

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Lentokonetekniikka
Mikko Pajunen – Jani Sinivaara

Opinnäytetyö

UAV-tekniikan kartoittaminen ja TAMKin UAV-projektin
pohjustaminen

Työn ohjaaja DI Simo Marjamäki
Työn tilaaja Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere 5/2010

Tekijät	Mikko Pajunen, Jani Sinivaara
Työn nimi	UAV-tekniikan kartoittaminen ja TAMKIn UAV-projektin pohjustaminen
Sivumäärä	89 sivua
Valmistumisaika	Toukokuu 2010
Työn ohjaaja	DI Simo Marjamäki
Työn tilaaja	Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

TAMKIn lentokonetekniikan osaston pyrkimyksenä on päästä osaksi UAV-tekniikkaa kehittävien tahojen verkostoa, jota ollaan panemassa alulle *Suomen puolustus- ja ilmailuteollisuusyhdistyksen* perustaman ILO-työryhmän tekemän selvityksen perusteella. Verkostoitumisen helpottamiseksi koululle päätettiin tehdä UAV-tekniikasta kattava selvitys, joka sisältää UAV-tekniikakartoituksen ja TAMKIn UAV-projektin pohjustuksen. Jotta aiheesta saataisiin kattava aloituspaketti, päätettiin esitetyt kaksi aihetta koota yksiin kansiin.

Näin ollen opinnäytetyö koostuu kahdesta pääosista, joista ensimmäinen osa on nimeltään *UAV-tekniikan kartoitus*. Kartoitus on teoriapohjainen tutkielma UAV-tekniikan historiasta ja nykysuuntauksista sekä UAV-tekniikan yleistymisen haasteista siviili-ilmailussa.

Tutkimuksen toinen osa on nimeltään *TAMKIn UAV-projektin pohjustus*. Tutkimuksessa selvitetään, minkä tyyppinen UAV-kone soveltuisi parhaiten TAMKIn UAV-projektille asetettuihin käyttösovelluksiin eli ilmanäytteenottoon ja lämpökamerakuvaukseen. Kun kone tyyppi on valittu, sille tehdään toteutussuunnitelma.

Tutkimuksen viimeisessä osassa työn pääosiot sidotaan yhteen. Osa on nimeltään *Johtopäätökset ja jatkokehityssuunnitelmat*, ja siinä tuodaan esiin ajatuksia opinnäytetyön onnistumisesta ja TAMKIn lentokonetekniikan osaston verkostoitumisesta muiden UAV-aiheen parissa työskentelevien tahojen kanssa.

Opinnäytetyön ensimmäisessä osassa onnistuttiin antamaan UAV-tekniikan läpileikkauksesta selkeä yleiskuva, jonka pohjalta UAV-tietämystä on helppo lähteä syventämään. Työn toisessa osassa tehtiin konekartoitus, jonka perusteella TAMKIn UAV-kone tyyppiä valittiin quadrotor. Quadrotorille onnistuttiin tekemään selkeä, nopeasti toteutettavissa oleva valmistussuunnitelma, jolle saatiin asetettua tavoitteiden mukainen alhainen budjetti. Lopuksi tehtiin ehdotelma TAMKIn UAV-projektin jatkokehittämisestä ja yhteistyötoiminnan lisäämisestä, joiden avulla verkostoitumista muiden alan toimijoiden kanssa voitaisiin edistää. Näin ollen UAV-tekniikasta voitaisiin rakentaa TAMKille suuntauksen ala, jolla olisi kauaskantoisia kehitysnäkymiä.

Writers	Mikko Pajunen, Jani Sinivaara
Thesis	UAV Technology Survey and Introduction to TAMK's UAV Project
Pages	89 pages
Graduation time	May 2010
Thesis Supervisor	MSc Simo Marjamäki
Co-operating Company	Tampere University of Applied Sciences

ABSTRACT

The Department of Aeronautical Engineering at Tampere University of Applied Sciences aspires to be a part of the oncoming network of UAV technology developers. The network will be based on a survey carried out by the working group ILO of the Finnish Defence and Aviation Association. In order to make the networking more achievable for TAMK, the Department of Aeronautical Engineering suggested this thesis to concentrate on making a survey concerning UAV technology. This UAV survey consists of a UAV technology study and an introduction to TAMK's UAV project. In order to cover a wider field, these separate subjects were decided to be gathered in one report.

Hereby this thesis consists of two main units. In the first unit a *UAV technology survey* is carried out. The survey is a theory based study concentrating on the history of UAV technology, on the trends of modern UAV-technology and on the challenges that the growth of UAV technology sets on civil aviation.

The second unit covers an *introduction to TAMK's UAV project*. Two tasks were appointed to the UAV project: air sample collecting and thermal video monitoring. The goal of this unit is to clarify what kind of an aircraft would be most suitable to complete these tasks. Once the most suitable UAV aircraft is chosen, a design plan for its manufacturing will be prepared.

At the end of the thesis, in unit three, the two main units were brought together. This unit reports the conclusions of the thesis and introduces ideas for future development for the TAMK's UAV project. The unit gathers the positive influences of the thesis and presents some ideas on how TAMK could start networking with other UAV technology developers.

The first main unit was a success. It managed to give a clear overview on UAV technology, and therefore provides an excellent basis for future studies. The second main unit provides a justified clarification of UAV-aircrafts. Based on this clarification, a quadrotor rotorcraft was chosen as the aircraft for TAMK's UAV project. A well-defined design plan was prepared for the quadrotor. This plan could be rapidly deployed if needed, and the budget was kept low as was planned. In the end a proposal was made for the future development of TAMK's UAV projects and for increasing networking with other UAV developers. Based on these ideas, the UAV technology could become a sustainable field of study with long lasting ideas of development for TAMK.

Alkusanat

Haluamme kiittää Tampereen ammattikorkeakoulun kirjaston informaatikko Marja-Liisa Timperiä hänen avustaan tämän työn lähdemateriaalin kartoituksessa. Olemme erittäin otettuja siitä, että hän jaksoi nähdä niin paljon vaivaa tiedonhakuprosessin helpottamiseksi.

Lisäksi tahdomme kiittää Katja Ilmosta hänen panoksestaan tämän työn kieliasuun liittyvissä asioissa.

Mikolta: Kiitti kulta, susta on ollut korvaamaton apu!

Tampereella toukokuussa 2010

Mikko Pajunen

Jani Sinivaara

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	8
-----------------	---

OSA I

UAV-Teknologian kartoittaminen

2 UAV-tekniikan historia	11
2.1 UAV-tekniikkaan johtanut historia	11
2.2 Moderni UAV 1900-luvun alusta.....	15
3 Nykyajan UAV-projekteja	17
3.1 Lentokone-UAV	17
3.2 Helikopteri-UAV	21
3.3 Quadrotor-UAV	23
3.3.1 X-4 Flyer	24
3.3.2 STARMAC.....	28
3.3.3 OS4.....	29
3.3.4 Flying Unit.....	31
4 UAV:n yleistyminen siviili-ilmailussa	32
4.1 UAV:n operointiin liittyvät ongelmat	32
4.2 UAV-järjestelmien integrointi kansallisiin ilmatilajärjestelmiin.....	34
4.3 UAV-tekniikan suunta Suomessa	36
4.4 Siviili-UAV:ta koskevat säädökset Suomessa	37

OSA II

TAMK:n UAV-projektin pohjustaminen

5 UAV-konetyypin selvitys.....	40
5.1 UAV-koneen käyttösovellukset.....	40
5.2 Suunnittelukriteerit.....	41
5.3 UAV-koneen valintaprosessi	42
5.3.1 Lentolaitteiden jaottelu ja pisteytys	43
5.3.2 Kriteeripohjainen vertailu.....	46
5.4 UAV-koneen valinta	51

6 Valmistussuunnitelma	53
6.1 Quadrotor-UAV:n toimintaperiaate	53
6.2 Tarvittavat komponentit	55
6.3 Komponenttien analysointi- ja määrittämisojelmät.....	57
6.3.1 Drive Calculator	58
6.3.2 MotoCalc.....	61
6.4 Komponenttien kokoluokan ja mittasuhteiden määrittely	63
6.5 Komponenttien valinta	68
6.6 Hintakartoitus ja toteutussuunnitelma.....	74

OSA III

Tutkimuksen johtopäätökset ja jatkokehitysmahdollisuudet

7 Johtopäätökset.....	79
8 Jatkokehitysjatukset	83
Lähdeluettelo	86

Lyhenteiden ja termien luettelo

ACC	Air Combat Command
ACTD	Advanced Concept Technology Demonstrations
APC	Atmospheric Pressure Casting
AUVSI	Association for Unmanned Vehicle Systems International
CFB	Carbon fiber
DSA	Detect Sense and Avoid
EPP	Expanded polypropylene
FAA	Federal Aviation Administration
GPS	Global Positioning System
HDPE	High Density Polyethylene
IMU	Inertial Measurement Unit
RC	Radio Control
SBC	Single Board Computer
STOL	Short Take-Off and Landing
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USAF	United States Air Force
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana on *Suomen Puolustus- ja Ilmailuteollisuusyhdistyksen* (PIA) perustaman Ilmailuteollisuuden ja lentotekniikan ohjelman (ILO) työryhmän aloittama selvitys Suomen ilmailun ja lentotekniikan tilasta ja tulevaisuudesta. Opinnäytetyön aloituspalaverissa ILO-työryhmän jäsen Heikki Aalto kertoi, että ILO-työryhmän aloittamassa selvityksessä aiotaan nostaa esiin miehittämättömien ilmailujärjestelmien (UAS/UAV, Unmanned Aerial System/Unmanned Aerial Vehicle) ja niihin liittyvien valmiuksien kehittäminen. Jos Suomessa lähdetäisiin kehittämään miehittämättömiä ilmailujärjestelmiä valtakunnallisella tasolla, voisi se luoda UAV-teknoologiaan liittyviä yhteistyöprojekteja, kun eri tahot verkostoituisivat keskenään. Tampereen ammattikorkeakoulu ottaisi mielellään osaa kyseisiin yhteistyöprojekteihin, joten opinnäytetyön aloituspalaverissa asetettiin opinnäytetyön tavoitteeksi TAMKIn lentokonetekniikan osaston tietotason ja valmiuksien parantaminen UAV-teknoologiaa silmällä pitäen. Opinnäytetyön tehtäviksi asetettiin UAV-teknologian kartoittaminen ja käytännön sovelluksiin perustuvan UAV-projektin toteuttaminen, sillä ne edesauttaisivat TAMKIn mahdollisuuksia päästä mukaan valtakunnallisiin yhteistyöprojekteihin.

Opinnäytetyö koostuu siis kahdesta erillisestä osasta, joista ensimmäinen on UAV-teknologian kartoitus ja toinen TAMKIn UAV-projektin pohjustaminen. Kahdesta erillisestä aiheesta huolimatta opinnäytetyö päätettiin koota yksiin kansiin, koska siten opinnäytetyöstä saataisiin TAMKille kattava aloituspaketti UAV-teknologiasta. Lisäksi molemmat osiot pohjautuvat samaan taustamateriaaliin, jonka kartoittamiseen on tarvittu kahden ihmisen panosta.

Osa I käsittelee UAV-teknologian kartoitusta. Tämä päätettiin ottaa opinnäytetyöhön omana osanaan, koska TAMKIn lentokonetekniikan linjalla ei vastaavaa selvitystä ole ollut saatavilla. UAV-teknologian kartoituksella pyritään tuomaan esille UAV-teknologian tämän hetkinen tilanne sekä kuvaus siitä, miten tähän pisteeseen ollaan tultu. Osio nojautuu vahvasti ennen varsinaista tutkimusta kerättyyn taustamateriaaliin, minkä seurauksena osio on vahvasti teoriapainotteinen. Luvussa 2 tutkitaan UAV-teknoologiaan johtanutta historiaa ja sitä, miten UAV-teknoologia on kehittynyt ajan kuluessa. Tämän jälkeen luvussa 3 tutkitaan nykyajan UAV-projekteja korostaen uusimpia suuntauksia.

Lopuksi luvussa 4 tutkitaan UAV:n yleistymisen aiheuttamia haasteita siviili-ilmailulle ja luodaan katsaus UAV-teknologian suuntaan Suomessa.

Osa II käsittelee TAMKIn UAV-projektin pohjustusta. TAMKille suunniteltavan UAV-koneen käyttösovellukset määriteltiin heti työn aiheen selviämisen yhteydessä. Nämä käyttösovellukset ovat ilmanäytteenotto ja lämpökuvaus. Luvussa 5 perehdytään pohjustuksen ensimmäiseen vaiheeseen eli rakennettavan UAV-lentolaitteen valintaan. Käyttösovellusten perusteella projektille rakennetaan suunnittelukriteerit. Tämän jälkeen kartoitetaan millainen lentolaite täyttäisi parhaiten nämä suunnittelukriteerit. Kartoitus perustuu UAV-taustamateriaaliin, joka on kerätty yhteen tätä tutkimusta varten. Tämän kartoituksen uskotaan antavan riittävän selkeän kuvan siitä, mikä konetyyppi kannattaa valita TAMKIn UAV-projektiin.

Luku 6 koostuu pohjustuksen toisesta vaiheesta, jossa tehdään valmistussuunnitelma valitulle UAV-koneelle. Valmistussuunnitelmassa valitun koneen toimintaperiaate ja komponentit käsitellään tarkemmin. Lisäksi koneelle pyritään tekemään suunnittelukriteereihin perustuva komponenttikartoitus. UAV-projektille tehdään myös hintakartoitus sekä toteutusehdotus, jonka avulla projekti olisi mahdollista saada käyntiin nopealla aikataululla. Valmistussuunnitelmassa pyritään soveltamaan omia oppeja ja ajatuksia mahdollisimman paljon. Lisäksi suunnitelmassa hyödynnetään tätä opinnäytetyötä varten kerättyä taustamateriaalia ja muita maailmalla jo tehtyjä projekteja ja niistä kertyneitä kokemuksia.

Osassa III yhdistetään tutkimuksen osat I ja II. Luvussa 7 tehdään kummastakin osasta yhteenveto, ja lisäksi luvussa esitellään ja arvioidaan työn tuloksia. Lopuksi luvussa 8 pohditaan tutkimuksen jatkokehitysmahdollisuuksia.

OSA I
UAV-tekniologian kartoittaminen
Jani Sinivaara

2 UAV-tekniikan historia

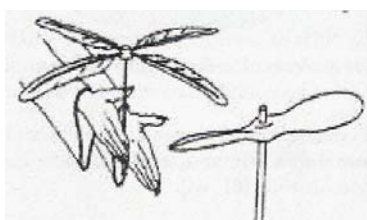
Tämän luvun tarkoitus on antaa yleiskuva siitä, miten nykyajan UAV-tekniikka on saanut alkunsa. Alaluku 2.1 esittelee UAV-tekniikkaan johtanutta historiaa, joka kulkee myös käsi kädessä yleisen ilmailun historian kanssa. Alaluku 2.2 keskittyy 1900-luvun alusta alkaneeseen modernin UAV:n kehitykseen.

2.1 UAV-tekniikkaan johtanut historia

Modernin ajan ensimmäiset UAV:t ilmestyivät ensimmäisen maailmansodan aikana vuonna 1917, mutta ajatus lentolaitteista juontaa jopa 2500 vuoden taakse.

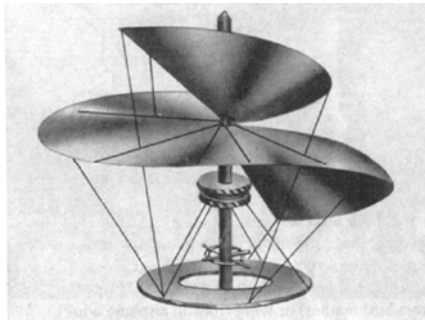
Ensimmäinen läpimurto automaattisten mekanismien saralla dokumentoitiin tapahtuneen jo Pythagoraan aikakaudella. Tämä läpimurto liitettiin Etelä-Italiaan Tarantaksen kaupungissa asuneeseen Archytas-nimiseen henkilöön. Ensimmäisenä insinöörinä ja mekaniikan isänä pidetty Archytas rakensi 425 eaa. kaikkien aikojen ensimmäisen mekaanisen lentolaitteen, joka muistutti ulkonäöltään lintua. Tämä lentolaite pystyi lentämään liikkuvien siipiensä avulla, jotka saivat energiansa lentolaitteen sisällä olevasta mekaniikasta. On väitetty, että tämä kyyhkystä muistuttava lentolaite pystyi lentämään jopa 200 metrin matkan, kunnes sen energia oli loppu. Latinalaisen kirjailijan Aulus Gelliuksen mukaan tämän uskottiin olevan ensimmäinen keinotekoinen lentolaite, joka tuotti oman lentämiseen tarvittavan voimansa. (Valavanis 2007, 15 - 17.)

Noin 400 vuotta eaa. kiinalaiset dokumentoivat ensimmäisenä idean pystysuoraan ylöspäin nousevasta lentolaitteesta. Laitteen ensimmäisen version väitetään olleen tanko, jonka päähän oli kiinnitetty linnun sulista valmistettu roottori. Tämä tanko-roottori yhdistelmä kykeni lyhyeen lentoon, kun sitä pyörytettiin käsien välissä. Kuvassa 1 on esitetty periaatepiirros kiinalaisten kehittämästä ideasta. (Castillo, Lozano & Dzul 2005, 3.)



Kuva 1: Kiinalaisten idea pyöriväsiipisestä lentolaitteesta (emt. 3)

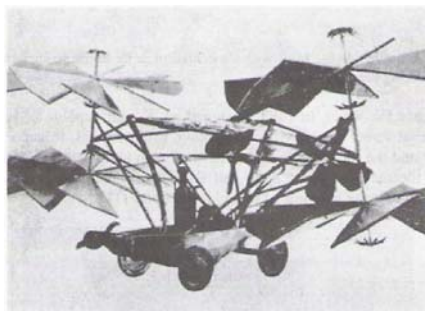
Vuosisatoja myöhemmin vuonna 1483 Leonardo Da Vinci suunnitteli lentolaitteen, joka kykenisi leijuntaan. Tätä kutsuttiin ilmaruuviksi tai ilmagyroskoopiksi. Viisi metriä halkaisijaltaan olevan ilmaruuvin idea oli nousta ilmaan, kun keskellä olevaa akselia pyöritettäisiin riittävällä nopeudella. Ilmaruuvia ohjasi oletettavasti neljän henkilön ryhmä, joka pyöritti akselia siinä olevista kädensijoista. Useat asiantuntijat ovat pitäneet kuvassa 2 esitettyä lentolaitesuunnitelmaa modernin helikopterin esi-isänä. (Valavanis 2007, 17 - 18.)



Kuva 2: Leonardo Da Vincin ilmaruuvi (emt. 17)

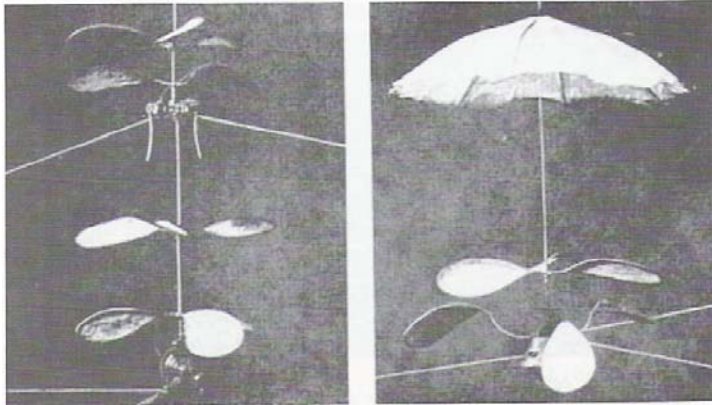
Vuosina 1754 ja 1783 dokumentoitiin kaksi uutta suunnitelmaa, jotka perustuivat aiemmin mainituilta kiinalaisilta peräisin olevaan pyöriväsiipisen lentolaitteen ideaan. Ensimmäinen oli koaksiaalinen jousella viritettävä roottori, jonka suunnittelijana oli Mikhail Lomonosov. Toisen suunnitelman esittivät Launoy ja Bienvenue, joiden malli perustui vastakkain pyöriviin roottoreihin. Roottorit oli valmistettu kalkkunan sulkia käyttäen. (emt. 18.)

George Cayley suunnitteli vuonna 1843 kuvassa 3 esitetyn lentävän vaunun, jonka oli tarkoitus pystyä nousemaan ja laskeutumaan vertikaalisesti sekä leijumaan paikallaan. Tämä suunnitelma pysyi kuitenkin vain ideana, koska siihen aikaan ei ollut saatavilla tarpeeksi tehokasta voimanlähdettä. Höyrymoottoreita, joita kyseisellä aikakaudella oli jo olemassa, ei voitu käyttää moottoroituun lentämiseen isoissa koneissa. (emt. 18.)



Kuva 3: George Cayleyn suunnittelema lentävä vaunu (emt. 18)

Horatio Phillips suunnitteli 1840-luvulla vertikaalisesti nousevan ja laskevan lentolaitteen, joka käytti voimanlähteenä roottorin lapojen kärjistä ejektoitua höyryä. Pienoisoptereita 1860-luvulla onnistuneesti lennättänyt Ponton d'Amecourt käytti myös höyryvoimaa koptereissaan, jotka on esitetty kuvassa 4. Tällä aikakaudella alettiin myös käyttää helikopteri-nimitystä pystysuoraan nousevista ja laskevista pyöriväsiipisistä lentolaitteista. (Valavanis 2007, 18.)



Kuva 4: Ponton d' Amecourtin helikopterit (emt. 19)

Vuosien 1860 ja 1907 välissä uusien helikopterimallien esittely jatkui. Yksi merkittävä henkilö oli Thomas Alva Edison, joka testasi erilaisia roottorikokoonpanoja 1880-luvulla. Hänen kokeidensa avulla kävi ilmi, että leijuntaan oli parasta käyttää roottoreita, jotka olisivat halkaisijaltaan suuria ja pinta-alaltaan pieniä. Ensimmäisen kopterin, joka oletettavasti nosti ihmisen irti maasta, kehitti Paul Cornu vuonna 1907. Se oli kaksiroottorinen kopteri, jonka roottorit pyörivät vastakkaisiin suuntiin. Laitteen väitettiin lentäneen noin 20 sekuntia. Cornun kopteri on esitetty kuvassa 5. (emt. 19.)



Kuva 5: Paul Cornun kopteri (emt. 19)

Helikoptereiden modernin ajan suuri läpimurto tapahtui Igor Ivanovich Sikorskyn toimesta 1909, jolloin hänen ensimmäinen prototyyppinsä rakennettiin. Miehittämätön koaksiaalinen helikopteri ei koskaan kuitenkaan lentänyt siinä ilmenneiden värähtely-ongelmien ja riittämättömän moottoritehon takia. Venäläinen Boris Yur'ev antoi panoksensa helikoptereiden kehityksen saralla suunnittelemalla ja toteuttamalla ensimmäisen pää- ja pyrstöroottoria käyttävän helikopterin. Hän oli myös ensimmäinen, joka esitti roottorin syklistä kohtauskulmasäättöä. Pyöriväsiipisten lentolaitteiden kehityksestä ilmailun alalla voidaan korkeimmalle jalustalle nostaa jo aiemmin mainittu Sikorsky, joka rakensi kuvassa 6 esitetyn klassisen helikopterin vuonna 1939. (Valavanis 2007, 20 - 23.)



Kuva 6: Sikorskyn moderni helikopteri vuonna 1939 (emt. 23)

Kiinteäsiipisten lentolaitteiden moderni kehitys katsotaan alkaneen Wrightin veljesten lentolaitedemonstraatiosta vuonna 1903. Tämä tarkoitti uuden ajan alkua ilmailussa ja myös modernin UAV:n historiassa. Wrightin veljesten ensilento Wright Flyer I -koneella on esitetty kuvassa 7. (emt. 23.)



Kuva 7: Wrightin veljesten ensilento Wright Flyer I -koneella, jossa Orville on pilottina ja Wilbur juoksee siivenkärjessä (Wright brothers 2010)

Kun runsaat kymmenen vuotta Wrightin veljesten ensilennosta oli kulunut, kehitettiin jo ensimmäinen kauko-ohjattu lennokki. Tästä alkoi 1900-luvun läpi jatkunut modernin UAV:n kehitys.

2.2 Moderni UAV 1900-luvun alusta

UAV:n moderni historia juontaa juurensa ensimmäisen maailmansodan loppupuolelle vuoteen 1917, jolloin kehitettiin ensimmäinen kauko-ohjattava lennokki. Radio-tekniikan ja gyroskooppisten inertia-laitteiden kehittyminen mahdollisti kauko-ohjattujen lentolaitteiden kehittämisen ja kokeellisen tutkimisen. Tämä ei kuitenkaan lähtenyt liikkeelle ongelmitta, vaan kehitystä jarrutti huomattavasti alkeellinen ohjaustekniikka. Ensimmäiset käytännölliset radio-ohjattavat UAV:t toimivat lähinnä ilmatorjuntayksiköiden harjoitusmaaleina. Yhdysvalloissa maalikoneiden käyttö lähti liikkeelle siviilissä toimineesta radio-ohjattuihin lennokkeihin erikoistuneesta yritystoiminnasta 1930-luvulla. Yhdysvaltain asevoimat ei kuitenkaan esittänyt kiinnostusta niitä kohtaan kuin vasta 1939. (Zaloga 2008, 4.)

Miehittämättömiä ilma-aluksia yritettiin ottaa taistelukäyttöön toisen maailmansodan aikana, mutta siihen kehitetty teknologia suuntautui lähinnä ohjattujen ohjusten kehittämiseen. UAV-tekniikan kehityksen alkuvaiheissa ohjusten ja UAV:n kehitys kulkivat rinta rinnan. Tämä johtui lähinnä siitä, että ongelmat molempien lennonohjausjärjestelmissä olivat pääpiirteittäin samat. Suurin ero UAV:lla ja ohjuksella on se, että UAV on tarkoitettu palaamaan kotiin ja ohjus taas tuhoutumaan kohteen saavutettuaan. Vuonna 1952 yhdysvaltalainen yritys Northrop adoptoi UAV-konseptin omaan bisnekseensä ja loi samalla pohjan yhdelle menestyneimmistä UAV-yrityksistä. Noin vuosikymmen toisen maailmansodan jälkeen UAV-järjestelmillä huomattiin olevan jo vahvaa potentiaalia tiedustelukäyttöön. Tämä oli alkusoittoa sille, että UAV-koneet tulisivat olemaan tärkeä osa sotilastiedustelua seuraavien vuosikymmenien aikana. (emt. 4 - 7.)

Vietnamin sodassa Yhdysvallat käytti ensimmäisen kerran suuren mittakaavan UAV-operaatioita lentotiedustelussa. Niillä tiedusteltiin alueita, jonne miehittyjen tiedustelulentojen tekeminen olisi ollut suuri riski. Nykypäivää kohti tullessa uusien teknologioiden, kuten digitaalikameroiden, satelliittinavigoinnin ja mikroprosessorien,

kehitys avasi uusia mahdollisuuksia UAV:lle. Tämä johti myös UAV:n laajemman kirjon syntymiselle. UAV-teknologiaa alettiin tutkia kaiken kokoisia lentolaitteita silmällä pitäen, kuten esimerkiksi mikro- ja mini-UAV. Mikro-UAV:lla tarkoitetaan yleensä läpimitaltaan noin 15 senttimetrin kokoisia lentolaitteita. Mini-UAV:n kokoiset lentolaitteet ovat taas perinteisten radio-ohjattavien lennokkien kokoluokkaa ja painavat muutamia kilogrammoja. (Zaloga 2008, 4.)

UAV-teknologia on tänä päivänä kehittynyt siihen pisteeseen, että monien maiden ilmavoimat varmasti miettivät, tulevatko miehittämättömät lentolaitteet korvaamaan perinteiset hävittäjät seuraavan sukupolven ilmataisteluaseina. Useista hyödyistään huolimatta UAV-teknologia on kuitenkin vielä nuori tulokas ilmailuun kaikkine mahdollisuuksineen. (emt. 44 - 45.)

UAV-tekniikka sai nykypäivän miehittämättömiin lentolaitteisiin johtaneen suuntansa, kun sen mahdollisuudet tiedustelukäytössä huomattiin. Uusien teknologioiden kehitys johti erittäin laajan UAV-koneiden kirjon syntymiseen, jota esitetään seuraavassa luvussa UAV-projekteja tutkien.

