



# wildNAV

Droonit luonnossa

Marius-Mihail Gurgu

Jorge Pena Queralta

Tomi Westerlund

Turun yliopisto

Puolustusministeriön julkaisuja 2024:4

wildNAV

Droonit luonnossa

Marius-Mihail Gurgu, Jorge Pena Queralta, Tomi Westerlund ja  
Turun yliopisto

Puolustusministeriö Helsinki 2024

**Julkaisujen jakelu**

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston  
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-  
arkivet Valto

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi)

Puolustusministeriö

This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

ISBN pdf: 978-951-663-154-0

ISSN pdf: 2984-102X

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2024

## wildNAV – Dronit luonnossa

### Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan julkaisuja 2024:4

**Julkaisija** Puolustusministeriö

**Tekijä/t** Marius-Mihail Gurgu, Jorge Pena Queralta, Tomi Westerlund

**Toimittaja/t** Tomi Westerlund

**Yhteisötekijä** Turun yliopisto

**Kieli** Suomi

**Sivumäärä** 15

#### Tiivistelmä

Miehittämättömien dronien nopea kehitys on mahdollistanut niiden käytön erilaisissa käyttöympäristöissä. Erilaiset käyttöympäristöt ja -kohteet vaativat erilaista suoriutumiskykyä erityisesti dronien paikannuksen osalta. Satelliittipohjaiset paikannusmenetelmät tarjoavat pääsääntöisesti luotettavan tavan paikannukselle. Kaikissa tilanteissa ja ympäristöissä satelliittipohjainen paikannusjärjestelmä ei ole kuitenkaan käytettävissä tai siihen ei voi luottaa. Siksi tässä tutkimushankkeessa on tutkittu kuvapohjaisia paikannusmenetelmiä, jotka eivät ole riippuvaisia satelliittijärjestelmistä tarjoten näin vaihtoehdoisen tavan dronien paikannukseen. wildNAV-hankkeessa kehitettiin kuvapohjainen paikannusalgoritmi, joka hyödyntää maaston piirteitä laskeakseen dronin sijainnin lennettäessä maaseudulla, vähemmän rakennetussa ympäristössä. Menetelmä perustuu dronin kameralla otettuihin RGB-valokuviin ja avoimen lähdekoodin satelliittikuviin, joiden välillä etsitään olennaisia yhteisiä piirteitä. Kokeelliset tulokset osoittavat, että kuvapohjainen paikannus on verrattavissa perinteisiin satelliittipohjaisiin menetelmiin, jotka toimivat vertailuarvoina. Verrattuna tämän hetken visuaalisiin odometria menetelmiin, ratkaisumme on suunniteltu pitkän matkan UAV-lentoja varten.

**Klausuuli** Tämä julkaisu on toteutettu osana Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINEn) tutkimusrahoituksen toimeenpanoa. ([www.defmin.fi/matine](http://www.defmin.fi/matine)) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta puolustusministeriön näkemystä.

**Asiasanat** satelliittipaikannus, miehittämättömät ilma-alukset, maanpuolustus, tutkimus, kokonaismaanpuolustus

**ISBN PDF** 978-951-663-154-0

**ISSN PDF** 2984-102X

**Julkaisun osoite** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-154-0>

## wildNAV - Drönare i vildmarken

### Publikationer av försvarets vetenskapliga delegation 2024:4

**Utgivare** Försvarsministeriet

**Författare** Marius-Mihail Gurgu, Jorge Pena Queralta, Tomi Westerlund

**Redigerare** Tomi Westerlund

**Utarbetad av** Åbo universitet

**Språk** Finska

**Sidantal**

15

### Referat

Den snabba utvecklingen av obemannade drönare har gjort det möjligt att använda dem i en mängd olika operativa miljöer. Olika operativa miljöer och mål kräver olika prestanda, särskilt när det gäller drönarnas positionering. Satellitens positioneringsmetoder ger generellt en pålitlig positioneringsmetod. Men i alla situationer och miljöer finns inte ett satellitpositioneringssystem tillgängligt. Därför har detta forskningsprojekt tittat på bildbaserade positioneringsmetoder, som inte är beroende av satellitsystem, och därmed ger en alternativ positioneringsmetod för drönare.

