

Kasper Ågren

Autonomisen vesimittalaitealustan ArduPilot-pohjainen ohjausjärjestelmä

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ala
Tietotekniikan koulutusohjelma
Kevät 2014

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Kasper Ågren	
Työn nimi Autonomisen vesimittalaitealustan ArduPilot-pohjainen ohjausjärjestelmä	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot	Toimeksiantaja Oulun yliopisto, (Centre for Measurement and Information Systems) CEMIS-Oulu
Aika Kevät 2014	Sivumäärä ja liitteet 30
<p>Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa ohjausjärjestelmä autonomiseen vedessä liikkuvaan mittalaitealustaan. Työn tilaajana oli Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikkö CEMIS-Oulu. Mittalaitealusta ja sen ohjausjärjestelmä suunniteltiin ja valmistettiin pääosin CEMIS-Oulun tiloissa Kajaanissa.</p> <p>Insinööriyön alussa esitellään veden pinnalla tai sukelluksissa liikkuvaan laitteeseen soveltuvia paikannus- ja navigointijärjestelmiä. Työn alussa käydään läpi myös yleisimpiä veden laadun mittauksia, joita autonominen veden alla liikkuva laite (AUV) voi suorittaa. Työn pääpaino on kahdessa eri osassa. Ensimmäisessä osassa keskitytään ohjaus- ja navigointijärjestelmän suunnitteluun ja testaukseen. Toisessa osassa keskitytään vapaaseen lähdekoodin perustuvan ArduPilot-autopilotjärjestelmän laitteistoon ja ohjelmistoon.</p> <p>Mittalaitealustan ohjausjärjestelmä toteutettiin vaiheeseen, jossa kaikki yksittäiset ohjauksen komponentit ja käsiohjaus toimivat halutulla tavalla. ArduPilotin ja maa-aseman välisen telemetriayhteyden avulla maa-asemasta voitiin lähettää mittalaitealustalle reittipisteitä ja seurata ArduPilotin lähettämiä telemetriatietoja.</p> <p>Työn tuloksena mittalaitealustassa oli toimiva ohjausjärjestelmä, jonka toiminta testattiin laboratorio-olosuhteissa. Ohjausjärjestelmän käsiohjaus ja telemetriayhteys testattiin ja todettiin toimivaksi autonomisen navigoinnin ja kenttätestauksen jäädessä jatkokehitettäväksi.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	ArduPilot, AUV
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Kasperri Ågren	
Title ArduPilot Based Steering System for Autonomous Water Measurement Platform	
Optional Professional Studies	Commissioned by University of Oulu, (Centre for Measurement and Information Systems) CEMIS-Oulu
Date Spring 2014	Total Number of Pages and Appendices 30
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design and implement a steering and navigation system for an autonomous measurement platform that moves in water. The commissioner of the thesis was Oulu university's unit CEMIS-Oulu that specializes in measurement technology. The measurement platform and its steering system were manufactured mainly in CEMIS-Oulu's facilities in Kajaani.</p> <p>The thesis starts with an introduction to positioning and navigation systems available for a device moving on the surface of water or submerged. Also, some of the basic water measurements made by an autonomous underwater vehicle (AUV) are explained. The main focus of this work is divided into two parts. First is the designing and testing of the steering and navigation system. The second part focuses on open source autopilot ArduPilot's hardware and software.</p> <p>As a result of this thesis the measurement platform had a working steering system which was tested in laboratory conditions. The telemetry connection and manual control of the steering system were tested and found working, while autonomous navigation was left for field tests and further development.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	ArduPilot, AUV,
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VEDESSÄ LIIKKUVAT MITTALAITTEALUSTAT	2
2.1 Paikannus ja navigointi	2
2.2 Veden laadun mittaus AUV:lla	4
3 OHJAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	5
3.1 Moottori	6
3.2 Servomoottori	6
3.3 Virransyöttö	8
3.4 Yhteydet	9
4 OHJAUSJÄRJESTELMÄN TESTAUS	11
4.1 Moottorin ohjaus	11
4.2 Servomoottori	11
4.3 Yhteydet	13
5 ARDUPILOT MEGA 2.6	16
5.1 Laitteisto	16
5.2 Ohjelmisto	21
6 YHTEENVETO	26
LÄHTEET	27

LIITTEET

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

Autopilot	Järjestelmä, joka ohjaa ja navigoi liikkuvaa laitetta tai alusta itsenäisesti.
BEC	Battery Eliminator Circuit
CTD	Conductivity Temperature Depth
DGPS	Differential Global Positioning System
DVL	Doppler Velocity Log
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter-Integrated Circuit
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
OSD	On-Screen Display
PWM	Pulse-Width Modulation
RC	Radio-Control
RTK	Real Time Kinematic
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
VRS	Virtual Reference Station

1 JOHDANTO

Insinööriyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa ohjausjärjestelmä autonomiseen vedessä liikkuvaan mittalaittealustaan. Työn tilaaja on Oulun yliopiston mittaustekniikan yksikkö (Centre for Measurement and Information Systems) CEMIS-Oulu. Mittalaittealustan ja sen ohjausjärjestelmän suunnitteluun ja valmistukseen käytetään CEMIS-Oulun tiloja Kajaanissa.

Työ liittyy liikkuvat laitealustat (LILA) -hankkeeseen. Hankkeessa tutkitaan ja demonstroidaan ilmassa ja vedessä liikkuvien laitealustojen käyttöä ympäristömittauksiin. Hankkeen rahoittajina ovat EU:n Itä-Suomen EAKR-toimenpideohjelma sekä yritykset ja yhteisöt.

Autonomisen vesimittalaittealustan avulla voidaan suorittaa mittalaitteista riippuen erilaisia vedenlaadun tarkkailutehtäviä. Autonominen mittalaittealusta voidaan ohjelmoida kiertämään haluttu reitti vesialueella kuten lammessa tai järvessä, samalla kun mittalaitteet mittaavat veden ominaisuuksia.

Mittalaittealustan ohjausjärjestelmän keskeisimpänä osana toimii Arduino Mega -pohjainen autopilotti ArduPilot Mega 2.6. ArduPilot navigoi mittalaittealustaa GPS-vastaanottimen, kiihtyvyyssanturien ja magnetometrin avulla.

Insinööriyön teoriaosiossa keskitytään autonomisiin vesilaitteisiin sekä niihin liittyviin teknologioihin. Käytännön osassa keskitytään ohjausjärjestelmän eri komponenttien valintaan ja ominaisuuksiin sekä testaukseen. Insinööriyössä käydään läpi myös ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin rakenne, ominaisuudet sekä siihen liittyvä ohjelmisto.

2 VEDESSÄ LIIKKUVAT MITTALAITTEALUSTAT

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) on autonomisesti veden alla liikkuva miehittämätön laite. Yleisimmin AUV on muutamien kymmenien kilojen painoinen, yhden tai kahden ihmisen kannettavissa oleva laite, jossa energialähteenä käytetään litium-pohjaisia akkuja. Yleensä AUV ei sukelluksissa ollessaan kommunikoi käyttäjän kanssa, vaan varastoi antureilta saamat tiedot lokeihin. [1.]

Kaupallisessa käytössä AUV-laitteita käytetään muun muassa merenpohjan kartoitukseen rakennustöitä varten tai vedenalaisten rakenteiden kunnan tarkistukseen. Sotilastehtävissä AUV:tä käytetään lähinnä miinojen tai sukellusveneiden havaitsemiseen. Tutkimustehtävissä AUV:tä voidaan käyttää esimerkiksi merenpohjan kartoitukseen tai veden ominaisuuksien tutkimiseen. [1.]

Tyypillinen AUV liikkuu joko potkurien tai melojen avulla. Se pystyy suorittamaan muutamien tuntien pituisia tehtäviä. Tyypillinen nopeus AUV:lle on 0,5...2 m/s. [2.]

Yksi käytetyistä AUV-tyypeistä on vedenalainen liitäjä (underwater glider), joka liikkuu hallitsemalla nostettaan sisäisen säiliön avulla. Liitäjä ei pysty etenemään vaakasuoraan, vaan eteneminen tapahtuu peräkkäisillä viistoilla sukellus- ja nousuvaiheilla. Vedenalainen liitäjä pystyy pienen virrankulutuksen ansiosta suorittamaan useiden kuukausien kestoisia tehtäviä. Tyypillinen nopeus vedenalaiselle liitäjälle on alle 0,5 m/s. [3.][4.]

2.1 Paikannus ja navigointi

GPS (Global Positioning System) on USA:n kehittämä ja yleisin käytössä oleva satelliittipaikannusjärjestelmä. Muita vastaavia järjestelmiä ovat muun muassa venäläinen GLONASS ja eurooppalainen Galileo. Yleisnimitys satelliittipaikannusjärjestelmille on GNSS (Global Navigation Satellite System). GPS-paikannusta käytetään AUV-laitteissa vain laitteen ollessa pinnalla, sillä GPS-signaali ei läpäise vettä. [5.][6.]

Veden alla itsenäisen AUV:n navigointi tapahtuu yksinkertaisimmillaan merkintälaskun avulla. Merkintälaskussa AUV:n sijainti arvioidaan kompassia, syvyysanturia ja nopeusanturia käyttäen. Merkintälaskua voidaan käyttää lyhytaikaisissa sukelluksissa, joissa tarkka paikan määrittäminen ei ole tärkeää. [6.]

IMU (Inertial Measurement Unit) on laitteen sisäinen mittaussyksikkö, jolla pystytään mittaamaan kiihtyvyyttä ja kulmakiihtyvyyttä. Mittaamalla maan vetovoiman suunta usean kiihtyvyyssanturin avulla voidaan laskea AUV:n orientaatio. Yleensä IMU mittaa laitteen liikkeen kolmen kiihtyvyyden ja gyroanturin avulla. IMU:hun perustuvaa navigointijärjestelmää kutsutaan nimellä INS (Inertial Navigation System). INS-navigoinnin huonona puolena on virheiden kasaantuvuus, koska seuraava sijainti lasketaan aina edellisestä sijainnista. Pitkäaikaista navigointia varten AUV:n täytyy välillä käydä pinnalla hakemassa GPS-koordinaatit navigoinnin tarkkuuden säilyttämiseksi. [7.]

