

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Vedenalaisten uhkien havainnointi autonomisilla roboteilla

Arto Visala, professori Maarintie 8, 02150 Espoo, puh: 0505755936, sähköposti arto.visala@aalto.fi

Mika Vainio, PhD , sähköposti mika.vainio@aalto.fi
Juha Tervo, PhD opiskelija, sähköposti juha.tervo@aalto.fi
Sanna Halmkrona, MSc, sähköposti sanna.halmkrona@aalto.fi

Tiivistelmä

Projektissa tavoite on kehittää yksinkertainen ja nopeasti käyttöönotettava robotti 1) veden-alaiseen ympäristön tarkkailuun ja 2) vedenalaiseen paikannukseen. Robotin mekaniikka perustuu osittain Aalto yliopistossa aikaisemmin kehitettyyn monirobottisysteemiin. Robotti havainnoi ympäristöä ja ympäristön kohteita mm. hydrofoneilla, CTD (conductivity temperature, Depth), DVL. Lisäksi robotit on varustettu GNSS, 4G modeemeilla Tavoitteena oli myös, että robotti pystyy autonomiseen vedenalaiseen paikannukseen ilman erillistä tukevaan infrastruktuuria.

1. Johdanto

Suomen aluevesien akustinen valvonta on pääosin perustunut kiinteisiin vedenpohjaan asennettuihin kuunteluasemiin. Niiden lisäksi käytössä voi olla toiminta-alueelle laivalla tai helikopterilla toimitettavia kuuntelupoijuja. Näiden lisäksi on käytössä nopeasti kohdealueelle asennettava SURA järjestelmä, jossa merenpohjaan pudotettavat pattereilla toimivat hydrofonianturijärjestelmä kytketään optisella kuidulla rantaan ja datan prosessointi tehdään muualla. Järjestelmä soveltuu erityisen hyvin esimerkiksi satamien suojaamiseen. Niin ikään laivaston uudet sota-alukset varustetaan uusilla huippuluokan kuuntelulaitteilla. Suomella ei kuitenkaan ole käytössä meidän tietääksemme mitään täysin autonomista hyvin skaalautuvaa järjestelmää, joka ei veteen laskemisen jälkeen vaadi mitään tukevaa infrastruktuuria vedenalaisten uhkien havaitsemiseen. Kyseisen kaltainen järjestelmä voisi olla jatkuvasti (huoltotoimenpiteisiin käytettyä aikaa lukuun otta-