I wildNAV-projektet utvecklades en bildbaserad positioneringsalgoritm som använder djupa egenskaper för att beräkna drönarens position, särskilt när den flyger över obebyggda områden. Metoden bygger på RGB-ljusbilder som tas av drönarens kamera och öppna källkodsatellitbilder, mellan vilka väsentliga gemensamma egenskaper letas efter. Experimentella resultat visar att bildbaserad positionering är jämförbar med traditionella satellitens baserade metoder, som fungerar som benchmarks. Jämfört med nuvarande visuella odometri-metoder är vår lösning designad för långdistansflygningar med UAV.

### Klausul

Den här publikation är en del i genomförandet av forskningsfinansiering av Försvarets vetenskapliga delegation. ([www.defmin.fi/matine](http://www.defmin.fi/matine)) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

### Nyckelord

satellitnavigering, obemannade luftfarkoster, försvaret, totalförsvaret, forskning

**ISBN PDF** 978-951-663-154-0

**ISSN PDF**

2984-102X

**URN-adress** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-154-0>

## wildNAV – Drones in the Wild

---

### Publications of the Scientific Advisory Board for Defence 2024:4

**Publisher** Ministry of Defence

---

**Author(s)** Marius-Mihail Gurgu, Jorge Pena Queralta, Tomi Westerlund

**Editor(s)** Tomi Westerlund

**Group author** University of Turku

**Language** Finnish

**Pages**

15

---

### Abstract

The rapid development of unmanned drones has opened their use to a variety of different operating environments. Different operating environments and targets require different performance, especially in terms of drone positioning. Satellite-based positioning methods generally provide a reliable way of positioning. However, in all situations and environments, a satellite-based positioning system is not available. Therefore, this research project has looked at image-based positioning methods, which are not dependent on satellite systems, thus providing an alternative way of positioning for drones.

In the wildNAV project, an image-based positioning algorithm was developed that utilizes deep features to calculate the UAV's position, especially when flying over unbuilt areas. The method is based on RGB light images taken by the UAV's camera and open-source satellite images, between which essential common features are searched for. Experimental results show that image-based positioning is comparable to traditional satellite-based methods, which serve as benchmarks. Compared to current visual odometry methods, our solution is designed for long-range UAV flights.

**Provision** This publication is part of the implementation of research funding of the Scientific Advisory Board for Defence (MATINE). ([www.defmin.fi/matine](http://www.defmin.fi/matine)) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Defence Ministry.

**Keywords** satellite navigation, unmanned aerial vehicles, national defence, comprehensive defence approach, research

---

**ISBN PDF** 978-951-663-154-0

**ISSN PDF**

2984-102X

---

**URN address** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-663-154-0>

---

## Sisältö

<b>1</b>	<b>WildNAV – Dronit luonnossa</b> .....	7
1.1	Satelliitivapaa kuvapohjainen paikannus.....	7
1.2	Aineisto ja menetelmät .....	8
1.3	Tulokset ja pohdinta.....	11
1.4	Loppupäätelmät ja tulokset.....	15

# 1 WildNAV – Dronit luonnossa

Viimeisten vuosien aikana miehittämättömien dronien kehitys on ollut nopeata mahdollistaen niiden hyödynnettävyyden erilaisissa tehtävissä ja käyttöympäristöissä. Erilaiset käyttöympäristöt ja -kohteet vaativat erilaista suoriutumiskykyä ja kyvykkyyttä suorittaa tehtävä. Tehtävän suorittamisen kannalta paikannus ja sen tarkkuus ovat merkityksellisiä asioita. Satelliittipohjaiset menetelmät tarjoavat pääsääntöisesti luotettavan menetelmän paikannukselle. Kaikissa tilanteissa ja ympäristöissä satelliittipohjainen paikannusjärjestelmä ei ole kuitenkaan käytettävissä, sen tarkkuus ei ole riittävä tai siihen ei voi luottaa. Siksi tässä hankkeessa on tutkittu kuvapohjaisia paikannusmenetelmiä, jotka eivät ole riippuvaisia satelliittijärjestelmistä tarjoten näin vaihtoehtoisen tavan dronien paikannukseen.

