
- värinätön käynti.

4.2.5 Nopeudensäätimet

Multikoptereissa käytetään moottoreina yksinomaan niin sanottuja harjattomia ulkopyörjijöitä (Brushless Outrunner). Sähkömoottoreiden ohjaamiseen tarkoitettuja nopeudensäätimiä kutsutaan myös yleisesti lyhennelmällä ESC (Electronic Speed Controller). Harjallisen ja harjattoman moottorityypin nopeudensäätimet eivät ole keskenään vaihtokelpoisia. Moottorin asennon mittaamisella ja oikea-aikaisella virran kytkemisellä on suuri merkitys moottorin vääntöön ja luotettavuuteen. Lisäksi multikopterin nopeuden säätimet kuuluvat autopilotin säätölenkkiin, joten niiden tulee olla mahdollisimman nopeita ja kaasuvasteeltaan lineaarisia.

Ensimmäiset säätimeni olivat Turnigy Plush 25A -tyyppisiä. Muutamaa viikkoa myöhemmin kauppiaan varastoon saapui myös tämän pienempää versiota 18 ampeerin virrankestollaan. Tilasin niitä varaosiksi. Säädinvalinta perustui mallisarjan edulliseen hintaan ja hyviin käyttökokemuksiin kiinteäsiipisissä lentolaitteissa. Tässä vaiheessa olin myös lukenut kansainväliseltä harrastefoorumilta (RC- Groups) säätimien firmware- päivityksestä, joka parantaa säätimen kaasuvastetta nimenomaan multikopterikäytössä.

Ensimmäiset Plush 25A -säätimet tuhoutuivat juhannuksena 2012 Proto-kopterin kaaduttua kellukkeilta kyljelleen järveen. Kellukekokeiluni päättyivätkin siihen. Myös toinen erä nopeudensäätimiä piti vaihtaa, koska ne eivät soveltuneet multikopterikäyttöön lämpötilaherkän rakenteensa vuoksi.

Multikopterin nopeudensäätimien tulee olla tulonsignaalin suhteen reaktioajaltaan mahdollisimman nopeita. Lisäksi multikopterikäytössä säätimien tulee olla varustettu lämpötilan suhteen vakaalla kideoskillaattorilla. Halvimpien nopeudensäätimien asetukset muuttuvat säätilan muuttuessa.

Proto-kopterin kolmannet nopeudensäätimet ovat Hobbyking Blue-series -mallisarjan 20A-malleja. Aiemmasta oppineena ostin säätimiä nyt kerrallaan 8 kpl, jotta malli säilyisi taatusti samana koko erässä. Blue-series -nopeudensäätimen etuna on helposti ohjelmoitava Atmel-prosessori, vakaata kellosignaalia tuottava kide-oskillaattori ja oikeaoppinen, kokonaan N-Feteillä toteutettu pääteaste.

Hyvänä ominaisuutena voidaan myös pitää tuplattua +5V virransyöttöä, koska proto-kopterissa autopilotti ja muu elektroniikka saavat virtansa suoraan säätimen lineaariregulaattoreilta. Haittapuolena säätimessä on kuitenkin se, että sen ohjelmointikoskettimet eli padit eivät ole piirilevyn reunassa siistissä jonossa, vaan sijoitettuna ympäri piirilevyä. Jokainen ohjelmoitava säädin on juotettava ohuilla hyppylangoilla kiinni ohjelmointikaapeliin, siksi valmista ohjelmointiliitintä ei voi käyttää.

Uudelleen ohjelmoidut säätimet aiheuttavat kaikkien kopterin vakauteen liittyvien PID-arvojen tarkistuksen ja siten useamman tunnin koelentotarpeen. PID-koelento on tylsä, korkeintaan minuutin kestoinen pomppu, joiden välissä kopteri sammutetaan, kytketään tietokoneeseen, muutetaan säätöarvoa, kytketään taas virrat, haetaan GPS-satelliitit. Arvo kokeillaan pikaisesti ilmassa ja sitä säädetään taas maassa kopterin käytöksen mukaan kannettavalla tietokoneella ja ohjelmointikaapelilla. Säättämisessä on edettävä pienin askelin ja vain yhtä arvoa kerrallaan muuttaen. Aluksi säätö on tehtävä täysin tyynessä säässä, mutta loppusilauksessa pyörteinen sää on jopa eduksi.

Oikein säädetyn autopilotin arvot ja säätimien alkuperäistä nopeampi ja lineaarisempi vaste parantavat kopterin vakautta huomattavasti. Vakaa lento kaikissa oloissa on

kopterin perusedellytys, ja siitä ei voi tinkiä. Vähänkin liian herkäksi säädetyn kopterin pieni, mutta jatkuva värinä estää myös vakaan kuvan saamisen maahan johtopaikalle. Liian hitaasti tuulen puuskan aiheuttamaan pieneen heilahdukseen reagoiva kopteri taas vaeltelee pitkän tovin sille asetetun paikan ympärillä ennen kuin saavuttaa taas tasapainon.

Soveltuvat nopeudensäätimet ovat

- kaasuvasteeltaan nopeita ja lineaarisia
- kevyitä ja edullisia
- ympäristöolosuhteiden suhteen vakaita.

4.2.6 Potkurit

Multikoptereiden lentäminen perustuu miltei aina vastakkain pyöriviin potkuripareihin. Potkuriparit kumoavat toistensa aiheuttaman vääntömomentin, eli perinteisen helikopterin pyrstöroottoria ei tarvita. Yhteinen ominaisuus kaikille multikopteripotkureille on keveys. Koska luontaisesti epävakaan multikopterin lentäminen perustuu jatkuvaan potkurien keskinäisen työntövoiman- ja kierrosluvun säätelyyn, on potkurin kierrosherkkyydellä suuri merkitys. Lisäksi keveillä potkureilla on aina pienemmät hyrrävoimat ja se helpottaa autopilotin vakautusta. Potkureiden ihanteellisena materiaalina voidaan pitää hiilikuitua.

Proto-kopterin vakautuksen säätölenkki pyörii noin 400 Hz taajuudella. Kopterin asento, asennon korjaamiseen vaadittava työntövoimalaskenta ja moottorinohjaus toistetaan siis useita satoja kertoja sekunnissa. Potkurin pyörimisnopeuden muutoksien on tapahduttava hyvin nopeasti.

Multikoptereissa potkureilta vaaditaan ristiriitaisia ominaisuuksia, sillä niillä pitäisi olla hyvä staattinen työntövoima, mutta tarvittaessa suuri virtausnopeus matkalentovaiheessa. Staattista työntövoimaa tarvitaan, jotta kopteri voi leijua pitkiä aikoja hyvällä hyötysuhteella. Leijunnassa paras hyötysuhde saavutetaan suurella halkaisijalla, mutta pienellä nousulla.

Suuren halkaisijan potkuri on kuitenkin tuuliherkkä, koska sen pyörimiskehällä on suuri pinta-ala ja tuuli tuottaa siihen suuren voiman. Lisäksi potkurin suuri halkaisija lisää sen kiihdyttämiseen tarvittavaa momenttia ja hidastaa siten sen kierrosherkkyyttä.

Nopeissa liikkeissä tarvitaan taas suurta virtausnopeutta, jota matalanousuinen potkuri ei voi tehokkaasti tuottaa. Matkalentoon erikoistunut suurinousuinen potkuri toisaalta tuhlaa energiaa paikallaan leijuesssa. (Ks. Liite 1.)

Proto-kopterissa käytin APC -tehtaan pienille kierrosluvuille tarkoitettuja Slow fly -potkureita tai niiden vastineita esimerkiksi GemFan-tuotenimellä. Kokeilin varsin laajasti eri potkurikokoja 9x3,8 – 11x4,7. Merkinnän ensimmäinen osa kertoo potkurin halkaisijan ja toinen ilmoittaa potkurin teoreettisen nousun yhdellä kierroksella. Mittayksikkö molemmissa on tuuma. Lisäksi simuloin erikoisempia kokoja sekä monilapaisia versioita.

Proton lentopainolla parhaaksi kompromissiksi osoittautui 9x4,7 GemFan. Potkurien valmistusmateriaali oli joko Nylon tai lasikuituvahvisteinen Nylon. Kaikkiaan eri koon, valmistajan, pyörimissuunnan ja värin potkureita kertyi täysi laatikollinen.

Mikäli olisin vielä jatkanut Proton kehittelyä, olisin pian siirtynyt hiilikuitupotkureihin, niiden keveyden ja paremman jäykkyyden vuoksi. Proto-kopterin lentopainolla lasikuituvahvisteinen nylon on vielä toimiva materiaali, mutta potkurikoon kasvaessa se on osoittautunut liian löysäksi materiaaliksi. Kaikki lentäneet potkurit tasapainotin staattisella potkurin magneettitasapainotuslaitteella. Tasapainotin potkurit sekä pitkittäis- että poikittaissuunnassa. GemFan-potkureissa oli yllättävän paljon epätasapainoa nimenomaan poikittaissuunnassa.

