

Rami Ojanen

# MOBIILIROBOTTIEN NAVIGOINTITEK- NOLOGIAT JA ESTEIDEN VÄLTÄMI- NEN

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Rami Ojanen: Mobiilirobottien navigointitekniikat ja esteiden välttäminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2022

---

Robottiikan merkitys teollisuudessa ja muilla aloilla on jo nyt suuri ja tulee kasvamaan myös tulevaisuudessa. Mobiilirobotikka on yksi tärkeimpiä ja nopeimmin kehittyviä robotiikan osa-alueita. Mobiilirobotteja hyödynnetään laajasti eri aloilla, esimerkiksi teollisuudessa, varastoissa ja sairaaloissa. Navigointi, ympäristön havainnoiminen ja esteiden välttäminen ovat mobiilirobotin toiminnan kannalta keskeisiä osa-alueita.

Mobiilirobottien ja antureiden nopean kehityksen myötä erilaisia navigointitekniikoita, ympäristön havainnoimiseen käytettäviä laitteita ja esteiden välttämiseen käytettäviä menetelmiä on paljon. Tämän työn tavoitteena on etsiä, kerätä ja analysoida kyseisiä tekniikoita, laitteita ja menetelmiä kirjallisuuden pohjalta. Työssä tutkitaan, miten tai mitä tekniikoita hyödyntäen mobiilirobotit navigoivat, millaisilla teknisillä laitteilla mobiilirobotit havainnoivat ympäristöään ja miten mobiilirobotit pyrkivät välttämään esteitä. Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuusselvitystä materiaalin keräämiseksi ja analysoimiseksi.

Kirjallisuuden pohjalta löydetään useita navigointitekniikoita, jotka jaotellaan globaaleihin ja lokaaleihin menetelmiin. Merkittäviä löydettyjä globaaleja navigointitekniikoita ovat APF (Artificial Potential Field) -, CD (Cell Decomposition) - ja RA (Roadmap Approach) -menetelmät sekä A\*-algoritmi. Näistä tarkemmin esitellään APF- ja CD-menetelmät. Tärkeitä löydettyjä lokaaleja navigointitekniikoita ovat geneettinen algoritmi (engl. Genetic Algorithm), neuroverkot, ACO (Ant Colony Optimization) -, FA (Firefly Algorithm) - ja PSO (Particle Swarm Optimization) -menetelmät sekä sumea logiikka. Näistä tarkemmin esitellään geneettinen algoritmi ja neuroverkot. Ympäristön havainnointiin käytettävistä laitteista esitellään ultraääni-, infrapuna- ja laser-anturit sekä kamerat. Esteiden välttämiseen käytettävistä tekniikoista perehdytään wall-following-, VFH (Vector Field Histogram) - ja DW (Dynamic Window) -menetelmiin sekä virhealgoritmeihin (engl. Bug Algorithms).

Työssä keskitytään ensisijaisesti autonomisiin, maalla renkailla liikkuviin mobiilirobotteihin, joiden esimerkiksi lentävät, veden alla liikkuvat ja kauko-ohjattavat mobiilirobotit rajataan käsittelyn ulkopuolelle. Lisäksi navigointitekniikoita on niin paljon, ettei tämän työn laajuus riitä niiden kaikkien yksityiskohtaiseen käsittelyyn. Tämän vuoksi työssä esitellään tarkemmin vain osa navigointitekniikoista. Johtopäätöksinä päädytään esimerkiksi siihen, että navigointitekniikoita, antureita ja esteiden välttämiseen käytettäviä menetelmiä on tärkeää kehittää edelleen, sillä nämä mahdollistavat mobiilirobottien entistä autonomisemman toiminnan ja lisäävät siten mobiilirobottien sovelluskohteita. Mobiilirobottien on myös tärkeää kyetä toimimaan samassa tilassa ihmisten ja liikkuvien esteiden kanssa, ja tässä kyseisillä tekniikoilla ja laitteilla on suuri merkitys. Lisäksi mainitaan, että tekniikoiden jaotteluun ja termien käyttöön olisi tärkeää löytää yhteinen ja selkeä tapa, sillä tällä hetkellä näissä on paljon vaihtelua eri lähteiden välillä. Tässä näkyy mobiilirobotiikan nopea kehitys, sillä termit ja tekniikoihin liittyvä sanasto eivät ole täysin vakiintuneet.

Avainsanat: mobiilirobotti, navigointitekniikka, anturi, esteiden välttäminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MOBIILIROBOTTI.....	3
2.1 Rakenne ja toimintaperiaate.....	3
2.2 Sovellukset .....	6
3. MOBIILIROBOTTIEN NAVIGOINTITEKNOLOGIAT.....	8
3.1 Globaalit navigointitekniologiat.....	8
3.2 Lokaalit navigointitekniologiat .....	11
4. YMPÄRISTÖN HAVAINNOIMINEN.....	13
5. ESTEIDEN VÄLTÄMINEN .....	15
6. POHDINTA .....	19
LÄHTEET .....	22

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACO	engl. Ant Colony Optimization
AGV	engl. Automated Guided Vehicle, vihivaunu
AMR	engl. Autonomous Mobile Robot, autonominen mobiilirobotti
APF	engl. Artificial Potential Field, keinotekoinen potentiaal kenttä
AUV	engl. Autonomous Underwater Vehicle, veden alla liikkuva mobiilirobotti
CD	engl. Cell Decomposition
DW	engl. Dynamic Window
FA	engl. Firefly Algorithm
GA	engl. Genetic Algorithm, geneettinen algoritmi
GPS	engl. Global Positioning System, satelliittipaikannusjärjestelmä
LMR	engl. Legged Mobile Robot, jaloilla liikkuva mobiilirobotti
PSO	engl. Particle Swarm Optimization
RA	engl. Roadmap Approach
UAV	engl. Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus
UGV	engl. Unmanned Ground Vehicle, maalla liikkuva mobiilirobotti
VFH	engl. Vector Field Histogram
WMR	engl. Wheeled Mobile Robot, renkailla liikkuva mobiilirobotti

# 1. JOHDANTO

Robottiikan ja automaation merkitys tekniikassa, teollisuudessa ja muilla aloilla on jo nyt suuri ja kasvaa jatkuvasti. Mobiilirobotiikka on yksi keskeisimpiä robotiikan osa-alueita ja se luo aivan uusia sovelluskohteita ja mahdollisuuksia verrattuna perinteisiin, paikallaan pysyviin robotteihin (Rubio et al. 2019). Erityisesti autonomisia mobiilirobotteja hyödynnetään laajasti eri aloilla, esimerkiksi teollisuudessa, sairaaloissa, varastoissa, maataloudessa ja kodin elektroniikassa. Lisäksi niitä voidaan käyttää äärimmäisissä olosuhteissa, esimerkiksi avaruuden tutkimisessa, kaivosteollisuudessa ja vaarallisilla tai saastuneilla alueilla. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 4–6; Fragapane et al. 2021)

Navigointi, ympäristön havainnoiminen ja esteiden välttäminen ovat mobiilirobotin toiminnan kannalta keskeisiä osa-alueita, sillä ne mahdollistavat mobiilirobotin turvallisen liikkumisen ympäristössään (Alatise & Hancke 2020). Muun muassa Rubio et al. (2019) ja Alatise & Hancke (2020) pitävät navigointikykyä tärkeimpänä osa-alueena mobiilirobotin suunnittelussa. Navigoinnin keskeisin tavoite on siirtyä lähtöpaikasta tavoitepaikkaan turvallista ja mahdollisimman lyhyttä reittiä pitkin. Jotta tämä onnistuu, on mobiilirobotin havaittava mahdolliset esteet erilaisten teknisten laitteiden avulla ja osattava reagoida niihin. (Gul et al. 2019)

Mobiilirobottien ja antureiden nopean kehityksen myötä erilaisia navigointitekologioita, ympäristön havainnoimiseen käytettäviä laitteita ja esteiden välttämiseen käytettäviä menetelmiä on paljon. Tämän työn tavoitteena on etsiä, kerätä ja analysoida mobiilirobottien navigointimenetelmiä, ympäristön havainnoimiseen käytettäviä teknisiä laitteita ja esteiden välttämiseen käytettäviä teknologioita kirjallisuuden pohjalta. Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- K1. Miten tai mitä teknologioita hyödyntäen mobiilirobotit navigoivat?
- K2. Millaisilla teknisillä laitteilla mobiilirobotit havainnoivat ympäristöään?
- K3. Miten mobiilirobotit pyrkivät välttämään esteitä?

Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuusselvitystä materiaalin keräämiseksi ja analysoimiseksi. Lähteitä etsitään ensisijaisesti Andor-hakupalvelulla ja lähteissä pyritään keskittymään vuosien 2015–2022 välillä julkaistuihin, vertaisarvioituihin lähteisiin.