WildNAV-tutkimushankkeen tuloksista on julkaistu tieteellinen julkaisu IEEE:n *International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)*-konferenssissa (10.1109/ICMERR56497.2022.10097798) ja siitä on myös julkaisut vapaasti saatavilla oleva esipainos Arxiv-palvelussa (<https://arxiv.org/abs/2210.09727>). Menetelmän lähdekoodi on vapaasti ladattavissa Githubissa (<https://github.com/TIERS/wildnav>). Tässä hankkeen loppuraportissa tuodaan esille tutkimuksen pääkohdat.

## 1.1 Satelliitivapaa kuvapohjainen paikannus

Päätavoitteena hankkeessa oli kehittää paikannus algoritmi, joka ei hyödynnä satelliittipohjaista paikannusjärjestelmää vaan hyödyntää vain monokulaarista laajakulmakameraa dronilentojen aikana. Tällainen lähestymistapa on merkityksellinen tilanteissa, joissa satelliittisignaalia ei voida luotettavasti käyttää tai varavaihtoehtona, jolla varmistetaan, että droni saavuttaa määränpäänsä tai ainakin kykenee laskeutumaan turvallisesti ennalta määritettyyn paikkaan.

Omat haasteensa algoritmien kehittämiseksi on valittu kohdeympäristö eli luonto, jossa kuvapohjaista paikannusta hyödynnetään. Luonnolla tarkoitetaan ympäristöjä, joissa on niukasti tai ei ollenkaan keinotekoisia rakenteita, kuten rakennuksia ja teitä. Rakennetun ympäristön vähäisyys muuttaa triviaalin piirteiden sovittamisen ja homografian laskemisen haastavaksi ongelmaksi. Ongelman ydin on siis löytää merkittäviä piirteitä luonnonympäristössä.

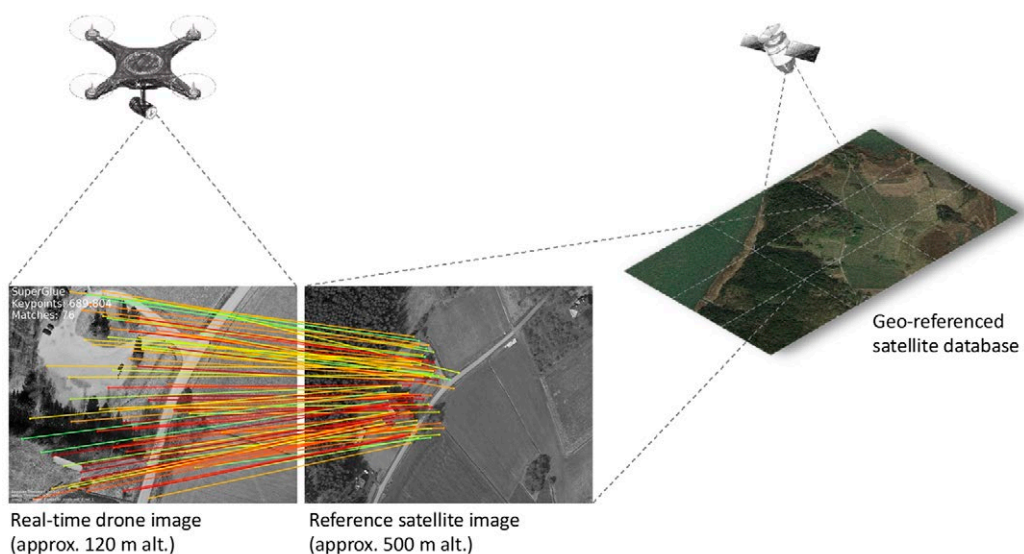


Neuroverkkoja käyttämällä pystymme tarjoamaan tarkkoja paikannustuloksia ja löytämään yhteisiä piirteitä dronien ottamien valokuvien ja satelliittikuvien välillä. Toinen huomattava ominaisuus toteutetussa paikannusalgoritmissa on se, että esikartoitusprosessi ei vaadi paikanpäällä droneilla lentämistä. Kartta on rakennettu yksinomaan avoimen lähdekoodin satelliittikuvista. Tavoitteena on mahdollistaa dronin itsenäinen paikannus missä tahansa edellyttäen, että se on laillisesti ja fyysisesti mahdollista (vaarallisten ympäristöolosuhteiden vuoksi).