Multikopterin kaiken pyörivän massan, kuten moottorien pyörivien osien ja potkurien, tasapainottaminen on erittäin tärkeää. Useampi melkein identtisillä nopeuksilla pyörivä roottori tuottaa kopterin runkoon vaihtelevan taajuista ja amplitudista värinää, jota on hyvin vaikea eristää kameranalta. Tärisevä kamera ei voi koskaan tuottaa täysin tarkkaa kuvaa. Ongelma korostuu varsinkin optiikan zoom-pituuden kasvaessa. Suuritaajuinen värinä voi tuottaa myös niin kutsuttua Jello-efektiä. Esimerkki Jello-vääristymästä löytyy kuvasta 8.



Kuva 8. Tärinän aiheuttaman Jello- efekti videokuvassa. Kuvan ottohetkellä liikahtanut kamera saa rakennuksen näyttämään hyllyvältä hyytelöltä.

5 KAMERAT JA APULAITTEET

Pelastustoiminnan johtamista palvelevan UAV:n on toimitettava laadukasta kuvaa johtopaikalle ja UAV:n ohjaajalle. Kuvan toimittamiseksi maahan satojen metrien päähän UAV:stä tarvitaan joukko apulaitteita. Tässä osassa kuvaan tämän kuvan siirtoketjun komponentteja ja niiden tärkeimpiä suorituskykyyn vaikuttavia ominaisuuksia.

UAV:n ja kameran lisäksi lentolaite tarvitsee ainakin kameraa paikallaan pitävän vakaimen, sopivan video-out -lähden, videosignaalia tukevan videolähettimen ja sille lentoarvoja lähettävän OSD (On-Screen Display)- lisälaitteen sekä signaalille sopivan lähetinantennin. Ihannelaitteiston maa-asemassa signaalia vastaanottaa kaksi toisistaan riippumatonta ja erilaisilla antenneilla varustettua vastaanotinta. Toisen vastaanottimen suunta-antenni tarvitsee aktiivisen antennisuuntaimen sekä signaalivalitsimen. Järjestelmän tuottamaa kuvaa pitää vielä pystyä esittämään onnettomuuspaikalla liikkuvalla UAV:n ohjaajalle. Turhan siirtoviiveen välttämiseksi maa-asemia tarvitaan kaksi, sillä toisen maa-aseman tehtävä on palvella pelastustoiminnan johtajaa tai pelastustoiminnan esikuntaa johtopaikalla.

Proton ensimmäinen kamera oli digitaalinen still-kamera Ixus IS90. Still-kameran käyttöä puoltaa kuvien suuri resoluutio, pieni tiedostokoko, helppo muokattavuus sekä helppo kuvien jakaminen esimerkiksi sähköpostin välityksellä. Pelastustoiminnan johtamiseen tarkoitetut ensitiedustelukuvat on kuitenkin saatava nopeasti kopterista johtopaikalle, tämä puoltaa huonompilaatuisen videokuvan kuvankaappauksen käyttöä ensitiedustelun tuotteena.

Still-kameran kuvat on helpointa jakaa siirtämällä muistikortti suoraan kamerasta halutulle tietokoneelle. Siirrosta aiheutuu aina viivettä, joten ensitiedusteluun siirtotapa ei sovellu. Ensitiedustelun jälkeen johtopaikalla on tarve yksityiskohtaiselle datalle. Sen tuottamiseen still-kamera soveltuu hyvin.

Liikkuvan videokuvan välittäminen johtopaikalle on teknisesti mahdollista, mutta se saattaa viedä liikaa huomiota varsinaiselta päätehtävältä eli pelastustoiminnan johtamiselta. Lennättäjälle liikkuva kuva on miltei välttämätön ja helpottaa halutunlaisen informaation tuottamista johtopaikalle. Lennättäjälle kuvan resoluutiota

tärkeämpää on kuvan reaaliaikaisuus ja siirron luotettavuus.

Lennättäjälle kuvainformaation mukana lähetetään usein myös koneen lentoarvoja, joille johtopaikalla ei mitään tarvetta. Lentoarvot liitetään yleensä videokuvan päälle OSD-lisälaitteella. Ostamani Ardupilotin oma MinimOSD vaati melkoisesti ohjeiden lukemista ja vianetsintää ennen kuin alkoi toimia. Lopulta se kuitenkin pakkasi peruslentoarvot, kuten lentokorkeuden ja -nopeuden, horisontin asennon, etäisyyden ja suunnan lähtöpaikalle sekä lentotilan suoraan lennättäjän edessä olevalle näytölle. Arvot kiinnostavat lähinnä vain lennättäjää, mutta langattoman videokuvan välittäminen on mahdollista useampaan paikkaan yhtäaikaisesti eikä lentodataa ole pakollista lähettää jokaiselle katselupaikalle.

Pyyhkäisevällä liikkeellä pikseli kerrallaan tapahtuvan kuvan ottamisen vuoksi CCD-videokamera tuottaa nopeasti liikkuvalla esineelle Shutter-efektin. Tuhansia kierroksia minuutissa pyörivä lennokin potkuri aiheuttaa aina shutter-efektin mukaisen nopeasti vilistävän ja videokuvassa häiritsevän varjon. Esimerkki Shutter-efektistä löytyy kuvasta 9. Kameralle on aina järjestettävä potkurivapaa kuvakulma.



Kuva 9. CCD- videokameran Shutter-efekti nopeasti pyörivästä potkurista

Käytössäni ollut MSA 5000 -sarjan savusukellukseen suunniteltu lämpökamera painaa suunnilleen yhtä paljon kuin Proto-kopteri itse lentokunnossa. Lämpökameraa ei edes yritetty saada lentoon. Kokeilin kuitenkin sen näkymää nostolavan korista maahan sopivalta UAV toimintaan sopivalta lentokorkeudelta maahan. UAV käyttöön soveltuva lämpökamera on mitoiltaan huomattavasti pienempi, koteloiltaan kevyemmin lämpösuojattu ja kuvakulmaltaan kapeampi. Koteloinnin iskunkestävyyteen kannattaa kuitenkin panostaa, sillä maahansyöksyjä tapahtuu toisinaan.

Savusukellukseen suunnitellulle kameralle laaja kuvakulma on hyväksi, mutta pidemmällä etäisyydellä se ei tuota riittävän yksityiskohtaista kuvaa. Näkyvän valon kameralla kuvakulman rajoitteet ei ole niin selviä, koska kameroissa on huomattavasti suurempi resoluutio ja digitaalisella zoomilla voidaan hieman korjata huonoa kuvan rajausta.

