



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JULIUS LINKINEN
VEDENALAISTEN ROBOTTIEN PAIKANNUSMENETELMÄT

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Arttu Heininen
31.05.2018

TIIVISTELMÄ

JULIUS LINKINEN: Vedenalaisten robottien paikannusmenetelmät.

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 22 sivua, 0 liitesivua

Toukokuu 2018

Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Kone- ja tuotantotekniikka

Tarkastaja: Arttu Heininen

Avainsanat: AUV, paikannus, inertiamittausyksikkö, paikan arviointi, geofysikaalinen paikannus, vedenalainen

Autonominen vedenalainen robotti eli AUV on laite, joka kykenee toimimaan itsenäisesti vaikeissa vedenalaisissa olosuhteissa keräämällä erilaisilla antureilla ja komponenteilla tietoa ympäristöstään. Vedenalaiset olosuhteet tuottavat omat haasteensa laitteen paikannukseen, jolloin kaikki pinnan yläpuolella toimivat menetelmät eivät ole käytännöllisiä tai eivät toimi ollenkaan.

Tämän työn tarkoituksena on esitellä yleisimpiä vedenalaisia paikannusmenetelmiä ja niiden komponentteja, sekä vertailla niitä keskenään. Eri menetelmät on jaettu kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat paikan arviointiin perustuvat menetelmät, geofysikaaliset menetelmät ja muut menetelmät. Työ toteutetaan kirjallisuusselvityksenä ja työssä keskitytään etenkin autonomisen paikannuksen mahdollistaviin menetelmiin, jolloin esimerkiksi robottien yhteistyöhön tai erilaisiin poijuihin perustuvat menetelmät jätetään pois. Pohditaan eri menetelmien heikkouksia ja vahvuuksia taulukoimalla ne sekä verrataan keskenään komponentin hinnan, painon, paikannustarkkuuden ja toimintasyvyyden suhteen. Lopuksi esitetään jaottelu kahteen erilaiseen tehtävätyyppiin ja menetelmien yhdistely tehtävästä riippuen.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö kirjoitettiin keväällä 2018. Aihe oli erittäin mielenkiintoinen ja toimi johdatteluna tulevaisuuden opintoja ajatellen. Kevät oli allekirjoittaneella hyvin työntäyteinen, joten haluaisin kiittää ohjaajaani Arttu Heinistä ymmärryksestä ja ohjauksesta työn edetessä myöhään keväälle. Haluaisin kiittää myös ystäviäni ja avovaimoani Miraa tuesta ja kannustuksesta kiireen keskellä.

Tampereella, 31.05.2018

Julius Linkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	PAIKANNUSMENETELMÄT	3
2.1	Arvioitu asema ja inertiamittausyksikkö.....	3
2.1.1	Menetelmät ja niiden komponentit	4
2.2	Geofysikaaliset paikannusmenetelmät	6
2.2.1	Menetelmät ja niiden komponentit	6
2.3	Muut menetelmät yleisesti	10
3.	VERTAILU JA HAVAINNOT	13
3.1	Vertailu.....	14
3.2	Havaintojen hyödyntäminen	18
4.	YHTEENVETO	20
	LÄHTEET.....	21

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Bluefin-21 Autonomous Underwater Vehicle (General Dynamics).....</i>	<i>1</i>
Kuva 2.	<i>Paikannusmenetelmien jaottelu.....</i>	<i>3</i>
Kuva 3.	<i>Xsens MTi 100-series inertiamittausyksikkö (Xsens).</i>	<i>4</i>
Kuva 4.	<i>Teledyne Marine Explorer DVL (Teledyne Marine).</i>	<i>5</i>
Kuva 5.	<i>Koteloitu videokameralaitteisto (Surface Down).</i>	<i>7</i>
Kuva 6.	<i>EdgeTechin 2200-sarjan SONAR-laitteisto (EdgeTech).</i>	<i>8</i>
Kuva 7.	<i>a) viistokaikuluotain b) monikaikuluotain c) etuluotain d) MSIS e) synteettisaperttuurinen luotain (Paull et al. 2014).....</i>	<i>9</i>
Kuva 8.	<i>Itsekompensoiva magnetometri (Ocean Floor Geophysics).....</i>	<i>10</i>
Kuva 9.	<i>Advanced Navigationin valmistama Poseidon GPS-antenni (Advanced Navigation).</i>	<i>11</i>
Kuva 10.	<i>Communication Technologyn valmistama Modular Meteo-Marine Monitor GIB (Communication Technology).</i>	<i>11</i>
Kuva 11.	<i>Paikannusmenetelmien hyödyntäminen oikeissa projekteissa (Chen et al. 2013).....</i>	<i>19</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AUV	Autonomous underwater vehicle, autonominen vedenalainen alus
DVL	Doppler velocity log
FLS	Forward-looking sonar, etukaikuluotain
GIB	GPS intelligent buoy, GPS transponderi
GPS	Global positioning system, satelliittipaikannusmenetelmä
IMU	Inertial measurement unit, inertiamittausyksikkö
INS	Inertial navigation system, inertianavigointijärjestelmä
LBL	Long baseline
MSIS	Mechanical scanning imaging sonar
SAS	Synthetic aperture sonar, synteettisapertuurinen luotain
SBL	Short baseline
SONAR	Sound operation, ranging and navigation, kaikuluotain
USBL	Ultra-short baseline

1. JOHDANTO

Meret peittävät yli 70 % maapallon pinta-alasta ja ne ovat olleet tärkeitä elävien organismien kehitykselle ja elämän ylläpitämiselle. Ihmiskunta on kuitenkin kartoittanut vasta alle 5 % planeettamme meristä, lopun ollessa täysin tuntematonta (National Oceanic and Atmospheric Administration). Hydrostaattisen paineen kasvaessa ja valon vähetessä meren pohjan kartoittaminen muuttuu haastavaksi ja riskialttiiksi, ja ilman oikeanlaisia varusteita mahdottomaksi. Työskentely näissä olosuhteissa ja yleisesti veden alla on ihmiselle hyvin vaarallista ja vaatii avuksi erinäisiä tukilaitteita, kuten happisäiliöt ja sukelluslaitteet. Vedenalainen robotiikka ja etenkin autonomiset laitteet ovat tärkeä tutkimusala, jonka avulla voidaan kartoittaa meille vielä tuntemattomia merenpohjia ilman ihmiseen kohdistuvaa riskiä.

Autonominen vedenalainen robotti, (englanninkielinen termi autonomous underwater vehicle) eli AUV, on laite, joka kykenee toimimaan itsenäisesti vaikeissa vedenalaisissa olosuhteissa ilman kontaktia pinnalle. Autonomisten vedenalaisten laitteiden kehittäminen nykymuodossaan alkoi 1970-luvulla ja näitä laitteita käytetään nykypäivänä monipuolisissa tehtävissä, mukaan lukien merenpohjan kuvauksessa ja kartoittamisessa, merenalaisten putkien ja kaapelien kunnan valvonnassa, pelastustoimenpiteissä ja kaivosten tutkimisessa (Chen et al. 2013; Paull et al. 2014). Kuvassa 1 on esitettyä esimerkkinä General Dynamicsin Bluefin-21 AUV.