## 1.2 Aineisto ja menetelmät

WildNAV-hankkeessa kehitimme kuvapohjaista paikannusalgoritmia, jonka avulla dronit pystyvät laskemaan maantieteelliset koordinaatit. Menetelmä perustuu RGB-valokuvien merkittävien ominaisuuksien vertailuun. Vertailussa hyödynnetään dronien ottamia kuvia, joita verrataan ennalta tehtyyn karttaan, joka koostuu georeferoiduista avoimen lähdekoodin satelliittikuvista. Koetulokset osoittavat, että kuvapohjainen paikannus on verrattavissa perinteisiin satelliittipohjaisiin menetelmiin, jotka toimivat referenssitietojen lähteenä. Verrattuna nykyaikaisiin visuaalisiin odometria -menetelmiin ratkaisumme on suunniteltu pitkille, korkealle lentäville droneille. Alla oleva kuva (Kuva 1) havainnollistaa kuvapohjaisen paikannuksen toimintaa.

**Kuva 1.** Hankkeessa kehitetyn kuvapohjaisen paikannusmenetelmän havainnekuva (Copyright © 2022, IEEE)



Tarkka kuvien piirteiden sovittaminen on hyödyllistä vain, jos droonikameran valokuvat voidaan liittää tarkasti maantieteellisiin koordinaatteihin. Tältä osin olemme, että droonin lentoalue on tiedossa etukäteen, joten kartta kyseiselle vyöhykkeelle voidaan rakentaa ja ladata droonin tietokoneeseen mahdollistaen sen käytön lennon aikana. Droonille ladattava kartta koostuu suorakaiteenmuotoisista alueista, jotka edustavat RGB-satelliittikuvia. RGB-satelliittikuvien resoluutio on noin  $1400 \times 1200$  pikseliä. Kullakin näistä alueista on sama perspektiivi, kameran näkymä on kohtisuora maan pintaan ja alue on rajaus tarjoaa samanlaisen näkökentän kuin laajakulmakamera. Yksi näistä osista näkyy alla kuvassa, jossa läpinäkyvä valkoinen suorakulmio edustaa georeferoitua karttalaatikkoo.

**Kuva 2.** Esimerkkikuva georeferoidusta karttaosuudesta (Copyright © 2022, IEEE)



Hankkeen kokeellisessa osiossa otettiin droonilla valokuvia, joilla testattiin kehitettyä paikannusalgoritmia. Valokuvat otettiin aurinkoisessa säässä (ei-kaupunkiympäristössä) noin 120 metrin korkeudesta. Jokainen valokuva otettiin samasta perspektiivistä (kamera kohti maan pintaa). Aineiston keräämiseen käytettiin H20T-kameraa, jossa oli 12 Megapikselin RGB-sensori, jolla on  $82,9^\circ$  näkökenttä ja 4,5 mm polttoväli. Kuvien keräämiseen käytettiin DJI Matrice 300 -droonia, jota ohjasi manuaalisesti ihmislentäjä kuvan 3 osoittamalla alueella.

