



Kustannustehokas lennokkiparvi ilma- ja pintavalvonnassa

Pasi Pertilä, Minna Väilä, Juho Uotila,
Robert Arajärvi, Juha Jylhä

Patria Aviation Oy

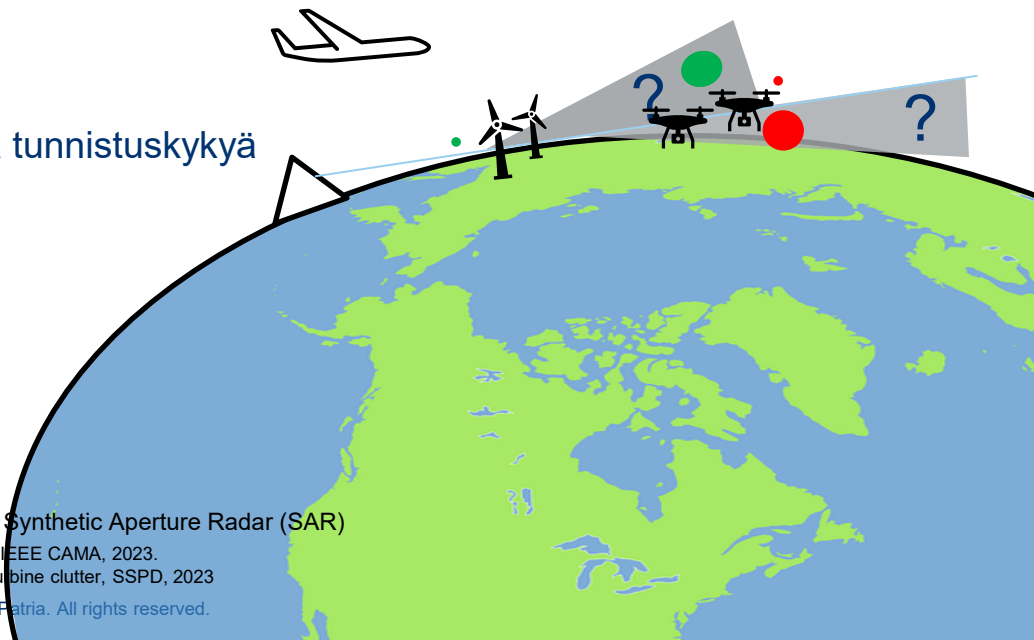
MATINE-seminaari 20.11.2025

Hanketiedot

Rahoitus: 190 000 €

Kesto: 1.2.2025–31.12.2026 (1. vuosi)

- Havaittu, iso kohde
- Havaittu, pieni kohde
- Ei havaittu, pieni kohde
- Ei havaittu, iso kohde



[2] J. Nissilä, P. Pertilä, M. Väilä ja J. Jylhä, Development of the line scatterer model for bistatic wind turbine clutter, SSPD, 2023.

Projektin tutkimus

- Kustannustehokkaiden lennokkien soveltuvuus oman alueen ilma- ja pintavalvontaan.
- Teknologiat: dronet, neuroverkot, datafuusio, seurantamenetelmät, suorituskykymallit.

- **Konsepti:**

- Lennokin sensorin tiedon käsittely on lennokin kyydissä
- Lennokin laskennan tulokset välitetään fuusiolaskentaan
- Fuusiolaskenta laskee ja välittää paikallisen tilannekuvan eteenpäin

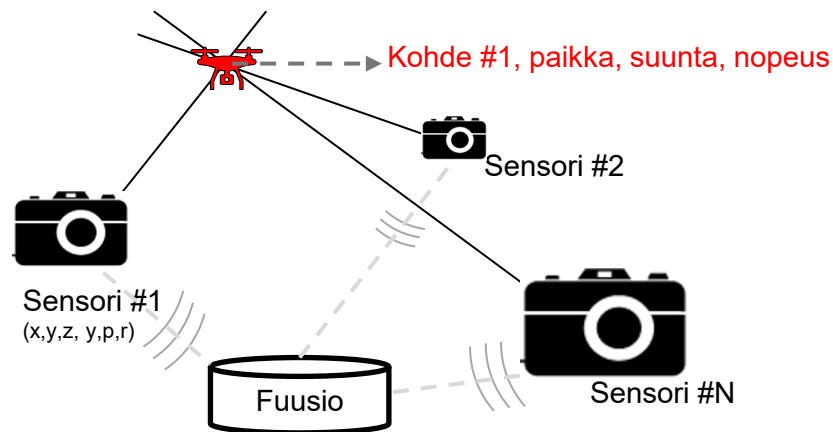
- **Sensorissa:** kuvapohjainen monimaaliseuranta

1. Sensorissa tehdään havaintoja eri kohteista
2. Havaitut kohteet asetetaan seurantaan
3. Seuratut kohteet tunnistetaan (luokitellaan)

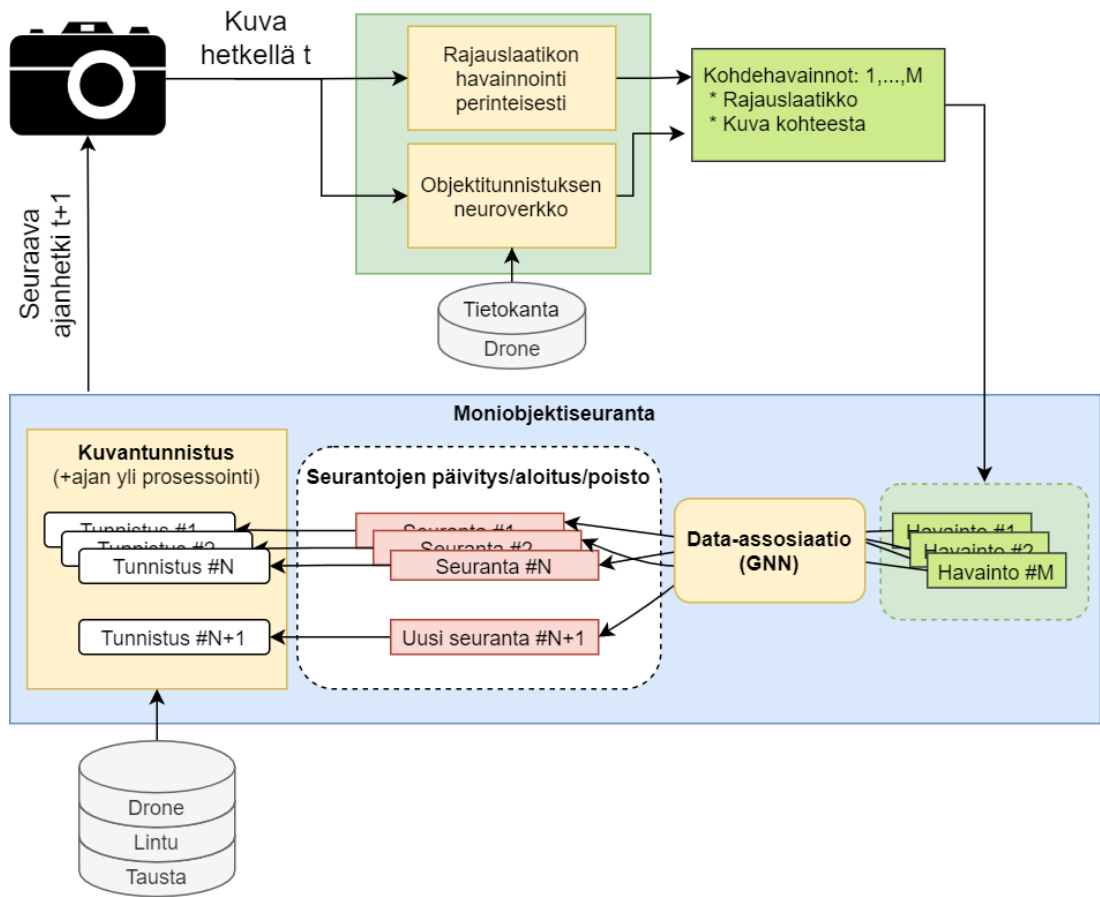
- **Sensoriparvi:** Paikallinen tilannekuva

- Missä kohteet ovat, mihin ne menevät, mitä ne ovat

- Projekti on toteutettavuustutkimus.
- Algoritmikehitystä 70%, suorituskyvyn mallinnusta 30%.
- Ratkaisuja kehitetään simulaatio- sekä mittausdatalla.
- Tiedonsiirto, kalibrointi, omapaikannus rajattu pois.