Kuva 1. Bluefin-21 Autonomous Underwater Vehicle (General Dynamics)

General Dynamicsin Bluefin on tyypillinen AUV, joka koostuu paikannukseen tarvituista komponenteista ja rungosta, jonka tulee suojata kaikkea navigoimiseen tarvittavaa elektroniikkaa, kuten akkuja, antureita, kameroita ja tietokoneita. Rungon tulee olla erittäin kestävä, sillä sen tulee kestää kova hydrostaattinen paine, ja sen tulee ylläpitää normaalia ilmanpainetta elektroniikkaa varten (Shah 2007). Laitteen anturien ja paikannuskompo-

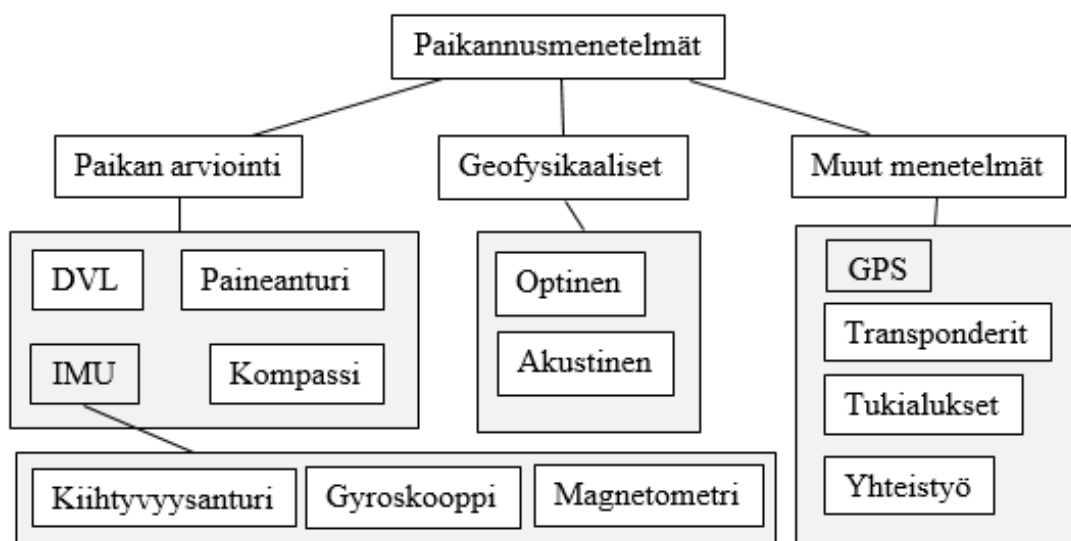
nenttien tehtävä on tuottaa reaaliaikaista dataa AUV:n asemasta, eli sijainnista ja orientaatiosta ympäristöönsä nähden. Tämän lisäksi Bluefin on modulaarinen, joten siihen voi helposti vaihtaa eri komponentteja käyttötarkoituksesta ja ympäristöstä riippuen.

Teknologian jatkuva kehitys etenkin tietotekniikan ja elektroniikan alalla on mahdollistanut entistä pienempien, tehokkaampien ja halvempien tietokoneiden ja anturien valmistamisen. Tämä korreloittuu suoraan autonomisiin vedenalaisiin robotteihin, jotka kykenevät havaitsemaan oman asemansa ympäristöön nähden ja laskemaan paikkansa entistä tarkemmin. Tämä on erittäin tärkeää, sillä ilman yhteyttä meren pintaan tulee robotin kyetä paikantamaan itsensä täysin omatoimisesti. Teknologian kehityksen myötä on keksitty myös uusia paikannusmenetelmiä, joiden ansioista AUV:t voivat toimia itsenäisesti entistä kauemmin entistä hankalammissa ympäristöissä.

Tämän työn tavoitteena on tarkastella vedenalaisessa robotiikassa käytettyjä paikannusmenetelmiä ja niiden komponentteja sekä vertailla niiden vahvuuksia ja heikkouksia. Ensimmäisenä johdannon jälkeen luvussa 2 kategorisoidaan ja käsitellään eri paikannusmenetelmiä ja komponentteja. Nämä taulukoidaan luvussa 3 ja vertaillaan niitä keskenään, sekä pohditaan eri paikannusmenetelmien ja niiden yhdistelmien mahdollisia käyttötarkeitä. Lopuksi luvussa 4 kootaan yhteenvetoon työn tutkimustulos ja pohdinnat.

2. PAIKANNUSMENETELMÄT

Vedenalaiset paikannusmenetelmät voidaan kuvan 2 mukaisesti jakaa kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat paikan arviointi, geofysikaaliset paikannusmenetelmät, ja muut menetelmät. Paikan arviointi kattaa erilaisia inertia-antureita sisältäviä inertiamittausyksiköitä ja muita antureita, joille ominaista on ympäristöstä riippumattomuus. Geofysikaaliset menetelmät kattavat sen sijaan erilaiset optiset ja akustiset menetelmät, jotka ovat ympäristöstä riippuvaisia. Muihin menetelmiin kuuluvat erilaiset tukitoimet ja -laitteet, jotka vaativat ulkoista apua.



Kuva 2. Paikannusmenetelmien jaottelu.

Nämä kolme kategoriaa käsitellään kaikki omissa luvuissaan. Tässä työssä keskitytään täyden autonomian mahdollistaviin menetelmiin, eli niihin, joiden avulla AUV pystyy toimimaan täysin ilman ulkoista apua. Tämän vuoksi vertailu tehdään vain inertia-antureihin pohjautuviin paikan arvioinnin menetelmien ja geofysikaalisten menetelmien sekä komponenttien välillä, mutta muut menetelmät käsitellään silti lyhyesti luvussa 2.3, sillä ne ovat monessa käyttötarkoituksessa tärkeitä AUV:n paikannuksen kannalta.

2.1 Arvioitu asema ja inertiamittausyksikkö

Kun AUV navigoi ilman ulkoista apua ja tietoa ympäristöstään, se arvioi omaa paikkaansa. Inertia-antureihin pohjautuva paikan arviointi perustuu GPS:n kautta saadun alkuperäisen sijainnin ja anturidatan avulla oman sijainnin jatkuvaan laskennalliseen arviointiin (Moody 2014). Näitä antureita kutsutaan inertia-antureiksi, sillä ne mittaavat inertiaalikoordinaatistonsa muutoksia (Curey et al. 2004). Tämä on tarkan paikannuksen perusta, jonka yhteydessä käytetään tarvittaessa muita paikannusmenetelmiä.

Anturidataan pohjautuvan paikan arvioinnin ongelmana on kuitenkin antureiden mittausvirhe, joka on kumulatiivista ja suurempi kuljetun matkan kasvaessa. Tällöin laitteen laskeuma paikka ajelehtii pois todelliselta reitiltä. Tätä voidaan yrittää kompensoida lisäämällä pienemmällä taajuudella toimivat anturit. Näiden mittadataa käytetään inertia-antureiden kalibroimiseen (Miller et al. 2010).

2.1.1 Menetelmät ja niiden komponentit

Inertiamittausyksikkö, lyhyesti IMU (eli inertial measurement unit), on kokonaisuus, joka koostuu kolmen akselin gyroskoopeista ja kiihtyvyyssantureista sekä usein myös magnetometrillä. Inertiamittausyksiköitä valmistetaan tuhansia eri variaatiota käyttökohteesta ja halutusta tarkkuudesta riippuen. Tulee huomioida, että yleensä kalliimpi mittausyksikkö sisältää myös tarkempia antureita, mutta on todennäköisesti kooltaan suurempi (Paull et al. 2014). Kuvassa 3 on esitettynä Xsensen valmistama MTi 100-sarjan inertiamittausyksikkö.



Kuva 3. Xsens MTi 100-series inertiamittausyksikkö (Xsens).

Anturia, joka mittaa kulmanopeutta tietyn akselin suhteen, kutsutaan gyroskoopiksi (Curey et al. 2004). Koska gyroskooppi mittaa kulmanopeutta vain yhden akselin suhteen, laitteeseen tulee kiinnittää kolme anturia, jotta saadaan mittadataa kolmessa ulottuvuudessa. AUV tarvitsee gyroskoopista saatua mittausdataa oman asentonsa ja sen muutoksien määrittämiseen.

Kiihtyvyyssanturi mittaa laitteen ominaiskiihtyvyyttä, joka johtuu siihen kohdistuvista ulkopuolisista voimista, kun painovoimaa ei oteta huomioon. Tämä tarkoittaa sitä, että kapaleen ollessa vapaassa pudotuksessa, ominaiskiihtyvyys on nolla. Tätä anturia voidaan käyttää lineaarikiihtyvyyden, mutta myös kulmakiihtyvyyden mittaamiseen. Yleensä kiihtyvyyssanturilla tarkoitetaan kuitenkin lineaarikiihtyvyyttä mittaavaa anturia (Curey et al. 2004). Näiden antureiden avulla AUV voi arvioida esimerkiksi aallokon ja veden virtauksien vaikutusta omaan asemaansa.