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

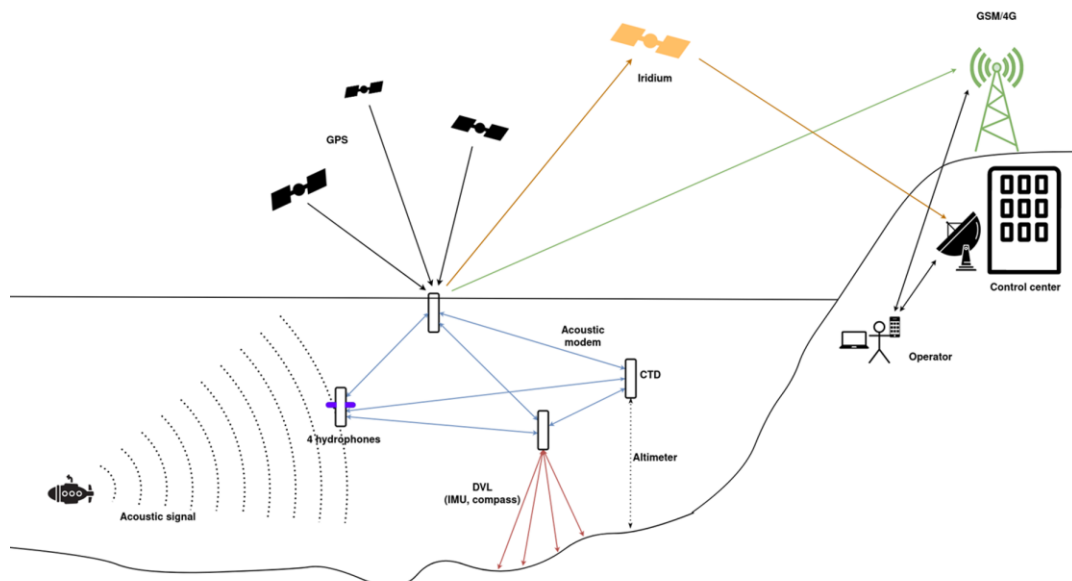
matta) valvontatehtävissä ja siten äärimmäisen vaikeasti havaittavana pysyvänä pelotteena tai se voidaan viedä nopeasti tietylle alueelle tilanteen vaatiessa. Projektin tavoitteena oli kokeilla ja todentaa ko. autonomisen havainnointirobotin ja miten helposti vedenalainen havainnointi voidaan toteuttaa.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Ehdotetussa projektissa kehitettiin autonomista, skaalautuvaa, nopeasti käyttöönotettavaa ja vaikeasti havaittavaa vedenalaisten uhkien akustiseen havainnointiin soveltuvaa virtausten avulla liikkuvaa robottijärjestelmää. Se perustui Aalto Yliopiston vedenalaiseen aikaisemmin rakennettuun mutta jo vanhentuneeseen SWARM monirobottijärjestelmään. Kokonaisen valmiin järjestelmän tavoite on kyetä havaitsemaan robotteihin asennettavien hydrofonien (2-4 kpl) avulla vedenalainen äänilähde, estimoimaan sen suunta ja mahdollisen karkea paikka 3D koordinaatistossa ja välittämään tieto eteenpäin joko mahdollisten olemassa olevien kiinteiden (poijut, pohja-asennukset) linkkien kautta tai tarvittaessa pinnalle nousevan yksikön avustuksella (satelliitti/4G).

SWARM järjestelmän jäsenet kykenevät estimoimaan sijaintinsa omien antureidensa (paine, IMU, DVL, pinnalla ollessaan GNSS) ja keskinäisen aikataulutetun akustisen etäisyydenmittauksen ja rajoitetun kommunikoinnin avustuksella. Järjestelmä kiinnitetään globaaliin koordinaatistoon yksittäisen robotin tai robottiparin pikaisen pintavierailun aikana hankitun GNSS tiedon avulla.

Järjestelmä estimoii jäseniensä paikkatiedon ohella vallitsevia virtauskenttiä, joiden avulla paikantamisen estimointi tuoreiden mittausten välisenä aikana paranee huomattavasti. Varsinainen tietojen yhdistäminen on onnistuneesti toteutettu ja dokumentoitu sekä laajennetulla Kalman suotimella (EKF). Lisäksi projektissa kehitettiin ja verifioitiin DVL (doppler velocity logger) ja alueen pohjakartan perusteella tapahtuva piirrepohjaisen paikannuksen soveltuvuus vedenalaiseen paikannukseen.



Kuva 1. kokonaisjärjestelmä

Koko järjestelmän suurimpana etuna muihin vastaaviin järjestelmiin on sen riippumattomuus erillisestä infrastruktuurista. Se ei vaadi ulkoisten äänimajakoiden asentamista ja mahdollistaa täten järjestelmän nopean käyttöönoton ja tarvittaessa helpon siirtämisen. Projektissa konseptitason hydrofonihavainnointijärjestelmä perustuu hydrofonien tuottamaan suuntaestimaattiin. Suuntaestimaatti verifioitiin ristikorrelaatiomenetelmällä joka yhdistettynä robotin omaan paikka- ja suuntaestimaattiin mahdollistaa parven jäsenten estimaattien yhdistämisen avulla käyttökelpoisen vieraan vedenalaisen kohteen sijainnin ja etenemissuunnan estimoinnin.

Projekti keskittyi konseptin kehittämiseen ja sen toiminnallisuuden validointiin tutkimusryhmän aikaisemmin toteuttamassa SSSim simulaattorissa ja Matlab ohjelmistossa projektin aikana ympäristöstä kerätyn akustisen datan pohjalta.