DVL (Doppler Velocity Log) -avusteisen INS:n avulla AUV voi navigoida veden alla pidempiä aikoja tarkkuuden pysyessä hyvänä. DVL on Doppler-ilmiöön perustuva kaikuluotain, jonka avulla voidaan mitata AUV:n etäisyys pohjaan sekä AUV:n nopeus. [6.]

DVL toimii mittaamalla lähettämänsä ääniaallon kaikuun kuluvan ajan sekä taajuuden muutoksen. DVL laskee AUV:n etäisyyden pohjaan ääniaallon kulkuajan avulla. AUV:n liikkumisesta johtuva ääniaaltojen kasautuminen tai venyminen muuttavat kaiun taajuutta, jolloin DVL voi laskea AUV:n nopeuden. [6.]

GPS-paikannuksessa satelliitit lähettävät GPS-vastaanottimelle radioviestin, joka sisältää ajan jolloin viesti on lähetetty ja satelliitin sen hetkisen sijainnin. Mittaamalla viestin kulkuajan GPS-vastaanotin voi laskea viesteistä oman sijaintinsa. Normaalisti GPS-vastaanotin tarvitsee signaalin vähintään kolmelta satelliitilta voidakseen paikantaa. [8.]

DGPS perustuu siihen, että kiinteä tukiasema mittaa GPS:ltä saadun sijainnin ja vertaa sitä omaan varmistettuun sijaintiinsa. Tarkan sijainnin ja GPS:ltä saadun signaalin avulla tukiasema pystyy laskemaan GPS:n antaman virheen ja lähettää korjauslähetyksen muille, liikkuville GPS-vastaanottimille. Suomen yhdeksän DGPS-tukiasemaa on sijoitettu lähinnä merenkulkua varten, joten DGPS-korjaussignaali ei ole kuuluvissa esim. Kainuun alueella. Käytännön tarkkuus DGPS menetelmällä on 1...2 m 95 % ajasta. [9.][10.][11.]

RTK (Real Time Kinematic) -menetelmää käyttäessä GPS-signaalista käytetään signaalin kantoallon vaihetta. RTK-mittauksissa tarvitaan GPS-vastaanottimen lisäksi myös tunnetulla sijainnilla oleva tukiasema, joka mittaa GPS-signaalin vaihetta ja lähettää GPS-vastaanottimelle korjaustiedon esim. UHF-radiotaajuudella. RTK-menetelmällä päästään muutamien senttimetrien tarkkuuteen enintään 15 km etäisyydellä tukiasemasta. RTK:n huonona puolena on virheen kasvaminen etäisyyden tukiasemaan kasvaessa. RTK-tukiasemia käytetään muun muassa maanmittauksessa ja traktorien automaattiohjauksessa. [9.]

Verkko RTK koostuu usean RTK-tukiaseman muodostamasta verkosta. RTK-verkon alueella voidaan laskentakeskuksen avulla laskea GPS-vastaanottimen tarkempi sijainti. VRS (Virtual Reference Station) RTK-menetelmän avulla voidaan GPS-paikantimen viereen laskea virtuaalinen tukiasema, jolloin etäisyys fyysisestä RTK-asemasta voi olla useita kymmeniä kilometrejä tarkkuuden heikentymättä. [9.][12.]

2.2 Veden laadun mittaus AUV:lla

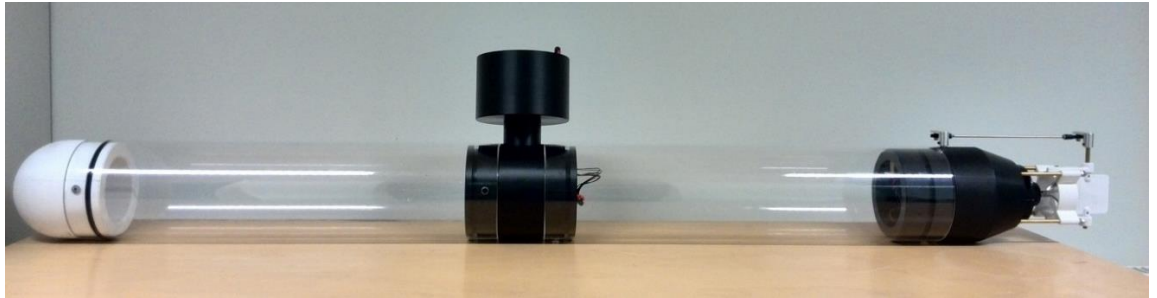
Yksi tärkeimmistä veden laatua mittaavista laitteista on CTD (Conductivity Temperature Depth) -luotain. CTD-luotainta käytetään veden suolaisuuden, lämpötilan ja syvyyden mittaukseen. Mitatuista suureista voidaan laskea myös veden tiheys. CTD-luotaimen avulla saadaan tietoa veden kerrostuneisuudesta ja vesirungon rakenteesta. [13.]

Muita vedestä mitattavia ominaisuuksia ovat muun muassa veden sameus, leväisyys ja liuennan hapen pitoisuus. AUV-laitteissa veden ominaisuuksia mittaavat anturit sijoitetaan yleensä AUV:n keulassa sijaitsevaan erityiseen mittapähän, johon voi asentaa useita antureita. [14.][15.]

Veden sameus on veden optinen ominaisuus, joka kuvaa valon siroamista vedessä. Sameassa vedessä valo siroaa ympäriinsä vedessä olevista partikkeleista, jolloin veden läpinäkyvyys heikenee. Veden voimakas sameus voi olla merkki veden saastumisesta. Veden levämäärät voidaan mitata fluorometrin avulla. Kokonaislevämäärä voidaan selvittää lehtivihreän eli klorofyllin määrän avulla. Fluorometrimittauksilla voidaan selvittää myös syanobakteerin eli sinilevän osuus. [16.][17.]

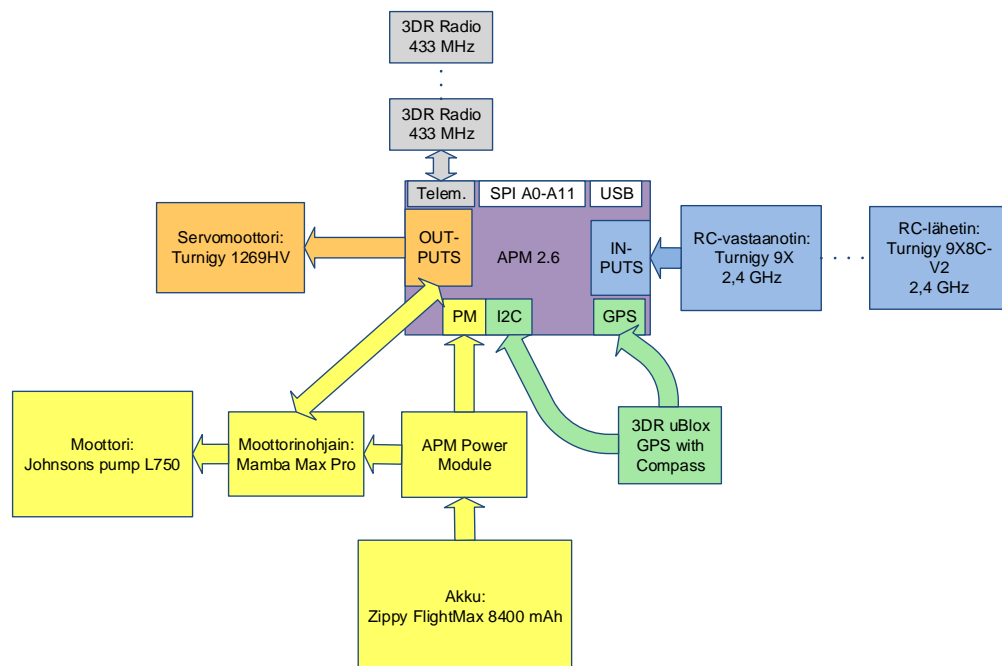
3 OHJAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Mittalaitealustan ohjausjärjestelmän tarkoituksena on mahdollistaa alustan luotettava ja vakaa liikkuminen vedessä. Mittalaitealusta, johon ohjausjärjestelmä rakennetaan, on putkimainen osittain sukelluksissa kulkeva laite. Laitteen rakenne näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Mittalaitealustan rakenne

Jatkuvan viestintäyhteyden ja GPS-signaalin vuoksi alustan antenniosio on veden yläpuolella. Ohjausjärjestelmä sijaitsee mittalaitealustan keski- ja peräosassa ArduPilotin ollessa suoraan antenniosion alapuolella. Mittalaitealustan koko keulaosa on hyötykuormaa eli mittalaitteita varten. Ohjausjärjestelmä rakentuu ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin ympärille. Järjestelmän lohkokaavio on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Ohjausjärjestelmän lohkokaavio

Ohjausjärjestelmän koko virransyötöstä vastaa yksi 13,2 V LiFePO₄-akku, mutta järjestelmää voidaan käyttää myös tavallisesta 12 V lyijyakusta. ArduPilotille ja sen oheislaitteille, kuten GPS-moduulille, radiovastaanottimelle ja telemetriaradiolle, saadaan virransyöttö APM Power Modulelta. ArduPilotin ja moottorinohjaimen välisellä yhteydellä moottorinohjaimen BEC (Battery Eliminator Circuit) syöttää käyttöjännitteen servomoottorille. ArduPilot ohjaa servomoottoria ja moottorinohjainta PWM:n (Pulse-Width Modulation) avulla. ArduPilotin ja maaseaman välinen tiedonsiirto tapahtuu 433 MHz telemetriaradioiden kautta. Ohjausjärjestelmää käsi ohjataan 2,4 GHz radiolähtetimen ja -vastaanottimen avulla.

3.1 Moottori

Yksi tärkeimmistä kriteereistä mittalaittealustan moottorille oli vedenkesto. Tavalliset radio-ohjattavien laitteiden moottorit eivät ole vesitiiviitä moottorin rungon tai akselin osalta. Mittalaittealustan moottoriksi valittiin pilssipumppu Johnson Pump L750. L750:n nimellinen käyttöjännite on 12 V tai 24 V. Pumpulle ilmoitettu pumppausnopeus 13,6 V jännitteellä on 73 l/min virran ollessa 3 A. Pilssipumpulle ilmoitettu sulakkeen koko oli 5 A.

