

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Säteilylähteiden paikannus parvirobotiikan ja 3D-SLAM-menetelmien avulla

Juha Röning, Oulun yliopisto
PL 4500, 90014 Oulun yliopisto, puh. 0294 482794

Tuukka Petäjä, Helsingin yliopisto
Roy Pöllänen, Säteilyturvakeskus
Marko Kauppinen, Veikko Halonen, Rajesh Raveendran,
Antti Tikanmäki, Ville Pitkänen, Oulun yliopisto
Ella Häkkinen, Runlong Cai, Frans Korhonen, Juha Kangasluoma, Helsingin yliopisto

Tiivistelmä: Radioaktiivisten aineiden aiheuttama uhka voi vaikeuttaa tai jopa kokonaan estää yhteiskunnan kannalta kriittisiä toimintoja. Taloudelliset, sosiaaliset, poliittiset ja maanpuolustukselliset vaikutukset voivat olla arvaamattomia. Lieviä uhkatilanteita voi syntyä esimerkiksi radioaktiivisia aineita käsittelevissä laitoksissa tai valvottaessa henkilöiden ydinturvallisuutta. Huomattavasti vakavampia tilanteita esiintyy reaktorionnettomuuksissa, sotatilanteissa tai mahdollisen terroritoiminnan yhteydessä. Vaarallisten aineiden tiedustelua tekevän henkilöstön turvallisuus on eräs keskeinen syy kasvaneeseen kiinnostukseen miehittämättömien alusten käytölle säteilymittauksissa. Miehittämättömien ilma-alusten ja maa-ajoneuvojen yhteistoiminnalla pystytään tehostamaan säteilylähteen paikannusta ylläpitäen samalla järjestelmän toimintavarmuus. Tutkimuksen päätavoitteena oli tuottaa menetelmiä säteilylähteiden havainnoimiseksi ja paikantamiseksi miehittämättömien alusten yhteistoiminnalla. Tutkimuksessa kehitettiin laitealustoja soveltumaan säteilylähteiden yhteistoiminnalliseen nopeaan paikantamiseen. Usean robotin yhteistoimintaan liittyvien paikannusalgoritmien tutkimusta varten luotiin simulaatioympäristö. Simulaatioympäristön käyttö on erityisen tärkeää kustannustehokkuuden ja kenttätesteihin liittyvien riskien vuoksi. Simulaatioissa jäljitellään aitoja laitteita sekä mitattavan kohteen käyttäytymistä mahdollisimman yksityiskohtaisesti. Säteilylähteiden paikannusta testattiin Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen harjoitusalueella järjestetyssä kenttätestissä, jossa multikopteriin oli kiinnitetty kaupallinen gammaspektrometri ja tutkimuksessa jatkokehitetty kenttämittauksiin soveltuva pienikokoinen hiukkaslaskuri. Kenttätestissä kerätyssä mittausdatassa havaittiin korrelaatio hiukkaslaskurin mittaaman aerosolipitoisuuden ja gammaspektrometrillä mitattun säteilyvoimakkuuden välillä. Kerättyä mittausdataa käytetään myös simulaatioympäristön jatkokehitykseen.

1. Johdanto

Säteilyturvakeskuksen tiloissa havaittiin 17.2.2016 plutonium-238 vuoto alfasäteilylähteen käytöstä poiston yhteydessä tehdyissä mittauksissa. Toisessa tapauksessa keskuksen ulkopuolella sijaitsevaan hiukkaskerääjään kerääntyi poikkeuksellisen paljon radioaktiivista cesium-137:ää 3-4.3.2016, jonka alkuperä pystyttiin paikantamaan 9.4.2016 radioaktiivisia pienjätteitä vastaanottavan yrityksen tiloihin. Kyseinen säteilylähdetyyppi on yleisesti käytössä teollisuuden pinnankorkeusmittauksissa. Molemmista tapauksista oli kriittistä paikantaa radioaktiivisten aineiden kontaminaatio mittaushenkilöstöä vaarantamatta.

Yllä mainitut ovat esimerkkitapauksia, jollaisia saattaa tapahtua radioaktiivisia aineita käsittelevissä laitoksissa tai valvottaessa henkilöiden säteilyturvallisuutta. Huomattavasti vakavampia

tilanteita saattaa esiintyä vakavissa reaktorionnettomuuksissa, sotatilanteissa tai terroritoiminnan yhteydessä, joissa suuri määrä ihmisiä – sotilaita, siviilejä tai ylipäätään tilanteen selvittämiseen osallistuvia henkilöitä – saattaa altistua ionisoivaa säteilyä lähettävillä radioaktiivisille aineille. Radioaktiivisten aineiden aiheuttama uhka voi vaikeuttaa tai jopa kokonaan estää yhteiskunnan kannalta kriittisiä toimintoja. Taloudelliset, sosiaaliset, poliittiset ja maanpuolustukselliset vaikutukset voivat olla arvaamattomia.