**Kuva 3.** Testialueen satelliittikuva (Copyright © 2022, IEEE)



Kuvien sovitukseen käytettiin SuperGlue-neuroverkkoa, joka laskee ja sovittaa ominaisuuksia ulkoilmakuvista. Se valittiin luomamme paikannusalgoritmin osaksi sen erinomaisen suorituskyvyn vuoksi. SuperGlue soveltuu erinomaisesti myös kuviin, joiden perspektiivi ja valaistusolosuhteet eroavat huomattavasti. Tämä ominaisuus on erittäin tärkeää ajatellen satelliitin ja droonin ottamiin kuviin luonnollisesti tulevia eroja mm. kuvien ottamisajankohdan, sääolojen ja kuvakulman vuoksi. Ennen kuin SuperGlue-neuroverkko valittiin ominaisuuksien sovittajaksi droonin ottamien valokuvien ja satelliittikuvien välillä, harkittiin myös mallin sovitus -tekniikkaa, jossa pyritään löytämään pieniä kuvan osia, jotka vastaavat mallikuvaa, ja skaala-invarianttia ominaisuusmuunnos -algoritmia, jota käytetään paikallisten piirteiden havaitsemiseen ja kuvailemiseen digitaalisissa kuvissa. Jälkimmäiset kaksi vaihtoehtoa hylättiin niiden suhteellisen korkean laskenta-ajan ja epätarkkuuden vuoksi verrattuna valittuun SuperGlue -neuroverkkoon. Erityisesti laskenta-aika on merkityksellinen droneissa ja muissa liikkuvissa robottialustoissa niiden rajallisen laskentakapasiteetin johdosta.

Maantieteellisten koordinaattien laskemiseksi algoritmi käyttää melko yksinkertaista lähestymistapaa. Se alkaa kääntämällä droonin ottamaa valokuvaa kuvametadatan avulla, joka tarjoaa tiedon droonin ja kameran gimbalin orientaatiosta karttaosioiden suuntaan sopivaksi (aina pohjoiseen päin suunnattu). Kääntö on tarpeen, koska se parantaa ominaisuuksien määrää, joita voidaan parittaa kuvaparin kanssa. Toiseksi molempien kuvien (drooni ja satelliitti) ominaisuudet lasketaan ja paritetaan toisiaan vasten. Tätä prosessia toistetaan kaikille satelliittikuville ja droonin oletetaan olevan siinä karttaosassa, jossa on eniten vastaavuuksia nykyisen kamerakuvan kanssa. Ominaisuusparituksen jälkeen lasketaan perspektiivinen muunnos, joka muodostaa linkin paritettujen ominaisuuksien sijainnin ja niiden sijainnin välillä georeferoituneessa karttakuvassa. Koska paritettu karttaosa on suorakulmio, jolla on ennalta tiedetyt maantieteelliset koordinaatit, on mahdollista muuntaa pikselikoordinaatteja leveysasteiksi ja pituusasteiksi suoraviivaisella tavalla. Algoritmin tarkempi kuvaus löytyy aikaisemmin mainitussa julkaisussa ja se on ladattavissa Githubissa.

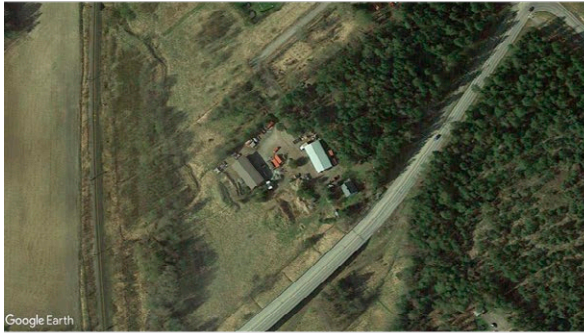
Valokuvaparin välillä olevien paritettujen piirteiden minimimäärä, joka mahdollistaa dronen sijainnin laskemisen, on neljä, muuten perspektiivikäännöstä ei voi laskea. Jos drooni lentää piirteettömien pintojen yllä, kuten pelloilla tai metsissä, kartan väärä osa voi olla parittunut kameran valokuvan kanssa, mikä johtaa virheellisiin maantieteellisiin koordinaatteihin.