Työssä keskitytään ensisijaisesti autonomisiin (engl. Autonomous Mobile Robot, AMR), maalla renkailla liikkuviin mobiilirobotteihin (engl. Wheeled Mobile Robot), joten esimerkiksi lentävät (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ja vedessä liikkuvat (engl. Autonomous Underwater Vehicles, AUV) sekä maalla jaloilla liikkuvat mobiilirobotit (engl. Legged Mobile Robot, LMR) rajataan käsittelyn ulkopuolelle. Lisäksi autonomisuus rajaa esimerkiksi kauko-ohjatut tai tiettyä, esimerkiksi teipeillä tai lattian alla olevilla johdoilla merkittyä reittiä seuraavat mobiilirobotit (engl. Automated Guided Vehicle, AGV) tarkastelun ulkopuolelle. Tämän työn laajuus ei riitä kaikkien navigointiteknologioiden yksityiskohtaiseen läpikäyntiin, joten tässä työssä esitellään tarkemmin vain neljä menetelmää ja mainitaan muita tärkeitä navigointitekologioita.

Tässä työssä kerrotaan ensin luvussa 2 mobiilirobottien määritelmä, rakenne, toimintaperiaate ja sovellukset. Nämä perusteet luovat pohjan muun työn ymmärtämiselle. Seuraavaksi siirrytään luvussa 3 käsiteltäviin navigointitekologioihin, jotka jaotellaan globaaleihin ja lokaaleihin teknologioihin. Luvussa 4 kerrotaan ympäristön havainnointiin käytettävistä antureista ja muista teknisistä laitteista ja luvussa 5 esteiden välttämiseen käytettävistä teknologioista. Luvussa 6 on pohdinta, jossa esitellään tärkeimmät tulokset, analysoidaan niitä ja esitellään muutamia jatkotutkimusideoita.

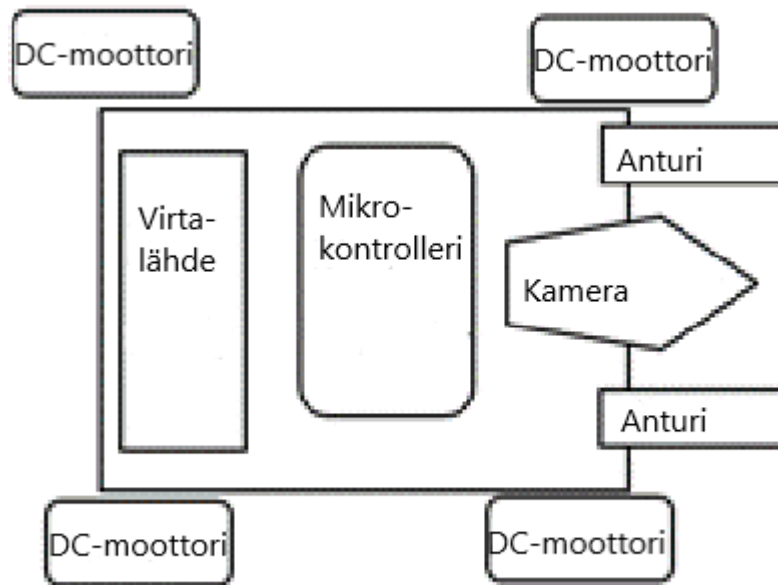
## 2. MOBIILIROBOTTI

Robotit voidaan jaotella paikallaan pysyviin (engl. fixed) robotteihin ja mobiilirobotteihin (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 2). ISO-standardin (ISO 19649 2017) mukaan mobiilirobotti on robotti, joka kykenee liikkumaan itsenäisesti. Mobiilirobotit voidaan edelleen jakaa autonomisiin ja ei-autonomisiin. Autonomiset mobiilirobotit kykenevät liikkumaan, tekemään päätöksiä ja suorittamaan tehtäviä itsenäisesti, kun taas monet ei-autonomiset mobiilirobotit ovat kauko-ohjattuja tai seuraavat tarkasti ennalta määrättyä reittiä. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 4–5)

Mobiilirobotit voidaan jakaa myös käyttöympäristön mukaan maalla liikkuviin (engl. Unmanned Ground Vehicle, UGV), lentäviin ja veden alla liikkuviin. Maalla liikkuvat mobiilirobotit voidaan jakaa edelleen renkailla liikkuviin ja jaloilla liikkuviin. (Tzafestas 2013, s. 1)

### 2.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Mobiilirobotin tärkeimpiä komponentteja ovat virtalähde, joka on yleensä tasavirtalähde, erilaiset anturit, toimilaitteet sekä ohjausjärjestelmä (Hu et al. 2021). Esimerkki nelirenkaisen mobiilirobotin rakenteesta on esitetty kuvassa 1. Kuvan mobiilirobotissa jokaista rengasta pyörittää tasavirtamoottori, joka on tasavirralla toimiva sähkömoottori (Razak et al. 2017). Lisäksi kuvaan on merkitty ympäristön havainnointiin käytettävät laitteet, eli tässä tapauksessa kaksi anturia ja kamera, sekä virtalähde ja mikrokontrolleri. Mikrokontrolleri on mikropiiri, jossa on mikroprosessori. Mikrokontrolleri vastaa robotin liikkeen hallinnasta ja päätöksenteosta. (Razak et al. 2017) Mobiilirobotin tarkka rakenne on hyvin sovelluskohtaista.



**Kuva 1.** Esimerkki nelirenkaisen mobiilirobotin rakenteesta (mukaillen lähdettä Razak et al. 2017, s.191).

Tärkeimmät osa-alueet mobiilirobotin toiminnan mahdollistamiseksi ovat liikkuminen, havainnointi, ohjausjärjestelmä ja älykkyys (engl. cognition) sekä navigointi (Rubio et al. 2019). Lisäksi paikannus on merkittävä osa mobiilirobotin toimintaa (Alatise & Hancke 2020). Näiden osa-alueiden sujuva yhteistoiminta on keskeistä, jotta mobiilirobotti kykenee suorittamaan tehtävänsä (Rubio et al. 2019; Alatise & Hancke 2020).

Ympäristö vaikuttaa suuresti mobiilirobotin liikkumiseen: sovelluskohteesta riippuen mobiilirobotti voi liikkua maalla, vedessä tai ilmassa. Lisäksi maalla liikkuesssa pinnan muodot ja tasaisuus vaikuttavat etenemiseen. Maalla kulkevat mobiilirobotit voivat käyttää liikkumiseen esimerkiksi renkaita, jalkoja tai teloja. (Rubio et al. 2019) Tässä työssä keskitytään maalla renkailla liikkuviin mobiilirobotteihin.

Havainnointi on mobiilirobotin toiminnan kannalta välttämätöntä. Havainnoinnissa voidaan hyödyntää esimerkiksi erilaisia antureita ja kameroita. (Harapanahalli et al. 2019) Näiden laitteiden avulla mobiilirobotti kykenee paikoittamaan itsensä sekä saamaan tietoa ympäristöstä ja mahdollisista esteistä. Näitä tietoja voidaan hyödyntää esimerkiksi kartan muodostuksessa, esteiden välttämässä ja lokaalissa navigoinnissa. (Alatise & Hancke 2020) Lokaali navigointi tarkoittaa ilman ennakkotietoa ympäristöstä tapahtuvaa navigointia (Patle et al. 2019). Havainnoinnissa yleisesti käytettäviä antureita ovat esimerkiksi infrapuna-, ultraääni- ja laseranturit (Wang et al. 2021). Havainnoinnissa käytettäviin teknisiin laitteisiin perehdytään tarkemmin luvussa 4.



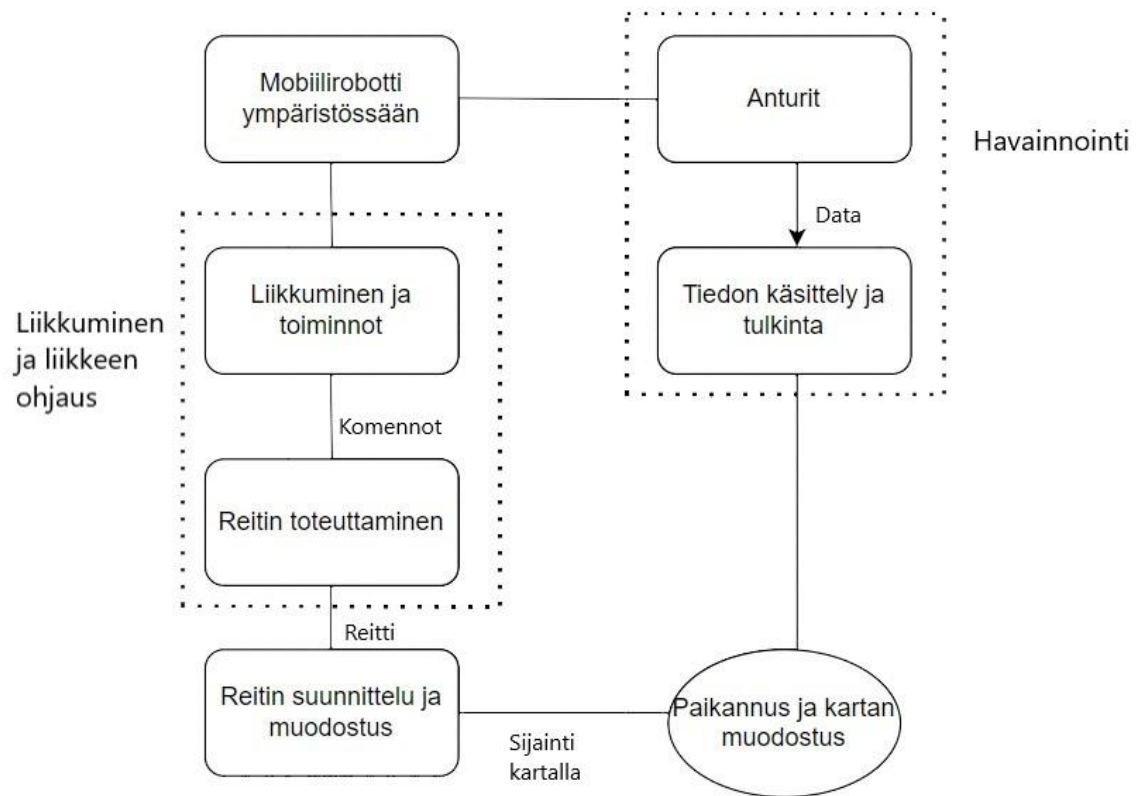
Kartan muodostuksessa voidaan hyödyntää esimerkiksi kameroita ja antureita, joiden avulla esteet tunnistetaan ja paikoitetaan. Kartta muodostetaan ja esitetään usein kaksiulotteisena ruudukkona tai matriisina. Kolmiulotteinen kartta taas voidaan muodostaa esimerkiksi pistepilvenä. (Pershina et al. 2019)