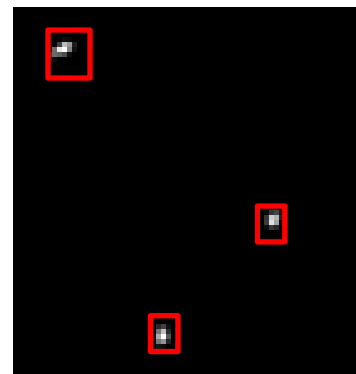
Sensorin signaalinkäsittely



Kohteiden perinteinen havainnointi

Patria

- Perinteisiä havaintomenetelmiä kohteiden kuvapohjaiseen koordinaattien arvioimiseen:
 1. “Blob”-detektori: havainto yksittäisestä kuvasta
 - Etsitään harmaatasoja kynnystämällä kuvasta erottuvia alueita.
 - Tulos: kohdetta ympäröivä rajaustilatikko (engl. bounding box)
 2. Liikkuvan kohteen havainnointi kuvasarjasta
 - Edellyttää kuvan “taustan” estimointia
 - Kaikki taustasta poikkeavat alueet ovat mahdollisia kohteita
 - Tulos: kohdetta ympäröivä rajaustilatikko (engl. bounding box)
- Menetelmät toimivat vaihtelevasti jos tausta on monimutkaista/liikkuu
 - Kasvillisuus ja vesistöt aiheuttavat harhahavaintoja
 - Horisonttidetektorin avulla rajataan taivas jolle havainnointi tehdään
- Menetelmät ovat laskennallisesti kevyitä

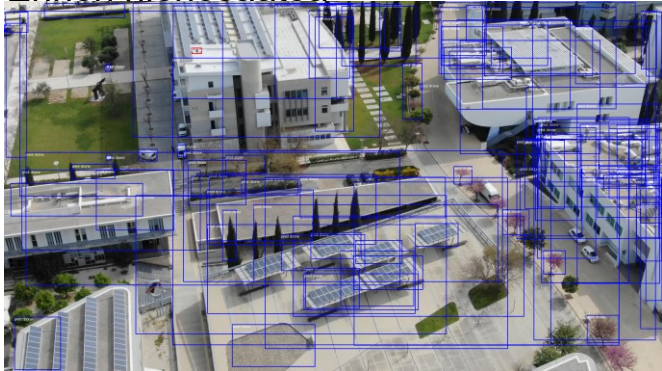


Kohteiden havainnointi neuroverkoilla

- Neuroverkolla voidaan kuvasta havaita objektit sekä niiden kategoriat
 - Menetelmiä
 - 1-vaiheiset CNN: YOLO, SSD
 - 2-vaiheiset CNN: Faster RCNN
 - Transformer (+CNN) pohjaiset: DETR -variantit
- Tässä: Faster RCNN (ResNet50 konvoluutioverkko backend):
 - UAV Dataset -dronekuvatietokanta (~1000 kuvaa) [1]
 - ~2500 muita (pääosin omia, myös kaukaisia) drone -kuvia
 - Opetuksessa 50 epochia
- Ulostulo:
 - Droneja ympäröiviä rajauslaatikoita (engl. bounding box)
 - Luokittelun pisteytys välillä [0,1]

Käytössä 4K kuvan jakaminen CNN:n käyttämään kuvakokoon [2]

Ennen hienosäätöä



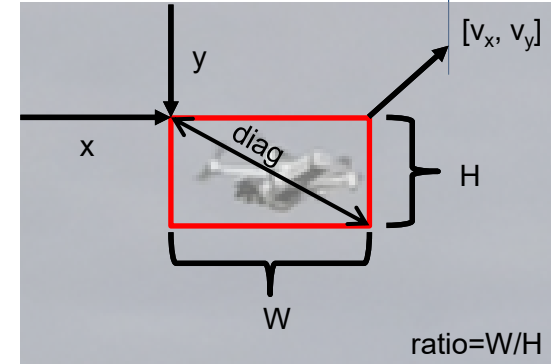
Hienosäätöä 1 epoch



[1] Rafael Makrigrigoris, Nicolas Souli, & Panayiotis Kolios. (2022). Unmanned Aerial Vehicles Dataset (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7477569>
[2] Unel, F. Ozge, Burak O. Ozkalayci, and Cevahir Cigla. "The Power of Tiling for Small Object Detection." In 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 582–91. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2019

Moniobjektiseuranta

- Seuranta (engl. tracking) tehdään kuvatasossa:
 - Kohteelle ID ja tila: $[x, y, v_x, v_y, \text{diag}, \text{ratio}]$.
 - Tila estimoidaan suodattamalla (Kalman-suodin)
 - Seuranta sietää puuttuvia havaintoja, tarkentaa objektin sijaintia, tuottaa nopeustietoa
 - Peräkkäisistä kuvista löytyvä havaintorypäs aloittaa seurannan
 - Seuranta lopetetaan, jos siihen ei assosioida havaintoja T sekuntiin
 - Havainnot yhdistetään seurantoihin data-assosiaatiolla
 - Global Nearest Neighbor (GNN) assosioi havainnot optimaalisesti seurantoihin
 - Neuroverkkojen avulla on toteutettu vastaavanlaisia seuranta-algoritmeja:
 - SORT [1], DeepSORT [2], OC-SORT [3] → keskittyvät mm. jalankulkijoihin, okklusioon jne.
 - Tässä ratkaisu toteutettu kaukaisten kohteiden seurannan näkökulmasta
 - Linnut sekä lennokit voivat esiintyä parvissa.
 - Havainnot kaukaisista kohteista ovat epäluotettavia.
 - Suuri seuranta- & havaintomäärä voi saturoida laskentaa.
- Parven yksittäisten jäsenten sijasta seurataan parvea



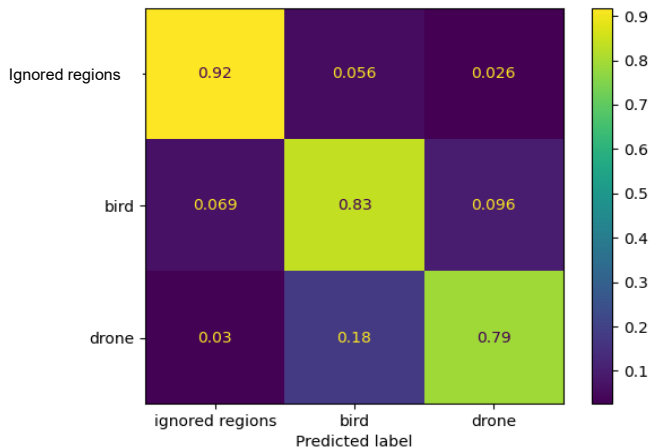
[1] Bewley, Ge, Ott, Ramos, Upcroft. Simple Online and Realtime Tracking. (ICIP), 2016.