### 1.3 Tulokset ja pohdinta

On olemassa useita tärkeitä tekijöitä, jotka vaikuttavat kuvapohjaisen paikannusalgoritmin tarkkuuteen. Näihin kuuluvat esimerkiksi sääolosuhteet ja valon määrä. Vuodenajan ja valaistuksen määrän mukaan droonin ottamat valokuvat saattavat sisältää enemmän tai vähemmän piirteitä, joita voidaan sovittaa lennon aikana mukana olevaan satelliittikarttaan. Kokeissa otetut kuvat otettiin vuotta myöhemmin, mutta samassa kuussa (toukokuu) kuin satelliittikuvat, jotta niiden samankaltaisuus maksimoitaisiin. Lisäksi lentäminen piirteettömien pintojen yläpuolella, kuten veden yläpuolella, voi tehdä kuvapohjaisen paikannusalgoritmin tehottomaksi.



**Kuva 4.** Vasemmalla on dronin ottama kuva samasta alueesta kuin oikean puoleinen satelliittikuva on otettu



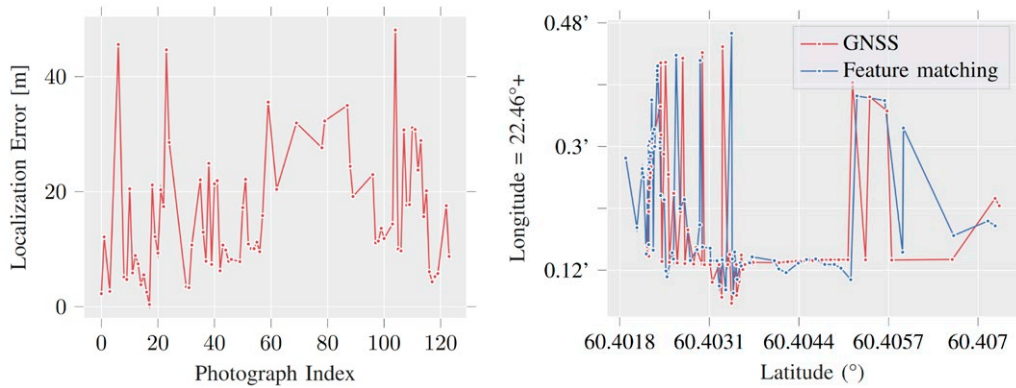
**Drone Camera Viewpoint**



**Geo Tagged Satellite Map**

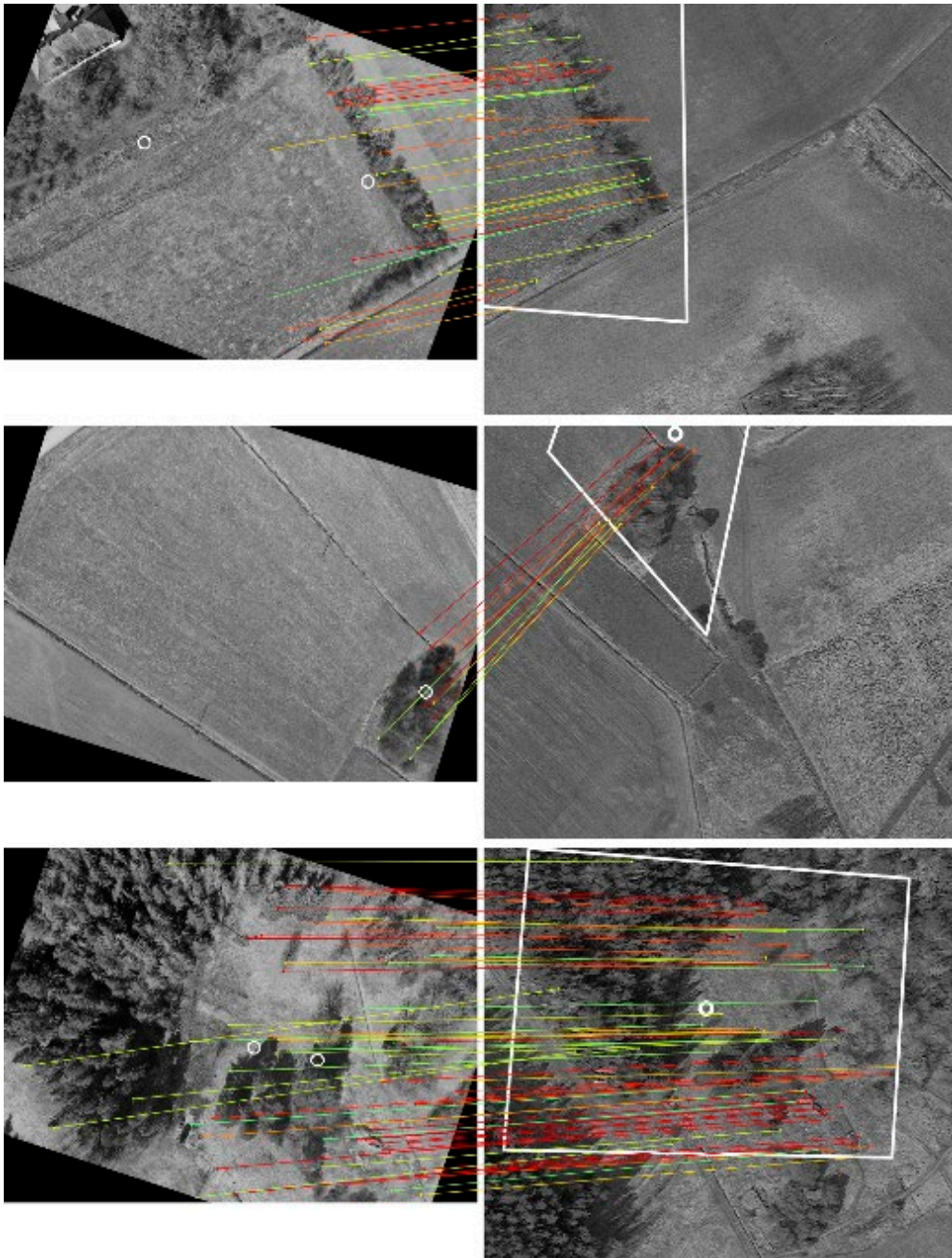