Fyysisen järjestelmän toimivuus todennettiin hallitusti todellisessa toimintaympäristössä suoritetuilla testeillä sekä Otaniemen "ice tank" testiympäristössä. Projekti ei keskittynyt hydrofonien kehittämiseen, mutta siinä jouduttiin kuitenkin käyttämään projektin kokoon nähden kohtuuttoman paljon työaikaa hydrofonien signaalinkäsittelyyn ja käyttöönottoon.

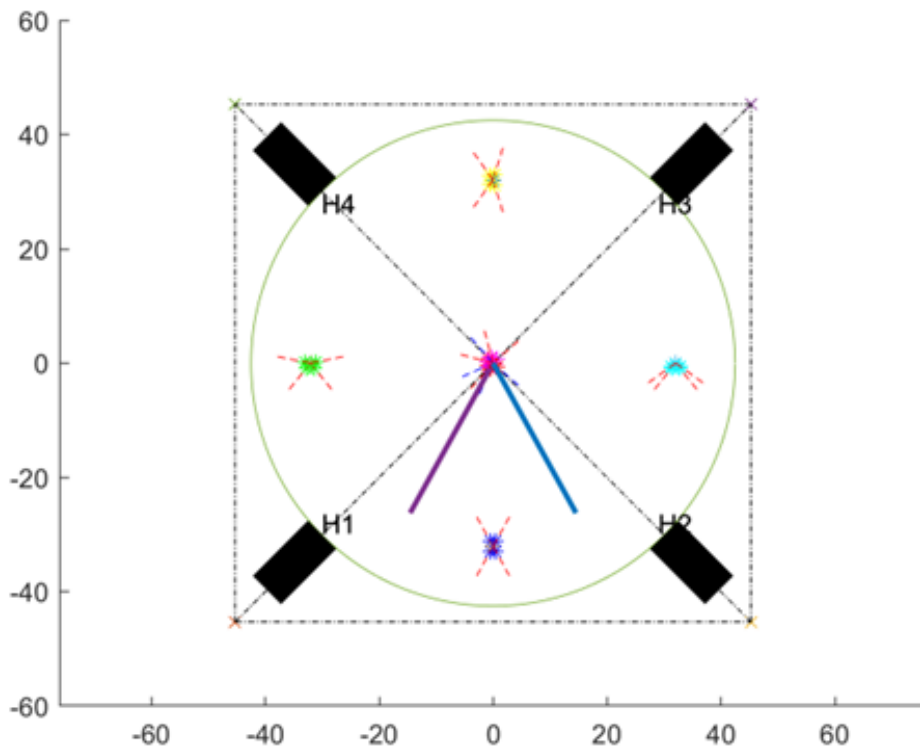
Niin ikään käytössä oleva SWARM monirobottijärjestelmä toimii projektissa vain konseptin toteuttavuuden testaamisessa. Mahdollisessa tuotteistamisprojektissa robotit tulee luonnollisesti suunnitella uudelleen nykypäivän komponenteista niiden käytettävyyden parantamiseksi, koon optimisoimiseksi, käyttöajan pidentämiseksi ja hintatason laske-
miseksi.

3. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen teoreettisen viitekehyksen kuvaus, käytetty materiaali ja menetelmät

3.1 Hydrofonien avulla tapahtuva kohteen suunnan määrittäminen

Tässä projektissa tavoitteena oli arvioida, pystytäänkö vedenalaisen äänilähteen suunta havainnoimaan hydrofoniryhmällä kerätystä akustisesta datasta. Työn tuloksia voidaan myöhemmin hyödyntää CoastalBot-parven akustisen havainnoinnin kehittämisessä. Työssä suunniteltiin, rakennettiin ja testattiin vedenalaisen akustisen datan keräysjärjestelmä. Järjestelmään kuuluu neljä Patria hydrofonia, sekä muut tarvittavat laitteistot ja ohjelmistot datan keräämistä varten. Hydrofonit on kiinnitetty kehikkoon, joka jäljittelee CoastalBot-robotin pintaa. Akustista dataa kerättiin "ice tank" vesialtaassa, meressä ja järvissä. Tulosuuntaa estimoitiin kerätystä datasta signaalien saapumisaikaerojen avulla (TDOA), jotka saatiin ristikorrelaatiolla. Tuloksista nähdään, että suunta pystytään estimoimaan, mutta lisää työtä tarvitaan järjestelmän parantamiseksi. Järjestelmää pitää muokata esimerkiksi kohinan vähentämiseksi, ja uusia testejä täytyy suorittaa realistisemmassa ympäristössä.