[2] Wojke, Bewley, Paulus, Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric, (ICIP 2017).

[3] Cao, Pang, Weng, Khrodgar, Kitani, Observation-centric sort: Rethinking sort for robust multi-object tracking, (CVPR 2023)

Kohteiden luokitus

- Kun kohde on seurannassa, sen rajauslaatikon sisältö luokitellaan konvoluutioverkolla.
 - Käytössä EfficientNet-B0 [1]: Vähän parametreja, suoritussykyinen
- Kohteen rajauslaatikko → [32 x 32] → CNN → [Drone, Bird, Background]
 - Neuroverkon painojen hienosäätö useiden eri tietokantojen avulla:
 - Train: 79k bird, 72k drone, 76k background.
 - Testi: 12k bird, 19k drone, 10k background.
 - Opetuksen aikana suoritetaan kuvien augmentointia.
 - Testidatan sekaannusmatriisi (Kuva)
 - Noin 80-90% tunnistuskyky testidatalla
- Tunnistuksessa kumuloidaan luokitustuloksia ajan yli
 - Myös tutkimusongelma



[1] Mingxing Tan and Quoc V. Le. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. ICML 2019

Yhteenveto: Havainnointi, seuranta, luokittelu

Patria

Alkuperäinen kuva



Havainnot



Seurantojen luokittelu: bird / drone / background



Moniobjektiseuranta: Kohteilla on identiteetti



Mittaukset: algoritmien validointi ja jatkokehitys

- Eri algoritmeja testattiin koemittauksien avulla
 1. Kohde-drone: Väri: valkoinen, mitat: 30,40,10 [cm] (kuva)
 - Vaikea havaita valkoisen värin ja pienen koon vuoksi
 2. Kamera-drone: kuvadata: 4K video @ 30 fps



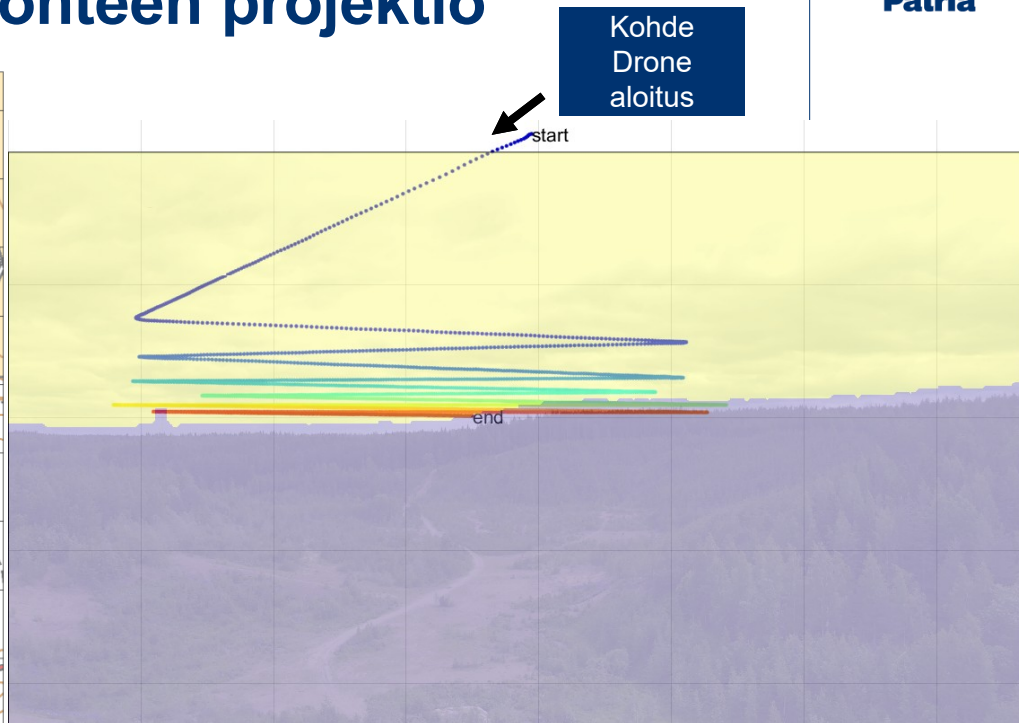
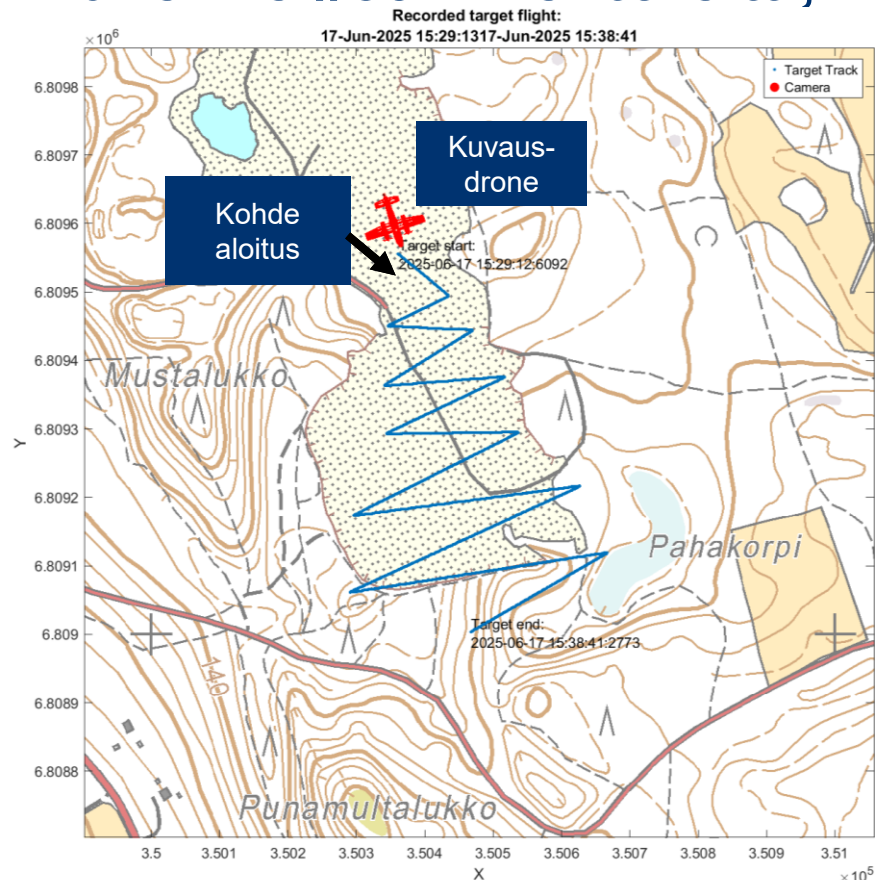
Havaintokyvyn analysointimenettely:

1. Dronejen paikat sekä orientaatiot tallennettiin
2. Ajettiin havainto-, seuranta- sekä luokittelualgoritmit kameradronen videokehyksille
3. Kohde-dronen projektio laskettiin kamera-dronen kuvaan samoille videokehyksille
4. Kohde merkitään havaituksi, jos havainnon etäisyys on alle kynnyksarvon kohde-dronesta (75px)
5. Tulos: Todennäköisyys havaita kohde etäisyyden funktiona