Magnetometri on anturi, joka mittaa magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa (McWilliams 2014). Kompassi on yksinkertainen magnetometri, joka osoittaa maapallon magneettikentän suuntaisesti kohti pohjoista. Tämän anturin avulla AUV tietää oman suuntautumisen maan magneettikenttään nähden. Magnetometri voitaisiin määritellä myös geofysikaaliseksi menetelmäksi, mutta koska kompassi on yleinen osa inertiamittausyksiköissä, käsitellään se tässä.

Inertia-antureiden lisäksi autonomisissa vedenalaisissa laitteissa käytetään yleensä Dopplerin ilmiöön pohjautuvaa nopeuden mittaamista eli Doppler velocity logia, lyhyesti DVL, mahdollisimman tarkan paikan arvion mahdollistamiseksi. DVL -anturi koostuu kolmesta tai neljästä alaspäin 30° kulmassa suunnatusta signaalinmuuntajasta. Anturi mittaa laitteen pohjan nopeuden suhteessa veteen jokaisessa muuntajassa, jonka avulla saadaan selville AUV:n nopeusvektorit (Rigby et al. 2006). Vaikka useimmat laitteet hyödyntävät myös tätä menetelmää, ovat tarkimmat anturit hyvin kalliita. Kuvassa 4 on esitetty Teledynen DVL -anturi.



Kuva 4. *Teledyne Marine Explorer DVL (Teledyne Marine).*

Useimmassa tapauksessa vedenalaiset laitteet saavat tarkan syvyystiedon paineanturin avulla (Yuan et al. 2016). Vaikka laitteen toimintasyvyys voidaan tietää etukäteen, on paineen mittaus tärkeää, jotta laitteen runko ei nurjahda paineen vaikutuksesta (Mohd Shahrieel Mohd Aras et al. 2012). Anturi mittaa veden laitteeseen kohdistamaa hydrostaattista painetta, joka on nesteen eli veden tiheyden, putoamiskiihtyvyyden ja korkeuden eli syvyyden tulo. Hydrostaattinen paine kasvaa hyvin jyrkästi, mitä syvemmälle mennään. Kymmenen metriä syvemmälle tarkoittaa yhden normaalin ilmanpaineen lisäystä, jolloin oma syvyys voidaan laskea noin 10 cm tarkkuudella (Paull et al. 2014).

2.2 Geofysikaaliset paikannusmenetelmät

Paikannusmenetelmiä, jotka käyttävät tietoa laitteen ympäristöstä apuna navigoinnissa, kutsutaan geofysikaaliksi paikannusmenetelmiksi. Ne käyttävät komponentteja ja prosesseja, joiden avulla laite pystyy havaitsemaan, tunnistamaan ja luokittelemaan ympäristöönsä. (Paull et al. 2014) Geofysikaaliset menetelmät eivät yksinään riitä tarkan paikannuksen saavuttamiseksi, vaan niitä käytetään yhdessä paikkaa arvioivien menetelmien kanssa.

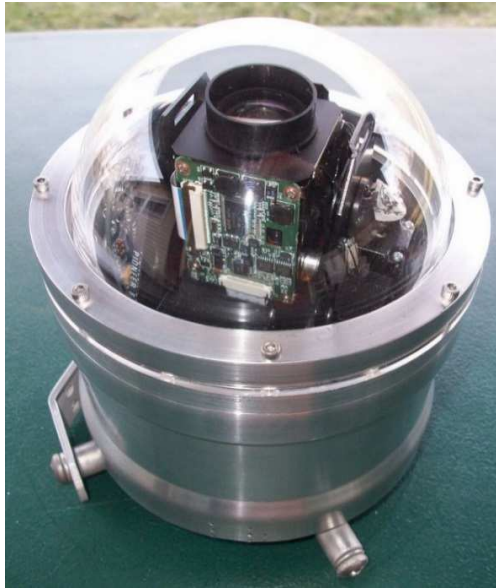
Geofysikaaliset paikannusmenetelmät voidaan jakaa optisiin, akustisiin ja magneettisiin menetelmiin. Optiset paikannusmenetelmät ottavat kameralaitteistolla kuvia merenpohjasta, ja vertaavat perättäisiä kuvia toisiinsa oman liikkeensä selvittämiseksi. Optisiin menetelmiin kuuluvat myös lasermittausta käyttävät menetelmät. Akustiset menetelmät käyttävät tutka- tai luotainlaitteistoa ympäristön piirteiden ja kiintopisteiden tunnistamiseen, ja tämä teknologia on ollut käytössä vuosikymmeniä ennen autonomisten laitteiden kehittämistä, joten se on pitkälti hyvin viimeisteltyä. Magneettiset menetelmät eivät ole yleisessä käytössä, mutta ne käyttävät ympäristön mahdollisia magneettikenttiä paikannukseen. Tähän perustuva kompassi käsiteltiin aiemmassa luvussa inertiamittausyksikön yhteydessä.

2.2.1 Menetelmät ja niiden komponentit

Optiset paikannusmenetelmät keräävät dataa kameralaitteistolla, joka voi koostua yhdestä tai useammasta kamerasta. Laitteistolla otetaan jatkuvia perättäisiä kuvia, joista AUV tunnistaa konenäön avulla erinäisiä kiintopisteitä ja maamerkkejä. Vertaamalla perättäisiä kuvia ja havaittujen pisteiden paikkaa, voidaan laskea robotin aseman muutos. (Paull et al. 2014) Monokulaarinen kameralaitteisto koostuu vain yhdestä linssistä, jolloin paikannus tapahtuu kaksiulotteisista kuvista. Ongelmana kuitenkin on, että havaittavien kohteiden skaala voi olla tulkinnanvaraista, eikä kuva sisällä kohteen syvyydestä. Tätä parempi menetelmä on käyttää stereokameralaitteistoa, joka koostuu kahdesta erillisestä kamerasta, joiden etäisyys ja sijainti suhteessa toisiinsa tunnetaan. Tällöin laitteisto toimii kuten ihmissilmät, jolloin havaittavien kohteiden skaalan tuottama monitulkinnallisuus korjaantuu ja paikannus on tarkempaa kolmiulotteisen kuvan syvyydestiedolla. (Massot-Campos & Oliver-Codina 2015) Kuvassa 5 esimerkki kameralaitteistosta.

Optiset paikannusmenetelmät ovat yleisesti käytössä, sillä ne antavat rikasta paikannustietoa, eivätkä ole kalliita toteuttaa. Vedenalaiset olosuhteet ovat kuitenkin vaihtelevia ja ajoittain voi olla hyvinkin huono näkyvyys, joka rajoittaa kameran toimintäisyyttä. Valon määrä ei myöskään ole vakio, etenkin syvemmälle sukeltaessa, eikä AUV:n oma valaistus ole aina riittävä. Optista kameralaitteistoa voidaan kuitenkin käyttää yhteistyössä laserin kanssa, joka verrattuna yhden linssin kameralaitteistoon ei ole altis huonolle näkyvyy-

delle ja heikolle valaistukselle. (Chen et al. 2013) Yleisin ratkaisu on käyttää vihreää laseria, jonka aallonpituus on 532 nm, koska se on hyvä kompromissi hinnan, saatavuuden ja valon vaimenemisen välillä (Massot-Campos & Oliver-Codina 2015).