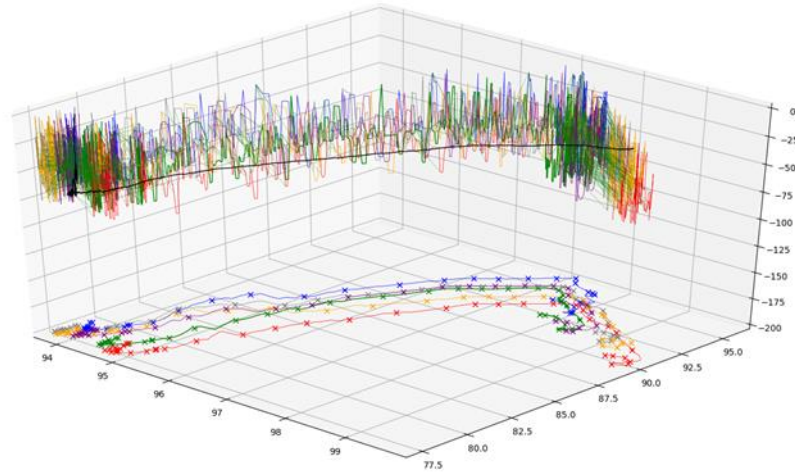


Kuva 2. Saapuvan äänisignaalin suunnan määrittäminen 4 hydrofonin avulla käyttäen ristikorrelaatiota TDOAn (time difference of arrival) määrittämiseksi.

3.2 Vedenalainen paikantaminen

Vedenalainen paikannus on edelleen haasteellista kustannustehokkaasti. Aalto yliopistossa on vedenalaista paikannusta tutkittu aiemmin. Erityisesti erilaiset akustiseen etäisyyden mittaukseen parviroboteilla ovat tutkimusten perusteella osoittautuneet mahdollisiksi paikannusmenetelmiksi. Tässä projektissa tutkittiin EKF (Extended Kalman Filter) menetelmään perustuvaa paikannusta, jossa robottiparven paikannus voidaan toteuttaa GNSS ja akustisella etäisyyden mittauksella. Menetelmään tutkittiin SSSIM simulaattorissa erilaisilla robottiparvilla. Ohessa kuva (kuva 2) kuuden robotin muodostavasta parvesta, niiden liikkeistä ja niiden välisestä akustisesta kommunikoinnista. EKF algoritmilla ei vielä saatu riittävän hyviä tuloksia paikannukseen.