Poistamalla pilssipumpusta uloin kuori ja alkuperäinen potkuri saadaan pilssipumpun moottorista sopiva, valmiiksi vedenpitävä moottori. Pilssipumpun moottoria voidaan sopivan potkurin kanssa käyttää mittalaittealustan ajomoottorina. Pilssipumpun moottorit ovat yleisessä käytössä itsetehdyissä sukelluslaitteissa. Potkuriksi valittiin 50 mm halkaisijalla oleva kolmilapainen alumiinipotkuri.

3.2 Servomoottori

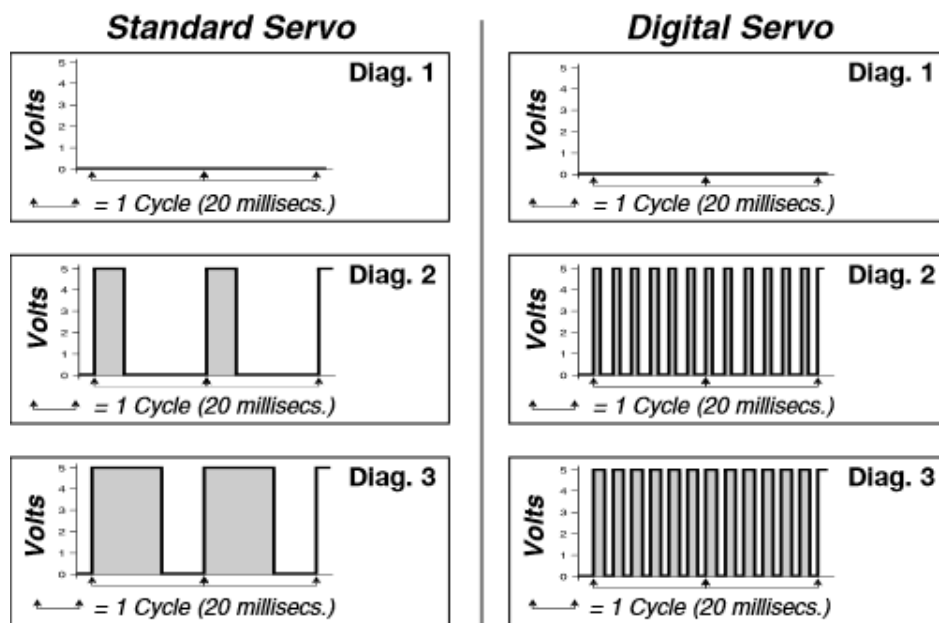
Mittalaittealustaa käännetään servomoottorin avulla. Servomoottori kääntää alustan perässä olevaa peräsiintä, jolloin alusta alkaa kääntyä. Servomoottoriksi valittiin Turnigy 1269HV. Turnigy 1269HV on korkeajännitteinen digitaalinen titaanihammasrattainen servo. Korkeajännitteisyyden ansiosta servomoottori kääntyy nopeammin ja tuottaa paremman vääntömomentin.

Tavallista ja digitaalista servoa ohjataan yleisesti 20 ms välein lähetettävällä 1...2 ms pituisella PWM-ohjaussignaalinalla. Ohjaussignaalin ollessa 1,5 ms pyrkii servomoottori olemaan keskellä liikematkaansa.

Servomoottori tunnistaa akselinsa asennon akseliin kiinnitetyn potentiometrin avulla. Servomoottorissa oleva elektroniikka kääntää servomoottorin akselia 20 ms välein vertailemalla ohjaussignaalia ja potentiometrin arvoa. Jos servomoottorin akseli on kaukana ohjaussignaalin osoittamasta asennosta, kääntää servomoottorin elektroniikka akselia pitkän jännitepulssin avulla. Servomoottorin akselin lähestyessä ohjaussignaalin osoittamaa asentoa jännitepulssi lyhenee. Jännitepulssin lyhenemisestä johtuen servomoottorin vääntömomentti on pieni pienillä ohjausliikkeillä, ja ulkoisen voiman on helppo poikkeuttaa servomoottorin asentoa.

Digitaalisessa servomoottorissa mikroprosessori analysoi ohjaussignaalin ja ohjaa sen perusteella servomoottoria. Mikroprosessorin ansiosta digitaalisen servomoottorin sisäinen taajuus on korkeampi kuin ohjaussignaalin taajuus. Ohjaamalla servomoottoria korkeampitaajuisilla jännitepulssilla saadaan servomoottorista parempi vääntömomentti jo pienillä ohjausliikkeillä.

Digitaalisen servon suurempi vääntömomentti pienillä ohjausliikkeillä lisää servomoottorin tarkkuutta. Näin ollen pieni ulkoinen voima ei pysty poikkeuttamaan servomoottorin asentoa. Kuvassa 3 näkyy tavallisen ja digitaalisen servon jännitepulssit ilman ohjausta, pienellä ohjausliikkeellä sekä suurella ohjausliikkeellä.



Kuva 3. Tavallisen ja digitaalisen servon jännitepulssit [18.]

3.3 Virransyöttö

ArduPilotille ja sen lisälaitteille, kuten telemetriaradiolle, radiovastaanottimelle ja GPS-moduulille, reguloidaan 5,3 V käyttöjännite APM Power Modulen avulla. Ohjausservon korkeampi, 6 V jännite syötetään moottorinohjaimen BEC-piirin (battery eliminator circuit) avulla. Moottorinohjaimella säädetään myös mittalaittealustan nopeutta vaihtelemalla ajomoottorin pyörimisnopeutta. Järjestelmän virtalähteenä toimii LiFePO₄-akku.

Akusto

Mittalaittealustan virtalähteeksi valittiin Zippy FlightMax 8400 mAh LiFePO₄ -akku. Neljäkennoista LiFePO₄-akku voidaan käyttää korvaamaan perinteinen kuusikennoinen lyijyakku. LiFePO₄-akun etuja lyijyakkuun verrattuna ovat sen n. 2,5 kertaa pienempi koko ja massa. Pienemmän fyysisen koon ansiosta mittalaittealustassa voidaan käyttää kapasiteetiltaan suurempaa akku. Nelikennoisia LiFePO₄-akkuja myydään muun muassa moottoripyörien akuiksi. Neljäkennoisen LiFePO₄-akun lepojännite on 12...13,2 V.

APM Power Module

APM Power Module asennetaan suoraan akun ja moottorinohjaimen välille XT60-virtaliittimillä. Kytkeä ArduPilotin ja APM Power Modulen välille toteutetaan 6-pinnisen DF13-kaapelin avulla. Tämän kytkennän avulla APM Power Modulen reguloima käyttöjännite kytketään ArduPilotille ja sen lisälaitteille. DF13-kaapelilla välitetään myös akun jännite- ja virtatiedot. APM Power Module reguloi ArduPilotille 5,3 V jännitteen maksimissaan 18 V akkujännitteestä.

Moottorinohjain

Moottorinohjaimen valinnassa tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja ovat käytettävän moottorin tyyppi – harjaton vai harjallinen, riittävä teho, tulojännitealue ja BEC:n (Battery eliminator circuit) ominaisuudet.

BEC-piirin avulla saadaan jännitteeltään korkeamman pääakun jännite reguloitua sopivaksi käytetyille servoille ja radiovastaanottimelle, jolloin aluksessa voidaan käyttää vain yhtä akkua. BEC-piirit sisältävät usein LVC-ominaisuuden (Low-voltage-cutoff), jonka avulla päämoottorin käyttö estetään, kun riittävän alhainen akkujännite saavutetaan. Päämoottorin käytön estolla voidaan muun muassa estää akun haitallinen ylipurkaminen tai varmistaa, että lentävä alus voidaan turvallisesti ohjata maahan.

ESC:ltä vaadittu tulojännitealue määräytyy käytettävän päämoottorin ja akun mukaan. Käytettävän akun jännite täytyy olla ESC:n tulojännitealueen sisällä, ja päämoottorin täytyy kestää akun maksimijännite.

Mittalaitealustan moottorinohjaimeksi valittiin Castle Creationsin Mamba Max Pro. Se on ohjelmoitava moottorinohjain, jota voidaan käyttää sekä harjattomien että harjallisten moottorien ohjaamiseen. Castle Link USB -liitännän avulla moottorinohjaimelle voidaan ohjelmoida muun muassa erilaisia kaasukäyriä, säätää BEC-jännitettä 5...7 V välillä tai asettaa LVC.

3.4 Yhteydet

Mittalaitealustan käsiohjaukseen käytetään 2,4 GHz radio-ohjainta. Mittalaitealustan ja käyttäjän välinen telemetriayhteys muodostetaan 433 MHz radiolähetin/vastaanottimien avulla. Telemetriayhteyden avulla käyttäjä voi reaaliaikaisesti seurata mittalaitealustan etenemistä tai tehdä muutoksia alustan reittiin. GPS-paikannussignaali vastaanotetaan 3DR:n uBlox-moduulilla, johon on integroitu myös digitaalinen kompassi. Kaikki yhteyslaitteet sijoitetaan veden pinnan yläpuolella olevaan antenniosioon.

Radio-ohjain ja -vastaanotin

Mittalaitealustan radio-ohjaimeksi valittiin Turnigy 9X 9Ch. Turnigy 9X 9Ch on RF9X-V2-lähetinyksiköllä ja LCD-näytöllä varustettu radio-ohjain. LCD-näytöstä voidaan seurata radio-ohjaimen akun jännitettä, ajoaikaa tai ohjaussauvojen asentoa. LCD-näyttöä käytetään myös ohjaimen valikkojen ja asetusten näyttämiseen. Turnigy 9X 9Ch käyttää virtalähteenä kahdeksaa AA-sormiparistoa, mutta paristot voidaan korvata myös sopivalla akulla.