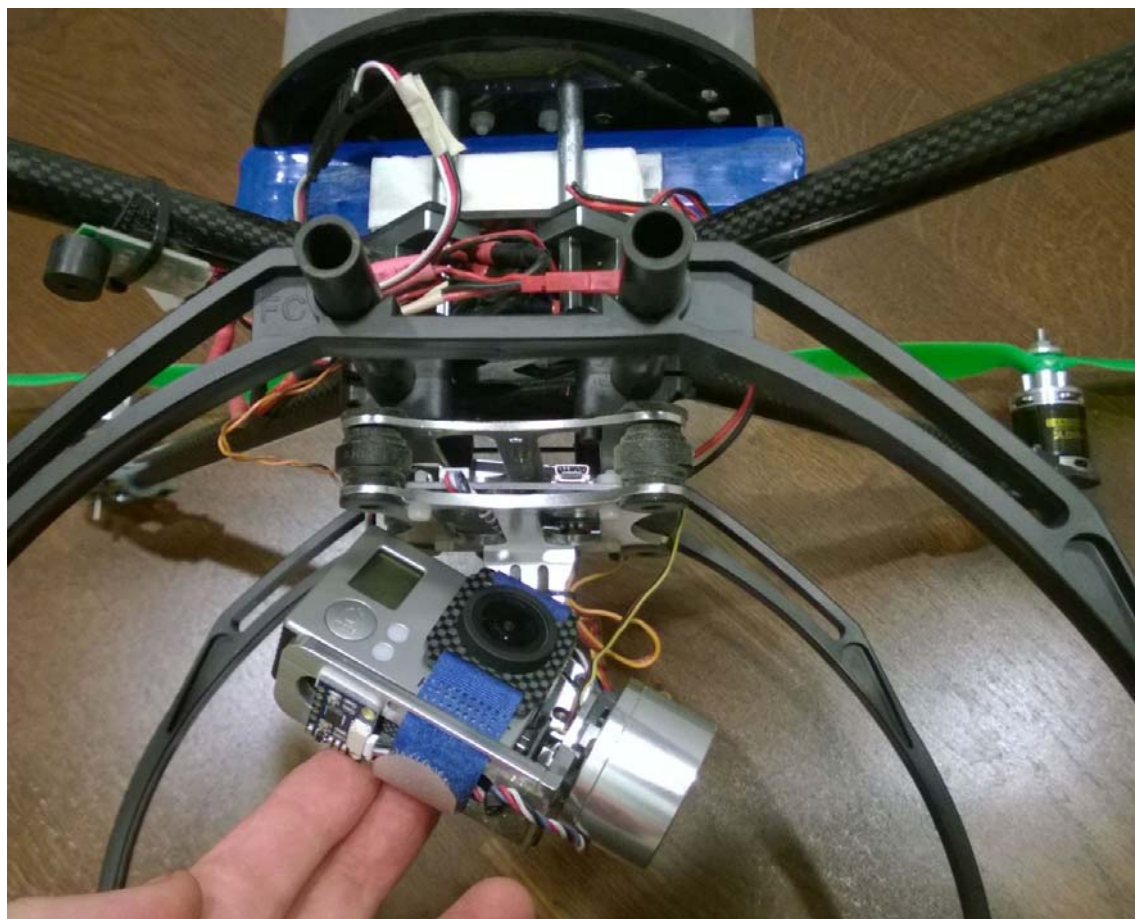
5.1 Kameran vakautus

Alkuvaiheessa Protossa ei käytetty lainkaan kameranvakautusta, tällöin kuvan informaatioarvo oli heikko. Seuraavassa vaiheessa kamera oli ripustettu joustavien kumikiinnikkeiden varaan ja kopterin painavin osa, ajoakku toimi massavakautuksena. Tämä yhdessä potkurien ja moottorien huolellisen tasapainotuksen kanssa toi kuvaan huomattavasti lisää yksityiskohtia. Kuvaan jäi kuitenkin kaikki tuulenpuuskien aiheuttamat kallistukset sekä autopilotin tekemät korjausliikkeet. Kuvan pidempiaikainen seuraaminen aiheutti edelleen pahoinvointia.

Seuraavaksi lisäsin kameralle servovakautuksen. Kamera kiinnitettiin kahden servon ja vipujen muodostamaan kokonaisuuteen, jota autopilotti ohjasi aina maahan nähden vaakasuoraan. Vakautukseen käytetyt servot olivat sivusuunnassa Savöx SA-1258TG ja pitkittäissuunnassa Futaba S9650. Molempia on pidettävä laadukkaina digitaaliservoina. Kuvan seurattavuus parani jo huomattavasti, mutta joko servojen kallistusresoluutio tai liikenopeus loppui kesken. Tuulisella säällä, kun kopterin epävakaus on voimakkaimmillaan, servovakautus ei ole riittävä vakautusmenetelmä.

Lopulta hankin pari kappaletta kaupallisissa multikopterissa käytettävää Brushless gimbal -vakautinta, jonka suorituskyky riittää lyhyellä optiikalla varustetulle kameralle

hyvin (Kuva 10). Vakain oli optimoitu GoPro3 -sukupolvelle, joka on hieman kevyempi kuin vanhemmat versiot. Hiekkatietä lento- ja laskeutumisalustana käytettäessä huomasin, että kopterin ilmaan heittämät hiekanjyvät kulkeutuivat helposti vakain moottoreiden ja niiden metallisten suojakuorien väliin aiheuttaen kuvaan haittaavaa nykimistä. Pelastustoimen käytössä nämä moottorit onkin sekä roiskevesi- ja iskusuojauksen lisäksi pölysuojattava.



Kuva 10. Brushless Gimbal-kuvanvakain. Kiihtyvyyssanturit kameran alle liimattuna. Vakaimen ohjelmointipistoke (miniUSB) kumityynyjen välissä. Moottorit ovat alumiinisen kotelon sisällä suojassa.

Brushless-vakainten suorituskyky on erinomainen ja niillä sekä liikenopeus että -tarkkuus on yhtäaikaaisesti saavutettavissa. Säädotekniikalle tunnusmaisesti kameravakautuksessakin kameran massa, massan jakautuminen laakerointeihin nähden, vakautusmoottorit sekä niiden ohjaimen PID-arvot muodostavat kaikki yhdessä kokonaisuuden. Jos esimerkiksi kameran optiikan vaihtuessa kameran massajakauma muuttuu, on vakain säädettävä uudelleen huippusuorituskyvyn saavuttamiseksi. Tämä

vaikeuttaa eri kameroiden kokeilua tai tehtävän mukaan vaihdettavan kamera-moduulin toteutusta. Vakaimen yhteiskäytössä erityyppisille kameroille ja optiikoille on sen PID-säätöarvojen oltava helposti ja nopeasti vaihdettavissa kameran massaa vastaavaksi.

Kamera ja kuvanvakain:

- kameralle järjestettävä potkuriton näkökenttä
- kamerassa oltava nopea video-out liitäntä videolähettimelle
- lämpökameran katselukulman oltava riittävän kapea
- kamera vakautettava aina parhaalla mahdollisella tekniikalla
- kameran massan vaikutus vakaimen säätöihin
- kameroiden oltava modulaarisesti vaihdettavissa
- vakaimen säätöarvot oltava nopeasti vaihdettavissa kameran mukaan.

5.2 Videolähetin ja OSD

Lentolaitteesta maahan videokuvaa välittävä lähetin- vastaanotin pari antennineen vaikuttaa suuresti laitteistosta saatavaan laadukkaan kuvan kantamaan. Videokuvaa on laillista lähettää ilman erillistä lupaa useammallakin taajuusalueella esimerkiksi 433 MHz, 2,4 GHz ja 5,8 GHz taajuusalueilla. (Viestintävirasto 2013, 4.)

Harrastelija foorumin mukaan mainittujen taajuusalueiden lisäksi on mahdollista toimia 1320 MHz taajuusalueella suurellakin teholla, mutta tämä edellyttää erillistä Viestintäviraston lupaa ja radioamatöörikoetta. Lisäksi lupa maksaa vuosittain muutamia kymmeniä euroja.

On tärkeää, ettei videolinkki häiritse UAV:n ohjaamiseen käytettyä radiolaitetta. Suurin osa markkinoilla olevista RC-ohjaimista perustuu 2,4 GHz taajuuteen ja hajaspektritekniikkaan. Samaa taajuusaluetta sekä ohjainkomennoille että videokuvalle on syytä välttää. Proto-kopterissa käytetty 5,8 GHz taajuus on toimiva vain lyhyillä matkoilla ja suuntaavalla vastaanotinantennilla. Sen kantama kärsii myös voimakkaasti ilmakehän kosteudesta.

Suuren taajuuden hyötynä ovat pienikokoiset antennit ja se, että laitteita on helposti saatavilla. Taajuuden heikkouksia puolestaan on sen hyvin rajoitettu maksimi

säteilyteho ja sen voimakkaasti heikkenevä kantama kosteassa ilmassa. Suoritetut kokeet osoittivat, että sumuisena päivänä videolinkin kantama oli korkeintaan puolet selkeän päivän kantamasta. Selkeälläkin säällä kaistalle suurimmalla sallitulla 25 mW lähetysteholla käyttökelpoinen kantomatka vaati voimakkaasti suuntaavan antennin käyttöä.

OSD (On-Screen Display) on lisälaite, joka lisää autopilotin lähettämät lentoarvot videokuvan päälle omaksi kerroksekseen. OSD -signaalia voi verrata DVD- elokuvien tekstityksiin, eli ne kytkeä päälle ja kesken normaalitoiminnan ja niiden sisältöä voi vaihdella etukäteen ohjelmoimalla. OSD-laite syöttää samalla häiriötä DC-sähköä videolähttimelle. Suoraan ajoakulta otetulla sähköllä kuvassa näkyy häiritseviä raitoja moottoreiden suuren virran aiheuttamana.

Videon lähettäminen maahan:

- Lähetysteho on hyvin rajattu.
- UAV:n lähetinantennin kuuluu olla ympärisäteilevä.
- OSD-lisälaite on suositeltava lentoarvojen lähetysmenetelmä.
- Videosignalin kanssa on huomioitava häiriösuojaus.

5.3 Antennit

Lentolaitteessa olevan lähetinantennin tulee olla mahdollisimman ympärisäteilevä eli sen antennivahvistuksen tulee olla mahdollisimman pieni. Proto-kopterissa lähetinantennina käytin FlyCamOne -videolinkin mukana tullutta noin 8 cm pitkää kumipatukka-antennia. Valmistaja kertoo antennivahvistuksen olevan 2 dB, eli sen säteilykuvio on miltei pallomainen.