Ohjausjärjestelmän pääkomponentti on yleensä mikroprosessori tai sulautettu mikroprosessori (Gopalakrishnan et al. 2004). Ohjausjärjestelmä ohjaa robotin toimintaa. Se vastaanottaa tietoa ympäristöstä ja robotin suhteesta ympäristöön antureilta ja muilta havainnointiin käytettäviltä laitteilta, prosessori vastaanottaa tietoa ja lähettää tarvittavat komennot toimilaitteille. Lisäksi ohjausjärjestelmä ja robotin älykkyyks vastavat reitin ja liikkumisen suunnittelusta sekä päätöksenteosta, jotta mobiilirobotti saavuttaa kohteensa tai tavoitteensa. (Rubio et al. 2019)

Paikannuksen tavoitteena on selvittää sekä robotin absoluuttinen sijainti että suhteellinen sijainti, eli robotin paikka suhteessa tavoitepaikkaan ja mahdollisiin esteisiin (Rubio et al. 2019). Paikannusmenetelmät voidaan jakaa relatiivisiin ja absoluuttisiin menetelmiin. Relatiiviset menetelmät hyödyntävät esimerkiksi asema-antureilta saatua tietoa robotin liikkumisnopeudesta ja -suunnasta. (Alatise & Hancke 2020) Kun näitä tietoja saadaan useita ja ne lasketaan yhteen, voidaan muodostaa arvio robotin sijainnista alkupaikkaan nähden. Näiden menetelmien ongelmana on, että sijainnin arviointiin liittyvät mittausvirheet kertyvät, minkä vuoksi nämä menetelmät soveltuvat vain lyhyille matkoille. (Tzafestas 2018; Alatise & Hancke 2020) Absoluuttisiin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi GPS (engl. Global Positioning System) ja muut satelliittipaikannusjärjestelmät (Alatise & Hancke 2020). GPS-järjestelmän etu on, että se on halpa ja helppo liittää mobiilirobottiin. Toisaalta se on moniin sovelluksiin liian epätarkka eikä se sovellu esimerkiksi varastoihin, tehtaisiin tai muihin sisätiloihin. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 131)

Navigoinnin keskeisin tavoite on siirtyä lähtöpisteestä tavoitepaikkaan turvallista ja mahdollisimman lyhyttä reittiä pitkin (Gul et al. 2019). Rubio et al. (2019) mukaan navigointi koostuu kolmesta osa-alueesta, jotka ovat kartan muodostus ympäristöstä, turvallisen reitin suunnittelu ja muodostus sekä reitin seuraaminen törmäyksiä välttäen. Lisäksi paikannus on keskeinen osa navigointia, sillä robotin on tiedettävä oma sijaintinsa, jotta se kykenee muodostamaan reitin ja seuraamaan sitä (Tzafestas 2018).

Kuvassa 2 on esitetty mobiilirobotin navigointia kuvaava lohkokaavio, josta huomataan, että mobiilirobotti käyttää navigoinnissaan hyödykseen muita osa-alueita. Havainnoinnin avulla robotti saa tarvittavaa tietoa ympäristöstä ja mahdollisista esteistä, paikannuksen avulla robotti tietää oman sijaintinsa kartalla ja ohjausjärjestelmä vastaa kartan muodostuksesta, reitin suunnittelusta ja päätöksenteosta (Rubio et al. 2019).



**Kuva 2.** Mobiilirobotin navigointia kuvaava lohkokkaavio (mukaillen lähdettä Patle et al. 2019, s. 583).

Kuvassa 2 havainnointi on jaettu antureihin sekä niiden tuottaman tiedon käsittelyyn ja tulkintaan. Tuota tietoa voidaan hyödyntää paikannuksessa ja kartan muodostuksessa ympäristöstä. Kun robotti on muodostanut kartan ympäristöstään ja tietää sijaintinsa paikannuksen avulla, on vuorossa reitin suunnittelu ja muodostus, jossa robotti pyrkii löytämään turvallisen ja mahdollisimman lyhyen reitin lähtöpaikasta tavoitepaikkaan. Kun reitti on muodostettu, siirrytään liikkeen säätöön. Reitin toteuttamiseksi toimilaitteille annetaan tarvittavat komennot, jotka nämä toteuttavat. (Patle et al. 2019) Mobiilirobottien navigointiteknologioihin perehdytään tarkemmin luvussa 3.

## 2.2 Sovellukset

Mobiilirobotteja hyödynnetään laajasti eri aloilla, esimerkiksi teollisuudessa, varastoissa, maataloudessa ja kodin elektroniikassa. Lisäksi mobiilirobotteja voidaan käyttää äärimmäisissä olosuhteissa, esimerkiksi avaruuden tutkimisessa ja vaarallisilla tai saastuneilla alueilla. (Rubio et al. 2019; Alatis & Hancke 2020) Tunnetuimpia mobiilirobottien sovel-

luksia ovat esimerkiksi robotti-imurit ja -ruohonleikkurit. Lisäksi esimerkiksi Mars-mönkijät ja itseohjautuvat autot ovat saaneet paljon huomiota viime vuosina. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 4–6)

Automaation ja mobiilirobottien merkitys on kasvanut teollisuudessa viime vuosikymmeninä ja tulee todennäköisesti kasvamaan myös tulevaisuudessa (Harapanahalli et al. 2019). Teollisuudessa mobiilirobotteja käytetään erityisesti materiaalin käsittelyyn ja kuljetukseen sekä varastosta tuotantolinjalle että eri työpisteiden välillä. Mobiilirobottien avulla voidaan parantaa tuotannon joustavuutta ja tuottavuutta sekä vähentää kuluja. Näin myös pienempiä eräkokoja pystytään tuottamaan kannattavammin. (Fragapane et al. 2020)

Mobiilimanipulaattori (engl. mobile manipulator) on eräänlainen mobiilirobotin ja perinteisen teollisuusrobotin yhdistelmä, jossa mobiilialustalle (engl. mobile platform) on yhdistetty esimerkiksi robottikäsi. Näin mobiilirobotin sovelluskohteita voidaan laajentaa. (Outón et al. 2019) Merkittäviä teollisuudessa käytettävien mobiilirobottien valmistajia ovat muun muassa MiR, KUKA ja Omron (Logistics IQ 2022). Kuvassa 3 on esimerkki Omronin valmistamasta mobiilirobotista, jota voidaan käyttää painavien kuormien kuljettamiseen ja siten esimerkiksi trukin korvaamiseen (Omron 2022).



**Kuva 3.** Esimerkkinä teollisuudessa käytettävästä mobiilirobotista Omronin HD-1500 (Omron 2022).

Mobiilirobotteja voidaan hyödyntää myös esimerkiksi sairaaloissa. Siellä mobiilirobotteja käytetään esimerkiksi lääkkeiden ja tavaroiden kuljettamiseen sekä tilojen desinfioimiseen. (Fragapane et al. 2021) Muun muassa ABB ja Aethon valmistavat sairaaloissa käytettäviä mobiilirobotteja (Logistics IQ 2022).

Mobiilirobottien käyttö maataloudessa on myös lisääntynyt viime vuosina. Tässä sovelluskohteessa kasvien tunnistus sekä kartan muodostus ja navigointi suurilla pelloilla ovat keskeisiä haasteita. (Emmi et al. 2021) Esimerkiksi AIS ja Robotnik valmistavat maataloudessa käytettäviä mobiilirobotteja (Logistics IQ 2022).

### 3. MOBIILIROBOTTIEN NAVIGOINTITEKNOLOGIAT

Tässä luvussa kerrotaan mobiilirobottien navigointitekniologioista, eli eri tekniologioista, joilla mobiilirobotit pyrkivät navigoimaan, määrittämään optimaalisen reitin alku- ja tavoitepaikan välillä ja seuraamaan sitä esteitä välttämällä (Patle et al. 2019). Alaluvussa 3.1 keskitytään globaaleihin navigointitekniologioihin ja alaluvussa 3.2 lokaaleihin navigointitekniologioihin. Navigoinnin osa-alueet ja perusteet kerrottiin luvussa 2 toimintaperiaatteen yhteydessä.