Seuranta- ja tunnistuskyvyn analysointi toteutetaan tarpeen mukaan

Tallenne #392: Lentoreitti, kohteen projektio

Patria



Tallenne #392: Havainnot ja seurannat

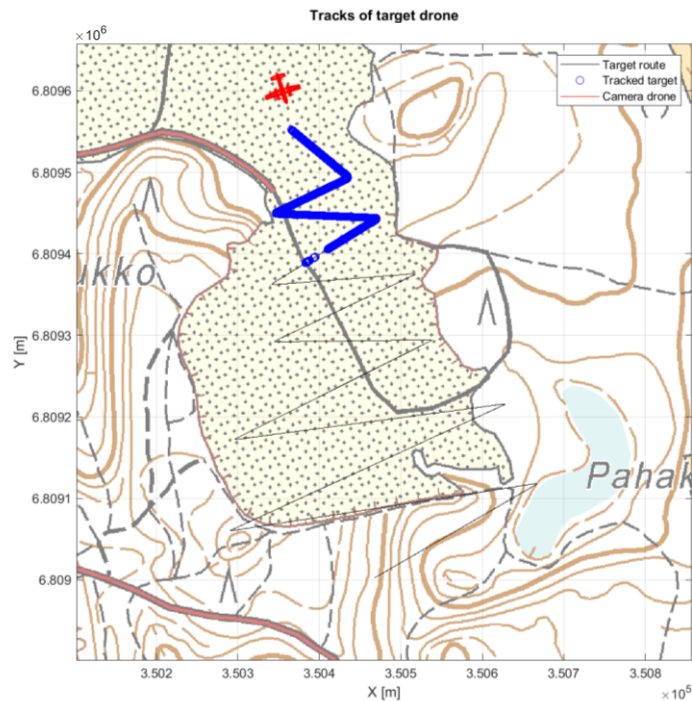
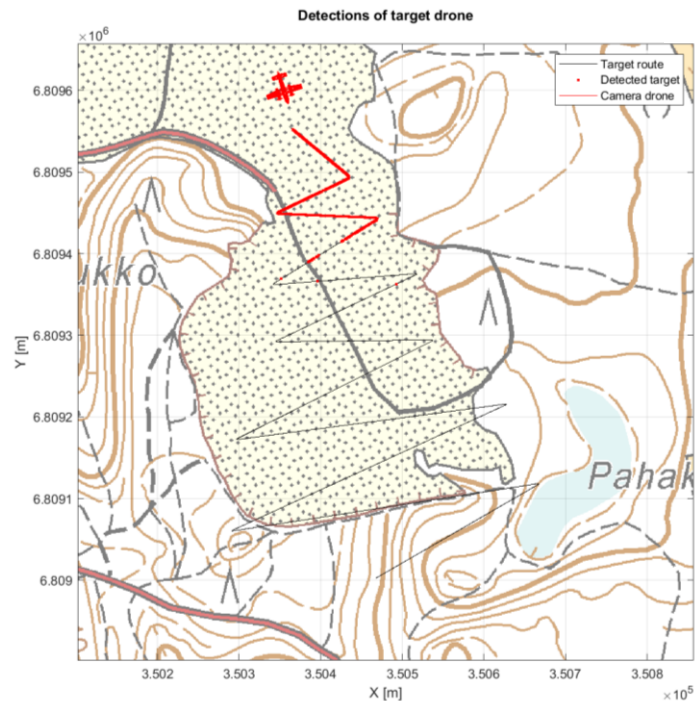
Patria

000: background
000: bird
000: drone



Tallenne #392: Havainnot ja seurannat

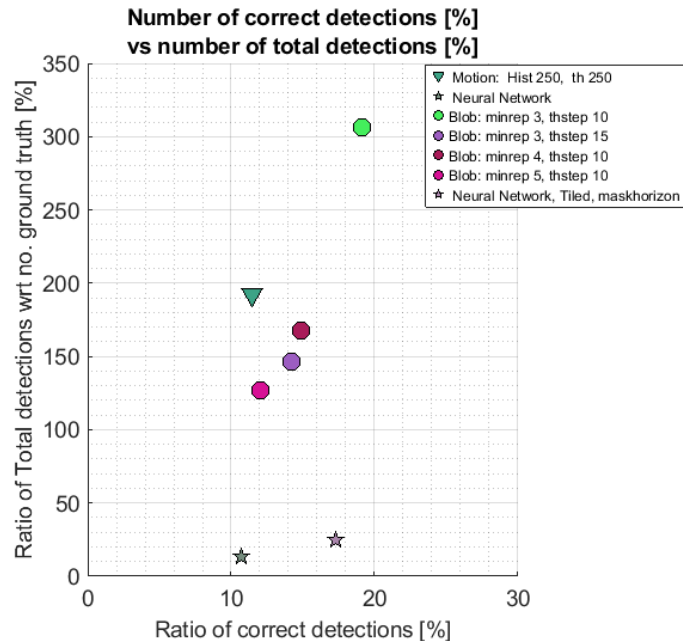
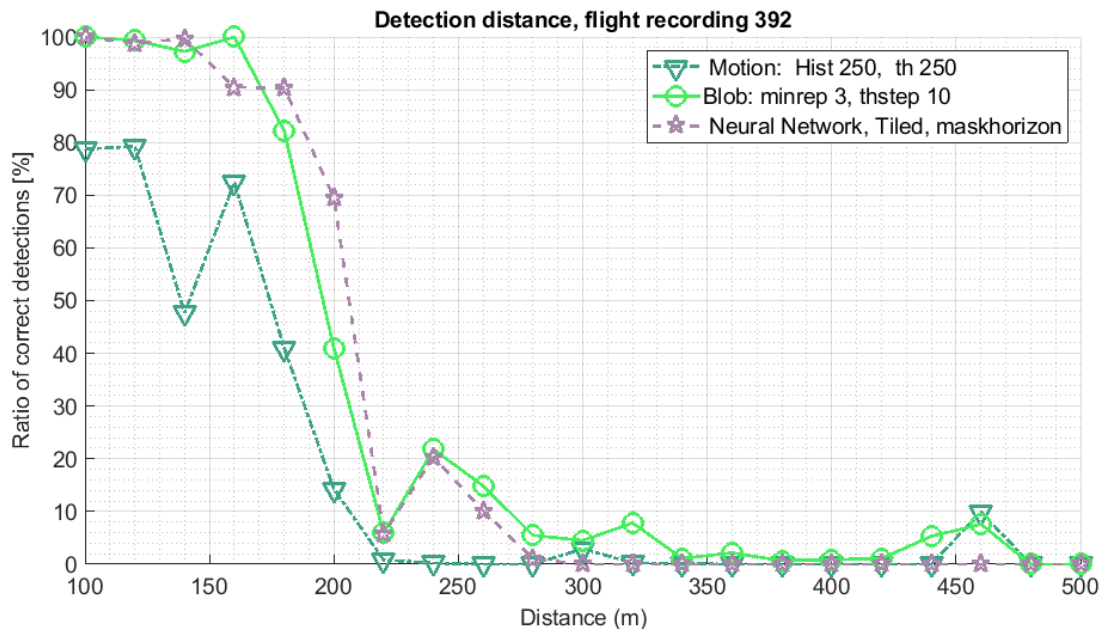
- Tosirataan assosioidut havainnot (vas.) sekä seurannat (oik). Algoritmi: NN



