



**KATSAUS DRONEEN JA AVOIMEN LÄHDEKODIN DRONE PROJEKTEIHIN
VUONNA 2022**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Mikael Forss

Tarkastaja: Nuorempi tutkija Jesse Tolvanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Mikael Forss

Katsaus droneen ja avoimen lähdekoodin drone projekteihin vuonna 2022

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

33 sivua, 6 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Nuorempi tutkija Jesse Tolvanen

Avainsanat: drone, avoimen lähdekoodin drone projekti, dronen käyttötarkoitus, dronen rakenne

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mihin dronea pystyy käyttämään vuonna 2022 ja mistä osista drone koostuu. Tämän jälkeen selvitettiin mikä on avoimen lähdekoodin drone projektien taso vuonna 2022 ja minkälaisia droneja niillä voi tehdä. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena käyttäen aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita ja aiheeseen liittyviä verkkosivuja.

Dronen käyttötarkoituksissa katsottiin mihin dronea käytettiin armeijassa, kaupallisella sektorilla ja yksityiskäytössä. Tämän jälkeen selvitettiin mistä osista harraste käyttöön tarkoitettu drone koostui. Viimeiseksi käytiin läpi muutama avoimen lähdekoodin drone projekti ja tutkittiin laajemmin mihin ArduPilot projekti pystyi.

Tutkimuksessa päästiin siihen tulokseen, että droneja pystyy vuonna 2022 käyttämään monenlaisiin eri tarkoituksiin. Avoimen lähdekoodin drone projektien toiminnallisuuden tasosta todettiin, että se on vuonna 2022 hyvin kattava. Niillä voi tehdä monia eri käyttötarkoitukseen tarkoitettuja droneja eikä niiden käyttö rajoitu vain droneihin. Niiden toiminnallisuuden taso tulee myös vain kasvamaan koska niitä on ruvettu käyttämään paljon kaupallisissa droneissa, jolloin niiden kehitys lisääntyy.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Mikael Forss

Review of drone and open-source drone projects in year 2022

Bachelor's thesis

2022

33 pages, 6 figures and 1 table

Examiner: Junior researcher Jesse Tolvanen

Keywords: drone, open-source drone project, drone usage, drone structure

This study's goal was to determine what you can use drones for, what parts the drone consists of and what is the state of open-source drone projects in 2022. The study was conducted as a literature review. Sources for the study were literature of the research topic, scientific articles, and web pages about the research topic.

In the study it was examined what kind of use cases for the drone were in the army, commercial and private use. After that it was studied what parts a hobby drone consists of and after that it was studied what kind of open-source drone projects are available and what kind of drones can be done with them. One of the studied open-source drone projects was studied more closely.

In this study it was determined that drones can be used in a wide variety of use cases in 2022. The state of open-source drone projects in 2022 was very comprehensive. With open-source drone projects you can make a wide variety of different drones and other vehicles. Because they are open source their functionality will increase in the future as they are developed more.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

FPV	Ensimmäisen persoonan näkymä (First Person View)
VR-lasit	Virtuaalitodellisuuslasit (Virtual Reality glasses)
RC	Kauko-ohjaus (Radio-control)
VTX	Videolähetin (Video Transmitter)
VTOL	Pystysuoraan nouseva ja laskeutuva (Vertical Take-off and Landing)
ROV	Kauko-ohjattava ajoneuvo (Remotely Operated Vehicle)
R&D	Tutkimus ja tuotekehitys (Research and Development)
GPS	Satelliittipaikannusjärjestelmä (Global Positioning System)
BSD	Berkeleyn ohjelmiston jakelu (Berkeley Software Distribution)
GPL	Yleinen julkinen lisenssi (General Public License)
GCS	Maaohjausasema (Ground Control Station)
SITL	Ohjelmisto silmukassa (Software In The Loop)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Drone.....	9
2.1	Taustaa	9
2.2	Dronejen käyttötarkoituksia	10
2.2.1	Armeija	10
2.2.2	Kaupallinen.....	11
2.2.3	Yksityinen	12
3	Dronen rakenne	13
3.1	Rakennekomponentit.....	13
3.2	Aktiiviset komponentit.....	14
3.3	Komento ja mittaus komponentit.....	15
3.3.1	Lennonohjain.....	16
3.3.2	RC-moduuli.....	17
3.4	Tehokomponentit	17
3.5	Lisäkomponentit.....	17
3.5.1	Kamera ja video lähetin.....	17
3.5.2	Gps	18
4	Avoimen lähdekoodin projektit	19
4.1	Taustaa	19
4.2	Avoimen lähdekoodin projekteja.....	20
4.2.1	PX4.....	20
4.2.2	BetaFlight	21
4.2.3	CleanFlight.....	21
4.2.4	LibrePilot	21
4.3	ArduPilot	21
4.3.1	Käyttökohteet	22
4.3.2	Simulointi	24

5	Johtopäätökset.....	26
	Lähteet	28

1 Johdanto

Dronejen käyttö yritys- ja yksityiskäytössä on kasvanut viime vuosien aikana hyvin paljon. Droneja voidaan käyttää monenlaisiin eri tarkoituksiin. Yrityskäytössä droneja voidaan käyttää esimerkiksi erilaisten tapahtumien kuvaamiseen tai tavaroiden kuljetukseen lyhyiden matkojen päähän, kuten ”Zipline” yritys on tehnyt Luoteis-Arkansasissa. (”Walmart Autonomous Drone Delivery Takes Flight in Northwest Arkansas”, 2021) Yksityiskäytössä droneja voidaan käyttää esimerkiksi valokuvaamiseen ilmasta käsin (*Camera Drones*, 2022) tai droneilla kilpa-lentämiseen. (*ABOUT DRL / The Drone Racing League*, 2022)

Dronen yksityiskäyttöön voi hankkia joko valmiina dronena kaupasta tai sen voi rakentaa itse käyttäen kaupassa myytävää rakennus sarjaa tai rakentaa sen kokonaan itse. Valmiina myydyissä droneissa on yleensä valmistajan antama takuu, joka takaa, että jos droneen tulee valmistuksessa tulleita vikoja valmistaja joko korjaa kyseisen dronen tai antaa uuden tilalle. (*After-Sales Service Policy - DJI*, 2022) Näissä droneissa ei ole kovin paljon varaa itse käyttäjän tehdä muokkauksia dronen rakenteeseen ja niiden käyttöjärjestelmissä voi olla valmistajan asettamia rajoituksia. Tästä esimerkkinä on DJI, joka on yrittänyt estää kuluttajia muokkaamasta DJI dronejen ohjelmistoa. (Sullivan, 2017) Jos dronea haluaa muokata itse vapaasti, tarvitsee ostaa drone rakennussarjana, joka on tarkoitettu harrastekäyttöön tai rakentaa drone alusta alkaen itse. Rakennussarjana myytävää dronea voi itse paljon vapaammin muokata kuin valmiina myytävää mutta se on vielä kohtuullisen helppo tehdä valmiiksi ilman suurta elektroniikan tietotaitoa. Tästä on esimerkkinä QWinOut:n dronen rakennussarja, jota myydään verkkokauppa Amazonissa. Kyseisessä rakennus sarjassa tulee mukana kaikki osat droneen pois lukien akku, lähetin ja vastaanotin. Rakennussarja sisältää myös ohjeet dronen rakentamiseen. (*QWinOut F550 Airframe RC Hexacopter Drone Kit DIY PNF Unassembly Combo Set with Kkmulticopter Flight Controller for Beginners (No Battery and Remote Controller) : Toys & Games*, 2022) Jos haluaa muokata aivan kaikkea dronessa sen rakenteesta ohjelmistoon kannattaa silloin rakentaa drone kokonaan itse ja hyödyntää avoimen lähdekoodin drone projekteja.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää mikä on avoimen lähdekoodin drone projektien toiminnallinen taso vuonna 2022. Tutkimus aloitetaan selvittämällä ensiksi mikä on drone, mihin sitä voi käyttää ja mitkä ovat sen rakenteen eri osa alueet. Dronen rakenteen osa alueista selvitetään mikä on niiden tarkoitus dronen toiminnan kannalta. Kun nämä ovat selvitetty tutkitaan minkälaisen dronen pystyy avoimen lähdekoodin projektilla tekemään. Tutkimus suoritetaan kirjallisena katsauksena käyttäen hyväksi tieteellisiä julkaisuja ja artikkeleita. Lähteinä käytetään myös verkkojulkaisuja ja harraste blogeja. Avoimen lähdekoodin projektien tutkimiseen käytetään internetistä löytyviä projekteja.

Tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä on drone
- Mihin dronea voi käyttää
- Mistä osa-alueista dronen rakenne koostuu
- Mikä on jokaisen osa-alueen tehtävä dronen toimivuuden kannalta
- Minkälaisia droneja pystyy avoimen lähdekoodin projekteilla tekemään

2 Drone

Sana ”drone” on yleisesti käytetty termi miehittämättömälle ilma-alukselle. Droneinfo sivuston mukaan drone voi olla joko moniroottorinen, multikopteri tai kiinteäsiipinen. Kiinteäsiipinen drone on lentokoneen kaltainen alus, jossa ei ole lentäjää. Moniroottorinen drone toimii kuten helikopteri, jossa työntö- ja nostovoima tuotetaan potkurilla. (*Drone ja sen toiminnot – miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien yleistuntemus*, 2022) Yksi esimerkki moniroottorisesta dronesta on kuvan 2.1 kauko-ohjattava drone. Seuraavaksi tutkitaan mistä dronen kehitys on lähtenyt liikkeelle ja mihin dronea voi nykypäivänä käyttää.



Kuva 1. Kauko-ohjattava drone (Bucco-Lechat, 2013)

2.1 Taustaa

Drone on kehitetty alun perin pelkästään armeijan käyttöön, niin kuin moni muukin teknologia oli alun perin kehitetty, joista esimerkkeinä ovat tietokone ja lentokone. (Adam Rothstein, 2015) Armeijassa dronejen tarkoitus pääsääntöisesti oli tehdä tiedustelu lentoja vihollisten linjojen taakse, kouluttaa pilotteja ja tehdä ohjusiskuja hyökkäyskohteisiin. (*Ethics of Drone Strikes*, 2022; Singh ym., 2019) Kun droneja alkoi tulla kaupalliseen ja yksityiseen käyttöön, oli niiden käyttötarkoitus jotakuinkin sama kuin armeija käytössä. Kaupallisella tai yksityisellä dronella voi tehdä tiedustelua, joista esimerkkeinä on valokuvaus tai

oman tontin valvonta. Dronejen kehitys jatkuu näihin tarkoituksiin niin kauan kunnes armeija ei ole enää suurin dronejen käyttäjä. (Adam Rothstein, 2015)

Dronejen kehitys muuhun kuin armeijan käyttöön näkyy nykyään niiden suuressa käytössä viihde alalla. Droneja käytetään paljon nykyään elokuvien kuvaamiseen ja urheilutapahtumien uutisointiin. (Intelligence, 2021) Dronen käyttö yksityiskäytössä on myös lisääntynyt paljon. Tämä johtuu siitä, että moni yksityishenkilö haluaa käyttää dronea kuvaus tarkoituksiin. (*Global Consumer Drones Market Report 2021*, 2021)

Seuraavaksi tutkitaan mihin tarkoituksiin droneja käytetään milläkin käyttö sektorilla.

2.2 Dronejen käyttötarkoituksia

Drone-markkinoilla suurin dronejen käyttäjä on armeija, joka on ennustettu olevan vuonna 2022 noin 55 % koko drone-markkinoista. (Fact.MR ,2022) Muita dronen käyttö sektoreita ovat kaupallinen ja yksityinen käyttö. Käydään sektoreittain läpi mihin droneja käytetään niissä.

2.2.1 Armeija

Vaikka armeija on dronejen suurin käyttäjä, ei dronelle ole tällä hetkellä siellä yhtä monipuolisia käyttötarkoituksia kuin muilla sektoreilla. Seuraavaksi käydään läpi muutamia dronen yleisimpiä käyttökohteita armeijassa.

Droneja käytetään armeijassa tiedusteluun (Singh ym., 2019), koska ne sopivat hyvin siihen tarkoitukseen niiden pienen koon ansiosta verrattuna ilma-aluksiin joihin ihminen mahtuu sisälle ohjaamaan. Tämän ansiosta drone pääsee ahtaisiin paikkoihin ja on myös vaikeampi huomata paljaalla silmällä. Drone voidaan myös ohjelmoida lentämään tiettyä reittiä automatisoidusti, jolloin tiedustelu voidaan automatisoida. Tästä esimerkkinä on Aero sentinelin Sentinel G2 sotilas drone, joka pystyy suorittamaan automatisoitua tiedustelua. ("Military Drone ,Military UAV | Sentinel G2", 2022)

Toinen käyttökohde dronelle armeijassa on drone iskut, jossa droneen on kiinnitetty ohjuksia, jotka viedään lähelle kohdetta. Kun drone on päässyt tarpeeksi lähelle kohdetta, voi-

daan ohjukset ampua siihen. Kaksi parhaiten tunnettua dronea tähän käyttöön ovat amerikkalaisten käyttämät predator ja reaper dronet. (*Ethics of Drone Strikes*, 2022)

Kolmas käyttökohde dronelle armeijassa on käyttö maalitauluna ilmatorjunta harjoituksissa. (Singh ym., 2019) Drone soveltuu tähän tarkoitukseen hyvin koska sitä voidaan lentää kauko-ohjatusti.

2.2.2 Kaupallinen

Kaupallisessa käytössä dronelle on monia käyttökohteita. Seuraavaksi käydään läpi muutamia käyttökohteita dronelle kaupallisella sektorilla.

Kuten armeijassa käytettiin dronea tiedusteluun, käytetään dronea kaupallisella sektorilla myös samaan tarkoitukseen. Näitä käyttökohteita ovat esimerkiksi maaston kartoitus, rakennusten turvallisuuden tarkastelu, viljelysten valvonta ja lain valvonta.(Intelligence, 2021) Näissä käyttökohteissa drone on varustettu kameralla, josta voidaan lähettää kuvaa dronen käyttäjälle. Tällaista dronea käytetään kaupallisella sektorilla myös ilmakuvaukseen uutisointia ja elokuvien tekemistä varten. (Intelligence, 2021) Kaupallisella sektorilla ilmakuvaukseen kykenevää dronea käytetään myös etsintään ja pelastukseen, mutta tässä tapauksessa drone on varustettu tavallisen kameran sijasta lämpökameralla. (Intelligence, 2021) Lämpökamera auttaa pelastus tehtävissä ihmisten löytämiseen tapaturma alueilla.