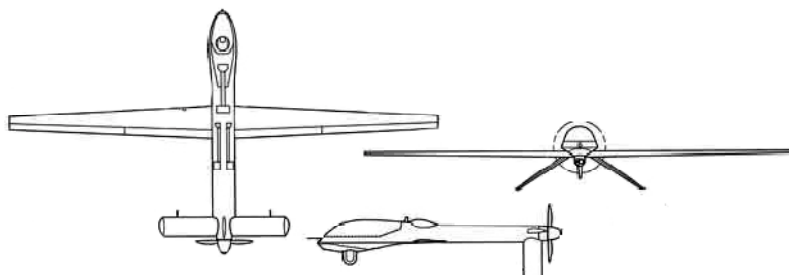
3 Nykyajan UAV-projekteja

Tässä luvussa käydään läpi nykyajan UAV-projekteja. Nykyajalla tarkoitetaan tässä aikaa 1980-luvulta eteenpäin. Alaluku 3.1 esittelee lentokone-tyyppisiä UAV-projekteja, jotka painottuvat sotilaspuoleen. Tämä johtuu lähinnä siitä, että VTOL-ominaisuuden omaavat koneet ovat enemmän suosiossa siviilipuolen sovelluksissa, kun taas sotilaspuoli on keskittynyt suurelta osin nopeasti lentäviin lentokoneisiin. Alaluku 3.2 esittelee miehittämättömiä helikopteri-projekteja. Helikoptereihin liittyvät projektit ovat tässä tekstissä yliopistojen ja tutkimuslaitosten töitä. Alaluku 3.3 käsittelee quadrotor-tyyppisten UAV-koneiden projekteja, jotka ovat myös yliopistoiden ja korkeakoulujen projekteja.

3.1 Lentokone-UAV

Seuraavaksi esitellään muutamia lentokone-tyyppisiä UAV-projekteja, jotka painottuvat sotilaspuoleen.

MQ-1 Predator. Yhdysvaltain ilmavoimien (USAF) MQ-1 Predator oli yksi ensimmäisistä *Advanced Concept Technology Demonstrations* -osaston (ACTD) luomista projekteista. Kuvassa 8 esitetty MQ-1-projekti sai alkunsa vuonna 1994, josta Yhdysvaltain ilmavoimat otti projektivastuun vuonna 1997. (Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005, 4.)

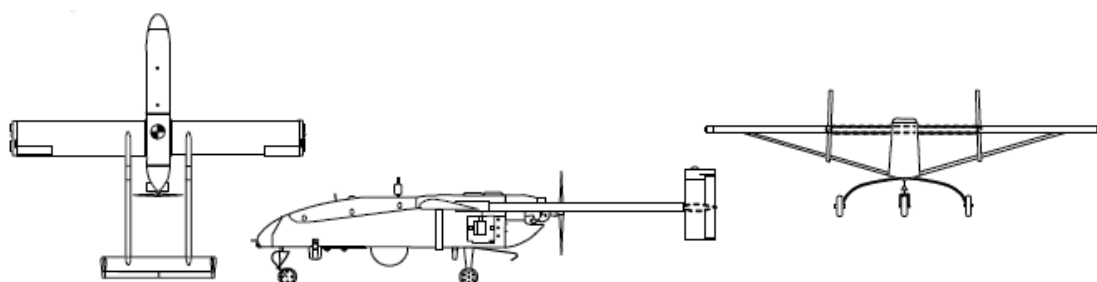


Kuva 8: MQ-1 Predator (emt. 4)

Vuodesta 1995 alkaen Predatorilla on lennetty useita tiedustelulentoja Lähi-idän alueella. Predator sai uuden tyyppimerkinnän vuonna 2001, kun siihen integroitiin ominaisuus ampua Hellfire-ohjuksia. Aikaisempi tyyppimerkintä RQ-1 muuttui MQ-1:ksi, jossa M-kirjain edustaa multi-mission-ominaisuutta. Yhdysvaltain ilmavoimilla

on ollut operatiivisessa käytössä 12 Predator-konetta kolmessa eri lentueessa. Vuonna 2004 MQ-1-laivue saavutti 100 000 lentotunnin rajapyykin. MQ-1 Predatorin suurin sallittu lentoonlähtöpaino on noin 1020 kg, josta hyötykuorman osuus voi enintään olla 204 kg. Toiminta-aika Predatorilla on sileänä 24 tuntia ja ulkoisella kuormalla varustettuna noin 14 tuntia. Suurin sallittu lentonopeus on noin 350 km/h ja toimintasäde 930 kilometriä. (Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005, 4.)

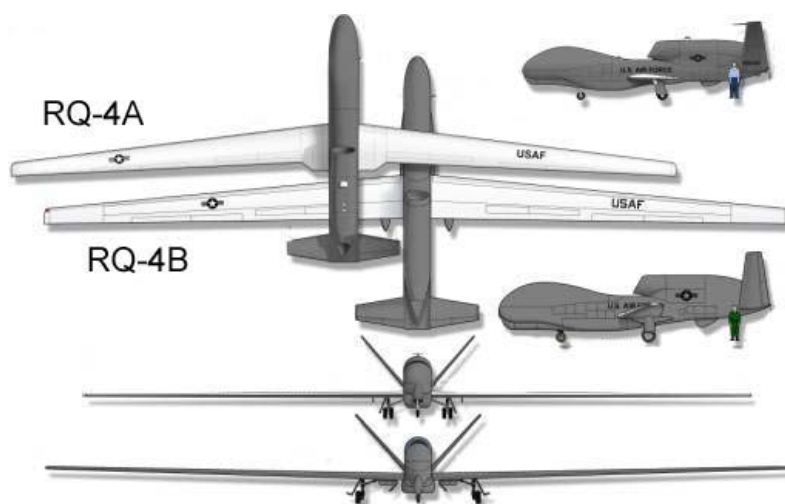
RQ-2B Pioneer. Alun perin USA:n laivaston käyttöön suunniteltu RQ-2B Pioneer - UAV on ollut käytössä vuodesta 1986. Kuvassa 9 esitetty Pioneer otettiin myöhemmin käyttöön merijalkaväen tiedustelutehtävissä, ja myös maavoimien yksiköt ovat käyttäneet sitä tiedustelun tukena. Pioneer voidaan lähettää suorittamaan tehtävää joko laukaisulaitetta käyttäen, rakettimootorin avustamana tai perinteiseen tapaan kiitotietä käyttäen. Laskeutuminen suoritetaan kiitotielle tai verkkoon, jota käytetään esimerkiksi laivastossa koneen vastaanottamiseen. Pioneer on lentänyt tiedustelulentoja vuodesta 1991 esimerkiksi Persianlahden, Bosnian ja Kosovon konflikteissa. Pioneeria käytettiin myös Irak-operaatiossa merijalkaväen tukena. USA:n laivasto lopetti Pioneer-operaatiot vuoden 2002 kesäkuun lopussa ja siirsi ne täysin merijalkaväen haltuun. Merijalkaväen tavoitteena oli ylläpitää Pioneer-UAV:ta siihen asti, kunnes se korvattaisiin VTOL-tyyppisellä mallilla. RQ-2B Pioneerin suurin lentoonlähtöpaino on 205 kg, josta hyötykuorman osuus on maksimissaan 34 kg. Polttoainetta koneeseen saa enintään 35 kg, jolla päästään noin 5 tunnin toiminta-aikaan. Toimintasäde on noin 185 kilometriä, suurimman sallitun lentonopeuden ollessa 204 km/h. (emt. 5.)



Kuva 9: RQ-2B Pioneer (emt. 5)

RQ-4 Global Hawk. Northrop Grummanin valmistama ja Yhdysvaltain ilmavoimien käyttämä RQ-4 Global Hawk on korkealla lentävä ja pitkän toiminta-ajan omaava miehittämätön tiedustelulentokone. Global Hawkin yksi suunnittelukriteereistä oli, että se pystyy tuottamaan tiedusteluinformaatiota erittäin laajalta alueelta yhden

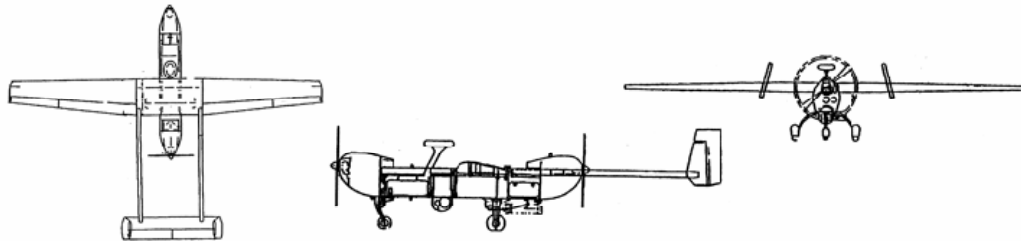
vuorokauden aikana. Kuvassa 10 esitetystä Global Hawkista on tehty kaksi versiota, RQ-4A ja RQ-4B, jotka eroavat toisistaan lähinnä kokonsa ja toiminta-aikansa suhteen. Suurempi B-versio voi painaa lentoonlähökunnossa 14 630 kg. A-version suurin sallittu lentoonlähöpaino on 12 130 kg, joka on 2500 kg pienempi kuin B-versiolla. Toiminta-ajassa on myös eroa versioiden välillä, sillä A-versio pystyy olemaan lennolla 32 tuntia, kun taas B-versio vain 28 tuntia. Toimintasäde molemmilla versioilla on jopa 10 000 kilometriä. Global Hawkilla on optinen sensori ja infrapunasensori sekä tutka, joilla se pystyy seuraamaan liikkuvia kohteita maassa. Nämä sensorit mahdollistavat sen, että Global Hawk pystyy suorittamaan tiedustelua päivällä ja yöllä sääolosuhteista riippumatta. Yksi merkittävä ero Global Hawkissa on perinteisiin UAV-koneisiin verrattuna se, että sen voimanlähteenä toimii suihkumoottori. (Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005, 6.)



Kuva 10: RQ-4 Global Hawk (emt. 6)

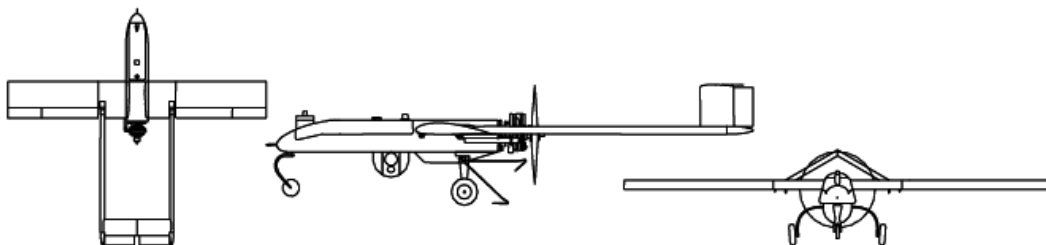
RQ-5A/MQ-5B Hunter. Alun perin Yhdysvaltain asevoimien yhteiseksi malliksi suunniteltu RQ-5 Hunter päätyi lopulta vain jalkaväen ja merijalkaväen käyttöön. Kuvassa 11 (ks. s. 20) esitetty Hunter on varustettu aiemmin mainitun Global Hawkin tapaan optisella sensorilla ja infrapunasensorilla, joiden antama videokuva lähetetään reaaliajassa maa-asemalle. Yhdysvallat käytti Hunteria NATO:n Balkanin operaatiossa 1999 ja Irakissa 2002. Tästä Northrop Grummanin valmistamasta UAV:sta on tehty kahta eri versiota. Suuremman kokoinen Hunterin B-versio voidaan varustaa ilmasta-maahan-aseistuksella, mistä johtuen sen tyyppimerkintä on MQ-5B. B-version toiminta-aika on 18 tuntia, joka on noin 7 tuntia parempi kuin A-versiolla. Molemmat versiot pystyvät kantamaan 90 kg:n hyötykuorman ja lentämään 270 kilometrin

toimintasäteellä. Hunterin täysimittainen tuotanto lopetettiin jo 1996, mutta sen jälkeen siitä on tehty muutamia pienempiä eriä. Hunterin seuraajaksi suunniteltiin Extended Range/Multipurpose (ER/MP) UAS-järjestelmä, joka pystytään myös aseistamaan edeltäjänsä tavoin. (Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005, 7.)



Kuva 11: RQ-5 Hunter (emt. 7)

RQ-7A/B Shadow 200. AAI:n valmistama RQ-7 Shadow 200 modifioitiin vuonna 1999 täyttämään prikaatikäytössä vaadittavat ominaisuudet. Kuvassa 12 esitetty Shadow 200 voidaan lähettää lennolle laukaisulaitetta käyttäen. Koneen vastaanottamisessa voidaan apuna käyttää pysäytysvaijeria, jos kiitotien pituus on lyhyt. Shadow 200 pystyy tuottamaan reaaliaikaista videokuvaa optiselta kameralta ja infrapunakameralta. Tästä UAV:sta on tehty kaksi versiota, joista ensimmäinen B-versio toimitettiin Yhdysvaltain armeijalle vuonna 2004. A-versioon verrattuna B-versiolla on tehokkaammat tietoliikenneominaisuudet ja paranneltu lennonohjaustietokone. Toiminta-aika B-versiolla on 7 tuntia, joka on 2 tuntia parempi kuin A-versiolla. Kasvanut toiminta-aika johtui laajennetusta polttoainekapasiteetista, joka B-versiossa on 33 kg. Shadow 200 UAV:ta on käytetty Irakin konfliktissa ja Etelä-Korean ilmatiedustelun tukena. (emt. 8.)



Kuva 12: RQ-7 Shadow 200 (emt. 8)

MQ-9 Predator B. General Atomics Aeronautical Systemsin valmistama MQ-9 Predator B on suunniteltu pitkän toiminta-ajan UAV:ksi. Sen toiminta-aika ilman ulkoista kuormaa on noin 30 tuntia ja ulkoisten kuormien kanssa noin 16 - 20 tuntia. Kuvassa 13 (ks. s. 21) esitetty Predator B kykenee lentämään myös korkealla, sillä sen

suurin sallittu lentokorkeus on 15 kilometriä. Kärkiväliltään 20-metrinen MQ-9 on kokonaispainoltaan 4760 kg, josta 1810 kg kattaa polttoaineen osuuden. Sisäistä hyötykuomaa Predator B voi ottaa vain 340 kg, mutta ulkoisen kuorman kanssa maksimi-hyötykuorma voi olla jopa 1360 kg. Yhdellä maa-asemalla voidaan operoida neljää MQ-9 UAV-konetta, joilla voidaan lentää 3700 kilometrin toimintasäteellä. Maa-aseman henkilöstö koostuu kahdesta ihmisestä, joista toinen ohjaa koneita ja toinen valvoo sensoreita. MQ-9:llä voidaan myös osallistua taisteluun maajoukkoja tukevasti, esimerkiksi erilaisten täsmäiskujen muodossa. Yhdysvaltain Air Combat Command (ACC) myönsi MQ-9 Predator B:n operatiivisesti kelpuutetuksi kesällä 2003. (Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005, 10.)



Kuva 13: MQ-9 Predator B (emt. 10)

Yhdysvaltain asevoimien MQ-9 Predator B:tä käytetään esimerkiksi sellaisten alueiden rajavalvontaan, joihin ei muulla tavoin helposti pääsisi. Tämä UAV on varustettu erikoisvalmisteisilla kameroilla ja sensoreilla. (Chahl, Jain, Mizutani & Sato-Ilic 2007, 3.)

3.2 Helikopteri-UAV

Miehittämättömät helikopterit ovat tänä päivänä useiden yliopistoiden ja tutkimuskeskusten tutkimuksen kohteena. Usein perinteiset miehitetyt helikopterit ovat kalliita ostaa, lentää ja ylläpitää. Tästä johtuen suurin osa tutkimustyötä tekevästä tahoista on kehittänyt omia alustoja miehittämättömiä helikoptereita varten. UAV-helikopteria varten kehitetyt alustat modifioidaan yleensä harrasteilmailuun ja ilmakuvaukseen tarkoitetuista koptereista. Tämän tyyppisiin koptereihin lisätään jälkepäin esimerkiksi GPS-vastaanotin ja sensoreita, kuten kiihtyvyyssanturit, gyro-pohjaiset kulmanopeusanturit ja elektroniset kompassit. Näiden sensorien antamaa tietoa varten tarvitaan myös jonkinlainen koneeseen integroitu tietokone, joka käsittelee ja valvoo informaatiota. Miehittämättömille helikoptereille tutkimusta tekevien tahojen on myös mahdollista hankkia kaupallisia alustoja, joissa on jo valmiina tietyn tasoisen

automaatiikka. Tämä on kuitenkin selvästi kalliimpi ratkaisu kuin itse kehitetty järjestelmä samoilla ominaisuuksilla. Eräs kaupallinen miehittämätön helikopteri on Northrop Grummanin valmistama MQ-8B, joka on esitetty kuvassa 14. (Fahimi 2009. 10 - 11.)



Kuva 14: Northrop Grummanin valmistama ja US Navyn käyttämä MQ-8B miehittämätön helikopteri (MQ-8 Fire Scout 2010)

Miehittämättömien helikopterien kehitys alkoi 1990-luvun alusta. UAV-helikopterien kehittämisessä kunnostautunut Etelä-Kalifornian yliopisto voitti vuonna 1994 *Association for Unmanned Vehicle Systems Internationalin* (AUVSI) järjestämän robotiikan kilpailun AVATAR-nimisellä helikopterilla. Kuvassa 15 esitetty AVATAR oli suunniteltu automaattiseen ajoneuvojen seurantaan ja yleiseen tiedusteluun. (Fahimi 2009. 11.)



Kuva 15: Etelä-Kalifornian yliopiston AVATAR UAV-helikopteri (Autonomous Flying Vehicle Project: AVATAR 2003)

Carnegie Mellonin robotiikkainstituutin kehittämä UAV-helikopteri on myös voittanut AUVSI:n lentäville roboteille suunnatun kilpailun. Tämä helikopteri oli valmistettu kaupallisesti saatavissa olevilla osilla ja omia innovaatioita käyttäen. Myös Berkeleyn yliopiston AeRobot-projekti on yksi kuuluisimmista UAV-helikopteri-projekteista. Tämä projekti tunnetaan myös nimellä BEAR, ja sitä on käytetty lennonohjausjärjestelmän käytettävyyden ja UAV-helikopterin suorituskyvyn testaukseen. Carnegie Mellonin robotiikkainstituutin tavoin Georgian teknologiainstituutin UAV-tutkimuslaitos sai myös ensimmäisen sijan eräässä AUVSI:n järjestämässä lentorobotiikan kilpailussa. Kyseinen tutkimuslaitos on suunnitellut ja valmistanut useita lentäviä robotteja ja UAV-helikoptereita. (Fahimi 2009, 11.)

Useat tutkimuslaitokset Euroopassa ovat myös käyttäneet resursseja automaattisten lentävien robottien suunnittelemiseen ja toteuttamiseen. Ruotsissa Wallenbergin laboratorion informaatioteknologian ja automaattisten järjestelmien osasto (WITAS) on tehnyt yhteistyöprojekteja yritysten kanssa. Projekteissa on käytetty kaupallisiin osiin perustuvaa UAV-helikopteria. Useat eurooppalaiset yliopistot ovat aktivoituneet UAV-järjestelmiin liittyen, ja yhtenä tutkimuksen kohteena on ollut useiden erilaisten helikopterien samanaikainen koordinointi ja lennonohjaus. Yhtenä yliopistona mainittakoon Berliinin teknillinen yliopisto, jonka helikopteri voitti AUVSI:n lentävien robottien kilpailun vuonna 2000. (emt. 12.)

3.3 Quadrotor-UAV

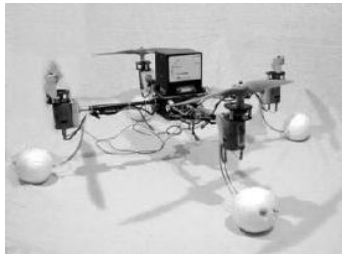
Quadrotorit ovat yleistyneet useiden projektien muodossa 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen aikana. Tämän on mahdollistanut nopeasti kehittynyt tietokone- ja sensoriteknologia sekä akkuteknikka. Projektien yleistymistä on osaltaan edesauttanut myös elektroniikkakomponenttien hintojen laskeminen. Quadrotorin ominaisuudet tekevät siitä erittäin varteenotettavan vaihtoehdon UAV:ksi siviilisovelluksiin, jotka todennäköisesti suoritetaan matalalla lentäen ja ahtaissa paikoissa. Tällaiset sovellukset edellyttävät UAV:lta lähes poikkeuksetta VTOL-ominaisuutta ja ketterää ohjattavuutta. Quadrotor täyttää nämä edellytykset kiitettävästi. Seuraavissa alaluvuissa 3.3.1, 3.3.2 ja 3.3.3 esitellään kolme tämän opinnäytetyön kannalta oleelliseksi arvioitua quadrotor-projektia. Näihin tunnetuihin projekteihin löytyy paljon viitteitä alan teoksista, minkä vuoksi ne päätettiin esitellä erikseen. Alaluvussa 3.3.4 esitellään lyhyesti Oulun

yliopiston kehittämä kahden robotin sisältämä yksikkö. Toinen tämän yksikön roboteista on lentävä quadrotor. Tämä päätettiin ottaa mukaan siksi, koska se oli ainoa Suomessa toteutettu quadrotor-projekti, joka tuli vastaan tiedonhaussa.

3.3.1 X-4 Flyer

X-4 Flyer -quadrotorin kehittäminen alkoi Australian kansallisessa yliopistossa 2000-luvun alkupuolella. X-4 Flyer -nimisiä tai lähes samannimisiä quadrotoreita löytyy nykyään maailmasta muitakin, eikä niitä pidä sekoittaa toisiinsa. Seuraavat kappaleet X-4 Flyerista ja sen ensimmäisestä prototyypistä, josta käytetään tekstissä nimeä X4-flyer, luotaavat kolmea eri konferenssijulkaisua.

Design of a Four-Rotor Aerial Robot -raportti julkaistiin Australasian robotiikan ja automaation konferenssissa vuoden 2002 marraskuussa. Raportti käsittelee neliroottorisen VTOL-lentolaitteen suunnittelua, valmistusta, lentolaitteen dynamiikan mallinnusta ja pilot-in-the-loop-ohjausjärjestelmän käyttöönottoa. Koneen ensimmäiselle prototyypille annettiin nimeksi X4-flyer, joka on esitetty kuvassa 16. (Pounds, Mahony, Hynes & Roberts 2002.)



Kuva 16: Australian kansallisen yliopiston kehittämä quadrotor X4-flyer (emt.)

Tärkeimpinä suunnittelukriteereinä X4-flyer-projektissa pidettiin edullisuutta ja joustavaa lentolaitteen toteutusta laboratorioympäristössä. Mekaaninen rakenne on pidetty tarkoituksenmukaisesti yksinkertaisena. Koneessa ei ole esimerkiksi yhtään servolla toimivaa ohjausta, vaan ainoat liikkuvat osat ovat moottoreissa kiinni olevat roottorit. X4-flyer-ohjausjärjestelmän suunnittelun tavoitteena oli, että kokenut pilotti pystyisi ohjaamaan konetta ilman hallinnan menettämistä. (emt.)

Rungon suunnittelukriteerit painottuivat yksinkertaiseen, suurpiirteiseen ja helppoon purettavuuteen. Runkomalliksi valittiin yksinkertaisuutta ja purettavuutta silmällä pitäen

keskiö ja tanko -tyyppinen ratkaisu. Tangot valmistettiin jousen nuoliksi tarkoitetuista putkitangoista, joiden halkaisija oli 8,5 mm ja seinämävahvuus 0,5 mm. Tankojen kestävyys testattiin taivutusrasituskokeella riittävän lujuuden varmistamiseksi. Keskiön valmistamisessa käytettiin suuritiheysistä polyeteeniä (HDPE = High Density Polyethylene) sen hyvän lujuuden ja muokattavuuden takia. Keskiö koostui kahdesta palasta, joiden väliin tangot kiinnitettiin. Moottorien pedit, jotka kiinnitettiin putkitankojen päihin, rakennettiin myös HDPE-muovista. (Pounds ym. 2002.)

X4-flyerissa käytettiin perinteisiä RC-tarvikeliikkeiden tuotteita. Näistä esimerkkinä voidaan mainita koneen neljä sähkömoottoria. Jokaista sähkömoottoria kohden tarvittiin yksi nopeudensäädin, jonka toiminta perustui jännitteen säätämiseen. Roottoreina koneessa käytettiin 11 tuuman pituisia ja 6 tuuman nousulla olevia APC-C2-roottoreita. Leijuntaan optimaalisia roottoreita ei ollut kaupallisesti saatavilla projektin toteutushetkellä. Tästä huolimatta X4-flyeriin asennettiin kaupalliset roottorit, koska projekti haluttiin pitää yksinkertaisena. Roottorin ja moottorin välillä käytettiin vaihteistoa, jonka välityssuhde oli 2,9:1. Vaihteistojen käyttäminen antoi moottoreille lisää vääntöä, minkä ansiosta voitiin käyttää isompia roottoreita. Kiinteälapaisten roottoreiden ansiosta aerodynaaminen mallintaminen ja koneen ohjattavuus helpottui. (emt.)

Staatistien testien mukaan quadrotorin maksimi-massaksi määritettiin 700 g. Tämä oli määritelmän mukaan suurin mahdollinen massa, jonka aktuaattorit eli moottori-roottori-yhdistelmät kykenisivät nostamaan ilmaan. Hyötysuhteeksi käytetylle aktuaattori-kokoonpanolle saatiin 0,24. Hyötysuhteen osalta parannettavaa jäi vielä runsaasti, kun verrataan esimerkiksi helikopterin tyypilliseen hyötysuhteeseen, joka on 0,6. Laadukkaammilla moottoreilla ja erikoisvalmisteisilla roottoreilla olisi ollut merkittävä vaikutus hyötysuhteeseen. (emt.)

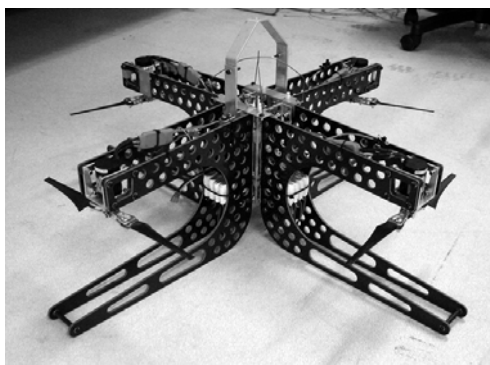
X4-flyerin pääasiallisena tarkoituksena oli toimia kokeellisena laitteena laboratorioympäristössä. Yhtenä tutkimuksen kohteena oli ohjausjärjestelmän testaaminen. Ohjausjärjestelmän rakenne oli ohjelmoitu SIMULINK-nimiseen ohjelmaan maassa sijaitsevalle tietokoneelle. Tämä mahdollisti nopeat korjaukset ohjauslogiikkaan ja dynaamisiin ohjausratkaisuihin testauksen aikana. (emt.)

Quadrotor-tyyppiset koneet tarvitsevat jonkinlaisen tietokoneen käsittelemään ja valvomaan sisään tulevia ja ulos lähteviä signaaleja. X4-flyeriin asennettiin HC-12

single-board-computer (SBC), jossa oli kaksi prosessoria. Pilotin radiolähtetimen välityksellä antamat ohjaukset välittyivät quadrotorissa olevan radiovastaanottimen kautta prosessorien käsiteltäväksi. Toinen informaation lähde X4-flyerin tietokoneelle oli inertial measurement unit (IMU), jonka tarkoitus oli antaa kulmanopeus- ja kiihtyvyydestietoa. IMU:n ja quadrotorin tietokoneen välisen väylän taajuus oli 120 Hz. IMU:lta tulevan informaation perusteella tietokoneen tulisi pystyä pitämään quadrotor stabiilissa lentotilassa. Stabiilia lentotilaa häiritsemällä quadrotor ohjataan haluttuun suuntaan. Lentotilan häiritsemisellä tarkoitetaan tässä tapauksessa pilotin lähettimellä antamia ohjauksia, jotka ohjaustietokone kokee normaalin lentotilan häirintänä. Quadrotorin tietokone suorittaa lentosuunnan muuttamisen moottorien kierrosnopeutta säätämällä, joka tapahtuu moottorien nopeudensäätimien avulla. Tällaisen elektroniikan ansiosta kokenut pilotti pystyy hallitsemaan konetta. (Pounds ym. 2002.)

X4-flyerin tyhjapaino oli hieman alle 2 kg. Tämä paino sisältää kaiken muun paitsi akut, koska virtalähteenä käytettiin maassa olevaa akkua. Koneen rungon pituus ilman roottoreita oli 700 mm ja korkeus 240 mm. (emt.)