Tallenne #392: Havaintoalgoritmien vertailua

Patria

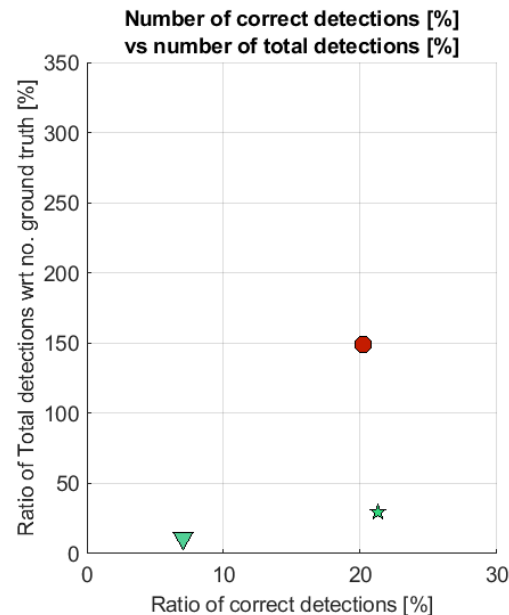
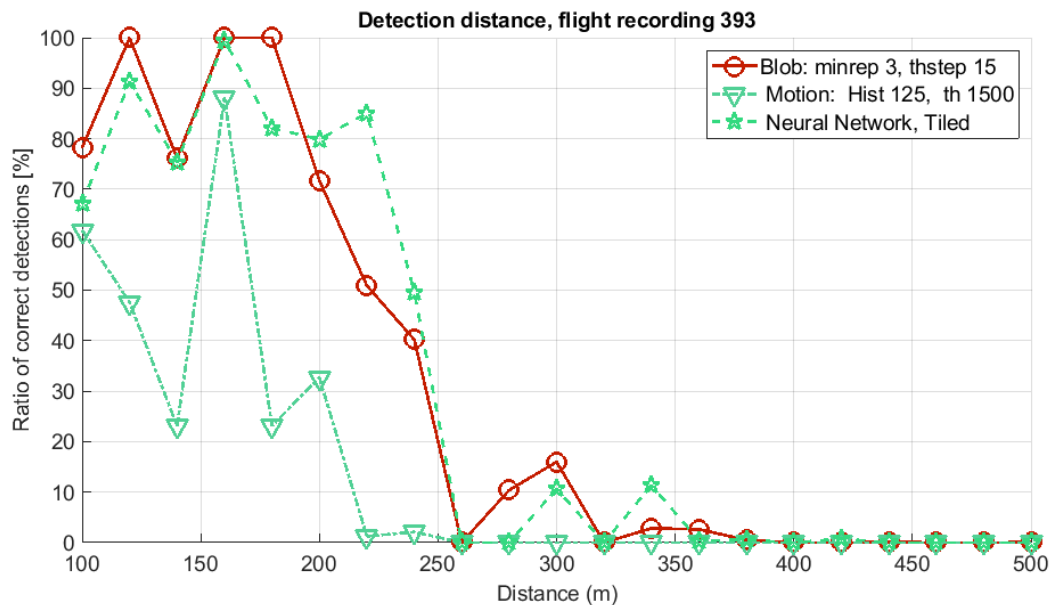
- Kohteen havaintojen määrä / etäisyyskori (vasen kuva, parhaat parametrit)
- Kaikkien havaintojen määrä vs. oikeiden havaintojen määrä (oikea kuva)
 - Blob-tunnistin (○): suoritussykyisimmillään tuottaa paljon harhahavaintoja
 - Neuroverkko (☆): vähän vääriä havaintoja → syötekuvan ositus + TH-lasku paransi tuloksia
 - Liikepohjainen algoritmi (▽) tuottaa vähiten havaintoja kohteesta



Tallenne #393: Havaintoalgoritmien vertailua

Patria

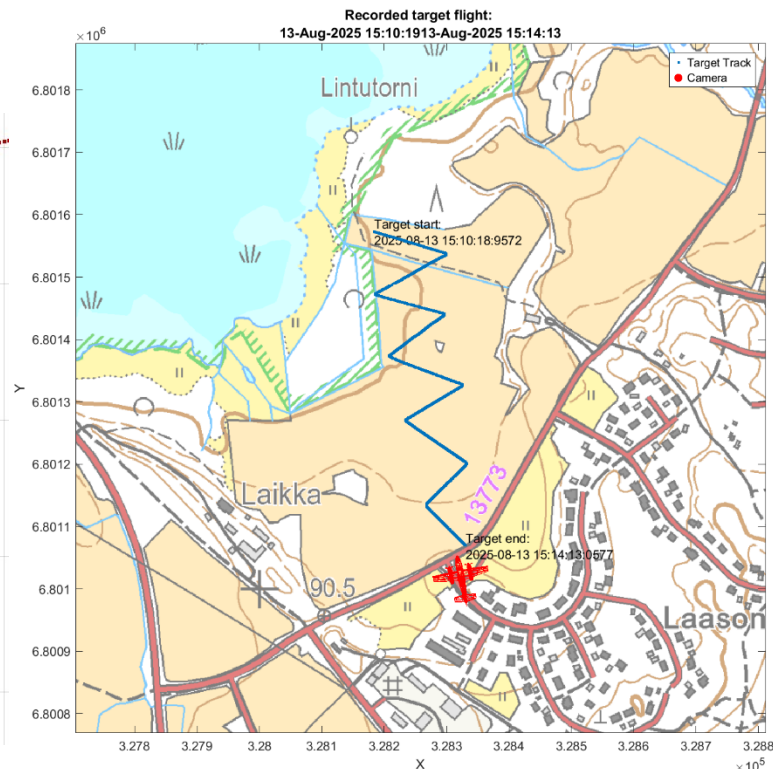
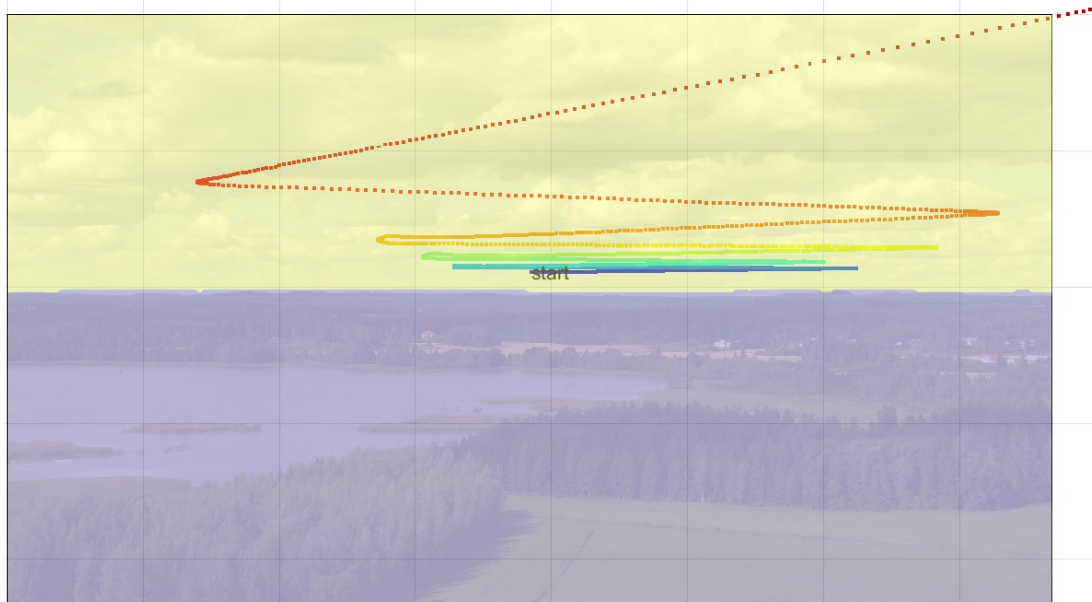
- Samansuuntainen tulos kuin edellisellä lennolla