Tavallisella kameralla varustettua dronea käytetään myös tapaturma alueen valvomiseen. Dronen pieni koko mahdollistaa tässä tapauksessa sen, että se pääsee vaikeasti saavutettaviin alueisiin. Droneja käytetään myös lääkkeiden ja ruoan viemiseen kyseisille alueille.(”The Work of Drones in Emergency Situations”, 2021) Dronella viedään tavaroita tapaturma alueiden lisäksi myös asiakkaille, (Intelligence, 2021) josta on esimerkkinä ”Zipline” yritys (*Zipline - Instant Logistics*, 2022), joka aloitti pakettien toimituksen asiakkaille Walmartista Luoteis-Arkansasissa marraskuussa 2021.(”Walmart Autonomous Drone Delivery Takes Flight in Northwest Arkansas”, 2021)

Droneja käytetään kaupallisella sektorilla myös tapahtumissa valoshow’n järjestämiseen. Niissä dronet toimivat yhtenä parvena ja muodostavat erilaisia muotoja, josta esimerkkinä

on Tokion olympialaisten avajaisten drone-taideteos. (*Spectacular Intel Drone Light Show Helps Bring Tokyo 2020 to Life - Olympic News*, 2021)

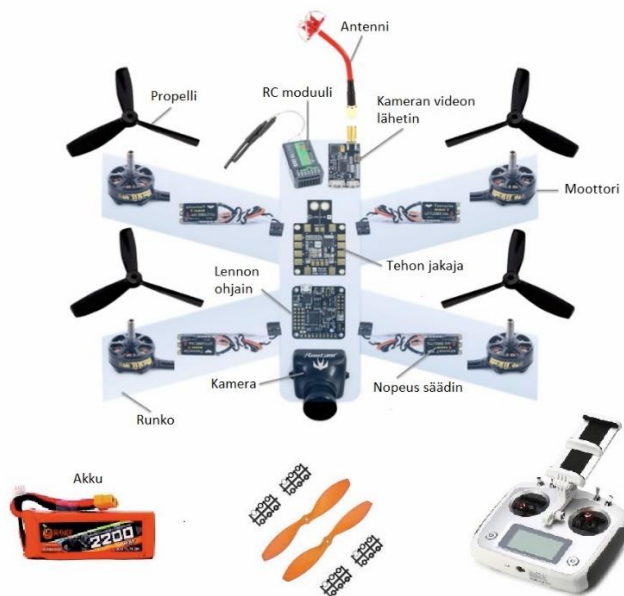
2.2.3 Yksityinen

Dronea voi käyttää yksityiskäytössä osittain samoihin tarkoituksiin kuin kaupallisella sektorilla, joihin lukeutuu muun muassa valokuvaus ja videointi ilmasta, oman rakennuksen kunnan tarkastaminen (Ciobanu, 2021) ja auttaminen kadonneiden lemmikkien etsimisessä. ("11 Cool Things to Do with Drones", 2020) Nämä käyttötarkoitukset hyödyntävät dronea jossa on kamera. Dronella voi myös lentää kilpaa, (Ciobanu, 2021) josta yksi esimerkki on ensimmäisen persoonan näkymästä (FPV) lennettävän dronen kilpalentäminen. Tässä droneja, joissa on kamera, lennetään monimutkaisen radan läpi ensimmäisestä persoonasta käyttäen virtuaalitodellisuuslaseja (VR-lasit). Tarkoitus on läpäistä rata mahdollisimman nopeasti ja nopeammin kuin muut samalla radalla kilpailevat dronen lentäjät. (*ABOUT DRL | The Drone Racing League*, 2022) Jos ei halua lentää dronea kilpailuissa voi dronea lennättää paikallisen lennökkikerhon lennätys tapahtumissa. ("11 Cool Things to Do with Drones", 2020)

3 Dronen rakenne

Tässä kappaleessa tutkitaan harraste käyttöön tarkoitettun dronen rakennetta. Harrastuskäyttöön tarkoitettu drone koostuu viidestä osa-alueesta ja lisäosista. Osa-alueet ovat rakennekomponentit, aktiiviset komponentit, mittaus komponentit, komento komponentit ja tehokomponentit. (Mendoza-Mendoza ym., 2021)

Kuvassa 3.1 on esitetty ensimmäisestä persoonasta lennettävän dronen komponentit. Seuraavaksi selvitetään mitkä komponentit kuuluvat mihinkin osa-alueeseen ja selvitetään niiden tarkoitus dronen toiminnan kannalta.



Kuva 2. FPV dronen osat (*Working Principle and Components of Drone · CFD Flow Engineering, 2020, muokattu*)

3.1 Rakennekomponentit

Dronen rakennekomponentit koostuvat sen rungosta, joka antaa dronelle sen muodon ja määrittää mitä osia droneen voidaan asentaa. Runkoon tehdään kiinnitys kohdat dronen muille komponenteille, jotta ne voidaan asentaa paikoilleen ruuveilla. Nämä kiinnitys koh-

dat voi varustaa tärinää vähentävillä kiinnikkeillä, jotta runkoon kohdistuva tärinä ei häiritse mittaus antureita. (Mendoza-Mendoza ym., 2021) Toinen tapa kiinnittää dronen osat sen runkoon on käyttää väliaikaisia menetelmiä. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi tarra-nauhalla kiinnitys tai kiinnitys hihnojen käyttö. (Mendoza-Mendoza ym., 2021)

3.2 Aktiiviset komponentit

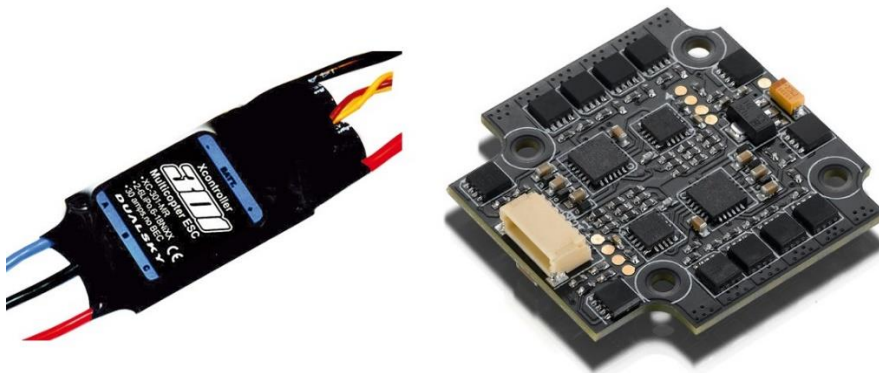
Aktiivisten komponenttien avulla drone pystyy liikkumaan. Aktiivisiin komponentteihin kuuluu moottori, nopeudensäädin ja potkuri. Moottoreina käytetään yleensä DC-moottoreita koska ne ovat hyvin herkästi reagoivia. DC-moottoreita on saatavana harjattomina ja harjallisina. Harjallisia moottoreita käytetään yleensä pienissä laitteissa niiden koon takia, mutta ne eivät ole yhtä hyvin reagoivia kuin harjattomat DC-moottorit. Tästä syystä droneissa, joissa on monta moottoria, käytetään yleensä harjattomia moottoreita (Kuva 3.2). (Mendoza-Mendoza ym., 2021)



Kuva 3. Harjaton DC-moottori (*Xrotor 2306 Race Pro FPV Motor 2700kv 4S - Harraste-kauppa Hobbylinna, 2022*)

Jotta näitä moottoreita voidaan ajaa tarvitsevat ne nopeudensäätimen. Nopeudensäädin on moottorin ja lennon ohjaimen välissä oleva komponentti, joka ottaa lennon ohjaimen käskyt vastaan ja nostaa tai laskee moottorin nopeutta. Nopeudensäädin voidaan toteuttaa dronen jokaiselle moottorille joko erillisenä komponenttina tai yhtenä komponenttina (Kuva 3.3), jossa yhdellä piirilevyllä on kaikkien moottoreiden nopeudensäätimet. Yhtenä komponenttina toteutettuna nopeudensäätimet mahtuvat pienempään tilaan ja joissain ta-

pauksessa tehonjakaja on sisällytetty mukaan samalle piirilevyille. (”All About a Multicopter FPV Drone Electronic Speed Controller | GetFPV”, 2018; Mendoza-Mendoza ym., 2021) Nopeudensäädin voi olla avoimen lähdekoodin projektiin perustuva. Tästä on esimerkkinä Zubax Oerl 20 nopeudensäädin joka perustuu PX4 projektin kehittäjien tekemään Sapog projektiin. (*PX4 Sapog - advanced open source ESC from the PX4 team*, 2016) Toinen avoimen lähdekoodin nopeussäädin projekti on BLHeli, jota EMAX Magnun II paketissa tuleva nopeudensäädin käyttää. (*EMAX F4 Magnum II F4 BLHeli32 35A 2-6s VTX Stack*, 2022)