Towards Dynamically-Favourable Quad-Rotor Aerial Robot -raportissa pureudutaan X-4 Flyer Mark II:n kahteen ongelmaan, jotka olivat riittämätön työntövoiman tuotto ja epästabiilin dynamiikan hallinta. Näihin haasteisiin vastattiin uudella roottorin suunnittelutekniikalla ja roottorien sijoittamismallilla, kuten kuvasta 17 voidaan todeta. Raportissa kuvataan aero-elastisen roottorilavan suunnittelua ja roottorin suorituskykymittauksia. Raportti esittelee myös, miten X-4 Flyeriin oli tehty jousitettu keskiö keinuroottoriratkaisulle, joka mahdollisti roottorilavan lepatuksen hallinnan. Keinuroottorien dynaamisen mallin lisäksi raportissa tuodaan esille X-4 Flyeriin asennettujen työntöroottorien tuoma koneen stabiiliteetin paraneminen. (Pounds, Mahony, Gresham, Corke & Roberts 2004.)



Kuva 17: Australian kansallisen yliopiston kehittämä X-4 Flyer Mark II (emt.)

X-4 Flyerin suunnittelu perustui quadrotorin uniikkeihin ominaisuuksiin. Verrattaessa esimerkiksi tavallisiin yhdellä isolla roottorilla toimiviin koptereihin, quadrotorilla päästään paljon lähemmäs kiinteitä kohteita ilman vaaraa roottorin vaurioitumisesta. Tämän tyyppiset koneet ovat ideaaleja esimerkiksi sisäkäytössä ja lennettäessä esteiden lähetyvillä. (Pounds ym. 2004.)

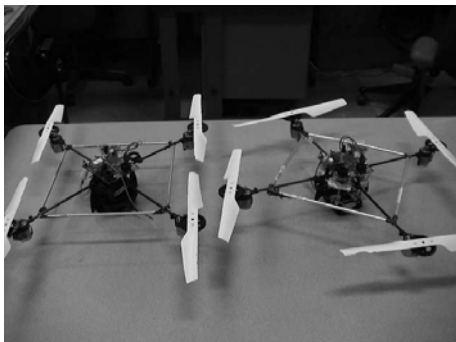
Small-scale Aeroelastic Rotor Simulation, Design and Fabrication -raportti keskittyy lähinnä uuden erikoisvalmisteisen roottorin suunnitteluun ja toteutukseen, mitä jo aiemmassa raportissa (Pounds ym. 2004) pohjustettiin. Aiemmin mainittiin, että ensimmäisessä prototyypissä käytettiin kaupallisia roottoreita, koska projekti haluttiin pitää yksinkertaisena. Kaupallisten roottorien käyttö oli kuitenkin huono ratkaisu hyötysuhdetta ajatellen. Pienikokoisille pyöriväsiipisille lentolaitteille on tärkeää, että niissä olisi hyötysuhteeltaan tehokkaat kiinteälapaiset roottorit. Tällaiset roottorit lisäävät toiminta-aikaa, koska energiahukka ei ole niin suuri. Hyötysuhteeltaan hyvien roottorien profiili on erittäin ohut, ja sen takia niitä on todella vaikea valmistaa. Ohut roottoriprofiili on erittäin vaikea saada täyttämään tarvittavat lujuusvaatimukset. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että valmistuksen yksinkertaisuus ja mekaaninen jäykkyys huononevat aerodynaamisten ominaisuuksien parantuessa. Tämä raportti esittää myös roottoriongelmaa simulaattorin kehittämiseen perustuvan suunnittelumetodin, jossa pyritään saavuttamaan tasainen roottorin suorituskyky ja löytämään oikea kapenevuus- ja kiertogeometria tietylle moottorin optimaaliselle väännölle. Oikealle kapenevuus- ja kiertogeometrian arvon löytämiselle käytetään sitä varten kehitettyä tietokoneohjelmaa. Kokeelliset työntövoimatestit osoittivat, että tietokoneohjelmalla tehdyt teoreettiset väitteet olivat lähellä totuutta. (Pounds & Mahony 2005.)

Useat quadrotorit ovat perustuneet kaupallisiksi leluiksi tarkoitettuihin laitteisiin. Vaikka tällaisia voidaan käyttää prototyyppeinä erilaisissa projekteissa, ne eivät yleensä ole tarpeeksi jämäköitä kokeellisiksi robottialustoiksi. Australian kansallisen yliopiston kehittämän X-4 Flyerin on todettu olevan erittäin luotettava alusta erilaisille kokeille. (Pounds, Mahony & Corke 2006.)

3.3.2 STARMAC

STARMAC on Stanfordin yliopiston kehittämä quadrotor-projekti. Yliopisto sijaitsee Kaliforniassa Yhdysvalloissa. Projektin päätarkoituksena oli valmistaa ulko-olosuhteisiin tarkoitettu quadrotor ja siihen ohjausjärjestelmä. Tavoitteena oli, että ohjausjärjestelmän avulla pystytään koordinoimaan useaa quadrotoria samanaikaisesti. (Hoffmann, Rajnarayan, Waslander, Dostal, Jang & Tomlin 2004.)

STARMAC-projektin pohjana käytettiin kaupallista Draganflyer III -quadrotoria. Draganflyerissa itsessään oli jonkin tasoinen gyro-pohjainen lennonvakautusjärjestelmä, joka ei kuitenkaan riittänyt suunniteltuun tarkoitukseen. Alustana käytetty Draganflyer pystyi kantamaan hyötykuormaa noin 114 g ja lentämään noin 10 minuuttia täydellä teholla. Alustan modifioinnissa poistettiin kaikki Draganflyer III:ssa kiinni ollut elektroniikka. Se korvattiin erikoisvalmisteisella piirilevyllä, jossa oli kaksi mikroprosessoria käsittelemässä kaiken koneeseen tulevan informaatiovirran. Kuvassa 18 on esitetty kaksi STARMAC-quadrotoria. (emt.)



Kuva 18: Kaksi STARMAC-quadrotoria (emt.)

Quadrotorin ja maa-aseman kommunikointi tapahtui Bluetooth Class II -laitteen avulla. Laitteelle luvattu 91 metrin kantoetäisyys osoittautui kuitenkin pienemmäksi, koska jo 46 metrin etäisyydellä havaittiin tiedon häviämistä. Tämä laite eroaa kotikäyttöön tarkoitetuista laitteista pidemmällä kantokyvyllään ja hienostuneemmalla tiedonkäsittelyllään, mutta toimii kuitenkin 2,4 GHz taajuudella. Laite on suunniteltu sarja-kaapelin korvikkeeksi, ja se toimii noin 115,2 kbps nopeudella. (emt.)

Sensoreina STARMAC:ssä oli GPS, ultraäänikorkeusmittari ja kolmen akselin IMU. GPS:n tarkkuudeksi oli annettu 1 - 2 metriä ja sen päivitystaajuus oli 1 Hz. Ultraäänisensorin päivitystaajuus oli 12 Hz ja maksimietäisyys 2 metriä, 5 - 10 senttimetrin tarkkuudella. Ultraäänikorkeusmittarin tarkkuuteen vaikuttavat selvästi

taustamelu ja pinnat, joista ääni heijastuu. STARMAC:ssa käytetty IMU mittasi kiihtyvyydenopeuksien muutoksia 76 Hz taajuudella. IMU:n tarkkuuteen vaikuttavat erityisesti koneen värinät, joiden lisääntyessä sen tarkkuus heikkenee. (Hoffmann ym. 2004.)

Maa-asemana käytettiin tavallista tietokonetta, jossa käyttöjärjestelmänä oli Microsoft Windows XP. Ohjelma, jonka kautta koneen ja maa-aseman informaatiovirta käsiteltiin, oli nimeltään National Instruments Labview 7. Käytetty Bluetooth-ohjelmisto loi maa-asemalle virtuaaliset sarjaportit jokaista quadrotoria varten. Virtuaalisarjaportit näkyivät konkreettisesti Labview-ohjelmassa. Manuaalinen ohjaus oli toteutettu perinteisellä joystickilla, joka liitettiin maa-asemana toimineeseen tietokoneeseen. (emt.)

3.3.3 OS4

OS4-quadrotor-projektin tavoitteena oli ensin tehdä testipenkki quadrotorin suunnittelua varten. Sen jälkeen määritettiin suunnittelukriteerit ja valmistettiin itse konkreettinen lentolaite. Ohjausjärjestelmän kehittäminen lentävään robottiin tarvitsee jonkinlaisen testipenkin alustavia kokeita varten. Se auttaa lukitsemaan tiettyjä liikesuuntia, mikä vähentää ohjauksen monimutkaisuutta ja vaurioiden vaaraa. (Bouabdallah 2007.)

Pienen pyöriväsiipisen lentolaitteen suunnittelun haaste on komponenttien merkittävä riippuvuus toisistaan. Suunnittelua aloitettaessa tulee noudattaa loogista komponenttien valintamenettelyä, jotta voidaan ottaa kaikki komponentteihin vaikuttavat muuttujat huomioon. OS4-quadrotorin suunnittelua varten kehitettiin tietokoneohjelma, jonka tarkoitus oli valita sopivat komponentit määrätyn logiikan mukaan. Tämän menetelmän kehittäminen aloitettiin listaamalla useita komponentteja ja niihin liittyviä oleellisia tietoja. Näitä tietoja apuna käyttäen tietokoneohjelma valitsi sopivimmat komponentit annettujen parametrien perusteella. (emt.)

OS4:n suunnittelu aloitettiin määrittelemällä kolme eri rajoitusta: maksimimassa, rungon maksimipituus ja haluttu työntövoima-paino-suhde. Näillä tiedoilla saatiin hyvä pohja roottorin halkaisijan määrittämiseksi. Roottorin halkaisijan määrittää pääasiassa rungon maksimipituus, koska roottorista halutaan yleensä mahdollisimman iso. Roottorin halkaisijan perusteella voitiin arvioida seuraavia ominaisuuksia: roottorilla tuotettavaa työntövoimaa, roottorista aiheutuvaa vastusta ja tehoarvoja roottorin tietylle

kulmanopeusalueelle. Maksimimassa, vastusmomentti ja työntövoima-paino-suhde riittävät moottorien tehovaatimusten määrittämiseen. Näiden tietojen perusteella tietokoneohjelma valitsi aiemmin listatuista moottorivaihtoehdoista kriteereihin sopivimmat ehdokkaat. Roottoreiden ja moottoreiden painoon lisättiin vielä karkea arvio rungon ja avioniikan painosta, minkä jälkeen saatiin ensimmäinen arvio tulevasta kokonaispainosta ilman akkuja. (Bouabdallah 2007.)

OS4-quadrotorin suunnittelukriteereiksi valittiin 500 gramman maksimimassa. Lisäksi rungon pituudeksi valittiin 800 mm ja työntövoima-paino-suhteeksi 2. Alustavan suunnitelman mukaan haluttiin, että OS4 pystyisi nostamaan kaksi kertaa oman painonsa verran. Roottorin halkaisijaksi valittiin 300 mm, koska se oli suurin mahdollinen valitun kokoiseen runkoon. Suunniteltuun massaan tuli vielä muutoksia runkoon kohdistuneiden vahvistusten ja elektronisten laitteiden takia. Kuvassa 19 esitetyn lopullisen OS4:n kokonaispaino oli noin 650 g. (emt.)



Kuva 19: OS4-quadrotor (emt.)

OS4-quadrotoria verrattiin muihin samantyyppisiin quadrotor-projekteihin kolmella eri parametrilla. Ensimmäinen parametri oli akkujen painon suhde kokonaispainoon. Ideaalitulanteessa akkujen osuus quadrotorin kokonaispainosta olisi 100 %. Toinen parametri oli moottoreiden painon suhde kokonaispainoon, joka olisi ideaalitulanteessa 0 %. Kolmas parametri oli työntövoimamarginaali, joka olisi ideaalina ääretön. (emt.)

OS4:n lisäksi vertailussa oli X-4 Flyer Australian kansalliselta yliopistolta, Draganfly Drangan Fly Innovations Inc. -yritykseltä Kanadasta ja Starmac 2 Stanfordin yliopistolta Yhdysvalloista. Ensimmäiseksi vertailtiin akkujen painon suhdetta kokonaispainoon, joka OS4:llä oli noin 35 %. Tämä oli 50 % parempi kuin toiseksi parhaalla X4-Flyerilla. Moottoreiden painon suhde kokonaispainoon oli OS4:llä 11 %, joka oli 38 % muita projekteja parempi. OS4:n työntövoimamarginaalia ei voitu suoraan

verrata muiden projektien tuloksiin, koska ei ollut varmuutta siitä, oliko mittaukset tehty muissa projekteissa hyötykuorman kanssa. Oli kuitenkin selvää, että OS4:n työntövoiman suhde kokonaispainoon oli vertailukelpoinen muihin projekteihin nähden. Näillä parametreilla tehdyt vertailutulokset osoittavat sen, että OS4:stä tuli erittäin onnistunut laite. OS4-quadrotorin toimivuus osoittaa myös sen, että sitä varten tehty tietokoneohjelmajoinen komponenttien valintamenetelmä on uskottava. (Bouabdallah 2007.)

3.3.4 Flying Unit

Oulun yliopisto kehitti ulkoilmassa tapahtuviin sovelluksiin järjestelmän, joka sisältää useita robotteja. Järjestelmä koostuu yhdestä maayksiköstä ja yhdestä lentävästä yksiköstä, mutta sitä voidaan myös laajentaa käsittämään useamman yksikön toimintaa. Järjestelmän pääasialliset tarkoitukset ovat maaston tiedustelu, ja ennalta määrättyjen kohteiden, kuten ihmisten etsintä. Operaatiot tapahtuvat erittäin vaihtelevissa ympäristöissä, mikä tulee vaatimaan paljon järjestelmän komponenteilta ja ominaisuuksilta. (Tikanmäki, Mäkelä, Pietikäinen, Särkkä, Seppänen & Röning 2007.)

Järjestelmän lentäväksi yksiköksi Oulun yliopiston robotiikan laboratorio päätyi valmistamaan Flying Unit -nimisen quadrotorin, joka on esitetty kuvassa 20. Quadrotorin päätarkoitus järjestelmässä on tuottaa alustavia havaintoja maayksikön toimintaa varten. Sen puoliautomaattinen lennonohjausjärjestelmä sisältää esimerkiksi automaattisen leijunnan ja laskeutumisen. (Flying Unit 2010.)



Kuva 20: Oulun yliopiston robotiikan laboratorion valmistama quadrotor (emt.)

4 UAV:n yleistyminen siviili-ilmailussa

Tässä luvussa tuodaan esille UAV:n yleistymiseen liittyviä haasteita siviili-ilmailussa. Tällä hetkellä suurin este siviili-UAV:n markkinoiden suoraviivaiselle nousulle ovat kansainvälisesti ja kansallisesti puuttuvat ilmailusäädökset. Alaluvussa 4.1 esitetään miehittämättömien lentolaitteiden operointiin liittyviä ongelmia. Tekstissä lähestytään ongelmia UAV:n operointiin liittyvien onnettomuuksien kautta. Alaluvussa 4.2 tuodaan esille ongelmia, jotka liittyvät UAV:n integroimiseen osaksi kansallista ilmatilajärjestelmää. Alaluvussa 4.3 käydään läpi Suomessa toimineen ILO-työryhmän loppuraporttia, jossa UAV-teknologia asetetaan päärooliin Suomen ilmailuteollisuuden ja lentotekniikan kehittämistä ajatellen. Alaluvussa 4.4 esitetään Suomen ilmailuviranomaisen säädöksiä siviili-ilmatilassa toimivien UAV-koneiden kohdalta.

4.1 UAV:n operointiin liittyvät ongelmat

UAV-järjestelmien kysyntä ja käyttö on viime aikoina ollut selvässä nousussa. Erityisesti siviilipuolen UAV-käytölle ovi on vasta aukeamassa, ja tämä tarkoittaa tulevaisuudessa UAV-koneiden lukumäärän selvää kasvua. Lisääntyvällä UAV-toiminnalla on kuitenkin myös useita vielä ratkaisemattomia ongelmia. Yksi suurimmista on turvallisuus. (Valavanis, Oh & Piegl 2008, 3 - 6.)

Viime vuosina UAV-koneiden käytön yleistyessä ovat myös niiden onnettomuudet ja läheltä piti -tilanteet lisääntyneet selvästi. Onnettomuuksien määrä tulee kasvamaan huomattavasti myös tulevaisuudessa, jollei niiden ehkäisemiseksi tehdä mitään riittävän ajoissa. Tutkimusten mukaan onnettomuuden johtuvat pääasiallisesti inhimillisistä erehdyksistä. Yhdysvaltain puolustusministeriön mukaan 70 % rauhanajan UAV-onnettomuuksista johtuu ohjaajan tekemistä virheistä. Esimerkkinä mainittakoon vuonna 2006 tammikuussa tapahtunut UAV:n maahansyöksy asutusalueelle, kun Los Angelesin piirikunnan sheriffi menetti koneen hallinnan. Toinen onnettomuus tapahtui saman vuoden huhtikuussa, kun Predator UAV:n siviiliversio syöksyi maahan Arizonan ja Meksikon rajalla vain muutaman sadan metrin päähän pienestä kylästä. (emt. 3 - 6.)

Viimeaikaisena trendinä on ollut täysin automaattisten ohjausjärjestelmien kehittäminen UAV-koneisiin. Täysin automaattisen lennonohjausjärjestelmän kehittämisessä on

kuitenkin vielä paljon ongelmia. On erittäin vaikea ennustaa yllättäviä tilanteita, joita UAV:n lennonohjausjärjestelmälle tulee väistämättä vastaan. Vielä vaikeampaa on ennustaa miten UAV:n tulisi reagoida tietynlaiseen yllättävään tilanteeseen. Tällaisten ongelmien ratkaiseminen vaatii vielä vuosien kehitystä, jotta täysin automatisoidun lennonohjausjärjestelmän omaavia UAV-koneita voitaisiin käyttää siviilissä kansallisissa ilmatilajärjestelmissä. Siviilipuolen UAV-sovelluksissa on usein kyse lähellä maata suoritettavista lentotehtävistä. Tästä johtuen esteiden lukumäärä toiminta-alueilla on yleensä suuri. Nopeasta kehityksestään huolimatta nykyajan sensoriteknologia ei ole vielä tarpeeksi kehittynyttä, jotta voitaisiin toimia täysin automaattisella ohjausjärjestelmällä esimerkiksi metsä- tai kaupunkiympäristössä. (Valavanis, Oh & Piegl 2008, 3 - 6.)

Siviili-UAV:ta ajatellen täydellisesti automatisoidun lennonohjausjärjestelmän kanssa, tullaan tekemään töitä vielä vuosia. UAV:n kasvavaan kysyntään tulisi kuitenkin reagoida paljon nopeammilla toimilla. Yksi UAV:n yleistymistä hidastavista ongelmista on jo aiemmin mainittu inhimillisten erehdysten takia kasvava onnettomuuksien määrä. Nopea parannus nykyiseen tilanteeseen olisi kehittää UAV-koneita ohjaavien pilottien koulutusta ja ohjaustapoja, joilla pilotit ohjaavat koneita. (emt. 3 - 6.)

Nykyään käytettävissä on kolme ohjaustapaa: ulko-ohjaus, sisäohjaus ja automaattinen ohjausjärjestelmä. Nykyajan UAV-koneista toiset käyttävät vain yhden tyyppistä ohjaustapaa, kuten Yhdysvaltain ilmavoimien täysin automaattinen Global Hawk - UAV. Toiset taas käyttävät esimerkiksi kahta ohjausjärjestelmää, kuten esimerkiksi ulko-ohjausta nousuun ja laskuun ja sisäohjausta lennon suorittamiseen. Ulko-ohjaus perustuu siihen, että lentolaite on kokoajan lentäjän näköpiirissä. Ohjaus tapahtuu yleensä radiolähettimellä annettuihin ohjauskomentoihin. Sisäohjaus tapahtuu maa-asehasta, josta UAV:ta lennetään joystickia ja sivuperäsinpedaaleita käyttäen. Koneessa olevan videokameran reaaliaikainen kuva lähetetään maa-asemaan ja siellä olevalle videonäytölle. Sisäohjauksen yhtenä ongelmana on se, että UAV:sta lähetetty videokuva on rajoittunut erittäin pienelle alueelle. Esimerkiksi ihmisen silmä kattaa huomattavasti suuremman alueen. Toinen ongelma on siinä, että pilotin antamien ohjauskomentojen vaikutus havaitaan aina hieman viiveellä, mikä saattaa helposti johtaa yliohtaamiseen. Tämän tyyppiset ongelmat heikentävät selvästi ohjaajan tilannetajua, mikä taas lisää onnettomuuden riskiä. (emt. 3 - 6.)

Aiemmin mainittiin automaattisten lennonohjausjärjestelmien kehittämiseen liittyviä ongelmia, mutta myös niiden operointiin liittyy asioita, jotka pitää ottaa huomioon turvallisuutta ajatellen. Automaattisten UAV-koneiden lentoa ei seurata kovin intensiivisesti, minkä seurauksena operaattorin tilannetaju heikkenee. Tästä taas aiheutuu ongelmia, jos lennon aikana tapahtuu jotain odottamatonta. Lentoon puuttuminen vie operaattorilta enemmän aikaa, mikä oleellisesti lisää onnettomuuden riskiä lentäjän ohjaamaan UAV-koneeseen verrattuna. Ohjaustapojen parantaminen esimerkiksi keinovalo-joystickeilla ja isommilla näytöillä auttaisi UAV:ta ohjaavaa operaattoria luomaan itselleen laajemman tilannekuvan. (Valavanis, Oh & Piegl 2008, 3 - 6.)

Inhimillisten virheiden ehkäisemisessä oleellinen asia on UAV-ohjaajien suorituskypyn ja koulutuksen parantaminen. Onnettomuustutkijat ovat huomanneet, että UAV-ohjaajat ottavat yleensä tarpeettomia riskejä, jotka lisäävät huomattavasti onnettomuuden todennäköisyyttä. Tarpeettomia riskejä ovat yleensä radikaalit ohjausliikkeet, joiden koneelle aiheuttama rasitus johtaa rakenteiden rikkoutumiseen ja maahansyöksyyn. Miehitetyn ja miehittämättömän lentolaitteen ohjaamisessa on myös selkeä psykologinen ero. Miehittämätöntä lentolaitetta ohjaava pilotti ei koe pelkoa oman henkensä menettämisestä. Tämä johtaa yleensä aggressiivisempiin ohjausliikkeisiin, ja onnettomuuden riski kasvaa. On myös havaittu, että kokeneemmat ohjaajat lentävät niin sanotusti tuntumalla ja pystyvät ennakoimaan ja välttämään tilanteita, jotka johtaisivat aggressiivisiin ohjausliikkeisiin. Mikäli kokenut ohjaaja kuitenkin joutuu tällaiseen tilanteeseen, hän osaisi pehmentää liikkeitä niin, että koneen rakenteille tulisi vähemmän räsytystä. Ohjaajien suorituskypyä ja koulutusta voisi parantaa antamalla UAV-ohjaajille simulaattorikoulutusta, joka simuloisi myös aerodynaamisia voimia. Lentokoulutus perinteisillä lentokoneilla toisi myös ohjaamiseen aivan uuden näkökulman. (emt. 3 - 6.)

4.2 UAV-järjestelmien integrointi kansallisiin ilmatilajärjestelmiin

Pienten UAV-järjestelmien nopea yleistyminen sotilaspuolella on johtanut siihen, että mielenkiinto UAV:n moniin sovelluksiin on saanut myös siviilimarkkinat heräämään. Pieniä UAV-järjestelmiä on käytetty kokeellisesti jo poliisivoimissa, maastopalojen hallintatehtävissä, saastuneiden alueiden tutkimisessa, napa-alueiden sääseurannassa ja

hurrikaanien valvonnassa. Nämä ovat vain muutamia sovellusalueita, ja voidaan ennustaa, että tulevaisuudessa varsinkin pienillä UAV-järjestelmillä tulee olemaan varsin laaja kirjo erilaisia sovelluksia. Pienillä UAV-järjestelmillä tarkoitetaan tässä tekstissä perinteisten RC-lennokkien kokoisia lentolaitteita. (Valavanis, Oh & Piegl 2008, 21 - 22.)

Viimeaikaisten arvioiden pohjalta Yhdysvalloissa UAV-markkinat voisivat ylittää jo 560 miljoonaan dollariin vuoteen 2017 mennessä. Kun UAV:n siviili- ja sotilasmarkkinat yhdistetään, voisi markkina-arvo Yhdysvalloissa olla jopa 5 miljardia dollaria vuoteen 2017 mennessä. Arvioinnin mukaan noin 1500 siviili-UAV-konetta olisi palveluksessa USA:ssa vuonna 2017, ja 85 % niistä olisi pieniä UAV-koneita. (emt. 21 - 22.)

Pienten UAV-järjestelmien kysynnän ja käytön kasvaminen aiheuttaa oleellisen ongelman siviili-ilmailun kommunikaatioverkolle. Erityinen ongelma piilee UAV:n integroimisessa maiden kansallisiin ilmatilajärjestelmiin. Yhdysvaltain ilmailuviranomainen Federal Aviation Administration (FAA) edellyttää normaalisti kaikilta ilmatilassa toimivilta osapuolilta detect, sense and avoid (DSA) -ominaisuutta. Tämä tarkoittaa siis sitä, että koneen pitää jotenkin pystyä havaitsemaan ja välttämään ympärillä mahdollisesti syntyviä vaaratilanteita. Tällä pyritään nostamaan turvallisuutta samalle tasolle perinteisten miehitettyjen ilma-alusten kanssa. UAV-koneisiin asennettavien sensorien odotetaan olevan ratkaisu tulevaisuuden DSA-ongelmaan, mutta sensorit eivät vielä pysty täyttämään viranomaisten vaatimuksia. Tämän lisäksi esille on tullut ongelma kommunikaation hoitamisesta lennonjohdon, UAV:n ja operaattorin välillä. Operaattorilta vaadittaisiin kykyä puuttua UAV:n lentoon, joko säätelevänä tai kokonaisvaltaisesti. Yksi FAA:n esille tuomista päähuolenaiheista on UAV:n turvallisuusmääräysten täyttäminen siten, että se ei olisi ristiriidassa olemassa olevien järjestelmien kanssa. Kommunikaatioon liittyviä ongelmia ovat esimerkiksi tarvittavan kaistan saatavuus ja varaaminen sekä valvonnan ja ohjauksen laajuuteen liittyvät kysymykset. Tällaiset haasteet ovat edessä kaikilla mailla, jotka tulevat käyttämään UAV-koneita omassa ilmatilassaan. (emt. 21 - 22.)

Tällä hetkellä kansainvälinen ilmailulainsäädäntö suhtautuu erittäin kankeasti miehittämättömään siviili-ilmailuun ja osittain jopa estää sen toiminnan. Tämän asian korjaamiseksi Yhdysvalloissa ja Euroopassa on alettu valmistella UAV-järjestelmiin liittyviä säädöksiä. Rajoitettu kansainvälinen UAV-järjestelmiä koskeva säännöstö voisi

tulla voimaan jo vuonna 2012. Lopullinen säännöstö pyritään saamaan voimaan vuoden 2020 loppuun mennessä. (ILO 2-työryhmä 2010, 6 - 7.)

4.3 UAV-teknologian suunta Suomessa

Suomen Puolustus- ja ilmailuteollisuusyhdistyksen perustama ILO-työryhmä teki perusteellisen selvityksen maamme ilmailuteollisuuden ja lentotekniikan tilasta ja tulevaisuuden mahdollisuuksista. ILO-työryhmän loppuraportti valmistui maaliskuussa 2010. Raportin mukaan Suomessa tullaan tulevaisuudessa menettämään systemaattisesti kehitetty osaaminen ilmailuteollisuudessa ja lentotekniikassa, jos asialle ei tehdä konkreettisia toimenpiteitä. Puolustusvoimilla ei lähitulevaisuudessa tule olemaan uusia kokoonpano- ja modernisointihankkeita, ja kaupallisen lentoliikenteen kova kilpailutilanne kiristää tilannetta entisestään. Euroopan puolustusvirasto (EDA) on ilmaissut tavoitteekseen EU:n riippumattomuuden ulkopuolisista avainteknologioita koskien. EDA:n yhdeksi painoalueeksi on valittu UAS-järjestelmät. (ILO 2-työryhmä 2010, 2.)

ILO-työryhmän selvityksessä todettiin, että maassamme pitäisi käynnistää koordinoitu ohjelma, jotta lentotekninen osaaminen voitaisiin turvata. Selvityksen perusteella keskeisimmiksi tavoitteiksi esitettiin:

- ilmailuklusterin yhteistyöverkoston kehittämistä
- lentoteknisen koulutuksen turvaamista ja kehittämistä
- miehittämättömien ilmailujärjestelmien (UAS/UAV) ja niihin liittyvien valmiuksien kehittämistä. (emt. 2.)