Tallenne #420: Häviötön 2x-zoom

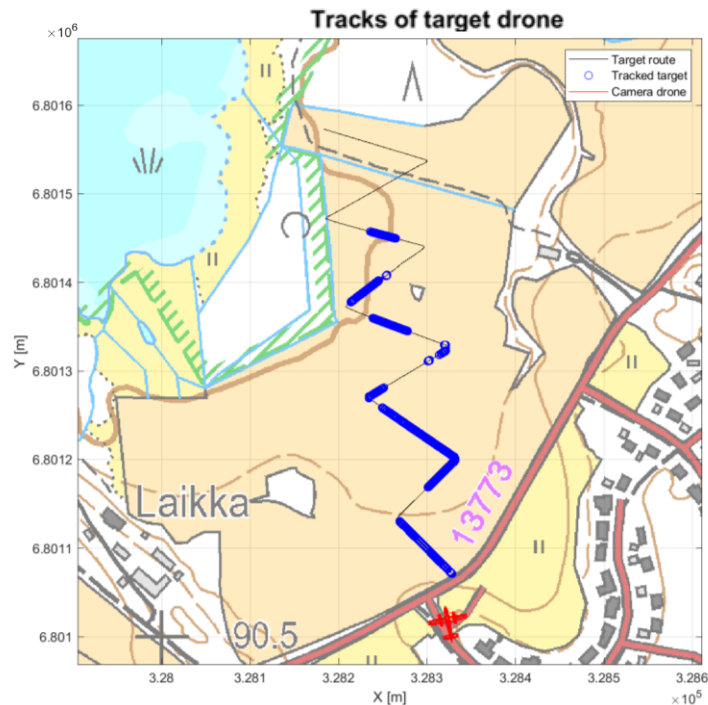
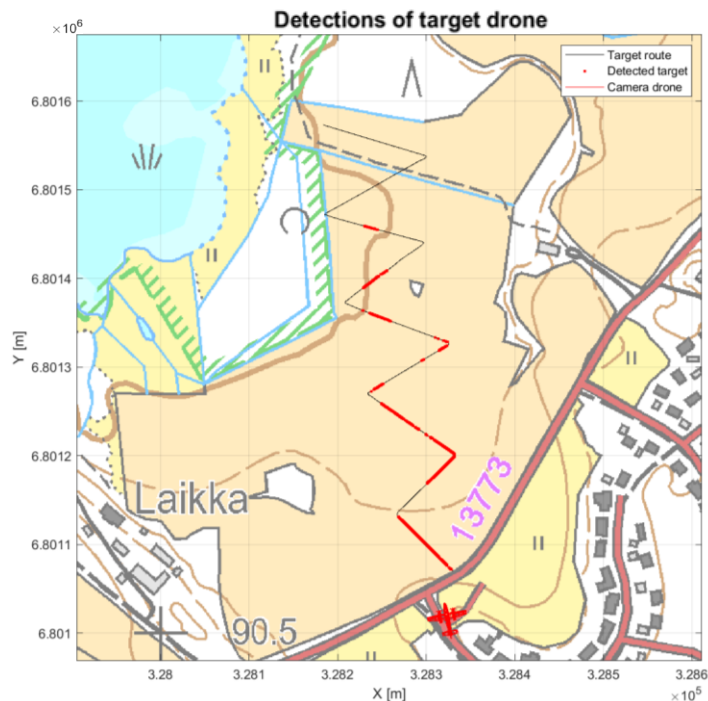
Patria

- Kameralla saavutettiin häviötön zoomaus 2x
 - Kohteen pikselikoko kasvaa → kasvaako havaintoetäisyys?



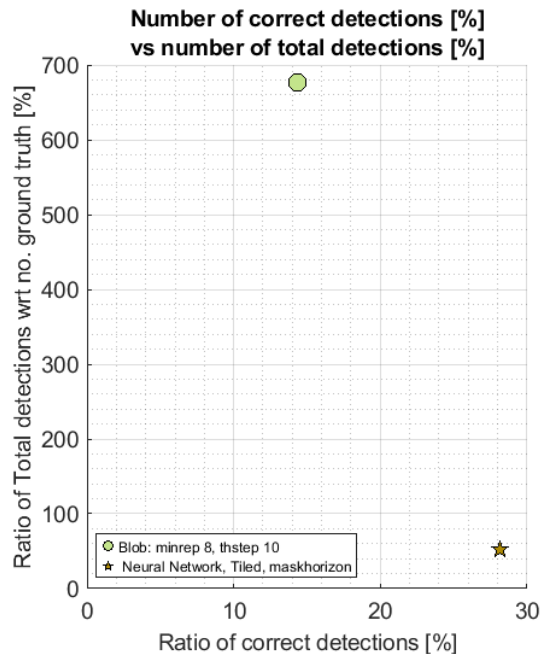
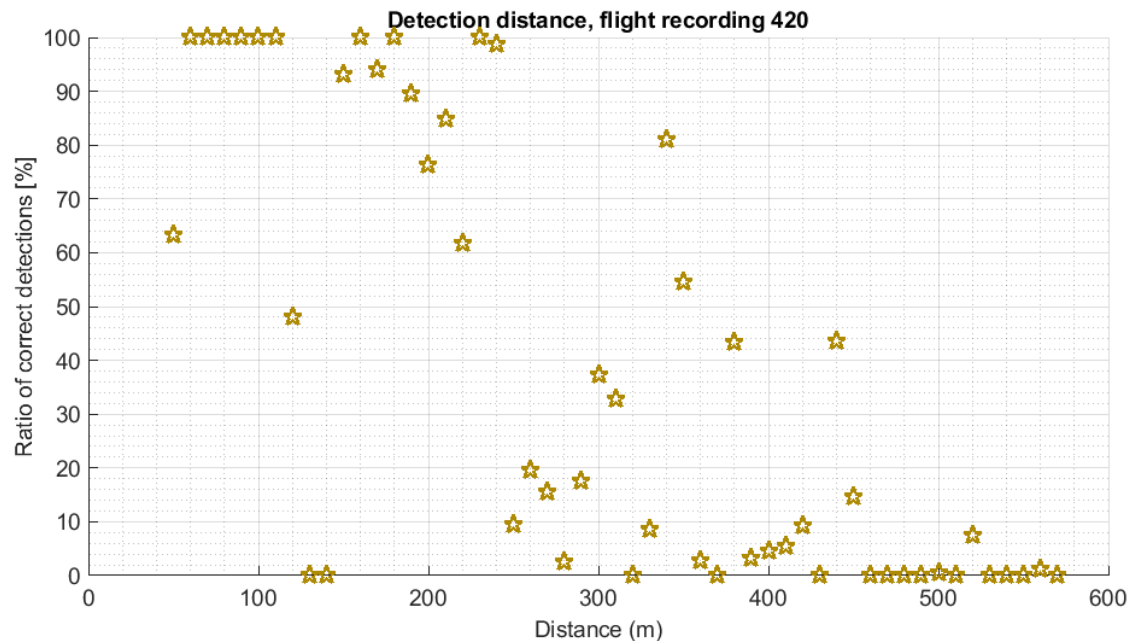
Tallenne #420: Häviötön 2x-zoom

- Havainnot kartalla (vasen). Seurannat kartalla (oikea).
- 2x-zoomauksella havaintokykyä muodostuu pidemmältä etäisyydeltä kuin ilman zoomausta