Vaarallisten aineiden tiedustelua tekevän henkilöstön turvallisuus on eräs keskeinen syy kasvaneeseen kiinnostukseen miehittämättömien alusten käytölle säteilymittauksissa. Miehittämättömien ilma-alusten ja ajoneuvojen yhteistoiminnalla pystytään tehostamaan säteilylähteen paikannusta ylläpitäen samalla järjestelmän toimintavarmuutta.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena on kehittää uusia menetelmiä säteilevien aineiden havaitsemiseksi ja paikantamiseksi. Ilma-alusten nopeus sekä liikkumisvapaus suosivat niiden käyttöä ulkona, kun taas rakennuksen sisällä sekä vaikeissa tuuliolosuhteissa maa-ajoneuvot pystyvät liikkumaan paremmin. Parvirobotiikan keinoin paikannustehtävän suoritus sietää alusten vikaantumista, sallii alusten lukumäärän ja konfiguraation muutokset, sekä mahdollistaa automaattisen adaptoitumisen vallitseviin olosuhteisiin. Lisäksi 3-ulotteisien paikannus- ja mallinnusmenetelmien (3D Simultaneous Localization And Mapping, 3D-SLAM) käyttö on varteenotettava vaihtoehto GPS-paikannuksen kannalta haastavissa tilanteissa. Tutkimuksen tavoitteena oli myös toteuttaa pieneen miehittämättömään ilma-alukseen (multikopteri) kiinnitettävä kondensaatiohiukkaslasakuri (CPC) ja testata, miten sen havaitsemat hiukkaspitoisuudet muuttuvat lennettäessä säteilylähteiden läheisyydessä. Gammaspetrometrin käyttö on mukana tutkimuksessa, jotta voidaan havaita säteilylähteiden gammaenergiatasot lähteiden tunnistusta ja luokittelua varten.

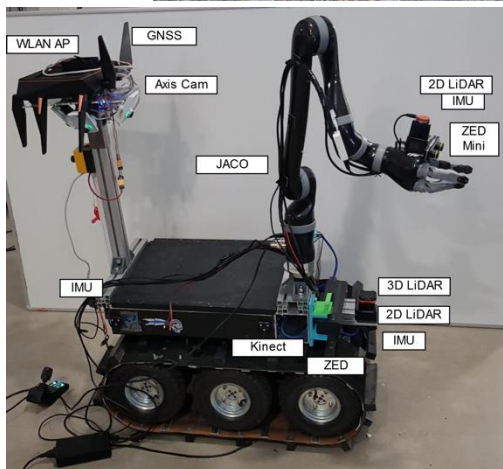
Tutkimuksessa on tarpeen tuottaa myös turvallinen kehitysympäristö parvirobotiikan tarpeisiin, jolla pystytään kehittämään tarvittavat algoritmit parviällyn vaatimissa ohjaussovelluksissa. Simulaatioympäristön käytön tavoitteena on mahdollistaa parviällyn sovelluksien turvallinen kehitys ja testaus. Simulaatioympäristön tulee olla myös mahdollisimman yhteensopiva käyttöjärjestelmien kanssa, joita käytetään todellisessa maailmassa yksittäisten robottiyksiköiden sisällä. Tämän lisäksi on tehtävä käytetyistä järjestelmistä robottiyksiköiden välillä mahdollisimman yhteensopivia, jotta robottiyksiköt voidaan mahdollisimman vaivattomasti integroida osaksi samaa järjestelmää.

3. Aineisto ja menetelmät

Todellisen maailman kenttätesteissä käytetään tämän tutkimuksen puitteissa Kromek GR1- ja GR1-A-gammaspetrometrejä, joiden avulla saadaan havaittua säteilylähteiden gammasäteilyn energiataso. Kyseiset gammaspetrometrit pohjautuvat CZT-sensoriin (kadmium-sinkki-telluuri), jolla on hyvä erottelutarkkuus sensorin havaitsemien gammasäteiden energiatasojen välillä. Kyseiset spektrometrit toimivat energiavälillä 30 keV–3 MeV. Kun tiedetään radioaktiivisen aineen hajoamistuotteiden muodostuksessa vapautuneiden gammasäteiden energiatasot, pystytään havaittujen säteiden energiajakauman perusteella myös päättelemään, mikä aine on kyseessä.

Reaaliaikaisten mittauksien kannalta tärkeä suure on gammaspetrometrin havaitsemien tapahtumien lukumäärä (counts per second, CPS), joka on sitä suurempi mitä lähempänä ollaan potentiaalista säteilylähdettä. Tämä tieto yhdistettynä mittausalueesta luotuu 3D-karttaan auttaa säteilylähteen paikan määrittämisessä. Lisäksi voidaan käyttää hyväksi tietoa, että piste-mäisestä gammasäteilylähteestä havaitun säteilyn intensiteetti pienenee vapaassa ilmassa likipitään neliöllisesti suhteessa etäisyyteen lähteestä.

Lisäksi tutkimuksessa käytetään Helsingin yliopiston Ilmakehätieteiden keskus INAR:ssa kehitettyä hiukkaslaskuria (condensation particle counter, CPC), joka mittaa ilman pienhiukkasten lukumääräpitoisuutta. Näyteilmassa olevat pienhiukkaset aktivoidaan kasvamaan 1-butanolin kondensaatiolla optisesti havaittavaan kokoon. Käytetyillä lämpötilasäädöillä CPC pystyi aktivoimaan puolet 10 nm halkaisijaltaan olevista hiukkasista ja 100 % havainnointitehokkuus saavutettiin 12 nm hiukkasille. Laitteen lämpötilaeroja kasvattamalla laskurin havaintotehokkuutta voidaan säätää. Leikkausraja- ja pitoisuuskalibroinnit tehtiin ennen testilentoja Helsingin yliopiston aerosolilaboratoriossa (e.g. [1]).



Kuva 1. Kenttätestauksessa käytetty kasikopteri ylhäällä, maarobottiyksikkö (Mörri) alhaalla vasemmalla ja kuusikopteri kehitystestaukseen oikealla.