ILO-työryhmä ehdottaa, että UAS-taitotieto kehittäminen ja ylläpitäminen pitäisi varmistaa teknologiaohjelman muodossa. Yliopisto- ja korkeakoulutasolla voitaisiin suorittaa UAV-aiheisia oppilaitosten välisiä yhteistyöprojekteja. Alan oppilaitosten kurssitarjontaan pitäisi myös kiinnittää huomiota miehittämättömään ilmailuun liittyen. Nämä voisivat olla esimerkiksi osuuksia kursseista tai kokonaisia toteutuksia. (emt. 8.)

Syksyn 2009 aikana työryhmä teki kansallisille julkishallinnon toimijoille kyselyn, johon vastasi 22 toimijaa. Kyselyn ja aiemmin tehtyjen selvitysten mukaan huomattiin,

että Suomesta löytyy yllättävän paljon UAV-tekniikkaan liittyviä hankkeita ja suunnittelua. Eri toimijoiden hankkeet ovat kuitenkin pääsääntöisesti erillään toisistaan. Hajanainen toiminta osoittaa sen, että yhteistyöverkoston kehittäminen on oleellinen seikka alan kehityksen tehostamiseksi. Esimerkiksi useissa Euroopan maissa on selkeä foorumi UAV-ilmailulle, mutta toistaiseksi Suomessa sellaista ei ole. Tällä hetkellä suurin rajoitus UAV-tekniikan käyttöönotolle ja kehitykselle on niitä koskevien määräysten puuttuminen. Ilmailuhallinnon, joka nykyään tunnetaan nimellä Trafi Ilmailu, pitäisi aktivoitua kansallisella ja kansainvälisellä tasolla UAV-järjestelmiä koskevien määräysten valmistelussa, jotta Suomi ei jäisi muuta Eurooppaa ja maailmaa jälkeen. (ILO 2-työryhmä 2010, 7.)

Raportissa ennustetaan, että kymmenen vuoden sisällä Suomessa on useita tahoja, jotka käyttäisivät UAV-operaattoreiden tuottamia palveluja. UAV-operaattoreille taas tullaan tarvitsemaan ylläpitotukea ja koulutusta, ja näihin liittyviä palveluita järjestettäisiin Suomessa. UAV-järjestelmien hankkiminen ja ylläpito edellyttää sitä, että osaamista ja valmiuksia kehitetään alueilla, jotka koskevat UAV:ta. Näitä ovat esimerkiksi simulaattorit ohjaajien koulutusta varten, UAV-järjestelmiin liittyvät ohjelmistot ja maa-asetat UAV:n operoimista varten. Maailmalla on jo paljon UAV-järjestelmiin liittyviä ohjelmistoja ja järjestelmiä, jotka pitää ottaa huomioon Suomen tarpeita ajatellen. (emt. 7.)

4.4 Sivili-UAV:ta koskevat säädökset Suomessa

Tämän alaluvun tarkoitus on antaa pohja siihen, mitä Suomen ilmailuviranomainen edellyttää UAV:n lennättämiseltä tällä hetkellä. Ilmatila jakaantuu valvottuihin ja valvomattomiin alueisiin, mihin seuraavaksi otetaan kantaa.

Valvomattomassa ilmatilassa saa lennättää miehittämätöntä lentolaitetta, mutta sillä ei saa lentää yli 150 metrin korkeuteen, ja koneen pitää olla lennättäjän näköpiirissä. UAV:lla voidaan myös lentää valvotun ilmatilan alapuolella, koska valvottu ilmatila ei tietyissä paikoissa yllä maahan asti. Tässäkään tapauksessa 150 m korkeutta ei saa ylittää. (Hassinen A 2008, 38 - 41.)

Mikäli halutaan lennättää konetta valvotussa ilmatilassa siten, että kone on kuitenkin koko ajan lennättäjän näköpiirissä, tarvitaan siihen lennonjohdolta lupa, eikä 150 metrin

korkeutta ei saa ylittää. Jos UAV:lla halutaan lentää yli 150 metrin korkeudessa, pitää ilmatila varata suljetuksi vaara-alueeksi. Alueen varauksen voi joutua tekemään jopa 10 viikkoa aikaisemmin tiettyä korvausta vastaan. Mikäli UAV:lla halutaan lentää siten, että se on näköpiirin ulkopuolella, pitää alue jälleen varata suljetuksi vaara-alueeksi. Asutuksen päällä lentäminen on myös mahdollista, mutta esteeseen pitää olla vähintään 30 metriä matkaa korkeussuunnassa, eikä 150 metrin korkeutta saa ylittää. Alla olevalle asutukselle ei saa aiheuttaa vaaraa missään tilanteessa. (Hassinen A 2008, 38 - 41.)

TAMKin UAV-projekti voidaan rinnastaa tavallisten lennokkien lennättämiseen liittyviin ohjeisiin, koska TAMKin UAV-kone tulisi olemaan pilotin ohjaama, eikä täydellisesti automaattinen robotti. Seuraavaksi osassa II lähdetään pohjustamaan TAMKin UAV-projektia.

OSA II

TAMKin UAV-projektin pohjustaminen

Mikko Pajunen

5 UAV-konetyypin selvitys

Tässä luvussa selvitetään, mikä lentolaite sopii parhaiten TAMK:n UAV-projektin UAV-koneeksi. Aivan ensiksi esitellään tutkimuksessa käsiteltävän UAV-koneen käyttösovellukset. Sen jälkeen alaluvussa 5.2 kootaan käyttösovellusten perusteella UAV-koneen suunnittelukriteerit. Alaluvun 5.3 alussa rajataan ilma-alustyypit, joita kannattaa harkita tutkimuksen UAV-koneeksi. Sen jälkeen selvitetään, kuinka hyvin nämä valitut konetyypit täyttävät alaluvussa 5.2 määritellyt suunnittelukriteerit. Lopuksi alaluvussa 5.4 kerrotaan, mihin konetyyppiin valintaprosessissa päädyttiin.

5.1 UAV-koneen käyttösovellukset

Tutkimuksessa käsiteltävälle UAV-koneelle asetettiin kaksi käyttösovellusta: ilmanäytteenotto ja lämpökamerakuvaus. Tampereen ammattikorkeakoulun ympäristömonitoroinnin osasto oli jo aiemmin osoittanut mielenkiintoa ilmanäytteenottoa kohtaan. Tähän sovellukseen olisi ollut tarjolla vain TAMK:ssa jo aikaisemmin valmistettu Eurostar-lennokki, joka ei kuitenkaan sovellu ilmanäytteenottoon, koska se on polttomoottorikäyttöinen ja liian raskas. Koneen suuren massan takia koneella ei voida operoida tiheästi asutulla alueella. Tämä johtuu siitä, että painava kone tarvitsee nousu- ja laskutieksensä suuren tilan. Lisäksi koneen polttomoottorin päästöjen pelättiin sekoittavan mittaustuloksia. Eurostarin moottorin arvioitiin olevan myös epäluotettava, ja sen takia koneella ei voisi kantaa herkkiä ja hintavia mittalaitteita. Ilmanäytteenottoa varten ympäristömonitoroinnin osastolla tulisi olla käytettävissä luotettava sähkökäyttöinen lentolaite, joka kykenisi kuljettamaan mittalaitteistoa.

Ajatus toisesta käyttösovelluksesta tuli lentokonetekniikan linjanjohtajalta. Hän ilmaisi tarpeen teollisuushallien lämpövuotojen havaitsemiselle lämpökameran avulla. Teollisuusrakennusten lämpövuotojen kuvaukselle ei ole olemassa käytännöllistä toteutustapaa, ja aihe voisi kiinnostaa yrityksiä energian säästöä silmällä pitäen. Tästä syystä toiseksi käyttösovellukseksi asetettiin lämpökameran avulla tehtävä lämpövuotokuvaus.

5.2 Suunnittelukriteerit

Kriteerit UAV-koneen suunnittelulle perustuvat suoraan edellä mainittuihin käyttösovelluksiin. Lisäksi suunnittelukriteerejä määriteltäessä huomioitiin koulun resurssien sekä käyttöympäristön asettamat rajoitukset. Näiden seikkojen perusteella koottiin kahdeksan kriteeriä, jotka esitellään seuraavaksi.

1. STOL/VTOL-ominaisuus (Short/Vertical Take-Off and Landing): Molempien sovelluksien tapauksessa koneella tulnaisiin operoimaan suurimmaksi osaksi asutusalueella tai muuten vaikeamaastoisessa ympäristössä. Täten on tärkeää, että kone pääsee lyhyeltä matkalta ilmaan, koska kiitoratoja ei ole käytettävissä. Samasta syystä myös laskeutumisen tulisi onnistua pienessä tilassa.

2. Käyttövarmuus: UAV-kone tulee kantamaan kalliita mitta- sekä havainnointilaitteita, joten hyvä käyttövarmuus on erittäin tärkeä ominaisuus. Käyttövarmuutta lisää rakenteen yksinkertaisuus, sillä mekaanisesti yksinkertaisessa laitteessa on mahdollisimman vähän kuluvia osia, jotka voivat pettää kriittisellä hetkellä.

3. Hyvät hidaslento-ominaisuudet: Hyvät hidaslento-ominaisuudet tulevat tarpeeseen etenkin lämpövuotokuvauksessa, joissa nopeasti liikkuva kone ei pystyisi riittävän nopeaan yksityiskohtien kuvaukseen. Alhainen lentonopeus vähentää myös törmäyksen mahdollisuutta, kun lennetään ahtaissa tiloissa. Jos kontaktitilanteeseen kuitenkin ajaututaan, on vahingon määrä sitä pienempi, mitä alhaisempi on kontaktinopeus. Tämä johtuu siitä, että hitaasti liikkuvalla objektilla on vähemmän kineettistä energiaa kuin nopeasti liikkuva objektilla.

4. Alhainen paino: Koneen rakenteen tulee olla mahdollisimman kevyt, jotta pystytään maksimoimaan käytettävissä oleva hyötykuorma sekä riittävä toiminta-aika. Koneen tulee olla kevyt myös siksi, että mahdollisessa hätätilanteessa sekä koneelle että ympäristölle aiheutuisi mahdollisimman vähän vahinkoa.

5. Riittävä toiminta-aika: Käyttösovellusten johdosta koneella tullaan lentämään pitkiä kierroksia, joten sillä tulee olla riittävän pitkä toiminta-aika. Esimerkiksi suuren teollisuushallin kartoittavaan kuvaukseen menee runsaasti aikaa. Jotta riittävä toiminta-aika saavutetaan, tulee koneen teho-painosuhteen olla mahdollisimman hyvä. Toiminta-ajan tulee olla arviolta 10 - 15 minuuttia, jotta UAV-koneella ehtii tehdä tarvittavat mittaukset ja kuvaukset.

6. Riittävä hyötykuorma: Koneen tulee pystyä kantamaan sille suunnitellut kuormat, kuten näytteenottovälineistön tai kamerat tarkoituksen mukaan. Raskaimmat ilmanäytteenottolaitteet painavat yli 700 grammaa, joten koneen tulisi pystyä lentämään riittävän hyvällä liikehtimiskyvyllä vielä 750 gramman hyötykuormalla, mikäli näitä varusteita aiotaan koneeseen ripustaa.

7. Taloudellisuus: Koneen tulee olla toteutettavissa koulun resurssien puitteissa, mutta tärkeissä komponenteissa ei kuitenkaan tule säästää, jotta voidaan säilyttää koneen käyttövarmuus. Tästä syystä koneeksi tulee lähtökohtaisesti valita edullisimmasta päästä oleva ratkaisu.

8. Nopea toteutettavuus: Yksi tutkimuksen pohjustuksessa esiin tullut seikka oli, että TAMKin UAV-projekti tulisi saada nopeasti ”siivilleen”, jotta aloitteilla olevaan kansalliseen UAV-hankkeeseen ehdittäisiin mukaan.

Seuraavaksi selvitetään, minkä tyyppinen lentolaite täyttäisi nämä käyttösovellusten pohjalta määritetyt suunnittelukriteerit. Tätä lähdetään selvittämään projektin alussa kerätyn UAV-tekniikkaan liittyvän materiaalin avulla.

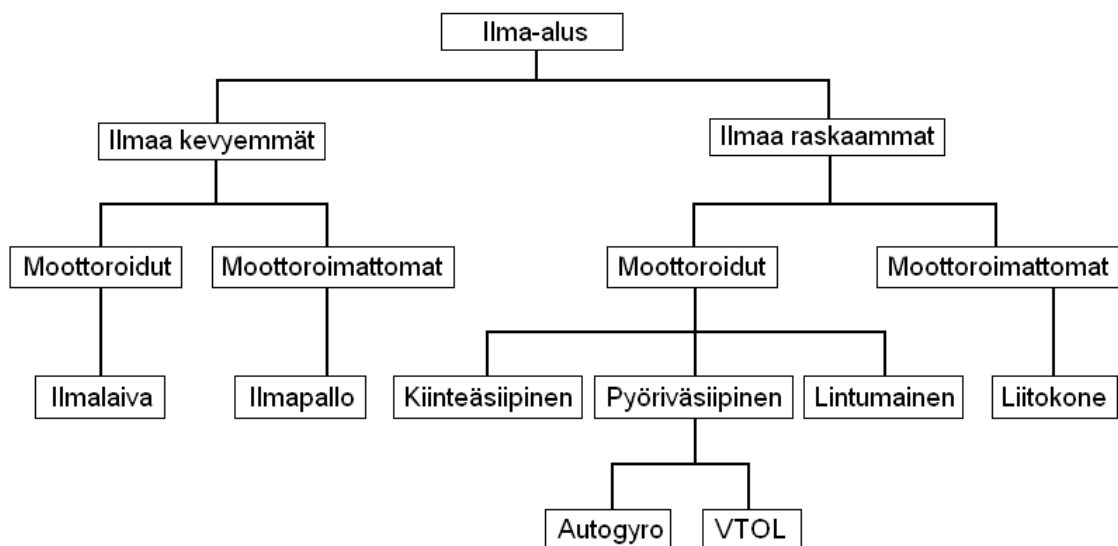
5.3 UAV-koneen valintaprosessi

Seuraavaksi aluvuossa 5.3.1 suoritetaan lentolaitteiden alustava rajaus lentolaitteiden jaottelun ja pisteytyksen avulla. Sen jälkeen aluvuossa 5.3.2 vertaillaan alustavan rajauksen perusteella valittuja lentolaitteita. Tämä vertailu perustuu yllä esitettyihin suunnittelukriteereihin.

5.3.1 Lentolaitteiden jaottelu ja pisteytys

Jotta kriteeripohjaista vertailua ei tarvitsisi tehdä liian monen konetyypin kesken, päätettiin ilma-alustyypeille suorittaa ensin alustava rajausta, jonka avulla voitaisiin karsia lentokonetyyppikategoriaa pienemmäksi. Näin lopulliseen vertailuun saataisiin vain potentiaalisimmat lentolaitteet, eikä vertailusta tulisi liian aikaavievä.

Tohtorinväitöskirjassaan Samir Bouabdallah (2007, 9) käyttää kuvan 21 mukaista menetelmää jakaessaan lentolaitteet kahteen pääkategoriaan lentotavan ja työntövoiman tuottotavan perusteella. Kuvan tekstit on käännetty alkuperäisteoksesta suomen kielelle ymmärrettävyyden parantamiseksi.



Kuva 21: Ilma-alusten erittely toimintaperiaatteen mukaan (Bouabdallah 2007, 9)

Taulukkoon 1 (ks. s. 44) on kerätty kuvan 21 lentolaitteita, joilla olisi potentiaalia pienoislma-aluskäyttöön. Taulukossa näitä ilma-aluksia vertaillaan ominaisuuskohtaisesti pisteyttäen ne kohta kohdalta. Taulukko on käännetty alkuperäisteoksesta (emt. 11) suomen kielelle ymmärrettävyyden parantamiseksi.

Taulukko 1: Ilma-alusten ominaisuusvertailu (1 = huono, 3 = hyvä)
(Bouabdallah 2007, 11)

	Lentokone	Helikopteri	Lintu	Autogyro	Ilmalaiva
Energiatehokkuus	2	1	1	2	3
Ohjattavuus	2	1	1	2	3
Hyötykuorma	3	2	2	2	1
Liikehtimiskyky	2	3	3	2	1
Liikehtimissuunnat	1	3	3	2	1
Leijunta	1	3	2	1	3
Hidaslento	1	3	2	2	3
Vaurionsietokyky	2	2	3	2	2
VTOL	1	3	2	1	3
Toiminta-aika	2	1	2	1	3
Pienikokoisuus	2	3	3	2	1
Sisäkäyttö	1	3	2	1	2
Kokonaisuus	20	28	26	20	26

Taulukkoa 1 tarkastelemalla voidaan todeta, että lentokone erottuu ryhmästä edukseen hyvän *hyötykuorman* ja *energiatehokkuuden* ansiosta. Kokonaispisteityksessä se jää kuitenkin VTOL-ominaisuuden omaavien koneiden (helikopteri, lintu ja ilmalaiva) taakse. VTOL-koneet ovat myös vahvoilla, kun verrataan niiden hyviä ominaisuuksia aikaisemmin aluvussa 5.2 esiteltyihin suunnittelukriteereihin. Tästä syystä rajauksessa päätettiin käyttää lisäksi taulukkoa 2 (Bouabdallah 2007, 12), jossa vertaillaan VTOL-ilma-alusten soveltuvuutta pienoisilma-aluskäyttöön. Myös taulukko 2 on käännetty alkuperäisteoksesta suomen kielelle ymmärrettävyyden parantamiseksi.

Taulukko 2: VTOL-ilma-alusten ominaisuusvertailu (1 = huono, 4 = erittäin hyvä)
(Bouabdallah 2007, 12)

	A	B	C	D	E	F	G	H
Energiatehokkuus	2	2	2	2	1	4	3	3
Ohjauksen energiataloudellisuus	1	1	4	2	3	3	2	1
Hyötykuorma/tilavuus	2	2	4	3	3	1	2	1
Liikehtimiskyky	4	3	2	2	3	1	3	3
Mekaniikan yksinkertaisuus	1	2	3	1	4	4	1	1
Aerodynamiikan haasteellisuus	1	1	1	1	4	3	1	1
Hidaslennettävyys	4	3	4	3	4	4	2	2
Nopeuslennettävyys	2	4	1	2	3	1	3	3
Pieniskoossa rakennettavuus	2	3	4	2	3	1	2	4
Vaurioherkkyyys	1	3	3	1	1	3	2	3
Leijuntakyky	4	4	4	4	4	3	1	2
Kokonaisuus	24	28	32	23	33	28	22	24

A = Yksiroottorinen, B = Aksiaaliroottori, C = Koaksiaaliroottori, D = Tandemroottori, E = Quadrotor, F = Ilmalaiva, G = Linnun kaltainen, H = Hyönteisen kaltainen.

Taulukon 2 tuloksia tarkastelemalla havaitaan, että quadrotor-tyyppinen VTOL-kone (E) on pisteityksessä ensimmäisenä, vain pisteen edellä toisena olevaa koaksiaaliroottoria (C). Quadrotor suoriutuu arvostelussa erityisen hyvin *mekaniikan yksinkertaisuus* ja *aerodynamiikan haasteellisuus* -osioissa, joissa se on molemmissa joukon paras. Lisäksi sen hidaslentokyvyt, eli *hidaslennettävyys* ja *leijuntakyky*, ovat parhaiden joukossa. Ainoa osio, jossa se jää joukon viimeiseksi on *energiatehokkuus*, jossa taas toiseksi tuleva koaksiaaliroottori pärjää paremmin. Parhaat pisteet koaksiaaliroottori saa kategorioissa *hyötykuorma/tilavuus* ja *pienkoossa rakennettavuus*.

Suurin yllätys taulukkoa 2 tutkittaessa on perinteisen helikopterin (A) melko huono soveltuvuus pienoisilma-aluskäyttöön. Helikopteria oli alustavasti pidetty yhtenä varteenotettavana vaihtoehtona TAMKin UAV-projektille, mutta pyöriväsiipisten VTOL-koneiden (A, B, C, D, E) vertailussa se jää toiseksi viimeiseksi, takanaan ainoastaan tandemroottori. Arvostelukriteereistä helikopterin kokonaisarvosanaa laskevat eniten sen *mekaaninen* ja *aerodynaaminen monimutkaisuus* sekä sen *vaurioherkkyys*. Lisäksi helikopterin ohjausjärjestelmä ei ole kovinkaan *energiataloudellinen*. Pyöriväsiipisille koneille ominaisesti helikopteri suoriutuu hyvin kategorioissa *hidaslennettävyys* ja *leijuntakyky*.

Jaotelluista lentolaitteista päätettiin valita seuraavassa alaluvussa käsiteltävään kriteeripohjaiseen vertailuun neljä lentolaitetta: lentokone, quadrotor, koaksiaaliroottori ja ilmalaiva. Kiinteäsiipinen lentokone valittiin mukaan, koska se on looginen valinta lentokonetekniikan opintolinjan taitotiedon johdosta. Tampereen ammattikorkeakoululla on kokemusta vastaavan tyyppisestä projektista jo aiemmin mainitun Eurostar-projektin muodossa (ks. alaluku 5.1 s. 40). Lisäksi TAMKin lentokoneinsinöörilinjan komposiittikursseilla on käsitelty runsaasti lennokkirakennusta, ja muutkin opinnot keskittyvät nimenomaan lentokoneisiin.

Quadrotor valittiin mukaan, koska se pärjasi pienoisikäyttöön soveltuvien VTOL-koneiden vertailussa erinomaisesti, ja suurin osa sen saavuttamista pisteistä tuli TAMKin UAV-projektille tärkeistä kategorioista. Pyöriväsiipisiä koneita päätettiin valita vertailuun vielä toinenkin, eli koaksiaaliroottori, koska se asettui pisteityksessä quadrotorin taakse vain pienellä marginaalilla. Lisäksi se keräsi quadrotoria enemmän pisteitä tietyistä kriittisistä kategorioista, kuten *pienoiskoossa rakennettavuudesta* ja *vaurioherkkydestä*. Neljäntenä aluksena kriteeripohjaiseen vertailuun päätettiin valita ilmalaiva. Ilmalaiva valittiin mukaan poikkeuksellisen hyvän *energiatehokkuutensa*

takia. Lisäksi se herätti tutkimuksessa mielenkiintoa, koska sen toimintaperiaate on täysin erilainen muihin lentolaitteisiin verrattuna. TAMKilla ei myöskään ole juuri paneuduttu ilmalaivojen ominaisuuksiin, joten niihin tutustuminen tässä tutkimuksessa koettiin hyödylliseksi.

5.3.2 Kriteeripohjainen vertailu

Edellisessä alaluvussa valittiin kriteeripohjaiseen vertailuun neljä lentolaitetta: lentokone, quadrotor, koaksiaaliroottori ja ilmalaiva. Seuraavaksi tarkastellaan näiden lentolaitteiden istuvuutta alaluvussa 5.2. esiteltyihin suunnittelukriteereihin.

Lentokone

Suoraviivainen lentotapa on yksi lentokoneen tärkeimmistä ominaispiirteistä. Sen ansiosta lentokone soveltuu hyvin näytteenottokäyttöön, sillä näytteenottojärjestelmä on helppo sijoittaa puhtaaseen ilmavirtaukseen asentamalla se ripustimen avulla siipeen. Toisaalta suoraviivainen lentotapa voidaan lukea tässä tutkimuksessa myös heikkoudeksi, sillä sen takia lentokoneen STOL/VTOL-ominaisuus on vaikea toteuttaa. Lentokone tarvitsee riittävän nopeuden, jotta se kykenee tuottamaan lentämiseen tarvittavan nostovoiman (Laine, Hoffren & Renko 2006, 58). Tästä syystä lentokone vaatii riittävän pitkän kiito- ja laskutien, tai vaihtoehtoisesti lentokoneen tulee olla niin pieni, että se voidaan heittää ilmaan kädestä tai katapultin avulla. Lentokoneen toimintaperiaatteen johdosta myös vaadittavat hidaslento-ominaisuudet on vaikea toteuttaa, sillä alla esitetyn kaavan (1) mukaisesti koneen nopeus (V) vaikuttaa nostovoiman (L) tuottamiseen toisessa potenssissa, jolloin yhtälön muita suureita, eli nostovoimakertoa (C_L), kohtauskulmaa (α), ilman tiheyttä (ρ) ja siiven pinta-alaa (S), jouduttaisiin kasvattamaan suhteessa huomattavasti enemmän.

$$L = C_L(\alpha) \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

Kun tarkastellaan kaavaa (1) riittävän toiminta-ajan kannalta, voidaan lentokoneen kohdalla todeta, että kaavan suureista ainoastaan nopeuden tuottamiseen tarvitaan mekaanista energiaa. Tämän johdosta lentokoneilla pystytään operoimaan pitkiä aikoja, mikä tuli esiin myös taulukossa 1(ks. s. 44).

Vaikka lentokone on toimintaperiaatteeltaan suhteellisen yksinkertainen, se käyttää ohjaukseen monia eri ohjainpintoja. UAV-koneessa nämä ohjainpinnat toimivat servojen avulla, eikä niille ole olemassa varajärjestelmää. Tämä heikentää käyttövarmuutta, kuten alaluvun 5.2 kohdassa 2 (ks. s. 41) perusteltiin.

Kun mietitään projektin toteutusnopeutta, voidaan lentokoneen kohdalla käyttää apuna Eurostar-projektin päiväkirjoja. Päiväkirjat osoittavat, että suunnittelun ja toteutuksen vaatimat aerodynaamiset laskelmat, lujuuslaskelmat, muottien valmistus sekä itse koneen rakentaminen veivät noin 500 miestyötuntia. Tulee myös ottaa huomioon, että Eurostar-projektin pohjana käytettiin jo olemassa olevaa konetta, mutta UAV-konetta suunniteltaessa tällaista mahdollisuutta ei olisi, ellei pohjana päätettäisi käyttää Eurostaria. Tämän takia työtunnit tulisivat lisääntymään entisestään.

Quadrotor

Quadrotor on vertailun vaihtoehtoista mekaniikaltaan yksinkertaisin. Sen perusrakenteessa on vain neljä liikkuvaa osaa, eli sähkömoottorit, joita käytetään sekä ohjaukseen että nostovoiman tuottamiseen (Bouabdallah 2007, 13). Koneen rakenteen yksinkertaisuus todennäköisesti nopeuttaisi UAV-projektin toteutusta. Lisäksi neljä nostovoimaa tuottavaa moottori-roottoriyhdistelmää lisäävät quadrotorin kuormankantokykyä verrattuna esimerkiksi perinteiseen helikopteriin tai koaksiaaliroottoriin. Tämä tosin kustautuu pienentyneenä käyttöaikana. (Castillo ym. 2005, 15.) Edellä mainitut ominaisuudet löytyvät alaluvussa 5.2 asetetuista suunnittelukriteereistä, ja ainoa ominaisuus, jossa quadrotor pärjää muita lentolaitteita heikommin on toiminta-aika. Taulukko 2 (ks. s. 44) osoittaa, että quadrotor pärjää erinomaisesti myös hidaslennossa ja leijunnassa. Kuten aikaisemmin mainittiin, nämä kriteerit ovat erittäin tärkeitä, kun operoidaan alueella, missä ei ole suurta nousu- tai laskeutumisaluetta tai kun suoritetaan lämpökuvausta, jossa kuvausta pitää pystyä tekemään tarpeeksi alhaisella nopeudella yksityiskohtien vangitsemiseksi.

Ongelmia quadrotorissa aiheuttaa sen rakenne, sillä sen roottorit on sijoitettu ristikkorungon kulmiin. Tämä hankaloittaa näytteenottolaitteiston sijoittamista, sillä roottorit sekoittavat ilmaa rungon ympäriltä. Tästä syystä näytteenottosuutin täytyy viedä puhtaaseen virtaukseen roottorin sekoittaman ilmamassan ulkopuolelle. Roottorien sijainti altistaa quadrotorin toisellekin ongelmalle, nimittäin vaurioherkkyydelle, mikä on nähtävissä myös alaluvun 5.3.1 taulukossa 2 (ks. s. 44),

jossa quadrotor arvosteltiin vaurioherkkyydeltään vain yhden pisteen arvoiseksi. Vaurioherkkyys johtuu siitä, että roottorien yhteisala on suuri, ja iso osa tästä alasta ulottuu koneen rungon linjojen ulkopuolelle. Tästä syystä mahdollisessa osumatilanteessa törmäyskohteeseen osuvat ensimmäisenä roottorit, mikä saattaa johtaa niiden vioittumiseen ja koneen putoamiseen. Roottorit on toki mahdollista suojata roottorien ulkokehän ympärille sijoitettavilla suojilla (Hoffmann, Huang, Waslander & Tomlin 2007, 1), mutta se taas nostaa koneen painoa.