Kuva 5. *Koteloitu videokameralaitteisto (Surface Down).*

Akustiset paikannusmenetelmät käyttävät ääneen heijastumiseen pohjautuvaa kaikuluotasta eli SONAR-menetelmiä (lyhenne englanninkielisistä sanoista sound operation, ranging and navigation) (Massot-Campos & Oliver-Codina 2015). Tässä käytetään kuitenkin termiä kaikuluotain helppolukuisuuden vuoksi. Akustiset luotainmenetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin, joista paikannuksessa käytetään aktiivisiä menetelmiä, joten vain niihin keskitytään tässä työssä. Menetelmän idea on, että luotaimet saavat aikaan ääniaallon joka heijastuu meren pohjasta tai mahdollisesta esteestä, ja luotain seuraa kyseistä heijastumista. Luotaimen aikaansaama ääniaalto voi olla jatkuvaa tietyllä taajuudella tai lyhyempiä aaltoja muuttuvalla taajuudella, ja yleensä pitkän kantaman luotaimet käyttävät matalampia taajuuksia ja lyhyen matkan luotaimet korkeita taajuuksia. (Massot-Campos & Oliver-Codina 2015) Koska vesi on ilmaa parempi välittäjäaine, ovat kaikuluotaimet käytössä pääsääntöisesti vedenalaisissa laitteissa (Chen et al. 2013). Kuvassa 6 on esimerkkinä EdgeTechin valmistama vedenalaiseen robottiin tarkoitettu luotainlaitteisto.

Akustinen kuva muodostuu ympäristön heijastamasta kaikutiheydestä. Lähempänä olevista kohteista heijastuva aalto palautuu anturiin aikaisemmin kuin kaukana olevista kohteista. Kun äänennopeus tunnetaan, voidaan laskea etäisyys havaittuun kohteeseen ja muodostaa siitä kuva. Koska ääniaalto heikkenee matkan kasvaessa, kaukana olevien kohteiden kuvantaminen on heikompaa (Kaeli 2016). Optiseen kuvaan verrattuna korrelaatio ympäristön kanssa on suuri, mutta kuvan resoluutio on huono. Akustisen kuvan

signaali-kohinasuhde on myös matalampi kuin optisella kuvalla. (Zeng et al. 2012) Seuraavaksi esitellään viisi eri kaikuluotaukseen perustuvaa paikannusmenetelmää, jotka ovat myös esitettynä kuvassa 7.



Kuva 6. *EdgeTechin 2200-sarjan SONAR-laitteisto (EdgeTech).*

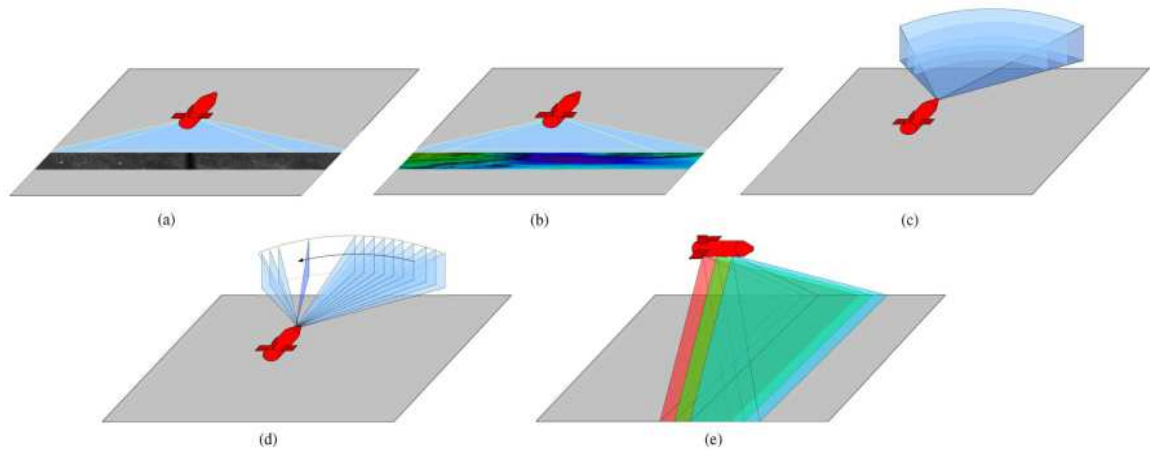
Viistokaikuluotaus (eli side-scan sonar) lähettää AUV:n kulkusuuntaan nähden kohtisuoran ääniaallon, joka heijastuu takaisin merenpohjasta tai mahdollisista esteistä (Kaeli 2016). AUV:n liikkeessa eteenpäin nämä jatkuvien ääniaaltojen muodostamat niin sanotut kuvaviipaleet luovat kaksiulotteisen kuvan merenpohjasta. Tätä kuvaa voidaan verrata laitteen muistista löytyvään valmiiseen karttaan tarkan sijainnin määrittämiseksi. Tämän luotaimen tarkkuus on sitä parempi mitä lyhyempi etäisyys on merenpohjaan. Tämän takia joissain tilanteissa luotain voi olla varsinaisesta AUV:sta irrallisena, jota se vetää perässään. (Chen et al. 2013) Tämä toimii vain aukealla alueella luotaimen riskistä juuttua esimerkiksi luolaverkostossa navigoidessa. Viistokaikuluotaus on esitetty kuvassa 7(a).

Monikaikuluotaus (eli multi-beam sonar) toimii hyvin samalla periaatteella kuin viistokaikuluotaus. Nimensä mukaisesti monikaikuluotain koostuu useasta AUV:n runkoon kiinnitetystä tunnistimesta, jolloin se havainnoida useamman eri pisteestä heijastuneen ääniaallon samanaikaisesti. Monikaikuluotaus mahdollistaa myös viistokaikuluotausta tarkemman syvyysmittauksen. (Chen et al. 2013; Paull et al. 2014) Yleisesti AUV:sta löytyy näistä laitteista vain toinen, joko monikaikuluotain tai viistokaikuluotain. Monikaikuluotaus on esitetty kuvassa 7(b).

Etukaikuluotaimen (eli forward-looking sonar FLS), tehtävänä on havainnoida AUV:n edessä luotaimen suhteen kohtisuorassa olevia esteitä eikä merenpohjaa. FLS toimii muuten samoin kuin edellä esitelty monikaikuluotaus. Menetelmän yleisin käyttötarkoitus on toimia apuna AUV:n lähestyessä hitaasti telakointiasemaansa. (Paull et al. 2014) Etukaikuluotaus on esitetty kuvassa 7(c).

MSIS (eli mechanical scanning imaging sonar) toimii kuten yllä esitellyt monikaikuluotaus ja FLS, mutta usean tunnistimen sijaan käytetään vain yhtä tunnistinta, jota liikutetaan halutussa havainnointikulmassa, tarvittaessa jopa täydet 360° . Tällöin kuvantamisen nopeus on kuitenkin hitaampaa, mutta saadaan täysi akustinen kuva laitteen ympäristöstä. Laitteen liike aiheuttaa kuvaan häiriöitä menetelmän hitauden takia, mutta tämä voidaan korjata laskennallisesti. (Chen et al. 2013) MSIS on esitetty kuvassa 7(d).

Synteettisapertuurinen kaikuluotain (eli synthetic aperture sonar SAS), on kehittyneempi versio perinteisestä viistokaikuluotauksesta, joka tuottaa todenmukaisemman kuvan merenpohjasta. Kun viistokaikuluotauksessa käsitellään yksi heijastunut ääniaalto kerrallaan, SAS taas muodostaa korkearesoluutioisen kuvan jatkuvilla perättäisillä aalloilla. Nämä aallot vahvistavat toisiaan, mikä mahdollistaa tarkan paikannuksen myös hyvin kaukaa. Normaaliin viistokaikuluotaukseen verrattuna SAS:n tunnistimien keilaleveys on suurempi, tyypillisesti yli 30° . (Hayes & Gough 2009; Chen et al. 2013) SAS on esitetty kuvassa 7(e).



Kuva 7. a) viistokaikuluotain b) monikaikuluotain c) etuluotain d) MSIS e) synteettisapertuurinen luotain (Paull et al. 2014).