Tutkimuksessa käytettävät robottialustat koostuivat yhdestä maarobottiyksiköstä ja kahdesta lentävästä kopteriyksiköstä, jotka ovat esitettynä kuvassa 1. Maarobottiyksikkö on varustettu tehokkaalla tietokoneella, Pixhawk-yhteensopivalla [2] alustan ohjaimella, kahdeksan antennin kolmikaistaisella WiFi-tukiasemalla, 2D- ja 3D-laserkeilaimilla, Kinect 2 RGB-D -kameralla sekä ZED-stereokameralla. Maarobottiyksikkö pystyy kantamaan suuren määrän hyötykuormaa, joten sitä käytetään myös langattoman verkon tukipisteenä robottiyksiköiden välillä.

DJI S1000+ -runkoon pohjautuva kasikopteri on tarkoitettu lentämään CPC ja Kromek GR1

1 Kangasluoma, J., Hering, S., Picard, D., Lewis, G., Enroth, J., Korhonen, F., Kulmala, M., Sellegri, K., Attoiu, M. and Petäjä, T. (2017) Characterization of three new condensation particle counters for sub-3 nm particle detection during the Helsinki CPC workshop: the ADI versatile water CPC, TSI 3777 nano enhancer and boosted TSI 3010, Atmos. Meas. Technol. 10, 2271-2281.

2 <http://pixhawk.org>



kiinnitettynä. Kasikopteri toimii myös pääasiallisena kartoituskopterina hyvän lentovakauden ja sopivan suuren hyötykuorman kantokyvyn vuoksi. Lentoyksiköiden ohjausalgoritmien testausta tehtiin aluksi nelikopterilla, joka valitettavasti joutui onnettomuuteen eräässä automaattisen lennon testissä. Tämän vuoksi testaustarkoitusta varten rakennettiin myöhemmin tilalle kuusikopteri, joka pystyy suurempaan hyötykuormaan ja on luotettavampi tilanteessa, jossa yksi moottori menetetään yllättäen kesken lennon. CPC-laitetta ei voinut käyttää kuusikopterissa, mutta muuten varustus on samankaltainen kummassakin kopterissa. Koptereiden varustuksena ovat NVIDIA Jetson TX2 + Pixevia Core X1 -minitietokone, kaksikaistainen Wi-Fi, Pixhawk-yhteensopiva lentokontrolleri, 433 MHz pitkän kantaman telemetriaradio, LiDAR-korkeusmittari sekä ZED-stereokamera.

Robottien välisen yhteensopivuuden takaamiseksi, jokaisessa robotissa käytetään samaa robotikäyttöjärjestelmää, tässä tapauksessa ROS (Robot Operating System, [3]) Kinetic-versiota. ROS koostuu noodeista, joilla jokaisella on oma spesifinen tehtävä järjestelmäkokonaisuudessa; esimerkiksi SLAM, navigointi ja robottien kontrollointi ovat jokainen hajautettuna oman noodi-kokonaisuuden sisällä. Kommunikointi noodien välillä tapahtuu TCP/IP-verkkoprotokollan yli, joten noodien välinen kommunikointi voi tapahtua suoraan myös langattomien verkkojen yli usean robotin ROS-järjestelmien välillä.

Tässä tapauksessa sovelletaan ROS:n master – slave -arkkitehtuuria, jossa maarobotin päätietokoneella toimiva ROS-ympäristö toimii ROS:n master-yksikkönä, joka kommunikoi koptereiden ROS:n slave-yksiköiden kanssa. Maarobottiyksikössä ja lentoroboteissa käytetään samaa Pixhawk-pohjaista kontrolleria, joten ohjauskomennot roboteille ovat suurelta osin yhtenevät ja yhteensopivat. Yhdistetyssä järjestelmässä maayksikön ROS:n master toimii kokonaisjärjestelmän koordinaattorina, joka saa mittaustietoa myös koptereiden antureista, joiden antama tieto yhdistetään yhdeksi kokonaisuudeksi ROS:n master-järjestelmässä. Tällöin ROS:n master-järjestelmä pystyy ohjaamaan kaikkia yksiköitä samassa ympäristössä antamalla ohjauskomentoja yksittäisille robottiagenteille. Näin toteutetussa arkkitehtuurissa maarobottiyksikön tietokone ohjaa robottijoukkoa parvena, prosessoiden yksittäisiltä roboteilta saatuja tietoja jakaen vain tärkeimmät tiedot yksiköiden välillä. Tällä lähestymistavalla usean robotin joukkoa voidaan ohjata kattamaan mitattavat alueet mahdollisimman tehokkaasti.

Yksi suuri haaste on 3D-SLAM-karttojen hyödyntäminen jaetusti järjestelmien välillä. Yhteinen kartta voidaan luoda ORB-SLAM2-kirjaston [4] avulla ROS-ympäristössä. ORB-SLAM2:n avulla luotu 3D-kartta sisältää joukon kiintopisteitä, jotka sisältävät skaalainvariantit piirremuunnokset (SIFT, Scale Invariant Feature Transform, [5]) vastaaville kuvapisteille, joita robottien kamerat havaitsevat ja hahmottavat 3D-avaruudessa. Kyseisten kiintopisteiden perusteella robotit voivat siis paikottaa itsensä yhteisessä kartassa. Tällainen paikoitus on tarpeen erityisesti alueilla, joilla GPS ei kuulu, esimerkiksi liikkuesssa GPS-signaalia estävien rakennelmien lähistöllä tai sisällä. ORB-SLAM2:n avulla luotu kartta itsessään soveltuu ainoastaan navigoinnin avuksi ja robotin paikan sekä asennon määrittämiseen yhteisessä kartassa.