Koaksiaaliroottori

Koaksiaaliroottoriin pätevät aiemmin esitetyn taulukon 2 (ks. s. 44) mukaan monet samat edut kuin quadrotoriinkin. Tästä syystä sen lähin vertailukohde tarkasteltaessa suunnittelukriteereihin soveltuvuutta on quadrotor. Koaksiaaliroottori soveltuu erinomaisesti pienissä tiloissa operoimiseen sen hyvien hidaslento- ja VTOL-ominaisuuksien ansiosta. Myös sen quadrotoria pienempi koko helpottaa ahtaissa tiloissa liikkumista. Koaksiaaliroottorilla on pienempi roottoriala kuin quadrotorilla, koska siinä on vain kaksi roottoria, ja ne on sijoitettu samalle akselille. Tällöin akselin suuntaisesti katsottuna roottoripinta-alaksi tulee vain yhden roottorin ala. Näin ollen kone on kokonaisuudessaan kompaktimpi kuin quadrotor. Kahdella moottorilla toimiva koaksiaaliroottori on myös energiatehokkaampi kuin neljää moottoria käyttävä quadrotor. Kaksimoottorisuudella on kuitenkin myös haittavaikutuksia, sillä se heikentää koaksiaaliroottorin kuormankantokykyä.

Koaksiaaliroottorin ja quadrotorin ongelmat ovat melko samanlaisia. Myös koaksiaaliroottorissa ongelmia tuottavat roottorit, sillä ne häiritsevät koneen ympärillä olevaa virtausta näytteenotossa, ja kontaktitilanteessa ne osuvat ensimmäisenä kohteeseen vaurioittaen mahdollisesti konetta sekä kohdetta. Koaksiaaliroottorin lavat ovat myös pidemmät kuin quadrotorin, joten ne omaavat pyöriessään suuremman määrän potentiaalienergiaa, ja näin vahingoittumisen mahdollisuus on suurempi.

Koaksiaaliroottorin suurin ongelma on sen lentomekaniikan ja aerodynamiikan monimutkaisuus. Vaikka pienoiskokoisten koaksiaaliroottoreiden roottorimekaniikkaa on onnistuttu yksinkertaistamaan täysikokoisten koaksiaalikohterien mekaniikkaan verrattuna, on se silti edelleen huomattavasti monimutkaisempi toteuttaa kuin esimerkiksi quadrotorin yksinkertainen roottorimekanismi. (Bouabdallah 2007, 11.) Tämän vuoksi TAMKin UAV-projektin toteutusaika tulisi pidentymään.

Ilmalaiva

Ilmalaivan vahvuus on sen passiivisesti tuotettu noste, koska sen ansiosta ilmalaiva on muita konevaihtoehtoja energiatehokkaampi. Lisäksi ilmalaivan propulsiojärjestelmä sekoittaa ilmaa näytteenottokäytössä huomattavasti vähemmän kuin muiden VTOL-koneiden propulsiojärjestelmät. Tämä johtuu siitä, että ilmalaiva käyttää pientä roottoria ainoastaan ohjaukseen. Ilmalaivan suurin heikkous on sen huono kuormankantokyky. Kun sen kuormankantokykyä kasvatetaan, kasvaa samalla myös sen koko. Tämä johtuu siitä, että painon lisääntyessä ilmalaivan tarvitsee syrjäyttää suurempi määrä ilmaa tuottaakseen riittävästi nostetta. Ilmalaivoissa käytetään ilmaa kevyempänä kaasuna heliumia (He). Jotta ilmalaivan kokoluokka saatiin selvitettyä, päätettiin laskea, kuinka paljon heliumia tarvittaisiin nostamaan ilmanäytteenottolaitteisto (750 g) irti maan pinnasta. Tähän käytettiin Arkhimedeen lakiin perustuvaa nosteen kaavaa (2).

$$F_p = \rho V g \quad (2)$$

Jossa: $F_p = \text{noste, [N]}$

$$\rho = \text{kaasun tiheys, } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_{\text{ilma}} = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{He}} = 0,178 \text{ kg/m}^3$$

$V = \text{syrjäytetty neste-, tai kaasutilavuus, [m}^3\text{]}$

$$g = \text{putoamiskiihtyvyyys, } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$= 9,81 \text{ m/s}^2$$

Noste ylöspäin on yhtä suuri kuin syrjäytettyyn kaasuun/nesteeseen (ilma) vaikuttava painovoima, joten:

$$F_{Noste} = \rho_{ilma} V g$$

Heliumiin (He) kohdistuu painovoima alaspäin:

$$G_{He} = \rho_{He} V g$$

Näytteenottolaitteistoon (nol) kohdistuu painovoima alaspäin:

$$G_{nol} = m_{nol} g$$

jolloin tasapainotilaksi saadaan

$$F_{Noste} = G_{He} + G_{nol}$$

joka on sama kuin

$$\rho_{ilma} V g = \rho_{He} V g + m_{nol} g$$

Kun yhtälö ratkaistaan tilavuuden (V) suhteen, saadaan:

$$V = \frac{m_{nol}}{\rho_{ilma} - \rho_{He}}$$

$$V = \frac{0,75 \text{ kg}}{1,293 \text{ kg/m}^3 - 0,178 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 0,67 \text{ m}^3$$

Heliumia tarvitaan siis $0,67 \text{ m}^3$, jotta mittalaitteisto saataisiin irti maasta.

Hahmottamisen helpottamiseksi tarvittava tilavuus voidaan ilmaista myös vastaavan kokoisen heliumpallon halkaisijana. Tähän käytetään pallon halkaisijan (d) kaavaa (3):

$$d = \sqrt[3]{\frac{V * 6}{\pi}} \quad (3)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{0,67 \text{ m}^3 * 6}{\pi}}$$

$$d = 1,09\text{m}$$

Pelkän mittalaitteiston kannatteluun tarvittaisiin siis vähintään 1,09 metrin heliumpallo, eikä laskussa edes huomioitu kaasun kokoonpuristuvuutta tai ilmalaivan pintamateriaalin ja ohjausjärjestelmän painoa.

Jos ilmalaivaa käytettäisiin pelkästään näytteenottoon, se ei tarvitsisi ohjausjärjestelmää, koska sitä voitaisiin ohjata narun avulla maasta. Mutta koska ilmalaivan täytyy pystyä projektin suunnittelukriteerien mukaan tekemään myös lämpökuvausta, täytyy sen olla radio-ohjattava. Ohjaukseen tarvittavat sähkö- ja servomootorit, akku ja lähetin-vastaanotin nostavat koneen painoa, jolloin sen kokoa pitäisi kasvattaa entisestään. Ilmalaiva on myös rakenteeltaan heikko, koska pintamateriaaliksi täytyy valita mahdollisimman ohut materiaali painon säästämiseksi.

Seuraavassa alaluvussa esitellään, mikä näistä neljästä koneesta lopulta valittiin tutkimuksen UAV-projektin konetyypiksi.

5.4 UAV-koneen valinta

Edellä tehty tutkimus on osoittanut, että kaikilla läpikäydyillä lentolaitteilla on potentiaalia UAV-käyttöön, ja niiden ympärille olisi hyvä lähteä rakentamaan uusia UAV-projekteja ja kehittämään uusia käyttösovelluksia. Tämän projektin käyttösovelluksien ja suunnittelukriteerien pohjalta voidaan todeta, että lentokone olisi ollut ilmanäytteenoton kannalta vartenotettava vaihtoehto, mutta sen huonot hidaslento-ominaisuudet ja puuttuva VTOL-ominaisuus muodostuivat esteeksi suunnittelukriteerejä ajatellen.

Ilmalaiva taas olisi soveltunut vain toiseen käyttösovellukseen, eli joko näytteenottoon tai lämpökamerakuvaukseen, mutta ei molempiin. Ilmanäytteenotto-ominaisuus vaatii hyvää kuormankantokykyä, ja kun tämä yhdistetään lämpökuvauksen vaatimaan hyvään ohjattavuuteen, nousee ilmalaivan koko kohtuuttoman suureksi. Ilmalaiva ei myöskään olisi opetuksellisesti kovin kehittävä lentokoneopintolinjan opiskelijoille.

Koaksiaaliroottori oli myös varteenotettava vaihtoehto, mutta tämän UAV-projektin konetyypiksi valittiin kuitenkin quadrotor, koska tutkimus osoitti sen täyttävän parhaiten suunnittelun lähtökohdaksi asetetut kriteerit, ja koska sen ainoa negatiivinen ominaisuus oli huono energiatehokkuus. Quadrotoria puolsivat myös sen parempi kuormankantokyky sekä mahdollisuus projektin nopeampaan toteutettavuuteen.

Quadrotor-koneen voidaan myös todeta olevan uusi aluevaltaus lentokonepuolen opettajille ja oppilaille, mikä puolestaan laajentaa lentokonepuolen taitotietoa ja vahvuusalueita. Tutkimuksen aikana ei ole myöskään havaittu muita kesken tai valmisteilla olevia kotimaisia quadrotor-projekteja, joten quadrotor-kehitystyössä on mahdollista saada etumatkaa muihin kotimaisiin UAV-tekniikan kehittäjiin nähden. Tämä saattaa olla tulevaisuudessa tärkeä kilpailuvaltti, joka voi nostaa TAMK:n markkina-arvoa ja uskottavuutta UAV-tutkimuksen parissa.

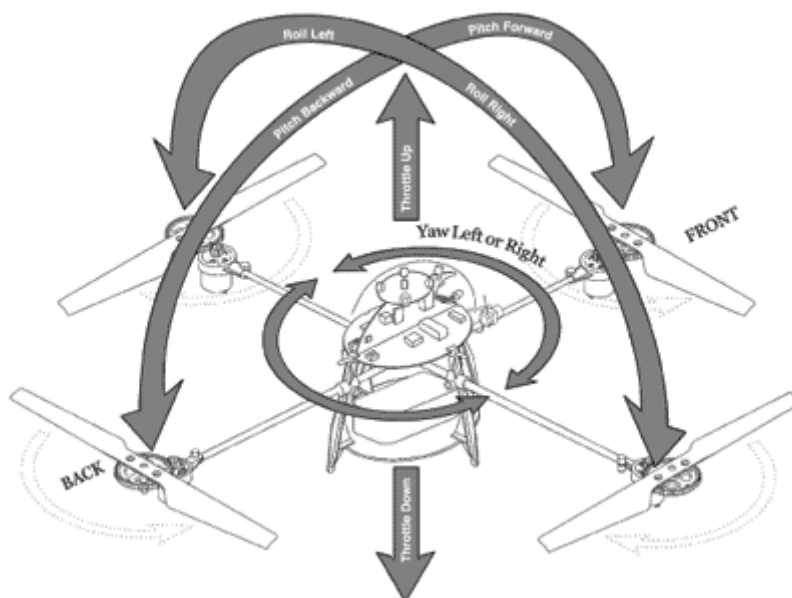
Quadrotoria ja sen valmistusprosessia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

6 Valmistussuunnitelma

Luvun 6 tarkoituksena on tehdä alustava valmistussuunnitelma TAMKIn quadrotor-UAV-projektille. Ensimmäisessä aluvuossa käydään läpi pienoiskokoisen sähkökäyttöisen quadrotorin toimintaperiaate, minkä jälkeen aluvuossa 6.2 esitellään komponentit, joita sähkökäyttöinen quadrotor tarvitsee toimiakseen. Alaluku 6.3 käsittelee RC-koneiden suunnitteluun ja komponenttien kartoitukseen käytettäviä analysointiohjelmiä. Sen jälkeen aluvuossa 6.4 määritellään TAMKIn quadrotorille oikeat mittasuhteet ja komponenttien kokoluokat. Aluvuossa 6.5 tehdään selvitys siitä, mitkä komponentit soveltuvat projektin tarpeisiin. Lopuksi aluvuossa 6.6 projektille tehdään kaksiosainen hintakartoitus sekä alustava toteutus- ja jatkosuunnitelma.

6.1 Quadrotor-UAV:n toimintaperiaate

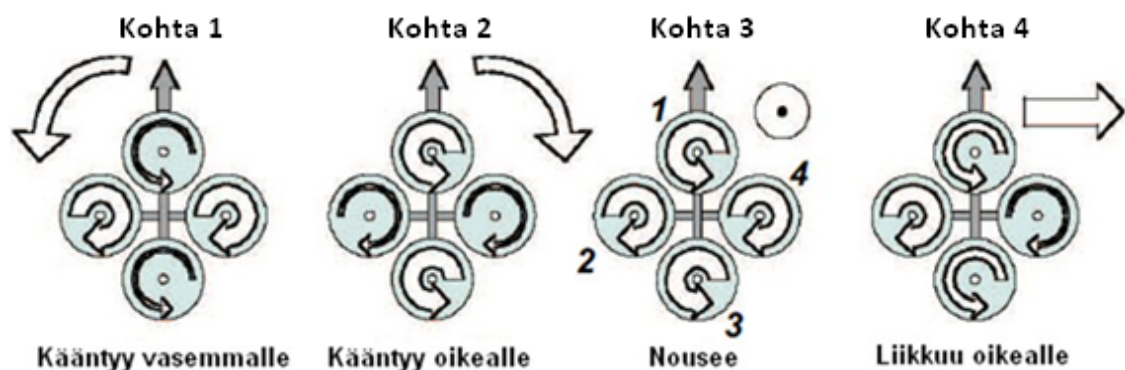
Quadrotor (kuva 22) on kone, joka koostuu ristin muotoisesta rungosta ja neljästä roottorista. Roottorit ovat kiinteälapakulmaisia, ja niitä pyörittävät sähkömoottorit. Roottorin ja moottorin välissä voi olla vaihde, kuten kuvan 22 quadrotorissa, tai roottori voi olla kiinnitetty suoraan moottorin akseliin, mikä on yleisempi tapa.



Kuva 22: Quadrotorin perusrakenne ja liikehtimissuunnat (Draganfly Innovations Inc. 2009b)

Moottori ja roottori muodostavat yhdessä aktuaattorin. Aktuaattorit on sijoitettu rungon neljän samanmittaisen varren päihin. Roottorit on asetettu samalle tasolle siten, että kaikkien roottorien tuottama noste suuntautuu kohtisuoraan runkoa kohti (Calvert 2009, 2). Roottorien tulee olla ominaisuuksiltaan yhtenevät, jotta ne tuottavat samalla tehoasetuksella saman määrän nostovoimaa. Tämän takia myös moottoreiden tulee olla ominaisuuksiltaan yhtenevät. Vastakkaiset roottorit muodostavat keskenään parit. Näistä pareista toinen pyörii myötäpäivään ja toinen vastapäivään. Siksi yksittäisten roottorien aiheuttamat gyroskooppiset vaikutukset ja aerodynaamiset väännöt kumoutuvat leijunnassa. (Castillo ym. 2005, 41.)

Kuvassa 23 on esitetty quadrotorin liikehtimisperiaate. Quadrotorin liikehdintä tapahtuu yksittäisten roottorien tuottamaa nostovoimaa säätelemällä. Koska roottorit ovat kiinteälapaisia, nostovoiman säätely tapahtuu niiden kierroslukua muuttamalla. Kun koneen roottorit tuottavat yhteensä koneen massan verran nostovoimaa, on kone leijunnassa. Kaikkien roottoreiden yhtäaikainen kiihdyttäminen aiheuttaa koneen nousemisen (ks. kuva 23, kohta 3) ja hidastaminen koneen vajoamisen (Bouabdallah 2007, 13). Quadrotorin kääntyminen pystyakselinsa ympäri saavutetaan edellisessä kappaleessa mainittujen roottoriparien keskinäisellä kierrosnopeuden muutoksella (ks. kuva 23, kohdat 1 ja 2). Poikittaissuuntainen liike saavutetaan kallistamalla konetta pituus- tai poikittaisakselinsa ympäri. Tämä toteutetaan roottoriparin sisäisellä kierrosnopeuden muutoksella (ks. kuva 23, kohta 4). (emt. 13.) Liikutettaessa konetta poikittaissuuntaisesti (ks. kuva 23, kohta 4) tai pystyakselinsa ympäri (ks. kuva 23, kohdat 1 ja 2) tulee roottorien tuottaman yhteisnostovoiman pysyä vakiona, jotta kone säilyttää lentokorkeutensa (Castillo ym. 2005, 42).



Kuva 23: Quadrotorin liikehtimisperiaate (Bouabdallah 2007, 13)

6.2 Tarvittavat komponentit

Tässä alaluvussa käydään läpi quadrotorin tarvitsemat komponentit nimikeasteella sekä selvitetään komponenttien perustoiminta ja merkinnät. Lisäksi käydään läpi tärkeimmät valintaan vaikuttavat ominaisuudet.

Quadrotor tarvitsee toimiakseen seuraavat komponentit:

Roottori, 4 kpl

Quadrotor-konetyypin toimintaperiaate asettaa joitakin rajoituksia roottorien valinnalle, koska roottoreita tulee olla saatavilla molempiin suuntiin pyörivinä, eikä se aina ole mahdollista. Lisäksi rungon koko rajoittaa potkurin maksimihalkaisijaa. Suosituttuja moottorimateriaalivaihtoehtoja quadrotor-käytössä ovat erilaiset muovit ja komposiitit, kuten APC¹- ja EPP²-muovit sekä CFB- eli hiilikuitukomposiitti.

Roottorin mallimerkintä voi olla esimerkiksi APC 10x4,7”, jossa APC tarkoittaa, että materiaali on APC-muovia ja 10” tarkoittaa, että roottorin halkaisija on 10 tuumaa. Merkintä 4,7” ilmoittaa roottorin geometrisen nousun: jos potkurin oletetaan porautuvan ilmaan kuin ruuvi, se etenee yhden kierroksen aikana 4,7 tuumaa.

Moottori, 4 kpl

Quadrotor-koneissa käytetään yleisimmin harjattomia ulkopyörjämoottoreita. Moottorit ovat harjattomia siitä syystä, että ne ovat harjallisiin verrattuna kevyempiä sekä pitkäikäisempiä ja niillä on parempi hyötysuhde. Ulkopyörjämoottoreiden etu sisäpyörjijöihin nähden on niiden alhaisempi kV-luku (kierroslukumäärä/voltti) ja suurempi vääntö. Siksi niiden kanssa ei tarvitse yleensä käyttää alennusvaihdetta, mikä taas säästää painoa. (Draganfly Innovations Inc. 2009a). Ulkopyörjämoottorin tunnistaa siitä, että sen ulkokehä pyörii akselin mukana kiinnitysalustan pysyessä paikallaan.

Quadrotorin kannalta tärkeitä merkintöjä moottoreissa ovat kV-luku ja paino. KV-luku ilmoittaa, kuinka monta kierrosta moottorin akseli pyörii yhden voltin jännityksellä.

¹ Atmospheric Pressure Casting (Quadrant 2007, 6)

² expanded polypropylene (EPP 2010)

Tutkimusten mukaan tämä luku on quadrotor-käytössä yleensä 700 - 1000 (RC Groups 2009). Pienen kV-luvun omaava moottori on vääntävämpi kuin saman kokoluokan moottori, jonka kV-luku on isompi. Quadrotoreissa käytettävät moottorit painavat yleisesti 50 - 80 grammaa (RC Groups 2009). Moottorivalmistaja ilmoittaa yleensä, minkä kokoluokan roottoreita moottorilla voi käyttää ja mikä on moottorin maksimivirta.

Nopeudensäädin (ESC = Electronic Speed Controller), 4 kpl

Nopeudensäädin kytketään akun ja moottorin väliin säätämään moottorin tehoa. Lisäksi nopeudensäätimeltä on yhteys koneen lähettimeen, jotta tehoa voidaan säädellä maasta käsin radio-ohjaimella. Harjattomille moottoreille on omat nopeudensäätimet, joita ei saa sekoittaa harjallisiin (Draganfly Innovations Inc. 2006b). Tämä ilmoitetaan nopeudensäätimen tiedoissa, joissa näkyy myös kuinka suurella sähkövirralla nopeudensäädintä saa käyttää (emt.). Moottoritiedoissa näkyy moottorin maksimijatkuvavirta ja maksimivirtapiikki. Nopeudensäätimessä vastaavien arvojen pitää olla näitä korkeampia. Lisäksi nopeudensäätimen tiedoissa ilmoitetaan, kuinka suuren jännitteen akku saa sille maksimissaan antaa (emt.).

Vaihte, 4 kpl (ei pakollinen)

Vaihte on välitys moottorin ja roottorin välillä. Sitä voidaan käyttää lisäämään vääntöä ja vähentämään roottorin kierroslukua, tai toisinpäin. Quadrotorissa käytettävät vaihteet ovat yleensä alennusvaihteita. Yleinen alennussuhde on luokkaa 1,5:1 – 3:1 (RC Groups 2009).

Runko

Quadrotorin runko on yleensä malliltaan symmetrinen risti. Risti koostuu keskiosasta, johon kiinnitetään koneen elektroniikkakomponentit ja akut, sekä varsista, joiden päihin kiinnitetään aktuaattorit eli moottori-roottori-yhdistelmät. Runko voidaan valmistaa itse tai ostaa valmiina. Sen tärkeimpiä ominaisuuksia on keveys ja riittävä jäykkyys. Lisäksi rungon tulee olla riittävän suuri valittavia roottoreita silmälläpitäen. Yleisimpiä runkomateriaaleja ovat hiilikuitukomposiitti ja alumiini. Lisäksi runkoon tulee hankkia

tai rakentaa kannatintaso keskiosaan kiinnitettävälle komponenteille, koska pelkkä rungon keskiosan tila ei todennäköisesti riitä. (RC Groups 2009.)

Ohjaustietokone, tarvittava elektroniikka ja ohjelmisto

Ohjaustietokone on quadrotorin toimintaa ohjaava ja valvova keskusyksikkö, jonka tehtävänä on huolehtia muun muassa koneen asentovakavuudesta ja mahdollistaa koneen ohjattavuus (Quadpower 2010). Tähän toimintoon tarvitaan IMUa (Inertial Measurement Unit, inertiaohjausyksikkö), joka on kulmanopeus- ja kiihtyvyyssantureiden avulla koneen asentoa sensoroiva piiri (VTI Technologies 2009). Quadrotorissa käytetään yleensä kuusisuuntaista IMUa, jotta sitä voidaan kontrolloida kuudessa liikesuunnassa. Nämä liikesuunnat ovat X, Y, Z, ja pyörähdykset näiden akselien ympäri. (Sparkfun Electronics 2010.) Ohjaustietokoneen hinnasta riippuen IMU on joko kiinteänä ohjaustietokoneessa tai hankittava erikseen.

Ohjaustietokoneiden ja niiden ohjelmistosoftien hintahaarukka on laaja, ja yleensä ylemmän hintaluokan tietokoneissa on kehittyneemmät ominaisuudet, kuten GPS-ohjaus, tuki säätölapapotkureille tai automaattinen lentokorkeuden säilytys ilmanpaineantureiden avulla. Tietokone ja ohjelmisto on myös mahdollista tehdä itse, tai vastaavasti voidaan kehittää eteenpäin jonkun muun valmistamaa avoimeen lähdekoodiin perustuvaa ohjelmistoa.

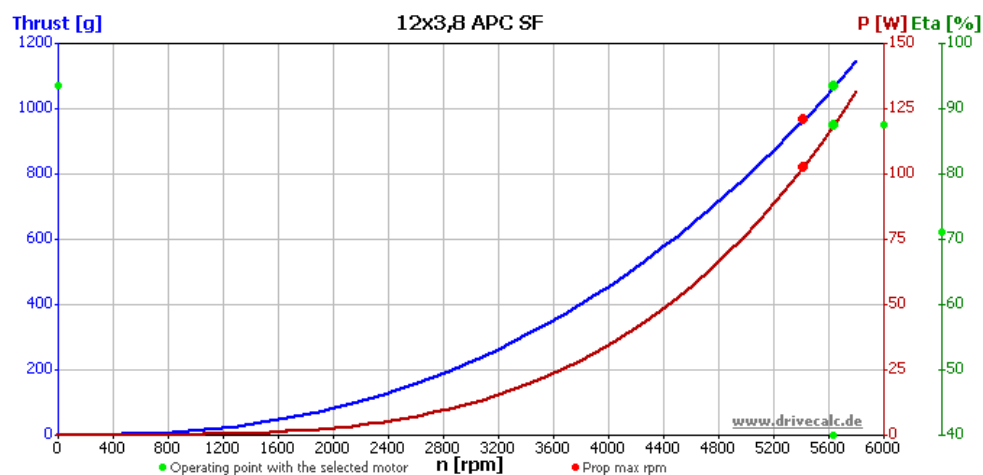
6.3 Komponenttien analysointi- ja määrittämisohjelmat

Koneen komponenttien määrittämisessä käytettiin apuna kahta eri apuohjelmaa, Drive Calculatoria ja MotoCalcia. Näitä ohjelmia käytetään sähkökäyttöisten RC-koneiden komponenttien ja niiden yhdistelmien analysointiin ja laskentaan. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään ohjelmien yleisiä toimintaperiaatteita sekä niiden ominaisuuksia quadrotor-projektin kannalta. Esimerkiksi MotoCalcin kattavat siipiprofiilien tarkasteluominaisuudet jätetään käsittelemättä, koska ne on tarkoitettu RC-lentokoneen suunnitteluun, joten ne ovat tämän tutkimuksen kannalta tarpeettomia. Lisäksi tekstissä annetaan kevyt selvitys siitä, miten ohjelmia käytetään.

6.3.1 Drive Calculator

Drive Calculator on freeware-ohjelma, eli sen käyttö on täysin ilmaista. Se on kehitetty Saksassa Christian Perssonin toimesta, ja se on tehty RC-harrastajien käyttöön helpottamaan komponenttien yhteensopivuuden ja oikeiden ominaisuuksien selvittämistä. Perssoniin oltiin ohjelmasta yhteydessä sähköpostitse (2010), ja alla esitettävät tiedot perustuvat tähän keskusteluun.

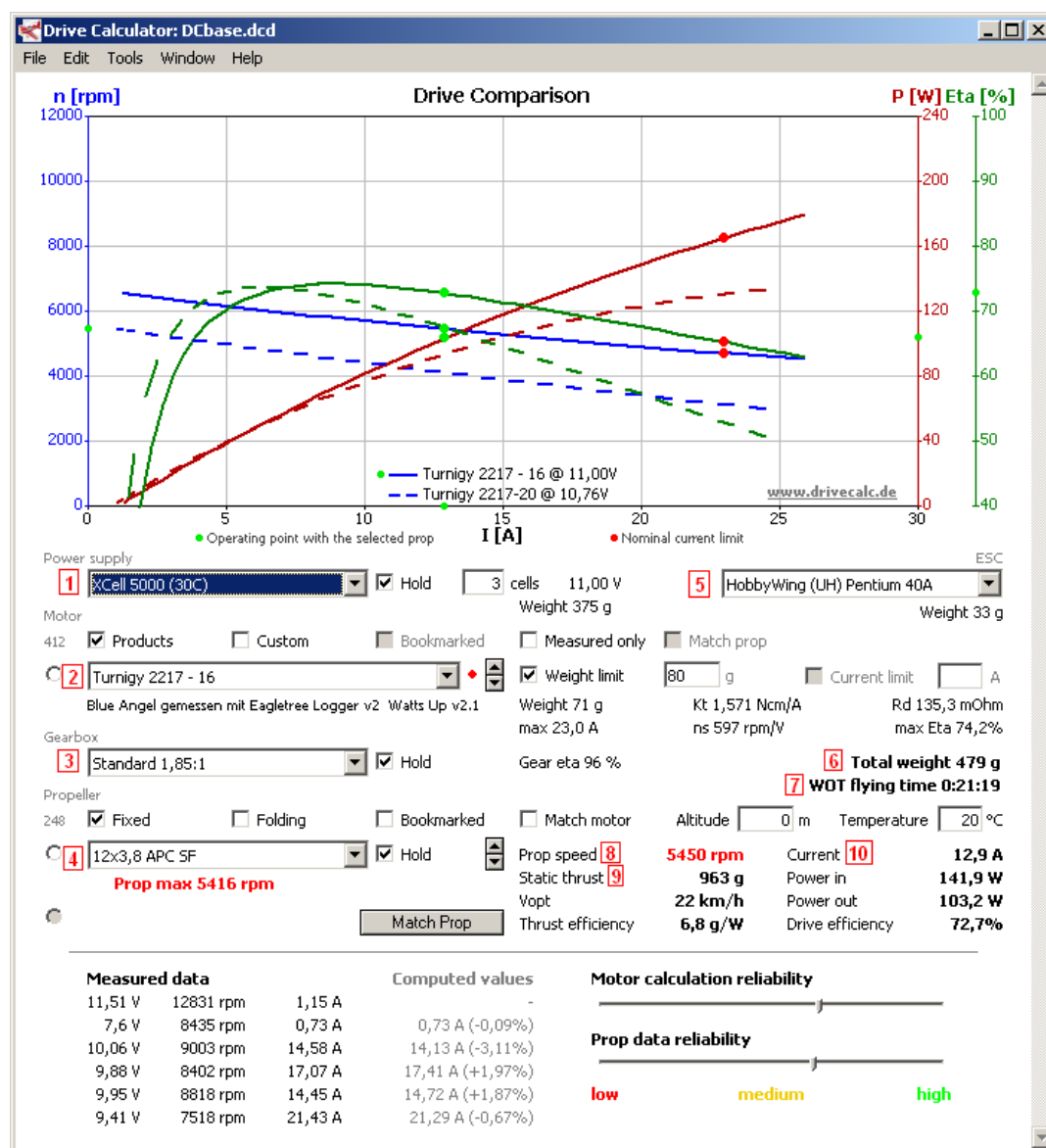
Tietokantaan tallennettujen komponenttivakioiden avulla ohjelma piirtää joko potkurin työntövoima/teho-kuvaajan, joka näkyy kuvassa 24, tai moottorin sähkövirta/teho-kuvaajan, joka näkyy kuvan 25 yläosassa (ks. s. 59). Tietokannan sisältö on avointa lähdekoodia, joten ei voida olla varmoja siitä, miten yksittäisten potkurien vakiot on saatu. Vakioiden perustana voi olla jokin kaava, esimerkiksi potkurilaskurin kohdalla momenttiteoria, mutta yleensä vakiot on saatu testitulosten perusteella. Ohjelman valmistaja Christian Persson on esimerkiksi vastaanottanut tuhansia propellien testituloksia Phil Milleneriltä, joka on erittäin tunnettu työstään RC-lennokkiharrastajien piireissä. Persson itse on myös suorittanut useita satoja staattiseen työntövoimaan ja tehon kulutukseen liittyviä testejä. Lisäksi useat muut käyttäjät ovat antaneet testidataa ohjelman käyttöön. (Persson 2010.)