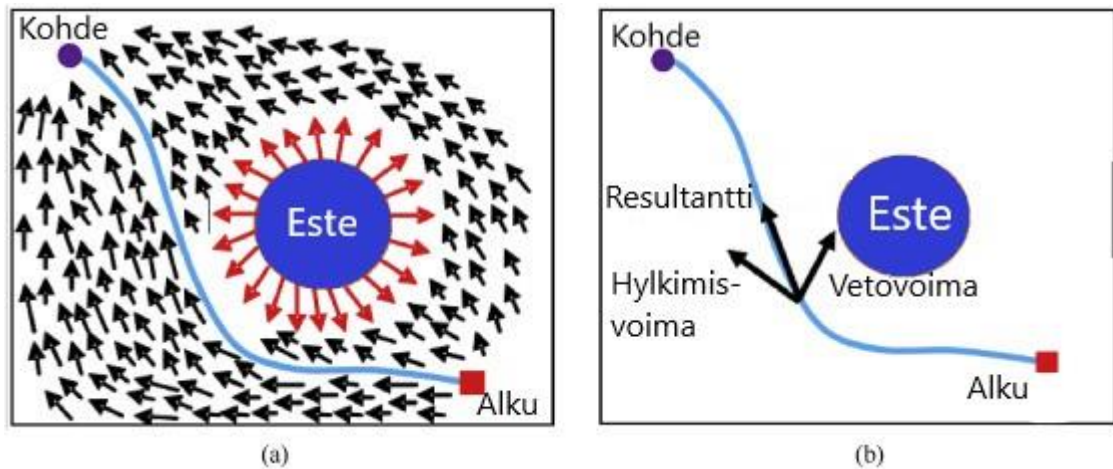
Navigointitekniologioita luokitellaan lähteestä riippuen hieman eri tavoin. Yksi yleinen tapa on jaotella tekniologiat globaaleihin ja lokaaleihin menetelmiin sen mukaan, tarvitsevatko ne ennakkotietoa ympäristöstään (Zafar & Mohanta 2018; Gul et al. 2019; Patle et al. 2019), ja tätä tapaa käytetään myös tässä työssä. Toisaalta esimerkiksi Patle et al. (2019) jakavat tämän lisäksi tekniologiat klassisiin ja reaktiivisiin, kun taas Gul et al. (2019) ja Pandey et al. (2017) jakavat ne evolutiivisiin, deterministisiin ja ei-deterministisiin. Klassiset menetelmät ovat vanhempia kuin reaktiiviset, eivätkä ne kykene reagoimaan ympäristössä tapahtuviin muutoksiin. Reaktiiviset menetelmät taas soveltuvat reaaliaikaisiin sovelluksiin ja kykenevät reagoimaan muuttuvaan ympäristöön. (Patle et al. 2019) Deterministisyys viittaa siihen, että sama syöte tuottaa aina saman tuloksen (ISO/IEC 18031 2011). Evolutiiviset menetelmät ovat determinististen ja ei-determinististen menetelmien yhdistelmiä (Pandey et al. 2017).

#### 3.1 Globaalit navigointitekniologiat

Globaalissa navigoinnissa mobiilirobotti tarvitsee aikaisempaa tietoa ympäristöstään, esimerkiksi mahdollisten esteiden sijainnista ja tavoitepaikasta. Siksi globaalit navigointitekniologiat soveltuvat ensisijaisesti täysin tunnettuun ympäristöön, jossa on vain paikallaan olevia esteitä. (Patle et al. 2019) Globaalissa navigoinnissa keskeistä on paikannus, kartan muodostus sekä turvallisen reitin suunnittelu (Ruan et al. 2021).

Eräs yleisesti käytetty globaali navigointitekniologia on keinotekoinen potentiaalitenttä (engl. Artificial Potential Field, APF). Tässä menetelmässä robotin ympäristö ajatellaan potentiaalitenttänä, jossa esteiden ja robotin välillä vaikuttaa kuvitteellinen hylkimisvoima, joka on kääntäen verrannollinen etäisyyteen nähdessä. Vastaavasti tavoitepaikka kohdistaa robottiin puoleensavetävän voiman. (Gul et al. 2019) Esimerkki APF:n toimintaperiaatteesta on esitetty kuvassa 4. Kuvan 4 osassa a näkyvät alku- ja tavoitepaikka

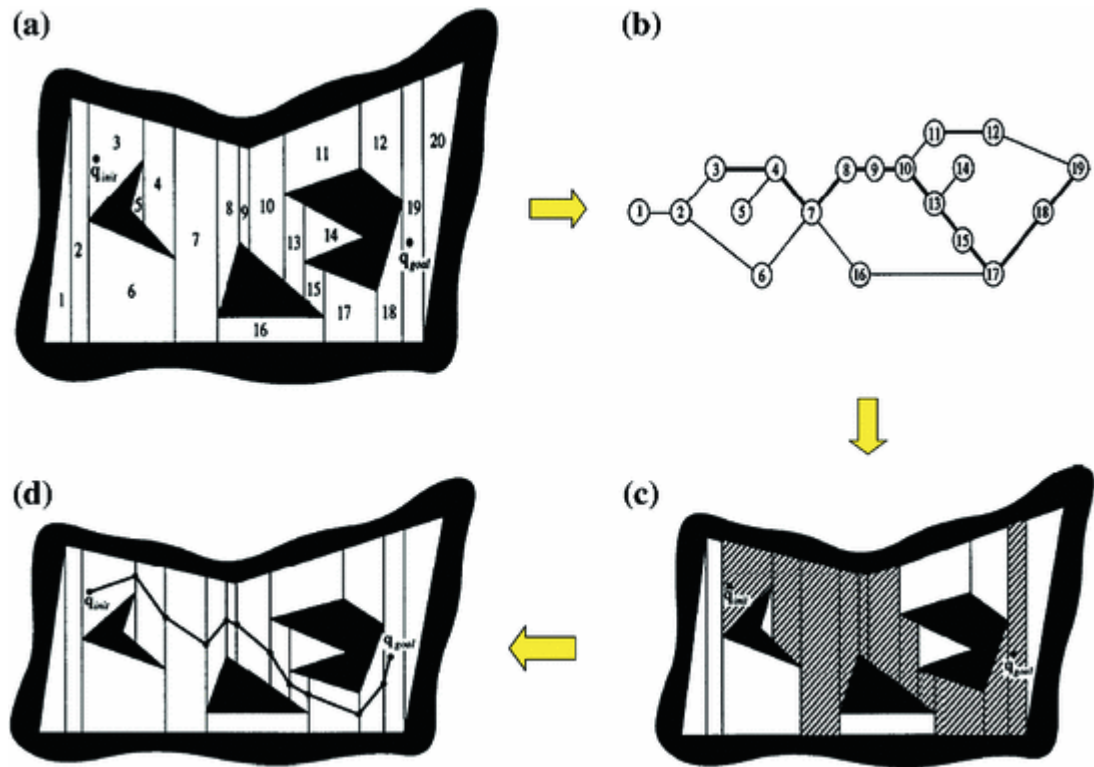
sekä nuolilla esitetyt esteen aiheuttama hylkimisvoima ja kohteen aiheuttama puoleen-savetävä voima. Osaan b nämä voimat on merkitty hylkimis-, veto- ja resultanttivoima-vektoreina.



**Kuva 4.** Esimerkki APF-menetelmän toimintaperiaatteesta (mukailen lähde Patle et al. 2019, s. 586).

Yksi keskeinen APF-tekniikan haaste liittyy lokaaliin minimiin (Patle et al. 2019). Se tarkoittaa tilannetta, jossa robotti päätyy pisteeseen, jossa hylkivä ja puoleensa vetävä voima tai kenttä kumoavat toistensa vaikutuksen. Tällöin robotti jää paikalleen. (Gul et al. 2019)

Toinen yleisesti käytetty tekniikka on CD (Cell Decomposition) -menetelmä. Tässä menetelmässä robotin ympäristö jaetaan vapaisiin ja täytettyihin alueisiin sen mukaan, onko kyseisellä alueella esteitä (Zafar & Mohanta 2018). Tyhjiä alueita voidaan käyttää reittinä ja täytetyt alueet jaetaan edelleen pienemmiksi alueiksi, joista jälleen tyhjiä alueita voidaan hyödyntää reitillä (Patle et al. 2019). Lopulta lähtöpisteen ja tavoitepisteen yhdistävät tyhjät alueet kootaan graafiksi, josta reitti voidaan ratkaista graafialgoritmeilla (Gasparetto et al. 2015). Kuvassa 5 on esitetty esimerkki CD-menetelmän toiminnasta: ensin alue jaetaan numeroiduiksi monikulmioiksi ja tämän pohjalta luodaan graafi, josta saadaan ylitettävät alueet ja lopulta reitti.



**Kuva 5.** Esimerkki CD-menetelmän toiminnasta (mukailen lähdettä Gasparetto et al. 2015, s. 10).

Erilaiset CD-menetelmät voidaan jaotella vielä esimerkiksi likimääräisiin ja eksakteihin menetelmiin. Näistä eksaktia menetelmää käytetään silloin, kun vapaan tilan ja esteiden rajat tiedetään tarkalleen. Vastaavasti likimääräistä menetelmää käytetään silloin, kun vapaata tilaa ei pystytä tarkalleen laskemaan. (Gasparetto et al. 2015)

Muita yleisesti käytettyjä globaaleja teknologioita ovat esimerkiksi RA (Roadmap Approach) -menetelmä ja  $A^*$ -algoritmi (Gul et al. 2019; Patle et al. 2019). Lisäksi näistä on kehitetty erilaisia yhdistelmiä (Glavaski et al. 2009). Näitä menetelmiä ei tarkastella tässä työssä tarkemmin, mutta ne ovat kuitenkin merkittäviä globaaleja teknologioita.