Kuva 4. Yksittäinen nopeudensäädin (vasen) (*DualSky XC-301-MR, 30 amps ESC*, 2022) ja neljä nopeudensäädintä yhdessä (oikea) (*Xrotor Nano FC and 20A 2-4S 4-in-1 ESC Combo - Harrastekauppa Hobbylinna*, 2022)

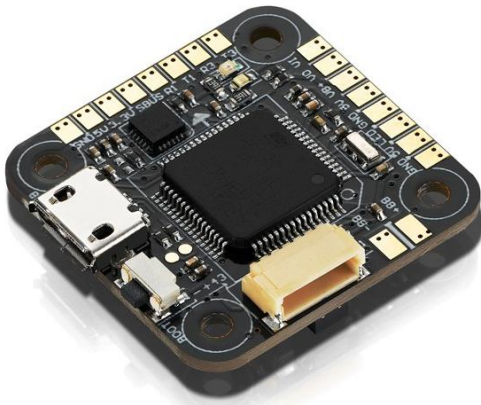
Viimeinen dronen aktiivinen komponentti on potkuri, jonka avulla moottori saa dronen ilmaan. Kun potkureita valitaan droneen, tarvitsee ne mitoittaa moottorien kanssa niin että ne jaksavat saatavilla olevan tehon avulla nostaa noin kaksi kertaa dronen painon verran massaa ilmaan. (Singh ym., 2019)

3.3 Komento ja mittaus komponentit

Dronen komento ja mittaus komponentteihin kuuluu lennonohjain, joka sisältää erilaisia antureita, joita tarvitaan dronen lentämiseen, kauko-ohjaus-moduuli (RC-moduuli), jolla vastaanotetaan käyttäjän käskyjä ja lähetetään tietoa käyttäjälle ja kauko-ohjain, jolla käyttäjä voi lähettää komentoja droneen ja vastaanottaa tietoa dronen tilasta. (Mendoza-Mendoza ym., 2021)

3.3.1 Lennonohjain

Lennonohjain (Kuva 3.4) on komponentti, joka saa käyttäjän käskyt RC-moduulilta ja näiden käskyjen perusteella säätelee moottoreita. Lennonohjain kerää myös tietoa muista komponenteista ja pystyy lähettämään nämä tiedot RC-moduulin kautta ohjaajalle. ("Flight Controllers Explained for Everyone", 2020) Nämä tiedot on myös mahdollista esittää näyttöllä jossa näkyy dronen videostriimi, jos dronessa on kamera ja videostriimi mahdollisuus. (*Connect a Drone Camera To Your Phone [Video Examples]*, 2022) Lennonohjain sisältää myös tärkeitä antureita, joilla drone saadaan pysymään ilmassa stabiilisti. Näihin antureihin kuuluu muun muassa gyroskooppi, joka mittaa dronen asentoa 3D tilassa ja barometri, joka mittaa dronen korkeutta. Näillä tiedolla lennonohjain tietää minkä moottorin nopeutta sen tarvitsee säätää, jotta drone pysyy stabiilina ilmassa. ("Flight Controllers Explained for Everyone", 2020) Lennon ohjaimissa voidaan käyttää avoimen lähdekoodin ohjelmistoa, josta on esimerkkinä EMAX Magnun II paketissa oleva lennonohjain, johon on valmiiksi asennettu BetaFlight ohjelmisto. (*EMAX F4 Magnum AIO FPV Stack*, 2022)



Kuva 5. Lennonohjain (*Xrotor Nano FC and 20A 2-4S 4-in-1 ESC Combo - Harrastekauppa Hobbylinna*, 2022)

3.3.2 RC-moduuli

RC-moduuli on lähetin, joka pystyy ottamaan komentoja vastaan kauko-ohjaimesta ja yleensä pystyy myös lähettämään tietoa dronesta kauko-ohjaimeen. Tämä voi olla dronessa erillisenä komponenttina tai sisäänrakennettuna lennon ohjaimeen.

3.4 Tehokomponentit

Tehokomponentit, joihin kuuluu akku ja tehonjakaja, tuottavat dronelle tarvittavan tehon, jotta se voi toimia. Akkuna droneissa käytetään yleensä sarjaan kytkettyjä Li-Po-kennoja. Akkujen lähelle tai akkuun on yleensä lisätty ilmaisim, josta nähdään akun varauksen taso. Tällainen ilmaisim voi olla esimerkiksi ledi, joka vaihtaa väriä riippuen akun varauksesta. Jotta teho saadaan siirrettyä niihin komponentteihin, joissa sitä tarvitaan, tarvitsee drone tehonjakajan. (Kim ym., 2020; Mendoza-Mendoza ym., 2021) Tehonjakaja jakaa tehon dronen akusta sitä tarvitseville komponenteille.(experts ym., 2022b)

3.5 Lisäkomponentit

Lisäkomponentit eivät ole välttämättömiä dronen toiminnan kannalta, mutta niillä saadaan monia hyödyllisiä toimintoja lisättyä droneen. Seuraavaksi käydään läpi muutama lisäkomponentti droneen.

3.5.1 Kamera ja video lähetin

Droneen voi lisätä kameran, jolla voi ottaa kuvia tai videoita itsestään, omistamista alueistaan ja tarkastella esimerkiksi omien rakennusten kuntoa ilmasta käsin. Kameraa voi myös käyttää dronen lentämiseen ensimmäisestä persoonasta. Jos kameraa haluaa käyttää dronen lentämiseen ensimmäisestä persoonasta, tarvitsee droneen lisätä vielä komponentit, jolla dronen ohjaaja saa live kuvan kamerasta esimerkiksi VR-laseihin. Tämä komponentti on

videolähetin (VTX), joka pystyy lähettämään dronen kuvaaman videon joko ruudulle tai VR-laseihin.(experts ym., 2022a)

3.5.2 Gps

Satelliittipaikannusjärjestelmä (Gps) moduulia voidaan käyttää mittaamaan dronen paikkaa kolmiulotteisessa tilassa maahan nähden, jonka ansiosta drone voi lentää automatisoidusti. Gps moduuli mahdollistaa itsestään ohjautuvalle dronelle kyvyn navigoida avoimella alueella asetetulta pisteeltä pisteelle ja se mahdollistaa myös automatisoidun palaa kotiin komennon. Gps moduuli mahdollistaa myös itsestään ohjautuvalle dronelle tai manuaalisesti ohjattavalle dronelle kyvyn säilyttää paikkansa tietyssä kohdassa ilman ulkopuolista ohjausta. Tällöin drone lukittuu sen hetkiseen gps koordinaatteihin ja säilyttää paikkansa siinä. (Ciobanu, 2020; Mendoza-Mendoza ym., 2020)

4 Avoimen lähdekoodin projektit

Droneja yksityiskäyttöön saa joko valmiiksi tehtynä tai dronen voi rakentaa itse. Valmiiksi tehdyt dronet sopivat käyttäjälle, joka haluaa dronen, joka toimii heti tai käyttäjälle, joka ei ole kovinkaan hyvä rakentamaan dronea itse. Näiden dronejen muokkaaminen on hyvin rajallista, josta on esimerkkinä DJI, joka pyrkii estämään kuluttajia tekemästä muokkauksia sen dronejen käyttöjärjestelmään. (Sullivan, 2017) Jos dronen rakennetta ja ohjelmistoa haluaa vapaasti muokata, tarvitsee drone rakentaa itse. Tähän tarkoitukseen voi käyttää avoimen lähdekoodin drone projekteja. Kuten kappaleen 3 osioissa mainittiin, on avoimen lähdekoodin projekteja saatavilla esimerkiksi nopeuden säätimille ja lennon ohjaimille. Tässä kappaleessa tutkitaan mitä avoimen lähdekoodin drone projekteja on saatavilla lennon ohjaimille ja mihin niitä voi käyttää.