Radiovastaanottimena toimii kahdeksankanavainen Turnigy 9X8C-V2. Vastaanottimen käyttöjännite on 4,5...6,5 V

Telemetriayhteys

Mittalaitelustan telemetriayhteys muodostetaan kaksisuuntaisten 3DR:n valmistamien 433 MHz radiolähetin/vastaanottimien avulla. Telemetriayhteyttä käytetään muun muassa autopilotin reittipisteiden asettamiseen ja lukemiseen, asetusten muuttamiseen ja ajon reaaliaikaiseen seuraamiseen.

GPS-vastaanotin ja kompassi

Ohjausjärjestelmän paikkatieto ja kompassisuunta saadaan 3DR:n valmistaman uBlox-moduulin avulla. Moduulin GPS-vastaanotinpiirinä toimii u-blox LEA-6H, jolla voidaan vastaanottaa myös GLONASS- tai Galileo-paikannussignaalia. Moduulin kompassi on Honeywellin valmistama 3-akselinen magnetometri HMC5883L.

4 OHJAUSJÄRJESTELMÄN TESTAUS

4.1 Moottorin ohjaus

Ennen moottorin ohjauksen testausta täytyi moottorinohjain ohjelmoida. Moottorinohjain asetettiin harjalliselle moottorille sopivaan tilaan ja BEC-jännitteeksi asetettiin 6,0 V. LVC:tä ei asetettu, koska testikytkennän virtalähteenä toimi laboratoriovirtalähde. Virtalähteen jännitteeksi asetettiin 13,6 V.

Moottorin ja sen ohjauksen toimintaa testattiin testikytkennällä, jossa moottori kytkettiin moottorinohjaimen ja moottorinohjain radiovastaanottimeen. Moottorin tehoa ohjattiin radiolähettimen avulla. Vapaasti pyörivä moottori vastasi kaasuun normaalisti, ja molemmat pyörimissuunnat toimivat.

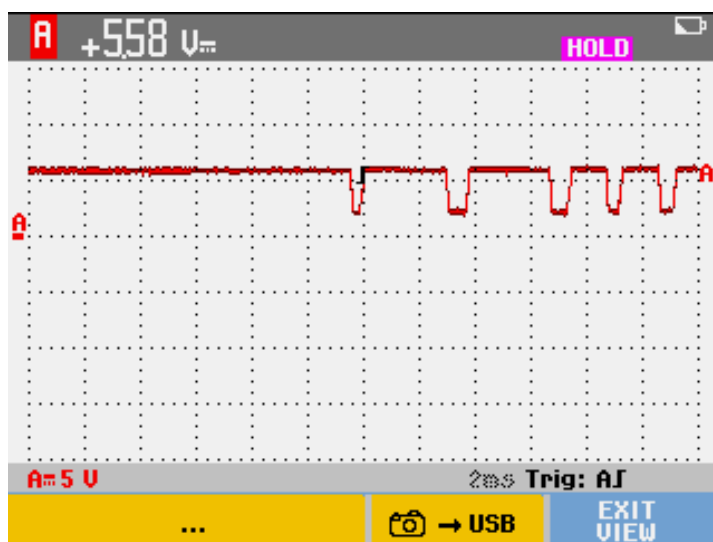
Moottorin kuormitustestiä varten moottoriin kiinnitettiin potkuri ja moottori asetettiin vedellä täytettyyn astiaan. Moottorin virrankulutusta mitattiin yleismittarin avulla. Virtaa mitattaessa havaittiin, että käytössä oleva potkuri kuormittaa moottoria enemmän kuin moottorin toiminta pilssipumppuna. Käytettävän potkurin kanssa moottorin virrankulutus nousi yli neljän ampeerin verrattuna pilssipumpussa ilmoitettuun kolmeen ampeeriin.

Moottorin kuormitusta päätettiin vähentää rajoittamalla moottorin tehonsyöttöä. Moottorinohjain ohjelmoitiin siten, että maksimikaasulla moottorin virrankulutus jäi kolmeen ampeeriin. Pilssipumpulle ilmoitettu sulakkeen koko oli 5 A, mutta tämä rajoitus ei todennäköisesti johdu itse moottorista, vaan pilssipumpun muusta rakenteesta.

4.2 Servomoottori

Seuraavaksi moottorin ohjauksen testikytkentään lisättiin servomoottori. Servomoottoria ohjattaessa servomoottorin liike oli nykivää ja servomoottorin liikkuminen aiheutti toimintahäiriöitä samanaikaisesti pyörivään ajomoottoriin.

Ongelmaa ryhdyttiin selvittämään tarkkailemalla servomoottorin ja radiovastaanottimen käyttöjännitettä eli BEC-jännitettä. BEC-jännitettä mittaamaan asetettiin digitaalinen oskilloskooppi. Mittauksissa havaittiin, että servomoottorin liikuttaminen aiheutti BEC-jännitteeseen äkillisiä alle millisekunnin kestoisia notkahduksia, jolloin jännite putosi kahteen volttiin. Kuvankaappaus BEC-jännitteestä näkyy kuvassa 4.

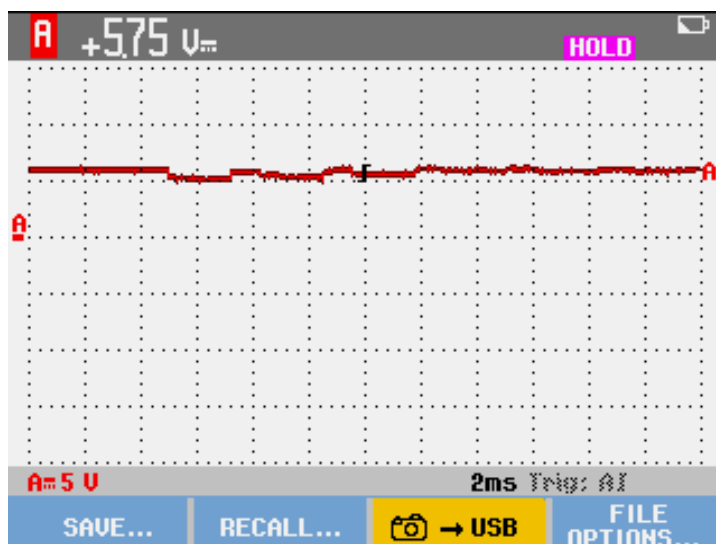


Kuva 4. BEC-jännite servomoottorin liikkeessa

BEC-jännitteen notkahtamisesta johtuen servomoottori ja radiovastaanotin sammuvat hetkeksi, mikä aiheuttaa servon nykimisen ja ajomoottorin toimintahäiriöt.

Lopullisessa versiossa BEC-jännite toimii ainoastaan servomoottorin käyttöjännitteenä ja radiovastaanotin saa käyttöjännitteensä APM Power Modulelta. Tästä huolimatta BEC-jännite täytyy vakavoidsa servomoottorin kunnollisen toiminnan saavuttamiseksi.

Servomoottori ei toimiessaan kuluta tasaisesti virtaa, joten ongelma voitiin ratkaista kytkemällä 10 mF kondensaattori BEC-jännitteeseen. Kondensaattori tasaa servomoottorin käyttöjännitteen ja varautuu hetkinä, jolloin servomoottori ei kuluta virtaa. Kondensaattorin asennuksen jälkeen servomoottoria pystyttiin ohjaamaan jatkuvasti BEC-jännitteen pysyessä lähellä kuutta volttia. Kuvankaappaus BEC-jännitteestä 10 mF kondensaattori asennettuna näkyy kuvassa 5.



Kuva 5. BEC-jännite servomoottorin liikkessa, 10 mF kondensaattori kytkettynä

Lopuksi testikytkentä korvattiin kuvan 2 kytkennällä, jossa ohjaus- ja yhteyslaitteet kiinnitettiin ArduPilot Mega 2.6 -autopilottiin. Ajo- ja servomoottorin toiminta tarkistettiin vielä ArduPilot kytkettynä.

4.3 Yhteydet

Ennen telemetriayhteyden testausta täytyi telemetriaradiot asettaa toimimaan Viestintäviraston määräysten mukaisesti. Käytetyt telemetriaradiot ovat 433 MHz:n taajuudella toimivia luvasta vapautettuja radiolähettä, joiden suurin sallittu efektiivinen lähetysteho on ≤ 25 mW ERP toimintasuhteen ollessa ≤ 10 %. [19, s. 9.]

Telemetrian toimintasuhte ja lähetysteho ovat ohjelmoitavissa Mission Planner -ohjelmistossa olevan terminaalikytkennän avulla. Lähetysteho voidaan valita kahdeksasta eri tehotasosta. Valittavissa olevat tehotasot näkyvät taulukossa 1. Toimintasuhte voidaan valita 10 prosentin askelin väliltä 0...100 %. Toimintasuhteen ollessa 0 % telemetriaradio toimii ainoastaan vastaanottimena. Telemetriaradion toimintasuhteeksi asetettiin 10 %. [20.]

Taulukko 1. 3DR:n 433 MHz:n telemetriaradion tehotasot [21.]

Power (dBm)	Power (milliWatts)
1	1.3
2	1.6
5	3.2
8	6.3
11	12.5
14	25
17	50
20	100

Sallittu lähetystehoraja ilmoitetaan usein joko mW ERP tai mW EIRP. ERP:ssä (Effective Radiated Power) lähetysjärjestelmän tehoa verrataan ideaaliseen puoliaaltodipoliantenniin ja EIRP:ssä (Effective Isotropically Radiated Power) ideaaliseen isotrooppiseen antenniin. Laskiessa lähetysjärjestelmän vastaavaa ERP- tai EIRP-tehoa lähettimen tehon lisäksi joudutaan ottamaan huomioon antennin vahvistus ja mahdollisessa antenninjohdossa tapahtuva vaimennus. [22.]