Antennipatukka säteilee antennin asennosta riippuvassa polarisaatiotasossa. Vastaanottimen antennin tulee olla samaan suuntaan polarisoitu. Opinnäytteeseen rakennetuissa prototyypit UAV:ssa patukka-antennit oli asennettu pystysuuntaan, koska silloin niiden vieressä on mahdollisimman vähän samansuuntaisia hiilikuituosia.

Vastaanotinantennina käytin joko alkuperäistä patukka-antennia, tai kun sen kantama ei ollut riittävä, kahta suunta-antennia. Patukka-antennin kantama riitti pyöriväsiipisen

kopterin tapauksessa, koska kopterin hahmottaminen kauempaa on hyvin vaikeaa sen pienen pinta-alan ja muodon vuoksi. Lähes parimetrinen kiinteäsiipisen koneen asennon tarkkailuun tottunut lennättäjä näkee kuitenkin huomattavasti laissa mainitun 500 m ulkopuolellakin, joten sen kanssa jouduin käyttämään suurivahvistuksista levymäistä patch-antennia.

Kiinteäsiipisen lentolaitteen tehdessä tiukkaa kaarta ja sen lähetinantennin ollessa yli 45 astetta kallellaan videolinkin kantamassa oli havaittavissa heikkenemistä. Multikopterin kallistumat on huomattavasti pienempiä, ja sillä ei havaittu vastaavaa kantaman katoamista.

Ympyräpolarisoitu antennipari ei menetä samalla lailla signaalin voimakkuutta kuten lineaarisesti polarisoitu antennipari. Ympyräpolarisoidun parin tulee kuitenkin olla samankätisiä, eli sähkökentän on pyörittävä kummassakin samaan suuntaan.

Kiinteäsiipisen lentolaitteen videolinkissä ympyräpolarisoidusta antenneista saadaan selkeä parannus, niistä ei multikopterissakaan ole haittaa, joten antenneissa kannattaa suosia ympyräpolarisoituja antennityyppejä. Lähettimeen sopiva antennityyppi on kukkaa muistuttava cloverleaf. Sen pariaksi maa-asemaan sopii lyhyille matkoille toinen samankätinen cloverleaf tai pidemmille matkoille suunta-antenniksi sopiva kierrejousta muistuttava helical-antenni.

5.4 Maa-asemat

Harrastelijoiden keskuudessa on havaittu, että suurimman videokuvalle sallitun lähetintehon rajoitusten vuoksi kantama ympärisäteilevillä antenneilla jää usein liian lyhyeksi. Maa-asemassa on siis miltei aina käytettävä suunta-antenneja.

Suunta-antennin rajattu säteilykeila vaatii toisaalta antennin suuntaamista lentolaitetta kohti eli aktiivisen antennisuuntaimen. Suuntaaminen perustuu usein vastaanottimen vahvistinta ohjaavaan tulosignaalin voimakkuudesta kertovaan RSSI-signaaliin ja keilan spiraalimaiseen liikkeeseen.

Antennisuuntaimen mekaniikka rajoittaa usein liikerataa eikä täyteen 360° puolipalloon päästä. Maa-aseman takasektoriin jää tällöin katvealue, jossa kuva ei välity edes lähietäisyydellä.

Antennisuuntaimen ja suunta-antennin lisäksi ihanteellinen maa-asema tarvitsee myös ympärisäteilevällä antennilla varustetun toisiovastaanottimen ja videovalitsimen, joka kytkee aina parempilaatuisen signaalin kuvaruudulle. Jälkianalyysiä varten on myös hyödyllistä, jos maa-asemassa on tallennusmahdollisuus, sillä maa-aseman vastaanottaman videokuvan päälle lisätty OSD (On-screen display) ei tallennu lentävään kameraan. Vaihtoehtoisesti jälkianalyysin voi tehdä autopilotin muistiin jäävästä lentoarvodatasta.

Pelastustoimen käytössä on erittäin tärkeää, että näitä maa-asemia on kaksi. Toinen maa-asema on lennättäjän käyttöön ja toinen pelastustoimen johtajaa varten johtopaikalla. Johtopaikalla on jo usein videokuvan näyttämiseen soveltuvia näyttöjä, mutta vastaanottimet, antennit ja videovalitsimet on tuotava myös johtopaikalle.

Johtopaikalla OSD-lentoarvoilla ei ole niin suurta merkitystä, ja tärkeitä ominaisuuksia on esimerkiksi helppo pysäytyskuvan tallentaminen ja näiden tallenteiden helppo hallinta. Jatkuvasti liikkuva live-videokuva voi jopa häiritä johtamista.

Ohjaajalle taas jatkuva live-kuva ja sen päälle lisätty OSD-data on ensiarvoisen tärkeää. Useimmat OSD-lisälaitteet mahdollistavat lentoarvojen päälle/pois laittamisen lennättäjän ohjaimesta käsin. Prototyypissä käyttämäni OSD salli kahden erilaisen datalehden vuorottelun ja datan poistamisen kokonaan videokuvasta. Pysäytyskuvalla ohjaajalla ei ole mitään tarvetta ja hallintalaitteissa muutenkin on pidättäytyttävä vain ehdottomasti välttämättömissä ominaisuuksissa.

Videokuvan näyttämiseen ohjaajalle on kaksi vaihtoehtoa: videolasit tai sopivan kokoinen näyttö. Pidän näyttöä parempana tapana, koska se mahdollistaa myös yhtäaikaisen suoran lentolaitteen tähystämisen. Videolaseilla varustettu ohjaaja ei voi seurata omin silmin tilannetta, ja toiminta vaatii erillisen tähystäjän, joka osaa tarvittaessa lennättää koneen turvallisesti maahan. Lisäksi videolasien liikkuvan kuvan seuraaminen saattaa aiheuttaa herkille henkilöille merisairautta vastaavaa pahoinvointia. Ohjaajan eteen sijoitettava näyttö kannattaa sijoittaa riittävän korkealle ja kauas

näkökentässä, koska silmien tarkentaminen vuoroin kauas ja lähelle on hyvin rasittavaa ja riski varsinkin pienen kopterin kadottamiseen taivaalle kasvaa huomattavasti. Paras sijoituspaikka on ohjaajan edessä valjaisiin kiinnitettynä. Näyttö voi myös sijaita ajoneuvon perässä, mutta tällöin ajoneuvo on osattava sijoittaa oikein jo onnettomuuspaikalle saapuessa. Ajoneuvon kiinnityksessä näytössä pätee samat säännöt kuin sammutusauton pumpun sijoittamisessa onnettomuuspaikalla.

Pimeälentotoimintaan sopiva näytön kuluu pimentyä ilman sopivaa tulosignaalia. Yleisesti markkinoilla olevat näytöt menevät kauttaaltaan kirkkaan siniseksi sopivan tulosignaalin puuttuessa ja tämä hävittää ohjaajan pimeänäkökyvyn pitkäksi aikaa. Lyhyitä videosignaalin katkeamisia sattuu toisinaan esimerkiksi puun oksien ja muiden esteiden sattuessa videolähetteen reitille.

Ohjaajalle on hyödyllistä järjestää esimerkiksi VIRVE- radioyhteys johtopaikalle, jotta hän voi paremmin tuottaa pelastustoiminnanjohtajan haluamaa informaatiota. Käsiradion käyttäminen yhtä aikaa radio-ohjaimen kanssa ei ole järkevää, mutta korvanapilla ja tangentti- napilla lennättäjä voi osallistua viestiliikenteeseen luontevasti.

Osa lennokkiohjaimista on alttiita ulkopuolisille häiriöille, ja ohjaimen sekä vahvaa digitaali- pursketta lähettävän VIRVE-päätelaitteen yhteensopivuus on ehdottomasti kokeiltava etukäteen. Erityisen alttiita häiriöille ovat taajuussyntetisaattoreihin perustuvat 35 MHz ohjaimet. Osa syntetisaattorilähettemistä häiriintyy jo lennättäjän taskussa olevasta GSM puhelimesta.

Maa-asema ja videokuvan vastaanottaminen:

- Riittävä kantama vaatii suunta-antennin ja aktiivisen antennisuuntaimen.
- Katvealueen vuoksi tarvitaan usein videovalitsin ja toinen vastaanotin.
- Ympyräpolarisoidut antennit ovat suositeltavia.
- Täydellisessä järjestelmässä on kaksi maa-asemaa (johtopaikalla ja ohjaajalla).
- PTJ:n videokuvalla on järjestettävä helppokäyttöinen pysäytysmahdollisuus.
- Ohjaajan videonäytön tulee olla pimeätoimintaan soveltuva.
- Radiosignaalien yhteensopivuus on varmistettava etukäteen.