4.1 Taustaa

Avoimen lähdekoodin projekteja on ollut saatavilla jo jonkin aikaa, joista kaksi suosituinta projektia on aloitettu jo vuosina 2009 (Ardupilot) ja 2011 (PX4). (”The Rise of Open-Source Drones”, 2021) Avoimen lähdekoodin projekteilla tarkoitetaan projekteja, jotka perustuvat vapaaseen käyttö lisenssiin. Näiden projektien kehitys on avointa ja niiden kehittäjät työstävät niitä avoimesti. Näitä projekteja saa siis muokata itse vapaasti ja käyttää myytävissä laitteissa ilman lisenssi maksua, jos siitä ei erikseen mainita. (*Starting an Open Source Project*, 2022) Nämä projektit voivat kattaa kaiken lennon ohjaimen ohjelmistosta ja viestintä protokollista akkujen hallintajärjestelmään saakka. (”The Rise of Open-Source Drones”, 2021)

Avoimeen lähdekoodiin perustuvien dronejen osuus kaupallisessa myynnissä yritys- ja yksityiskäyttöön on lisääntynyt siitä, kun toinen suosituimmista avoimen lähdekoodin projekteista ArduPilot aloitettiin. Tällä hetkellä suurin osa kaupallisista droneista yritys- ja yksityiskäyttöön on DJI:n tekemiä. DJI käyttää omaa ohjelmistoaan droneissa, joka ei perustu avoimeen lisenssiin. Oman ohjelmiston kehittäminen droneen on kallista, jonka takia avoimeen lähdekoodiin perustuvien dronejen käyttö kaupallisessa myynnissä on lisäänty-

nyt. Aloittavalle yritykselle, joka valmistaa droneja on paljon halvempaa ja kannattavam-
paa käyttää avoimen lähdekoodin ohjelmistoa, jota on kehitetty jo hyvin paljon. ("The Rise
of Open-Source Drones", 2021) Jos aloittavan yrityksen valmistamalle dronelle ei löydy
valmiiksi sopivaa avoimen lähdekoodin ohjelmistoa, voi yritys muokata jotain avoimen
lähdekoodin ohjelmistoa niin, että sillä voidaan toteuttaa valmistettavan dronen toimin-
not. ("The Rise of Open-Source Drones", 2021)

Myydyistä droneista noin 16 % on avoimen lähdekoodin ohjelmistoihin perustuvia. Avoi-
men lähdekoodin ohjelmistoja käytetään paljon enemmän yksityis- ja harraste käytössä.
("The Rise of Open-Source Drones", 2021) Seuraavaksi tutkitaan mitä avoimen lähdekoo-
din drone projekteja on saatavilla ja mihin niitä voi käyttää.

4.2 Avoimen lähdekoodin projekteja

Avoimen lähdekoodin drone projekteja on saatavilla moneen eri käyttötarkoituk-
siin. (*Complete List of Flight Controller Firmware Projects*, 2018) Niistä on listoja monilla
eri nettisivuilla ja blogeissa joissa kerrotaan mihin niitä voi käyttää ja miksi juuri kyseistä
projektia kannattaa käyttää. Seuraavaksi käydään läpi Drone Dojo:n (Bergquist, 2019) si-
vuilla olevan listan avoimen lähdekoodin drone projektit läpi selvittäen mihin niitä voi
käyttää ja mikä niiden hyvä puoli on. Lopuksi otetaan vielä yksi listan projekti tarkempaan
tarkasteluun.

4.2.1 PX4

PX4 drone projekti keskittyy itsestään ohjautuvien dronejen tekoon. PX4 toimii dronejen
lisäksi myös muissa ajoneuvo tyyeissä kuten lentokoneissa ja helikoptereissa. PX4 käyt-
tää Berkeleyn ohjelmiston jakelu (BSD) lisenssiä, joka tarkoittaa sitä, että jos lisäät jonkin
uuden toiminnon PX4 projektiin ei sitä toimintoa tarvitse lisätä pää projektiin vaan sen voi
pitää omana tietonaan. Tämä on hyvä asia droneja valmistaville yrityksille, koska ne voivat
kehittää omia ominaisuuksia droneen, joita ei tarvitse muille jakaa. (Bergquist, 2019; *Open
Source Drone Projects List*, 2022) Näin yritykset voivat erottua markkinoilla muista PX4
käyttävistä yrityksistä.

4.2.2 BetaFlight

Toisin kuin PX4, BetaFlight ei sovellu itsestään ohjautuvien dronejen tekoon. BetaFlight on hyvä manuaalisesti lennettävien dronejen ja lentokoneiden tekemiseen. Tämä tekee BetaFlight projektista hyvän vaihtoehdon, jos haluaa tehdä FPV dronen. (Bergquist, 2019; *Complete List of Flight Controller Firmware Projects*, 2018) BetaFlight käyttää yleistä julkista lisenssiä (GPL), jonka takia kaikki muutokset BetaFlightin koodiin tarvitsee lisätä takaisin päälle projektiin. (*betaflight/betaflight*, 2015/2022)

4.2.3 CleanFlight

Kuten BetaFlight, CleanFlight ei sovellu itsestään ohjautuvien dronejen tekemiseen. CleanFlight on BetaFlightin tapaan hyvä manuaalisesti lennettävien dronejen tekoon. CleanFlight käyttää BetaFlightin tapaan GPL lisenssiä. (Bergquist, 2019; *Complete List of Flight Controller Firmware Projects*, 2018)

4.2.4 LibrePilot

LibrePilot projekti keskittyy itsestään ohjautuviin droneihin, mutta sitä voi myös käyttää manuaalisesti ohjattavien dronejen tekoon ja se käyttää GPLv3 lisenssiä. LibrePilot on hyvä vaihtoehto ArduPilot projektille, mutta se ei sisällä yhtä paljon ominaisuuksia kuin ArduPilot. (Bergquist, 2019; *Complete List of Flight Controller Firmware Projects*, 2018)

Seuraavaksi tarkastellaan projektia ArduPilot tarkemmin.

4.3 ArduPilot

ArduPilot on C++ koodilla kirjoitettu avoimen lähdekoodin drone projekti. (*Welcome to the ArduPilot Development Site — Dev documentation*, 2022) ArduPilot saa nimensä ”Ardu”

osan siitä, että alkuperäisesti käytetyt APM1- ja APM2-levyt perustuivat Arduino kehitysympäristöön. (*Welcome to the ArduPilot Development Site — Dev documentation*, 2022) ArduPilot projekti soveltuu hyvin itsestään ohjautuvien dronejen tekoon. ArduPilot toimii myös muissakin ajoneuvoissa, joista esimerkkeinä ovat lentokoneet ja helikopterit. ArduPilot projekti perustuu GPL lisenssiin, joka tarkoittaa sitä, että kaikki ArduPilot projektiin tehdyt muutokset pitää lisätä takaisin ArduPilot pää projektiin. Tämä on hyvä asia ArduPilot projektin käyttäjien kannalta, koska ArduPilot ohjelmistoa kehitetään koko ajan eteenpäin tämän ansiosta. (*8 Open Source Drone Projects | Opensource.Com*, 2018; *Open Source Drone Projects List*, 2022; Bergquist, 2019)

4.3.1 Käyttökohteet

Kuten edellä todettiin voi ArduPilot projektia käyttää itsestään ohjautuvien dronejen tekoon, mutta sitä voi myös käyttää perusvakautus ohjelmana kauko-ohjattavissa droneissa. (*Use-Cases and Applications — Copter documentation*, 2022)

Edellä mainittujen ajoneuvojen lisäksi voi ArduPilot projektia käyttää monissa muissakin ajoneuvoissa, joihin lukeutuu sukellusveneet, veneet, mönkijät, ilmalaivat, purjeveneet, pystysuoraan nousevat ja laskeutuvat (VTOL) lentokoneet ja satelliitit. (*Use-Cases and Applications — Copter documentation*, 2022)

Seuraavaksi selvitetään minkälaisia käyttömahdollisuuksia ArduPilot projektilla on sen kotisivun mukaan ja verrataan niitä PX4 projektin kotisivun ilmoittamiin käyttömahdollisuuksiin ja DJI:n kuluttajille suunnattuihin droneihin.