Mittalaitealustassa telemetriaradion antenni kiinnitetään suoraan telemetriaradioon. Tällöin laskennassa huomioon otettavaksi jäävät lähetysteho ja antennin vahvistus. Telemetriaradion antennin vahvistukseksi on ilmoitettu 2 dBi, joka täytyy muuttaa muotoon dBd ERP-tehon laskemiseksi [23]. Muunnos suoritetaan kaavalla 1, jossa G_T ilmaisee antennin vahvistuksen.

$$G_T(dBd) = G_T(dBi) - 2,15 dB \quad (1)$$

Kaavan avulla vahvistukseksi saadaan

$$G_T(dBd) = 2 (dBi) - 2,15 (dB) = -0,15(dBd)$$

Tuloksen ollessa negatiivinen ilmenee, että ideaaliseen puoliaaltodipoliantenniin verrattuna antenni on hieman vaimentava. Tästä voidaan päätellä, että lähetysteho voidaan asettaa korkeintaan 25 mW:iin. ERP-lähetysteho voidaan laskea kaavalla 2, jossa $P_T(dBm)$ on lähetysteho, $G_T(dBd)$ antennin vahvistus ja $L_C(dB)$ antenninjohdon aiheuttama vaimennus.

$$ERP(dBm) = P_T(dBm) + G_T(dBd) - L_C(dB) \quad (2)$$

Lähetystehoksi asetetaan 25 mW, jota vastaava pyöristetty dBm-luku löytyy taulukosta 1. Laskuissa käytetään kuitenkin tarkempaa dBm-lukua, joka lasketaan kaavalla 3.

$$P_T(\text{dBm}) = 10 * \log_{10}(P_T(\text{mW}) * 1000) \quad (3)$$

Asettamalla lukuarvot paikalleen saadaan tarkemmaksi dBm-luvuksi

$$P_T(\text{dBm}) = 10 * \log_{10}(25 \text{ mW} * 1000) = 13,98 \text{ dBm}$$

Laskettua dBm-lukua käytetään kaavassa 2, jolloin saadaan

$$ERP(\text{dBm}) = 13,98(\text{dBm}) + (-0,15(\text{dBd})) - 0(\text{dB}) = 13,83 \text{ dBm ERP}$$

Lähetysteho muutetaan muotoon mW ERP kaavalla 4.

$$P_T(\text{mW ERP}) = \frac{10^{\frac{P_T(\text{dBm})}{10}}}{1000} \quad (4)$$

Asettamalla lukuarvot kaavaan 4 saadaan lähetystehoksi

$$P_T(\text{mW ERP}) = \frac{10^{\frac{13,83(\text{dBm})}{10}}}{1000} = 24,15 \text{ mW ERP}$$

Telemetriaradion lähetysteho on 24,15 mW ERP ja toimintasuhde 10 %, joten Viestintäviraston asettamat rajat ≤ 25 mW ERP lähetysteholle ja ≤ 10 % toimintasuhteelle eivät ylity.

Mittalaitealustan GPS-moduulin toiminta testattiin laboratoriossa ikkunan läheisyydessä. GPS-moduuli näytti paikkatiedon muutaman metrin tarkkuudella, vaikka moduulilla ei ollut esteetöntä yhteyttä taivaalle. Testissä varmistettiin ainoastaan moduulin toiminta, joten epäsuorasta signaalista johtuvat aikaviiveet ja niistä johtuvat paikannusvirheet eivät olleet oleellisia. GPS-moduulin paikantama sijainti ja kompassin kompassisuunta näkyivät Mission Planner -ohjelmiston kartassa. Paikkatiedot kuten muutkin telemetriatiedot välitettiin maa-asemassa olevalle Mission Planner -ohjelmistolle telemetriayhteyden avulla.

5 ARDUPILOT MEGA 2.6

ArduPilot on vapaaseen lähdekoodiin perustuva autopilot-järjestelmä, jota voidaan käyttää ohjaamaan maalla, vedessä ja ilmassa liikkuvia miehittämättömiä laitteita. ArduPilotia kehittää DIY Drones -yhteisö. ArduPilot Mega 2.6 on Atmelin ATmega2560-mikrokontrolleriin perustuva autopilot-laite. ATmega2560 on 16 MHz:n taajuudella toimiva 8-bittinen RISC-mikrokontrolleri. Ohjelmamuistin määrä on 256 kilotavua. Lokitiedoille muistia on 4 megatavua. ATmega2560 suorittaa ArduPilotin laskennan ja autonomisen ohjauksen. USB-liitännän ohjaukseen käytetään ATmega32U2-mikrokontrolleria. Koteloitu ArduPilot Mega 2.6 näkyy kuvassa 6. [25.][26.][27.]



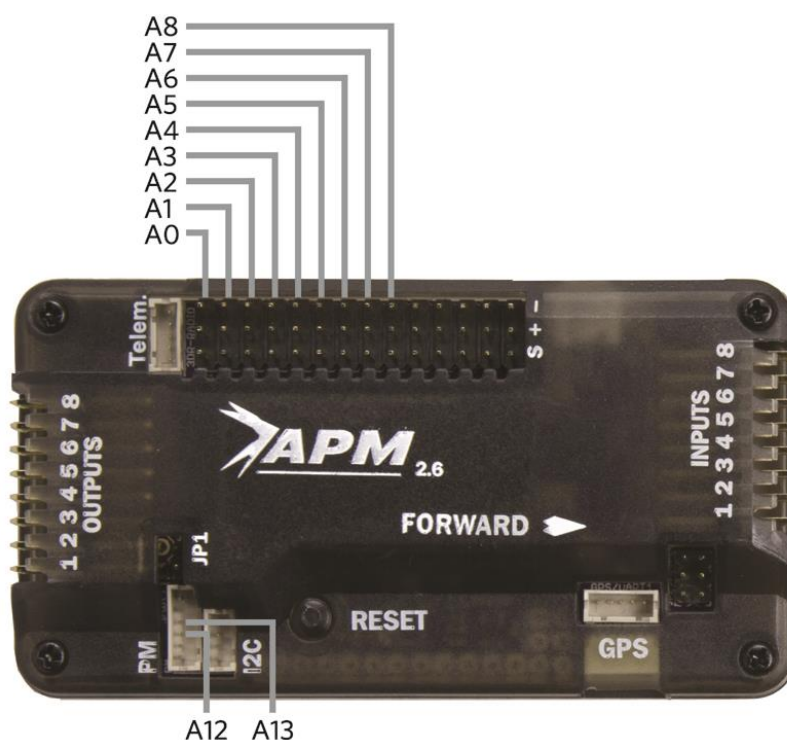
Kuva 6. Koteloitu ArduPilot Mega 2.6 [24.]

5.1 Laitteisto

Tässä osiossa käydään läpi ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin liitännät, väyliä ja muita teknisiä ominaisuuksia.

Analogiset tulot ja digitaaliset lähdöt

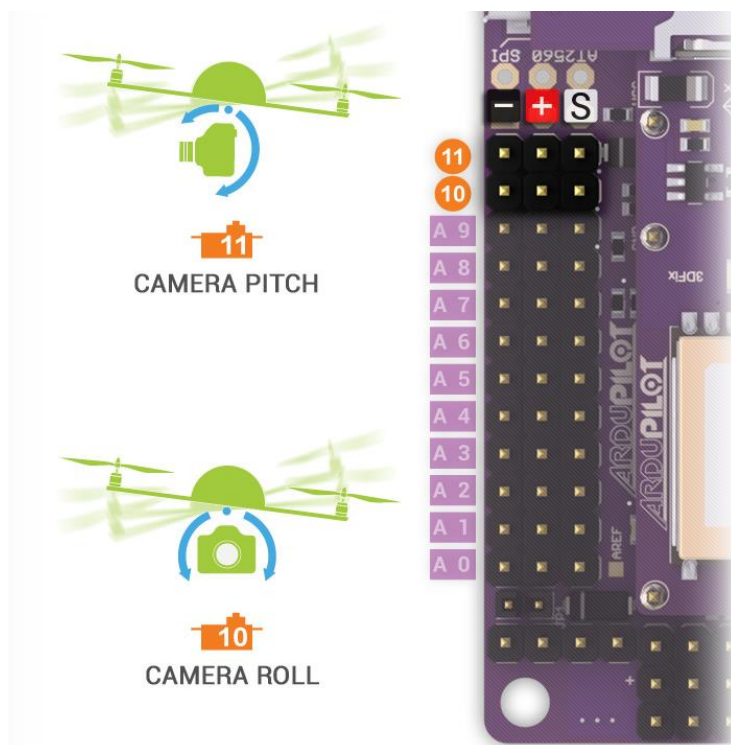
ArduPilot Mega 2.6 sisältää yhdeksän käyttäjän ohjelmitavissa olevaa pinniä, joita voidaan käyttää joko analogisena tulona tai digitaalisena lähtönä. Analogista tuloa voidaan käyttää esimerkiksi analogisen ultraäänianturin etäisyysmittaukseen [28.] Digitaalisilla lähdöillä voidaan ohjata esimerkiksi erilaisia laitteen tilasta ilmoittavia ledejä. Ohjelmitavat pinnit A0...A8 ja pinnit A12 sekä A13 näkyvät kuvassa 7. Pinnit A12 ja A13 ovat analogisia tuloja virta- ja jännitemittauksia varten. [29.]



Kuva 7. ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin analogiset tulot ja digitaaliset lähdöt [29.]

Kameran kauko-ohjaus

ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin pinnejä A9...A11 voidaan käyttää digitaalisen kameran suuntaukseen ja kuvan ottoon. Kamera kiinnitetään erityiseen kehikkoon jota voidaan kääntää servomoottorien avulla. Kameran laukaisijaa ohjataan pinnillä A9. Pinnillä A10 ohjataan kameran kääntämistä ja pinnillä A11 nyökkäämistä. Kameran ohjaus havainnollistuu kuvassa 8. [30.]



Kuva 8. Havainnollistava kuva kameran ohjauksesta [30.]

GPS-portti

ArduPilotin GPS-porttia käytetään ArduPilotin ja GPS-moduulin välisessä tiedonsiirrossa. GPS-portti käyttää yhden ArduPilotin sarjaliikenneporteista. ArduPilotin sarjaliikenne on UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) -tyyppinen. UART-sarjaliikenteessä lähetettävät tavut puretaan ja lähetetään sarjamuotoisesti yksittäisinä bitteinä ilman yhteistä kello-signaalia. Vastaanottajan UART-piiri vastaavasti kokoaa lähetetyistä biteistä tavuja. GPS-portti näkyy kuvassa 6. [31]. [32.]