Paikannusmenetelmän virhe lasketaan ottaen huomioon laskettujen maantieteellisten koordinaattien läheisyys totuusarvolle, jota edustaa valokuvien satelliittimetadataa. Vertailu absoluuttisten satelliittikoordinaattien ja hankkeessa kehitetyn paikannusalgoritmin tarjoamien koordinaattien välillä näkyy kuvassa 5(a). Aineisto koostuu 126 valokuvasta, joista 77 onnistuttiin paikantaa kuvapohjaisilla algoritmeillamme. Valokuva katsottiin onnistuneesti paikannetuksi, jos etäisyys dronin GNSS-paikannuksen ja kuvapohjaisen algoritmin lasketun sijainnin välillä oli alle 50 metriä. Koko aineiston keskimääräinen virhe 15,82 metriä viittaa siihen, että uusi paikannusmenetelmä on vastaa tarkkuudeltaan satelliittipohjaisia paikannusmenetelmiä, joiden virhe voi vaihdella 1–20 metristä selkeällä taivaalla. Satelliittipohjaisten paikannusjärjestelmien tarkkuus riippuen paljolti muun muassa käytettävissä olevien satelliittien lukumäärästä. Kuvapohjaisen menetelmän tarkkuus (kts. Kuva 4(b)) ei luonnollisesti riitä lentämiseen matalilla korkeuksilla, joissa on esteitä.