Taulukko 1: Lista ArduPilot ja PX4 projektien käyttömahdollisuuksista niiden kotisivujen mukaan ja DJI:n kuluttajille suunnatut dronet. (*Camera Drones*, 2022; ”UAV Use Cases & Applications”, 2022; *Use-Cases and Applications — Copter documentation*, 2022)

ArduPilot	PX4	DJI
VTOL etsintä ja pelastus	Ilmakuvaus ja videointi	Ilmakuvaus ja videointi
Upotettava kauko-ohjattava ajoneuvo (ROV)	Paketin toimitus dronet	Lentäminen ensimmäisestä persoonasta
Automoidut niittokoneet ja traktorit	Kilpa lentäminen	
Automoidun ajoneuvon törmäyksenesto	Etsintä ja maanmittaus	
3D kartoitus	Tutkimus ja tuotekehitys (R&D)	
Lentäminen ensimmäisestä persoonasta		
Usean ajoneuvon lentämiseen samaan aikaan		
Lennoikin paikan tunnistaminen ilman GPS moduulia		
sisätila lentäminen		

Taulukossa 4.1 olevat käyttö mahdollisuudet projekteille ArduPilot ja PX4 olivat ilmoitettuna kummankin projektin omilla sivuilla. Nämä eivät kuitenkaan ole ainoat käyttömahdollisuudet kyseisille projekteille koska ArduPilot projektilla tehtyyn droneen voi myös asentaa tavallisen kameran ilmakuvausta varten. (*Cameras and Gimbals — Plane documentation*, 2022) Taulukosta 4.1 huomataan että PX4 on enemmän keskittynyt käyttömahdollisuuksiin, jotka ovat hyödyllisiä kaupallisella sektorilla, vaikka joitakin käyttötarkoituksia voi yksityisellä puolella hyödyntää myös. ArduPilot projektin käyttömahdollisuuksista taas huomataan, että suurin osa niistä on suunnattu yksityiskäyttöön. Osa ArduPilot projektin käyttö kohteista on kuitenkin samankaltaisia kuin PX4, joita ovat maanmittaus ja 3D kartoitus. Kumpaakin projektia voi käyttää myös etsintään ja pelastukseen. Taulukosta 4.1 huomataan myös, että PX4 on enemmän keskittynyt lentäviin ajoneuvoihin, kun taas ArduPilot projektin sivuilla mainituissa käyttö kohteissa on mainittu myös muitakin ajoneuvoja, joita olivat maatalouskoneet ja vedessä toimivat ajoneuvot.

Kuluttajille myytävä drone johon ArduPilot projektin käyttökohteita verrataan, valittiin taulukkoon 4.1 DJI:n dronet, koska DJI on tällä hetkellä suosituin kuluttaja dronejen valmistaja. (”The Rise of Open-Source Drones”, 2021) DJI:n dronet olivat keskittyneet hyvin paljon valokuvaamiseen ja videointiin ilmasta käsin. ArduPilot projektin sivuilla käyttökohteissa ei sanota edellä mainittuja DJI dronejen käyttötarkoituksia, mutta kuten edellä mainittiin voi ArduPilot projektilla tehtyyn droneen asentaa kameran kuvausta varten (*Cameras and Gimbals — Plane documentation*, 2022) ja koska ArduPilot projektilla voi tehdä ensimmäisestä persoonasta lennettävän dronen voi sitä myös käyttää videointiin ilmasta käsin. (*Use-Cases and Applications — Copter documentation*, 2022) DJI myy myös ensimmäisestä persoonasta lennettäviä droneja, joita ArduPilot projektilla pystyy myös tekemään. (*Use-Cases and Applications — Copter documentation*, 2022)

ArduPilot projektin sivuilla oli myös mainittu, että sitä voi käyttää antenni seurantaan. (*Antenna Tracking — Copter documentation*, 2022) Tässä ajoneuvon sijaintia seurataan ja antennin asentoa muutetaan niin että se osoittaa koko ajan ajoneuvoa päin. Tämä parantaa etäisyyttä, jonka yli signaali voidaan vastaanottaa ajoneuvosta. ArduPilot projekti tukee kahta eri antenni seurannan muotoa, jotka ovat AntennaTracker ja Mission Planner GPS-pohjainen antennin seuranta. (*Antenna Tracking — Copter documentation*, 2022)

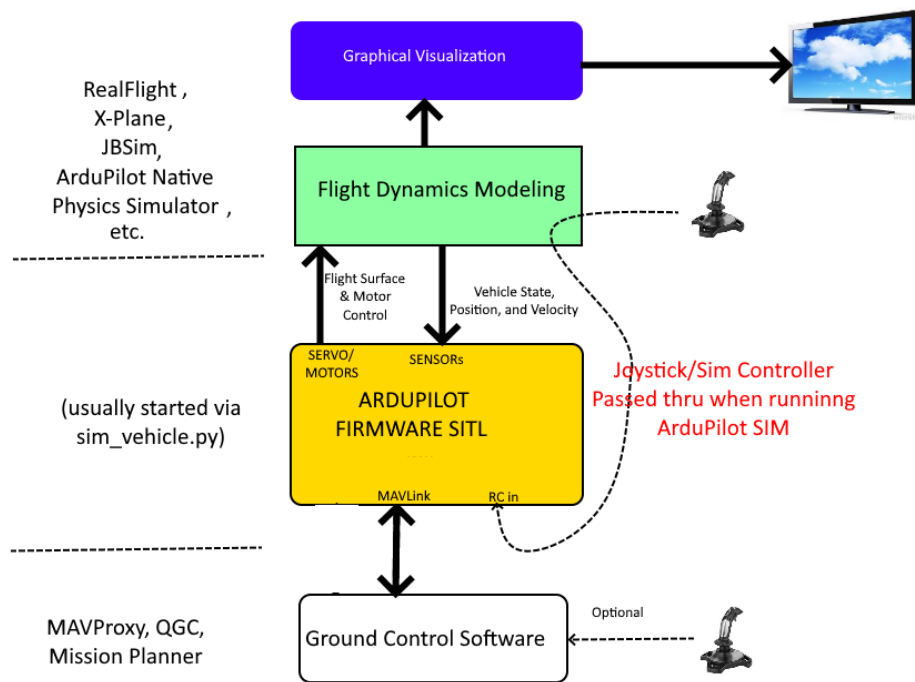
AntennaTracker seurannassa ArduPilot ohjelmiston tukemaa lennon ohjainta käytetään kontrolloimaan antennin suuntausta ohjaavaa servomoottoria. Tämä laskee ajoneuvon paikan käyttäen sen omia GPS koordinaatteja ja ajoneuvosta saatuja GPS koordinaatteja. Tämän jälkeen se suuntaa antennin osoittamaan ajoneuvoa. (*AntennaTracker Home — AntennaTracker documentation*, 2022)

Mission Planner GPS-pohjaisessa antennin seurannassa Mission Planner laskee ajoneuvon paikan käyttäen sen maaohjausaseman (GCS) GPS koordinaatteja ja ajoneuvon GPS koordinaatteja. Näiden perusteella Mission Planner suuntaa lopuksi antennin oikeaan suuntaan. (*Mission Planner GPS-based Antenna Tracking — Copter documentation*, 2022)

4.3.2 Simulointi

ArduPilot projektia on myös mahdollista käyttää simuloinnissa. Tämä on hyvä tapa testata omia muokkauksia ArduPilot ohjelmiston koodiin ilman että tarvitsee pelätä sen aiheutta-

van ajoneuvon rikkoutumista. (*Simulation — Copter documentation, 2022*) Simulointi toteutuu käyttäen lento dynaamista mallinnusta simuloidusta ajoneuvosta. Tämä malli saa vastaan komentoja ohjelmisto silmukassa (SITL) ohjelmalta, joka suorittaa testattavaa ArduPilot versiota. Ajoneuvo malli syöttää SITL ohjelmalle takaisin mallin tilan, paikan ja nopeuden, jotta testattava ArduPilot ohjelmiston versio voi niiden perusteella syöttää uusia käskyjä ajoneuvo mallille. Jos simuloitua ajoneuvoa haluaa itse ohjata, se toteutuu joko käyttäen joystickiä, simulaattori ohjainta (esimerkiksi Spektrum SPMRFTX1 ohjain) tai käyttäen MAVLink komentoja GCS ohjelmasta. Alla on lohko diagrammi simuloinnin toiminnasta. (*Simulation — Dev documentation, 2022*)



Kuva 6. ArduPilot simuloinnin lohko kaavio (*Simulation — Dev documentation, 2022*)

5 Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää mistä osista harrastekäyttöön tarkoitettu drone koostuu, mihin tarkoituksiin dronea pystyy käyttämään ja mikä on avointen lähdekoodin drone projektien taso vuonna 2022.