Kuva 24: Drive Calculatorin potkurin työntövoima/teho-kuvaaja

Kaikkiin ohjelman antamiin tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Tietyissä tapauksissa ohjelman tulokset ovat hyvin lähellä todellisuutta, mutta joskus ne ovat myös virheellisiä. Ohjelmaa tuleekin käyttää ainoastaan apuohjelmana; sen tuloksia käsitellään ohjearvoina, jotka ohjaavat oikeaan suuntaan komponenttivalinnoissa. Varsinaisilla komponenteilla tulisi sitten suorittaa kokeita, joiden tuloksia voitaisiin verrata ohjelman antamiin ohjearvoihin. (Persson 2010.)

Kuvassa 25 näkyy Drive Calculatorin perusvalikko, joka on toiminnoiltaan melko yksinkertainen. Ohjelma antaa valita tietokannasta komponenttivalikoita akuille [1], moottorille [2], vaihteistolle [3], potkurille [4], sekä nopeudensäätimelle [5].



Kuva 25: Drive Calculatorin perusvalikko

Tietokantahaulle voidaan asettaa rajoituksia, kuten moottorin paino- tai virtarajoitukset. Lisäksi ohjelma antaa syöttää komponentin yksittäiset parametrit, jos haluttu komponentti puuttuu tietokannasta. Myös minkä tahansa olemassa olevan komponentin ominaisuuksia pystytään tarvittaessa muuttamaan.

Kun halutut komponentit on valittu, ohjelma antaa tietoa niiden yhteensopivuudesta ja niiden yhteistoimintaominaisuuksista. Se ilmoittaa esimerkiksi koko yhdistelmän painon [6], käyttöajan täydellä teholla [7], potkurin pyörintänopeuden [8], staattisen työntövoiman [9] ja virrankulutuksen [10] (ks. kuva 25). Lisäksi ohjelma piirtää

kuvaajat valinnaisesti moottorin tai potkurin ominaisuuksista. Moottorikuvaajia saa myös useamman päällekkäin, jotta niiden ominaisuuksia voidaan verrata keskenään.

Quadrotorin kohdalla ongelmia aiheuttaa se, että ohjelmalla ei voi laskea useamman moottorin systeemiä. Ongelman voi kiertää muokkaamalla akun parametreja niin, että sen lataus pienenee vastaamaan yhden moottorin osuutta neljästä.

Eli jos akun kapasiteetti on esimerkiksi 5000 mAh, jakautuu se neljälle rinnan olevalle moottorille, koska Kirchoffin lain (kaava 4) mukaan solmupisteeseen tulevien sähkövirtojen summan on oltava yhtä suuri kuin siitä lähtevien sähkövirtojen (I) summa, eli:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (4)$$

Ohmin lain (ks. kaava 5) mukaan kapasiteetti jaetaan neljään samansuuruiseen osaan rinnan olevien vastusten ollessa samansuuruisia ($R_{moottori\ 1} = R_{moottori\ 2} = R_{moottori\ 3} = R_{moottori\ 4}$), eikä moottorikohtainen jännite muutu, koska rinnan sijoitetut vastukset eivät vaikuta jännitteeseen (Lehmusvuori & El Mahboul 2007, 45), joten:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = I_2 = \frac{U}{R_2} = I_3 = \frac{U}{R_3} = I_4 = \frac{U}{R_4} \quad (5)$$

Akun kapasiteetti siis muutetaan arvoon 1250 mAh. Samasta syystä myös virrat I_{max} (100 A) ja $I_{max\ short}$ (150 A) jaetaan neljään osaan, eli arvoiksi saadaan:

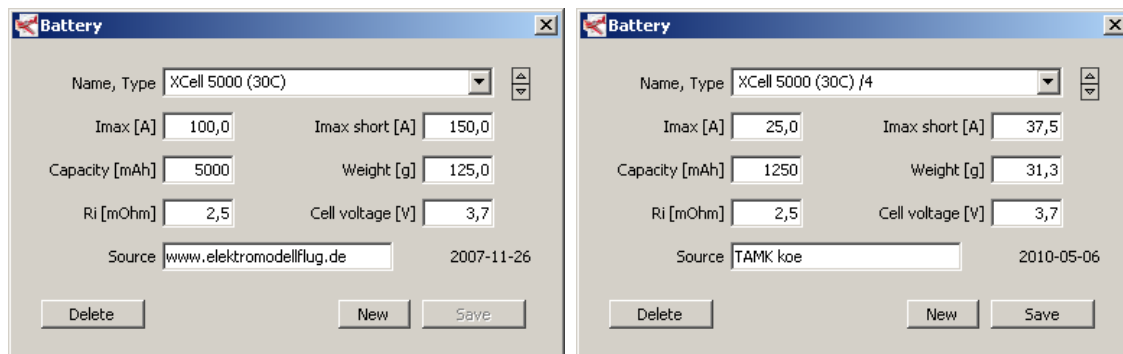
$$I_{max} = 25A$$

$$I_{max\ short} = 37,5A$$

Akun sisäinen vastus pysyy samana, koska tilanteessa simuloidaan akkua, jonka sisäinen resistanssi on ilmoitettu vakio. Tämä vastus ei muutu rinnan oleville moottoreille jaettavan kapasiteetin tai virran mukaan.

Akun paino jaetaan suoraan neljään osaan, koska tällöin akun paino kertaantuu oikeaksi kun ohjelman antamat loppuarvot kerrotaan neljällä.

Testattavaa akkua muutettiin siis edellisellä sivulla kerrottujen periaatteiden mukaan kuvan 26 esittämällä tavalla.



Kuva 26: Akun muutosprosessi nelimoottorikäyttöön

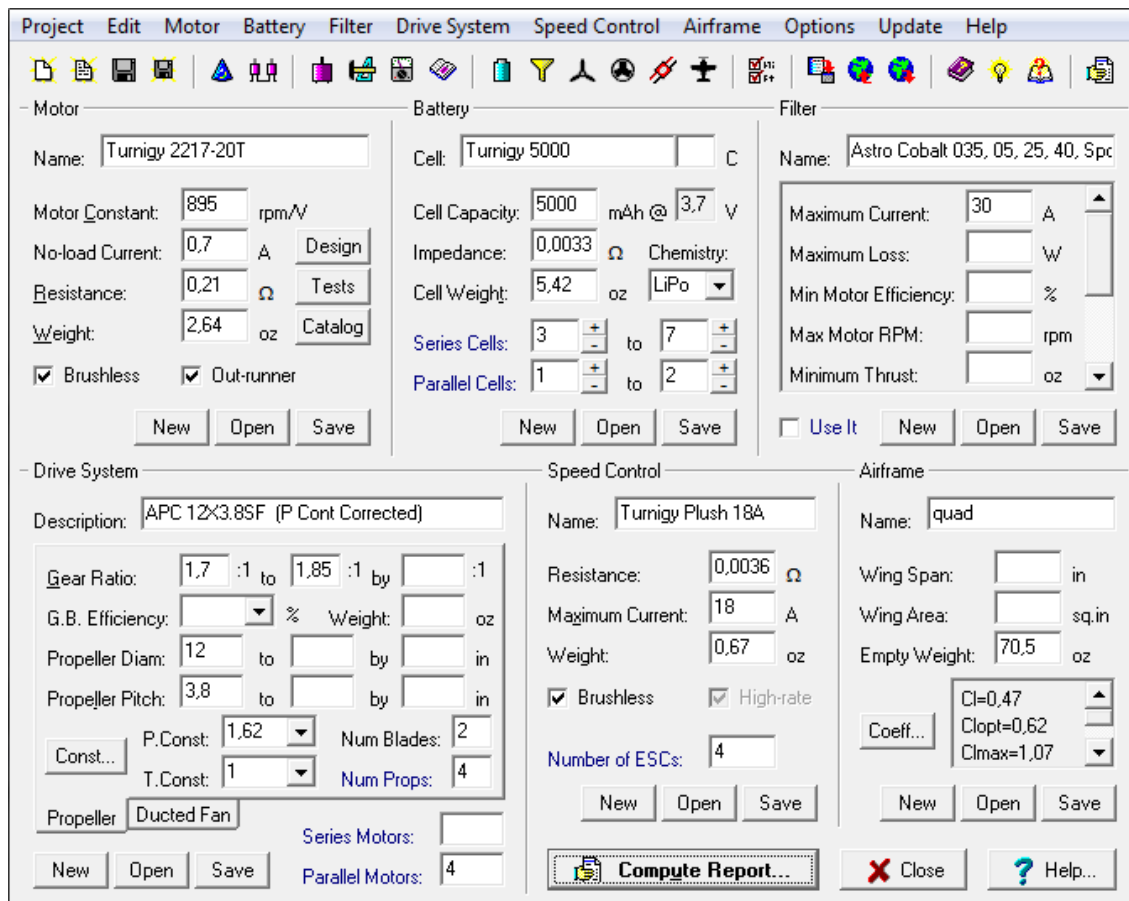
6.3.2 MotoCalc

MotoCalc on tehty Stefan Vorkoetterin ja Lori Albroughin toimesta pääasiassa sähkökäyttöisten RC-lentokoneiden suunnitteluun. Ohjelma on maksullinen, mutta siitä on olemassa 30 päivän maksuton kokeiluversio. Ohjelma toimii samalla periaatteella kuin Drive Calculator, eli se hakee komponentteja tietokannasta. Jos haluttua komponenttia ei löydy ohjelman sisäisestä tietokannasta, voi tietokantaa täydentää ohjelman internet-sivuilta löytyvästä luettelosta. Komponenttien tiedot perustuvat yleensä testituloksiin tai valmistajalta saatuihin tietoihin. Vorkoetteriltä sähköpostikeskustelun kautta saatujen tietojen mukaan (2010) ohjelma käyttää lentoarvojen laskemisessa aerodynamiikan kaavoja, joita on muokattu lennökkikäyttöön sopivaksi.

Ohjelma on saanut erinomaisia arvioita E-zone-nimiseltä verkkolehdeksi, joka on tehnyt ohjelmasta kaksi kattavaa arvostelua. Lehden toimittaja David Johnson (2006) arvosteli ohjelmasta version 8.03 ja totesi arvostelun loppupäätelmissä ohjelman olevan tärkeä apuväline jokaiselle sähköisten RC-lennokkien harrastelijalle. Johnson itse on hyödyntänyt ohjelmaa suunnitellessaan koneita pienistä vaahtolennokeista aina suurempiin, noin kuuden kilon painoisiin sähkölennokeihin asti. Ohjelman antamia tuloksia Johnson pitää yllättävän tarkkoina ja paikkansa pitävinä. (Johnson 2006.)

MotoCalc on tietyiltä ominaisuuksiltaan monipuolisempi kuin Drive Calculator.

Ohjelman perusnäky, joka on esitetty kuvassa 27, vaikuttaa aluksi monimutkaiselta, mutta kun ohjelman on sisäistänyt, voidaan huomata sen omaavan quadrotor-projektin tarpeisiin monia tärkeitä ominaisuuksia.



Kuva 27: MotoCalcin perusnäky

MotoCalcin tärkein ominaisuus tässä projektissa on se, että sillä voidaan suunnitella useamman moottorin kattavia järjestelmiä. Lisäksi ohjelmalla voidaan tilastoida eri komponenttien välisiä muutoksia. Ohjelman voi esimerkiksi asettaa vertaamaan akkujen tehon ja keston muutosta muuttamalla sarjassa ja rinnan olevien kennojen määrää perusnäkyä kohdissa *Series Cells* ja *Parallel Cells*. Tällöin ohjelma listaa tulokset kaikilla eri akkuväriatioilla tulosikkunassa, joka on esitetty seuraavalla sivulla kuvassa 28.

Sama onnistuu myös roottoreissa mahdollisesti käytettävien vaihteiden kanssa. Tällöin perusnäkymän *Drive System* -ruudun kohtaan *Gear Ratio* (ks. kuva 27) asetetaan halutut välityssuhteet, jolloin näiden ominaisuudet listautuvat tulosikkunaan. Vaikka kuvissa 27 ja 28 näkyvät arvot on ilmoitettu amerikkalaisissa yksiköissä, voi ohjelman asetuksista muuttaa ohjelman käyttämään metri-järjestelmää.

Cells	Gear Ratio	Diam (in)	Pitch (in)	Weight (oz)	Batt Amps	Motor Amps	Motor Volts	Input (W)	InPld (W/lb)	Loss (W)	MGBOut (W)	OutPld (W/lb)	MotGb Ef (%)	Shaft Ef (%)	Motor RPM	Prop RPM	Thrust (oz)	PSpd (mph)	Time (m:s)
3S1P	1,70	12,0	3,8	100,0	28,1	28,1	10,8	303,3	48,5	83,6	219,7	35,1	72,4	70,5	8183	4814	96,3	17,3	10:41
3S1P	1,85	12,0	3,8	100,0	23,9	23,9	10,8	258,6	41,4	69,2	189,4	30,3	73,2	71,5	8476	4582	87,2	16,5	12:35
3S2P	1,70	12,0	3,8	116,3	28,6	28,6	10,9	313,0	43,1	86,2	226,7	31,2	72,4	71,3	8270	4865	98,3	17,5	20:58
3S2P	1,85	12,0	3,8	116,3	24,2	24,2	11,0	265,7	36,6	70,9	194,8	26,8	73,3	72,4	8556	4625	88,9	16,6	24:45
4S1P	1,70	12,0	3,8	105,4	41,7	41,7	14,2	592,6	89,9	173,6	419,0	63,6	70,7	67,9	10149	5970	148,1	21,5	7:12
4S1P	1,85	12,0	3,8	105,4	36,3	36,3	14,3	518,3	78,7	138,5	379,7	57,6	73,3	70,7	10688	5777	138,7	20,8	8:16
4S2P	1,70	12,0	3,8	127,1	42,7	42,7	14,5	618,6	77,9	182,9	435,7	54,8	70,4	68,9	10282	6048	152,0	21,8	14:03
4S2P	1,85	12,0	3,8	127,1	37,1	37,1	14,5	539,2	67,9	144,8	394,4	49,7	73,2	71,8	10824	5851	142,3	21,1	16:10
5S1P	1,70	12,0	3,8	110,8	53,0	53,0	17,6	931,1	134,4	317,3	613,8	88,6	65,9	62,6	11526	6780	191,0	24,4	5:40
5S1P	1,85	12,0	3,8	110,8	48,1	48,1	17,7	849,6	122,6	251,7	597,8	86,3	70,4	67,2	12433	6721	187,7	24,2	6:14
5S2P	1,70	12,0	3,8	137,9	54,0	54,0	18,0	972,2	112,8	339,5	632,7	73,4	65,1	63,3	11643	6849	194,9	24,6	11:07
5S2P	1,85	12,0	3,8	137,9	49,3	49,3	18,0	889,4	103,2	268,1	621,3	72,1	69,9	68,2	12594	6808	192,6	24,5	12:11
6S1P	1,70	12,0	3,8	116,3	58,4	58,4	21,0	1225,0	168,6	509,7	715,3	98,4	58,4	55,2	12129	7135	211,5	25,7	5:08
6S1P	1,85	12,0	3,8	116,3	56,0	56,0	21,0	1179,2	162,3	417,3	761,8	104,8	64,6	61,2	13480	7286	220,6	26,2	5:21
6S2P	1,70	12,0	3,8	148,8	58,4	58,4	21,6	1259,1	135,4	543,5	715,6	77,0	56,8	55,2	12131	7136	211,6	25,7	10:17
6S2P	1,85	12,0	3,8	148,8	56,8	56,8	21,6	1225,6	131,8	448,0	777,6	83,6	63,4	61,7	13572	7336	223,7	26,4	10:34
7S1P	1,70	12,0	3,8	121,7	58,0	58,0	24,5	1422,0	187,0	713,2	708,8	93,2	49,8	47,2	12093	7113	210,3	25,6	5:10
7S1P	1,85	12,0	3,8	121,7	58,5	58,5	24,5	1433,5	188,5	617,9	815,6	107,2	56,9	53,8	13790	7454	230,9	26,8	5:08
7S2P	1,70	12,0	3,8	159,6	57,6	57,6	25,2	1451,2	145,5	750,0	701,2	70,3	48,3	47,0	12049	7088	208,8	25,5	10:25
7S2P	1,85	12,0	3,8	159,6	57,9	57,9	25,2	1457,0	146,1	655,8	801,3	80,3	55,0	53,5	13709	7410	228,2	26,7	10:22

Motor: Turnigy 2217-20T; 895rpm/V; 0,7A no-load; 0,21 Ohms. Sea Level, 29,92inHg, 59°F
 Battery: Turnigy 5000; 3 to 7 series x 1 to 2 parallel cells; 5000mAh @ 3,7V; 0,0033 Ohms/cell.
 Speed Control: Turnigy Plush 18A; 4 controls (separate); 0,0036 Ohms; High rate.
 Drive System: APC 12X3.85F (P Cont Corrected); 4 motors (parallel); 12x3.8 (Pconst=1,62; Tconst=1) geared 1,7:1 to 1,85:1 (Eff=95%).
 Airframe: quad; 100 to 159,6oz RTF.

Motor performance calculations take ambient temperature and heating effects into account.

Color Key: Propeller Stalled

Save... Print... In-flight... Opinion... Graph... Compare... Close Help

Kuva 28: MotoCalcin tulosikkuna

Ohjelma sisältää myös monipuolisia lentorunkoihin ja siipiin liittyviä ominaisuuksia, jotka eivät quadrotor-projektissa ole tarpeellisia, mutta mahdollisessa lentokonemallisen UAV-koneen suunnittelussa niistä voi olla hyötyä.

6.4 Komponenttien kokoluokan ja mittasuhteiden määrittely

Koska jokainen komponentti vaikuttaa johonkin koneen ominaisuuteen, ei koneessa voida muuttaa yhtä komponenttia ottamatta huomioon sen vaikutusta kokonaisuuteen. Lähtökohdaksi valittiin propulsiojärjestelmä, joka kykenee kannattelemaan koneen arvioidun massan ja kuorman käyttäen noin 2/3 nostovoimastaan. Suunnittelukriteereissä koneen toiminta-ajaksi määriteltiin 10 - 15 minuuttia. Tästä syystä koneen leijunta-ajan tulisi olla yli 15 minuuttia laboratorio-olosuhteissa, koska koneen ohjaus ulkoilmaolosuhteissa vähentää sen toiminta-aikaa.

Ihanteellisessa tilanteessa koneen paino koostuisi pelkästään akuista (Bouabdallah 2007, 42), mutta koska tämä ei ole mahdollista, kone pyrittiin kokoamaan niin, että sen kuivapaino olisi mahdollisimman vähäinen ja siihen lisättävien akkujen paino mahdollisimman suuri.

Karkea kuivapaino määritettiin tarkkailemalla eri harrastelijaprojekteja, näissä käytettyjä komponentteja ja niiden massoja (RC Groups 2009). Lisäksi koneeseen valittiin mahdollisimman kevyt kaupallinen runko, MikroKopter MK50, jonka valintaperusteluihin palataan tarkemmin alaluvussa 6.5.

Komponentti/Paino:

Moottori (4 kpl): n. 80 g/kpl

Roottori (4 kpl): n. 20 g/kpl

Nopeudensäädin (4 kpl): n. 20 g/kpl

Ohjauspiiri: n. 50 g

Liittimet, johdot, jne. n. 100 g

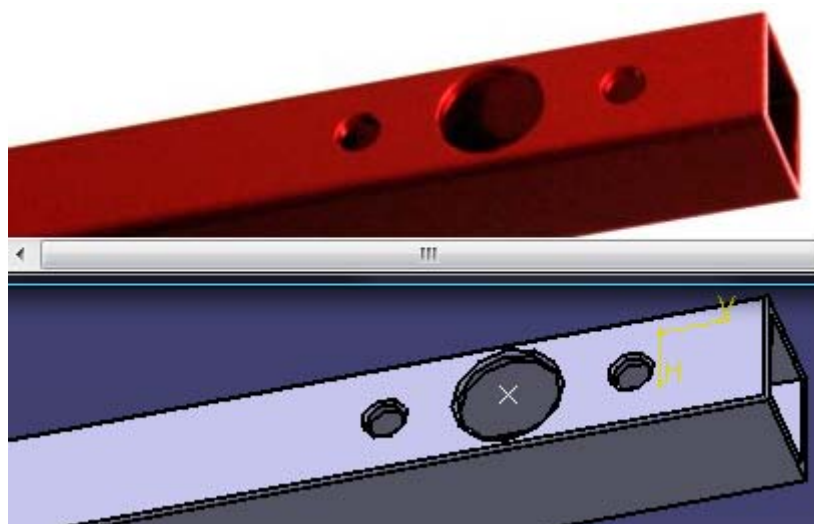
Runko: 120 g

Yhteensä: n. 750 g

Kun koneen tavoiteltu 750 gramman hyötykuorma, joka määriteltiin suunnittelukriteereissä sivulla 42, lisätään yllä olevassa listauksessa laskettuun kuivapainoarvioon eli noin 750 grammaan, saadaan yhteispainoksi noin 1500 grammaa. Yhteispainon lisäksi koneen on pystyttävä kannattelemaan myös akkujen paino. Seuraavaksi tuleekin löytää riittävän tehokas moottori-roottori-yhdistelmä, sekä akku/akut, jotka mahdollistavat riittävän suuren toiminta-ajan ja ovat mahdollisimman kevyet.

Roottorit päätettiin valita lentorungon koon mukaan. Runkoon haettiin halkaisijaltaan mahdollisimman suuret roottorit sivusuhteen kasvattamiseksi ja indusoidun tehontarpeen pienentämiseksi (Raunio 1993, 175).

Suurin ongelma roottorien valinnassa oli se, että rungon tiedoissa ei kerrottu, millä etäisyydellä moottorien kiinnityskohdat ovat rungon varsissa. Valmistajan tiedoissa ilmoitettiin kuitenkin varsien tankoprofiilin paksuus ja pituus sekä kiinnitysreikien sijainti toisistaan (Mikrocontroller 2008). Lisäksi valmistaja ilmoitti rungon keskiosan mitat (emt.). Näiden tietojen avulla pystyttiin luomaan riittävän tarkka Catia-malli rungosta. Catia-mallia ja valmistajan sivuilta saatua kuvaa verrattiin alla olevan kuvan 29 mukaisesti toisiinsa. Keskireiän sijaintia varressa säädettiin Catia-mallissa niin kauan, kunnes malli ja kuva olivat silmämääräisesti yhtenevät. Kuva ja malli olivat yhtenevät, kun keskireiän etäisyys varren päästä asetettiin 20 millimetriin. Tällä vertailuperiaatteella pystyttiin selvittämään aktuaattorin kiinnityskohdan sijainti varressa melko tarkasti.



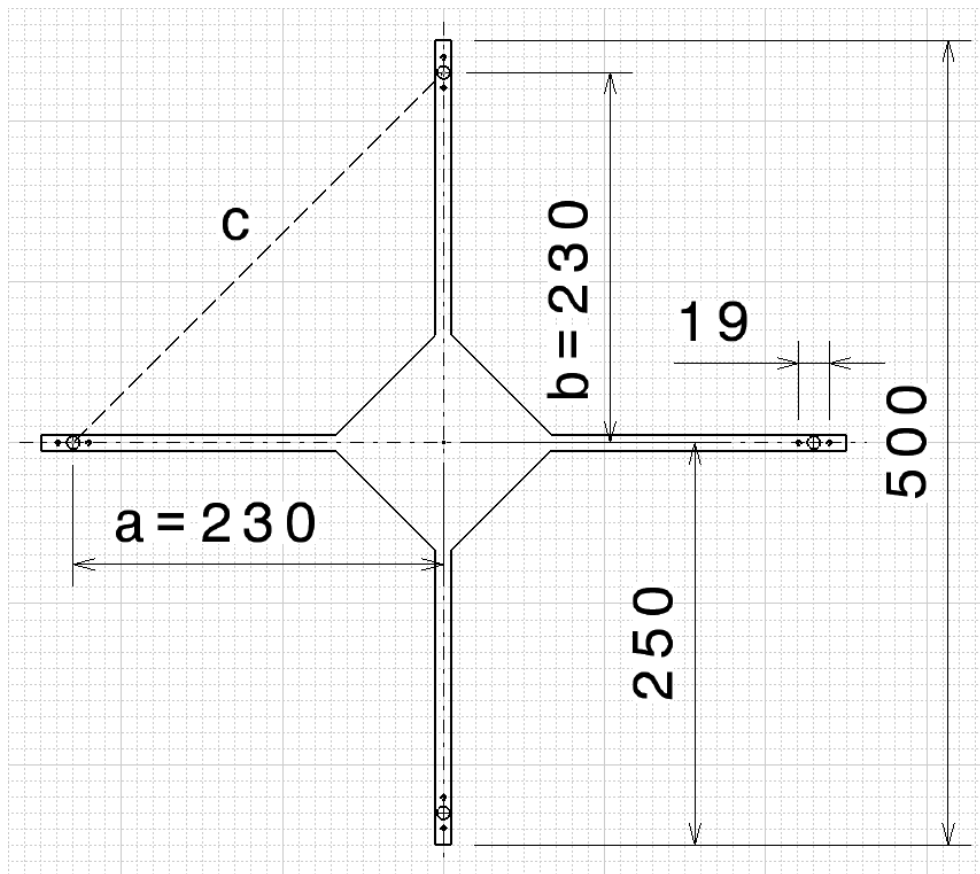
Kuva 29: Aktuaattorin kiinnityskohdan sijainnin selvitys yllä olevan kuvan ja alla olevan Catia-mallin avulla (Mikrocontroller 2008)

Koska rungon varret muodostavat keskenään ristin, rajoittaa roottorin maksimikokoa viereisessä varressa kiinni oleva roottori. Vierekkäiset roottorit eivät saa päästä osumaan toisiinsa. Koska viereiset varret ovat keskenään kohtisuorassa, voidaan roottorien maksimisäde selvittää Pythagoraan lauseen (6) avulla.

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (6)$$

Lauseessa a ja b ovat suorakulmaisen kolmion kateetit ja c hypotenuusa.

Edellisellä sivulla esitetyn periaatteen mukaan moottorien kiinnityskohdiksi arvioitiin 20 mm varsien päistä. Näin ollen kiinnityskohtien etäisyys rungon keskipisteestä on kuvan 30 mukaisesti 230 mm.