**Kuva 5.** (a) Lasketut koordinaatit ja satelliitin määrittelemä sijainti, (b) Paikannusvirhe (Copyright © 2022, IEEE)



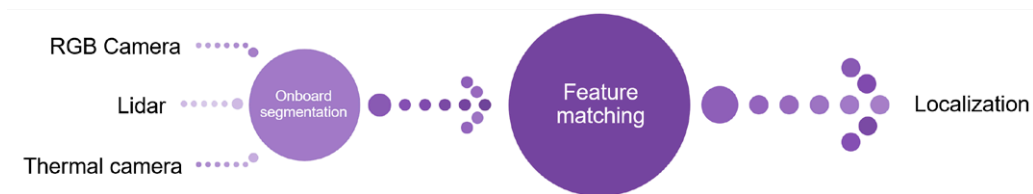
Toinen tärkeä seikka on, että keinotekoiset rakenteet kuten rakennukset ja tiet yleensä sisältävät enemmän piirteitä, joita voidaan seurata ja sovittaa, verrattuna luonnonobjekteihin. Tämä on syy, jonka vuoksi piirteiden sovittaminen muuttuu haastavaksi tehtäväksi, kun sitä suoritetaan alueilla, joissa on vähän tunnistettavia piirteitä. Lisäksi luonnonympäristön avoimen lähdekoodin valokuvat ovat alhaisempaa resoluutiota ja niitä päivitetään harvemmin kuin kaupunkiympäristön. Kuvassa 6 on esimerkkejä onnistuneista droonin ottamien kuvien ja satelliittikuvien yhdistämisistä. Kuvista näkee myös, että kehitetty malli pystyy tarjoamaan tarkkoja sovituskappaleita myös silloin, kun droonin ottamat valokuvat eroavat satelliittikuvien perspektiivistä ja lisäksi niissä on vähän merkittäviä merkittäviä piirteitä.

**Kuva 6.** Esimerkkejä onnistuneista droonin ottamien kuvien ja satelliittikuvien yhdistämisistä (Copyright © 2022, IEEE)



## 1.4 Loppupäätelmät ja tulokset

wildNAV-tutkimushanke keskittyi kehittämään menetelmiä mahdollistamaan autonomisten miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien pitkäaikainen autonomia. Projektissa tutkittiin dronien adaptiivisia sensorifuusiomenetelmiä tavoitteena saada ne tunnistamaan maaperän piirteet ja hyödyntää tunnistettuja piirteitä navigointiin sekä riskitietoiseen reittisuunnitteluun. Tällä pyrittiin kehittämään droneille navigointiratkaisua mahdollistamaan autonomisen toiminnan erilaisilla alueilla kuten rakennusten lähellä tai sisällä sekä täysin itsenäisen pitkäaikaisen tehtävien suorittamisen ilman satelliittisignaalia. Hanke tuotti menetelmän dronien satelliittivapaalle paikannukselle. Menetelmä hyödynsi SuperGlue-neuroverkkoa tunnistamaan dronin ottamista kuvista piirteitä ennalta ladatusta satelliittikuvista.



Tutkimus antaa hyvän lähtökohdan jatkotutkimuksille. Erityisesti erilaisten aktiivisten sensoreiden kuten lidar-sensoreiden tuottaman datan hyödyntäminen paikannustarkkuuden parantamiseksi olisi hyödyllistä. Lidar-sensoreiden tuottamasta datasta voidaan luoda myös heijastavuus- ja etäisyyskuvia, joiden hyödynnettävyyttä paikannuksessa ei ole arvioitu. Nämä kuvat ovat herättäneet mielenkiintoa, koska ne ovat käytettäviä myös epäsuotuisissa olosuhteissa, kuten sateessa tai sumussa. Yllä olevan kuvan mukaisesti voidaan luoda tarkempi paikannusmenetelmä hyödyntämällä useampia sensoreita RGB-kameran kanssa.

Hankkeen tuloksista on julkaistu tieteellinen artikkeli IEEE:n *International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR)* -konferenssissa ([10.1109/ICMERR56497.2022.10097798](https://doi.org/10.1109/ICMERR56497.2022.10097798)) ja siitä on myös julkaistu vapaasti saatavilla oleva esipainos Arxiv-palvelussa (<https://arxiv.org/abs/2210.09727>). Menetelmän lähdekoodi on vapaasti ladattavissa Githubissa (<https://github.com/TIERS/wildnav>).





Puolustusministeriö  
Försvarsministeriet  
Ministry of Defence



Ministry of Defence

MATINE

the Scientific Advisory Board  
for Defence

Eteläinen Makasiinikatu 8, Helsinki

PO Box 31, 00131 Helsinki

[defmin.fi](http://defmin.fi)

ISSN PDF: 2984-102X

ISBN PDF: 978-951-663-154-0