6 POHDINTA

Pelastustoiminnan johtamiseen soveltuvalle UAV- laitteistolle muodostuu lista vaatimuksia, joita sen on täytettävä. Teknisten vaatimuksien lista on opinnäytteeni suurimpia tuotoksia.

UAV- laitetta voidaan ohjata jatkuvassa näköyhteydessä. Lentolaitteen suurin etäisyys lennättäjältä on tällöin 500 m ja maksimi lentokorkeus alle 120 m. Erillistä tähytäjää ei mielestäni tarvita, mikäli onnettomuuspaikalla on riittävän avoin näkyvyys. Osa pelastustehtävistä suoritetaan niin tiheän rakennuskannan tai puuston alueella, ettei UAV voi tuottaa lisäinformaatiota turvallisesti.

UAV-toiminnassa on aina huomioitava mahdollinen radiohäiriö ja lentäminen tulee aina tehdä paikassa, josta UAV:n autopilotti voi turvallisesti ja esteisiin törmäilemättä palata lentotehtävän lähtöpisteeseen.

Pyöriväsiipisellä laitteella lentosuunta ja kameran suunta ovat toisistaan riippumattomia. Mielestäni pelastuslaitoksen käytössä pyöriväsiipinen lentolaite on soveltuvampi. Se on myös vakaampi kamera-alusta pyörteisessä ilmassa huomattavasti pienemmän tuulipinta-alan ansiosta. Kiinteäsiipinen lentolaite on mahdollisesti sopiva, mutta siinä lennonvakautus ja kameran vakautusjärjestelmien on kytkeydyttävä toisiinsa, jotta kiinnostuksen kohdetta voidaan seurata kameralla ilman jatkuvaa kameran suunnan korjaamista.

Lentolaitteen on oltava riittävän pieni mahtuakseen ajoneuvoon. Se tulee olla nopeasti saatettavissa lentokuntoiseksi ja sen tulee lähettää kuvaa langattomasti sekä johtopaikalle ja lennättäjälle. Lennättäjälle on lähetettävä kuvan lisäksi myös lentoarvoja kuten kompassisuunta, etäisyys, korkeus, akun jäljellä oleva kapasiteetti.

Lentolaitteen akkujen tulee olla ladattavissa nopeasti täyteen. Lataus on oltava mahdollista myös kenttäolosuhteissa ja jopa hälytysajon aikana. Lentolaitteen akut on oltava nopeasti vaihdettavissa. Hot swap -ominaisuus akunvaihdossa on suositeltava, jotta GPS ei hidasta akun vaihtamista. Yhden akun maksimi toiminta-ajasta voidaan tinkiä ketteryuden, hyötykuorman ja käytettävyyden parantamiseksi, mutta akullisella on oltava mahdollista leijua ainakin 20 minuuttia kerrallaan.

Multikopterin optimirakenteena pidän kuuden moottorin heksakopteri-rakennetta. Myös nelimoottorinen quadrokopteri soveltuu tehtävään hyvin, mutta siinä on kiinnitettävä erityistä huomiota moottoreiden luotettavuuteen.

Pelastustoiminnan johtamisessa käytettävän UAV:n tulee kyetä lentämään myös pimeässä, kevyessä sateessa ja tuulisessa säässä. Tuulen kestävyys on multikoptereilla hyvä, mutta tämän ominaisuuden saavuttaminen syö hieman maksimaalista lentoaikaa. Multikopterin odotuttaminen ilmassa on aina tehotonta, kopteria ei kannata nostaa taivaalle ilman sille soveltuvaa tehtävää.

UAV:n hyötykuormana tarvitaan videokameraa, jota tulee kyetä etäohjaamaan maasta. Kamerassa on oltava video out -liitäntä, jonka prosessointiviive on mahdollisimman lyhyt. Jo alle sekunnin viive kuvassa estää kopterin ohjaamisen sen välityksellä. Videokameran perään on liitettävä luotettavasti myös vaativassa säässä 500 m kantamaan pystyvä, mutta kuitenkin radio-ohjainta häiritsemätön videolinkki.

Lennättäjän on myös kyettävä vaihtelevaan OSD-dataa videokuvan päällä ja tarvittaessa poistamaan kaikki videokuvaan kuulumaton data kuvasta. Videokameraan vaaditaan ainakin kohtuullinen zoom-objektiivi, jota tulee kyetä säätämään etäkäyttöpaikasta.

Videokamera on vakautettava tarjolla olevista tekniikoista parhaalla mahdollisella tavalla. Tätä kirjoittaessa parhaalta vaikuttava tekniikka on harjattomiin moottoreihin ja kiihtyvyyssantureihin perustuva Brushless gimbal -tekniikka. Vakaimen on oltava rakenteeltaan roiskevesi- ja pölysuojattu. Moduuleina vaihdettavat kamerat ovat suositeltavia ja vakautuksen säätöarvojen on oltava nopeasti ja helposti vaihdettavissa kameran massaa vastaavaksi.

Pimeällä kopteriin on oltava mahdollista vaihtaa infrapunavaloon reagoiva lämpökamera. Lämpökamerassa zoom-ominaisuus ei ole aivan välttämätön, mutta vähintäänkin suositeltava ominaisuus. Lämpökameran tulee kuitenkin olla katselukulmaltaan riittävän kapea, jotta kuvan erottelevuus säilyy sen matalammasta resoluutiosta huolimatta myös ilmasta maahan kuvauksessa. Siinäkin on oltava reaaliaikainen lyhyt latenssinen video-out -liitäntä videolinkkiä varten. Kaikkia vaatimuksia täyttävää laitekokonaisuutta ei tätä kirjoittaessa ole vielä saatavilla.

Järjestelmä on vielä koottava itse eri lähteistä.

LÄHTEET

Associated Newspapers Ltd. 2011. *First clear pictures show the true devastation at the Fukushima nuclear plant as Japan files unmanned drone over stricken reactor.* Daily Mail Online. Linkki: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-1372589/First-clear-pictures-true-devastation-Fukushima-nuclear-plant-Japan-fliesunmanned-drone-stricken-reactor.html?ito=feeds-newsxml>. 20.11.2014

Ilmailulaki 1194/2009.

Ilmailuhallinto 2006. *OPS MI-1 30.11.2006. Lentosäännöt.* Ilmailumääräys. Nykyisin Liikenteen turvallisuus virasto (Trafi).

Keski- Suomen Pelastuslaitos 2013. *Vaaratilanne Laukaan Vihtavuoressa – Suuronnettomuuden uhka.* Data-esitys onnettomuuden palautetilaisuudessa Jyväskylän Paviljongissa 9.9.2013.

Neuvonen, T., Honkanen, M., Lerssi, R. ja Leppioja, T. 2007. *P3-Käsikirja, Toimintaohjeet.* Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö. Savion Kirjapaino Oy. Kerava.

Onnettomuustutkintakeskus 2014. *Räjähdekontin kuumeneminen räjähdetehtaalla Laukaan Vihtavuoressa 10.7.2013.* Tutkintaselostus 9/2014. Helsinki.

TRAFI/2164/03.04.00.00/2014. *OPS MI-23 Lentotyö.* Määräysluonnos. julkaistu 18.2.2014 lausuntoja varten

Pelastusopisto 2005. *Pelastustoiminnan johtaminen julkaisu 26.5.2005. Tutkimus- ja kehittämisyksikkö.* Pelastusopisto. Kuopio.

Pelastuslaki 379/2011.

Työturvallisuuslaki 738/2002.

Veneskari T. 2011. *Miehittämättömät ilma-alukset pelastusviranomaisten tilannekuvan muodostuksessa.* Opinnäytetyö. Savonia- Ammattikorkeakoulu. Kuopio.

Viestintävirasto 15 AF/2013M. *Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteis-
taajuuksista ja käytöstä.* Määräysliite. Viestintävirasto.