Kuten jo aiemmin mainittiin, globaalit menetelmät tarvitsevat aiempaa tietoa ympäristöstään ja soveltuvat ensisijaisesti täysin tunnettuun ympäristöön. Muita näihin menetelmiin liittyviä ongelmia ovat laskennallinen vaativuus ja se, että ne eivät kykene reagoimaan ympäristön epävarmuuteen tai dynaamisiin muutoksiin, kuten liikkuviin esteisiin (Patle et al. 2019). Näiden ongelmien vuoksi nykyään käytetään paljon lokaaleja navigointitekno- logioita, joista kerrotaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa 3.2.

### 3.2 Lokaalit navigointitekniologiat

Lokaalissa navigoinnissa mobiilirobotti ei tarvitse ennakkotietoa ympäristöstään, joten lokaalit navigointitekniologiat soveltuvat tuntemattomaan tai osittain tunnettuun ympäristöön. Ne hyödyntävät usein tekoälyä, ovat tavallisesti älykkäämpiä menetelmiä kuin globaalit ja kykenevät toteuttamaan reitin autonomisesti. (Patle et al. 2019) Lokaalissa navigoinnissa hyödynnetään usein erilaisia antureita, joiden avulla saadaan tietoa muun muassa robotin sijainnista ja etenemissuunnasta (Gul et al. 2019). Ympäristön havainnointiin käytettävistä antureista ja muista teknisistä laitteista kerrotaan tarkemmin luvussa 4.

Yksi lokaalissa navigoinnissa laajasti hyödynnetty menetelmä on geneettinen algoritmi (engl. Genetic Algorithm, GA). Se on optimointityökalu, jonka toimintaperiaate pohjautuu genetiikkaan ja luonnonvalintaan (Zafar & Mohanta 2018; Gul et al. 2019; Patle et al. 2019). Algoritmi valitsee mahdollisten ratkaisujen, eli tässä tapauksessa mahdollisten reittien, joukosta sattumanvaraisesti populaation (Tometzki & Engell 2011), jonka alkioille lasketaan niiden soveltuvuutta kuvaava luku (engl. fitness value) (Nelson et al. 2009). Näistä soveltuvimmat muodostavat uuden populaation. Populaatiossa tapahtuu risteytystä ja mutaatioita, kun alkioiden dataa yhdistetään ja muokataan (Lamini et al. 2018). Näitä vaiheita toistetaan iteratiivisesti, kunnes optimaalinen ratkaisu löytyy tai ratkaisu ei enää muutu merkittävästi (Gul et al. 2019). Geneettisen algoritmin pseudokoodi on esitetty kuvassa 6, josta huomataan mainitut algoritmin vaiheet. Tämän algoritmin heikkouksia ovat muun muassa epävarmuus optimaalisen ratkaisun löytämisessä ja prosessin hitaus (Patle et al. 2019).

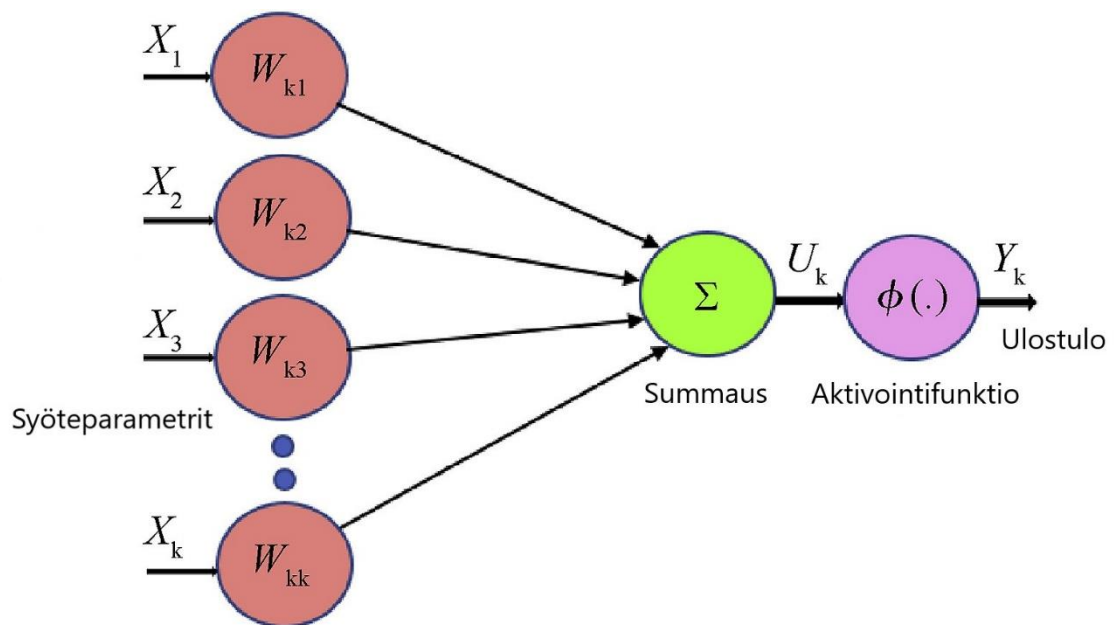
```

INITIALIZE
Generate the initials population
Compute fitness equation
Repeat
  Selection
  Crossover
  Mutation
Compete fitness
UNTIL population has converged to
optimal solution
Stop

```

**Kuva 6.** Geneettisen algoritmin pseudokoodi (Gul et al. 2019, s. 14).

Myös neuroverkkoja (engl. Neural Network) hyödynnetään lokaalissa navigoinnissa. Niiden toimintaperiaate jäljittelee aivojen toimintaa (Sleaman & Yavuz 2020). Neuroverkko rakentuu yksinkertaisista, toisiinsa liitetyistä keinotekoisista neuroneista, jotka prosessoivat dataa. Kyky hajautettuun prosessointiin, monimutkaisten ja epälineaaristen suhteiden mallintamiseen, oppimiseen ja yleistämiseen sekä virheiden sietokyky ovat neuroverkkojen selkeitä vahvuuksia. (Gul et al. 2019; Patle et al. 2019) Yksi heikkouksista on, että aina optimaalista reittiä ei kyetä löytämään (Zafar & Mohanta 2018). Yksinkertaistettu esimerkki neuroverkon toimintaperiaatteesta on esitetty kuvassa 7, josta nähdään, että laskenta tai päätöksenteko jaetaan pienempiin kokonaisuuksiin, jotka sitten yhdistetään. Neuroverkkoja hyödynnetään usein yhdessä muiden teknologioiden, esimerkiksi geneettisen algoritmin, kanssa. Näin saadaan yhdistettyä eri menetelmien vahvuuksia ja eliminoitua heikkouksia. (Gul et al. 2019; Patle et al. 2019)



**Kuva 7.** Neuroverkon rakenne ja toimintaperiaate (mukaillen lähdettä Patle et al. 2019, s. 589).

Muita lokaaleja menetelmiä ovat muun muassa sumea logiikka (engl. Fuzzy Logic, FL) sekä erilaiset luontoon pohjautuvat menetelmät, kuten ACO (Ant Colony Optimization) -menetelmä, FA (Firefly algorithm) -algoritmi ja PSO (Particle Swarm Optimization) -menetelmä (Zafar & Mohanta 2018; Patle et al. 2019). Lisäksi näistä on kehitetty useita erilaisia yhdistelmiä, joissa on pyritty yhdistämään eri menetelmien vahvuuksia ja eliminoimaan heikkouksia (Gul et al. 2019; Patle et al. 2019).



## 4. YMPÄRISTÖN HAVAINNOIMINEN

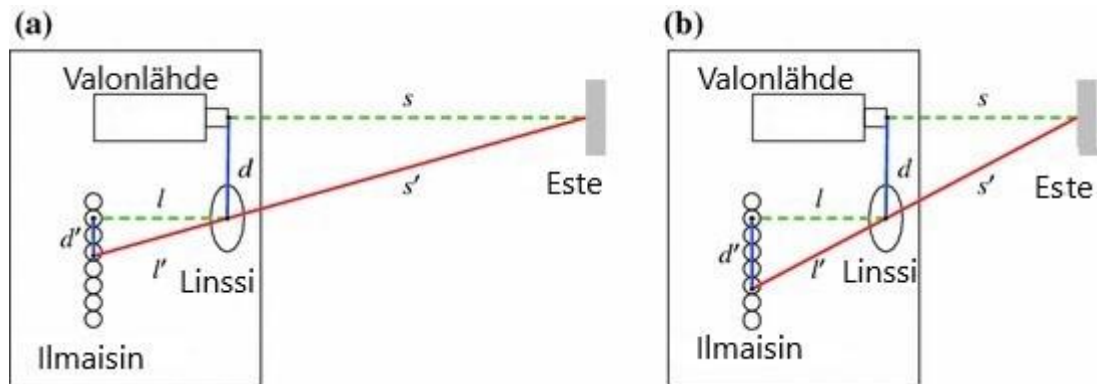
Mobiilirobotit hyödyntävät erilaisia antureita ja muita teknisiä laitteita saadakseen tietoa ympäristöstään ja omasta tilastaan (Payá et al. 2017). Anturit voidaan jakaa proprioseptiivisiin ja eksteroseptiivisiin antureihin. Proprioseptiiviset anturit mittaavat robotin sisäisiä muuttujia, esimerkiksi moottorin pyörimisnopeutta, kun taas eksteroseptiiviset mittaavat ulkoisia muuttujia, esimerkiksi robotin etäisyyttä esteeseen. (Rubio et al. 2019)