Jos alueista halutaan tehdä lisäksi visuaalisesti esitettävä kartta, on turvauduttava pistepilviteknikoihin, joiden avulla luodaan 3D-mallit mitatuista alueista. ROS-ympäristössä tämä tehdään RTAB-MAP-pakettien [6] avulla, jossa robotin antureiden fuusion ja pistepilven optimoinnin avulla luodaan 3D-kartta, jota vasten mittauksia voidaan visualisoida. Yksityiskohtaisempaa teksturoitua karttaa varten käytetään Agisoft Photoscan -ohjelmistoa [7], joka pystyy kuvasar-

3 <http://www.ros.org>

4 Raúl Mur-Artal, Juan D. Tardós, "ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras", <https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2705103>

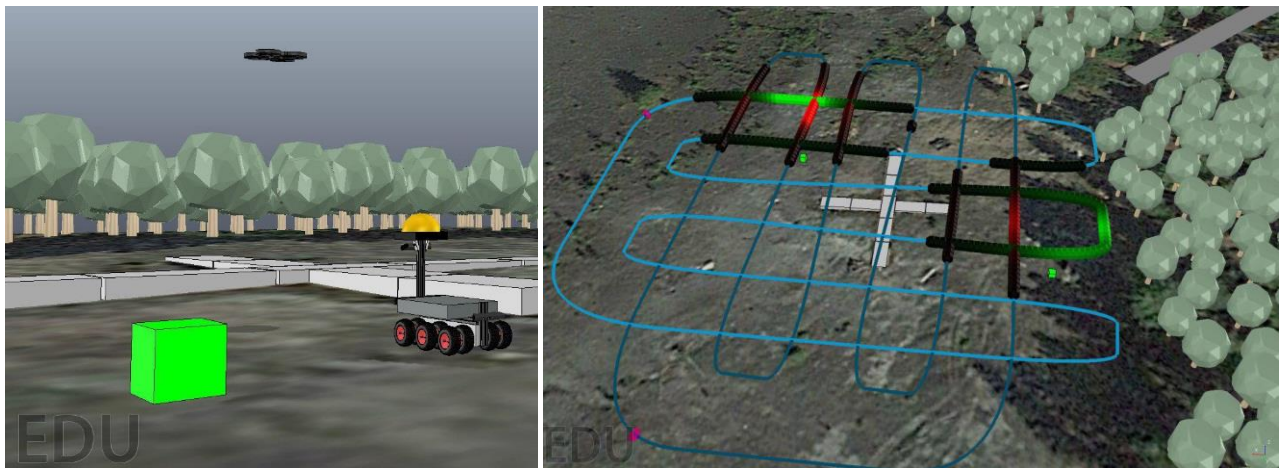
5 David G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", D.G. International Journal of Computer Vision (2004) 60: 91, <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>

6 <http://introlab.github.io/rtabmap/>

7 <http://www.agisoft.com>

jan ja siihen liittyvän paikkakoordinaattitiedon pohjalta luomaan 3D-esityksen kuvatusta alueesta.

Simulaatioympäristöjen käyttö on tärkeää erityisesti monen robotin parviällyn yhteistoimintaan liittyvien algoritmien kehityksessä, jotta aidon laitteiston testaukseen liittyvät riskit saadaan pidettyä mahdollisimman pieninä. Simulaatioissa pyritään jäljittelemään aitoja laitteita mahdollisimman yksityiskohtaisesti sekä mitattavien kohteiden käyttäytymistä. Simulaatioympäristönä käytetään pääasiassa V-REP-simulaattoria [8] (kuva 2), johon yhdistetään ROS-ympäristössä olevien laitteiden ohjaus. Käytettyjen Pixhawk-pohjaisien kontrollereiden käyttäytymistä voidaan emuloida SITL (Software-In-The-Loop) -lähestymistavalla, jossa emuloitu kontrolleri ohjaa simuloitua robottia siten kuin aito kontrolleri ohjaisi oikeaa robottia. Näin kehitetyt ohjausalgoritmit ovat mahdollisimman yhteensopivia aitojen robottien kanssa. Kuvassa 2 on esimerkki simuloitusta V-REP-ympäristöstä, joka mukailee Ylöjärven testialuetta ja on rakennettu alueen ortokuvakartan päälle. Mitattavan testikenttäalueen simuloimisella etukäteen tavoitellaan sitä, että ohjausalgoritmeja ei tarvitsisi merkittävästi muuttaa todellisessa testitilanteessa.



Kuva 2. Vasemmalla, V-REP-ympäristössä simuloitu ilma- ja maayksikkö virtuaalisen säteilylähteen vieressä (vihreä kuutio), josta tulevan säteilyn intensiteetti pienenee neliöllisesti etäisyyden funktiona. Oikealla, kahden kopterin tekemä simuloitu mittaus samasta alueesta ja simuloitut havainnot maan pinnalla olevista kahdesta säteilylähteestä. Ensimmäisen kopterin tekemät havainnot vihreällä värillä ja toisen punaisella. (Pinnan tekstuurin lähde Ylöjärven testialueesta: Google Earth, Landsat / Copernicus, 2015–2016)

4. Tulokset ja pohdinta

4.1. Säteilylähteiden paikannus

Säteilylähteiden paikannusta Kromek GR1 -gamma-spektrometrilla ja CPC-laitteella testattiin Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen harjoitusalueella Lakialan Ylöjärvellä 21. elokuuta 2018. Säteilylähteinä testeissä käytettiin kolmea alla olevan taulukon mukaista säteilylähdettä.