LIITTEET

LIITE 1. Erään potkurivalmistajan potkuritaulukko, josta näkyy potkurin staattisen työnnön ja sen vaatiman akselitehon välinen riippuvuus. Potkurimerkintä 9x47SF tarkoittaa, että potkurikehän halkaisija on 9 tuumaa, sen teoreettinen nousu yhdellä kierroksella on 4,7 tuumaa ja lavan muoto on hitaille pyörintänopeuksille optimoitu Slow Fly.

| APC Propeller Performance Data | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|-------------|------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------------|
| http://www.apcprop.com/v/downloads/PERFILES_WEB/datalist.asp | | | | | | | | | |
| DEFINITIONS: | | | | | | | | | |
| Ct=T/(rho * n**2 * D**4) (thrust coef,) | | | | | | | | | |
| Cp=P/(rho * n**3 * D**5) (power coef,) | | | | | | | | | |
| PROP RPM | Ct | Cp | PWR (Hp) | PWR (W) | Torque (Lbf-in) | Torque (kgf-m) | Thrust (Lbf) | Thrust (g) | EFFICIENCY (g/W) |
| 9x47SF | | | (Hp) | (W) | (Lbf-in) | (kgf-m) | (Lbf) | (g) | (g/W) |
| 3000 | 0,1264 | 0,0838 | 0,011 | 8 | 0,226 | 0,026 | 0,238 | 108 | 13,16 |
| 4000 | 0,1242 | 0,0819 | 0,025 | 19 | 0,392 | 0,045 | 0,415 | 188 | 10,10 |
| 5000 | 0,1234 | 0,0799 | 0,047 | 35 | 0,598 | 0,069 | 0,645 | 293 | 8,35 |
| 6000 | 0,123 | 0,078 | 0,08 | 60 | 0,84 | 0,097 | 0,926 | 420 | 7,04 |
| 7000 | 0,1232 | 0,0766 | 0,125 | 93 | 1,124 | 0,129 | 1,262 | 572 | 6,14 |
| 8000 | 0,1248 | 0,0766 | 0,186 | 139 | 1,467 | 0,169 | 1,67 | 758 | 5,46 |
| 9000 | 0,1258 | 0,0768 | 0,266 | 198 | 1,862 | 0,215 | 2,129 | 966 | 4,87 |
| 10000 | 0,1239 | 0,0759 | 0,361 | 269 | 2,274 | 0,262 | 2,59 | 1175 | 4,36 |
| 10x38SF | | | (Hp) | (W) | (Lbf-in) | (kgf-m) | (Lbf) | (g) | (g/W) |
| 2000 | 0,1152 | 0,0731 | 0,005 | 4 | 0,148 | 0,017 | 0,147 | 67 | 17,88 |
| 3000 | 0,1117 | 0,07 | 0,015 | 11 | 0,319 | 0,037 | 0,32 | 145 | 12,98 |
| 4000 | 0,1088 | 0,0664 | 0,034 | 25 | 0,539 | 0,062 | 0,555 | 252 | 9,93 |
| 5000 | 0,1067 | 0,0626 | 0,063 | 47 | 0,793 | 0,091 | 0,85 | 386 | 8,21 |
| 6000 | 0,1062 | 0,0602 | 0,105 | 78 | 1,099 | 0,127 | 1,218 | 552 | 7,06 |
| 7000 | 0,1061 | 0,0594 | 0,164 | 122 | 1,476 | 0,170 | 1,656 | 751 | 6,14 |
| 8000 | 0,1063 | 0,059 | 0,243 | 181 | 1,914 | 0,221 | 2,168 | 983 | 5,43 |
| 9000 | 0,1074 | 0,0591 | 0,346 | 258 | 2,426 | 0,280 | 2,771 | 1257 | 4,87 |
| 10000 | 0,1077 | 0,059 | 0,475 | 354 | 2,992 | 0,345 | 3,43 | 1556 | 4,39 |
| 10x47SF | | | (Hp) | (W) | (Lbf-in) | (kgf-m) | (Lbf) | (g) | (g/W) |
| 2000 | 0,1222 | 0,0797 | 0,005 | 4 | 0,162 | 0,019 | 0,156 | 71 | 18,98 |
| 3000 | 0,1195 | 0,0777 | 0,017 | 13 | 0,354 | 0,041 | 0,343 | 156 | 12,27 |
| 4000 | 0,1178 | 0,075 | 0,039 | 29 | 0,608 | 0,070 | 0,601 | 273 | 9,37 |
| 5000 | 0,1167 | 0,072 | 0,072 | 54 | 0,913 | 0,105 | 0,93 | 422 | 7,86 |
| 6000 | 0,1169 | 0,0702 | 0,122 | 91 | 1,281 | 0,148 | 1,341 | 608 | 6,69 |
| 7000 | 0,1186 | 0,07 | 0,193 | 144 | 1,739 | 0,200 | 1,851 | 840 | 5,83 |
| 8000 | 0,1193 | 0,0697 | 0,287 | 214 | 2,262 | 0,261 | 2,433 | 1104 | 5,16 |
| 9000 | 0,1191 | 0,0694 | 0,407 | 303 | 2,851 | 0,328 | 3,073 | 1394 | 4,59 |
| 10000 | 0,1183 | 0,069 | 0,555 | 414 | 3,499 | 0,403 | 3,77 | 1710 | 4,13 |
| 11x47SF | | | (Hp) | (W) | (Lbf-in) | (kgf-m) | (Lbf) | (g) | (g/W) |
| 2000 | 0,1156 | 0,0746 | 0,008 | 6 | 0,244 | 0,028 | 0,216 | 98 | 16,42 |
| 3000 | 0,1126 | 0,072 | 0,025 | 19 | 0,529 | 0,061 | 0,473 | 215 | 11,51 |
| 4000 | 0,1109 | 0,0676 | 0,056 | 42 | 0,883 | 0,102 | 0,828 | 376 | 8,99 |
| 5000 | 0,1107 | 0,0649 | 0,105 | 78 | 1,324 | 0,153 | 1,291 | 586 | 7,48 |
| 6000 | 0,1121 | 0,0643 | 0,18 | 134 | 1,889 | 0,218 | 1,883 | 854 | 6,36 |
| 7000 | 0,1131 | 0,064 | 0,284 | 212 | 2,56 | 0,295 | 2,584 | 1172 | 5,53 |
| 8000 | 0,1133 | 0,0637 | 0,422 | 315 | 3,328 | 0,383 | 3,382 | 1534 | 4,87 |
| 9000 | 0,114 | 0,0638 | 0,602 | 449 | 4,217 | 0,486 | 4,307 | 1954 | 4,35 |
| 10000 | 0,1115 | 0,0628 | 0,814 | 607 | 5,13 | 0,591 | 5,2 | 2359 | 3,89 |
| 12x38SF | | | (Hp) | (W) | (Lbf-in) | (kgf-m) | (Lbf) | (g) | (g/W) |
| 2000 | 0,1018 | 0,0636 | 0,01 | 7 | 0,321 | 0,037 | 0,269 | 122 | 16,36 |
| 3000 | 0,0971 | 0,0578 | 0,031 | 23 | 0,656 | 0,076 | 0,578 | 262 | 11,34 |
| 4000 | 0,0947 | 0,0526 | 0,067 | 50 | 1,062 | 0,122 | 1,001 | 454 | 9,09 |
| 5000 | 0,0948 | 0,0509 | 0,127 | 95 | 1,604 | 0,185 | 1,565 | 710 | 7,50 |
| 6000 | 0,0971 | 0,0507 | 0,219 | 163 | 2,304 | 0,265 | 2,309 | 1047 | 6,41 |
| 7000 | 0,0978 | 0,0504 | 0,346 | 258 | 3,115 | 0,359 | 3,166 | 1436 | 5,57 |
| 8000 | 0,0965 | 0,0498 | 0,511 | 381 | 4,022 | 0,463 | 4,079 | 1850 | 4,86 |
| 9000 | 0,0974 | 0,0499 | 0,728 | 543 | 5,098 | 0,587 | 5,212 | 2364 | 4,35 |
| 10000 | 0,0966 | 0,0499 | 0,999 | 745 | 6,294 | 0,725 | 6,383 | 2895 | 3,89 |

LIITE 2. Simulointi akkukapasiteetin lisäämisen vaikutuksesta lentoaikaan kopterin leijunta-aikaan. Ylimääräisen massan taivaalla pitäminen on tehotonta.

| | | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Design Fundamentals: metric units | # of Rotors: 4 | xCopter Weight: 685 g without Drive | Field Elevation: 100 m ASL | Air Temp: 15 °C | Pressure (QNH): 1013 hPa | |
| Battery: (continuous / max. C) - charge state LiPo 4500mAh - 20/30C normal | # serial: 4 s | # parallel: 1 P | Capacity: 4500 mAh | Resistance: 0.005 Ohm | Volt per Cell: 3.7 V | Weight per Cell: 118 g |
| Controller: Custom | Resistance: 0.010 Ohm | Continuous Current: A | max. Current: A | Weight: 10 g | | Motor Weight: 71 g |
| Motor: Manufacturer - Type (Kv in rpm/V) Turnigy 2217-20T (860) | Kv (w/o torque): 860 rpm/V | Resistance: 0.162 Ohm | no-load Current: 0.58 A @ 10 V | Limit (up to 20s): 22 A | # mag. Poles: 10 | Case length: 21 mm |
| Propeller: Type - yoke twist Custom 0° | Diameter: 10 inch | Pitch: 4.5 inch | # Blades: 2 | Prop Const: 1.18 | Gear Ratio: 1.00 :1 | <input type="button" value="calculate"/> |