Erilaisia etäisyysantureita käytetään robotin ja esimerkiksi esteiden välisen etäisyyden mittaamiseen. Niiden toiminta perustuu monissa tapauksissa signaalin lähettämiseen ja esteestä heijastuneen signaalin vastaanottamiseen. Signaalin lähettämisen ja vastaanottamisen välinen aika voidaan mitata. Etäisyys saadaan kertomalla tämä aika signaalin nopeudella ja jakamalla tulos kahdella, sillä signaali kulkee kyseisen etäisyyden suuruisen matkan kahteen kertaan. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 22)

Ultraäänianturi on etäisyysanturi, jonka toiminta perustuu ultraäänen lähettämiseen ja vastaanottamiseen (Wang et al. 2021). Ultraääniantureiden etu on, että esteiden väri, valon heijastuskyky tai ympäristön valon määrä eivät häiritse anturin toimintaa (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 23). Lisäksi ne ovat halpoja verrattuna esimerkiksi laser-antureihin (Wang et al. 2021). Toisaalta etäisyyden mittaaminen ultraäänianturilla on hidasta verrattuna valoa käyttäviin antureihin, sillä äänen nopeus on huomattavasti pienempi kuin valon. Niitä ei pysty myöskään kohdistamaan tiettyyn kohteeseen. Lisäksi erilaiset pinnat absorboivat ja heijastavat ääniaaltoja eri tavoin, mikä voi aiheuttaa virhettä mittaustulokseen. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 23–24)

Infrapuna-anturia käytettäessä etäisyys voidaan laskea eri tavoin (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 24; Wang et al. 2021). Yksi tapa perustuu infrapunavalon intensiteetin mittaamiseen, sillä valon intensiteetti pienenee neliöllisesti etäisyyteen nähden. Tämä tapa on kuitenkin hyvin epätarkka, sillä intensiteetti riippuu myös kohteen heijastuskyvystä. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 24) Toinen tapa perustuu infrapunavalon heijastamiseen kohteesta ja trigonometriaan (Wang et al. 2021). Kuvassa 8 osassa a on esitetty infrapunavalon heijastuminen kaukana olevasta kohteesta ja osassa b lähellä olevasta kohteesta. Kun tiedetään, että kuvassa esitetyt valonlähteen ja ilmaisimen etäisyydet linsistä ( $d$  ja  $l$ ) pysyvät vakioina ja muut kuvaan merkityt pituudet riippuvat esteen etäisyydestä, saadaan etäisyys ratkaistua yhdenmuotoisten kolmioiden kautta. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 26–27) Infrapuna-antureiden hyvä puoli on esimerkiksi se, ettei näkyvä valo häiritse mittausta. Lisäksi ne ovat halvempia kuin laser-anturit. Toisaalta esimerkiksi

havainnoitavan kohteen väri vaikuttaa suuresti mittauksen tarkkuuteen. (Wang et al. 2021)



**Kuva 8.** Yksi tapa etäisyyden määrittämiseen infrapuna-anturia käytettäessä (mukaillen lähdeä Ben-Ari & Mondada 2018, s. 26).

Myös laser-antureita käytetään etäisyyksien määrittämiseen. Laser-valo on koherenttia, eli siinä valon muodostavat aallot ovat samalla taajuudella ja samassa vaiheessa (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 25). Myös laser-antureissa etäisyyden määrittäminen perustuu lähetetyn signaalin ja heijastuneen signaalin väliseen aikaeroon (Paya et al. 2017). Laser-antureilla pystytään mittaamaan pitkiäkin etäisyyksiä. Lisäksi ne pystytään kohdistamaan tarkasti tiettyyn kohteeseen, joten niiden mittaustarkkuus on hyvä. (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 24; Wang et al. 2021). Toisaalta ne ovat kalliimpia kuin ultraääni- ja infrapuna-anturit (Wang et al. 2021).

Ympäristön havainnointiin käytetään myös kameroita. Kameroiden avulla ympäristöstä saadaan paljon tietoa 3D-muodossa. Lisäksi kamerat ovat yleensä halvempia ja kuluttavat vähemmän energiaa kuin esimerkiksi laser-anturit. (Payá et al. 2017) Käyttämällä kahta kameraa samanaikaisesti (engl. binocular vision), voidaan etäisyyksiä määrittää vertaamalla kameroiden kuvia keskenään. Yhtä kameraa käytettäessä (engl. monocular vision), verrataan kuvaa esimerkiksi robotin tietokannassa valmiina oleviin kuviin. (Wang et al. 2021) Kameroiden käyttämisessä haasteena on, että kuvien käsittely ja esimerkiksi esteiden tunnistus kuvista vaatii monimutkaisia algoritmeja ja on haastavaa (Ben-Ari & Mondada 2018, s. 31).

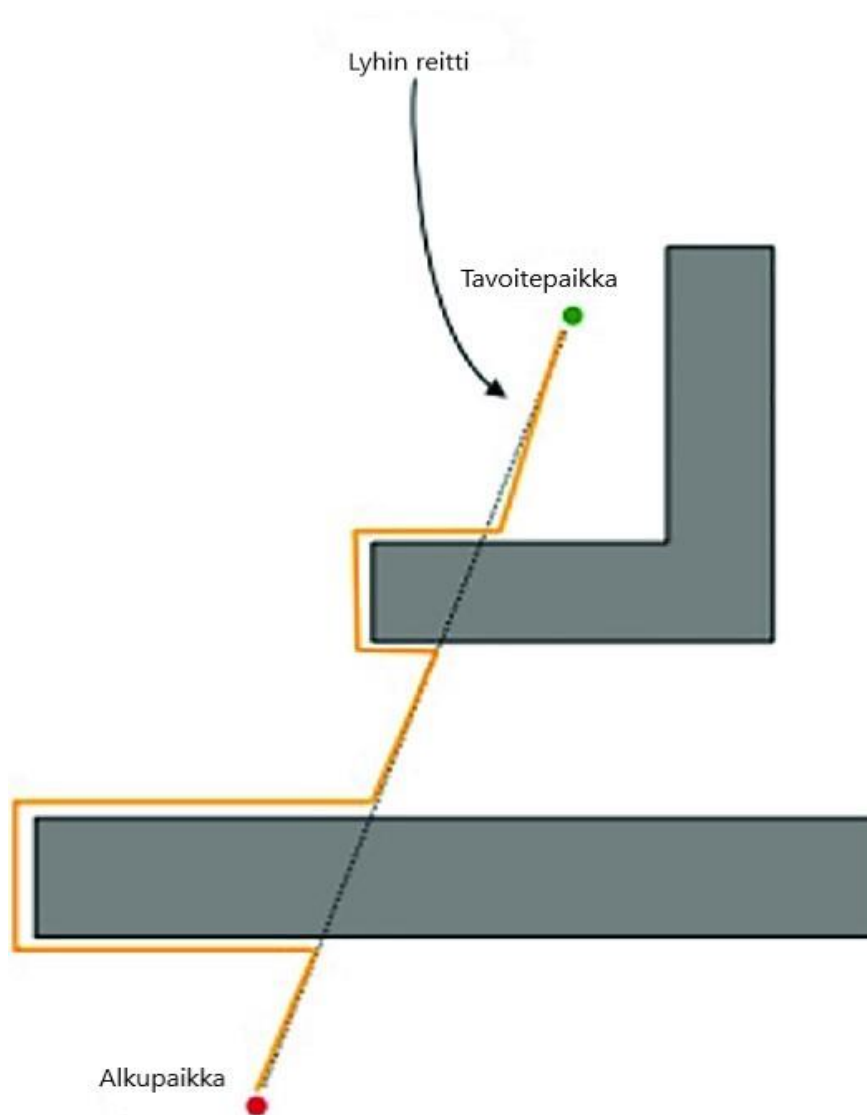
## 5. ESTEIDEN VÄLTÄMINEN

Tässä luvussa kerrotaan eri teknologioista, joiden avulla mobiilirobotit pyrkivät välttämään esteitä. Esteiden välttäminen (engl. obstacle avoidance) on mobiilirobotin toiminnan, navigoinnin ja liikkumisen kannalta keskeistä (Rubio et al. 2019). Erityisen tärkeää tämä on silloin, kun mobiilirobotti toimii samassa tilassa ihmisten kanssa (Wang et al. 2021).