Kuva 30: Rungon yläkuvanto ja päämitat

Kun Pythagoraan lausetta (ks. s. 65) sovelletaan roottorin maksimisäteen mitoitukseen, tulee lauseesta ratkaista hypotenuusa (c). Hypotenuusan muodostaa moottorien kiinnityskohtien etäisyys toisistaan, ja se on merkitty kuvaan 30 paksulla katkoviivalla. Lauseen kateetteina (a ja b) käytetään kuvan 30 mukaisesti kiinnityskohtien etäisyyttä rungon keskipisteestä, jolloin:

$$c = \sqrt{(230 \text{ mm})^2 + (230 \text{ mm})^2}$$

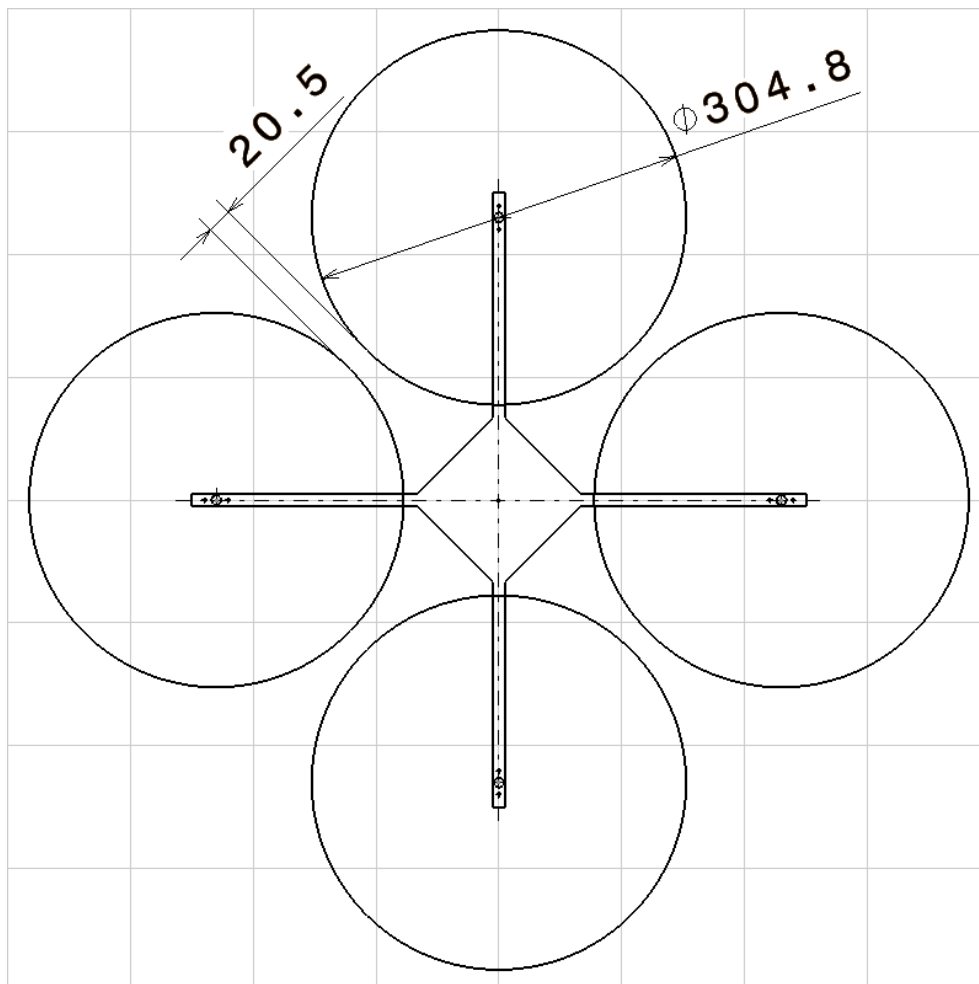
$$= 325,3 \text{ mm}$$

Kun saatu tulos jaetaan kahdella, saadaan roottorin maksimisäde (r_{max}).

$$r_{max} = \frac{325,3 \text{ mm}}{2}$$

$$= 162,6 \text{ mm}$$

Suurin kaupallinen roottori, jonka säde on alle 162,6 mm, on 12 tuuman roottori. Roottorin halkaisija on millimetreinä 304,8, eli sen säde on 152,4 mm. Kun moottorit kiinnitetään rungon kiinnityskohtiin, jää moottoreihin kiinnitettävien roottorien etäisyydeksi toisistaan kuvan 31 mukaisesti 20,5 mm.



Kuva 31: Roottorien mitoitus runkoon

Kuva 31 näyttää quadrotorin rungon ja roottorien oikean mittasuhteen, joten kuvien 30 (ks. s. 66) ja 31 avulla voidaan selvittää quadrotorin maksimihalkaisija. Rungon ristimitta on 500 mm, ja sivulla 65 tehdyn selvityksen mukaan moottoreiden kiinnityspisteiden etäisyys varsien kärjistä on 20 mm, joten roottorien napojen etäisyys toisistaan on 460 mm. Kun tähän lukuun summataan vastakkain olevien roottoreiden säteet (yhteensä 304,8 mm), saadaan koneen maksimihalkaisijaksi 764,8 mm \approx 76,5 cm.

Kun komponenttien mittasuhteet ja kokoluokat on saatu selvitettyä, voidaan keskittyä komponenttien valintaan ja niiden ominaisuuksiin.

6.5 Komponenttien valinta

Paras tapa komponenttien kartoitukselle olisi niiden testaus, koska valmistajat eivät useinkaan tarjoa kaikkea valinnan kannalta tärkeää tietoa. Mutta koska tämä ei ole projektin tässä vaiheessa mahdollista, täytyy kartoituksessa turvautua muiden käyttäjien testituloksiin ja kokemuksiin. Luotettavia ja yleisiä komponentteja käytiin läpi RC Groups -foorumilta, jonka aktiivinen quadrotor-käyttäjäkunta on testannut suuria määriä etenkin oikean kokoluokan moottoreita ja roottoreita. Foorumia voidaan pitää suhteellisen luotettavana kartoituslähteenä, koska myös yksi johtavista ammattikäyttöön quadrotoreita valmistavista yrityksistä nimeltä Draganfly Innovations Inc. kartoittaa suosittuja komponentteja tätä kautta (Draganfly Innovations Inc. 2009a). Komponenteiksi pyrittiin valitsemaan harrastelijakäytössä toimiviksi ja luotettaviksi todettuja malleja. Seuraavaksi listataan komponentit, joihin tässä tutkimuksessa päädyttiin.

Roottorit

Roottorin halkaisijaksi valittiin alaluvussa 6.4 12 tuumaa. Tästä kokoluokasta löytyy vastakkain pyöriviä roottoreita kaikista alaluvun 6.2 Roottori-osiossa mainituista materiaaleista valmistettuna. Kartoituksen jälkeen vaihtoehdoiksi jäivät EPP 12x4,5” ja APC 12x3,8” sekä niiden CFB-vaihtoehdot. Roottoriksi valittiin APC-roottori, koska 12 tuuman EPP-roottoreiden on raportoitu olevan hauraita (RC Groups 2009). Lisäksi APC-roottorin pienempi nousukulma on projektin kannalta käytännöllisempi, koska quadrotor liikkuu vertikaalisessa suunnassa suhteellisen vähän, eikä sekään vähäinen liike tapahdu suurella nousunopeudella. Tästä syystä pienempi lapakulmainen roottori on parempi, koska sen kohtauskulma on soveltuvampi pienemmille lentonopeuksille (Laine ym. 2006, 163). APC-materiaali on myös harrastajien tekemien kokeiden perusteella jäykempää, joten se taipuu vähemmän aerodynaamisten voimien vaikutuksessa.

Hiilikuituroottori olisi toimivuudeltaan ehdottomasti paras vaihtoehto, koska se on kevyin ja kestävin, mutta sen hinta on moninkertainen verrattuna muoviroottoreihin. Tämän takia koneen toimivuutta on parempi ensin testata edullisemmilla muoviroottoreilla, minkä takia tässä tutkimuksessa ensimmäiseksi vaihtoehdoksi

valittiin APC-roottori. Hiilikuituroottoria voidaan pitää kuitenkin varteenotettavana vaihtoehtona, kun quadrotoria ruvetaan soveltamaan ammattimaisempaan käyttöön.

Suositusvaihtoehto 1: APC 12x3,8", max rpm = 5416 (APC Propellers 2007)

Suositusvaihtoehto 2: CFB 12x3,8" (LCC-Shop 2008)

Moottorit

Kuten alaluvun 6.2 Moottori-osiossa todettiin, luonnollinen moottorivalinta quadrotorille on harjaton ulkopyörjämoottori. Moottoria valittaessa tärkeimmiksi seikoiksi nousevat sen paino ja oikea mitoitus valitulle roottorille. Moottorin tulee pystyä pyörittämään roottoria sen maksimipyörimisnopeudella niin, että moottorista jää hieman tehoreservejä käyttämättä (Draganfly Innovations Inc. 2006a). Moottori ei saa käydä ääri rajoilla, jottei se vaurioidu, mutta se ei myöskään saa olla ylimitoitettu, koska tällöin sen suurempi paino menisi täysin hukkaan (emt.). 12 tuuman roottori on suhteellisen suuri, joten moottorinkin tulee olla niin tehokas ja vääntävä, että se pystyy pyörittämään kyseistä roottoria sen maksimikierroslukualueella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että moottorin kV-luvun tulee olla 700 - 850. Roottorin pyörintänopeuteen vaikuttaa myös se, kuinka monesta kennosta koneen akut koostuvat. (RC Groups 2009.)

Koska moottorivaihtoehtoja on niin paljon, lähdettiin niitä rajaamaan ensiksi käyttösuosion ja käyttökokemusten perusteella. RC Groups -foorumien eräät käyttäjät ovat saaneet testattavakseen ja arvosteltavakseen monia eri moottoreita, ja he ylläpitävät listaa quad- ja multirotor-käyttöön hyväksi havaituista moottorityypeistä (RC Groups 2009). Tältä listalta poimittiin kaksi lähtökohtaisesti projektin tarpeisiin soveltuvaa moottoria: HexTronik DT-750 (750 kV) ja HexTronik DT-700 (700 kV). Nämä moottorit ovat kV-luvultaan oikean kokoisia, ja lisäksi ne ovat edullisia ja melko kevyitä. (RC Groups 2009.)

Tämän jälkeen moottoreiden soveltuvuutta testattiin Drive Calculator- ja MotoCalc-kartoitusohjelmien avulla. Valittuja moottoreita ei ollut ohjelmien tietokannoissa, joten niille pyrittiin löytämään kV-luvultaan ja painoltaan mahdollisimman samantyyppiset korvaavat moottorit. Ohjelmien mukaan molempien tyyppiset moottorit tuottivat oikealla akkukokoonpanolla tarpeeksi työntövoimaa pitäen kuitenkin roottorin pyörimisnopeuden sallituissa rajoissa. DT-750:llä oli kuitenkin parempi työntövoiman

ja käyttöajan suhde, joten se valittiin ensimmäiseksi suositusvaihtoehdoksi. Ohjelmien tietokantoja selattiin myös sillä ajatuksella, että jotkin niiden moottoreista saattaisivat soveltua sellaisenaan projektiin. MotoCalc antoikin erittäin lupaavia tuloksia moottorityypillä E-Flite Park 400 740 kV. Moottori valittiin toiseksi suositusvaihtoehdoksi, vaikka se onkin huomattavasti kalliimpi kuin aikaisemmin mainitut DT-sarjan moottorit.

Suositusvaihtoehto 1: HexTronik DT-750, 750 kV, 78 g (HobbyKing online 2010)

Suositusvaihtoehto 2: E-Flite Park 400, 740 kV, 56 g (E-Flite 2010)

Akut

Akuissa tärkeintä on saada mahdollisimman suuri kapasiteetti mahdollisimman kevyeen pakettiin rakennettuna. Kartoitushjelmia käytettäessä parhaisiin tuloksiin päästiin, kun käytettiin kahta kolmen kennon ja 5000 mAh:n akkua rinnan kytkettynä. Kolme kennoa takasi riittävän työntövoiman, ja kaksi akkua rinnan nosti käyttöajan riittävä tasolle. Kun akun kokoluokka oli selvitetty, kartoitettiin akun merkki RC Groups -foorumia (2009) apuna käyttäen. Foorumilla kehuttiin Zippy Flightmax -merkkisten akkujen hinta-laatusuhdetta, joten kyseinen merkki valittiin UAV-koneen akun suositusvaihtoehdoksi.

Suositusvaihtoehto: 2 kpl. ZIPPY Flightmax 5000mAh, 3S1P, 25C, 378 g (HobbyKing online 2010)

Nopeudensäätimet

Koska quadrotorin nopeudensäätimessä ei tarvita jarrua tai suunnanvaihdinta, on valintaprosessi melko yksinkertainen. Nopeudensäätimen valintaan vaikuttavat moottorin tyyppi sekä virta- ja jännitetaso. Moottori on harjaton, joten myös nopeudensäätimen tulee olla harjattomalle moottorille tehty. Nopeudensäätimen virransiedon tulee olla korkeampi kuin moottorin maksimivirtapiikki täydellä teholla. (Draganfly Innovations Inc. 2006b.) HexTronikin moottorilla ilmoitettu arvo on 18 ampeeria, kun käytetään 11x4,7” roottoria (HobbyKing online 2010). E-Fliten moottorilla ilmoitettu maksimivirtapiikki on 10 ampeeria (E-Flite 2010). Tästä syystä nopeudensäätimen tavoitearvoksi päätettiin suosiolla asettaa 20 ampeeria.

Akun jännitetason arvoksi ilmoitetaan 11,1 voltia (HobbyKing online 2010), joten nopeudensäätimen tulee olla suunniteltu kyseiselle tai korkeammalle jännitteelle. Nopeudensäätimeksi valittiin molempien moottorien kohdalla Turnigy Plush 25 A, koska se kestää jatkuvaa virtaa 25 ampeeria ja 35 ampeerin virtapiikkejä. Lisäksi se on suunniteltu 5,6 - 16,8 voltin jännitetasolle. (emt.) Kyseinen nopeudensäädin on myös suhteellisen edullinen ja erittäin suosittu multirotor-käyttäjien keskuudessa (RC Groups 2009).

Suositusvaihtoehto: Turnigy Plush 25 A (HobbyKing online 2010)

Runko

Rungoksi valittiin alaluvun 6.4 mukaisesti MikroKopter MK50 sen järkevän hinnan ja alhaisen painon vuoksi. Kyseinen runko koostuu keskiölevystä sekä varsista, jotka on valmistettu neliskulmaisesta alumiiniprofiilista (Mikrocontroller 2008). Lisäksi runkoon tulee rakentaa kannatintaso ohjaustietokoneelle ja muille koneen keskustaan liitettäville komponenteille, koska keskiölevyn tila yksin ei näille osille riitä (RC Groups 2009). Kannatintason tulee olla riittävän suuri ja mahdollisimman kevyt, joten toimivia valmistusmateriaaleja ovat hiilikuitukomposiitti tai alumiini. Kannatintason sijoitus on miettimisen arvoinen asia, koska jos taso sijoitetaan perusrungon yläpuolelle, runko suojaa kalliita komponentteja kovan laskeutumisen sattuessa. Ongelmia yläpuolelle sijoittamiselle aiheuttavat pyörivät roottorit, sillä niiden takia tilaa on vähän. Jos taso sijoitetaan rungon alapuolelle, laskee se koneen painopistettä. Tällöin kone on todennäköisesti vakaampi ja tasolla on enemmän tilaa, mutta se asettaa komponentit vahingoittumisalttiimpaan paikkaan.

Suositusvaihtoehto: MikroKopter MK50 (Mikrocontroller 2008)

Ohjaustietokone, tarvittava elektroniikka ja ohjelmisto

Ohjaustietokoneen valintaprosessi aloitettiin kartoittamalla eri tietokoneiden ominaisuuksia, laajennettavuutta ja niiden soveltuvuutta opiskelukäyttöön. Asiaa kysyttiin myös RC Groups -foorumilta (2009).

Opiskeluprojektikäyttöön ehdotettiin Arduino Duemilanove -merkkistä yksikköä sen alhaisen hinnan ja hyvän kehitettävyyden takia (RC Groups 2010). Lisäksi Arduino

perustuu avoimeen lähdekoodiin, joten sen kaupallinen käyttö on sallittua. Näin ollen kyseiseen tietokoneeseen on saatavilla monen eri valmistajan suunnittelemaa ohjelmistoa ja lisäpiirejä. Yksikössä ei ole integroitua IMUa, joten se tulee hankkia erikseen. Sitä varten Arduino tarvitsee shield-piirin. (Arduino 2010.) Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää Aeroquad-projektin komponentteja, eli AeroQuad Shieldiä, 5 DOF (Direction Of Freedom) IMUa ja dual axis gyroa, jotka yhdessä mahdollistavat kuuden suunnan kontrolloinnin (Aeroquad 2010).

Toinen huomiota herättänyt ohjaustietokone oli QuadPower-niminen yksikkö. QuadPoweria mainostetaan Plug & Play -tyyppisenä ohjausyksikkönä, eli se sisältää kaiken tarvittavan quadrotorin kontrollointiin (Quadpower 2010). Yksikön ominaisuudet ovat huomattavasti kattavammat kuin Arduinon, mutta sen hinta on myös moninkertainen. Lisäksi QuadPoweriin on saatavilla lisäyksikkö nimeltä AccelPower, joka tuo koneeseen lisäominaisuuksia, kuten automaattisen paikanhaun ja muita GPS-sovelluksia. (emt.)

Suositusvaihtoehto 1. Arduino Duemilanove perusyksikkö, ja AeroQuad komponentit ja ohjelmisto (Arduino 2010, Aeroquad 2010)

Suositusvaihtoehto 2. QuadPower perusyksikkö ja mahdollisesti AccelPower lisäyksikkö (Quadpower 2010)

Radiolähetin

Quadrotorin lennätykseen tarvitaan vähintään 6-kanavainen ohjain, joten TAMKille Eurostar-projektia varten hankittu Futaba-merkkinen 7-kanavainen ohjain on riittävä quadrotor-käyttöön.

Suositusvaihtoehto: Futaba 7C

Seuraavalla sivulla listatut komponentit ja apulaitteet ovat lentämisen kannalta vapaavalintaisia, mutta pitkäaikaisessa, ammattimaisessa käytössä ne ovat kuitenkin pakollisia. Kaikkien näiden komponenttien ja apulaitteiden suositukset on valittu käyttösuosion perusteella.

Lisäakku ohjaustietokoneelle

Vaikka ohjaustietokone pystyy ottamaan virtansa pääakulta, on pienen lisäakun käyttö suositeltavaa, sillä lisäakku takaa ohjaustietokoneelle puhtaan energialähteen ja vähentää ohjaustietokoneen jännitteensäätimen aiheuttamaa lämpenemistä (Ayk. 2010, 24). Lisäakun paino on niin pieni, että sen vaikutus quadrotorin kokonaispainoon on alhainen.

Suositusvaihtoehto: Rhino 460mAh, 2S, 20C, 28,5 g (HobbyKing online 2010)

LiPo-hälytin

LiPo-hälytin ilmoittaa LED-valoilla kun koneen akku on tyhjenemässä. LiPo-akkua ei saisi koskaan päästää alle 20 prosentin lataustilan, joten kyseinen komponentti on akkujen pitkän käyttöiän kannalta tärkeä. (HobbyKing online 2010.)

Suositusvaihtoehto: HXT Lipo Monitor 3S (HobbyKing online 2010)

Nopeudensäätimen (ESC:n) ohjelmointikortti

Ohjelmointikorttia käytetään nopeudensäätimien ohjelmointiin ennen asennusta (HobbyKing online 2010).

Suositusvaihtoehto: TURNIGY BESSC Programming Card (HobbyKing online 2010)

LiPo-laturi

Laturia käytetään LiPo-akkujen lataamiseen, tasaamiseen ja purkamiseen (HobbyKing online 2010).

Suositusvaihtoehto: Turnigy Accucel-6 50W 6A Balancer/Charger

(HobbyKing online 2010)

Tässä alaluvussa tehtyjen komponenttiehdotusten hintakartoitukseen keskitytään seuraavassa alaluvussa.

6.6 Hintakartoitus ja toteutussuunnitelma

Tässä alaluvussa tehdään kaksivaiheinen hintakartoitus ja toteutussuunnitelma. Ensimmäisessä vaiheessa kerätään alustava komponenttipaketti, jolla projekti saadaan liikkeelle. Lisäksi esitellään toteutuksen peruseriaatteet. Toisessa vaiheessa listataan komponentteja ja esitellään ajatuksia, joiden avulla quadrotoria voitaisiin kehittää ammattimaisempaan suuntaan.

Vaihe 1: Prototyypivaihe

Sillä oletuksella, että projektin ensimmäisessä valmistusvaiheessa käytetään halvimpia mahdollisia komponentteja, ja ohjaukseen käytetään koululta löytyvää Futaba 7C lähetintä, tulee koneen lähtöhinnaksi taulukon 3 erittelyn mukaan noin 400 euroa. Hinnat on otettu edellisen alaluvun suositusvaihtoehtojen lähteistä, eikä niissä ole huomioitu esimerkiksi postikuluja tai tullimaksuja. Listassa ei myöskään ole hinnoiteltu erilaisten liittimien tai johtojen hintoja. Tästä syystä hintakartoitukseen tulee suhtautua suuntaa antavana ohjearvona.

Taulukko 3: Peruskokoonpanon hinnasto

	Komponentit:	kpl:	kpl hinta: (€)	yht. hinta: (€)
Roottorit:	APC 12/3,8"	4	10	40
Moottorit:	HexTronik DT-750	4	7	28
Akut:	Flightmax 5000	2	30	60
Nopeudensäätimet:	Turnigy Plush 25A	4	10	40
Runko:	MikroKopter MK50	1	55	55
Ohjaustietokone:	Arduino	1	23	23
	AeroQuad Shield	1	20	20
	IMU 5 direction	1	56	56
	Dual Axis Gyro	1	30	30
Laturi:	Turnigy Accucel-6	1	20	20
ESC:n ohjelmointikortti:	TURNIGY BESC	1	10	10
LiPo hälytin:	HXT Lipo Monitor 3S	1	2	2
Yhteensä:				384

Kuten jo aikaisemmin todettiin, komponenttisuositukset ovat suuntaa antavia, ja ne on valittu sillä periaatteella, että niiden avulla projekti saadaan nopeasti ja edullisesti käyntiin ja tutustuminen tekniikkaan voidaan aloittaa. Tätä varten halvimpia komponentteja, kuten moottoreita ja roottoreita, kannattaa hankkia useampia, koska

siten seisonta-aika ei pitkity mahdollisen vaurion syntyessä. Tämä luonnollisesti nostaa projektin lähtöhintaa.

Ennen varsinaisen rakennustyön aloittamista tulee päättää, miten työtä lähdetään viemään eteenpäin. Projekti on mittakaavaltaan tässä vaiheessa niin pieni, että se on järkevintä toteuttaa projektiluontoisesti, kuten Eurostar- ja Student Formula -projektit. Tämä pitää työryhmän oikean kokoisena ja motivoituneena, ja työtehtävät jakautuvat järkevästi tekijöiden kesken.

Toteutuksen ensimmäinen vaihe eli prototyypivaihe koostuu lähinnä koneen osien hankinnasta ja testauksesta sekä koneen kokoamisesta. Komponentteja kannattaa hankkia useita eri vaihtoehtoja, jotta niitä päästään analysoimaan ja testaamaan käytännössä. Tulee kuitenkin kalliiksi hankkia useiden eri valmistajien komponentteja, joten ensimmäisessä vaiheessa suositellaan käyttämään taulukon 3 (ks. s. 74) tai vastaavan hintaluokan komponentteja. Tällä tavalla koneen ideaalikokoonpano pystytään selvittämään mahdollisimman edullisesti. Työn alkamisen ajankohdan mukaan, osien kartoitusta tulee jatkaa vielä tässä opinnäytetyössä tehdystä kartoituksesta eteenpäin, koska markkinoille tulee jatkuvasti uusia, kehittyneempiä komponentteja. Tämä alustava työ tulee myös helpottamaan varsinaista koneen rakennustyötä, jonka osuus prototyypivaiheen kokonaisuudesta on melko pieni.

Varsinaista rakennusohjetta ei tässä opinnäytetyössä esitellä, koska työn tarkoituksena on tehdä projektisuunnitelma, ei projektiohje. Quadrotor-rakennusohjeen kirjoittaminen ei myöskään ole järkevää ilman quadrotor-rakennuskokemusta. TAMKIn UAV-projektia varten avattuun projektikansioon (X:\projects\UAV-projekti\UAV-tietokanta\Työohjeet) on sijoitettu kaksi rakennusohjetta:

- AeroQuad: A Build Tutorial (Ayk. F 2010)
- QuadPowered - Base Board: Build Guide (Quadpower 2010)

Kuten ohjeiden nimistä voi päätellä, ne on suunnattu eri ohjaustietokoneita käyttäville quadrotoreille. Molemmat ohjaustietokoneet löytyvät alaluvun 6.5 ohjaustietokonekohdan suositusvaihtoehtoista (ks. s. 71 - 72). AeroQuad-ohjeessa quadrotor rakennetaan Arduino-ohjaustietokoneen ja AeroQuad-lisäkomponenttien ympärille, kun taas QuadPowered-ohjeessa quadrotor rakennetaan QuadPower-ohjaustietokoneen

ympärille. Molemmissa ohjeissa listataan tarvittavat komponentit ja tehdään komponenttiehdotelma.

Kyseisten ehdotelmien suosituskomponentit poikkeavat jonkin verran tämän opinnäytetyön alaluvussa 6.5 esitetyistä suositusvaihtoehdoista, koska TAMKin UAV-quadrotorin komponenttikartoituksessa on keskitytty mahdollisimman hyvään kuormankantokykyyn. Muilta osin ohjeet keskittyvät pääasiassa sähköliitäntöihin, eivätkä ne käsittele esimerkiksi rungon rakentamista tai komponenttien kiinnitystä kovinkaan kattavasti. Sähköliitännät keskittyvät pääasiassa ohjaustietokoneiden liitäntöihin ja ohjelmistoihin. Lisäksi AeroQuad-ohjeessa annetaan käyttökelpoisia neuvoja nopeudensäädinten kalibroinnista. Ohjeiden lähteitä tulee seurata säännöllisesti, sillä ohjeet päivittyvät melko usein. Näiden käyttökelpoisten ohjeiden lisäksi RC Groups -foorumilta löytyy kattavaa tietoa quadrotorien rakentamisesta.

Vaihe 2: Käyttöönotto vaihe

Onnistuneen prototyypivaiheen jälkeen tulee arvioida quadrotorin suoriutumista sille suunnitelluista käyttösovelluksista. Koneeseen tulee rakentaa näytteenottolaitteiston kuljetusmahdollisuus niin, että koneella kyetään ottamaan näytteitä ilmassasta, jota roottorit eivät ole sekoittaneet. Tämä tulee tehdä niin, että raskas mittalaitteisto sijoitetaan koneen painopisteen alle, ja laitteistolta viedään kevyt kanava roottorivaikutuksen ulkopuolelle. Lisäksi lämpökuvauslaitteiston hankintaa pitää ruveta kartoittamaan. Jos tarvetta ilmenee, tulee komponenttien laatua parantaa. Muun muassa seuraavia asioita tulee miettiä:

Pitäisikö potkurit vaihtaa hiilikuituisiin?

Ovatko moottorit tarpeeksi luotettavat ja suorituskykyiset?

Onko runko tarpeeksi suuri, vai auttaisiko rungon varsien pidentäminen parantamaan quadrotorin vakautta?

Tuottaako kone riittävästi työntövoimaa neljällä aktuaattorilla, vai tulisiko aktuaattoreiden määrää lisätä kahdella tai jopa neljällä?

Kannattaisiko käytössä oleva 72 MHz:n ohjain vaihtaa ulkoisia häiriöitä paremmin sietävään 2,4 GHz:n versioon?

Lisäksi projektin kehityssuunnaksi voidaan valita automatiikan lisääminen, jolloin koneeseen tulee kehittää GPS-tekniikkaa. Taulukossa 4 listataan mahdollisia kalliimpia komponentteja, joiden hankintaa ja käyttöä voidaan harkita.