Approx. Values:

Warning:

| | | | | | | |
|---|---|--|----------------------------------|---|--|----------------------------|
| Battery: | max. Load: 14.3 C | Voltage: 13.52 V | Rated Voltage: 14.8 V | Flight Time*: 4.21 min | Flight Time Hover: 14.44 min | Weight: 472 g |
| Motor @ Maximum: Values per Motor | max. Current: 16.04 A | Voltage: 13.36 V | Revolutions: 9252 rpm | el. Power (in): 214.24 W | mech. Power (out): 166.08 W | Efficiency: 77.5 % |
| Optimal Efficiency: | Current: 7.65 A | Voltage: 14.11 V | Revolutions: 11070 rpm | el. Power (in): 107.95 W | mech. Power (out): 89.89 W | Efficiency: 83.3 % |
| Motor @ Hover: Values per Motor | Current: 3.97 A | Voltage: 14.44 V | Throttle (linear): 43 % | el. Power (in): 57.39 W | mech. Power (out): 45.19 W | Efficiency: 78.7 % |
| Entire Drive: | Total Current: 15.9 A to hover 64.15 A maximum | Weight: 875.6 g Drive 1560.6 g AL/W | add. Payload: 1050 g 37.04 oz | P (in): 235.26 W to hover 949.57 W maximum | P (out): 180.75 W to hover 664.32 W maximum | Efficiency: 76.8 % 70 % |

| | | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Design Fundamentals: metric units | # of Rotors: 4 | xCopter Weight: 685 g without Drive | Field Elevation: 100 m ASL | Air Temp: 15 °C | Pressure (QNH): 1013 hPa | |
| Battery: (continuous / max. C) - charge state LiPo 4500mAh - 20/30C normal | # serial: 4 s | # parallel: 2 P | Capacity: 9000 mAh | Resistance: 0.005 Ohm | Volt per Cell: 3.7 V | Weight per Cell: 118 g |
| Controller: Custom | Resistance: 0.010 Ohm | Continuous Current: A | max. Current: A | Weight: 10 g | | Motor Weight: 71 g |
| Motor: Manufacturer - Type (Kv in rpm/V) Turnigy 2217-20T (860) | Kv (w/o torque): 860 rpm/V | Resistance: 0.162 Ohm | no-load Current: 0.58 A @ 10 V | Limit (up to 20s): 22 A | # mag. Poles: 10 | Case length: 21 mm |
| Propeller: Type - yoke twist Custom 0° | Diameter: 10 inch | Pitch: 4.5 inch | # Blades: 2 | Prop Const: 1.18 | Gear Ratio: 1.00 :1 | <input type="button" value="calculate"/> |

Approx. Values:

Warning:

| | | | | | | |
|---|--|---|---------------------------------|--|--|------------------------------|
| Battery: | max. Load: 7.6 C | Voltage: 14.11 V | Rated Voltage: 14.8 V | Flight Time*: 7.94 min | Flight Time Hover: 19.74 min | Weight: 944 g |
| Motor @ Maximum: Values per Motor | max. Current: 17.21 A | Voltage: 13.94 V | Revolutions: 9590 rpm | el. Power (in): 239.9 W | mech. Power (out): 185.08 W | Efficiency: 77.1 % |
| Optimal Efficiency: | Current: 7.79 A | Voltage: 14.41 V | Revolutions: 11308 rpm | el. Power (in): 112.26 W | mech. Power (out): 93.53 W | Efficiency: 83.3 % |
| Motor @ Hover: Values per Motor | Current: 5.81 A | Voltage: 14.51 V | Throttle (linear): 56 % | el. Power (in): 84.36 W | mech. Power (out): 69.52 W | Efficiency: 82.4 % |
| Entire Drive: | Total Current: 23.26 A to hover 68.94 A maximum | Weight: 1394.8 g Drive 2079.8 g AL/W | add. Payload: 783 g 27.62 oz | P (in): 344.21 W to hover 1018.83 W maximum | P (out): 278.08 W to hover 740.32 W maximum | Efficiency: 80.8 % 72.7 % |

| | | | | | | |
|---|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Design Fundamentals: metric units | # of Rotors: 4 | xCopter Weight: 685 g without Drive | Field Elevation: 100 m ASL | Air Temp: 15 °C | Pressure (QNH): 1013 hPa | |
| Battery: (continuous / max. C) - charge state LiPo 4500mAh - 20/30C normal | # serial: 4 s | # parallel: 3 P | Capacity: 13500 mAh | Resistance: 0.005 Ohm | Volt per Cell: 3.7 V | Weight per Cell: 118 g |
| Controller: Custom | Resistance: 0.010 Ohm | Continuous Current: A | max. Current: A | Weight: 10 g | | Motor Weight: 71 g |
| Motor: Manufacturer - Type (Kv in rpm/V) Turnigy 2217-20T (860) | Kv (w/o torque): 860 rpm/V | Resistance: 0.162 Ohm | no-load Current: 0.58 A @ 10 V | Limit (up to 20s): 22 A | # mag. Poles: 10 | Case length: 21 mm |
| Propeller: Type - yoke twist Custom 0° | Diameter: 10 inch | Pitch: 4.5 inch | # Blades: 2 | Prop Const: 1.18 | Gear Ratio: 1.00 :1 | <input type="button" value="calculate"/> |

Approx. Values:

Warning:

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------------------|---------------------------------|--|--|------------------------------|
| Battery: | max. Load: 5.2 C | Voltage: 14.33 V | Rated Voltage: 14.8 V | Flight Time*: 11.47 min | Flight Time Hover: 21.43 min | Weight: 1416 g |
| Motor @ Maximum: Values per Motor | max. Current: 17.65 A | Voltage: 14.15 V | Revolutions: 9712 rpm | el. Power (in): 249.8 W | mech. Power (out): 192.36 W | Efficiency: 77 % |
| Optimal Efficiency: | Current: 7.83 A | Voltage: 14.51 V | Revolutions: 11390 rpm | el. Power (in): 113.64 W | mech. Power (out): 94.7 W | Efficiency: 83.3 % |
| Motor @ Hover: Values per Motor | Current: 8.03 A | Voltage: 14.51 V | Throttle (linear): 70 % | el. Power (in): 116.5 W | mech. Power (out): 97.11 W | Efficiency: 83.4 % |
| Entire Drive: | Total Current: 32.13 A to hover 70.59 A maximum | Weight: 1914 g Drive 2599 g AL/W | add. Payload: 351 g 12.38 oz | P (in): 475.46 W to hover 1044.88 W maximum | P (out): 388.45 W to hover 769.44 W maximum | Efficiency: 81.7 % 73.6 % |

LIITE 3. Esimerkki harjoitussuunnitelma pelastuslaitoksen suuronnettomuus

harjoitukseen liittyvästä UAV- lennoista. Lentolupaa ei tullut ja kuvauslennot jäi suorittamatta.

Harjoitussuunnitelma

UAV:n (miehittämättömän ilma-aluksen) käyttäminen osana KIP- pohjoisen alueen suuronnettomuusharjoitusta 12.10.2012.

Harjoitus skenaario:

Onnettomuudessa harjoitellaan teollisuusalueella putkisillalla numero 5 tapahtuvan räjähdys ja sitä seuraavan tulipalon pelastustyötä. Räjähdyksipaikalla on muutama potilas ja pieni vaarallisenaineen vuoto. Räjähdyksen seurauksena syttyy hetkellinen voimakas tulipalo ja hetkellinen myrkyllisen aineen päästö. Tulipalo leviää putkisillalta viereisen Cu-elektrolyysi rakennuksen kattorakenteisiin. Tulipalon sammuttaminen vaatii kahden pelastusjoukkueen käyttöä.

Harjoituksen aikataulu:

Harjoitukseen sisältyy koulutuspäivä 11.10 ja varsinainen harjoitus järjestetään 12.10 klo 9.00 alkaen.

UAV- toiminnan tarkoitus:

UAV laitetta käytetään tutkimukseen osana Savonia- Ammattikorkeakoulun Palopäällystön koulutuslinjan opinnäytetyötä. Opinnäytteen nimi on; UAV:n käyttö pelastustoiminnan johtamisen tukena. Laitetta käyttää Palomestari ja palopäällystöoppilas Jyri Jäntti. Työn tarkoituksena on saada käytännön kokemuksia UAV monimoottorikopterin käytöstä pelastustoiminnan tukitoimissa.