I2C-väylä

ArduPilotin I2C (Inter-Integrated Circuit) -väylää käytetään sisäisen ilmanpaineanturin ja ulkoisen kompassin tiedonsiirtoon. ArduPilot toimii väylällä vain master-laitteena, eikä ArduPilotin I2C-väylälle voida lisätä muita master-laitteita. ArduPilotin I2C-väylälle voidaan kuitenkin lisätä muita ulkoisia slave-laitteita, kuten antureita tai näyttöjä. I2C-väylän liitäntä näkyy kuvassa 6. [33.]

PWM-liitännät

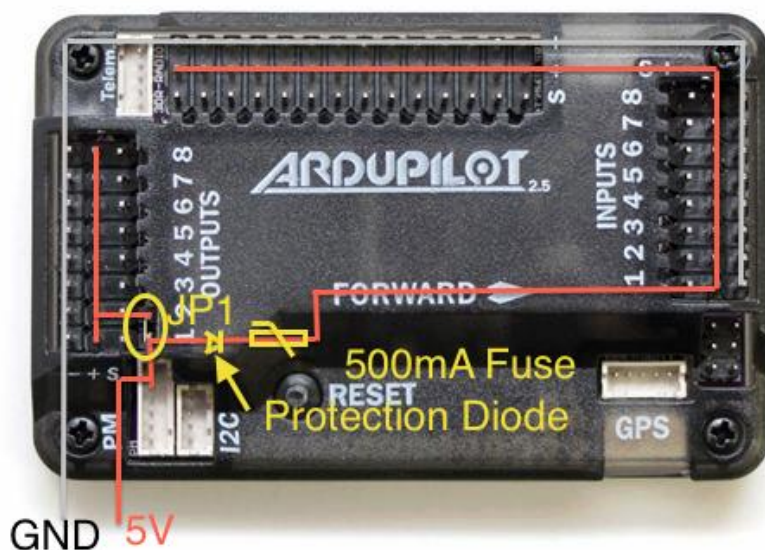
ArduPilot Mega 2.6 sisältää kahdeksan PWM-lähtöä ja kahdeksan PWM-tuloa. PWM-lähtöjen avulla ArduPilot ohjaa servomoottoreita ja moottorinohjaimia. Radiovastaanottimen kukin kanava käyttää yhden PWM-tulon. Esimerkiksi mittalaitealustan kaasun ja peräsimen kääntö tarvitsevat molemmat yhden kanavan. PWM-lähdöt on merkitty ArduPilotin koteloon ”OUTPUTS”, ja tulot ”INPUTS” kts. kuva 6. [34.]

Telemetrialiitäntä

ArduPilotin ja telemetriaradion välinen tiedonsiirto tapahtuu kaksisuuntaisen sarjaliikenneportin avulla. Telemetrialiitäntään voidaan lisätä myös OSD (On-Screen Display) -laite, jolloin telemetriatiedot voidaan yhdistää videokuvaan. Telemetria- ja USB-liitäntä jakavat yhteisen sarjaliikenneportin, jonka vuoksi liitännät eivät voi olla samanaikaisesti käytössä. Telemetrialiitäntä on merkitty ArduPilotin koteloon tekstillä ”Telem.”. Liitäntä näkyy kuvassa 6. [35.][36.][37.]

JP1-oikosulkupala

Oikosulkupala JP1:n avulla ArduPilotin PWM-lähdöt voidaan yhdistää samaan käyttöjännitteeseen ArduPilotin ja muiden laitteiden kanssa. JP1 kytkettynä ArduPilotin käyttöjännite voidaan syöttää PWM-lähdöstä. Poistamalla JP1 voidaan PWM-lähtöihin kiinnitetyille laitteille asettaa erillinen virransyöttö. Mittalaitealustassa oikosulkupala JP1 on irrotettuna, jolloin servomoottori voi käyttää eri käyttöjännitettä kuin ArduPilot ja muut siihen kytketyt laitteet. JP1-oikosulkupalan muodostama piiri näkyy kuvassa 9. [29.]



Kuva 9. Oikosulkupala JP1:n muodostama piiri

USB-liitäntä

ArduPilotin USB-liitäntää käytetään ensisijaisesti ArduPilotin käyttöönotossa, kun ArduPilotiin asennetaan ohjelmisto ja asetetaan asetukset. Kytettäessä USB ArduPilot saa käyttöjännitteen USB-liitännän kautta. Telemetry- ja USB-liitäntä jakavat yhteisen sarjaliikenneportin, jonka vuoksi liitännät eivät voi olla samanaikaisesti käytössä. [29.][35.]

PM-liitäntä

PM (Power Module) -liitännän avulla ArduPilotille voidaan syöttää käyttöjännite ja mitata virrankulutus sekä akkujännite. APM Power Module syöttää PM-liitäntään 5,3 V jännitteen. ArduPilotiin rakennettu jännitesuojaus on toteutettu sulakkeella ja suojadiodilla, joka pudottaa syöttöjännitettä 0,37 V. Suojadiodin jälkeen ArduPilotille saadaan Power Modulelta noin 5 V:n käyttöjännite. PM-liitäntä, sulake ja suojadiodi näkyvät kuvassa 9. Suojadiodi on merkitty kuvaan tekstillä ”Protection Diode” ja sulake ”500mA Fuse”. [29.][38.]

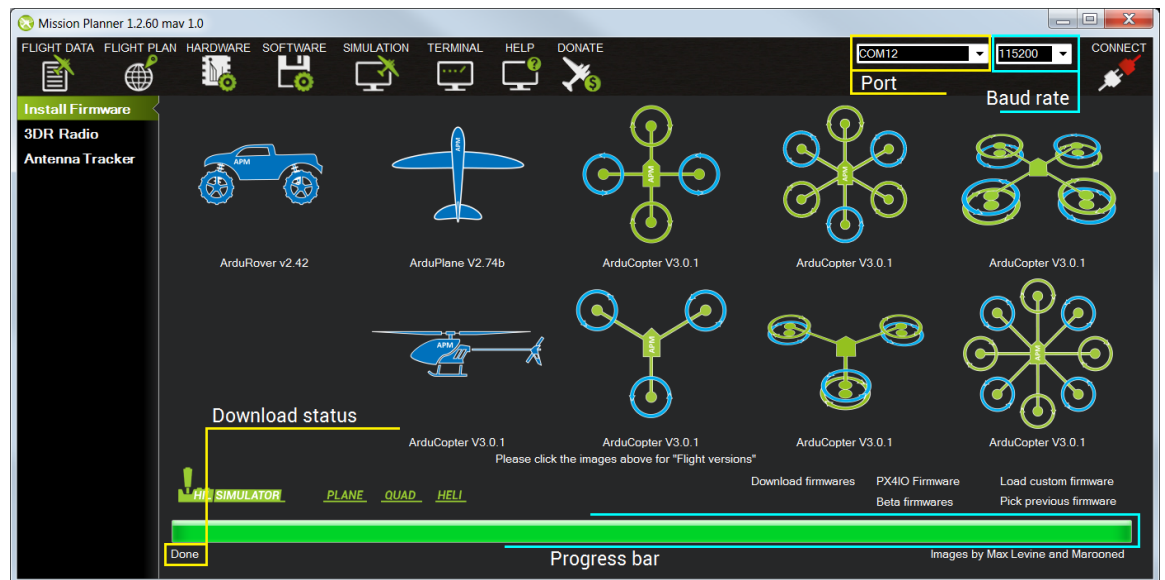
5.2 Ohjelmisto

ArduPilot Mega 2.6 -autopilotin käyttöön tarvittava ohjelmisto koostuu ArduPilotin omasta laiteohjelmistosta ja maa-aseman hallintaohjelmistosta. ArduPilot ohjaa ja navigoi alusta laiteohjelmiston avulla. Hallintaohjelmiston avulla voidaan muun muassa asettaa kulkureittejä ja seurata aluksen etenemistä sekä muuttaa ArduPilotin asetuksia.

Laiteohjelmiston asennus

Laiteohjelmiston versio valitaan käytössä olevan aluksen mukaan. Valmiita laiteohjelmistoja löytyy maa- ja ilma-aluksille. Maa-aluksissa käytettävä laiteohjelmisto on ArduRover ja kiinteäsiipisissä ilma-aluksissa ArduPlane. Helikoptereissa tai moniroottorisissa multikopteri-ilma-aluksissa käytetään ArduCopter-laiteohjelmistoa.

ArduPilotin laiteohjelmisto voidaan ladata Mission Planner -ohjelmiston avulla. Käyttöliittymä laiteohjelmiston valinnasta näkyy kuvassa 10. Laiteohjelmisto asennetaan ArduPilotiin USB-liitännän kautta. Mittalaittealustassa käytetään maa-aluksille tarkoitettua ArduRover-laiteohjelmistoa.



Kuva 10. Laiteohjelmiston valinta Mission Planner -ohjelmistossa [39.]

Ennen kuin alusta voidaan ohjata, täytyy ArduPilot kalibroida radiovastaanottimelle. Kalibroinnilla ArduPilotille opetetaan kunkin kanavan minimi- ja maksimisignaalit. Mittalaitelustan ohjaukseen tarvitaan kolmea kanavaa. Moottorin kaasu ja peräsimen kääntö vievät molemmat yhden kanavan. Kolmannen kanavan avulla vaihdetaan ajotilaa käsi- ja automaattiajon välillä.

Ohjausparametrit

ArduRover-laiteohjelmistoversio tarvitsee navigointia varten kuuden tärkeimmän ohjausparametrin asettamisen. Ohjausparametrit ja niiden selitteet näkyvät taulukossa 2.

Taulukko 2. Tärkeimmät ohjausparametrit [40.]