Magneettikentät ovat tärkeitä esimerkiksi ympäristön geologisen ja arkeologisen datan, mineraalipitoisuuksien, sekä muiden resurssien kartoittamiseen. Magneettikenttiä voidaan hyödyntää myös, jos AUV:n halutaan seuraavan merenpohjaan laskettua putkea tai kaapelia. Magnetometriä voidaan käyttää myös esteiden väistämiseen ja havainnointiin. Varsinaisessa tarkan sijainnin määrittämisessä magnetometrit kompassia lukuun ottamatta ovat hyvin vähäisessä käytössä. Magnetometrin heikkous on laitteen, johon anturi on asennettu, muodostaman magneettikentän virhe, joka häiritsee ympäristön havainnointia. Tämän takia magnetometri saatetaan asentaa laitteen ulkopuolelle, jolloin AUV vetäisi sitä perässään. Tämä on kuitenkin hyvin epäkäytännöllinen ja kallis menetelmä. (Ocean Floor Geophysics) Kuvassa 8 esimerkki magnetometrillä.



Kuva 8. *Itsekompensoituva magnetometri (Ocean Floor Geophysics).*

Kuvassa esitetty Ocean Floor Geophysicsin SCS Magnetometer, eli siis itsekompensoituva magnetometri. Yllä esitetystä eroten se asennetaan AUV:n rungon sisään, sillä se on onnistuneesti kalibroitu kompensoimaan AUV:n omaa ja muista laitteista muodostuvaa, jatkuvasti muuttuvaa magneettikenttää patentoidulla järjestelmällä, ratkaisten näin magnetometrien isoimman virhelähteen. (Ocean Floor Geophysics)

2.3 Muut menetelmät yleisesti

Tähän kategoriaan kuuluvat paikannusmenetelmät vaativat apua laitteen ulkoisilta järjestelmiltä, jolloin ei voida puhua täysin autonomisesta paikannuksesta. Tärkeimpinä voidaan tuoda esille satelliittipaikannus, esimerkkinä GPS (eli global positioning system), lähetyvastaanottimet eli transponderit ja erilaiset tukitoimet, esimerkiksi pinta-alukset. Näitä menetelmiä ei satelliittipaikannusta lukuun ottamatta vertailla tässä työssä, mutta esitellään lyhyesti.

GPS on maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä, joka mahdollistaa oman sijainnin määrittämisen missä tahansa maapallolla muutaman metrin tarkkuudella, olettaen että yhteys maapallon kiertoradalla liikkuviin satelliitteihin toimii ilman häiriötekijöitä. Järjestelmä voidaan jakaa satelliiteista koostuvaan avaruusosaan, ohjaavaan toimintaan eli kontrolliosaan ja käyttäjän laitteista koostuvaan käyttäjäosaan. Kun käyttäjäosa saa yhteyden vähintään neljänä eri satelliittiin, järjestelmä määrittää käyttäjän etäisyyden kustakin satelliitista ja saa näin geometrisesti selville tarkan kolmiulotteisen sijainnin. (GPS.gov)

Koska vesi toimii esteenä GPS-paikannuksessa vaaditulle signaalille, sitä voidaan käyttää vain AUV:n noustessa pintaan. GPS on kuitenkin yleensä integroitu yhteen paikan arviointiin pohjautuvien menetelmien kanssa, joita käsiteltiin luvussa 2.1. (Chen et al. 2013) Tällöin AUV hakee tarkan sijaintinsa satelliittipaikannusta hyödyntäen, ja sukelluksen jälkeen pohjautuu täysin inertia-antureihinsa. Luvussa 2.1 mainittua paikannuksen kumulatiivista virhettä voidaan korjata nousemalla tasaisin väliajoin takaisin pintaan satelliittipaikannusta varten. Tällöin laitteen toimintasyvyys ei kuitenkaan voi olla hirveän syvä. Kuvassa 9 on esitetty Advanced Navigationin GPS-antenni, joka kiinnitetään AUV:n rungon päälle ja mahdollistaa satelliittipaikannuksen merenpinnalla.



Kuva 9. *Advanced Navigationin valmistama Poseidon GPS-antenni (Advanced Navigation).*

Transponderit ovat AUV:n ulkopuolisia lähetinlaitteita, jotka toimivat keinotekoisina kiintopisteinä paikannuksessa. GPS intelligent buoy (GIB) on meren pinnalla kelluva lähetin, joka saa sijaintitietonsa GPS-järjestelmän kautta. Se koostuu pinnan yläpuolella olevasta vastaanottimesta ja pinnan alapuolella olevasta akustisesta laitteesta. Kun AUV saa yhteyden vähintään kolmeen lähettimeen akustisilla signaaleilla, se voi laskea tarkan sijaintinsa kolmessa ulottuvuudessa lähettimien GPS sijaintien ja etäisyyksien avulla. (Paull et al. 2014) Yksikin lähetin riittää suuntaa antavan sijainnin määrittämiseen. Esimerkki pinnalla kelluvasta GIB menetelmään perustuvasta poijusta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 10. *Communication Technologyn valmistama Modular Meteo-Marine Monitor GIB (Communication Technology).*

Long baseline (LBL) on saman tyyppinen menetelmä kuin GIB, mutta tässä tapauksessa lähettimet kiinnitetään meren pohjaan luoden lähetinverkoston, jonka laajuus riippuu halutusta toiminta-alueesta. Tällöin AUV suhteuttaa oman sijaintinsa tähän verkostoon, eikä varsinaisiin sijaintikoordinaatteihin. Tämän menetelmän kantama voi olla jopa kuusituhatta metriä, jolloin yleensä riittää, että lähettimet asennetaan toiminta-alueen kulmiin. GIB on näistä kahdesta laajemmin käytössä sen hinnan ja helppokäyttöisyyden vuoksi. (Chen et al. 2013) Toiminta-aluetta on myös helpompi vaihtaa.

Muita baseline-menetelmiä ovat short baseline (SBL) ja ultra short baseline (USBL). Nämä toimivat AUV:n kannalta samalla tavalla kuin yllä esitetyt GIB ja LBL, mutta ne ovat yleensä kiinnitettynä liikkuvaan pinta-alukseen. (Chen et al. 2013) AUV sitoo sijaintinsa pinta-alukseen, jonka sijaintikoordinaatit tunnetaan. Tämä mahdollistaa jatkuvan tarkan sijaintitiedon ylläpitämisen, olettaen että kantama pinta-alukseen pysyy riittävänä. Kyseisen pinta-aluksen ei tarvitse olla välttämättä edes miehitetty, vaan tämäkin voi olla oma automatisoitu laitteensa, jolloin kaksi robottia toimivat yhteistyössä keskenään.

Toinen robottien yhteistyöhön perustuva paikannusmenetelmä on niin sanottu robotti-parvi, jolloin useampi AUV kommunikoi keskenään. Parvet voivat olla joko homogeenisiä tai heterogeenisiä. Heterogeeninen parvi muodostuu useammasta AUV:sta, joista muutama tai vain yksi on varustettu kalliimmalla laitteistolla tai esimerkiksi GPS:llä. Näiden yksittäisten robottien tehtävänä on tukea muuta parvea tarjoamalla tarkempaa sijaintitietoa, esimerkiksi jakamalla GPS-koordinaatit AUV:n käydessä pinnalla, jota muut voivat käyttää paikannusvirheen korjaamiseen. Homogeeninen parvi muodostuu taas useammasta täysin samanlaisella laitteistolla varustetusta AUV:sta. Paikannuksen virhe kasvaa huomattavasti hitaammin, kun robotit jakavat tietonsa keskenään. Samaan tapaan heterogeenisen parven kanssa, jos yksikään näistä roboteista nousee pintaan, jakaa se GPS-koordinaatit koko parven kanssa. (Paull et al. 2014)

3. VERTAILU JA HAVAINNOT

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on sellaisten vedenalaisten paikannusmenetelmien ja niiden komponenttien esittely ja vertailu, jotka mahdollistavat robotin autonomisen toimimisen pinnan alla. Tässä luvussa on taulukoitu ja vertailtu edellisessä luvussa autonomisen paikannuksen mahdollistaviksi todetut menetelmät. Tämän lisäksi magnetometri käsitellään vertailussa pelkkänä kompassina sen yleisyyden vuoksi. Vertailun kohteena ovat paikan arvioinnin kategoriasta:

- Inertiamittausyksikkö (IMU)
- Satelliittipaikannusjärjestelmä (GPS)
- Kompassi
- Doppler velocity log (DVL)
- Paineanturi

Myös GPS on sisällytetty tähän, sillä sitä käytetään laajalti inertiamittausyksiköiden kanssa. Geofysikaaliset menetelmät on koottu kahdessa osassa. Optisista menetelmistä vertailun kohteena ovat:

- Kamerajärjestelmä
- Laser-avusteinen kamerajärjestelmä

Nämä menetelmät ovat lähes samanlaisia, mutta tilanteen mukaan on järkevää valita vain toinen. Akustisista menetelmistä vertailun kohteena ovat kaikki viisi eri esiteltyä menetelmää, eli:

- Viistokaikuluotain
- Monikaikuluotain
- Etukaikuluotain (FLS)
- Mechanical scanning imaging sonar (MSIS)
- Synteettisapertuurinen luotain (SAS)

Tavoitteena on myös pohtia eri menetelmien käyttötarkoituksia ja soveltuvuutta eri tehtäviin ja eri olosuhteisiin. Tukena käytetään tietoa jo toteutuneista vedenalaisista projekteista. Pohditaan myös eri menetelmien yhdistelmiä, jotta saavutetaan haluttu paikannustarkkuus tietyssä tehtävässä ja ympäristössä. Pohdinnan tukena käytetään vertailussa tehtyjä havaintoja.

3.1 Vertailu

Taulukkoon 1 on koottuna paikan arviointiin perustuvat menetelmät ja ne ovat listattuna esittelyjärjestyksessä GPS:ää lukuun ottamatta, sillä se on yleisesti käytetty menetelmä inertiamittausyksiköiden kanssa. Taulukossa on lyhyt kuvaus menetelmän toimintaperiaatteesta, tieto siitä mitä informaatiota menetelmä antaa AUV:n asemasta, sekä menetelmän vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 1. Koonti paikan arvioinnin menetelmistä.

Nimi	Kuvaus	Tieto	Vahvuudet	Heikkoudet
IMU	Koostuu vähintään kolmesta gyroskoopista ja kolmesta kiihtyvyyssanturista, yksi jokaisen akselin suhteen.	Asento sekä kiihtyvyys	- Halpa komponentti - Helppo toteuttaa - Valtava valikoima	- Kumulatiivinen virhe, josta seuraa jatkuvasti heikkenevä tarkkuus.
GPS	Globaali satelliittipaikannusjärjestelmä, joka toimii vain meren pinnalla.	Sijainti	- Hyödyntää jo olemassa olevaa järjestelmää - Halpa komponentti - Helppo toteuttaa	- Ei toimi pinnan alla - Altis häirinnälle - Ulkopuolisen järjestelmän varassa
Kompassi	Antaa laitteelle globaalin suuntareferenssin osoittamalla kohti magneettista pohjoista.	Suunta	- Halpa komponentti - Helppo toteuttaa	- Altis häiriöille, jotka johtuvat ympäristöstä ja muista komponenteista.
DVL	Laskee laitteen nopeusvektorin Dopplerin ilmiön avulla rungon alapinnalla.	Nopeus	- Hyvä toimintasyvyys - Antaa nopeuden suoraan	- Mitä tarkempi, sen painavampi, jolloin ei sovellu pienille laitteille - Kallis komponentti - Virrankulutus
Paineanturi	Anturi laskee, kuinka syvällä laite on merenpintaan nähden mittaamalla veden laitteeseen kohdistamaa hydrostaattista painetta, eli veden tiheyden, putoamiskiihtyvyyden ja korkeuden eli syvyyden tuloa.	Syvyys	- Hyvä toimintasyvyys - Halpa komponentti - Hyvä tarkkuus	- Kestoikä - Vain dynaaminen mittaus

Huomataan, että jokainen eri menetelmä antaa erilaista tietoa AUV:n asemasta. Huomataan myös, että useat menetelmät ovat hyvin alttiita virheelle ja häiriöille. Tämä on hyvin ominaista arviointiin perustuvilla menetelmillä, sillä niissä virhe kasvaa ajan funktiona,

jolloin AUV:n on tarpeellista nousta säännöllisesti pintaan korjaamaan sijaintinsa GPS-koordinaattien avulla. Tämän takia pelkästään näillä menetelmillä navigoivan laitteen toimintasyvyys on melko matala. Tällöinkin laite pystyy paikantamaan itsensä vain suhteessa lähtö- tai tarkistuskoordinaatteihinsa, eikä se kykene havainnoimaan ympäristöään. Tämän takia näitä menetelmiä tulisi käyttää yhdessä muiden menetelmien kanssa.

Taulukkoon 2 on koottuna optiikkaan perustuvat menetelmät ja ne ovat listattuna esittelyjärjestyksessä. Taulukossa on lyhyt kuvaus menetelmän toimintaperiaatteesta, tieto siitä mitä informaatiota menetelmä antaa AUV:n asemasta, sekä menetelmän vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 2. Koonti optisista menetelmistä.

Nimi	Kuvaus	Tieto	Vahvuudet	Heikkoudet
Kamera	Laite vertailee perättäisiä kuvia ja arvioi laitteen aseman muutosta ja nopeutta.	Sijainti (ympäristöön nähden) ja nopeus	- Halpa komponentti - Helppo toteuttaa - Hyvä tarkkuus	- Vaatii hyvän näkyvyyden - Vaatii hyvän valaistuksen - Matala käyttösyvyys
Laser-avusteinen	Käyttää laseria yhteistyössä kameran kanssa kohteiden hahmottamiseen ja etäisyyden mittaamiseen. Yleisin aallonpituus 532 nm.	Sijainti (ympäristöön nähden) ja etäisyys	- Hyvä tarkkuus - Ei altis näkyvyyden ja valaistuksen muutoksille	- Korkea hinta

Huomataan, että kumpikin menetelmä antaa AUV:lle hyvin samanlaista tietoa. Molemmat menetelmät havainnoivat ympäristöään vertaamalla kamerajärjestelmällä otettuja peräkkäisiä kuvia ja antavat tiedon sijainnista ja sen muutoksesta ympäristön suhteen. Laser-avusteisen järjestelmän vahvuutena on myös tieto esteiden etäisyyksistä. Pelkkä kamera on kuitenkin hyvin altis näkyvyyden ja valaistuksen muutoksille, joten sen käyttösyvyys on matala verrattuna laserilla varustettuun kamerajärjestelmään. Tämän vuoksi käyttöympäristöstä, -ajasta ja -syvyydestä riippuen tulee valita joko toinen menetelmä, jos halutaan käyttää optista paikannusmenetelmää. Jo pelkkä yksinkertainen kamerajärjestelmä kuitenkin mahdollistaa ympäristön videotaltioinnin myöhempää tarkastelua varten, jos AUV on varustettu omilla valoilla ja ympäristö on edes paikoittain selkeää. Tästä syystä jonkinlaisen kameran käyttäminen, jos ei paikannustarkoituksessa, voi olla erityisen hyödyllinen.

Taulukkoon 3 on koottuna kaikki viisi esiteltyä akustista paikannusmenetelmää ja ne ovat listattuna esittelyjärjestyksessä. Taulukossa on edelleen lyhyt kuvaus menetelmän toimintaperiaatteesta, tieto siitä mitä informaatiota menetelmä antaa AUV:n asemasta, sekä menetelmän vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 3. Koonti akustisista menetelmistä.

Nimi	Kuvaus	Tieto	Vahvuudet	Heikkoudet
Viistokaikuluotaus	Luo takaisinheijastuneiden signaalien avulla kaksiulotteisen tiheyskuvan merenpohjasta.	Sijainti (merenpohjaan nähden)	- Tuottaa tarkan kuvan - Toimintanopeus - Hyvä toimintasyvyys	- Kuva tarkka vain lähellä merenpohjaa - Liian painava pienille laitteille - Korkea hinta
Monikaikuluotaus	Sama periaate kuin viistokaikuluotauksessa, mutta runkoon kiinnitetty useita vastaanottimia.	Sijainti (merenpohjaan nähden) ja syvyys	- Tarkka kuva - Hyvä toimintasyvyys - Soveltuu myös pienille laitteille	- Korkea hinta
Etukaikuluotaus	Sama periaate kuin monikaikuluotauksessa, mutta suunnattu vain eteenpäin.	Sijainti (esteisiin nähden)	- Esteiden väistäminen - Hyvä toimintasyvyys - Tarkka kuva	- Korkea hinta - Rajoittunut näkökenttä
MSIS	Käännetään yhtä tunnistinta halutussa havainnointikulmassa.	Sijainti (ympäristöön nähden)	- Monikaikuluotainta halvempi - Kevyt	- Hidas menetelmä - Vaihteleva tarkkuus
Synteettisapertuurinen	Viistokaikuluomainen kehittyneempi versio, yksittäisten signaalien sijasta lähettää useita perättäisiä, jotka vahvistavat toisiaan.	Sijainti (merenpohjaan nähden)	- Viistokaikuluotaimen verrattuna parempi näkökenttä - Etäisyydestä riippumaton hyvä tarkkuus	- Toimii paremmin hitailla nopeuksilla - Toimii paremmin syvissä vesissä - Korkea hinta

Huomataan, että jokainen menetelmä antaa AUV:lle periaatteessa saman informaation, ainoastaan menetelmän havainnointisuunta, menetelmän nopeus ja menetelmän kantama eroavat toisistaan.

Taulukkoon 4 on koottuna vielä kertaalleen kaikki tarkasteltavat paikannusmenetelmät esittelyjärjestyksessä. Taulukossa tarkastellaan paikannusmenetelmän komponentin hintaa, paikannustarkkuutta, painoa ja toimintasyvyyttä suhteessa muihin paikannusmenetelmiin. Tässä hintaa tarkastellaan asteikolla matala-keskiverto-korkea, tarkkuutta asteikolla huono-keskiverto-hyvä, painoa asteikolla kevyt-keskiverto-painava ja toimintasyvyyttä asteikolla matala-keskiverto-syvä.

Taulukko 4. Menetelmien vertailu.

Nimi	Hinta	Tarkkuus	Paino	Toimintasyvyys
IMU	Matala	Huono	Kevyt	Keskiverto
GPS	Matala	Hyvä	Kevyt	Matala
Kompassi	Matala	Hyvä	Kevyt	Matala
DVL	Korkea	Keskiverto	Vaihteleva	Syvä
Paineanturi	Matala	Hyvä	Kevyt	Syvä
Kamera	Matala	Vaihteleva	Keskiverto	Matala
Laser-avusteinen	Korkea	Hyvä	Keskiverto	Keskiverto
Viistokaikuluotaus	Keskiverto	Keskiverto	Painava	Syvä
Monikaikuluotaus	Keskiverto	Keskiverto	Kevyt	Syvä
FLS	Keskiverto	Keskiverto	Kevyt	Syvä
MSIS	Keskiverto	Keskiverto	Kevyt	Keskiverto
SAS	Korkea	Hyvä	Keskiverto	Syvä

On huomattava, että inertiamittausyksikön tarkkuus on huono verrattuna muihin menetelmiin kumulatiivisen virheen takia. Tämän lisäksi DVL:n paino ja kameran tarkkuus ovat asteikosta poiketen vaihtelevia johtuen siitä, että ne ovat hyvin riippuvaisia laitteen hinnasta ja paikannustarkkuudesta.

Taulukkoa tutkittaessa voidaan tehdä useita huomioita. IMU, GPS ja kompassi ovat kaikki halpoja ja kevyitä, mutta niiden toimintasyvyys on huono verrattuna muihin. Kaikilla akustisilla menetelmillä taas on erittäin hyvä toimintasyvyys, mutta niiden hinta on huomattavasti korkeampi. DVL on nopeuden mittaamiseen ehdottomasti paras valinta, ja paineanturia tulisi käyttää jokaisessa tilanteessa, koska se on hyvin halpa, sillä on todella hyvä tarkkuus, se on kevyt ja sen toimintakyky säilyy syvissä vesissä. Kameralaitteistot ovat tarpeellisia, jos halutaan tallentaa videokuvaa myöhempää tarkastelua varten tai jos

tavoiteltu toimintasyvyys on matala, jolloin akustiset kaikuluotaimet ovat turhan kalliita ja epäkäytännöllisiä.

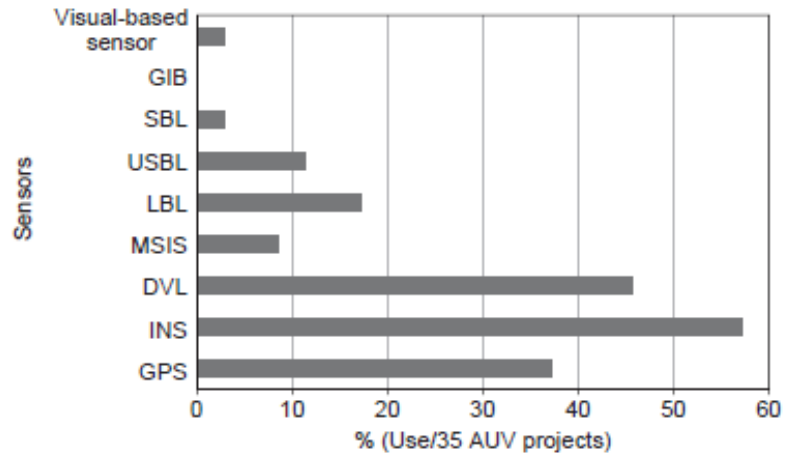
3.2 Havaintojen hyödyntäminen

Paikannusmenetelmät tulisi aina pohtia tehtäväkohtaisesti. Yksikään paikannusmenetelmä ei tarjoa täydellistä paikkatietoa ja menetelmät törmäävät erilaisiin haasteisiin erilaisissa ympäristöissä. Tästä syystä eri paikannusmenetelmiä voi ja tulee yhdistellä mahdollisimman tarkan paikannuksen ja navigoinnin saavuttamiseksi. Menetelmien valinnassa tärkeimpiä kysymyksiä ovat AUV:n haluttu toiminta-alue ja sen syvyys, tehtävän budjetti ja vaadittu paikannuksen tarkkuus.

Esitetään karkeaa jakoa kahteen eri tehtävätyyppiin, matalan toimintasyvyyden tehtävät ja syvän toimintasyvyyden tehtävät. Molemmissa tapauksissa suositellaan, että paikan arvioinnin menetelmiä käytettäisiin kaiken navigoinnin pohjana, jota täydennetään muilla paikannusmenetelmillä. DVL on paras menetelmä nopeuden selvittämiseen ja paineanturia kannattaa käyttää jokaisessa tehtävässä erinomaisen toimintasyvyyden ja -tarkkuuden takia.

Matalan toimintasyvyyden tehtävissä kannattaa hyödyntää mahdollisuutta nousta pintaan satelliittipaikannuksen eli GPS:n hyödyntämiseksi. Geofysikaalisista menetelmistä optiset soveltuvat myös parhaiten matalan toimintasyvyyden tehtäviin, sillä ympäristön valoisuus helpottaa menetelmällä navigoimista. Kaikuluotainjärjestelmät ovat tällaisessa tehtävässä yleensä tarpeettomia. Akustiset menetelmät soveltuvat taas ennen kaikkea syviin toimintasyvyksiin, jolloin niillä voi korvata optiset paikannusmenetelmät. Kaikuluotainjärjestelmiä ei ole tarpeellista hyödyntää muissa tehtävissä menetelmän korkean hinnan ja muiden menetelmien riittävyyden vuoksi.

Paikannusmenetelmien hyödyntämistä oikean elämän AUV-projekteissa on käsitelty esimerkiksi artikkelissa ”International Journal of Intelligent Unmanned Systems” (Chen et al. 2013), jossa on tarkasteltu 35 eri AUV-projektia ja niissä käytettyjä paikannusmenetelmiä. Kuvassa 11 on esitetty prosenttiosuuksina, kuinka suuressa osassa näistä projektia käytettiin yleisimpiä paikannusmenetelmiä.