Nuklidi	Aktiivisuus 21.8.2018
Am-241 (amerikium)	185 MBq
Ba-133 (barium)	180 MBq
Cs-137 (cesium)	66 GBq

Mittaustiedon tallennuksesta vastasi kasikopteriin lisätty Raspberry Pi Zero -minitietokone, johon CPC ja Kromek GR1 olivat kytkettyinä. Testauspäivänä tehtiin yhteensä neljä lentoa, joista kolmesta saatiin tallennettua sekä Kromekin että CPC-laitteen tiedot luotettavasti. Maarobottiyksikkö oli mukana testipaikalla ja toimi tukiasemana kopterin ja etäkäyttöjärjestelmien välillä. Kopterin tietokoneen ROS-ympäristössä tallennettiin tiedot kopterin antureista sekä stereovideo ZED-kamerasta ROS:n lokitiedostoon, joka valitettavasti havaittiin kamerakuvan osalta korruptoituneeksi testipäivän jälkeen. Syynä oli ongelma käytetyssä USB 3.0 -kytkimessä, jonka vuoksi tärkeitä datapaketteja menetettiin videokuvan kaappauksessa. Tämän vuoksi testialueesta ei saatu luotua 3D-karttaa visualisointia varten.

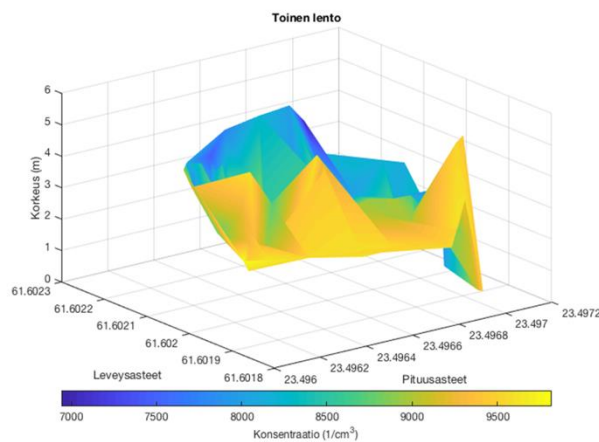
Lentoa pyrittiin tekemään ristikkomuodossa testialueella, kahdella eri korkeudella, mutta testausta hankaloitti voimakas puuskittainen tuuli, jossa tuulen nopeus voimakkaimmissa puuskissa ylsi yli 10 metriin sekunnissa. Tämän vuoksi lentäminen ennakkoon suunnitellussa ristikkomuodossa tuli mahdottomaksi, vaikka muuten kopteri pystyi lentämään tuulisissa olosuhteisakin vakaasti. Tämän vuoksi jatkossa kopterin ohjaus tarvitsee paremman kompensoinnin tuulen vaikutuksien eliminoimiseksi. Optisen vuon mittaamiseen perustuvalla PX4Flow-kameralla [9] tai ORB-SLAM2:n avulla tehtyyn kopterin paikan seurantaan pohjautuvalla kompensatiolla tämä onnistuisi, mutta tätä ei ehditty testipäivään mennessä implementoida, mm. PX4Flow-kameran käyttöönotossa ilmenneiden ongelmien vuoksi. Toinen toteutusta hankaloittava seikka oli, että kasikopteriin ei kuukausien odotuksen jälkeen saatu oikeantyyppistä kameravakautusjärjestelmää toimittajan tekemien virheiden vuoksi.

Näistä ongelmista huolimatta testipäivänä pystyttiin koestamaan säteilylähteiden paikannus Kromek GR1- ja CPC-laitteiden avulla. Lennolta 1 CPC-dataa ei saatu tallennettua kokonaan tallennusohjelmassa havaitun virheen vuoksi. Lennot 1–3 suoritettiin avoimella alueella vaalean betoniristin läheisyydessä, joka näkyy hyvin ylhäältä päin otetussa ortokuvassa. Koska Kromekin mittauksessa näkyi kopteriin kytkettynä merkittävästi enemmän kohinaa kuin normaalisti, otettiin datasta näkyviin vain bariumiin liittyvä havaintojälki, ts. visualisoitiin gammaenergia-alue 344,2–368,2 keV. Ba-133:n gammasäteilyenergian huippukohta on teoriassa 356,015 keV, joka sijaitsee valitulla havainnointivälillä. Lentojen 1–3 Kromek GR1 -mittaukset ovat esitettyinä alla olevassa kuvassa 3. Lennolla 3 Kromek GR1 -anturin kopterin takapuoleiselle laidalle lisättiin 5 mm paksu lyijyeste, jotta voitaisiin testata sen vaikutusta säteilyn havainnointiin. Tässä tapauksessa säteilyn pitäisi vaimentua, kun kopterin keula osoittaa pois päin lähteestä. Näin tapahtuikin, mikä nähdään kuvasta 3. Näin ollen lyijyesteen avulla voitaisiin lähteen paikka myös trianguloida tekemällä kopterilla täysi käännös vähintään kahdessa kohdassa lähteen lähistöllä.