Floats paths, pings, position fixes

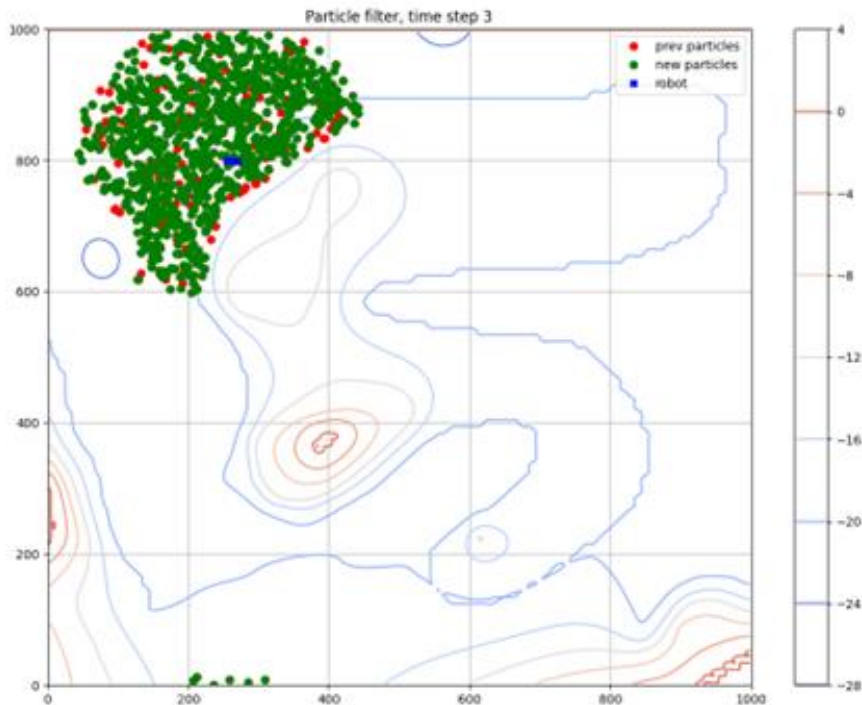


Kuva 3. Robottiparven simulointi SSIM simulaattorissa. Kuvassa 6 robotin liikkeet merivirrassa ja robottien välinen akustinen kommunikointi (vihreällä)

Projektissa tutkittiin myös piirrepohjaisia paikannusmenetelmiä. Piirrepohjainen paikannus robotiikassa ja autonomisissa laitteissa on otettu käyttöön esim. risteilyohjuksissa jo vuosikymmeniä sitten. Menetelmän etuja on riippumattomuus ulkoisista satelliittipaikannusmenetelmistä. Myös vedenalaisessa paikannuksessa piirrepohjaista paikannusta on tutkittu. Tavallisesti paikannus perustuu visuaaliseen sensorointiin ja pohjapiirteiden vertaamiseen tallennettuun pohjan kuvamateriaaliin. Tässä tutkimuksessa tutkittiin piirrepohjaista paikannusta huomattavasti rajoitetummalla informaatiolla eli pelkästään pohjan syvyyden vertausta olemassa olevaan karttapohjatietoon. Esitetty testialue on haasteellinen piirrepohjaiselle paikannukselle (ns. partikkelifiltterille) koska alueella on laajoja tasaisia alueita ja projektissa tutkittiin juuri paikantamista ko. alueella.

Voidaan todeta, että paikantaminen onnistuu simulaatiossa riippuen lähtöpaikasta:

- pystytäänkö alue rajaamaan kohtuullisen pienelle alueelle syvyyden perusteella
- liikkuuko robotti alueella tunnistettavaan suuntaan
- alueen pohjamuodoista, jolla robotti liikkuu
- muista satunnaisista tekijöistä kuten pohjakartan tarkkuus, sensorien (DVL, CTD, IMU) tarkkuus



Kuva 4. piirre pohjaisen partikkelifiltringin visualisointi

4. Tulokset ja pohdinta

Hydrofonien käyttö vedenalaiseen kohteeseen suunnanmäärittämiseen toimii kuten odotettiin mutta laitteistoa ja menetelmiä kannattaisi jatkossa kehittää tämä projektin löydösten perusteella.

Erityisesti Patrian hydrofoneihin (4 kpl) perustuva vedenalaisen äänilähteen havainnointijärjestelmä testattiin Otaniemen Aalto Yliopiston laivalaboratorion isossa altaassa, järvessä ja meressä. Alustavien tulosten pohjalta voidaan todeta, että jopa vain neljään hydrofoniin perustuva järjestelmä tuottaa arvokasta tietoa äänilähteen suuntimiseen, varsinkin kun useamman robotin muodostama järjestelmä saadaan kokonaisuudessaan toimintaan.