Prosessi, jolla esteitä pyritään välttämään, voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen. Ensimmäinen näistä on ympäristön havainnoiminen, jossa pyritään havaitsemaan mahdolliset esteet erilaisten antureiden avulla. Toinen osa-alue on päätöksenteko, jossa laskeetaan törmäyksen todennäköisyys tai se, törmäkö robotti esteeseen. Lisäksi tähän kuuluu yleensä tietty turvaetäisyys, jota lähempänä estettä oltaessa esteen välttämismekanismi käynnistyy. Kolmas osa-alue on varsinainen esteen välttäminen, eli se, miten robotti reagoi esteeseen. (Wang et al. 2021) Yksinkertaisimmillaan mobiilirobotti pysähtyy välittömästi havaittuaan esteen, välttäen näin mahdollisen törmäyksen. Käytännössä mobiilirobotti pyrkii kuitenkin löytämään reitin ja tavan ohittaa este. (Montgomery 2015, s. 5–6)

Yksinkertainen tapa, jolla mobiilirobotti voi ohittaa esteen, on seuraamalla sen reunaa (engl. wall following). Tässä menetelmässä mobiilirobotti voi esimerkiksi liikkua siten, että esteen reuna on aina robotin oikealla puolella. Jos este on edessä, robotti kääntyy vasemmalle. Jos taas este on oikealla, robotti jatkaa liikettään eteenpäin. Jotta tämä menetelmä toimii oikein esimerkiksi G:n muotoisen esteen tai useamman esteen tapauksessa, tarvitsee robotti tietoa tavoitepaikan sijainnista ja omasta etenemissuunnastaan sekä tavan havaita tavoitepaikka silloin, kun sen edessä ei ole esteitä. (Ben-Ari & Mondada 2018, s.112–116)

Erilaisten virhealgoritmien (engl. Bug Algorithms) toimintaperiaate on samantapainen kuin wall following -menetelmässä. Niissä robotti kulkee kohti tavoitepaikkaa ja jos se kohtaa esteen, se liikkuu esteen rajaa myöden, kunnes se pääsee jälleen jatkamaan kohti päämäärää. Näissä menetelmissä robotti ajatellaan pistemäisenä ja sen on tärkeää tietää alku- ja loppupiste. Kehittyneemmissä versioissa algoritmi ylläpitää tietoa lyhimästä reitistä alku- ja loppupisteen välillä. (Ng & Ahmad 2019) Esimerkki tästä menetelmästä on esitetty kuvassa 9, johon on merkitty alku- ja tavoitepaikat sekä lyhin reitti näiden välillä. Lisäksi kuvaan on piirretty oranssilla viivalla mobiilirobotin reitti, jota kulke-  
malla se väistää esteet ja etenee alkupaikasta tavoitepaikkaan.

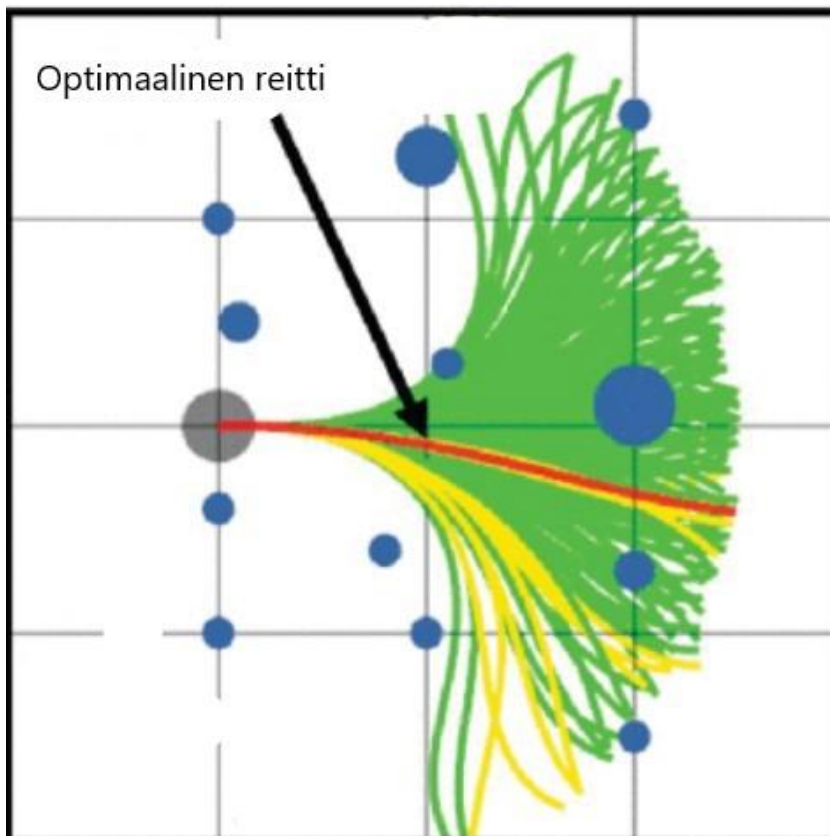


**Kuva 9.** Esimerkki virhealgoritmin toiminnasta (mukaillen lähdeettä Ng & Ahmad 2019, s. 1237).

Myös VFH (Vector Field Histogram) -menetelmää käytetään yleisesti esteiden välttämiseksi (Gul et al. 2019; Rubio et al. 2019). Tässä menetelmässä robotin ympäristö kuvataan ruudukkona, jonka eri ruuduilla on eri määrä esteitä. Robotti pyrkii kulkemaan suuntaan, jossa esteitä on vähemmän, ja ruudukkoa päivitetään antureilta saadun datan mukaisesti. VFH-menetelmä ei tarvitse valmista karttaa ympäristöstään, vaan sen toiminta perustuu antureilta saatuun tietoon. (Rubio et al. 2019)

DW (Dynamic Window) -menetelmän toimintaperiaate voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa mobiilirobotin ympäristöstä rajataan alue ja ne reitit, joihin robotin on sen kiihtyvyyden ja nopeuden perusteella mahdollista edetä valitussa lyhyessä ajassa. Mobiilirobotin nopeus oletetaan lyhyellä aikavälillä vakioiksi ja reitti approksimoidaan kaarien avulla. Nämä kaaret muodostetaan robotin etenemis- ja kulmanopeuden perusteella. Reittivaihtoehdoista karsitaan pois myös ne, joita seuraamalla

robotti törmäisi esteeseen. (Kobayashi & Motoi 2022) Toinen vaihe on reitin optimointi, jonka tavoitteena on valita paras mahdollinen reitti vaihtoehdoista. Optimoinnissa käytetään yleisesti kolmea muuttujaa, jotka ovat suunta, etäisyys esteeseen ja nopeus. Suunnan perusteella paras vaihtoehto on mahdollisimman suoraan kohti tavoitepaikkaa kulkeva reitti. Etäisyys esteeseen taas vaikuttaa siten, että mitä lähempänä este on, sitä vahvemmin robotti pyrkii väistämään estettä. Lisäksi menetelmä pyrkii valitsemaan mahdollisimman nopean reitin. (Saranrittichai et al. 2013) Esimerkki DW-menetelmän toiminnasta on esitetty kuvassa 10, johon on merkitty vihreällä reitit, jotka johtavat törmäykseen, keltaisella reitit, jotka eivät johda törmäykseen ja punaisella optimaalinen reitti. Kuvasta huomataan myös, että ympäristöstä rajataan vain ne reitit, joihin robotin on sen kiihtyvyyden ja nopeuden perusteella mahdollista edetä valitussa lyhyessä ajassa.



**Kuva 10.** DW-menetelmän toimintaperiaate (mukaillen lähdettä Kobayashi & Motoi 2022, s. 17020).

Lisäksi joissain lähteissä, kuten (Wang et al. 2021) esteiden välttämiseen käytettävänä teknologioina mainitaan esimerkiksi GA- ja APF-algoritmit sekä neuroverkot ja sumea logiikka, jotka mainittiin jo luvussa 3 navigointitekniikoiden yhteydessä. Tämä johtuu

sekä teknologioiden monikäyttöisyydestä (Pandey et al. 2017; Gul et al. 2019) että navigointiteknologioihin ja esteiden välttämiseen liittyvien käsitteiden erilaisesta käytöstä eri lähteissä. Lisäksi esteidenvälttämisteknologioista on kehitetty erilaisia yhdistelmiä (Rubio et al. 2019; Wang et al. 2021).

## 6. POHDINTA

Tässä työssä kerrottiin ensin mobiilirobottien määritelmä, rakenne ja toimintaperiaate sekä sovellukset. Nämä perusteet loivat pohjan muun työn ymmärtämiselle. Seuraavaksi siirryttiin navigointitekologioihin, jotka jaoteltiin globaaleihin ja lokaaleihin teknologioihin. Luvussa 4 kerrottiin ympäristön havainnointiin käytettävistä antureista ja muista teknisistä laitteista ja luvussa 5 esteiden välttämiseen käytettävistä teknologioista.

Tämän työn tavoitteena oli etsiä, kerätä ja analysoida mobiilirobottien navigointitekologioita, ympäristön havainnointiin käytettäviä teknisiä laitteita ja esteiden välttämiseen käytettäviä menetelmiä kirjallisuuden pohjalta. Työn tutkimuskysymykset olivat:

K1. Miten tai mitä teknologioita hyödyntäen mobiilirobotit navigoivat?

K2. Millaisilla antureilla ja muilla teknisillä laitteilla mobiilirobotit havainnoivat ympäristöään?

K3. Miten mobiilirobotit pyrkivät välttämään esteitä?