Tallenne #420: Häviötön 2x-zoom

- Zoomauksen avulla havaintoetäisyys kasvaa



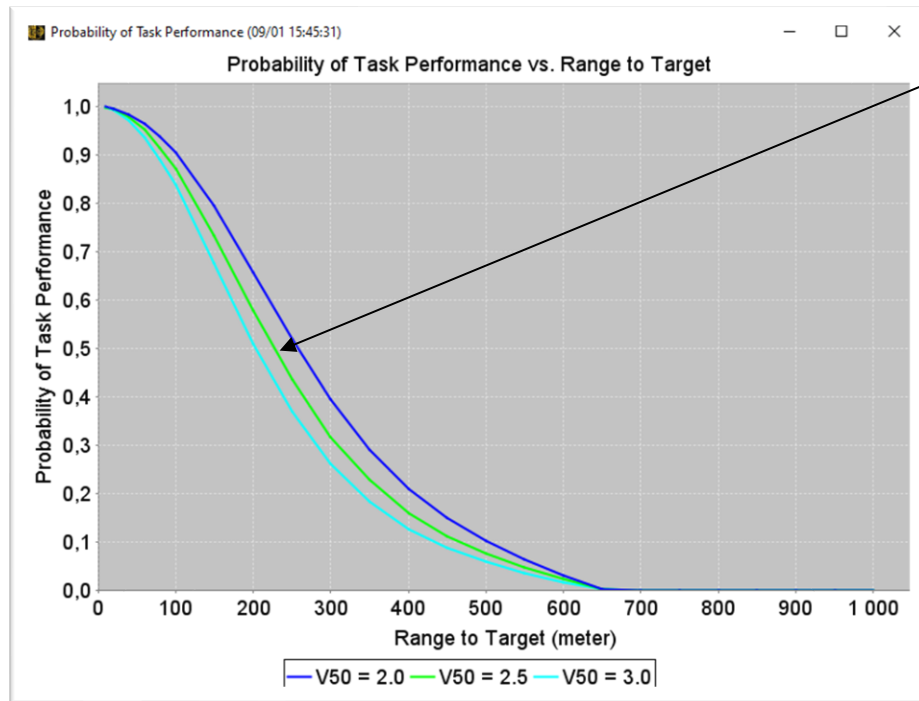
Sensorin suorituskykymallin kehitys

- Kameran kykyä havaita kohde mallinnetaan tässä NV-IPM (The night vision integrated performance model) -menetelmällä
 - USA:n armeijan kehittämä työkalu optisten järjestelmien analysointiin
 - Syötteenä valaisuolosuhteet, kohteen ominaisuudet, väliaineen ominaisuudet, etäisyys, sekä kameran optiikan ja kennon ominaisuudet.
 - Ulostulo: todennäköisyys havaita, luokitella, tunnistaa kohde kuvasta
- NV-IPM:n parametreja säädetään vallitseviin olosuhteisiin, käytettyihin laitteisiin, kuvattuun kohteeseen, sekä algoritmin suorituskykyyn.
 1. Kalibroidaan malli mitattujen suorituskykyarvojen avulla
 2. Kalibroidun mallin avulla voidaan analysoida muita kohteita sekä eri olosuhteita
 - Malli tuottaa myös luokittelun suorituskykyarvoja

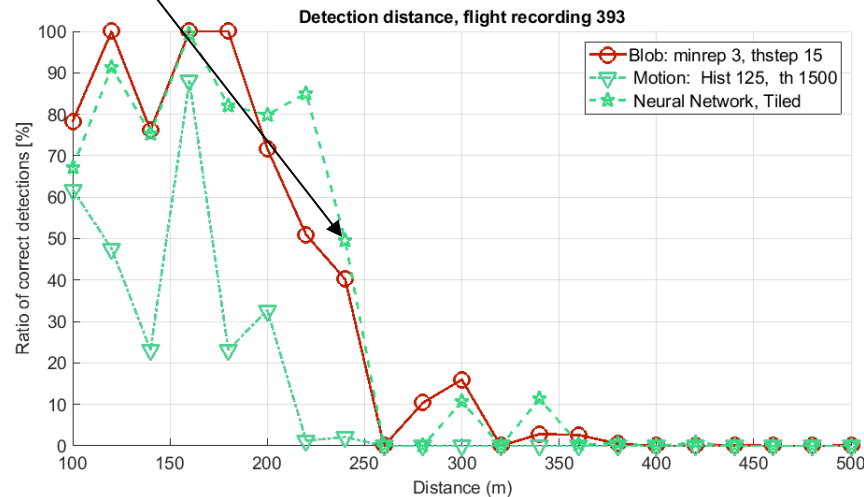
NV-IPM:n kalibrointi (1x-zoom)

Patria

- Kun laitteen optiikka on mallinnettu, voidaan määrittää kalibrointipiste, joka selittää havainnot vastaavan kokoisesta kohteesta samoissa valaisuolosuhteissa. ($V50=2.5$)
- 2x-zoomauksen kalibrointi voidaan tehdä vastaavasti

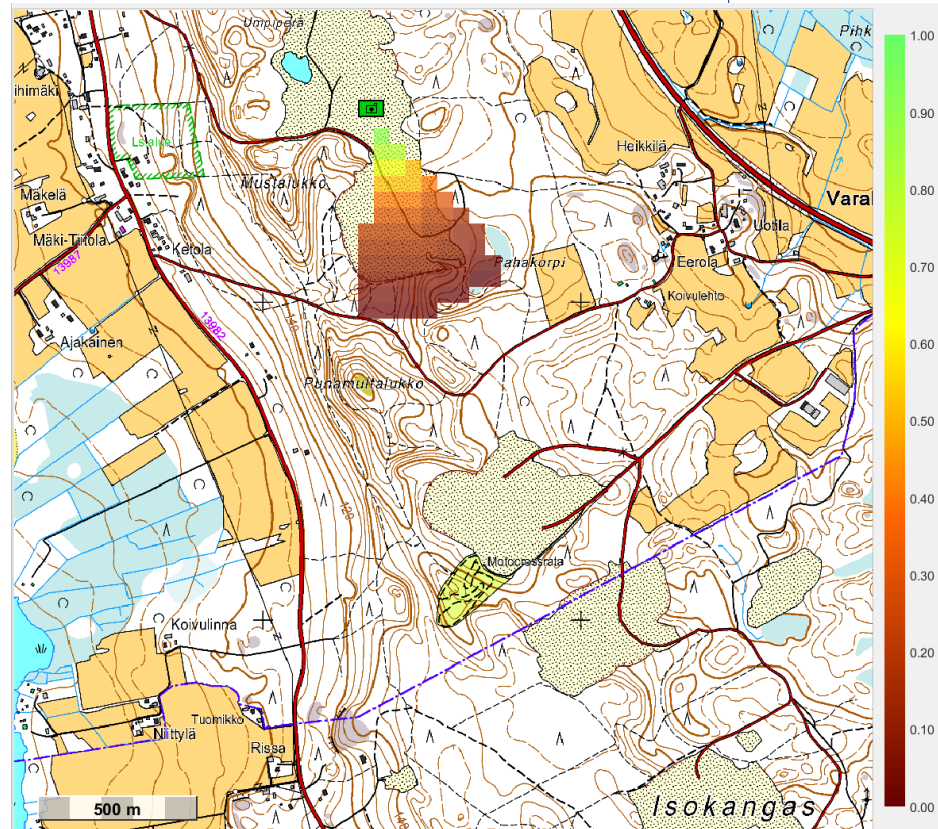


Kalibrointipiste (250 m ja PD 50 %)