- laitteiston toteutus vaatii jatkokehitystä kuten mahdollinen hydrofonien päivitys
- esivahvistimen taustakohinan poisto
- dynaaminen vahvistuksen muuttaminen äänisignaalin tasoon perusteella
- muiden kuin ristikorrelaationmenetelmien käyttö äänilähteen suunnan määrittämiseen
- hydrofonien optimaalisen määrän määrittäminen (2,3,4) ja hydrofonien asennon vaikuttaminen vastaanotettuun signaaliin

Paikannusmenetelmiä tutkittiin ja erityisesti piirrepohjaisen paikannuksen käyttö osoittautui käyttökelpoiseksi ja laskennallisesti helposti toteuttavaksi. Projektissa ei ehditty tutkia yhtenä päämääränä ollutta erilaisten paikannusmenetelmien yhdistäminen optimaalisella tavalla. Etenkin nykyisten suhteellisten edullisten MEMS inertipaikannusjärjestelmät INS toimivuutta ja integrointia järjestelmään ei voitu tutkia, koska budjetissa ei ollut varauduttu sen hankkimiseen. Muista paikannussovellutuksista tiedetään, että vikaantumisen voidaan todeta ristiin validoinnilla. Ehjäksi todetut mittaukset voidaan fuusoida estimoitujen kovarianssien perusteella EKF:lla.

5. Loppupäätelmät

Resurssien rajallisuudesta ja muualta saatavien resurssien niukkuuden vuoksi, projektissa ei päästy etenemään halutulla nopeudella ja sen seurauksena loppuvaiheen monen robotin testauksia ei päästy tekemään suunnitellulla tavalla.

Siitä huolimatta yksittäisen robotin osajärjestelmiä ja ohjelmistoa saatiin kehitettyä ja vietyä eteenpäin alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti.

Simulaatiotulokset sekä äänilähteen suunnan määrittämiseksi että vedenalaisen paikannuksen suhteen osoittautuivat lupaaviksi ja ennako-odotusten mukaiseksi. Projektin kenttäkokeet eivät onnistuneet siinä laajuudessa kuten projektin alussa suunniteltiin joutuessa lähinnä käyttökelpoisen robotin elektroniikasta. Mittauksia saatiin kuitenkin suoritettua riittävästi algoritmien testaamiseen ja kehittämiseen.

Tutkimusjärjestelmän päivitys vaati enemmän työtä kuin oli odotettavissa. Oletus oli, että olemassa olevaa laitteistoa voitaisiin käyttää osana kenttäkokeita. Se osoittautui kuitenkin mahdottomaksi ikääntyneen laitteiston vuoksi. Hydrofonien käyttöönottoaminen ei ollut suoraviivaista vaan vaati paljon resursseja, jotka oli allokoitu kokonaisjärjestelmän toteuttamiseen ja testaamiseen. Hydrofonilaitteiston (digitaaliset hydrofonit, esivahvistin) uusiminen, hydrofoniasennuksen tutkiminen (hydrofonien määrä, asento, sijoitus) kannattaisi ehdottomasti tutkia jatkossa. Myös suunniteltu useamman vedenalaisen paikannusmenetelmän fuusio jo olemassa olevalla laitteistolla kannattaa viedä loppuun optimaalisen paikannuksen aikaansaamiseksi.

Seuraavassa vaiheessa Aallossa sijaitseva useamman vedenalaisen robotin järjestelmän modernisointi täytyy saada valmiiksi ja erillisessä testialustassa testatut komponentit ja ohjelmistot toimimaan kaikissa niissä. Sen jälkeen alustavan testisuunnitelman mukaiset kokeet pystytään suorittamaan valitulla alueella Suomenlahdella. Kerätyn datan pohjalta pystytään paitsi parantamaan fyysisen laitteiston ohjelmistoja myös parantamaan kehitettyjen simulaatiotyökalujen todenmukaisuutta ja käyttökelpoisuutta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Sanna Halmkrona. Underwater acoustic data acquisition for sound source direction estimation. MSc Thesis Espoo, 2022.



7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Tutkimus vastasi tavoitteita lukuun ottamatta hydrofonien integrointia ja onnistunutta äänilähteiden suuntimista floater- yksiköillä aidossa demonstraatioympäristössä meriolosuhteissa. Tällainen demonstraatio vaatii jatkossa hydrofoniteknikan asiantuntijoiden mukaan ottamista hankkeeseen.