Ilma-aluksen ominaisuudet:

Harjoituksessa käytettävä lentolaite on neliroottorinen ns. quadrokopteri. Laitteen lentopaino on noin 1,6kg. Laitteen on mahdollista lentää täysin autopilotin ohjaamana, mutta harjoituksessa kopteria ajetaan käsiohjauksella ja näköyhteydellä. Hetkellisesti konetta käytetään autopilotin paikallaan pitämänä ns. loiter- tilassa. Laite kuvaa ilmasta videokuvaa ja lähettää sen langattomasti ohjaajalleen. Maahan lähetetyn kuvan lisäksi kuva tallentuu myös HD- tasoisena kameran muistikortille. Harjoituksessa on tarkoitus kokeilla kameraa sekä video, että still- tilassa. Kamerassa ei käytetä hyrrävakautusta eikä zoom- objektiivia, eli kuvasta ei erota pieniä yksityiskohtia kuin lähietäisyydeltä kuvattaessa.



Quadrokopteri.

Tietoturva ja salassapito:

Harjoituksessa kuvattavaa materiaalia käytetään palopäällystökurssin opinnäytetyössä ja pelastustoimen tutkimustoiminnassa. Kuvamateriaalia ei julkaista ilman lupaa yleisessä tietoverkossa. Halutessaan teollisuusyritysten edustajilla on oikeus sallia, rajoittaa tai kieltää kuvamateriaalin käyttöä. Tallenteita esitetään osana tutkimustuloksia opinnäytetyöseminaarissa Pelastusopistolla, mikäli yrityksen edustajat sen sallivat. Ilma-aluksen kuva lähetetään maahan myös analogisena salaamattomana videona. Teoriassa tämän salaamattoman signaalin sieppaaminen myös tehdasalueen ulkopuolelta on mahdollista. Aiemmin suoritetuissa kokeissa videolinkin kantomatoksi on havaittu n.300-500m ilmasta maahan ilman suuria suunta-antenneja. Signaalin vastaanottamiseen tarvittavan 5,8GHz vastaanottimen sattuminen samalle taajuudelle signaalin kantavuusalueelle on pidettävä äärimmäisen epätodennäköisenä.

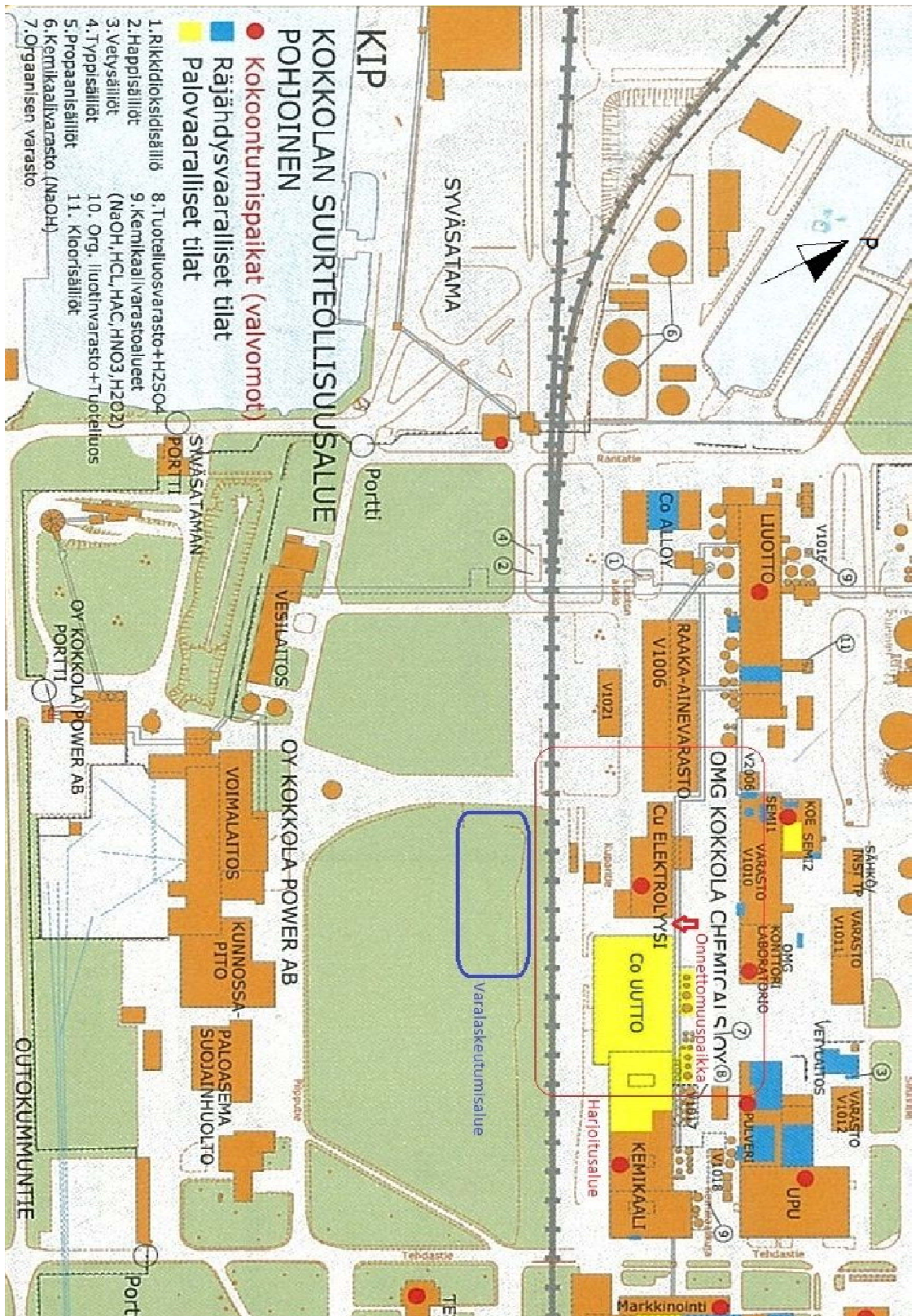
Riskiarviointi:

Quadro- kopterin tekniikka on lennokkiharrastajien suunnittelemaa. Tekniikka on vielä kehitysasteella ja sen vikaantuminen lennolla on mahdollista. Kopteri on kuitenkin tarkoituksella rakennettu niin pieneksi, että sen aiheuttamaa riskiä kypärällä suojautuneille ihmisille on pidettävä vähäisenä. Maahan syöksyssä on teoriassa mahdollista syttyä pieni tulipalo ja törmäyspaikalla voi myös olla hyvin paikallinen sirpaleiden lentämisvaara. Lennätys suoritetaan tyhjiällä asfalttialueilla ja ihmisten päällä lentämistä tarkoituksella vältetään. Ennen lentotoimintaa on mahdollista sopia mahdollisista lentokieltoalueista ja kohteista joita ei saa kuvata. Mahdollisessa vikatilanteessa kopterille on sovittu pakko-laskeutumisalueeksi nurmialue Cu elektrolyysin ja voimalaitoksen väliin.

| Riski: | Seuraus: | Ehkäisevä toimenpide: |
|----------------------------|----------------------------------|--|
| Ihmisjoukkoon puutoaminen | Säikähtäminen, haavat, mustelmat | Kopteria ei lennetä tietoisesti ihmisten päällä |
| Rakennuksiin törmääminen | Pinnan naarmuuntuminen | Vältetään rakennusten välittömässä läheisyydessä lentämistä |
| Oikosulku maahan-syöksyssä | Pieni tulipalo | Vältetään lentämistä syttymisvaarallisten tilojen läheisyydessä |
| Autopilotin häiriö | Kopterin karkaaminen | Ei täysin vältettävissä. Kaikki ohjainkäskyt menevät autopilotin läpi |

Rajoitukset ilma-aluksen käytölle:

- Teollisuuden edustajan lupa käyttää UAV- kopteria kuvaamiseen.
- Kopterilentotoiminta aloitetaan vain, jos sen lennättäjä pitää sitä turvallisena.
- Lentotoimintaa suoritetaan vain alueilla, jotka on todettu turvallisiksi.
- Kopterilla ei lennetä tietoisesti ihmisten päällä.
- Kopterille on sovittu vikatilanteen varalta varalaskutumisaalue, jolla ei ole ihmisiä.
- Lentokorkeutena pidetään alle 150m(500ft). Toimitaan näkölento- olosuhteissa (LOS) ja alle 500m etäisyydellä lennättäjästä. Toiminta ei aiheuta ilmatilarajoituksia tai vaaraa muulle ilmailulle.
- Tosivaara- keskeyttää lentotoiminnan



Harjoitusalue.