Parametri	Selite
STEER2SRV_P	Kääntöympyrän halkaisija
TURN_MAX_G	Maksimikiihtyvyys kaarteessa
NAVL1_PERIOD	Ohjaustiheys
SPEED_TURN_GAIN	Kaarrenopeus
CRUISE_SPEED	Ajonopeus
CRUISE_THROTTLE	Kaasun asento ajossa

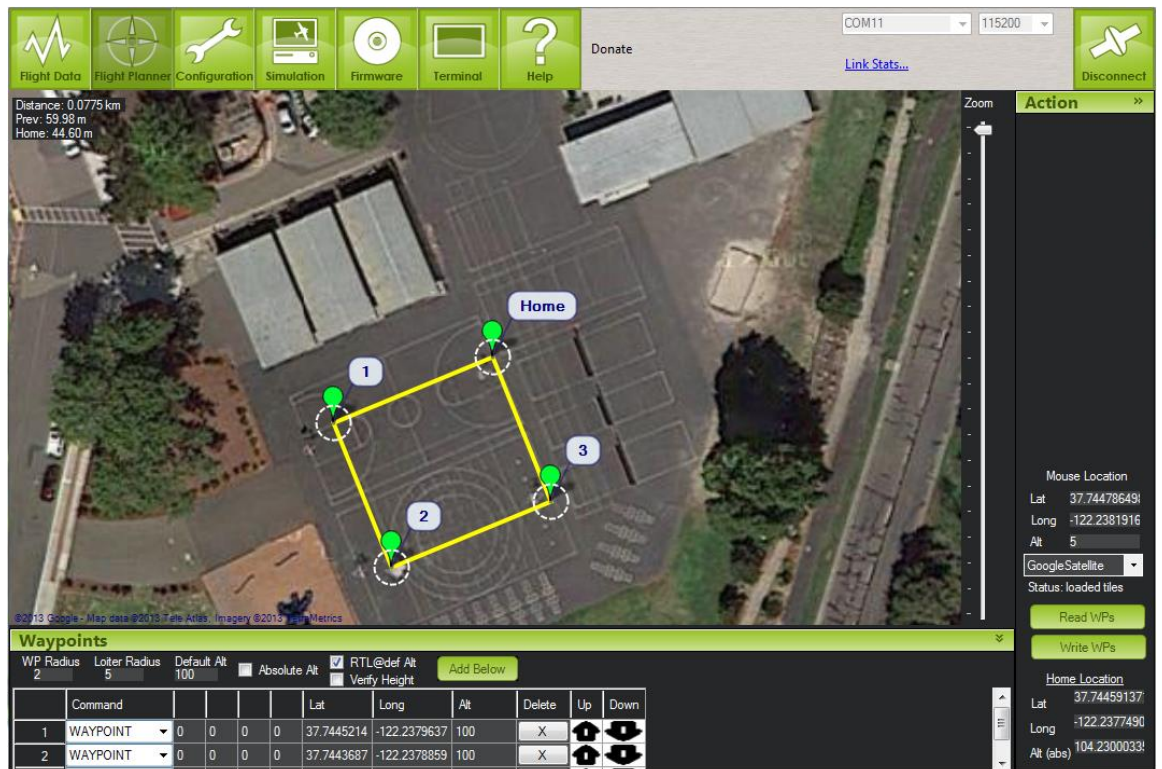
Kääntöympyrän halkaisija mitataan ajamalla aluksella hitaasti ympyrä käännön ollessa ääriasennossa. ArduPilot laskee navigoidessaan tarvittavan kääntökulman kääntöympyrän halkaisijan avulla. Kaarteen maksimikiihtyvyys ilmoittaa ArduPilotille suurimman sallitun kiihtyvyyden käännettäessä. Arvon ollessa liian suuri voi maa-alus kierähtää ympäri tai lähteä luistoon. Liian pienellä arvolla alus ei käänny riittävän terävästi, jolloin ohjaustarkkuutta menetetään. [40.]

Ohjaustiheys-parametri määrittää, kuinka usein ArduPilot tekee uuden ohjausliikkeen. Arvon ollessa pieni ArduPilot tekee ohjausliikkeitä lyhyen ajan välein. Liian suuri arvo vähentää tarkkuutta reitin suorituksesta. Liian pienellä arvolla ArduPilot tekee myös turhia ohjausliikkeitä. [40.]

Kaarrenopeus-parametri määrittää, kuinka paljon nopeutta pudotetaan kaarteesta. Kaarreno-
peuden ollessa maksimiarvossa alus ajaa kaarteessa samaa nopeutta kuin suoralla. Ajonopeus on reittiä suoritettaessa käytettävä ajonopeus ajettaessa suoraan. Kaasun asento ajossa -parametrin avulla ArduPilotille opetetaan kaasun asento, jolla haluttu ajonopeus saavutetaan. [40.]

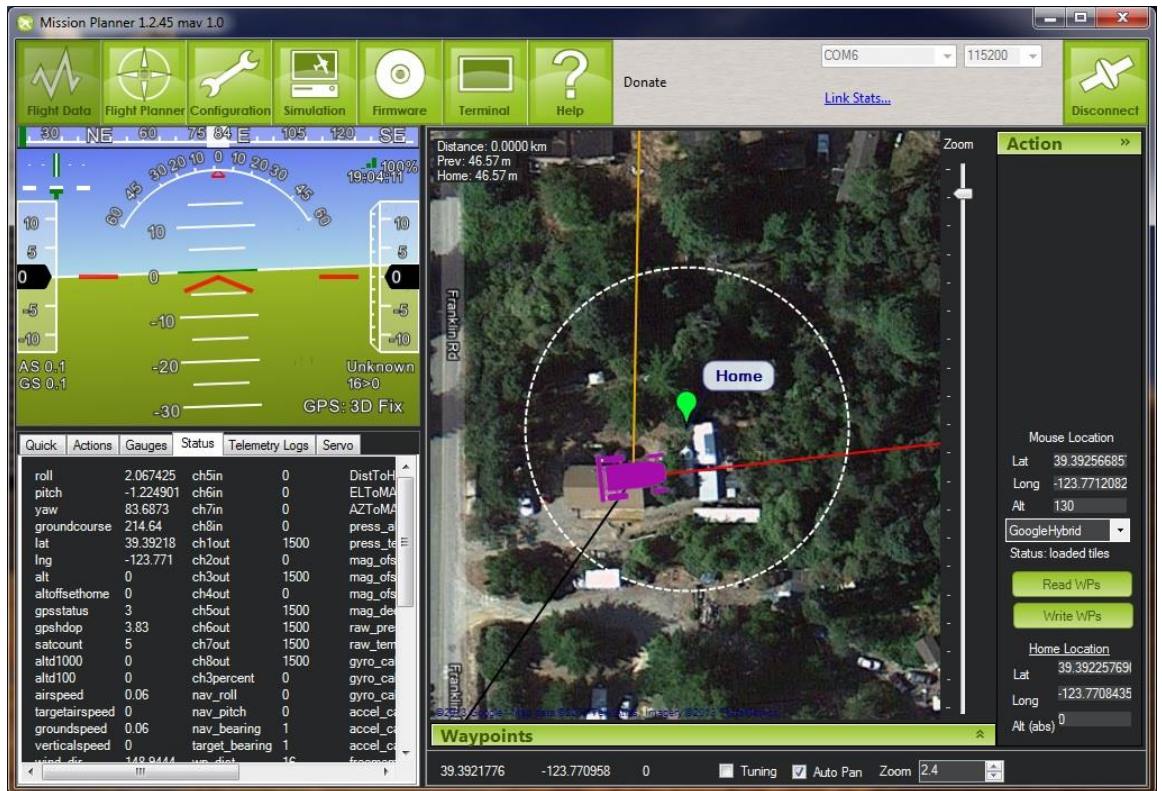
Reitin suunnittelu ja toteutus

Mission Planner -ohjelmistolla voidaan suunnitella alukselle reittiä myös ilman yhteyttä ArduPilotiin. Reittipisteitä voidaan asettaa kartalle yksinkertaisesti osoittamalla ja klikkaamalla haluttua kohtaa kartasta. Reittipisteille asettuu automaattisesti kartan pistettä vastaavat GPS-koordinaatit, joita ArduPilot navigoidessaan seuraa. Ilma-aluksille voidaan asettaa myös reittipisteen lentokorkeus. Valmis reitti voidaan lähettää ArduPilotille joko telemetriayhteyden tai USB-liitännän kautta. Neljä reittipistettä sisältävä reitti näkyy kuvassa 11. [41.]



Kuva 11. Neljä reittipistettä sisältävä reitti Mission Planner -ohjelmistossa [41.]

ArduPilot aloittaa reitin suorituksen, kun ajotilaksi asetetaan automaattiajo. Aluksen etene- mistä voidaan seurata Mission Planner -ohjelmistosta. ArduPilot lähettää jatkuvasti telemet- riatietoja, joista voidaan seurata esimerkiksi aluksen suuntaa, nopeutta, telemetria- tai GPS- yhteyden tilannetta tai akkujännitettä. Näkymä maa-aluksen seurannasta näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Näkymä maa-aluksen seurannasta Mission Planner -ohjelmistossa [42.]

Lokitiedot

ArduPilotin suorittaessa reittiä kerätään ajosta tietoja kahteen erilliseen lokitiedostoon. Telemetrialoki on maa-asemassa sijaitseva loki, jonne Mission Planner tallentaa kaikki reitin suorituksen aikana lähetetyt telemetriatiedot. Dataflash-loki on ArduPilotin sisäiselle neljän megatavun lokimuistille kirjoitettu loki. [43.]

Lokien avulla suoritettu reitti voidaan näyttää jälkikäteen uudelleen samalla tavalla kuin reaaliaikaisessa reitin seurannassa. Lokitiedostoja toistettaessa voidaan esimerkiksi keskittyä turvallisesti jonkin erityisen parametrin tarkkailuun. Kuvassa 13 tarkastellaan aluksen kallistumista ja nyökkäämistä reitin suorituksen aikana. [43.]



Kuva 13. Aluksen kallistuminen ja nyökkäminen lokitiedoston toistossa [43.]

6 YHTEENVETO

Insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin ohjausjärjestelmä autonomiselle vesimittalaitealustalle. Ohjausjärjestelmän osien valinnassa täytyi etukäteen ottaa huomioon kaikkien osien keskenään yhteensopivuus. Mittalaitealustaan sopivan vedenpitävän moottorin ja sille sopivan moottorinohjaimen löytäminen osoittautui haasteelliseksi. Harjallisille moottoreille tarkoitettuja moottorinohjaimia löytyi useita, mutta näissä oli usein liian pieni tulojännitealue. Sopiva moottorinohjain kuitenkin löytyi, jolloin loput ohjausjärjestelmän osat voitiin valita.