Taulukko 4: Lisä- ja korvauskomponenttihinnasto

	Komponentit:	kpl:	kpl hinta: (€)	yht. hinta: (€)
Roottorit:	CFK 12x3,8"	4	24,5	98
Moottorit:	E-Flite Park 400	4	34	136
PC:	QuadPower	1	180	180
	AccelPower add-on	1	180	180
Lähetin:	Futaba 7C 2.4Ghz FASST	1	289	289
Yhteensä:				883

Tiettyjen komponenttien, kuten sähkömoottoreiden tai lähettimen omavarainen parantaminen voi olla vaikeaa tai jopa mahdotonta. Tällaisten komponenttien kohdalla ei ole muuta vaihtoehtoa kuin hankkia ne kaupallisesti. Tällöin korvattavien komponenttien toimivat ominaisuudet tulee säilyttää samoina, ja samaan aikaan tulee pyrkiä parantamaan niitä ominaisuuksia, joiden puutteellisuuden takia komponentti on päätetty korvata. Joidenkin komponenttien ja ominaisuuksien parantamiseen voidaan myös käyttää koulun osaamista. Näitä komponentteja ovat esimerkiksi roottorit ja runko, joiden kehittämiseen lentokonetekniikan osaston taitotieto ja välineistö riittävät hyvin. Lisäksi koneen ohjaustietokonetta ja ohjelmistoa voidaan kehittää, mutta tähän tarvitaan todennäköisesti tietotekniikan opintolinjan *sulautetut järjestelmät ja elektroniikka* -suuntautumislinjan apua. Yhteistyö- ja jatkokehitysajatuksiin palataan tarkemmin opinnäytetyön seuraavassa ja viimeisessä osassa.

OSA III

Tutkimuksen johtopäätökset ja jatkokehitysmahdollisuudet

7 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli koota TAMKin lentokoneosastolle kattava aloituspaketti UAV-teknologiasta. Työ koostui UAV-teknologian kartoituksesta (OSA I) ja TAMKin UAV-projektin pohjustamisesta (OSA II).

Ennen opinnäytetyön erillisiin osiin paneutumista keskityttiin työssä tarvittavan tutkimusmateriaalin keräämiseen. Materiaali koostuu suurimmaksi osaksi erilaisista seminaari- ja yliopistoraporteista sekä hakuteoksista. Tutkimusmateriaalin kerääminen osoittautui tutkimuksen ehkä aikaa vievimmäksi osioksi, sillä kuten ILO-työryhmän jäsen, jo eläkkeelle jäänyt lentokonetekniikan linjanjohtaja Heikki Aalto tutkimuksen alkuvaiheessa sanoi: ”Silloin kun luulee löytäneensä kaiken olennaisen materiaalin, ei ole löytänyt vielä puoliakaan”. Tämä lausahdus osoittautui erittäin paikkansapitäväksi, koska yleensä siinä vaiheessa, kun kirjoitustyö oli jo hyvässä vauhdissa, ilmaantui jokin uusi olennainen teos, joka vaikutti johonkin tutkimuksen osioon tuntuvasti ja todennäköisesti sai kirjoittajansa kirjoittamaan tai muokkaamaan sivukaupalla tekstiä.

OSA I

UAV-teknologian kartoituksen tavoitteena oli antaa yleinen käsitys UAV-teknologian nykytilasta, siitä miten nykytilanteeseen on tultu ja mitä haasteita tulevaisuus tuo UAV:n yleistymiselle siviili-ilmailussa.

Taustamateriaalin kartoittamisen jälkeen ensimmäinen vaihe oli tutkia UAV-teknologiaan johtanutta historiaa ja sitä, miten UAV-teknologia on kehittynyt ajan kuluessa. Toisessa vaiheessa tutkittiin UAV-projekteja korostaen uusimpia suuntauksia. Kolmannen vaiheen tarkoituksena oli tutkia UAV:n yleistymiseen liittyviä haasteita siviili-ilmailua ajatellen, sekä tarkastella UAV-teknologian suuntaa Suomessa.

Ensimmäisessä vaiheessa lähdettiin selvittämään UAV-teknologiaan johtanutta historiaa. Tätä tutkittaessa huomattiin, että jo yllättävän varhaisessa vaiheessa on alettu kehitellä ideoita miehittämättömistä lentolaitteista, mutta teknologian kehittymättömyys ei kuitenkaan tukenut näitä suunnitelmia. Vasta 1900-luvun alkupuolella miehittämättömät lentolaitteet alkoivat konkreettisesti edistyä radiotekniikan kehittymisen johdosta. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen huomattiin, että UAV:n kehitys kulki käsi kädessä ohjusten kehittelyn kanssa, koska niiden ohjausjärjestelmien

ongelmat olivat samanlaisia. UAV-koneet yleistyivät vasta 1950-luvulla laajamittaiseen tiedustelukäyttöön erityisesti Yhdysvaltain toimesta Vietnamin sodassa.

UAV-tekniikan kartoituksen toisessa vaiheessa tuotiin esille nykyajan UAV-projekteja niin sotilas- kuin siviili-ilmailun puolelta. Tässä tutkimuksessa päädyttiin erityisesti siihen johtopäätökseen, että perinteinen lentokone on väistymässä VTOL-lentolaitteiden tieltä UAV-siviilisovelluksissa. Nykyajan kehittynyt elektroniikka on mahdollistanut pienikokoisten VTOL-koneiden valjastamisen UAV-käyttöön.

Kartoituksen kolmannessa vaiheessa otettiin tutkimuksen kohteeksi UAV:n yleistymisen haasteita siviili-ilmailussa sekä UAV-tekniikan suunta Suomessa. Tutkimuksesta voidaan päätellä, että siviili-ilmailussa UAV:lle eniten ongelmia tulevat aiheuttamaan kansalliset ja kansainväliset ilmailumääräykset, joiden vaatimukset pitää täyttää turvallisuuden nimissä. Ongelmia tulee tuottamaan myös nykyaikaisen lennonvalvontajärjestelmän soveltuvuus UAV-käyttöön. Samat ongelmat ovat edessä myös Suomessa, jossa on valtakunnallisesti esitetty UAV-tekniikan kehitykseen panostamista. Suomen ilmailuviranomaisen tulisi aktivoitua voimakkaasti ja mahdollisimman nopeasti uusien UAV:ta koskevien säädösten valmistelussa, niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin. Suomen nykyiset ilmailumääräykset eivät ota erityisen kattavasti kantaa UAV-toimintaan, mutta sallivat sen tietyissä rajoissa. Valtakunnallisesti pääpainon asettaminen UAV-tekniikan kehittämiseen tarkoittaa myös TAMK:in osalta sitä, että tulisi reagoida nopeasti uuteen kehityssuuntaan. Tämä tarkoittaisi käytännössä nopeasti toteutettavaa ja käytännöllistä UAV-projektia, jolla luodaan suunnitelma tämän opinnäytetyön osassa II. Myös yhteistyöverkostojen luomista muihin alan oppilaitoksiin ja yrityksiin.

UAV-tekniikan kartoitusprosessi oli erittäin haastava aloittaa. Haastavuus ei johtunut niinkään materiaalin vähydestä, vaan järkevän kokonaisuuden aikaan saamisesta todella erityyppisten konferenssipaperien, raporttien ja julkaisujen perusteella. Myös kirjoittajalle itselleen uudet ja vieraat asiat toivat oman haasteensa työn suorittamiseen.

Kokonaisuutena UAV-tekniikan kartoitus antaa hyvän yleiskuvan UAV-tekniikan historiasta, nykytilanteesta ja UAV:n yleistymiseen liittyvistä haasteista siviili-ilmailua ajatellen. Tämän tutkimuksen pohjalta on hyvä lähteä syventämään tietoa, kun tarkoituksena on syventyä UAV-tekniikan eri osa-alueisiin.

OSA II

TAMKin UAV-projektin pohjustuksen tarkoituksena oli selvittää, minkälainen UAV-kone Tampereen ammattikorkeakoulun lentokonetekniikan osastolla kannattaisi rakentaa. Tutkimuksessa tehtiin myös suunnitelma TAMKille koneen valmistamisesta. Ensimmäiseksi päätettiin koneen käyttösovellukset, jotka ovat ilmanäytteenotto ja ilmakuvaus. Sen jälkeen niiden ympärille rakennettiin suunnittelukriteerit. Tämän jälkeen lähdettiin selvittämään, mikä lentolaite sopisi parhaiten asetettuihin suunnittelukriteereihin. Kun selvitys oli saatu päätökseen, tehtiin valitusta UAV-koneesta valmistussuunnitelma. Valmistussuunnitelmassa tehtiin tarkempi selvitys valitusta koneesta ja valittiin koneelle oikeat komponentit. Osion lopussa tehtiin vielä suunnitelma siitä, miten projekti toteutettaisiin.

Selkeiden käyttösovellusten ansiosta suunniteltavalle koneelle onnistuttiin rakentamaan toimivat suunnittelukriteerit, joiden avulla koneen tyyppiä oli hyvä lähteä selvittämään. Kaikista kartoituksessa olleista konetyypeistä onnistuttiin tekemään kattava selvitys, jonka ansiosta konetyypin valinnasta tuli melko vaivaton. Työssä päädyttiin esittämään TAMKin tulevaksi UAV-koneeksi quadrotor-tyyppistä lentolaitetta, koska tutkimuksen mukaan kyseinen konetyyppi olisi tutkituista vaihtoehdoista paras toimimaan asetetuissa käyttösovelluksissa. TAMKin UAV-quadrotorille tehtiin toteutuskelpoinen valmistussuunnitelma, joka koostuu komponenttiehdotelmasta ja toteutussuunnitelmasta. Valmistussuunnitelman avulla UAV-koneen rakentaminen pystytään aloittamaan pienellä ryhmällä ja tarvittaessa nopeassa aikataulussa. Projektin aloitusbudjetiksi tuli noin 400 euroa, jota voidaan pitää alhaisena, ja sitä oli tutkimuksessa tavoiteltukin.

TAMKin UAV-projektin pohjustus oli iso oppimisprosessi. Muun muassa luku 5 pakotti minut tutustumaan tekniikkaan, johon ei Tampereen ammattikorkeakoululla ollut vielä aiemmin tutustuttu. Tämä seikka myös lisäsi työn haastavuutta ja mielenkiintoa entisestään. Ennen kaikkea VTOL-koneisiin ja niiden tekniikkaan tutustuminen oli minulle uusi kokemus, ja oli yllättävää, että projektissa päädyttiin suunnittelemaan pyöriväsiipinen lentolaite. Ennen kartoituksen aloittamista pidin lentokonetta melko luontevana vaihtoehtona, luultavasti siksi, että opintoni ovat painottuneet nimenomaan lentokoneisiin ja lentokonetekniikan perinteetkin ohjaavat ajatusta samaan suuntaan.

Luvussa 6 tehty valmistussuunnitelma oli kirjoittajalleen ensikosketus lentolaitteen suunnitteluun kokonaisuudessaan. Tästä syystä suunnitteluprosessissa käytettiin runsaasti apuna muiden harrastelijoiden kokemuksia. Eniten vaikeuksia valmistussuunnittelussa aiheutti koneen kokoluokan määrittely. Vaikeuksien suurin syy oli kokemuksen puute, mutta näkemykseni mukaan koulun opit kompensoivat tätä puutetta melko hyvin, ja mielestäni kokoluokan määrittelyssä päästiin järkevään ja perusteltuun lopputulokseen.

Toinen vaikeuksia aiheuttanut asia oli se, että tässä vaiheessa suunnittelua ei ollut mahdollista saada eri komponentteja koekäyttöön. Tämän takia komponenttikartoituksessa jouduttiin nojautumaan ainoastaan alaluvussa 6.3 käsitelyihin komponenttien analysointiohjelmiin ja muiden käyttäjien kokemuksiin. Quadrotor-käyttäjäkunta on kuitenkin erittäin aktiivista, mikä helpotti kartoitusta huomattavasti. Testauksen puutteen takia komponenttivalinnoille ei kuitenkaan voida antaa täyttä varmuutta, ja kuten alaluvussa 6.6 todettiin, tulee komponenteilla suorittaa kattavat testaukset ennen niiden käyttämistä lentävässä quadrotorissa.

Kaiken kaikkiaan TAMKin UAV-projektin pohjustaminen -osiossa päästiin mielestäni erinomaiseen lopputulokseen. Kokonaisuudesta tuli selkeä ja johdonmukainen ja se palvelee mielestäni tarkoituseriään hyvin. Loppukaneettina totean, että jos tätä opinnäytetyötä pitäisi kuvata yhdellä sanalla, olisi se mielestäni *kasvu*, koska tutkimuksen edetessä ajatus ilmakehä- ja ilmanäytteenotto-UAV:sta kasvoi kohti paljon laajempaa näkemystä. Näkemykseni ei kata enää pelkästään tässä opinnäytetyössä suunniteltua projektia, vaan se käsittää myös ideoita ja ajatuksia siitä, miten tutkimusta voitaisiin jatkaa ja kehittää eteenpäin. Näitä jatkotutkimusajatuksia käsitellään seuraavassa luvussa.

8 Jatkokehitysajatukset

Viime vuosina kehittynyt sensori-teknologia on avannut uusia ovia UAV-koneiden kehittymiselle. Perinteisesti monet uudet teknologiat saavat alkunsa sotilaskäyttöön kehitetyistä sovelluksista ja sen jälkeen ne yleistyvät siviilipuolelle, kun niiden hyödyllisyydet havaitaan taloudellisesti kannattaviksi. Nykyajan UAV-teknologia kolkuttelee siviilimaailman ovia uusien markkinoiden toivossa. Sotilas- ja siviilipuolen tarpeet kuitenkin yleensä eroavat hieman toisistaan, kuten myös UAV:n tapauksessa. Sotilaspuolella UAV:ta on käytetty pääasiallisesti reaaliaikaisen tilannekuvan luomiseen, mikä suoritetaan suhteellisen suurista lentokorkeuksista käsin. Siviilipuolen sovellukset taas edellyttävät usein matalalla lentämistä paikoissa, joissa esteitä on suhteellisen paljon. Muun muassa tästä syystä erilaiset VTOL-järjestelmät ovat kasvattaneet suosiota useiden projektien muodossa siviilipuolella.

Tämä tutkimus on osoittanut, kuinka suuren potentiaalin VTOL-koneet omaavat UAV-käytössä, ja kuinka paljon näiden koneiden kehityksestä voitaisiin hyötyä oppimismielessä ja mahdollisesti myös taloudellisesti. VTOL-koneista tähänkin projektiin valittu quadrotor nousi tutkimuksen suurimmaksi yllättäjäksi, koska TAMKilla ei ollut kyseisestä lentolaitteesta juurikaan tietoa ennen projektin alkua. Tähän vaikuttaa suurelta osin se, että quadrotorien kehitys on ollut viime vuosina valtavan nopeaa. Tämä johtuu teknologian nopeasta kehityksestä. Näistä syistä myös quadrotor-harrastajamäärät kasvavat nopeaa vauhtia. Mielestämme olisikin tärkeää, että myös TAMK tarttuisi aiheeseen nyt, kun se on vielä suhteellisen tuore, eikä kaupallista kilpailua vielä juuri ole. Tutkimuksessa ei ole havaittu muita kotimaisia quadrotor-projekteja kuin Oulun yliopiston robotiikan laboratorion valmistama quadrotor (ks. luku 3.3.4). Oulun yliopiston projektikaan ei ollut kaupallinen, eikä tämän tutkimuksen aikana tullut ilmi, että projektia olisi jatkettu kaupallisiin tarkoituksiin. Tutkimuksen tulos ei tietenkään tarkoita, ettei muita quadrotor-projekteja voisi olla valmisteilla. Aiheeseen tulisi kuitenkin tarttua nyt, sillä tämä antaisi mahdollisesti ”varaslähdön” tekniikan kehitykseen. Quadrotor-tekniikan toimivuudesta on osoituksena muun muassa tässäkin tutkimuksessa esiin tullut kanadalainen Draganfly Innovations Inc., joka aloitti quadrotorien kehityksen leluista ja sai juuri FAA:lta luvan myydä Draganflyer X6:ta hätätilannekäyttöön Coloradon poliisivoimille (Draganfly Innovations Inc. 2009b).

TAMKin quadrotor-UAV-projektilla on suurta potentiaalia jatkokehitykselle, jonka ympärille voitaisiin rakentaa jatkoprojekteja tai opinnäytetöitä monillekin eri opintolinjoille, tai kehittää jopa yhteistyöprojekteja eri opintolinjojen kesken. Alla olevassa listauksessa on kerrottu vain ensisijaisia muutos- ja parannuskohteita, ja varmaksi voidaan todeta, että työn käytännön toteutus avaa vielä runsaasti uusia kohteita.

Jatkokehityksen aiheita ovat esimerkiksi:

- uuden rungon suunnittelu ja rakentaminen
- selvitys mahdollisesta hiilikuitupotkureiden valmistamisesta koululla
- GPS-käyttöisen automatisoinnin lisääminen kopteriin
- automaattinen leijunta ilmanpaineantureiden avulla
- hankitun ohjausohjelmiston jatkokehitys, tai vastaavasti täysin uuden ohjausohjelmiston suunnittelu
- lämpökuvauslaitteiston lisääminen alukseen
- kartoitus kevyemmän ilmanäytteenottolaitteiston hankkimisesta
- selvitys koneen kantokyvyn lisäämisestä muuttamalla se esimerkiksi heksa- tai oktokoiteriksi, eli lisäämällä sen aktuaattorien määrää kuuteen tai kahdeksaan.

Tämän projektin pohjalta voitaisiin myös suunnitella täysin omavaraisen koneen kehittämistä, jossa voitaisiin hyödyntää useita opintolinjoja. Esimerkiksi lentokonetekniikan opintolinjalla voitaisiin suorittaa koneen perus- ja rakennesuunnittelu. Perussuunnitteluun sisältyy muun muassa koneen suunnittelukriteerien määrittely ja koneen suunnittelu niin, että se täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset. Rakennesuunnittelu kattaa esimerkiksi koneen roottorien suunnittelun, jossa voitaisiin hyödyntää lentokonetekniikan komposiittiosaamista. Lisäksi rakennesuunnittelu kattaa myös rungon suunnittelun. Tässä työssä tehdyn tutkimuksen perusteella koneen rungon tulisi olla riittävän kevyt ja kestävä. Rungon tulisi myös olla helposti vauriokorjattava, jolloin se olisi parasta suunnitella moduuleista koostuvaksi.

Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka -suuntautumislinja voisi vastata koneen elektroniikan suunnittelusta. Tähän kuuluvat alaluvussa 6.2 mainitun ohjaustietokoneen ja siihen liitettävän elektroniikan suunnittelu ja toteutus sekä tarvittavan ohjelmiston koodaus. Ohjaustietokoneeseen voidaan integroida monia eri ominaisuuksia, kuten edellisessä listauksessa mainittu GPS-käyttöinen automatisointi tai leijunta ilmanpaineantureita hyväksi käyttäen. Kuten on käynyt ilmi, quadrotorin suunnittelu alusta loppuun kattaa monia eri työvaiheita. Täten omavaraisen koneen kehittämisprojekti tulisi jakaa moniin alaprojekteihin ja opinnäytetöihin eri opintolinjojen kesken.

Edellä esitetyssä suunnitteluehdotuksessa lähdettiin siitä olettamuksesta, että suunniteltava kone on quadrotor. Koneen tyyppi tulee kuitenkin määrittää sille asetettujen käyttösovellusten mukaan, kuten tässäkin opinnäytetyössä on tehty. Kone voi olla quadrotor, mutta se voi olla myös esimerkiksi octo- tai heksarotor, eli sen roottorien määrää on lisätty, tai se voi olla jokin alaluvussa 5.3.1 mainituista lentolaitteista.

Kuten aiemmin todettiin, UAV-koneen ja erityisesti tässä opinnäytetyössä esille tuodun quadrotor-koneen valmistusprosessi vaatii usean eri tekniikan alan osaamista. Yhteistyöprojektimahdollisuudet eivät rajaudu ainoastaan TAMKIn opintolinjojen välille, vaan ne ulottuvat myös oppilaitosten välisiin projekteihin. Alaluvussa 4.3 käsiteltiin ILO-työryhmän tekemää raporttia, jossa korostettiin suomalaisen UAV-tekniikan kehittämisen merkitystä. Kehityksen yhtenä osana pidettiin yhteistyöverkoston luomista eri oppilaitosten ja yritysten kesken. Voidaan todeta, että tässä opinnäytetyössä suunnitellun projektin nopea toteuttaminen ja oikea hyödyntäminen mahdollistaisivat verkostoitumisen myös TAMKIn osalta. Tämä on tärkeää, jotta TAMK ei jäisi yhteistyöverkoston ulkopuolelle. Verkostoitumista voitaisiin kehittää esimerkiksi JAMKIn kanssa, kuten ILO-raportissa ehdotettiin (ILO 2-työryhmä 2010, 5), tai Tampereen ja sen lähetyvillä sijaitsevien yritysten kanssa (Patria, Robonic jne.). TAMKIn UAV-tekniikan tuntemuksen kehittyessä voitaisiin myös lentokonetekniikan opetusta laajentaa UAV-tekniikan suuntaan. Tämä lisäksi TAMKIn uskottavuutta suomalaisten UAV-osaajien parissa ja parantaisi näin TAMKIn asemaa yhteistyöverkostossa. Edellä mainituin keinoin UAV-tekniikasta olisi mahdollista rakentaa Tampereen ammattikorkeakoululle kestävä suuntauksen ala, jolla olisi pitkäkestoisia kehitysnäkymiä pitkälle tulevaisuuteen.

Lähdeluettelo

Painetut lähteet:

- Castillo P, Lozano R & Dzul A 2005. Modelling and Control of Mini-Flying Machines. USA: Springer.
- Chahl J, Jain L, Mizutani A & Sato-Ilic M 2007. Innovations in Intelligent Machines 1. Springer.
- Fahimi F 2009. Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control. Springer.
- Hassinen A 2008. Ilmakuvaus lennokilla. Ilmailu 2/2008.
- Laine S, Hoffren J & Renko K 2006. Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka. Helsinki, Finland: WSOY Oppimateriaalit Oy
- Lehmusvuori T & El Mahboul N 2007. Teoreettinen sähkötekniikka. Helsinki, Finland: Edita Publishing Oy
- Raunio J 2000. Helikopteriteoria. Helsinki, Finland: Oy Edita Ab
- Valavanis K 2007. Advances in Unmanned Aerial Vehicles. Florida, USA: Springer
- Valavanis K, Oh P & Piegler L 2008. Unmanned Aircraft Systems: International Symposium On Unmanned Aerial Vehicles, UAV '08. Springer.
- Zaloga S 2008. Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare 1917 - 2007. Osprey Publishing.

Sähköiset lähteet:

- Aeroquad 2010 [online] [viitattu 30.4.2010]. <http://aeroquad.info/bin/view>
- APC Propellers 2007 [online] [viitattu 19.5.2010]. <http://www.apcprop.com/pindex.asp>
- Arduino 2010 [online] [viitattu 30.4.2010]. <http://www.arduino.cc/>
- Autonomous Flying Vehicle Project: AVATAR 2003. University of Southern California [online] [viitattu 20.5.2010]. <http://robotics.usc.edu/~avatar/images/photos/benning1.jpg>
- Ayk. F 2010. AeroQuad: A Build Tutorial, version 8 [pdf] [online] [viitattu 22.5.2010]. <http://code.google.com/p/aeroquad/downloads/list> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]

- Bouabdallah S 2007. Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying. Sveitsi: EPFL [pdf] [online] [viitattu 19.5.2010]. http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2007/3727/EPFL_TH3727.pdf [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Calvert N 2009. Design and Testing of a Quadrotor Aircraft. American Institute of Aeronautics and Astronautics [pdf] [online] [viitattu 11.5.2010]. http://www.colorado.edu/ASEN/SrProjects/Archive/2008-09/AIAA_Conference_Paper/VALASARAPTOR_AIAA_paper.pdf [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Draganfly Innovations Inc. 2006a [online] [viitattu 30.4.2010]. <http://www.rctoys.com/pr/2006/12/08/choosing-the-right-brushless-electric-motor-for-your-rc-airplane/>
- Draganfly Innovations Inc. 2006b [online] [viitattu 30.4.2010]. <http://www.rctoys.com/pr/2006/12/11/choosing-the-right-electronic-speed-control-esc-for-your-electric-rc-airplane/>
- Draganfly Innovations Inc. 2009a [online] [viitattu 30.4.2010]. <http://www.rctoys.com/pr/2009/05/25/all-about-brushless-motors-what-you-need-to-know/>
- Draganfly Innovations Inc. 2009b [online] [viitattu 18.5.2010]. <http://www.draganfly.com/>
- E-Flite 2010 [online] [viitattu 10.5.2010]. <http://www.e-fliterc.com/>
- EPP 2010 [online] [viitattu 17.5.2010]. <http://epp.com/>
- Flying Unit. Oulun yliopisto [online] [viitattu 23.5.2010]. http://www.ee.oulu.fi/research/isg/flying_unit
- HobbyKing online 2010 [online] [viitattu 10.5.2010]. <http://www.hobbycity.com>
- Hoffmann G, Rajnarayan D, Waslander S, Dostal D, Jang J & Tomlin C 2004. The Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi Agent Control (STARMAC). Proc. 23rd Digital Avionics Systems Conference, Salt Lake City, USA [pdf] [online] [viitattu 9.12.2009]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.74.9999&rep=rep1&type=pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Hoffmann G, Huang H, Waslander S & Tomlin C 2007. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. American Institute of Aeronautics and Astronautics [pdf] [online] [viitattu 8.4.2010]. http://hoffmann.stanford.edu/papers/Quadrotor_Dynamics_GNC07.pdf [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- ILO 2-työryhmä 2010. Ilmailuteollisuuden ja lentotekniikan ohjelma (ILO) 12.3.2010. Suomen puolustus- ja ilmailuteollisuusyhdistys [pdf]. [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]

- Johnson D 2006. Review: Capable Computing Inc's MotoCalc Version 8.03 [online] [viitattu 17.5.2010].
<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=544846>
- LCC-Shop 2008 [online] [viitattu 19.5.2010]. <http://www.lcc-shop.de/index.htm>
- Mikrocontroller 2008 [online] [viitattu 17.5.2010]. <https://www.mikrocontroller.com/>
- MQ-8 Fire Scout. Wikipedia. [online] [viitattu: 19.5.2010]
http://en.wikipedia.org/wiki/File:MQ-8B_Fire_Scout.jpeg
- Pounds P, Mahony R, Hynes P & Roberts J 2002. Design of a Four-Rotor Aerial Robot. Australasian Conference on Robotics and Automation [pdf] [online] [viitattu 23.2.2010]. <http://www.araa.asn.au/acra/acra2002/Papers/Pounds-Mahony-Hynes-Roberts.pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Pounds P, Mahony R, Gresham J, Corke P & Roberts J 2004. Towards Dynamically-Favourable Quad-Rotor Aerial Robots. Australasian Conference on Robotics and Automation [pdf] [online] [viitattu 4.12.2009].
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.8460&rep=rep1&type=pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Pounds P & Mahony R 2005. Small-scale Aeroelastic Rotor Simulation, Design and Fabrication. Australasian Conference on Robotics and Automation [pdf] [online] [viitattu 12.4.2010].
<http://www.araa.asn.au/acra/acra2005/papers/pounds.pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Pounds P, Mahony R & Corke P 2006. Modelling and Control of a Quad-Rotor Robot. Australasian Conference on Robotics and Automation [pdf] [online] [viitattu 4.12.2009].
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.8460&rep=rep1&type=pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Quadpower 2010 [online] [viitattu 10.5.2010]. <http://www.quadpowered.com/>
- Quadrant 2007. Engineering Plastic Solutions for Construction & Heavy Equipment. Mainoskatalogi. [pdf] [online] [viitattu 17.5.2010].
<http://www.quadrantepp.com/assets/global/Europe/EPP/Literature/CHEbrochureE.pdf> [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]
- Rc Groups 2009. Quadrocopter and Trikopter Info Mega Link Index [online] [viitattu 3.5.2010]. <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1097355>
- Rc Groups 2010. UAV Student project – questions about quadrotor [online] [viitattu 23.4.2010]. <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1202361>
- Sparkfun Electronics 2010 [online] [viitattu 17.5.2010].
<http://www.sparkfun.com/commerce/categories.php>

Tikanmäki A, Mäkelä T, Pietikäinen A, Särkkä S, Seppänen S & Röning J 2007. Multi-Rotor System for Exploration in an Outdoor Environment. Proc. Robotics and Applications and Telematics [online] [viitattu 23.5.2010].
<http://www.actapress.com/Abstract.aspx?paperId=31342>

Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 - 2030, 2005. USA Department of Defense [pdf] [online] [viitattu 10.3.2010].
http://www.fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]

VTI Technologies 2009 [online] [viitattu 10.5.2010]. <http://www.vti.fi/fi/uutiset-tapahtumat/tiedotteet/1257860964/>

Wright brothers. Wikipedia. [online] [viitattu 7.5.2010].
http://en.wikipedia.org/wiki/File:First_flight2.jpg

Painamattomat lähteet:

Persson C 2010. Drive Calculator-ohjelman tekijä. S-postikeskustelu. *cp@heise.de*. Tulostettu 23.5.2010 [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]

Vorkoetter S 2010. MotoCalc-ohjelman tekijä. S-postikeskustelu. *stefan@capable.ca*. Tulostettu 23.5.2010 [Saatavilla: TAMK, argon, UAV-projektikansio]