Mobiilirobottien navigointi koostuu kolmesta osa-alueesta, jotka ovat kartan muodostus ympäristöstä, turvallisen reitin suunnittelu ja reitin seuraaminen törmäyksiä välttäen. Lisäksi paikannus on merkittävä osa navigointia. Kirjallisuuden pohjalta löydettiin useita navigointitekologioita, jotka jaettiin globaaleihin ja lokaaleihin menetelmiin. Tärkeimpiä globaaleja navigointitekologioita olivat keinotekoinen potentiaalitenttä, CD- ja RA-menetelmät sekä A\*-algoritmi. Näistä tarkemmin esiteltiin keinotekoinen potentiaalitenttä ja CD-menetelmä. Tärkeimpiä löydettyjä lokaaleja navigointitekologioita olivat geneettinen algoritmi, neuroverkot, ACO-, FA- ja PSO-algoritmit sekä sumea logiikka. Näistä tarkemmin esiteltiin geneettinen algoritmi ja neuroverkot.

Erilaisia ympäristön havainnointiin käytettäviä antureita ja muita teknisiä laitteita löydettiin myös runsaasti. Nämä painottuivat erityisesti etäisyysantureihin, joiden toiminta perustuu signaalin lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Näistä tarkemmin esiteltiin ultraääni-, infrapuna- ja laser-anturit. Muista teknisistä laitteista nostettiin esiin kamerat.

Prosessi, jolla esteitä pyritään välttämään, voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: ympäristön havainnoiminen, päätöksenteko ja varsinainen esteen välttäminen, eli se, miten robotti reagoi esteeseen. Erilaisia esteiden välttämiseen käytettäviä teknologioita löydettiin useita. Tärkeimpiä näistä olivat wall-following-, VFH- ja DW- menetelmät sekä erilaiset virhealgoritmit.

Tuloksista huomataan erilaisten navigointitekniikoiden, ympäristön havainnointiin käytettävien laitteiden ja esteiden välttämiseen käytettävien teknologioiden suuri määrä. Lisäksi tuloksista voidaan havaita navigointitekniikoiden kehitys, sillä lokaalit navigointitekniikat toimivat tuntemattomassa ympäristössä ja kykenevät reagoimaan ympäristössä tapahtuviin muutoksiin, toisin kuin globaalit menetelmät. Tässä kehityksessä esimerkiksi tietokoneiden laskentatehon kasvamisella ja tekoälyn kehityksellä on ollut suuri merkitys. Lisäksi esimerkiksi esteiden tunnistamiseen käytettävien teknologioiden ja kameroiden kehitys on lisännyt kameroiden käyttöä havainnoinnissa.

Työn tavoite saavutettiin varsin hyvin, sillä erilaisia navigointitekniikoita, ympäristön havainnointiin käytettäviä teknisiä laitteita ja esteiden välttämiseen käytettäviä teknologioita löydettiin runsaasti. Toisaalta aiheen laajuus ja teknisyys aiheuttivat omat haasteensa. Työssä keskityttiin ensisijaisesti autonomisiin, maalla renkailla liikkuviin mobiilirobotteihin, joten esimerkiksi lentävät ja vedessä liikkuvat mobiilirobotit rajattiin käsittelyn ulkopuolelle. Lisäksi autonomisiin mobiilirobotteihin keskittyminen rajasi esimerkiksi kauko-ohjattavat tai tarkasti ennalta määrättyä, esimerkiksi teipeillä tai johdoilla merkittyä reittiä seuraavat mobiilirobotit käsittelyn ulkopuolelle.

Navigointitekniikoita on myös niin paljon, että tämän työn laajuus ei riitä niiden kaikkien yksityiskohtaiseen käsittelyyn. Tämän vuoksi työssä esiteltiin tarkemmin vain osa navigointitekniikoista. Lisäksi esimerkiksi luvussa 3.2 mainitut ACO-, FA- ja PSO-menetelmät ovat varsin monimutkaisia ja niihin liittyvien algoritmien käsittely vaatisi tarkkaa perehtymistä, mikä menisi jo hieman varsinaisen aiheen ulkopuolelle. Mobiilirobotit, navigointitekniikat ja anturit myös kehittyvät jatkuvasti, mikä aiheuttaa omat haasteensa ja rajoitteensa työhön.

Eräs työn kannalta merkittävä haaste ja rajoite oli se, että lähteestä riippuen termejä käytettiin ja teknologioita ryhmiteltiin hieman eri tavoin. Esimerkiksi Patle et al. (2019) jakoivat navigointitekniikat globaalien ja lokaalien lisäksi klassisiin ja reaktiivisiin, kun taas Gul et al. (2019) ja Pandey et al. (2017) jakoivat ne evolutiivisiin, deterministisiin ja ei-deterministisiin. Lisäksi joissain lähteissä esteiden välttämiseen käytettävät teknologiat olivat osa navigointitekniikoita, kun taas joissain lähteissä ne oli selkeämmin eroteltu omaksi osa-alueekseen. Esimerkiksi Wang et al. (2021) esittelivät esteiden välttämiseen käytettävänä teknologioina muun muassa GA- ja APF-algoritmit sekä neuroverkot ja sumean logiikan, jotka taas Patle et al. (2019) ja Gul et al. (2019) mainitsivat navigointitekniikoina. Tämä johtuu sekä teknologioiden monikäyttöisyydestä että mainituista eroista teknologioiden jaottelussa ja termien käytössä. Vastaavasti osassa lähteistä reitin suunnittelu oli osa navigointia, kun taas osassa se oli selkeämmin eroteltu omaksi osa-alueekseen.



Mobiilirobottien navigointiin ja esteiden välttämiseen käytettäviä teknologioita sekä ympäristön havainnointiin käytettäviä teknisiä laitteita on tärkeää kehittää edelleen, sillä ne mahdollistavat mobiilirobottien entistä autonomisemman ja monipuolisemman toiminnan. Lisäksi mobiilirobottien on tärkeää kyetä toimimaan turvallisesti samassa tilassa ihmisten ja liikkuvien esteiden kanssa, ja tässä kyseisillä teknologioilla ja laitteilla on suuri merkitys. Nämä tekijät lisäävät mobiilirobottien mahdollisia sovelluskohteita. Tässä kehityksessä myös erilaiset algoritmit ovat merkittävässä osassa, sillä niitä hyödynnetään navigointitekniikoissa, esteiden välttämässä ja havainnoinnissa. Lisäksi esimerkiksi GPS- ja muiden paikannusjärjestelmien kehittäminen nykyistä paremmin sisätiloihin soveltuviksi ratkaisisi paikannukseen liittyviä haasteita ja parantaisi siten mobiilirobottien navigointia.

Mobiilirobotiikka on todella nopeasti kehittyvä ala, joten siihen liittyviä uusia teknologioita kehitetään jatkuvasti. Mobiilirobottien navigoinnissa, antureissa ja esteiden välttämässä on myös edelleen paljon tutkittavaa. Tulevaisuudessa olisi tärkeää löytää ja sopia selkeä tapa esimerkiksi eri teknologioiden jaotteluun ja termien käyttöön, sillä tällä hetkellä termien käytössä ja teknologioiden jaottelussa on paljon vaihtelua. Myös tässä näkyy alan nopea kehitys, sillä uusien termien ja teknologioiden standardointi ei välttämättä pysy kehityksessä mukana.

## Lähteet

Alatise, M. B. & Hancke, G. P. (2020). A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE access*. [Online] Vol. 8. pp. 39830–39846.

Ben-Ari, M. & Mondada, F. (2018) *Elements of Robotics*. 1st ed. [Online]. Cham: Springer International Publishing.

Emmi, L., Le Flécher, E., Cadenat, V. & Devy, M. (2021). A hybrid representation of the environment to improve autonomous navigation of mobile robots in agriculture. *Precision agriculture*. [Online] Vol. 22(2), pp. 524–549.

Fragapane, G., Ivanov, D., Peron, M., Sgarbossa, F. & Strandhagen, J.O. (2020). Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Annals of operations research*. [Online] Vol. 308(1–2), pp.125–143.

Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F. & Strandhagen, J.O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European journal of operational research*. [Online] Vol. 294(2), pp. 405–426.

Gasparetto, A., Boscariol, P., Lanzutti, A. & Vidoni, R. (2015). Path Planning and Trajectory Planning Algorithms: A General Overview. In *Motion and Operation Planning of Robotic Systems*. [Online]. Cham: Springer International Publishing. Vol. 29, pp. 3–27.

Glavaški, D., Volf, M. & Bonkovic, M. (2009). Robot motion planning using exact cell decomposition and potential field methods. In *Proc. 9th WSEAS Int. Conf. Simulation, Modelling and Optimization, SMO '09, 5th WSEAS Int. Symp. Grid Computing, Proc. 5th WSEAS Int. Symp. Digital Libraries, Proc. 5th WSEAS Int. Symp. Data Mining*. pp. 126–131.

Gopalakrishnan, B., Tirunellayi, S. & Todkar, R. (2004). Design and development of an autonomous mobile smart vehicle: a mechatronics application. *Mechatronics (Oxford)*. [Online] Vol. 14 (5), pp. 491–514.

Gul, F., Rahiman, W. & Alhady, S. (2019). A comprehensive study for robot navigation techniques. *Cogent engineering*. [Online] Vol. 6(1), pp. 1–25.

Harapanahalli, S., O Mahony, N., Hernandez, G., Campbell, S., Riordan, D. & