



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jesper Nurmi

Paikannusjärjestelmän käyttöönottoselvitys telakka-alueella

Tekniikan ja
innovaatiojohtamisen yksikkö
Automaatio ja tietotekniikan
diplomityö
Diplomi-insinööri

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Jesper Nurmi		
Tutkielman nimi:	Paikannusjärjestelmän käyttöönottoselvitys telakka-alueella:		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Automaatio ja tietotekniikka		
Työn ohjaaja:	Jouni Lampinen		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	54

TIIVISTELMÄ:

Eri teollisuuden aloilla tunnustetaan jatkuvasti uusia mahdollisuuksia teknologian käyttöönottoon sekä toimintojen tehostamisessa että turvallisuuden parantamisessa. Paikannusjärjestelmän avulla on mahdollista lisätä työympäristön turvallisuutta ja parantaa kokonaiskuvaa laivanrakennuksen prosesseista ja niiden haasteista sekä viivästyksien syistä. Rakennusvaiheessa olevassa laivassa liikkuu paljon henkilöstöä ja kalustoa, jonka vuoksi riski vaaratilanteisiin sekä onnettomuuksiin on kohonnut. Lisäksi henkilöiden paikantaminen laivassa vaaratilanteen tai hälytyksen aikana on nykytilanteessa haasteellista, koska olemassa olevaa järjestelmää laivan sisällä tapahtuvan liikkumisen seuraamiselle ei ole käytössä.

Tässä diplomityössä on tarkoituksena tunnistaa ja vertailla eri teknologioita, joita voitaisiin potentiaalisesti käyttää telakka-alueen paikannusjärjestelmän toteuttamiseen. Teknologioita vertaillaan sekä suorituskykyyn liittyvillä että heuristisilla suureilla. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Aiemmin toteutetuista käyttöönottoista tunnistettiin yhteneviä tuloksia, jotka jaettiin kolmeen eri teemaan: teollisuusympäristöjen vaatimukset ja käyttöönoton haasteet, paikannusjärjestelmän paikannusteknologiat ja lainsäädännölliset edellytykset. Työssä vastataan tutkimuskysymyksiin paikannustarkoitukseen relevanteista teknologioista teollisuuskontekstissa ja vaatimukseen paikannusjärjestelmälle telakkaympäristössä. Työn tavoitteena on tuottaa vertailu eri relevanteista teknologioista telakkateollisuuden kontekstissa, jonka pohjalta on mahdollista tehdä päätös paikannusjärjestelmän toteuttamiseen käytettävästä teknologiasta. Lisäksi työssä tutkitaan teollisuusympäristön ominaisuuksia sekä paikannusjärjestelmiin liittyvää lainsäädäntöä.

Tuloksena huomattiin, että paikannusjärjestelmän käyttöönotto on moniulotteinen prosessi, jonka suunnittelussa ja toteuttamisessa on huomioitava käyttöönottoympäristö, käytettävän teknologian rajoitukset ja ominaisuudet sekä henkilötietoja koskeva lainsäädäntö ja ohjeistus. Paikannusjärjestelmän valinnassa on tärkeää huomioida paikannusalueen ominaisuudet, kuten radioaaltoja estävät materiaalit ja kerrosten päällekkäisyys. Teollisuusympäristöissä korostuvat järjestelmän toimintavarmuus, skaalautuvuus, kustannukset ja paikannuksen tarkkuus. Lainsäädännölliset asiat ovat tärkeitä yrityksille, jotka ovat velvoitettuja noudattamaan Suomen ja EU:n tietosuojaa ja teknistä valvontaa koskevia säädöksiä. Tekninen valvonta on sallittua perustelluista syistä, kuten työturvallisuuden varmistamiseksi, ja kerättävän tiedon tulee olla työsuhteen kannalta oleellista.

Yhteenvedona todetaan paikannusjärjestelmän valinnan ja käyttöönoton vaativan huolellista suunnittelua sekä vaatimusten määrittelyä. Työssä esitetyt suositukset toimivat yleisohjeina teollisuuden paikannusjärjestelmän valintaprosessin tukena. Tämä auttaa varmistamaan, että järjestelmä täyttää vaatimukset sekä tuo toivotusti lisäarvoa käyttötarkoituksen puitteissa.

AVAINSANAT: paikannusjärjestelmät, telakkateollisuus, tietosuoja, henkilöpaikannus, teollisuus, paikannusteknologiat, vaatimusmäärittely

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Jesper Nurmi		
Tutkielman nimi:	Paikannusjärjestelmän käyttöönottoselvitys telakka-alueella:		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Automaatio ja tietotekniikka		
Työn ohjaaja:	Jouni Lampinen		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	54

ABSTRACT:

In many different industrial sectors, opportunities for the implementation of technological advancements are constantly being identified in order to enhance efficiency and improve safety. The implementation of a positioning system can increase workplace safety and provide a better overall understanding of shipbuilding processes, challenges and the reasons for delays. While a vessel is under construction, onboard are numerous personnel and equipment, which increases the risk of accidents and working hazards. Additionally there are no ways of tracking the movements of personnel onboard in the case of an emergency or evacuation.

The aim of this thesis is to identify and compare different technologies that could potentially be used in implementing a positioning system for a shipyard. The technologies are compared based on both performance-related and heuristic metrics. The work was carried out as a literature review. The most common results from previously conducted research and implementations were identified and divided into three different themes: requirements and implementation challenges in industrial environments, positioning system technologies and legislative requirements. This thesis answers research questions about technologies relevant to localization purposes in an industrial context and the requirements for a positioning system that the shipyard environment requires. The goal of the thesis is to produce a comparison of different relevant technologies in the context of the shipbuilding industry, based on which a decision can be made on the technology used for a positioning system. Additionally, this thesis explores the characteristics of the industrial environment and the legislation related to localization systems.

The results indicated that the implementation process of a positioning system is a multifaceted process that requires consideration of the environment, the limitations and characteristics of the technology, as well as information about the legislation and use of personal data. When selecting a localization system, it is important to consider the characteristics of the environment, such as materials and overlapping of floors or platforms. In industrial environments, the reliability, scalability, cost and accuracy of the system are emphasized. Legislative matters are essential especially for companies, which are required to comply with both Finnish and EU regulations regarding data protection and technical surveillance. The technical surveillance is permitted for justified reasons, such as ensuring occupational safety.

In summary, it is concluded that the selection process and implementation of a positioning system require planning and defining the requirements. The recommendations presented in this thesis serve as a general collection of guidelines to support the selection process of a positioning system in an industrial setting. This helps ensure that the system meets the requirements and provides the desired added value within the scope of the intended use.

AVAINSANAT: paikannusjärjestelmät, telakkateollisuus, tietosuojat, henkilöpaikannus, teollisuus, paikannusteknologiat, vaatimusmäärittely

Sisällys

1	Johdanto	8
1.1	Tarve työlle	9
1.2	Työn rajaus	10
1.3	Tutkimuskysymykset	11
2	Paikannusjärjestelmät	12
2.1	Paikannusjärjestelmät yleisesti	12
2.2	Kolmiomittausmenetelmä	14
2.2.1	Lateraatio	14
2.2.2	Angulaatio	16
2.3	Radiosormenjälkipaikannus	18
2.3.1	Koulutusvaihe	18
2.3.2	Tuotantovaihe	19
2.4	Signaalin etenemisen mallinnus	20
2.5	Suunnistuslaskenta	21
2.6	Läheisyysperusteinen paikannustekniikka	22
3	Tutkimussuunnitelma	24
3.1	Esittely	24
3.2	Aineiston kerääminen ja analyysi	25
4	Teollisuusympäristöjen vaatimukset ja käyttöönoton haasteet	27
5	Paikannusjärjestelmän paikannusteknologiat	30
5.1	WLAN	30
5.2	Bluetooth Low Energy	31
5.2.1	BLE-majakka	33
5.2.2	BLE-Tagi	34
5.3	ZigBee	34
5.3.1	Zigbee-standardin komponentit	35
5.3.2	ZigBee-laitetyypit	35
5.4	Radio Frequency Identification (RFID)	36

5.5	Ultra Wideband (UWB)	37
6	Teknologioiden soveltuvuus telakkateollisuuteen	39
6.1	Suorituskyvyn mittarit	39
6.1.1	Tarkkuus	39
6.1.2	Monimutkaisuus	40
6.1.3	Toimintavarmuus	40
6.1.4	Kuuluvuusalue	40
6.1.5	Skaalautuminen	41
6.1.6	Kustannukset	41
6.2	Teknologiavertailu	41
7	Lainsäädännölliset edellytykset	44
7.1	GDPR-vaatimukset	44
8	Tulosten analysointi	46
8.1	Vaatimusmäärittely	47
9	Johtopäätökset	48
	Lähteet	50

Kuvat

Kuva 1 Sisätalapaikannustekniikoiden jaottelu	12
Kuva 2. Lateraation toimintaperiaate kolmella vastaanottimella.	15
Kuva 3. Angulaation toimintaperiaate (Grün, Krösche, Jakl, & Drab, 2009).	18
Kuva 4 Radiosolmenjälkipaikannusjärjestelmän työkulkukaavio (Khandker, Torres-Sospedra, & Ristaniemi, 2019).	20
Kuva 5 Todennäköisyysellipsin visualisointi (Randell, Djallis, & Muller, 2005).	22
Kuva 6 BLE-Tekniikan käyttämät lähetyskanavat (Mathworks, 2024)	32

Taulukot

Taulukko 1 Hakusanoilla löydettyjen aineistojen määrä.....	26
Taulukko 2 Sisätalapaikannusteknologioiden vertailu.....	42
Taulukko 3 RMC:n vaatimusmäärittely paikannusjärjestelmälle.....	47

Lyhenteet

AOA - Angle of arrival, Saapumiskulma

BLE - Bluetooth low-energy

CAD - Computer Aided Design, Tietokoneavusteinen suunnittelu

CSA - Connectivity Standards Alliance

DOA - Direction of arrival, Saapumissuunta

GDPR - General Data Protection Regulation, Euroopan unionin yleinen tietosuoja-asetus

GNSS - Global Navigation Satellite System, Sateliittipaikannus

GPS - Global Positioning System, Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IPS - Indoor positioning system, Sisätilojen paikannusjärjestelmä

IOT - Internet Of Things, Esineiden internet

KNN - K-Nearest Neighbors, K-lähimmät naapurit

LOS - Line Of Sight, Näköetäisyys

RFID - Radio frequency identification, Radiotaajuustunnistus

RMC - Rauma Marine Constructions

RSS - Received Signal Strength, Vastaanotetun signaalin voimakkuus

TDOA - Time distance of arrival, Saapumisaika

TOA - Time of arrival, Saapumisaika

UWB - Ultra wideband, Erittäin laaja taajuuskaista

WLAN - Wireless local area Network, Langaton lähiverkko

1 Johdanto

Monet teollisuuden alat ovat murroksessa jatkuvasti kiihtyvän teknologisen kehityksen seurauksena. Digitalisaation myötä on tunnistettu ja tunnistetaan edelleen mahdollisuuksia uusien teknologioiden käyttämiseen laajasti teollisuuden eri prosesseissa. Teollisuuden alojen näkökulmasta digitalisaation keskeiset teknologiat ovat massadata-analyysi, automaatio, esineiden internet (IOT), kyberturvallisuus sekä pilvipalvelut (Helminen & Saarikoski, 2019). Varsinkin massadata-analyysi sekä automaatio ovat keskeisiä teknologioita, joita käytetään laajasti teollisuuden erilaisiin käyttötarkoituksiin. Teknologiaratkaisuiden sisällyttäminen teollisuuden prosesseihin ja ratkaisujen keräämä tieto tuovat yritykselle lisäarvoa ja auttavat tunnistamaan kehityskohtia olemassa olevissa prosesseissa, johtaan kokonaisvaltaiseen tehokkuuden kasvuun (Kržan & Orel Šanko, 2023).

Teollisuuden alojen digitalisaation mahdollistamien ratkaisuiden vaikutuksesta prosesseihin ja toimintatapoihin puhutaan usein termillä neljäs teollisuuden vallankumous (Industry 4.0). Termi on nimitys ilmiölle, jossa tuotannon täyden automatisoinnin sijaan keskitytään kehittämään prosesseja digitalisaation tuomien mahdollisuuksien avulla niin, että ihminen säilyy keskiössä. Neljännen teollisuuden vallankumouksen ajatuksena onkin esineiden internetin hyödyntäminen osana yrityksen prosesseja. Varsinkin sensorien käyttö teollisuusympäristöissä eri prosessien ohjaamiseen ja seuraamiseen sekä automatisointiin on ollut keskeinen osa neljättä teollisuuden vallankumousta.

Telakkateollisuus ja laivanrakennus ovat aloina vahvasti linkittyneitä perinteisiin, jonka vuoksi teollisuus 4.0 mukaisten uusien prosessien ja teknologioiden käyttöönotto voi olla haastavaa (Diaz, Smith, Bertagna, & Bucci, 2023). Tuotantoprosesseihin tehtävät muutokset nähdään laivanrakennusalalla usein uhkana, sillä uusien järjestelmien tai toimintatapojen käyttöönotto lisää riskiä tuotannon pysähtymiseen ja näin tuotteen valmistumisen viivästymiseen. Teollisuuden alalla, jossa rakennuksen eri vaiheet ovat toisistaan vahvasti riippuvaisia, viivästyminen missä tahansa tuotannon vaiheessa johtaa

usein suuriin tappioihin, joko tuotannon seuraavien vaiheiden viivästymisen tai viivästymisen aiheuttaman tuotantosuunnitelmiin tai toimintatapoihin tehtävien muutosten seurauksena. Laivanrakennuksen kannalta ensimmäiset suuret teknologian tuomat muutokset tapahtuivat 1970-luvulla tietokoneavusteisten suunnitteluohjelmistojen (CAD) yleistymisen myötä. Tätä muutosta kuitenkin pidetään digitalisaation, joka on teknologian käyttöä prosessien optimoimiseen, sijaan digisointina, joka on termi kuvaamaan tiedon muuntamista tietokoneen ymmärtämään muotoon. Voidaankin sanoa, että laivanrakennusala on kokenut laajasti digisointia, mutta digitalisaatiota ei ole vielä laajasti hyödynnetty (Naval Architect, n.d.).

Paikannustietoa on käytetty sekä yleisesti sekä teollisuuden alojen käyttötarkoituksiin laajasti sateliittipaikannuksen (GNSS) kehittämisen jälkeen. Sateliittipaikannus ei ole kuitenkaan sopiva vaihtoehto monelle teollisuuden alalle, sillä tuotanto usein tapahtuu joko osittain tai täysin sisätiloissa, jossa rakenteet, materiaalit tai laitteisto usein estävät sateliittisignaalin kulun. Teollisuus 4.0:n paikannusvaatimuksiin sekä täydentämään sateliittipaikannusta on kehitetty sisätilojen paikannusteknologioita, jotka ovat jo laajasti käytössä useissa logistiikka ja tehdasympäristöissä (Li, Wu, Zhao, & Huang, 2024). Sisätilojen paikannusteknologioita voidaan hyödyntää ihmisten, materiaalien, työkalujen ja ajoneuvojen seurantaan, joka tekee teknologiasta myös potentiaalisen työkalun laivanrakennukseen liittyvän paikannuksen ja turvallisuuden varmistamisen tarpeisiin.

1.1 Tarve työlle

Työ toteutetaan toimeksiantona Rauma Marine Constructions:lle (RMC). Paikannusjärjestelmän käyttöönotolla tavoitellaan sekä turvallisempaa työympäristöä että parempaa ymmärrystä laivanrakennuksen käytännön prosesseiden haasteista ja tilanteista sekä asioista, jotka aiheuttavat viivettä rakennusprosessiin.

Rakennusvaiheessa olevassa laivassa liikkuu paljon sekä RMC:n että lukuisten verkostoyritysten henkilöstöä ja kalustoa, jonka vuoksi riski vaaratilanteisiin ja

onnettomuuksiin on kohonnut. Lisäksi henkilöiden paikantaminen laivassa vaaratilanteen tai hälytyksen aikana on nykytilanteessa haasteellista, koska olemassa olevaa järjestelmää laivan sisällä tapahtuvan liikkumisen seuraamiselle ei ole käytössä. Jo käytössä olevan porttikulunvalvonan tehostamisen lisäksi paikannusteknologian käyttöönoton tarkoituksena on parantaa sekä työturvallisuutta tarjoamalla tarkkaa paikkatietoa laivassa liikkuvista henkilöistä hätätilanteissa että helpottaa ja automatisoida työajanseurantaprosessia RMC:n ja yhteistyössä toimivien verkostoyritysten välillä.

Tässä diplomityössä on tarkoituksena tunnistaa ja vertailla eri teknologioita, joita voitaisiin potentiaalisesti käyttää paikannusjärjestelmän toteuttamiseen. Teknologioiden vertailu toteutetaan sekä suorituskykyyn liittyvillä että heuristisilla suureilla. Tuloksena on tarkoitus tuottaa vertailu eri relevanteista teknologioista telakkateollisuuden kontekstissa, jonka pohjalta on mahdollista tehdä päätös paikannusjärjestelmän toteuttamiseen käytettävästä teknologiasta. Lisäksi työssä tutkitaan teollisuusympäristön ominaisuuksia sekä paikannusjärjestelmiin liittyvää lainsäädäntöä. Tuloksena on tarkoitus saada kokonaisuus, joka tarjoaa tietoa ja tukea paikannusjärjestelmän käyttöönotolle teollisuusympäristössä ja tarkemmin telakkaympäristössä.

1.2 Työn rajaus

Työ rajataan käsittelemään yleisiä laajasti teollisuuden aloilla seurantatarkoitukseen hyödynnettyjä teknologioita. Teknologian vaatimuksena on soveltuvuus sisätiloissa tapahtuvaan tarkkaan henkilöseurantaan, jotta se voidaan nähdä henkilöpaikannusjärjestelmän toteuttamisen käyttötarkoitukseen. Työssä tunnistetaan sekä paikannukseen käytettäviä tekniikoita että paikannusteknologiaratkaisuja. Teknologiaratkaisuja vertaillaan käyttäen apuna teollisuusympäristössä toimivan järjestelmän suorituskyvyn mittareita. Lisäksi työssä luodaan vaatimusmäärittely RMC:n paikannusjärjestelmän ominaisuuksille ja käsitellään järjestelmän käyttöön liittyvä henkilötietojen käsittelyongelma.

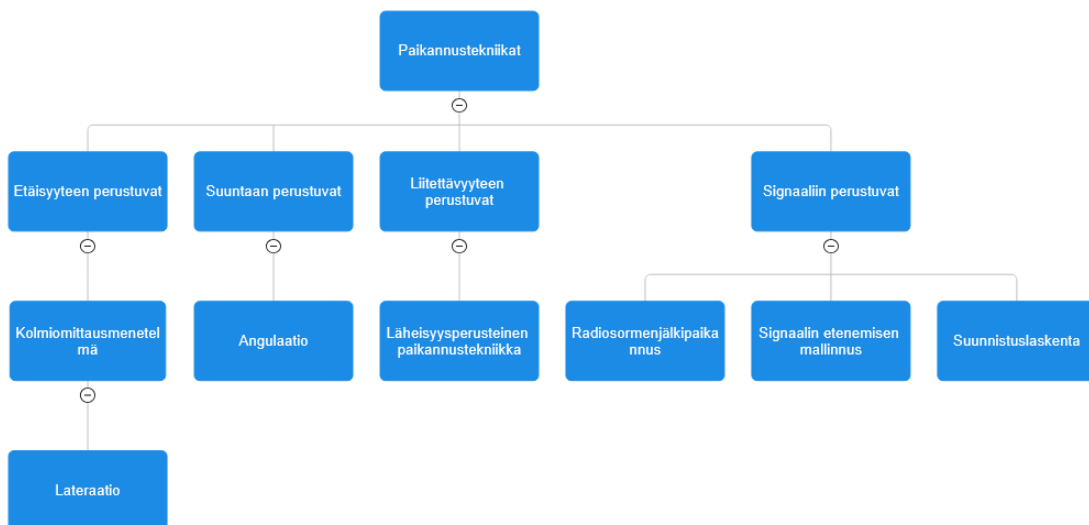
1.3 Tutkimuskysymykset

Tutkimuskysymykset tässä työssä ovat seuraavat:

- Mitkä ovat paikannustarkoitukseen relevantteja teknologioita teollisuuskontekstissa?
- Mitkä ovat vaatimukset paikannusjärjestelmälle telakkaympäristössä?

2 Paikannusjärjestelmät

Tässä luvussa käydään läpi yleisiä paikannusjärjestelmien pohjana toimivia paikannustekniikoita, jotka ovat yleisiä teollisuuskäytössä. Paikannustekniikat voidaan jakaa ulkokäytössä oleviin sateliittipohjaisiin Global Navigation Satellite System (GNSS)-pohjaisiin tekniikoihin ja sisätiloissa toimiviin usein tarkempaa tietoa antaviin paikannustekniikoihin. Telakkaympäristön paikannusratkaisun selvittämiseksi käsitellään laajasti eri sisätilapaikannustekniikoita, jotka ovat kolmiomittausmenetelmä, radiosormenjälkipaikannus, signaalin etenemisen mallinnus, suunnistuslaskenta ja läheisyysperusteinen paikannustekniikka. Sisäpaikannustekniikoita voidaan edelleen jakaa etäisyyteen perustuviin, suuntaan perustuviin, liitettävyyteen perustuviin ja signaaliin perustuviin paikannustekniikoihin (kuva 1).



Kuva 1 Sisätilapaikannustekniikoiden jaottelu

2.1 Paikannusjärjestelmät yleisesti

Paikannusjärjestelmä on toteutus, joka mahdollistaa jonkin esineen tai asian sijainnin selvittämisen jossakin määritetyssä tilassa (Syazwani ym., 2022).

Paikannustarkoitukseen on olemassa useita teknologioita, joiden käyttötarkoitukset vaihtelevat paikallaan olevien kohteiden sekä liikkuvien kohteiden seurannan välillä. Teknologioita voidaan myös käyttää yhdessä muiden paikannusteknologioiden kanssa sijainnin tarkkuuden selvittämiseksi tai jo saadun sijainnin tarkkuuden parantamiseksi (Asaad & Maghdid, 2022). Paikannusjärjestelmät voidaan jakaa korkealla tasolla ulkoilmassa toimiviin paikannusteknologiaihin sekä sisätiloissa toimiviin paikannusteknologiaihin. Tunnetuin sekä eniten käytetty ulkoilmassa toimiva paikannusteknologia on yhdysvaltain puolustusministeriön vuonna 1978 kehittämä Global Positioning System (GPS), jonka toiminta perustuu päätelaitteen ja maata kiertävän satelliittikonstellaation välisen etäisyyden laskemiseen. GPS on osa suurempaa Global Navigation Satellite System (GNSS)-käsitettä, joka viittaa kaikkiin satelliittien ja vastaanotinlaitteen välistä kommunikaatiota käyttäviin paikannusjärjestelmiin. GNSS-järjestelmiä käytetään pääasiassa ulkoilmapaikannukseen, sillä satelliittien sijainnin vuoksi lähetetty signaali palaa takaisin heikkona ja ei näin ollen pysty luotettavasti kulkemaan rakennusten tai seinien läpi, joka tekee sisätilapaikannuksen teknologialla haasteelliseksi. Lisäksi GNSS-järjestelmät vaativat suoran Line of Sight (LOS) -yhteyden ainakin neljään eri satelliittiin paikallistamisen varmistamiseksi, joka ei ole sisätilapaikannuksen asettamien rajoitusten vuoksi mahdollista.

Indoor positioning system (IPS) viittaa paikannusjärjestelmään, joka toteutetaan toimimaan sisätiloissa ja joka ei perustu yleisiin GNSS-teknologioihin. IPS-järjestelmät ovat hyödyllisiä tilanteissa, joissa GNSS-järjestelmät eivät joko toimi lainkaan tai joissa ei saada saavutetuksi tarpeeksi tarkkaa paikkatietoa satelliittipaikannusta käyttämällä. IPS-järjestelmän toteuttamiseen voidaan käyttää useita eri algoritmeja ja teknologioita, jotka voivat esimerkiksi käyttää signaalin vahvuutta tai aallonpituutta sijainnin määrittämisessä. IPS-järjestelmiä käytetään usein käyttötapauksissa, jossa GNSS-järjestelmän käyttö olisi haastavaa tai mahdotonta, kuten esimerkiksi rakennusten, tehtaiden tai muiden rakennelmien sisätiloissa tapahtuvaan paikannukseen.

2.2 Kolmiomittausmenetelmä

Kolmiomittausmenetelmä on yksi laajimmin käytetyistä IPS-paikannustekniikoista, joka perustuu kolmioiden geometriisiin tunnettuihin ominaisuuksiin. Näiden ominaisuuksien avulla voidaan selvittää mitattavan asian etäisyys tai orientaatio mittauslaitteistoon nähden. Kolmiomittauksessa keskeisiä suureita sijainnin ja orientaation määrittämiseksi ovat Time of arrival (TOA), joka viittaa ajanhetkeen, jolloin lähettimestä tuleva signaali saapuu vastaanottimeen, kuten paikannusmajakkaan. Time difference of arrival (TDOA) viittaa Time of arrival-arvojen väliseen aikaeroon. Angle of arrival (AOA) viittaa kulmaan, josta signaali saapuu vastaanottimeen, kertoen lähettimen suunnan vastaanottimeen verrattuna. Kolmiomittausmenetelmää voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, joita ovat signaalin saapumiseen kestävään aikaan perustuva lateraatio sekä signaalin saapumiskulmaan perustuva angulaatio.

2.2.1 Lateraatio

Lateraatio on paikannustekniikka, jolla on mahdollista selvittää lähettimen sijainti käyttämällä lähettimen signaalin TOA-arvoa sekä tunnettuja vastaanottimien sijainteja. Lateraatiolla on mahdollista selvittää vastaanottimen tarkka sijainti kaksiulotteisessa tilassa kolmella vastaanottimella sekä kolmiulotteisessa tilassa neljällä vastaanottimella. Myös useampia vastaanottimia voidaan käyttää paikannustiedon tarkentamiseen kummassakin tapauksessa.

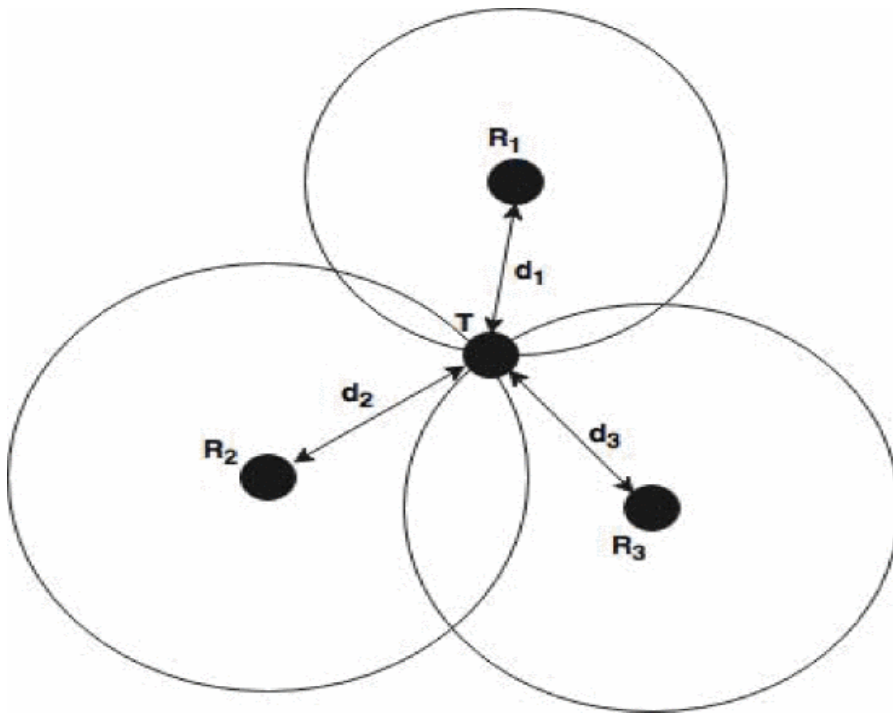
Lateraatiotekniikassa tietona tarvitaan signaalin kulkeutumisaika lähettimestä vastaanottimeen t . Koska tiedetään, että kaikki elektromagneettiset aallot kulkevat valon nopeudella c , voidaan selvittää lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys kertomalla signaalin kulkeutumisaika valonnopeudella seuraavasti:

$$d = c \cdot t \quad (1).$$

Tästä voidaan johtaa kaava kaksiulotteisessa tilassa olevan tunnetun vastaanottimen paikan etäisyydelle lähettimeen nähden.

$$d = \sqrt{(x_{\text{vastaanotin}} - x)^2 + (y_{\text{vastaanotin}} - y)^2} \quad (2),$$

missä $x_{\text{vastaanotin}}$ ja $y_{\text{vastaanotin}}$ ovat tunnettuja vastaanottimen koordinaatteja ja x sekä y ovat lähettimen koordinaatteja. Kun etäisyys vähintään kolmesta laitteesta lähettimeen on tiedossa ja vastaanottimien tarkat paikat ovat tiedossa, on mahdollista selvittää lähettimen tarkka paikka etäisyyksiä käyttämällä alla olevan kuvan (kuva 2) mukaisesti:



Kuva 2. Lateraation toimintaperiaate kolmella vastaanottimella.

Lähettimen paikka on siis kaikkien kolmen lähettimen ja vastaanottimen etäisyyden säteisen ympyrän kaarien leikkauspiste. Oletuksena tekniikan toiminnalle on, että jokainen vastaanotin on synkronoituna, jotta tarkan aikaleiman saaminen signaalista on mahdollista. Lisäksi oletuksena on, että paikannettavalla lähettimellä on jatkuvasti yhteys kaksiulotteisessa paikannuksessa vähintään kolmeen ja kolmiulotteisessa paikannuksessa vähintään neljään vastaanottimeen.

TDOA-tekniikka laskee absoluuttisen lähettimen ja vastaanottimen välisen signaalin saapumisajan sijaan signaalin saapumisaikojen eron kaikkien vastaanottimien välillä. Kahden vastaanottimen välisen pituuksien ero Δd voidaan laskea kertomalla signaalin saapumisaikojen ero Δt valon nopeudella c :

$$\Delta d = c * \Delta t \quad (3).$$

Tästä kaavasta voidaan johtaa seuraava kaava TDOA-tekniikalla määritetyille etäisyyden eroille:

$$\Delta d = \sqrt{(x_i - x)^2 - (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 - (y_j - y)^2} \quad (4),$$

jossa (x_i, y_i) ja (x_j, y_j) ovat tunnettuja vastaanottimien sijainteja ja (x, y) ovat lähettimen koordinaatteja.

2.2.2 Angulaatio

Angulaatio on paikannustekniikka, jolla on mahdollista signaalin saapumiskulmien avulla arvioida signaaleja lähettävän asian sijainti (kuva 3). Angulaatiopaikannuksesta voidaan käyttää vielä termiä direction of arrival (DOA). Kaksiulotteisen sijainnin saamiseksi tarvitaan vain kaksi kulmaa, mutta tarkemman sijainnin selvittämiseksi kolmen tai useamman antennin käyttö on tarpeellista. Usein Angulaatiota käytettäessä vastaanottimessa käytetään suunnattuja antennoja sijainnin määrittämiseksi. Angulaatiopaikannusta usein hyödynnetään tilanteissa, joissa Line Of Sight yhteys vastaanottimien sekä paikannettavan asian välillä on olemassa, eli signaali kulkee häiriöttä vastaanottimelle. Angulaation tarkkuuteen kuitenkin vaikuttavat useat signaaliin vaikuttavat häiriöt, kuten häipyminen, sironta, heijastuminen, diffraktio, varjostus sekä antennin suuntaus (Oguntala et al., 2018). Lähettimen sijainnin selvittäminen tilanteessa, jossa lähettimen seurantaan käytetään kahta vastaanotinta,

kun kummankin vastaanottimen sijainti on muuttumaton sekä tiedossa toteutetaan seuraavasti:

Olkoon $A(x_1, y_1)$ ja $B(x_2, y_2)$ tiedetyt antennien sijaintien koordinaatit sekä $C(x_3, y_3)$ vastaanottimen sijainti. Koordinaatiston pisteet muodostavat yhdessä x-akselin kanssa kaksi kulmaa, jotka nimetään seuraavasti:

$$\angle ACX = \theta_1 \quad (5)$$

$$\angle BCX = \theta_2 \quad (6)$$

Muodostettujen kolmioiden avulla on mahdollista selvittää kolmion sivujen AX sekä BX pituudet ottamalla tangenti muodostuneista kolmioista

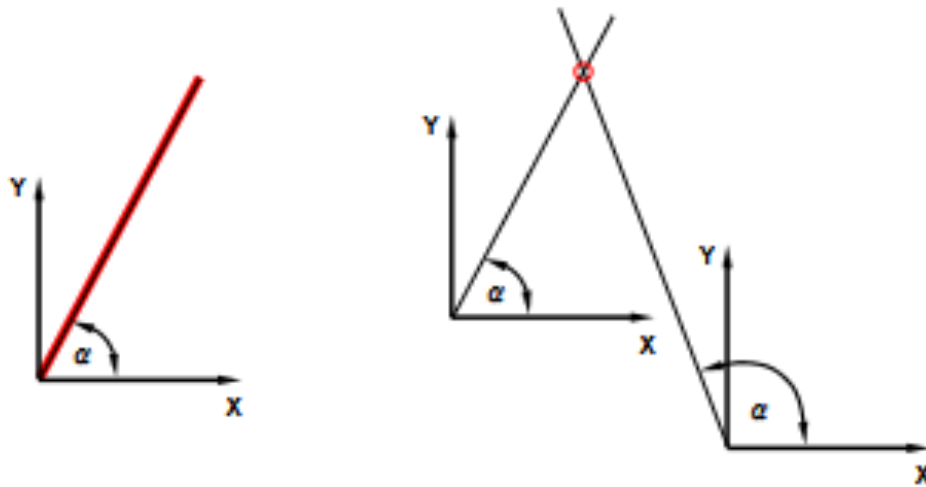
$$\tan(\theta_1) = \frac{(y_1 - y_3)}{(x_1 - x_3)} \quad (7)$$

$$\tan(\theta_2) = \frac{(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)} \quad (8)$$

ratkaisemalla yhtälöt saadaan yhtälöt sekä vastaanottimen x ja y koordinaattipisteelle.

$$x_3 = \frac{y_1 - y_2 + x_2 \tan(\theta_2) - x_1 \tan(\theta_1)}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \quad (9)$$

$$y_3 = \frac{[y_1 \tan(\theta_2) - y_2 \tan(\theta_1)] - [(x_1 - x_2) \tan(\theta_2) \tan(\theta_1)]}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)} \quad (10)$$



Kuva 3. Angulaation toimintaperiaate (Grün, Krösche, Jakl, & Drab, 2009).

2.3 Radiosormenjälkipaikannus

Radiosormenjälkipaikannus on sisätilapaikannusmetodi, joka perustuu lähettimen ja vastaanottimen väliseen signaalin voimakkuuteen ja voimakkuuden pohjalta mitattuun etäisyyteen (Shin, Lee, Yu, Kyung, & Lee, 2022). Oletetaan, että minkä tahansa laitteen lähettäessä radiosignaalia, ei signaali sisällä samoja ominaisuuksia kahdesta eri paikasta, jolloin signaalin ominaisuudet luovat uniikin sormenjäljen, joka voidaan lähettää vain tietyistä paikasta. Paikannusmenetelmä on laajasti käytössä, sillä sitä voi toteuttaa wifi-signaalin ja reitittimien avulla, jotka usein löytyvät jo valmiiksi teollisuushalleista sekä paikannukseen käytettävistä tiloista. Radiosormenjälkipaikannuksen käyttöönotto jaetaan kahteen vaiheeseen: koulutusvaiheeseen ja tuotantovaiheeseen (Khandker, Torres-Sospedra, & Ristaniemi, 2019).

2.3.1 Koulutusvaihe

Koulutusvaiheessa luodaan tietokanta, johon kartoitetaan signaalin ominaisuudet alueen eri pisteissä ja tallennetaan ominaisuuksista rakentuva signaalin profiili tietokantaan. Jokainen tallennettava signaaliprofiili vastaa koordinaattia paikannusalueella. Käytännössä tiedon keräämistä toteutetaan työläisyytensä vuoksi

keräämällä tietoa asteittain esimerkiksi henkilöiden liikkua hallissa lähetyslaitteen kanssa.

2.3.2 Tuotantovaihe

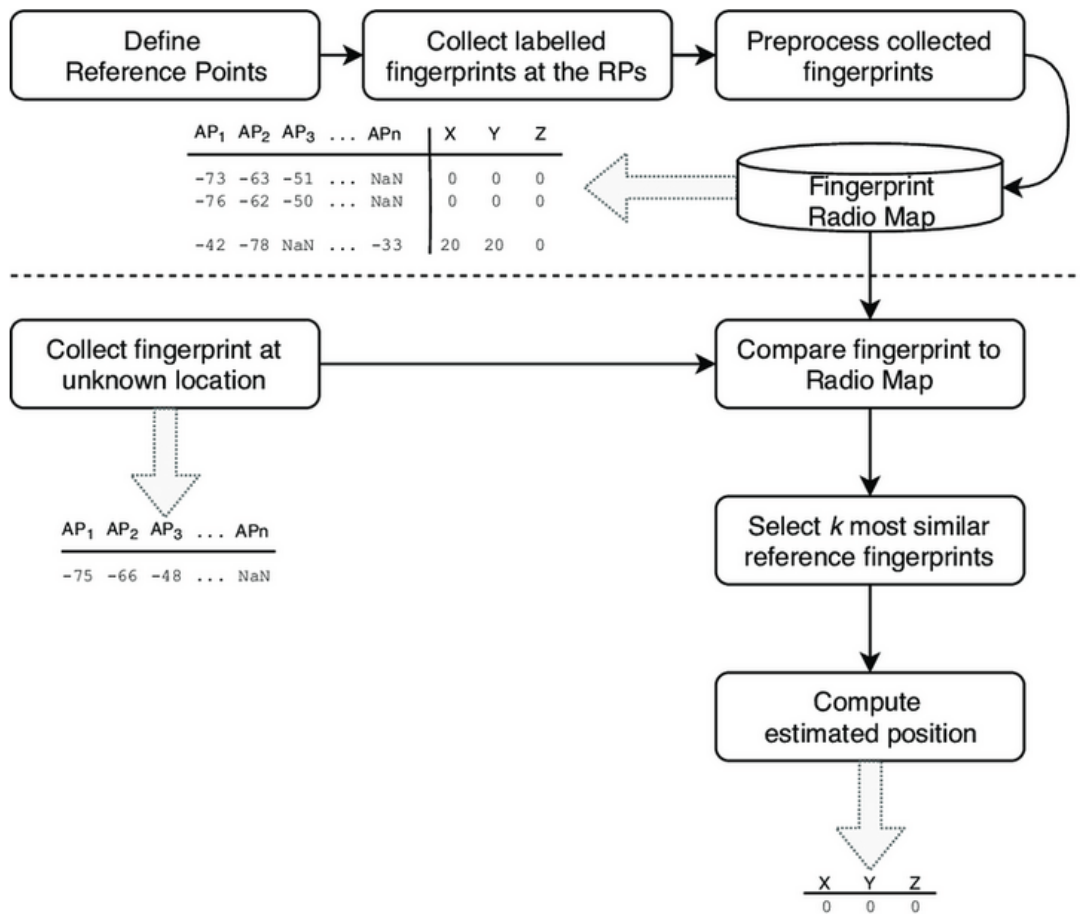
Tuotantovaiheessa vastaanotin lähettää sijainnistaan signaaliprofiilinsa, jota verrataan tietokantaan kerättyihin signaaliprofiileihin. Tietokanta palauttaa lähimpänä vastaanottimen lähettämää signaaliprofiilia olevan signaaliprofiilin paikkatiedot ja olettaa lähettimen olevan tällä paikalla. Vastaanottimen lähettämää signaaliprofiilia lähiten vastaavan signaaliprofiilin selvittämiseksi voidaan käyttää useita algoritmeja, joista yleisimmät ovat Euklidinen metriikka ja K-Nearest Neighbors (KNN) - koneoppimisalgoritmi, joka hyödyntää Euklidista metriikkaa etäisyyden laskemisessa. Euklidinen etäisyys pisteiden P ja Q välillä voidaan selvittää kaksiulotteisessa avaruudessa seuraavasti:

$$\sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (11)$$

Mikäli algoritmia halutaan käyttää kolmiulotteisella signaalin ominaisuuksien tietojoukolla, voidaan käyttää laajennettua kolmiulotteisten pisteiden välistä etäisyyttä:

$$\sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2 + (p_z - q_z)^2} \quad (12)$$

Radiosormenjälkipaikannusjärjestelmän toimintaa kuvataan alla olevalla työkulkukaaviolla (kuva 4), jossa katkoviivan yläpuolella on kuvattuna järjestelmän koulutusvaihe ja alapuolella tuotantovaihe:



Kuva 4 Radiosolmenjälkipaikannusjärjestelmän työkulkukaavio (Khandker, Torres-Sospedra, & Ristaniemi, 2019).

Radiosolmenjälkipaikannusjärjestelmässä on huomioitava, että paikannettavan tilan muuttuessa tietokantaan tallennetut datapisteet sekä signaalin ominaisuudet eivät ole enää päteviä ja referenssipisteet täytyy määrittää uudelleen ennen käyttöönottoa uudessa ympäristössä.

2.4 Signaalin etenemisen mallinnus

Signaalin etenemisen mallinnuksen käyttö sisätilojen paikannusmenetelmänä perustuu radiosolmenjälkipaikannuksen tavoin ylläpidettävään tietokantaan, johon tallennetaan signaalien ominaisuuksia. Radiosolmenjälkipaikannuksesta eroten referenssipisteitä ei määritetä empiirisesti mittaamalla, vaan mallintamalla signaalit tietokoneavusteisesti

tilan ominaisuuksien avulla. Mallinnettuja signaaliominaisuuksia verrataan radiosormenjälkipaikannuksen mukaisesti lähettimen lähettämiin signaalitietoihin, ja vertailu toteutetaan löytämällä vastaanotetun signaalin ominaisuuksia vastaavan teoreettisen signaalin positio (Batistić & Tomic, 2018).

2.5 Suunnistuslaskenta

Suunnistuslaskenta on yksi vanhimmista sisätilapaikannuksen muodoista, joka on ollut alkeellisessa muodossa käytössä jo 1400-luvun merenkulussa. Tuolloin paikannukseen käytettiin kompassin osoittamaa suuntaa ja tietoa laivan nopeudesta sekä meren virtauksien voimakkuudesta. Nykyään suunnistuslaskennan periaatetta voidaan hyödyntää sisätilapaikannuksessa seuraamalla paikannuksen kohteen nopeutta sekä suuntaa. Yleisesti tätä voidaan toteuttaa kiinnittämällä seurattavaan kohteeseen antureita, jotka antavat tietoa kohteen liikkumissuunnasta sekä nopeudesta tai kiihtyvyydestä. Suunnistuslaskennalla sijainnin selvittäminen on mahdollista, kun tiedetään seurattavan kohteen aikaisempi sijainti ja sijainnissa kohteen suunta sekä nopeus. Näiden tietojen perusteella voidaan muodostaa yhdistetty liikevektori, joka edustaa tunnetun sijainnin P_0 ja arvioidun sijainnin P_1 välistä muutosta. Yksittäisestä mittauksesta voidaan muodostaa kaksiulotteiseen koordinaatistoon ellipsi, jonka sisälle seurattava kohde sijoittuu 95 %:n todennäköisyydellä (Randell, Djallis, & Muller, 2005).

Kun paikannusta toteutetaan useamman kuin yhden mittauksen ajalta verrattuna aloituspisteeseen P_0 , kerääntyy mittausten epävarmuus kumulatiivisesti. Kokonaisepävarmuutta paikannustuloksessa voidaan ilmaista seuraavalla kaavalla:

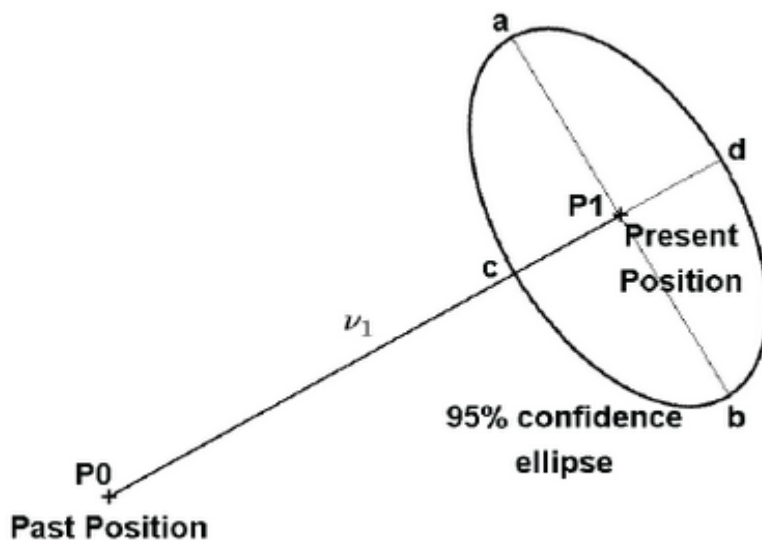
$$P_n = P_0 + \sum_{i=1}^n (V_i + V_c) \quad (13),$$

jossa P_n on paikannettavan kohteen nykyinen position ja V_c on virhevektori jokaiselle mittauspisteelle. n mittauksen jälkeen todennäköisyydellisin huiput ovat muodossa

$$n * ab \quad (14)$$

$$n * cd (15),$$

joissa ab ja cd kuvaavat ellipsin x-akselin ja y-akselin suuntaisia huippujen etäisyyksiä. Todennäköisyysellipsi siis laajenee pahimmassa tapauksessa lineaarisesti verrattuna mitattujen pisteiden määrään (kuva 5).



Kuva 5 Todennäköisyysellipsin visualisointi (Randell, Djallis, & Muller, 2005).

Suunnistuslaskentaa käytetään harvoin ainoana paikannusmetodina, sillä pienet tarkkuusvirheet paikannukseen käytettävissä antureissa voivat vaikuttaa suuresti lopulliseen paikannuksen tarkkuuteen (Batistić & Tomic, 2018). Tarkkuutta voidaan huomattavasti parantaa esimerkiksi käyttämällä algoritmeja tai toista paikannustekniikkaa suunnistuslaskennan tukena.

2.6 Läheisyysperusteinen paikannustekniikka

Läheisyysperusteisessa paikannustekniikassa seurattavan kohteen paikka määritetään vastaanottimien avulla, joiden paikka on jo tiedossa. Vastaanotin vastaanottaa signaalia usein tietyltä rajalliselta etäisyydeltä. Tämän etäisyyden avulla voidaan luoda

vastaanottimen ympärille kehä, jonka säde on vastaanottimen signaalin vastaanottoetäisyyden pituinen. Kun vastaanotin saa yhteyden lähettimeen, voidaan lähettimen todeta olevan vastaanottimen kehän sisällä. Paikannustekniikan rajoituksena on, ettei yksittäisellä vastaanottimella voida saada tarkkaa tietoa, missä kohtaa vastaanottimen ympärille luotua kehää lähettäjä on. Mikäli paikannusalue on avara sekä vähäesteinen, voidaan signaalin voimakkuudesta päätellä myös lähettimen etäisyys vastaanottimesta Received Signal Strength (RSS) -metodilla. Mikäli käytössä on useita vastaanottimia niin, että lähettimellä on mahdollisuus yhdistää niihin samanaikaisesti, voidaan eri signaalien vahvuuksien suhteista sekä signaalin saapumisajoista päätellä paikannettavan kohteen tarkempi sijainti.

3 Tutkimussuunnitelma

Tässä työssä tutkimusmenetelmänä on kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksessa kartoitetaan aihepiiristä aikaisemmin toteutettuja tutkimuksia. Tutkimuksista kootaan uudelle tutkimukselle relevantit tulokset, joita käytetään pohjana uuden tutkimuksen toteuttamiseen (Salminen, 2011).

3.1 Esittely

Aineisto kirjallisuuskatsaukseen kerätään pääasiallisesti tietokantojen verkkoaineistoista. Tietokannoista löytyvien aineistoiden tueksi voidaan hakea tietoa myös muista sähköisistä lähteistä, kuten ammatillisista verkkosivuista tai aihealueeseen perehtyneistä

Aineistot haetaan käyttämällä sisätilojen paikannusjärjestelmiin sekä teollisuuteen liittyviä hakusanoja. Aineiston hakemiseen käytetyt hakusanat ovat seuraavat:

- indoor positioning
- indoor localisation
- industrial enviroment
- shipyard digitalization

Hakusanoilla löydetystä aineistoista tarkastetaan otsikko, jolloin saadaan rajattua joukko alustavasti aiheen kannalta oleellisia aineistoja. Alustavan suodatuksen jälkeen jäljelle jääneistä aineistoista tarkastellaan tarkemmin tiivistelmä, johdanto sekä johtopäätökset, joiden perusteella selvitetään, onko aineisto tämän työn kannalta oleellinen. Työn kannalta oleellisten töiden sisällössä painottuvat jonkin langattomaan teknologiaan perustuvan sisätilapaikannusjärjestelmän toteutus, huomiot toteutukseen liittyvistä haasteista, huomiot toteutusympäristöön liittyvistä haasteista sekä lainsäädäntöön liittyvät huomiot henkilötietojen käsittelemisessä sekä henkilöön kohdistuvassa paikannuksessa yleisesti.

Tässä työssä kirjallisuuskatsaus voidaan jakaa kolmeen eri teemaan, jotka ovat teollisuusympäristöjen vaatimukset ja käyttöönoton haasteet, paikannusjärjestelmän paikannusteknologiat ja lainsäädännölliset edellytykset. Teollisuusympäristöjen vaatimuksia sekä käyttöönoton haasteita käsitellään yhtenä teemana niiden toisiinsa vahvasti linkittyneen suhteen vuoksi. Teollisuusympäristön vaatimukset vaikuttavat suuresti valittavaan paikannusjärjestelmään ja ovat merkittävä syy käyttöönottoon liittyviin haasteisiin.

Aineiston oleellisuuden määrittämisen jälkeen oleellimmat tutkimukset luetaan tarkemmin ja niiden tekemät löydökset kerätään aiemmin esiteltyjen teemojen alle temaattisen analyysin metodia käyttäen. Tämän työn tapauksessa teemat on valittu käytännönläheisiksi käyttöönoton helpottamista varten.

Eri teollisuuden alojen vaatimukset paikannusjärjestelmille ja toisistaan eroavat toimintaympäristöt vaikuttavat teemojen painotuksiin. Aiheen mukaisesti vaatimusten määrittäminen ja niiden vertaaminen aiempiin tutkimuksiin on kohdennettava telakkaympäristön kanssa samankaltaisiin ympäristöihin.

3.2 Aineiston kerääminen ja analyysi

Työhön liittyvän aineiston kerääminen aloitettiin heinäkuussa 2024 ja lopetettiin joulukuussa 2024. Tiedonhaku toteutettiin pääasiallisesti tekniikkaan perehtyviin aineistotietokantoihin. Suorittamalla haut käyttämällä aikaisemmin mainittuja hakusanoja yksitellen tuloksia saatiin hyvin laajasti, joten tuloksia rajattiin hakusanoja yhdistämällä. Lisäksi haun palauttamien aineistoiden ajankohtaisuuden varmistamiseksi rajattiin hakuun niin, että aineisto on viimeisen viiden vuoden ajalta (2019–2024). Alla olevassa taulukossa (taulukko 1) on esitetty hakuun käytetyt hakusanojen yhdistelmät sekä aineistoiden määrä alkuperäisessä haussa sekä aineistoiden määrä tiivistelmän, johdannon sekä johtopäätösten tarkastelun jälkeen.

Taulukko 1 Hakusanoilla löydettyjen aineistojen määrä

Käytetty hakusana	"Indoor positioning industrial"	"Indoor localisation shipyard digitalization"	"Shipyard localisation"
Alustavien aineistojen määrä	IEEE Xplore n=370 ACM digital library n=272 ScienceDirect n=6	IEEE Xplore n=4 ACM digital library n=18 ScienceDirect n=27	IEEE Xplore n=9 ACM digital library n=69 ScienceDirect n=260
Lopullisten aineistojen määrä	IEEE Xplore n=3 ACM digital library n=4 ScienceDirect n=3	IEEE Xplore n=5 ACM digital library n=3 ScienceDirect n=3	IEEE Xplore n=2 ACM digital library n=3 ScienceDirect n=5
Yhteensä	10	11	10

Yhdistämällä sisätilapaikannukseen liittyviä hakusanoja telakkateollisuuteen liittyviin hakusanoihin oli saadun aineiston määrä hyvin vähäinen. Haku toteutettiin kolmeen eri tietokantaan, joita olivat IEEE Xplore, ACM digital library ja ScienceDirect. Eniten aineistoja tuotti yleisesti teollisuuden sisätilapaikannukseen liittyvä haku, jossa alustavia aineistoja saatiin 648. Huomattavasti vähemmän aineistoja saatiin sisätilapaikannuksesta telakkaympäristössä, johon liittyen saatiin 49 tulosta. Analysoinnin tavoitteena oli saada tasaisesti relevantteja aineistoja kaikista käytetyistä hakusanojen yhdistelmistä.

4 Teollisuusympäristöjen vaatimukset ja käyttöönoton haasteet

Sisätilapaikannusjärjestelmät ovat laajasti käytössä useilla eri teollisuuden aloilla ja niiden tarjoamat mahdollisuudet, kuten tehokkuuden ja turvallisuuden parantaminen sekä työprosessien optimointi ja automatisointi ovat keskeisiä nykyaikaisissa teollisuusympäristöissä sekä teollisuuden että sidosryhmien sekä asiakkaiden tarpeisiin vastaamisessa. Teollisuus 4.0 ja sen mukana tulleet työkalut mahdollistavat datankeruun työprosesseista yhä innovatiivisemmilla menetelmillä.

Tan ja Law (2007) toteavat, ettei satelliittiperusteinen GPS-paikannusjärjestelmä sovi sisätilapaikantamiseen sellaisenaan. Tutkittaessa GPS-yhteyden paikannuskyvykkyyttä sisätiloissa huomattiin, että paikannusyhteys koki huomattavaa monitie-häirintää. (Engl. multipath interference). Löydökset olivat linjassa sen kanssa, että GPS-signaali heijastuu samoista sisätilojen rakenteista, kuten lattiasta, seinistä, tai teräsrakenteista useaan kertaan, aiheuttaen huomattavaa signaalin vääristymistä.

Inoue, Sashima ja muut (2008) tunnistivat ongelmaksi tuotantotilojen puutteellisen evakuointihälytysjärjestelmän ja huomasivat kehityskohdan, joka oli mahdollista ratkaista paikannusjärjestelmällä. Tutkielmassa esiteltiin idea järjestelmästä, joka pystyisi lähettämään evakuointikäskyn tilassa olevan henkilön mobiililaitteeseen ja ohjaamaan hänet kokoontumispaikalle reaaliaikaisen pohjakarttasovelluksen avulla. Tutkimuksen ehdottama järjestelmä koostuu langattomista radiosignaalmajakoista, henkilöiden mukanaan kantamista lähettimistä, kosteus- kamera ja lämpötilasensoreista sekä sensoridatan hallintajärjestelmästä. Kun sensorit havaitsevat hätätilanteen, kuten tulipalon tuotantotilassa, majakat lähettävät bluetooth-tekniikalla evakuointiviestin kaikille kantaman sisällä oleville mobiililaitteille. Järjestelmän todettiin parantavan turvallisuutta. Lisäksi tutkimuksessa painotettiin, miten sisätilapaikannusjärjestelmän tulisi olla käytännöllinen, helppo asentaa ja vähäkustanteinen.

Silva, Pendão ja Moreira (2022) Tutkivat teollisuuden käyttöön tulevien paikannusjärjestelmien käytännön asentamista ja siihen liittyviä ongelmia. Tutkimuksessa todettiin, että useat tutkimukset antavat yleisen kuvauksen järjestelmän toiminnasta, mutta niissä on usein puutteita konkreettiseen käyttöönottoon liittyvistä seikoista, kuten asennusympäristön vaatimuksista, käyttöönottoon käytettävästä työajasta ja siitä, vaatiiko järjestelmän käyttöönotto infrastruktuuriin liittyviä asennuksia tai muokkauksia. Lisäksi järjestelmien testaaminen toteutetaan usein pienissä testitiloissa, jotka eivät vastaa olosuhteiltaan teollisuusympäristöjä. Tutkimus huomioi lisäksi, miten yleinen paikannustekniikka, radiosormenjälki, on työteliäs ja haastava toteuttaa reaali maailman tuotantotiloissa niiden laajuuden vuoksi.

Tutkimuksessa esitellään automaattinen radiosormenjälkitietokannan luontijärjestelmä, joka ei ole riippuvainen paikannettavan tilan pohjapiirustuksesta. Ratkaisussa tietokanta luodaan teollisuusajoneuvojen ja niihin kiinnitettyjen anturien avulla. Tutkimus painotti Inouen, Sashiman ja muiden (2008) tutkimuksen mukaisesti paikannusjärjestelmästä saatavaa turvallisuushyötyä hätätilanteissa. Lisäksi ratkaisussa nousi esille kustannusystävällisyys ja käyttöönoton yksinkertaisuus.

Zhao, Pikas ja muut (2021) tutkivat paikannusjärjestelmän soveltamista työajanhallintaan rakennustyömailla. Tutkimuksessa selvitettiin, voiko paikannusjärjestelmällä seurata työtehtävien edistymistä työntekijöiden käyttämien seurantalaitteiden avulla. Tutkimus tunnistaa rakennusympäristöt kaoottisiksi ja toteaa töiden usein keskeytyvän työkulkujen puutteiden tai työkulkuihin vaikuttavien häiriöiden takia. Työtä joudutaan usein työkulkujen epäkohtien vuoksi improvisoimaan, tekemään uudelleen tai toteuttamaan vähemmän ideaalisilla tavoilla. Lisäksi teollisuuden työkuille on ominaista seuraavien vaiheiden riippuvaisuus aiemmista työkulun vaiheista, jolloin myöhästymisen tai häiriöt aikaisemmissa vaiheissa johtavat myöhemmin myöhästymisiin tai pitkiin loppa-aikoihin, jolloin työtä ei voida jatkaa (Sacks, Seppänen, Priven, & Savosnick, 2017).

Tutkimuksessa toteutettiin paikannusjärjestelmä, joka pystyy arvioimaan töiden aloitus- sekä lopetusaikoja sisätiloissa Bluetooth-pohjaista seurantaratkaisua käyttämällä. Tutkimuksessa kahdeksalle työntekijälle annettiin mukana kannettavat Bluetooth Low Energy (BLE) lähettimet ja ympäri työmaata sijaitseville kulkuväylille asetettiin BLE-majakointa (engl. beacon). Työntekijän kulkiessa majakan kantamalle, kirjattiin työsuoritus aloitetuksi majakalle määritellyllä alueella ja lopetetuksi, kun työntekijä poistui alueelta. Automaattisen seurannan tuottamia kirjauksia verrattiin lopuksi työntekijöiden manuaalisesti tekemiin kirjauksiin.

Työntekijät havaittiin majakoiden kantamalla 98.2 % ajasta ja sijoitettiin automaattisten kirjausten perusteella oikeaan paikkaan 89 % kirjauksista. Tutkimuksessa havaittiin kaksi selkeää syytä kirjauksien epätarkkuudelle. Huomattiin tilanteita, joissa lähimmän majakan sijaan jokin kauemmista majakoista havaitsi työntekijän ja asetti työn väärälle alueelle. Ongelman ratkaisemiseksi ehdotetaan majakoiden signaalin voimakkuuden vähentämistä, mutta tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa majakat eivät pysty havaitsemaan työntekijöitä lainkaan. Toisena ongelmana havaittiin majakoiden kattavuusalueiden päällekkäisyys varsinkin tilanteissa, joissa kaksi paikannettavaa aluetta sijaitsivat päällekkäin. Tämä aiheutti joissakin tilanteissa kirjauksia, joissa henkilön sijainti vaihtelee nopeasti kahden työalueen välillä (Zhao, Seppänen, Peltokorpi, Badihi, & Olivieri, 2019). Tutkimuksessa huomattiin, että paikannusjärjestelmän käyttöönotolla voitiin yksinkertaistaa ja selkeyttää työkulkuja ja saada työajanseurannan helpottamiseksi pääosin luotettavaa tietoa työalueella työskennelystä ajasta tekijäkohtaisesti.

5 Paikannusjärjestelmän paikannusteknologiat

Tässä luvussa tutustutaan yleisesti teollisuusympäristöissä käytössä oleviin paikannusteknologioihin.

5.1 WLAN

Yksi tunnetuimmista sekä laajimmin käytetyistä langattomista tiedonsiirtoteknologioista on Wireless Local Area Network (WLAN), eli langaton lähiverkko. WLAN verkossa tiedonsiirto tapahtuu käyttämällä elektromagneettisia aaltoja, joita lähetetään päätelaitteen ja vastaanottimen, joka useissa Wi-Fiin käyttötarkoituksessa on reititin, välillä. Vaikka usein WLAN-yhteyttä käytetään langattoman verkon jakamiseen, voidaan paikannustekniikoiden avulla WLAN-ratkaisuja käyttää myös sisätilapaikannukseen. Teknologia on kiinnostavaa varsinkin WLAN-teknologian laajan levinneisyyden vuoksi, jolloin paikannusjärjestelmän käyttöönotto ei mahdollisesti vaatisi suuria laitteistoinvestointeja. Lähettimenä voidaan WLAN-paikannuksessa käyttää mitä tahansa WLAN-yhteyteen yhdistettävää laitetta, kuten esimerkiksi paikannettavan kohteen omaa mobiililaitetta. Lisäksi WLAN-signaali ei vaadi LoS-yhteyttä, joka tekee siitä potentiaalisen teknologian teollisuusympäristöjen paikannusjärjestelmän vaatimuksia mukailleen.

WLAN-signaalit ja niiden taajuusalueet määritellään IEEE 802.11-standardien mukaisesti toimimaan 2.4 gigahertsin, 5 gigahertsin ja 6 gigahertsin taajuusalueilla, ja sillä voidaan saavuttaa jopa 23 Gigabitin tiedonsiirtonopeus sekuntiin käyttäessä Wi-Fi 7 -standardia. (2024). Luotettavan paikannustarkkuuden varmistamiseksi ympäristöissä, joissa ei ole suoraa näköyhteyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä, on suotavaa käyttää alhaisempia taajuusalueita, jotka pystyvät pidemmän aallonpituutensa vuoksi kantamaan sekä pidemmälle että läpäisemään paremmin eri esteitä, kuten seiniä ja teräsrakenteita (Chruszczyk, Zajac, & Grzechca, 2016).

Paikannusta WLAN-tekniikalla voidaan toteuttaa monella jo aikaisemmin työssä esitellyllä metodilla. Paikannuksen toteuttamiseen valittu tekniikka riippuu suuresti paikannusjärjestelmän vaatimuksista. Esimerkiksi jos tarvitaan vain tieto laitteista, jotka toimivat. Järjestelmän vaikutusalueella, voidaan paikannus toteuttaa vain tunnistamalla yhdistetty laite. Tarkemman etäisyys- tai paikkatiedon keräämiseen käytetään yleisesti seuraavia tekniikoita:

- radiosormenjälkipaikannus
- triangulaatiopaikannus
- signaalin etenemisen mallintaminen

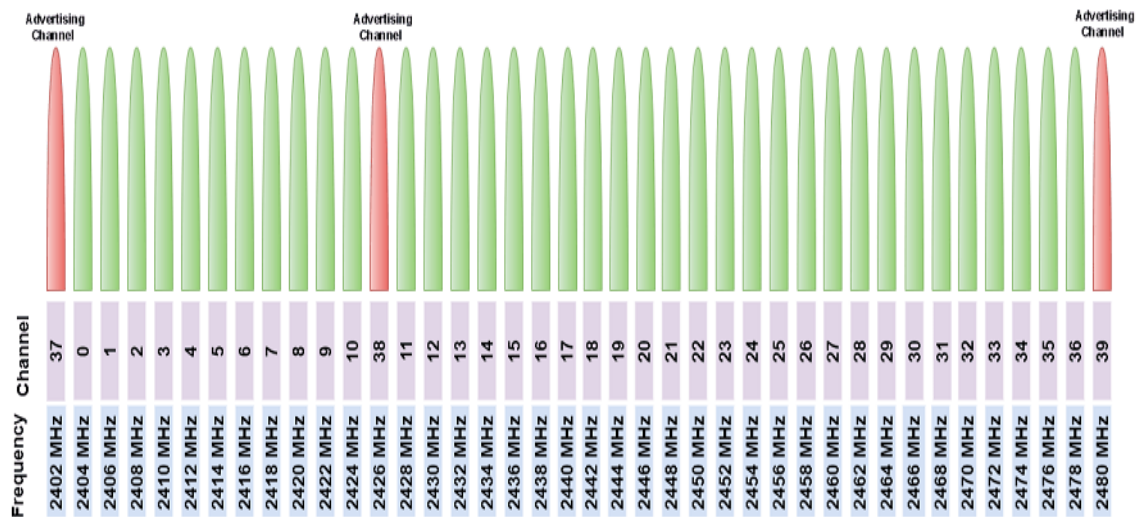
Eräs aikaisimpia WLAN-tekniikkaan perustuvia paikannusjärjestelmiä on Microsoftin kehittämä RADAR, joka perustuu radiosormenjälkipaikannustekniikkaan. RADAR käyttää lisäksi tukena Signaalin etenemisen mallintamista ja seinien sekä lattian materiaalien vaimennuskertoimia paikannuksen mahdollistamiseksi. Yhdistämällä sekä empiirisesti kerättyä signaalien ominaisuustietoa että teoreettisesti tietokoneavusteisesti laskettua tietoa, RADAR pystyy paikantamaan kohteen sisätilassa muutamien metrien tarkkuudella (Bahl & Padmanabhan, 2000).

Yhtenä uusimmista kehityksistä WLAN-paikannusjärjestelmissä on koneoppimisen käyttö radiosormenjälkipaikannustietokannan käsittelyyn. Neyaz, Inamullah ja Beg (2024) ratkaisevat WLAN-paikannukseen liittyviä ongelmia, kuten signaalihäiriötä ja paikannustiedon epävarmuutta käsittelemällä aiemmin otettua radiosormenjälkitietojoukkoa koneoppimisen metodeilla, jolloin paikannustekniikkaa on mahdollista käyttää kohteen paikantamisen lisäksi myös tilan kartoitukseen.

5.2 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) -tekniikka on henkilökohtainen verkkotekniikka, joka perustuu lyhyen matkan langattomaan tiedonsiirtoon radioaaltojen välityksellä. Bluetooth Low Energy on Bluetooth-tiedonsiirtotekniikan sovellus, jossa keskiössä on

alhaiset kustannukset sekä energiankulutus (Varshney, Goel, & Qadeer, 2016). BLE-tekniikka toimii 40 lähetyskanavalla (kuva 6), joista jokainen on sijoitettu kahden megahertsin väleille toisistaan. BLE:n käyttämistä kanavista kanavat 37, 38 ja 39 ovat varattuna pakettien lähettämiseen ja loput kanavat varataan tiedonsiirtoon. Pakettien lähettämiseen varatut kanavat mahdollistavat kommunikoinnin kahden parittamattoman laitteen välillä. (Milano et al., 2024). BLE-tekniologia pystyy siirtämään tietoa 25Mbit/s nopeudella 60 metrin etäisyydeltä majakasta (Spachos & Plataniotis, 2021).



Kuva 6 BLE-Tekniikan käyttämät lähetyskanavat (Mathworks, 2024)

Yleinen tapa toteuttaa BLE-paikannusjärjestelmä on asentaa paikannettavalle alueelle BLE-majakoita (engl. beacon), jotka lähettävät Ennalta määritellyn datapaketin tietyillä aikaväleillä. Majakoiden lähettämien datapakettien sekä aiemmin käsiteltyjen paikannustekniikoiden avulla signaalin vastaanottavat laitteet pystyvät päättelemään sijaintinsa tilassa.

Yleisimmät BLE-ratkaisut perustuvat seuraaviin paikannustekniikoihin:

- radiosormenjälkitunnistus
- triangulaatiopaikannus

- signaalin etenemisen mallintaminen

BLE-teknologiaan perustuvat sisätilapaikannusratkaisut ovat laajasti käytössä eri teollisuuden aloilla. Yuzawa & Fujii (2024) tutkivat BLE-majakoiden käyttöä sisätilapaikannuksessa tehdasympäristössä. Tutkimuksessa ehdotettiin paikkatiedon tarkkuuden parantamista hyödyntämällä majakoiden valintamenetelmiä, joilla voidaan karsia paikkatiedon arvioinnista pois paikannustietoa, joka sisältää interferenssiä. Paikkatietoa tarkennetaan valitsemalla vain ne kolme majakkaa, jotka ovat lähimpänä sekä suorassa yhteydessä paikannettavaan kohteeseen. Majakoiden valinnan jälkeen paikannus toteutetaan triangulaatiomenetelmällä, jolloin valittujen majakoiden lähettämän paikkatiedon pohjalta saadaan tarkempi kuvaus verrattuna kaikkien tehtaassa sijaitsevien majakoiden tarjoaman paikkatiedon käyttöön.

BLE-tekniikassa uutena kehitysaskeleena WLAN-tekniikan tavoin on koneoppimisen menetelmien hyödyntäminen paikkatietojen käsittelyssä paremman paikannustarkkuuden saavuttamiseksi. Sthapit, Gang ja Pyun käsittelevät tutkimuksessaan *"Bluetooth Based Indoor Positioning Using Machine Learning Algorithms"* (2018) BLE-pohjaista sisätilojen paikannuskyvyn tarkentamista koneoppimisalgoritmien avulla.

5.2.1 BLE-majakka

Bluetooth Low Energy-majakka on itsenäinen esineiden internettiin (IoT) kuuluva laite, jonka käyttötarkoitus on jakaa tietoa BLE-signaalin avulla. Yleisimmissä käyttötarkoituksissa majakat eivät pysty vastaanottamaan tietoa ja lähettävät ennalta määrätyn tietopaketin laitteelle, jolla on kykeneväisyys purkaa ja lukea lähetetyn paketin tiedot. Usein vastaanottavana laitteena käytetään joko erillistä paikannustarkoitukseen kehitettyä tagia tai muuta laitetta, jolla on mahdollisuus muodostaa bluetooth-yhteyksiä, kuten mobiililaitetta, tablettia tai tietokonetta.

BLE-majakoiden ominaisuudet riippuvat valmistajasta sekä käyttötarkoituksesta, mutta yhteisiä komponentteja miltei kaikille teollisuusympäristöissä toimiville majakoille on radiosiru, mikroprosessori sekä virtalähde. Usein teollisuusympäristöissä virtalähteenä toimii joko litiumparisto tai -akku, mutta sopivassa toimintaympäristössä majakoille voidaan tuottaa virtaa myös aurinkopaneeleilla tai yhdistämällä ne verkkovirtaan (Spachos & Plataniotis, 2021).

5.2.2 BLE-Tagi

BLE-Tagi on yksinkertainen bluetooth-laite, joka koostuu radiolähettimestä, mikroprosessorista, sekä virtalähteestä, kuten akusta tai paristosta. BLE-tagin on tarkoitettu paikallaan pysyvää BLE-majakasta eroavasti kiinnitettäväksi liikkuvaan kohteeseen. Majakkapohjaisesta ratkaisusta eroten Tagia käytettäessä vastaanottavaa laitetta käytetään tagin sijainnin selvittämiseen. BLE-tageja käytetään varsinkin tavaroiden paikantamiseen ja niitä voidaan käyttökohteen mukaan muokata eri tarpeisiin, esimerkiksi tarralla kiinnitettäväksi tai kaulaan ripustettaviksi.

5.3 ZigBee

ZigBee on langaton tiedonsiirtoprotokolla, joka perustuu Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) järjestön 802.15.4 standardiin. ZigBeeen kehityksen taustalla on tarve standardisoida ja mahdollistaa IoT-laitteiden välinen kommunikaatio (Safaric & Malaric, 2006). ZigBee on määritelty toimimaan lyhyen matkan langattomassa tiedonsiirrossa sekä kustannus- että energiatehokkaasti. Pääasiassa standardi on käytössä vähäkustannuksisissa paristolla toimivissa ratkaisuissa ja laitteissa.

ZigBee-standardin hyödyntämistä teollisuuden paikannustarkoitukseen on tutkittu laajasti. Alhmiedat, Omar ja Taleb (2014) esittivät hybridiseurantaratkaisun, jossa Zigbee-moduuliin on lisätty kiihtyvyyssensori sekä gyroskooppi. Toteutuksessa zigbee-koordinaattoriksi valittiin mukana kannettava moduuli ja reitittimet valittiin paikallaan pysyviksi referenssilaitteiksi.

5.3.1 Zigbee-standardin komponentit

ZigBee-standardin verkkotopologia rakentuu kolmesta selkeästä roolista. Verkot on suunniteltu helposti skaalautuviksi, jotta standardia voidaan hyödyntää mahdollisimman monipuolisesti eri teollisuuden käyttötarkoituksiin. Zigbee-komponenttien roolit on määritelty Connectivity Standards Alliancen (CSA, 2025) mukaan seuraavasti:

- PAN-koordinaattori
- reititin
- päätelaite

Koordinaattori on laite, joka vastaan verkon sisällä tapahtuvien tapahtumien hallinnasta sekä verkon ominaisuuksien varastoimisesta. Reitittimen tehtävänä on reitittää verkon sisäistä viestintää sekä toimia tukena koordinaattorin sekä päätelaitteen välisessä viestinnässä. Päätelaitteet pystyvät lähettämään ja vastaanottamaan viestejä ollessaan yhteydessä joko koordinaattoriin tai reitittimeen (Alhmiedat & Yang, 2009).

5.3.2 ZigBee-laitetyypit

Paikannustarkoitukseen rakennettu ZigBee-järjestelmä koostuu kahdesta laityypistä:

- täysitoiminen laite (Engl. Full function device, FDD)
- rajoitetun toiminnan laite (Engl. Restricted function device, RFD)

Täysitoiminen laite pystyy toteuttamaan kaikki ZigBee-standardissa määritetyt roolit, kun rajoitetun toiminnan laite toimii rajoitetusti ja pystyy toteuttamaan vain osan standardin määrittämistä tehtävistä. Toiminnallisuuksien karsiminen kuitenkin tekee rajoitetun toiminnan laitteista energiatehokkaampia sekä toimintavarmempia. Rajoitetun toiminnan laitteet ovat usein paikannustarkoitukseen käytettäviä pieniä laitteita (Fahrani, 2008).

5.4 Radio Frequency Identification (RFID)

Radioaaltotunnistus (Engl. Radio Frequency Identification, RFID) on radioaaltoihin pohjautuva tiedonsiirtoteknologia, joka on yleisesti käytössä tavaroiden kirjaus ja tunnistuskäytössä. RFID:llä on kuitenkin käyttömahdollisuuksia myös paikannustarkoituksessa. RFID-järjestelmän voi toteuttaa käyttämällä joko passiivisia rfid-lähettimeä, jotka eivät sisällä virtalähdettä, tai aktiivitageja, jotka sisältävät virtalähteen. Järjestelmissä, jotka käyttävät passiivista RFID-tunnistusta tagit hyödyntävät RFID-vastaanottimen lähettämää sähköistä signaalia. Passiiviset rfid-tagit vaativat hyvin vähän energiaa lähettääkseen vastauksia ja niiden käyttöön riittääkin vastaanottimen lähettämä signaali. Passiivitagit ovat laajasti käytössä esimerkiksi kulunvalvonta ja logistiikkatarkoituksissa. Passiivitagien kuuluvuusalue on kuitenkin vain 1–2 metriä, joten se on huomattavasti aktiivitageja huonommin soveltuva teknologia laajaan henkilöpaikannukseen (Batistić & Tomic, 2018).

Järjestelmät, jotka käyttävät aktiivitageja soveltuvat henkilöpaikannukseen. Aktiivitagit koostuvat sekä virtalähteestä että RFID-lähtimestä, joka toimii seurantaratkaisussa majakan kaltaisena laitteena. Aktiivitagit siis lähettää määritellyin väliajoin signaalia, jonka rfid-lukija pystyy lukemaan jopa 150 metrin päästä. Vertaamalla lähetetyn signaalin vahvuutta vastaanottimien välillä voidaan käyttää kolmiomittausmenetelmää paikannettavan kohteen sijainnin selvittämiseksi

Aktiivitageja käyttävän RFID-järjestelmän etuja ovat laaja kuuluvuusalue sekä hyvä toimintavarmuus. Aktiivitagijärjestelmän tagit ovat kuitenkin huomattavasti passiivijärjestelmän tageja kalliimpia (Shukla & Radadiya, 2013).

Vaikka passiivitageilla ei voida päästä aktiivitagien kaltaiseen tarkkuuteen ja mahdollisuudet paikannuskäytössä ovat huomattavasti rajatummat, on passiivitagien käyttöä reaaliaikaiseen seurantaan silti tutkittu. Ting, Kwok ja muut (2011) toteuttivat passiivitageja käyttävän paikannusjärjestelmän, joka käytti radisormenjälkilukemia sekä

passiivitagin signaalin voimakkuutta paikkatiedon selvittämiseksi. Paikannus toteutettiin yhdeksän neliömetrin alueella, jonka kulmiin asetettiin RFID-lukijat. Tuloksena saatiin vähäkustannuksinen sekä suorituskyvyltään tyydyttävä paikannusjärjestelmä. Paikannusjärjestelmän testaus kuitenkin toteutettiin teollisuuden tuotantoympyräistöihin pienellä alueella. Passiivitageilla toteutettu käytännön järjestelmä vaatisi useita satoja lukijoita.

5.5 Ultra Wideband (UWB)

Ultra wideband (UWB) on yksi uusimmista sekä tarkimmista paikannusteknologioista (Ghavami, Michael, & Kohno, 2006). UWB:n edeltäjänä Tekninen määritelmä signaalille, joka voidaan määritellä UWB-signaaliksi, on radiosignaali, joka kattaa osuuden taajuusspektristä, joka on suurempi kuin 20 % keskikantotaajuudesta tai jonka kaistanleveys on yli 500 MHz (Federal Communications Commission, 2022). Yleisesti UWB on viestintätekniikka, joka hyödyntää hyvin laajaa taajuuskaistaa tiedonsiirrossa. Tämä mahdollistaa nopean siirtonopeuden, kun etäisyydet ovat pieniä. Kaupallisesti UWB on laajasti käytössä varsinkin sisätilapaikannustarkoituksissa (Sarkar & Sultana, 2018).

UWB on tehokas paikannusteknologia varsinkin ympäristöissä, joissa on paljon esteitä tai materiaaleja, jotka häiritsevät perinteisiä tiedonsiirtosignaaleja. Laajan taajuuskaistan käytön ansiosta UWB pystyy siirtämään suuren määrän tietoa alhaisella tehotehokkuudella. Lisäksi UWB-pulssin matala taajuus mahdollistaa hyvät läpäisykyvykkyydet eri materiaalien läpi. Tämä tekee UWB-tekniikasta hyvän vaihtoehdon varsinkin tehtaiden, varasstojen sekä tuotantotilojen paikannustarpeisiin (Zhang ja muut., 2022).

UWB-paikannus perustuu TDOA-tekniikkaan, jossa paikannettavan kohteen sijainti voidaan selvittää paikannuslaitteen lähettämien viestien sekä UWB-majakoiden sijoittelusta johtuvien eroavien viestien saapumisaikojen perusteella. Kun tiedetään kauanko jokaisella majakalla kesti luoda aikaleima lähettimen lähettämästä viestistä,

voidaan paikannuslaitteen sijainti määrittää käyttämällä aiemmin esiteltyä TDOA-paikannustekniikan kaavaa.

UWB-paikannusjärjestelmä koostuu UWB-majakoista sekä UWB-tageista. Tagien muoto vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan tarramuotoisesta kiinnitettävästä materiaalin seurantatagista mukana kannettaviin avaimenperiin tai kaulan ympärillä tai taskussa säilytettäviin tagiratkaisuihin. UWB-seurantaratkaisuja käytetään laajasti eri teollisuusympäristöissä sekä eri teollisuuden aloilla.

6 Teknologioiden soveltuvuus telakkateollisuuteen

Tässä kappaleessa määritetään suorituskyvyn mittarit, joiden pohjalta luodaan vertailutaulukko, jossa esiteltyjä paikannusteknologioita verrataan.

6.1 Suorituskyvyn mittarit

Sisätilapaikannusjärjestelmien toteuttamiseen voidaan käyttää useita eri teknologioita, joilla on eri ominaisuuksia ja käyttötarkoituksia. Eri teknologioiden vertailuun voidaan käyttää suorituskykymittareita, jotka mittaavat teollisuusympäristössä käyttöönotettavan paikannusjärjestelmän kannalta merkittäviä asioita. tässä työssä merkittävät suorituskykymittarit ovat listattuna alla:

- tarkkuus
- monimutkaisuus
- toimintavarmuus
- kuuluvuusalue
- skaalautuminen
- kustannukset.

6.1.1 Tarkkuus

Tarkkuus määritellään lähimmäksi tarkasti määriteltäväksi etäisyydeksi, joka syntyy paikannusjärjestelmän ilmoittaman paikkatiedon ja paikannettavat asian reaali maailman paikan välille. Tarkkuutta voidaan yleisesti pitää paikannusjärjestelmän tärkeimpänä ominaisuutena. Paikannusteknologian vaadittava tarkkuus riippuu käyttötarkoituksesta sekä käyttöympäristöstä, ja tarkkuuden sekä muiden ominaisuuksien välillä tehdään usein kompromisseja. Eri käyttötarkoituksiin käytettävät paikannusteknologiat vaativat eroavia tarkkuuksia (Brena, García-Vázquez, Galván-Tejada, Muñoz-Rodríguez, Vargas-Rosales, & Fangmeyer, 2017). Esimerkiksi

teollisuusrobotille vaadittava tarkkuus saattaa olla senttimetrejä, kun taas henkilöpaikannuksessa tai suurien työkoneiden seurannassa metrien tarkkuus on riittävä.

6.1.2 Monimutkaisuus

Paikannusjärjestelmän monimutkaisuus rakentuu laitteistosta, ohjelmistosta ja laitteen käyttöön liittyvistä seikoista. Teollisuusympäristöissä mahdollisimman yksinkertainen laitekonfiguraatio ja mahdollisimman yksinkertainen toimintaperiaate nähdään eduiksi.

6.1.3 Toimintavarmuus

Telakkaympäristössä, jossa olosuhteet ovat usein tietotekniselle laitteistolle haastavia, Paikannusjärjestelmän kyky toimia luotettavasti optimiolosuhteita huomattavasti huonommissa olosuhteissa on tärkeää. Toimintaympäristössä on paljon signaalia häiritsevää materiaalia, jolloin teknologian on pystyttävä tuottamaan luotettavaa paikkatietoa signaalihäiriöstä huolimatta.

6.1.4 Kuuluvuusalue

Paikannustekniikan kuuluvuusalueella tarkoitetaan sitä etäisyyttä vastaanottimesta, jonka sisällä paikannettavaa asiaa on mahdollista tarkasti ja luotettavasti paikantaa. Kuuluvuusalue riippuu merkittävästi käytetystä paikannusteknologiasta, paikannusympäristöstä sekä paikannusympäristön esteistä, signaalin voimakkuudesta sekä vastaanottimien sijoittelusta ja lähettimen sijainnista. Laajempi kuuluvuusalue mahdollistaa saman alueen seuraamisratkaisun implementoinnin käyttämällä vähemmän vastaanottimia. Sisätilapaikannuksessa paikannettavat alueet ovat usein suhteellisesti pieniä, jolloin kymmenien metrien kuuluvuusalue vastaanottimella on riittävä.

6.1.5 Skaalautuminen

Skaalautumisella tarkoitetaan teknologian mahdollisuutta laajentua tai pienentyä käyttötärpeen mukaan teollisuusympäristössä. Järjestelmän kyky ylläpitää vakaa ja toimiva paikannustoiminnallisuus useissa yleisissä tilanteissa, kuten paikannusalueen laajentuessa sekä paikannettavien kohteiden määrän kasvaessa on kriittistä. Käytännössä skaalautumista voidaan toteuttaa suunnittelemalla järjestelmä modulaariseksi, jolloin esimerkiksi vastaanottimien tai lähettimien lisääminen paikannusjärjestelmäkokonaisuuteen ei vaadi uudelleensuunnittelua tai muita suuria toimenpiteitä (Li, Wu, Zhao, & Huang, 2024).

6.1.6 Kustannukset

Sisätilapaikannusjärjestelmän kustannukset koostuvat käyttöönottokustannusten lisäksi useasta osa-alueesta, jotka on huomioitava teknologiavalintaa toteuttaessa. Rahallisiin kustannuksiin kuuluu muun muassa laitteistosta ja lisenssimaksuista koostuvat kustannukset. Rahallisten kustannusten lisäksi kustannuksiin liittyy myös muita tekijöitä, kuten järjestelmän ylläpitoon, kalibrointiin, suunnitteluun ja huoltoon kuluva työaika. Lisäksi ei-rahallisiin kustannuksiin kuuluu seurattavasta alueesta ja sen ominaisuuksista riippuvat kustannukset, joita syntyy esimerkiksi ympäristöön tehtävistä muutoksista, jotka ovat tarpeellisia järjestelmän asennukselle. Jotkin seurantateknologiat voivat hyödyntää jo valmiiksi muuhun tarkoitukseen käytettyä laitteistoa, kuten reitittämiä tai mobiililaitteita osana paikannusjärjestelmää (Brena, García-Vázquez, Galván-Tejada, Muñoz-Rodríguez, Vargas-Rosales, & Fangmeyer, 2017).

6.2 Teknologivertailu

Teknologivertailu toteutetaan luokittelemalla käsiteltyjen paikannustekniikoiden ominaisuuksia kappaleessa 5.1 esiteltyjen suorituskyvyn mittareiden perusteella. Työssä esiteltyjen tekniikoiden vertailua tarkkuuteen, monimutkaisuuteen, toimintavarmuuteen, kuuluvuusalueeseen, skaalautumiseen sekä kustannuksiin peilattuna on esitelty alla olevassa taulukossa (taulukko 2).

Taulukko 2 Sisätilapaikannusteknologioiden vertailu.

Suorituskyvyn mittari	WLAN	BLE	ZigBee	RFID	UWB
Tarkkuus	5-8m tarkkuus sisätilaympäristöissä	3-5m tarkkuus sisätilaympäristössä	<1m tarkkuus sisätilaympäristössä-	<10 senttimetriä	<30 senttimetriä
Monimutkaisuus	Yksinkertainen, tarvittavain laitteistojen usein jo valmiiksi asennettuna	Yksinkertainen	Monimutkainen	Yksinkertainen	Yksinkertainen
Toimintavarmuus	Heikko	Vahva	Vahva	Vahva sekä aktiivilla että passiivilla	Vahva
Kuuluvuusalue	100–300 metriä per reititin	5–50 metriä per majakka	10–100 metriä per majakka	Aktiivilla < 1 m, passiivilla <1 m	20- 100 m per majakka
Skaalautuminen	Skaalautuu helposti, järjestelmää voidaan laajentaa lisäämällä reitittämiä.	Rajoitettu. Kaikki laitteet tarvitsevat yhteyden toisiinsa.	Vahvasti skaalautuva, mahdollisuus yhdistää satoja laitteita yhteen verkkoon	Vahvasti skaalautuva.	Vahvasti skaalautuva

Suorituskyvyn mittari	WLAN	BLE	ZigBee	RFID	UWB
Kustannukset	Alhainen	Alhainen	Kohtalainen	Asennus sekä aktiivitagiratkaisussa että passiivitagiratkaisussa kallis.	Alhainen

7 Lainsäädännölliset edellytykset

Kun käytetään järjestelmää, jonka toiminnalle on olennaista seurata henkilön liikkeitä sekä tallentaa kerättyä henkilöön liittyvää tietoa, on tärkeää ottaa huomioon henkilötietoihin sekä tietosuojaan liittyvä lainsäädäntö. Lainsäädännöt sekä ohjeistukset paikannustietoon liittyen vaihtelevat riippuen maiden yksilöllisestä lainsäädännöstä (Fathalizadeh, Moghtadaiee, & Alishahi, 2022). Lainsäädännön lisäksi paikannusjärjestelmän käyttö sekä paikannustiedon tallentaminen johtavat usein siihen, etteivät käyttäjät halua paljastaa tietoa sijainnistaan tai vastustavat tiedon tallentamista vedoten yksityisyyteen liittyviin seikkoihin.

Vaikka paikannusjärjestelmien käyttöönotosta on tehty useita toteutuksia sekä tutkimuksia, ei paikannuksen tuottaman datan käsittelyä tai lainsäädäntöön liittyviä seikkoja usein mainita tutkimustuloksissa. Tämä saattaa johtua eri maiden eroavista lainsäädännöistä ja käytännöistä, joiden vuoksi yhteinäisiä toimintatapoja tai lakeja paikannusjärjestelmien tuottaman datan säilyttämiselle sekä käsittelemiselle ei ole syntynyt.

Suomessa on määritelty erillinen tietosuoja-asetus, jonka tarkoituksena on täydentää sekä täsmentää yleisen tietosuoja-asetuksen (GDPR) asettamia henkilötietojen säilytykseen liittyviä seikkoja. Lisäksi paikannusjärjestelmän täytyy mukautua Työsuojeluhallinnon asettamia tekniseen valvontaan liittyviä määräyksiä. Työsuojeluhallinnon (2024) mukaisesti teknistä valvontaa saa toteuttaa, mikäli valvonta tapahtuu työturvallisuuden, omaisuuden suojelemisen tai henkilöstön ja asiakkaiden turvallisuuden takaamiseksi.

7.1 GDPR-vaatimukset

Euroopan unionin yleinen tietosuoja-asetus (engl. General Data Protection Regulation, GDPR) on Euroopan Unionin vuonna 2018 voimaan tullut laki, joka määrittää miten organisaatiot sekä yritykset saavat säilyttää ja käyttää henkilötietoja. Henkilötiedot ovat

mitä tahansa tietoa, jota voidaan joko suorasti tai epäsuorasti käyttää yksittäisen henkilön identiteetin tunnistamiseen. Tiedon käsittelyllä tarkoitetaan tiedon keräämistä, rakentamista, järjestämistä, säilyttämistä, poistamista ja tuhoamista. Jokaisella yrityksellä, joka käsittelee jollakin tavalla työntekijöiden henkilötietoja on velvollisuus noudattaa GDPR: n linjaamia ohjeistuksia ja määräyksiä (GDPR, 2018).

GDPR-asetuksen mukaan henkilöseurantaa voidaan toteuttaa, mikäli seuraavat vaatimukset täyttyvät:

- paikannusta toteutetaan asianmukaisella perusteella ja tarpeella
- paikannuksesta on sovittu erillisellä sopimuksella
- paikannustiedon säilyttämisessä noudatetaan GDPR:n vaatimuksia

Vaikka paikannusjärjestelmien tuottaman tiedon suojaamisesta tehty tutkimus on suppeaa, voidaan datan suojaamiseen käyttää yleisesti tiedon anonymisointiin käytettäviä tekniikoita, joita ovat esimerkiksi kohinan lisääminen paikannustiedon sekaan (Fathalizadeh, Moghtadaiee, & Alishahi, 2022).

Paikannusjärjestelmän tapauksessa eräs ratkaisu, jolla varmistetaan paikannusjärjestelmän sekä kerätyn tiedon GDPR-komplianssi, on anonymisoida saatu paikkatieto niin, ettei sitä voi missään tapauksessa yhdistää yksittäiseen henkilöön. Tätä voidaan toteuttaa esimerkiksi jakamalla paikannettavien henkilöiden tagit ryhmiin esimerkiksi toimijakohtaisesti, jolloin kaikki kerätty data nähtäisiin vain tietyn toimijan osalta toimijan alla toimivien henkilöiden sijaan.

8 Tulosten analysointi

Paikannusjärjestelmän käyttöönotto teollisuusympäristössä on moniulotteinen prosessi, jonka toteuttamisessa täytyy ottaa huomioon käyttöönottoympäristöön, käytettävään teknologiaan sekä paikannukseen liittyvään lainsäädäntöön liittyvät edellytykset. Paikannusjärjestelmä tuo lisäarvoa sekä työturvallisuuteen että prosessien tehostamiseen liittyen.

Paikannusjärjestelmän valinnassa on otettava huomioon paikannusalueen ominaisuudet. Teollisuusympäristöissä on tärkeää kartoittaa ja tunnistaa tilassa sijaitsevat mahdollisesti radioaaltoja estävät materiaalit ja asiat, kuten seinät, laitteet tai työkoneet. Lisäksi on tärkeää selvittää, sijaitseeko paikannettava alue useassa kerroksessa, sillä paikannuslaitteen yhdistäminen samanaikaisesti kahteen paikannusmajakkaan kerrosten päällekkäisyyden takia saattaa johtaa virheelliseen tulokseen. Varsinkin liiketoimintatarkoitukseen käytettävässä järjestelmässä korostuvat järjestelmän toimintavarmuus, skaalautuminen sekä järjestelmän asentamisen sekä ylläpidon kustannukset. Myös vaadittava paikannuksen tarkkuus on oleellinen tekijä järjestelmän valinnassa.

Ympäristöön sekä teknologiaan liittyvien ominaisuuksien lisäksi myös lainsäädännölliset asiat ovat tärkeitä varsinkin yrityskontekstissa. Vaikka kaiken kattavaa yhteistä toimintatapaa ei ole määriteltä, joutuvat suomalaiset yritykset noudattamaan suomen lainsäädäntöön kirjattuja tietosuojan ja tekniseen valvontaan liittyviä lainsäädäntöjä sekä Euroopan unionin yleistä tietosuoja-asetusta. Teknisen valvonnan suorittaminen on yleisesti sallittua, kun sille on jokin perusteltu syy, kuten työturvallisuuden varmistaminen. Lisäksi valvonnan avulla kerättävän tiedon tulee olla työsuhteen kannalta oleellista.

8.1 Vaatimusmäärittely

Aiemmin työssä tuotetun kirjallisuuskatsauksen sekä teemoittelun pohjalta toteutetaan vaatimusmäärittely Rauma Marine Constructionsin tarpeisiin toteutettavalle paikannusjärjestelmälle. RMC:n tunnistetut vaatimukset ovat listattuna seuraavassa taulukossa (taulukko 3).

Taulukko 3 RMC:n vaatimusmäärittely paikannusjärjestelmälle.

RMC:n vaatimukset paikannusjärjestelmälle
Järjestelmä pystyy selvittämään työntekijöiden liikkeitä määritetyillä alueilla
Järjestelmä on helposti muokattavissa ja siirreltävässä dynaamisen ympäristön vuoksi
Järjestelmä voidaan saada toimimaan alueelle, jossa mobiiliyhteyksien kuuluvuus on heikko.
Henkilöiden seuraaminen on tehty mahdollisimman yksinkertaiseksi (mahdollisimman vähän liikkuvia osia, kortteja jne.)
Järjestelmä ratkaisee GDPR-vaatimukset sekä noudattaa muutenkin datankäsittelyn määräyksiä
Järjestelmästä on mahdollista saada dataa, joko valmiina koontina tai jonkin rajapinnan kautta.
Järjestelmä on fyysisesti kiinnitettävissä jollakin ratkaisulla, joka estää sen luvattoman purkamisen/liikuttamisen
Poikkeustilanteissa, kuten onnetouuden sattuessa tai muussa hätätilanteessa henkilöiden sijoinnin selvittäminen on välittömästi mahdollista
Seurantaan käytettävä laitteisto on helppokäyttöistä ja toimintavarmaa kaikissa tilanteissa
Järjestelmän on oltava helposti skaalautuva ja pystyttävä vastaamaan kasvavaan käyttäjämäärään sulavasti
Järjestelmän käyttämä teknologia pystyy toimimaan laivaympäristössä, jossa signaalin tiellä voi mahdollisesti olla monta suoraa yhteyttä häiritsevää estettä/tekijää
Järjestelmän tuottamaa tietoa on mahdollisuus tarkastella takautuvasti.
Järjestelmän käytännön toiminnan prosessi on suoraviivainen
Järjestelmä on energiatehokas, jotta laitteet toimivat pitkään ilman lataamistarvetta
Järjestelmä pystyy hälyttämään, mikäli työskentelyalueella on vaaratilanne tai jos seurantalaitte kytketään pois päältä
Seurantalaitte pystyy erottamaan onko se liikkeessä ja yksittäisen henkilön kannettavana
Hätätilanteissa evakuoinnin seuranta reaaliaikaisesti on mahdollista
Järjestelmän rajapinta mahdollistaa integraation muiden käytössä olevien järjestelmien kanssa esim. työajanseuranta tai dokumenttienhallintajärjestelmä

9 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli tunnistaa yleisiä teollisuuden sisätilapaikannustarkoitukseen sopivia paikannusteknologioita sekä vertailla niiden ominaisuuksia teollisuuden tuotantotiloissa toimivien paikannusjärjestelmien ominaisuuksiin perustuvilla vaatimusmääreillä. Lisäksi työssä kuvattiin teollisuuden paikannusympäristöä sekä ympäristöön liittyviä ominaisuuksia, jotka on otettava huomioon paikannusjärjestelmän käyttöönottoa suunnitellessa. Kirjallisuuskatsauksessa eri eineistoissa esiintyvien teemojen pohjalta tunnistettiin suosituksia, joiden on tarkoitus auttaa käyttöönottoprosessissa. Lisäksi tunnistettujen teemojen pohjalta luotiin vaatimusmäärittely juuri telakkaympäristössä toimivalle sekä RMC:n odotuksiin sopivalle paikannusjärjestelmälle.

Teollisuusympäristöistä sekä teollisuusympäristöihin aiemmin toteutetuista paikannusjärjestelmistä tunnistettiin yhteisiä yleisiä käyttötarkoituksia, kuten työturvallisuuden edistäminen sekä työprosessien parantaminen. Paikannusjärjestelmiä sekä niiden mahdollisuuksia teollisuuden tarkoituksiin käyttämisessä on tutkittu sekä testattu laajasti. Teollisuusympäristöissä keskeisiä paikannusteknologioita ovat WLAN, BLE, ZigBee, RFID ja UWB. Mainitut teknologiat sopivat teollisuusympäristöjen ja varsinkin telakkateollisuusympäristöjen käyttötarkoituksiin varsinkin yksikertaisuutensa sekä kustannustehokkuutensa vuoksi. Koska paikannusetäisyydet laivojen sisällä eivät kasva kovinkaan suuriksi, saadaan eniten hyötyä suhteellisen lyhyen kuuluvuusalueen ratkaisuista, joita ovat esimerkiksi BLE, ZigBee sekä UWB. Telakkaympäristö vaatii muiden teollisuusympäristöjen mukaisesti toimintavarman, helposti skaalautuvan sekä monia käyttötapauksia mahdollistavan järjestelmän. Lisäksi energiatehokkuus sekä lainsäädännöllisten aspektien täyttäminen on välttämätöntä yrityskontekstissa.

Työssä tunnistettiin useita teollisuuden paikannustarkoituksiin käytettyjä paikannusteknologioita. Lisäksi tutkittiin teknologioiden ominaisuuksia teollisuudessa sekä liiketoiminnassa aikaisemmin toteutettujen järjestelmien vaatimusten perusteella. Näistä vaatimuksista muodostettiin suorituskyvyn mittareita, joiden avulla toteutettiin

taulukkomuotoinen vertailu viidestä eri paikannusteknologiasta peilaten teknologioiden ominaisuuksia tunnistettuihin suorituskyvyn mittareihin.

Tämä työ tarjoaa tietoa paikannustekniikoista, eri teollisuusaloille soveltuvista paikannusteknologioista sekä huomioitavia tekijöitä paikannusjärjestelmän valinnassa ja käyttöönotossa. Paikannusteknologian valinta on monimutkainen prosessi, jossa on otettava huomioon järjestelmän toimintaympäristö, teknologian suorituskyky, kustannukset sekä järjestelmän käyttötarkoitus. Työssä esitelty vertailu eri paikannusteknologioiden välillä auttaa ymmärtämään, miten eri teknologiat soveltuvat teollisuuden tarpeisiin ja mitä erityispiirteitä on otettava huomioon telakkaympäristössä. Vertailu tarjoaa myös konkreettisia suosituksia siitä, miten paikannusjärjestelmän käyttöönottoa voidaan suunnitella ja toteuttaa tehokkaasti.

Voidaan todeta, että paikannusjärjestelmän valinta ja käyttöönotto vaativat huolellista suunnittelua sekä vaatimusten määrittelyä. Työssä esitetyt suositukset toimivat yleisohjeina teollisuuden paikannusjärjestelmän valintaprosessin tukena. Tämä auttaa varmistamaan, että järjestelmä täyttää vaatimukset sekä tuo toivotusti lisäarvoa käyttötarkoituksen puitteissa. Jatkotutkimuksena olisi mahdollista tutkia työn esittelemiä teoreettisia paikannusteknologioiden ominaisuuksia käytännössä telakkaympäristössä sekä verratta käytännön testaamisella saatuja arvoja teoreettisiin arvoihin.

Lähteet

- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. (2016). Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors*, *16*(5), 707. <https://doi.org/10.3390/s16050707>
- Alhmiedat, T., & Yang, S.-H. (2009). Tracking multiple mobile targets based on the ZigBee standard. *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. doi: 10.1109/IECON.2009.5415426.
- Asaad, S. M., & Maghdid, H. S. (2022). A comprehensive review of indoor/outdoor localization solutions in IoT era: Research challenges and future perspectives. *Computer Networks*, *212*, 109041. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109041>
- Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. (2000). RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* (Vol. 2, pp. 775-784). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2000.832252>
- Batistić, L., & Tomic, M. (2018). Overview of indoor positioning system technologies. *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 0473-0478. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400090>
- Brena, R. F., García-Vázquez, J. P., Galván-Tejada, C. E., Muñoz-Rodríguez, D., Vargas-Rosales, C., & Fangmeyer, J. Jr. (2017). Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, *2017*, Article ID 1234567. <https://doi.org/10.1155/2017/1234567>
- Chruszczyk, L., Zajac, A., & Grzechca, D. (2016). Comparison of 2.4 and 5 GHz WLAN Network for Purpose of Indoor and Outdoor Location. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, *62*(1), 10-15. <https://doi.org/10.1515/eletel-2016-0010>

- Farahani, S. (2008). *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Chapter 1.7 Device Types.
- Fathalizadeh, A., Moghtadaiee, V., & Alishahi, M. (2022). On the privacy protection of indoor location dataset using anonymization. *Computers & Security*, *117*, 102665. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102665>
- Federal Communications Commission. (2022). *Ultra-wideband (UWB) devices: Frequently asked questions* (393764 D01 UWB FAQ v02r01). Office of Engineering and Technology, Laboratory Division. https://apps.fcc.gov/kdb/GetAttachment.html?id=aDJBz479vVHapGRP22%2FOg%3D%3D&desc=393764%20D01%20UWB%20FAQ%20v02r01&tracking_number=20253
- Ghavami, M., Michael, L. B., & Kohno, R. (Eds.). (2006). *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470867532>
- Helminen, R., & Saarikoski, J. (2019). *Satamien digitalisaation tulevaisuuden skenaariot* (B 211). Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskus, Turun yliopiston Brahea-keskus.
- Inoue, Y., Sashima, A., Ikeda, T., & Kurumatani, K. (2008). Indoor emergency evacuation service on autonomous navigation system using mobile phone. *2008 Second International Symposium on Universal Communication*, Osaka, Japan, 79-85. <https://doi.org/10.1109/ISUC.2008.49>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2020). IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (IEEE Std 802.11-2020). IEEE. https://standards.ieee.org/standard/802_11-2020.html
- Khandker, S., Torres-Sospedra, J., & Ristaniemi, T. (2019). Improving RF fingerprinting methods by means of D2D communication protocol. *Electronics*, *8*(1), 97. <https://doi.org/10.3390/electronics8010097>

- Kržan, K., & Orel Šanko, N. (2023). *Digitalisation and digital technologies: Potential advantages and weaknesses for business operations*.
- Li, P., Wu, W., Zhao, Z., & Huang, G. Q. (2024). Indoor positioning systems in industry 4.0 applications: Current status, opportunities, and future trends. *Digital Engineering*, 3, 100020. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2024.100020>
- MathWorks. (n.d.). *Bluetooth LE Channel Selection Algorithms*. Haettu kohteesta [MathWorks](#)
- Milano, F., da Rocha, H., Laracca, M., Ferrigno, L., Espírito Santo, A., Salvado, J., & Paciello, V. (2024). BLE-Based Indoor Localization: Analysis of Some Solutions for Performance Improvement. *Sensors*, 24(2), 376. <https://doi.org/10.3390/s24020376>
- Naval Architect. (n.d.). *Digitalization in shipbuilding*. Haettu Maaliskuu 18, 2025, from <https://naval-architect.io/digitalization-shipbuilding/>
- Neyaz, H., Inamullah, M., & Beg, M. M. S. (2024). Machine learning based indoor positioning system using Wi-Fi fingerprinting dataset. In *2024 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECET61485.2024.10698116>
- Oguntala, G., Abd-Alhameed, R., Jones, S., Noras, J., Patwary, M., & Rodriguez, J. (2018). Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey. *Computer Science Review*, 30, 55-79. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.09.001>
- P. Sthapit, H. -S. Gang and J. -Y. Pyun, "Bluetooth Based Indoor Positioning Using Machine Learning Algorithms," *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia)*, JeJu, Korea (South), 2018, pp. 206-212, doi: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552138.
- keywords: {Machine learning algorithms;Fingerprint recognition;Machine learning;IP networks;Servers;Mobile handsets;Bluetooth;indoor positioning;RSSI;machine learning},
- Randell, C., Djallil, C., & Muller, H. (2005). Personal position measurement using dead reckoning. 166-173. <https://doi.org/10.1109/ISWC.2003.1241408>

- Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation). Official Journal of the European Union, L 119, 4.5.2016, p. 1–88.
- Sacks, R., Seppänen, O., Priven, V., & Savosnick, J. (2017). Construction flow index: a metric of production flow quality in construction. *Construction Management and Economics*, 35(1–2), 45–63. <https://doi.org/10.1080/01446193.2016.1274417>
- Safaric, S., & Malaric, K. (2006). ZigBee wireless standard. *Proceedings ELMAR 2006*, Zadar, Croatia, pp. 259-262. doi: 10.1109/ELMAR.2006.329562.
- Salminen, A. (2011). *Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin*. Vaasan yliopiston julkaisuja. Opetusjulkaisuja 62, Julkisjohtaminen 4. Vaasa.
- Sarkar, A., & Sultana, S. (2018). Study on Ultra-Wideband (UWB) System and Its Applications. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.13066>
- Seppälä, L. (2019). *Drawingless production in digital data-driven shipbuilding*.
- Shin, B., Lee, J. H., Yu, C., Kyung, H., & Lee, T. (2022). Received signal strength-based robust positioning system in corridor environment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-15. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3190522>
- Shukla, K., & Radadiya, B. (2013). Comparative study of active RFID and passive RFID technologies in context of electronic toll collection (ETC) system. *Indian Journal of Applied Research*, 3(3), 59-60. <https://doi.org/10.15373/2249555X/MAR2013/21>
- Silva, I., Pendão, C., & Moreira, A. (2022). Real-world deployment of low-cost indoor positioning systems for industrial applications. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5386-5397. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3103662>
- Spachos, P., & Plataniotis, K. (2021). BLE Beacons in the Smart City: Applications, Challenges, and Research Opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*. Retrieved from IEEE

- Ting, S. L., Kwok, S. K., Tsang, A., & Ho, G. T. S. (2011). The study on using passive RFID tags for indoor positioning. *International Journal of Engineering Business Management*, 3, 10.5772/45678.
- Työsuojeluhallinto. (n.d.). Tekninen valvonta. Työsuojelu.fi. Haettu 11. huhtikuuta 2025 kohteesta <https://tyosuojelu.fi/tyosuuhde/oikeudet-ja-velvollisuudet-tyossa/yksityisyyden-suoja/tekninen-valvonta>
- Varshney, V., Goel, R. K., & Qadeer, M. A. (2016). Indoor positioning system using Wi-Fi & Bluetooth Low Energy technology. In 2016 Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WOCN.2016.7759023>
- Zhang, Y., Chu, Y., Fu, Y., Li, Z., & Song, Y. (2022). UWB positioning analysis and algorithm research. *Procedia Computer Science*, 198, 466-471. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.271>
- Zhao, J., Pikas, E., Seppänen, O., & Peltokorpi, A. (2021). Using real-time indoor resource positioning to track the progress of tasks in construction sites. *Frontiers in Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.661166>
- Zhao, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Badihi, B., & Olivieri, H. (2019). Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction. *Automation in Construction*, 104, 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.003>
- Zheng, C., Ge, Y., & Guo, A. (2023). Ultra-Wideband Technology: Characteristics, Applications and Challenges. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.13066>