Dronen rakenne koostui viidestä osa-alueesta ja lisäkomponenteista. Näistä osa-alueista tärkeimmät dronen toiminnan kannalta olivat aktiiviset komponentit ja komento ja mittaus komponentit. Aktiiviset komponentit sisälsivät dronen lentämiseen tarvittavat komponentit, kun taas komento ja mittaus komponentit sisälsivät komponentit, joiden avulla drone pysyi stabiilina ilmassa ja joiden avulla drone pystyi vastaanottamaan komentoja käyttäjältä.

Dronen käyttötarkoituksissa selvisi, että armeija on tällä hetkellä vielä suurin dronejen käyttäjä, jonka on arvioitu olevan vuonna 2022 noin 55 % koko drone-markkinoista. (Fact.MR ,2022) Tämän takia dronen käyttö tarkoitukset muussa kuin armeija käytössä muistuttivat silti armeijan käyttötarkoituksia. Tästä esimerkkinä oli dronella valokuvaus ja videointi ilmasta käsin, joka on osittain samanlaista kuin armeijan tiedustelu. Dronejen käyttö muualla kuin armeijassa oli kuitenkin lisääntynyt, jonka ansiosta dronejen kehitys muuhun kuin armeija käyttöön on ruvennut lisääntymään. Dronejen käyttötarkoitukset kaupallisessa ja yksityisessä käytössä olivat hyvin monipuolisia. Droneja pystyi käyttämään esimerkiksi urheilutapahtumien kuvaukseen ilmasta käsin tai niitä voi lentää harrastusmielessä paikallisessa lennätys kerhossa.

Tutkimuksessa todettiin, että valmiiksi tehdyissä droneissa ei ole paljon varaa muokata dronea itse. Yksi syy tähän oli se, että valmiiksi tehdyt dronet käyttävät itse tehtyjä ohjelmistoja droneissaan, joiden muokkaaminen ei ole helppoa. Joissain tapauksissa dronen valmistaja koittaa aktiivisesti estää käyttäjiä tekemästä muokkauksia dronen ohjelmistoon, josta esimerkkinä oli DJI. (Sullivan, 2017) Tämän takia itse tehty drone, joka käyttää avoimen lähdekoodin projektia hyödyksi on parempi vaihtoehto käyttäjälle, joka haluaa muokata helposti dronea.

Avoimen lähdekoodin drone projektien taso vuonna 2022 oli tutkimuksen perusteella hyvin kattava. Näillä projekteilla pystyi tekemään monia eri tarkoituksiin olevia droneja. Kun toista tämän hetken suosituinta projektia verrattiin DJI:n valmistamiin droneihin huomattiin, että kyseisellä projektilla voi tehdä samoihin tarkoituksiin droneja kuin DJI:n valmistamat dronet. Näiden projektien käyttötarkoitukset eivät rajoittuneet pelkästään droneihin vaan näillä pystyi tekemään ohjelmistoja muihinkin ajoneuvoihin. Ardupilot projektin yhdeksi käyttökohteeksi oli myös mainittu antenni seuranta, jossa antenni suunnattiin ArduPilot ohjelmiston avulla ohjattavan laitteen suuntaan signaalin vastaanotto etäisyyden parantamiseksi. Koska avoimen lähdekoodin projektien kehittäminen on avointa kaikille, tulee näiden projektien toiminnallinen taso vain kasvamaan tulevaisuudessa. Suosituimpien projektien taso tulee todennäköisesti kasvamaan eniten, josta esimerkkinä nykyään on LibrePilot ja ArduPilot, joista suosituimpi on ArduPilot, jossa on tällä hetkellä enemmän ominaisuuksia kuin LibrePilot ohjelmistossa.

Avoimen lähdekoodin drone projektien taso tulee kasvamaan myös sen ansiosta, että niitä on alettu käyttää aloittelevien droneja valmistavien yritysten droneissa. Tämä johtuu siitä, että oman ohjelmiston tekeminen droneen on aikaa vievää ja kallista, jolloin parempi vaihtoehto näille yrityksille on käyttää jo valmiiksi kehitettyä avoimeen lähdekoodiin perustuvaa drone projektia.

Tämän tutkimuksen perusteella avoimen lähdekoodin drone projektien taso on vuonna 2022 hyvin kattava ja niiden taso tulee vain kasvamaan tulevaisuudessa, kun niiden käyttö lisääntyy kaupallisissa droneissa. Jos haluaa itse rakentaa dronen on siihen tällä hetkellä parasta käyttää apuna avoimen lähdekoodin drone projektia, jolloin dronen muokattavuus kuluttajalle on kaikista helpointa.

Lähteet

8 open source drone projects | Opensource.com. (2018).

<https://opensource.com/article/18/2/drone-projects>

11 Cool Things to Do with Drones. (2020, lokakuuta 23). *Aero Corner.*

<https://aerocorner.com/blog/cool-things-to-do-with-drones/>

ABOUT DRL | The Drone Racing League. (2022). <https://thedroneracingleague.com/about-drl/>

Adam Rothstein. (2015). *Drone*. Bloomsbury Academic; eBook Academic Collection (EBSCOhost).

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=1717217&site=ehost-live>

After-Sales Service Policy—DJI. (2022). DJI Official. <https://www.dji.com/service/policy>

All About a Multirotor FPV Drone Electronic Speed Controller | GetFPV. (2018, helmikuuta 2).

GetFPV Learn. <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multirotor-fpv-drone-electronic-speed-controller/>

Antenna Tracking—Copter documentation. (2022). <https://ardupilot.org/copter/docs/common-antenna-tracking.html>

AntennaTracker Home—AntennaTracker documentation. (2022).

<https://ardupilot.org/antennatracker/index.html#home>

Bergquist, C. (2019, maaliskuuta 28). Open Source Drone Software Projects | Best Choices (2020).

Drone Dojo. <https://dojofordrones.com/open-source-drone/>

Betaflight/betaflight. (2022). [C]. The Betaflight Open Source Flight Controller Firmware Project.