Sensorin suorituskykymalli

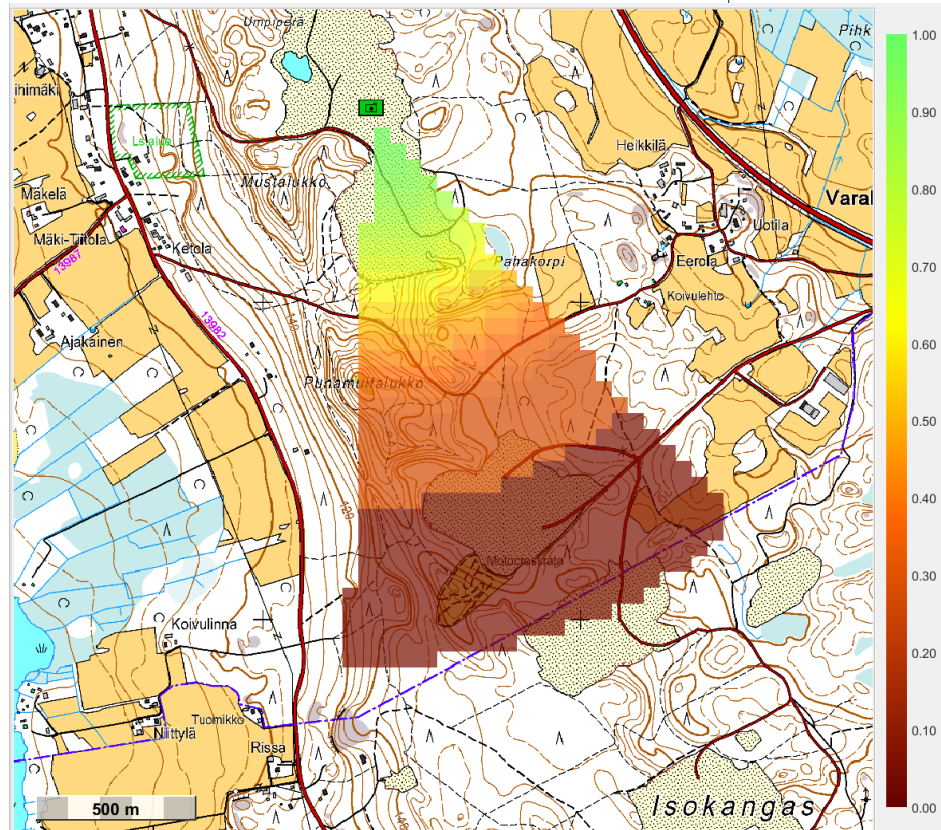
- NV-IPM:n tuottama sensorin suorituskyvyn malli vietiin karttapohjaiseen mallinnustyökaluun.
- Kuvausolosuhteet valitaan käyttöliittymästä
 - Esim. valaisu- ja sääolosuhteet.
- Laskennassa huomioidaan kohteen koko, korkeus, sensorin kuvauskorkeus, kuvaussuunta ja näkökenttä (vertikaali sekä horisontaali)
- Kuvassa on esitetty sensorin havaintokyky mittaustilanteesta vastaavassa asetelmassa
- Olosuhteina mallissa Suomen kesä hyvällä näkyvyydellä
- Kamera ja kohde samalla korkeudella 1 000 m AMSL
- **Kohteen koko: 0,35 m**



Sensorin suorituskykymalli

Patria

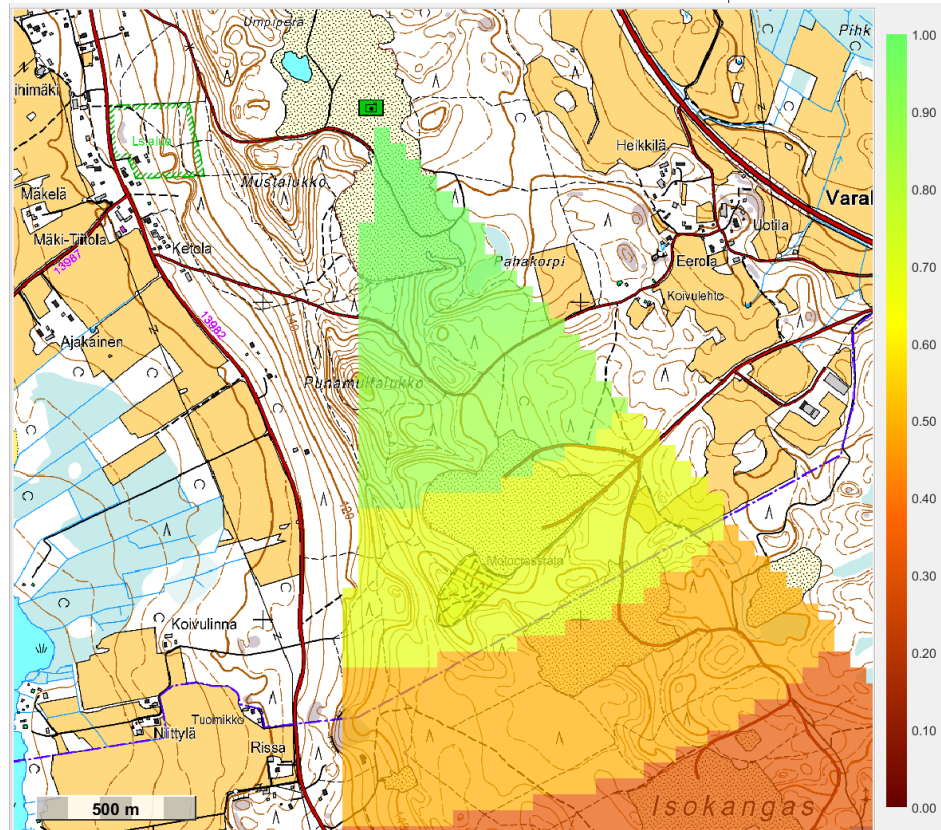
- Kuvassa on esitetty sensorin havaintokyky mittaustilanteesta vastaavassa asetelmassa
- Olosuhteina mallissa Suomen kesä hyvällä näkyvyydellä
- Kamera ja kohde samalla korkeudella 1 000 m AMSL
- **Kohteen koko: 1 m**



Sensorin suorituskykymalli

Patria

- Kuvassa on esitetty sensorin havaintokyky mittaustilanteesta vastaavassa asetelmassa
- Olosuhteina mallissa Suomen kesä hyvällä näkyvyydellä
- Kamera ja kohde samalla korkeudella 1 000 m AMSL
- **Kohteen koko: 5 m**



- Tutkittiin ja toteutettiin dronen havainnointi-, seuranta-, luokittelualgoritmeja
- Kehitettiin horisonttidetektor- sekä parven tunnistusalgoritmit
- Suoritettiin kenttämittauksia ja suorituskyvyn analysointia kahdella dronella
 - Havaintotodennäköisyyden arviointi etäisyyden funktiona
 - Dronen (30 cm) havainto edellytti ~4 pikselin leveyttä kuvassa
 - Optinen zoom (2x) nosti havaintoetäisyyttä
- Sensorin suorituskykymalliksi valittiin NV-IPM
 - Optiikan ja muiden tekijöiden mallinnustyö
 - Mallin parametrien kalibrointi mittaustuloksilla
- Toteutettiin suorituskykymallin laskentamenetelmä karttapohjalle
 - Mahdollistaa suorituskyvyn visualisoinnin eri kohteille eri kuvausolosuhteissa.



Yhteenveto ja jatkosuunnitelmat

Jatkosuunnitelma

- Sensorin suorituskykymallin kehittäminen
 - Suorituskykymalli huomioi maaston muodot
 - Kohteen taivasta vasten näkyminen
 - Sensorin tarkkuuden mallinnus
 - Erilaisten sensorityyppien mallinnus
 - esim. maasijoitteinen dronetutka
- Lennokkiparven valvontakyvyn algoritmien ja suorituskykymallin kehittäminen
 - Paikannus-/seuranta-algoritmikehitys simulaatioiden avulla
 - Suorituskykymallin kehitys lennokkiparven havainto- ja seurantakyvyille
- Skenaariotarkastelut: valvontakonseptien vertailu