Kuva 11. Paikannusmenetelmien hyödyntäminen oikeissa projekteissa (Chen et al. 2013).

Kuvasta ilmenee, että inertianavigointijärjestelmiä (INS), eli muun muassa inertia-mittausyksikköä, kompassia ja paineanturia, hyödynnetään yli puolessa artikkelissa tarkastelluista projekteista. Myös DVL ja GPS ovat käytössä lähes puolessa tapauksista. Nähdään siis, että tässä kandidaatintyössä esitetyt suositukset toteutuvat jo nyt myös oikean elämän tehtävissä.

4. YHTEENVETO

Vedenalainen robotiikka on jatkuvasti kehittyvä tieteenala, jossa laitteen paikannus mahdollisimman hyvällä tarkkuudella on erittäin tärkeää. Teknologian kehitys mahdollistaa tarkempien laitteiden ja antureiden valmistamisen entistä halvemmalla, jolloin paikannukseen voidaan hyödyntää useampia eri menetelmiä ilman, että robotin hinta ja paino nousee liian korkeaksi.

Vedenalaiset paikannusmenetelmät käsiteltiin kolmessa kategoriassa, jotka olivat paikan arviointiin pohjautuvat menetelmät, geofysikaaliset menetelmät ja muut menetelmät. Paikan arvioinnin yhteydessä käsiteltiin yleisimmät anturit, kuten inertiamittausyksikkö ja DVL. Todettiin, että näille menetelmille ominaista on paikannuksen kumulatiivinen virhe ja sijainnin laskennallinen selvitys. Geofysikaaliset menetelmät jaettiin optisiin ja akustisiin menetelmiin, joille ominaista oli ympäristön havainnointi ja paikannuksen sitominen ympäristöön. Akustisista menetelmistä käsiteltiin useampi luotaukseen perustuva menetelmä. Muista menetelmistä tärkeimmäksi nostettiin satelliittipaikannusjärjestelmät, joista GPS toimi esimerkkinä.

Työssä keskityttiin ennen kaikkea täydellisen autonomian mahdollistaviin paikannusmenetelmiin, joita vertailtiin toisiinsa suhteutettuna hinnan, painon, paikannustarkkuuden ja toimintasyvyyden kannalta. Muut menetelmät GPS:ää lukuun ottamatta jätettiin siis vertailusta pois. Todettiin, että käytettävät paikannusmenetelmät tulisi valita tehtävän luonteen perusteella. Tärkeimpiä kysymyksiä ovat AUV:n haluttu toiminta-alue ja sen syvyys, tehtävän budjetti ja vaadittu paikannuksen tarkkuus. Esitettiin, että paikan arvioinnin menetelmiä tulisi käyttää kaiken navigoinnin pohjana, jota täydennetään muilla paikannusmenetelmillä. DVL on paras menetelmä nopeuden selvittämiseen ja paineanturia kannattaa käyttää jokaisessa tehtävässä erinomaisen toimintasyvyyden ja -tarkkuuden takia. GPS soveltuu parhaiten matalan toimintasyvyyden tehtäviin, joissa AUV:lla on mahdollista nousta pintaan tarkistaakseen sijaintikoordinaattinsa satelliittipaikannusjärjestelmän avulla. Geofysikaalisista menetelmistä optiset soveltuvat myös parhaiten matalan toimintasyvyyden tehtäviin, sillä ympäristön valoisuus helpottaa menetelmällä navigoimista. Akustiset menetelmät soveltuvat taas ennen kaikkea syviin toimintasyvyysyksiin, eikä niitä ole tarpeellista hyödyntää muissa tehtävissä menetelmän korkean hinnan ja muiden menetelmien riittävyyden vuoksi.

LÄHTEET

Advanced Navigation POSEIDON - Advanced Navigation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.3.2018): <http://www.advancednavigation.com.au/product/poseidon#features>.

Chen, L., Wang, S., McDonald-Maier, K. & Hu, H. (2013). Towards autonomous localization and mapping of AUVs: a survey, *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, Vol. 1(2), pp. 97-120.

Communication Technology Modular Meteo-Marine Monitor, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.4.2018): http://www.commtec.com/Prods/Apps/apps_oceanography_Buoys.html.

Curey, R.K., Ash, M.E., Thielman, L.O. & Barker, C.H. (2004). Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards, PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), Monterey, CA, USA, IEEE, pp. 83-90.

EdgeTech 2200 and 2205 AUV / UUV / ROV / ASV / USV Sonars, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.4.2018): <https://www.edgetech.com/products/auv-rov-sonar/2200-2205-auv-rov-sonar/>.

General Dynamics Bluefin-21 Autonomous Underwater Vehicle (AUV) - General Dynamics Mission Systems, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.2.2018): <http://gdmissionsystems.com/products/underwater-vehicles/bluefin-21-autonomous-underwater-vehicle>.

GPS.gov GPS Overview, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.4.2018): <https://www.gps.gov/systems/gps/>.

Hayes, M.P. & Gough, P.T. (2009). Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 34(3), pp. 207-224.

Kaeli, J.W. (2016). Real-time anomaly detection in side-scan sonar imagery for adaptive AUV missions, 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Tokyo, Japan, 6-9 Nov. 2016, IEEE, pp. 85-89.

Massot-Campos, M. & Oliver-Codina, G. (2015). Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction, *Sensors (Basel, Switzerland)*, Vol. 15(12), pp. 31525-31557. Saatavissa: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26694389>.

McWilliams, M.O. (2014). Magnetometer, Access Science, McGraw-Hill Education. Saatavissa: <http://www.accessscience.com.libproxy.tut.fi/content/magnetometer/399600>.

Miller, P.A., Farrell, J.A., Zhao, Y. & Djapic, V. (2010). Autonomous Underwater Vehicle Navigation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 35(3), pp. 663-678.

- Mohd Shahrieel Mohd Aras, Abdullah, S.S., Shafei, S.S., Mohd Zamzuri Ab Rashid & Jamali, A. (2012). Investigation and Evaluation of Low Cost Depth Sensor System Using Pressure Sensor for Unmanned Underwater Vehicle, *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, Vol. 6(2), pp. 21.
- Moody, C.A.B. (2014). Dead reckoning, Access Science, McGraw-Hill Education. Saatavissa: <http://www.accessscience.com/content/dead-reckoning/181600>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration How much of the ocean have we explored?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.2.2018): <https://oceanservice.noaa.gov/facts/exploration.html>.
- Ocean Floor Geophysics Self-Compensating Magnetometer, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.4.2018): <http://www.oceanfloorgeophysics.com/ofg-scm/>.
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M. & Li, H. (2014). AUV Navigation and Localization: A Review, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 39(1), pp. 131-149.
- Rigby, P., Pizarro, O. & Williams, S.B. (Sept 2006). Towards Geo-Referenced AUV Navigation Through Fusion of USBL and DVL Measurements, *OCEANS 2006*, Singapore, 18.9.2006, IEEE, pp. 1-6.
- Shah, V.P. (2007). Design considerations for engineering autonomous underwater vehicles, Massachusetts Institute of Technology, Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1912/1883>.
- Surface Down Cameras, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.4.2018): <http://surface-down.com/cameras-.html>.
- Teledyne Marine Explorer DVL, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.3.2018): <http://www.teledynemarine.com/explorer-doppler-velocity-log?ProductLineID=34>.
- Xsens MTi 10-series – Products, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.3.2018): <https://www.xsens.com/products/mti-10-series/>.
- Yuan, D., Ma, X., Liu, Y., Hao, C. & Zhu, Y. (2016). Dynamic initial coarse alignment of SINS for AUV using the velocity loci and pressure sensor, *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 10(8), pp. 926-933. Saatavissa: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2016.0151>.
- Zeng, W., Wan, L., Zhang, T. & Huang, S. (2012). Simultaneous localization and mapping of autonomous underwater vehicle using looking forward sonar, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 17(1), pp. 91-97. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12204-012-1234-8>.