<https://github.com/betaflight/betaflight/blob/b6af12b6b141cb457fb7f34be6a734e2aee516d7/LICENSE> (Original work published 2015)

Bucco-Lechat, C. (2013). *WMCH Drone, a DJI Phantom 1*. Own work.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WMCH_Drone.jpg

Camera Drones. (2022). DJI. <https://www.dji.com/fi/photo>

Cameras and Gimbals—Plane documentation. (2022). <https://ardupilot.org/plane/docs/common-cameras-and-gimbals.html>

Ciobanu, A. E. (2020, marraskuuta 21). What Are GPS Drones, and Why Does It Matter. *Droneblog*. <https://www.droneblog.com/what-are-gps-drones-and-why-does-it-matter/>

Ciobanu, A. E. (2021, kesäkuuta 15). 21 Ideas For Interesting & Useful Ways To Use Your Drone. *Droneblog*. <https://www.droneblog.com/21-ideas-for-interesting-useful-ways-to-use-your-drone/>

Complete List of Flight Controller Firmware Projects. (2018, maaliskuuta 2). DroneTrest Blog. <https://blog.dronetrest.com/flight-controller-firmware/>

Connect a Drone Camera To Your Phone [video examples]. (2022, maaliskuuta 1). <https://droneflyingpro.com/how-to-connect-drone-camera-to-your-phone/>

Drone ja sen toiminnot – miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien yleistuntemus. (2022). Droneinfo. <https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/drone-ja-sen-toiminnot-miehittamattomien-ilma-alusjarjestelmien-yleistuntemus>

DualSky XC-301-MR, 30 amps ESC. (2022). VERTICAL Hobby. <https://www.verticalhobby.com/kauppa/dualsky-xc-301-mr-30-amps-esc-p-4455.html>

EMAX F4 Magnum AIO FPV Stack. (2022). English. <https://www.getfpv.com/emax-f4-magnum-aio-fpv-stack.html>

EMAX F4 Magnum II F4 BLHeli32 35A 2-6s VTX Stack. (2022). VERTICAL Hobby. <https://www.verticalhobby.com/kauppa/en/emax-f4-magnum-ii-f4-blheli32-35a-6s-vtx-stack-p-7173.html>

Ethics of Drone Strikes. (2022). <https://web-p-ebsohost-com.ezproxy.cc.lut.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMjcwOTI0NF9fQU41?sid=4a7ca539-2c2f-4d18-bb4a-4064c6425e2b@redis&vid=0&format=EB&rid=1>

experts, D. D. N. is an online communication platform that brings together, Research, E. in D., start-ups, businesses, Drone, E. A. the N. T. in the, & market, F. P. V. (2022a). How to choose VTx | FPV Video Transmitter. *Https://Dronenodes.Com/*.
<https://dronenodes.com/best-vtx-fpv-video-transmitter/>

experts, D. D. N. is an online communication platform that brings together, Research, E. in D., start-ups, businesses, Drone, E. A. the N. T. in the, & market, F. P. V. (2022b). Power Distribution Board PDB - Drone Nodes. *Https://Dronenodes.Com/*.
<https://dronenodes.com/pdb-power-distribution-board/>

Flight Controllers explained for everyone. (2020, lokakuuta 9). *Fusion Engineering*.
<https://fusion.engineering/flight-controllers-explained-for-everyone/>

Global Consumer Drones Market Report 2021: Hobbyist & Gaming; Aerial Photography; Others - Forecast to 2030 - ResearchAndMarkets.com. (2021, kesäkuuta 21).
<https://www.businesswire.com/news/home/20210621005402/en/Global-Consumer-Drones-Market-Report-2021-Hobbyist-Gaming-Aerial-Photography-Others---Forecast-to-2030---ResearchAndMarkets.com>

Intelligence, I. (2021). *Drone technology uses and applications for commercial, industrial and military drones in 2021 and the future*. Business Insider.
<https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-applications>

Kim, J., Choi, Y., Jeon, S., Kang, J., & Cha, H. (2020). Optrone: Maximizing Performance and Energy Resources of Drone Batteries. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 39(11), 3931–3943. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2020.3012790>

Mendoza-Mendoza, J. A., Gonzalez-Villela, V. J., Aguilar-Ibañez, C. F., & Fonseca-Ruiz, L. (2021). *Drones to Go: A Crash Course for Scientists and Makers*. Apress.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6788-2>

- Mendoza-Mendoza, J. A., Gonzalez-Villela, V. J., Sepulveda-Cervantes, G., Mendez-Martinez, M., & Sossa-Azuela, H. (2020). *Advanced Robotic Vehicles Programming: An Ardupilot and Pixhawk Approach*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5531-5>
- Military Drone ,Military UAV | Sentinel G2. (2022). *Aero Sentinel*. https://www.aero-sentinel.com/military-drones/military_drone_sentinel_g2/
- Mission Planner GPS-based Antenna Tracking—Copter documentation*. (2022). <https://ardupilot.org/copter/docs/common-mission-planner-gps-based-antenna-tracking.html#common-mission-planner-gps-based-antenna-tracking>
- Open Source Drone Projects List*. (2022). <http://www.caldat.com/b/open-source-drone-projects-list-cm583>
- PX4 Sapog—Advanced open source ESC from the PX4 team*. (2016, elokuuta 20). diydrones. <https://diydrones.com/profiles/blogs/px4-sapog-advanced-open-source-esc-from-the-px4-team>
- QWinOut F550 Airframe RC Hexacopter Drone Kit DIY PNF Unassembly Combo Set with Kkmulticopter Flight Controller for Beginners (No Battery and Remote Controller): Toys & Games*. (2022). https://www.amazon.com/QWinOut-Hexacopter-Unassembly-Controller-Kkmulticopter/dp/B00PRNMY2M/ref=sr_1_16?keywords=Drone%2BKit%2BBuild&qid=1652717821&sr=8-16&th=1
- Simulation—Copter documentation*. (2022). <https://ardupilot.org/copter/docs/common-simulation.html>
- Simulation—Dev documentation*. (2022). <https://ardupilot.org/dev/docs/simulation-2.html#simulation-2>
- Singh, N. K., Muthukrishnan, P., & Sanpini, S. (2019). *Industrial System Engineering for Drones: A Guide with Best Practices for Designing*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3534-8>

Spectacular Intel Drone Light Show helps bring Tokyo 2020 to life—Olympic News. (2021,

joulukuuta 20). International Olympic Committee.

<https://olympics.com/ioc/news/spectacular-intel-drone-light-show-helps-bring-tokyo-2020-to-life-1>

Starting an Open Source Project. (2022, toukokuuta 4). Open Source Guides.

<https://opensource.guide/starting-a-project/>

Sullivan, B. (2017, heinäkuuta 7). DJI Is Locking Down Its Drones Against a Growing Army of DIY

Hackers. *Vice*. <https://www.vice.com/en/article/3knkgn/dji-is-locking-down-its-drones-against-a-growing-army-of-diy-hackers>

The Rise of Open-Source Drones. (2021, toukokuuta 30). *Drone Analyst*.

<https://droneanalyst.com/2021/05/30/rise-of-open-source-drones/>

The work of drones in emergency situations. (2021, joulukuuta 15). *Telefónica*.

<https://www.telefonica.com/en/communication-room/blog/the-work-of-drones-in-emergency-situations/>

UAV Use Cases & Applications. (2022). *PX4 Pro Open Source Autopilot*.

<http://dronecode.diyrobocars.com/applications/>

Use-Cases and Applications—Copter documentation. (2022).

<https://ardupilot.org/copter/docs/common-use-cases-and-applications.html>

Walmart autonomous drone delivery takes flight in Northwest Arkansas. (2021, marraskuuta 18).

KARK. <https://www.kark.com/news/business/walmart-autonomous-drone-delivery-takes-flight-in-northwest-arkansas/>

Welcome to the ArduPilot Development Site—Dev documentation. (2022).

<https://ardupilot.org/dev/>

Working Principle and Components of Drone · CFD Flow Engineering. (2020, syyskuuta 27). CFD

Flow Engineering. <https://cdfflowengineering.com/working-principle-and-components-of-drone/>

Xrotor 2306 Race Pro FPV Motor 2700kV 4S - Harrastekauppa Hobbylinna. (2022).

<https://www.hobbylinna.fi/product/xrotor-2306-race-pro-fpv-motor-2700kv-4s/HW30405200>

Xrotor Nano FC and 20A 2-4S 4-in-1 ESC Combo—Harrastekauppa Hobbylinna. (2022).

<https://www.hobbylinna.fi/product/xrotor-nano-fc-and-20a-2-4s-4-in-1-esc-combo/HW38040028>

Zipline—Instant Logistics. (2022). <https://flyzipline.com/retail/>

Global Drone Market Snapshot (2022-2032). (2022).

<https://www.factmr.com/report/62/drone-market>