Lennon 2 CPC-laitteen tekemä mittaus on esitetty kuvassa 4. Kun tätä vertailtiin kopterin lentoreittiin, vaikuttaa siltä, että hiukkasarvot olisivat suurimmillaan lähellä aluetta, jossa säteilylähteet sijaitsivat. Tuloksessa täytyy tosin ottaa huomioon, että ilmayksikkö liikkui myös lähempänä maata siinä kohden, jossa lähteet sijaitsivat. Testialueella maa vietti loivasti alaspäin, kun mentiin lähteen päin lähteistä. Tämän vuoksi myös kuvassa nähty korkeus on korkeampi alueen toisella laidalla, vaikka merenpinnan suhteen kopteri pysyikin suurin piirtein samalla korkeudella. Tästä johtuen ei voida täysin poissulkea kopterin ilmapirran vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuteen, sillä lähempänä maan pintaa kopteri saattaa nostaa hiukkasia maasta, jotka mahdollisesti näkyvät mittauksissa.



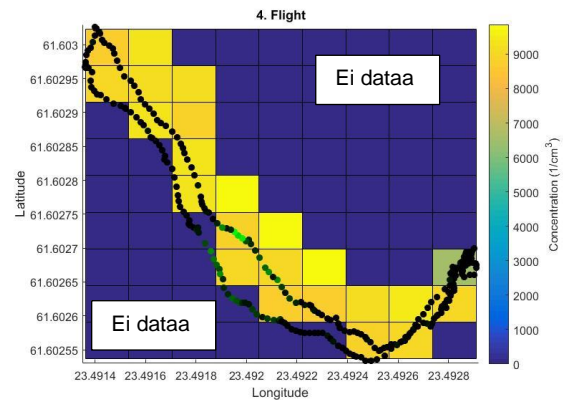
Kuva 3. Vasemmalla yhdistettynä tulokset lennoista 1 ja 2. Lennolla 1 Am-241- ja Ba-133-lähteet olivat sinisen täplän osoittamassa kohdassa. Lennolla 2 Am-241 oli edelleen sinisessä kohdassa mutta Ba-133 oli tällä kertaa punaisessa. Kromek GR1 tekemät havainnot Ba-133:sta on merkitty vihreillä täplillä. Keskellä olevissa kuvissa, lennolla 3 Kromekin kopterin takapuoleiseen kylkeen asennettiin 5 mm lyijyeste n. 1 cm etäisyydelle anturista, jolloin havaittu säteily vaimeni, kun kopterin keula osoitti pois päin lähteestä. Ba-133-lähde sijaitsi punaisen ympyrän kohdalla ja kopteri kääntyi ympäri sinisen ympyrän rajaamalla alueella. Oikealla kuva kasikopterista lentämässä testialueella. (Ortokuvien lähde: Google Earth, Landsat / Copernicus, 2015–2016)



Kuva 4. CPC-laitteen suorittama hiukkaskonsentraation mittaus lennon 2 aikana.

Lennolla 4 havainnoitiin voimakasta Cs-137-säteilylähdettä, joka sijaitsi tien varrella olevassa rakennuksessa kuvan 5 mukaisesti. Ilmayksikkö lensi tietä pitkin kerran edestakaisin ohittaen rakennuksen matkalla. Lennon suorituksen aikana korkeus tien pinnan suhteen pysyi n. 3–4 metrissä. Säteilylähde oli kollimoitu siten, että suurin säteilyannos lähti rakennuksesta kohtisuoraan tietä kohti, jolloin suurin säteily määrä havaittiin rakennuksen kohdalla. CPC-laitteen havaitsema suurin hiukkaspitoisuus näyttäisi korreloivan sen kanssa, missä Kromek havaitsee suurimman säteilyintensiteetin. Tästä voitaisiin päätellä, että säteilyllä on vaikutusta mitatun ilman aerosolihiukkaspitoisuuteen. Hiukkaspitoisuuden avulla tapahtuvaa paikannusta voidaan mahdollisesti tarkentaa parantamalla laskurin alle 10 nm kokoisten hiukkasten havaintotehokkuutta. Teknisesti tämä tapahtuu laitteen operaatiolämpötiloja muuttamalla. Parannukset voidaan verifioida laboriotesteillä. On huomioitavaa, että myös tällä alueella oli puuskittaista tuulta, joten sillä voi olla vaikutusta hiukkaspitoisuuksien paikalliseen vaihteluun. Kuvissa esitetyt lentoreitit on suodatettu lentokontrollerin sisällä Extended Kalman -suodattimella, mutta

tuulisista olosuhteista johtuen on oletettavaa, että visualisoidut reitit voivat sisältää useita metrejä virhettä.



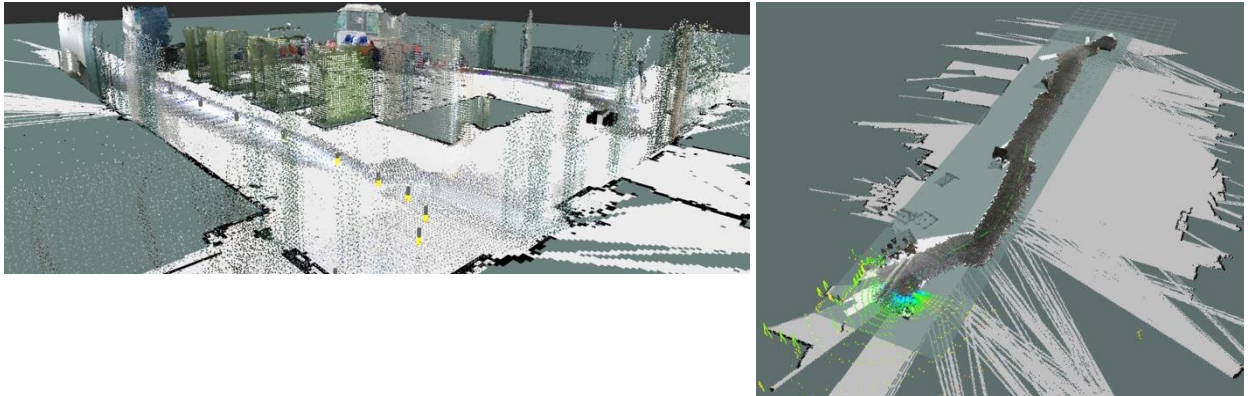
Kuva 5. Vasemmalla Cs-137-lähteen sijainti (punainen) suhteessa kasikopterin kontrollerin ilmoittamaan lentoreittiin ja mittauksiin. Oikealla Kromek GR1:n mittaamat datapisteet Cs-137-lähteelle (energia-alue 644,8–680,9 keV, jolla Cs-137:n gammasäteilyhuippu, 661,64 keV, sijaitsee) suhteessa CPC-mittauksiin (hiukkaspitoisuus eli havaittujen hiukkasten lukumäärä / kuutiokeskimetri ilmaa). Huomioitavaa on, että aerosolipitoisuutta ei tiedetä lentoalueen ulkopuolella.