Ohjausjärjestelmän testauksessa havaittiin, että mittalaitealustan peräsimen kääntöön käytetty servomoottori aiheutti BEC-jännitteen romahtamisen servoa käytettäessä. Ongelman syy selvisi kuitenkin nopeasti tarkkailemalla BEC-jännitettä oskilloskoopilla. Ongelma ratkaistiin asentamalla kondensaattori tasaamaan servomoottorin tarvitsemat virtapiikit.

Mittalaitealustan telemetriayhteyden testauksessa otettiin viranomaismääräykset huomioon. Telemetriaradioiden lähetystehot laskettiin määräystä vastaavalla tavalla ja asetettiin sallitulle tasolle. Myös telemetriaradioiden toimintasuhteet tarkastettiin ja asetettiin.

Työtä tehdessä perehdyttiin autonomisiin miehittämättömiin maa-, ilma- ja vesialuksiin sekä niissä käytettyihin teknologioihin. Mittalaitealustan autonomisuudesta vastaavaan ArduPilot 2.6 -autopilotjärjestelmän toimintaan perehdyttiin erityisesti.

Mittalaitealustan ohjausjärjestelmä saatiin niiltä osin valmiiksi kuin laboratorio-olosuhteissa on mahdollista. Seuraavassa vaiheessa aloitetaan mittalaitealustan kenttätestaus ja mittalaitteiden suunnittelu sekä toteutus.

LÄHTEET

1. National Oceanic and Atmospheric Administration. What Are AUVs, and Why Do We Use Them?. 2008. <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/background/auvs/auvs.html> (Luettu 16.3.2014)
2. SP's Naval Forces. Striking Stealthily From the Deep. [WWW-dokumentti] <http://www.spsnavalforces.com/story.asp?mid=27&id=5> (Luettu 16.3.2014)
3. ACSA. What is an underwater glider? [WWW-dokumentti] <http://www.acsa-alcen.com/what-underwater-glider> (Luettu 16.3.2014)
4. Autonomous Undersea Vehicle Applications Center. Underwater Gliders for Ocean Research. [PDF-dokumentti] http://auvac.com/uploads/publication_pdf/mts_glider.pdf (Luettu 16.3.2014)
5. Chatre, E. & Hegarty, C.J. Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS). 2008. [WWW-dokumentti] https://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc12/jproc-CHegarty-2006090/article.html (Luettu 16.3.2014)
6. Austin, T., Merchant, T. & Vaganay, J. AUV Navigation. [WWW-dokumentti] <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/logs/may15/may15.html> (Luettu 16.3.2014)
7. Forsvarets forskningsinstitut (FFI). Introduction to Inertial Navigation. [PDF-dokumentti] http://www.navlab.net/Publications/Introduction_to_Inertial_Navigation.pdf (Luettu 16.3.2014)
8. Garmin. What is GPS?. [WWW-dokumentti] <http://www8.garmin.com/aboutGPS/> (Luettu 16.3.2014)
9. Geodeettinen laitos. GPS:n mittausmoodit ja tarkkuus. [PDF-dokumentti] <http://pru-jut.files.wordpress.com/2010/05/09-mittausmoodit.pdf> (Luettu 16.3.2014)
10. Liikennevirasto. DGPS kuuluvuus. [PDF-dokumentti] http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/ammattiliikenteen_palvelut/liikkuminen_vesivaylilla/radionavigointi/DGPS_kuuluvuus.pdf (Luettu 16.3.2014)
11. Liikennevirasto. Radionavigaatiopalvelut. [WWW-dokumentti] http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/ammattiliikenteen_palvelut/liikkuminen_vesivaylilla/radionavigointi (Luettu 16.3.2014)
12. Tötterström, S. GPS RTK-Network ja virtuaalituokiasema (VRS). [PDF-dokumentti] http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk500/mk500_387_totterstrom.pdf (Luettu 16.3.2014)
13. Vainio, J. & Lumiaro, R. Lämpötila-suolaisuus- eli CTD-luotain. [WWW-dokumentti] http://www.itameriportaali.fi/fi/tutkimus/tutk_menetelmat/fi_FI/ctd/ (Luettu 29.3.2014)

14. Exowater. EXO Water Quality Sensors. [WWW-dokumentti] <http://www.exowater.com/sensors> (Luettu 29.3.2014)
15. Ysisystems. EcoMapper. [WWW-dokumentti] <http://www.ysisystems.com/systems-detail.php?EcoMapper-1> (Luettu 29.3.2014)
16. U.S. Geological Survey. [WWW-dokumentti] <http://water.usgs.gov/edu/turbidity.html> (Luettu 29.3.2014)
17. Kairesalo, T., Ketola, M. & Kuoppamäki, K. Vesijärven automaattiasemien vertailunäytteenotto. 2012. [PDF-dokumentti] http://www.puhdasvesijarvi.fi/easydata/customers/puhdasvesijarvi/files/vesijarven_tila/raportit_katsaukset/kalibrointiraportti2010-2011.pdf (Luettu 29.3.2014)
18. Futaba. Digital servos. [PDF-dokumentti] <http://www.futaba-rc.com/servos/digital-servos.pdf> (Luettu 16.3.2014)
19. Viestintävirasto. Määräys luvasta vapaiden radiolähettimien yhteistajuuksista ja käytöstä. 2013. [PDF-dokumentti] <https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Viestintavirasto15AF2013M.PDF> (Luettu 6.4.2014)
20. DIY Drones community. Duty Cycle setting. [WWW-dokumentti] http://copter.ardupilot.com/wiki/common-using-the-3dr-radio-for-telemetry-with-apm-and-px4/#Duty_Cycle_setting (Luettu 6.4.2014)
21. DIY Drones community. Power Levels. [WWW-dokumentti] http://copter.ardupilot.com/wiki/common-using-the-3dr-radio-for-telemetry-with-apm-and-px4/#Power_levels (Luettu 6.4.2014)
22. Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology Laboratory Division. Determining ERP and ERIP. [WWW-dokumentti] <https://apps.fcc.gov/eas/comments/GetPublishedDocument.html?id=204&tn=255011> (Luettu 9.4.2014)
23. 3DRobotics. Antenna 433MHz RP-SMA 2dBi. [WWW-dokumentti] <http://store.3drobotics.com/products/antenna-433mhz-rp-sma-2dbi> (Luettu 9.4.2014)
24. 3DRobotics. APM 2.6 Set. [WWW-dokumentti] <http://store.3drobotics.com/products/apm-2-6-kit-1> (Luettu 12.4.2014)
25. ArduPilot. Welcome to the ArduPilot/APM development site. [WWW-dokumentti] <http://dev.ardupilot.com/> (Luettu 12.4.2013)
26. Atmel. ATmega2560. [WWW-dokumentti] <http://www.atmel.com/devices/atmega2560.aspx> (Luettu 12.4.2014)
27. Atmel. ATmega32U2. [WWW-dokumentti] <http://www.atmel.com/devices/atmega32u2.aspx> (Luettu 12.4.2014)
28. DIY Drones community. SONAR. [WWW-dokumentti] <http://copter.ardupilot.com/wiki/sonar/> (Luettu 13.4.2014)

29. DIY Drones community. APM 2.5 and 2.6 Overview. [WWW-dokumentti] <http://rover.ardupilot.com/wiki/common-25-and-26-overview/> (Luettu 13.4.2014)
30. DIY Drones community. ArduPilot instructional graphics source. [WWW-dokumentti] <http://dev.ardupilot.com/wiki/graphics-resource-page/> (Luettu 13.4.2014)
31. u-blox. LEA-6 series. [PDF-dokumentti] http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/LEA-6_ProductSummary_%28GPS.G6-HW-09002%29.pdf (Luettu 13.4.2014)
32. Durda, F. Serial and UART Tutorial. [WWW-dokumentti] <https://www.freebsd.org/doc/en/articles/serial-uart/> (Luettu 13.4.2014)
33. DIY Drones community. I2C. [WWW-dokumentti] <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/I2C> (Luettu 13.4.2014)
34. DIY Drones community. APM board connections. [WWW-dokumentti] <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-25-board-connections/> (Luettu 13.4.2014)
35. DIY Drones community. Connecting your 3DR Radios. [WWW-dokumentti] http://copter.ardupilot.com/wiki/common-using-the-3dr-radio-for-telemetry-with-25-and-px4/#Connecting_your_3DR_Radios (14.4.2014)
36. 3DRobotics. 3DR RADIO V2 QUICK START GUIDE. [PDF-dokumentti] <http://3drobotics.com/wp-content/uploads/2013/10/3DR-Radio-V2-doc1.pdf> (Luettu 14.4.2014)
37. DIY Drones community. Using an On Screen Display Board with your FPV System. [WWW-dokumentti] <http://copter.ardupilot.com/wiki/common-on-screen-display-for-fpv/> (Luettu 14.4.2014)
38. DIY Drones community. Power Module set-up to measure battery voltage and current consumption. [WWW-dokumentti] <http://plane.ardupilot.com/wiki/common-measuring-battery-voltage-and-current-consumption-with-25/> (Luettu 14.4.2014)
39. DIY Drones community. Loading Firmware onto APM. [WWW-dokumentti] <http://copter.ardupilot.com/wiki/initial-setup/common-load-firmware-25/> (Luettu 15.4.2014)
40. DIY Drones community. Tuning steering and navigation for a Rover. [WWW-dokumentti] <http://rover.ardupilot.com/wiki/tuning-steering-and-navigation-for-a-rover/> (Luettu 15.4.2014)
41. DIY Drones community. Rover Setup for APM 2.5 autopilot. [WWW-dokumentti] <http://rover.ardupilot.com/wiki/mission-planning/> (Luettu 15.4.2014)
42. DIY Drones community. PX4 Firmware Installation Using Mission Planner [WWW-dokumentti] <http://rover.ardupilot.com/wiki/px4-firmware-installation/> (Luettu 15.4.2014)

43. DIY Drones community. Mission Planner Telemetry Logs [WWW-dokumentti]
<http://rover.ardupilot.com/wiki/common-mission-planner-telemetry-logs/#Creating-3d-images-of-the-flight-path> (Luettu 15.4.2014)