4.2. 3D-SLAM-menetelmien testaus

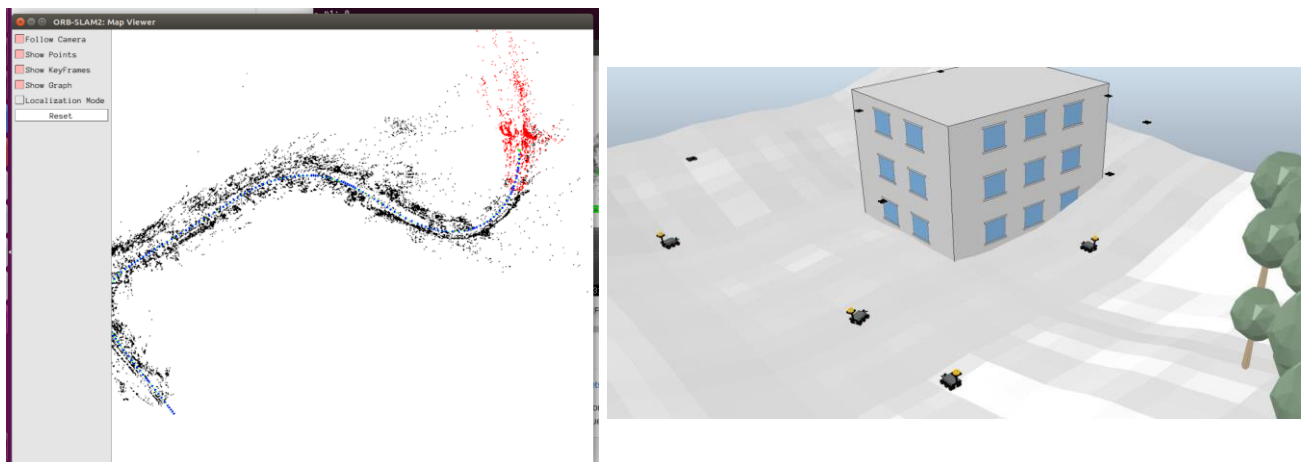
Näiden kenttätestien lisäksi robottiyksiköissä on otettu käyttöön GPS:stä riippumattomia kartoitus- ja paikannusmenetelmiä. Maarobottiyksikkö kykenee tuottamaan yksityiskohtaisia pistepilviä mitattavista alueista reaaliajassa ja se soveltuu myös paremmin jo havaittujen säteilylähteiden lähimittaukseen. Ilmarobottiyksiköissä laskentakyky on paljon rajallisempi, joten ne rajoittuvat pääasiassa ORB-SLAM2:n avulla tuotetun harvan 3D-navigointikartan rakentamiseen ja sen avulla navigointiin.

Maarobottiyksikön Kinect 2 RGB-D -kameralla tekemä pistepilvikartoitus toimii erityisen hyvin sisätiloissa, missä navigointi ja lentäminen turvallisesti ilmaroboteilla on tällä hetkellä lähes mahdotonta. Kartoitus toimii myös ulkotiloissa, mutta käytetyn ZED-stereokameran syvyydstarkeus ei ole kovin hyvä. Ulkotiloissa 2D- ja 3D-lasereiden informaatio on siten tärkein tarkan kartan luomisen kannalta. Kuvassa 6 on esimerkki Mörrin-robotilla tehdystä 3D-SLAM-mittauksesta sisä- ja ulkotilassa. Datan fuusio laserkeilaimen ja kameran datan välillä on tehty ROS:n RTAB-MAP-ohjelmistopakettien avulla. Koska aitoja säteilylähteitä ei ollut käytettävissä tässä testissä, mitattiin visualisointia varten Wi-Fi-signaalin voimakkuutta. Mittaus voidaan esittää vastaavasti myös havaitulle säteilyvoimakkuudelle.

Koska suuren tarkkuuden pistepilveä ei voida realistisesti käyttää jaetussa järjestelmässä yhteisenä karttana, on käytettävä yhteisenä karttapohjana ORB-SLAM2-menetelmällä saatua karttaa. ORB-SLAM2-paketti toimii myös ROS-ympäristössä, jota käytetään ajamaan reaaliajassa myös kopterissa olevassa NVIDIA Jetson TX2 -minitietokoneessa ZED-stereokameran toimiessa kamerana kuten maayksikössä. Luotua ORB-SLAM2:n 3D-pistekarttaa (kuva 7) voidaan käyttää usean robottiyksikön paikantamiseen samassa kartassa, kun kartta jaetaan yksiköiden kesken.



Kuva 6. Vasemmalla maanrobotilla sisätilassa tehty 3D-SLAM-kartoitus, jossa kartoitettuna myös signaalin kuuluvuus kelta-harmaalla palkilla esitettyinä. Oikealla ulkotilassa tehty kartoitus.



Kuva 7. Vasemmalla reaaliajassa syntyvä ORB-SLAM2 3D-pistekartta visualisoituna Jetson TX2-minitietokoneella, jota käytetään ilmarobottiyksiköissä. Oikealla V-REP-simulaattorikuva usean robotin skenaariosta.

4.3. Simulaatioympäristö parvirobotiikan algoritmien kehityksessä

Valitussa robottien simulaatioympäristössä on käytettävissä yleiskäyttöinen malli nelikopterista, Mörrri-maanrobotista sekä toteutettu viitekehys erilaisten usean robotin skenaarioiden rakentamiseen. Simulaattori sisältää eri tarkkuuksilla toimivia fysiikkamoottoreita tarpeiden mukaan. Simulaattorissa voitaisiin mallintaa myös partikkelien liikettä, jos halutaan simuloida esimerkiksi aineen leviämistä ympäristössä. Simuloinnissa on tosin yleensä aina tehtävä kompromisseja simulaation tarkkuuden ja suorituskyvyn välillä.

Koska V-REP-simulaattoriin asennettu RosInterface-liitännäinen mahdollistaa jokaisen simulaattorissa käytetyn robottimallin ohjauksen ROS-ympäristöstä, mallinnettuja robotteja voi ohjata samoilla ohjauksenkomennoina kuin oikeitakin robotteja. Tämä nopeuttaa kehitystyötä ja vähentää kalliiden kenttätestausten tarvetta. V-REP-ympäristöön toteutettuja robotteja voidaan helposti monistaa parvirobotiikan kehitystä varten, josta esimerkki on kuvassa 7.

5. Loppupäätelmät

Työn aikana kehitettiin robottialustoihin GPS-riippumattomia kartoitusmenetelmiä 3D-SLAM-tekniikkoihin pohjautuen. Myös robottikäyttöjärjestelmää kehitettiin niin, että yhteistoiminta robottien välillä on mahdollista myös parvirobotiikan sovelluksissa. Robottikäyttöjärjestelmän ja simulaatioympäristön välille on alustavasti luotu kehys, jonka avulla parvirobotiikkaa pystytään kehittämään samoilla ohjelmistokomponenteilla, joita käytetään myös aidoissa roboteissa. Näin saadaan simulaattorissa kehitettyjen algoritmien käyttöönottoa helpotettua, mahdollistaen turvallisemman ja nopeamman kehityssyklin ohjausjärjestelmien testauksessa.

Suurimpana haasteena usean robotin järjestelmässä on vielä samanaikaisen kartoituksen ja paikoituksen yhdistäminen siten, että minimoidaan kommunikaation vaatima datamäärä usean robottiyksikön jakamassa langattomassa verkossa kenttäolosuhteissa. Etukäteen prosessoitu ORB-SLAM2:n 3D-pistekartta voidaan jakaa usean robottiyksikön välillä, mutta saman kartan päivittäminen usealla yksiköllä samanaikaisesti on vielä erittäin suuri haaste toteuttaa. Tähän liittyy myös usean robotin ohjaamiseen soveltuvan parviällyn kehittäminen, joka pystyisi ottamaan huomioon dynaamisesti ympäristössä tapahtuvat muutokset ja optimoimaan yhteisen 3D-kartan luomisprosessin mahdollisimman tehokkaaksi.

Ylöjärvellä hiukkaslaskurilla ja gammaspektrometrillä suoritettujen kenttätestien onnistuivat teknisesti hyvin. Hiukkaslaskuri pystyi hyvin havaitsemaan aerosolihiukkasten pitoisuudet eikä mittauksissa ollut ongelmia liittyen kopterin nopeaan liikkeeseen ja heiluntaan. Hiukkaslaskurissa on vielä teknistä parantamista liittyen isojen lukumääräpitoisuuksien mittaamiseen (coincidence) ja erittäin pienten hiukkasten mittaamiseen (leikkausrajan optimointi). Hiukkaslaskurin lämpötilaeroa kasvattamalla laite on herkempi halkaisijaltaan pienemmille hiukkasille, joita mahdollisesti on enemmän radioaktiivisten lähteiden ympärillä. Tehtyihin testeihin perustuen, hiukkasmittaukset kopteria käyttäen mahdollistavat aerosolihiukkaslähteiden tunnistamisen ja paljastavat hiukkaspitoisuuden nopeat vaihtelut alueellisesti. Mittauskokonaisuutta voitaisiin hyödyntää myös esimerkiksi aerosolihiukkaslähteiden liikkeiden etäseurantaan.

Tutkimuksessa saavutetut tulokset antavat hyvän perustan kehittää tekoälytekniikkoihin pohjautuvia autonomisia menetelmiä säteily- ja hiukkaslähteiden havaitsemiseksi ja paikantamiseksi useilla eri menetelmillä. Jatkotutkimuksen tavoitteena on tutkia säteilyintensiteetin ja pienhiukkasten pitoisuuden samanaikaisen mittauksen potentiaalia säteily- ja pienhiukkaslähteiden seurantaan.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tieteelliset julkaisut valmistuvat projektia seuraavina vuosina konsortion osapuolten yhteistyönä.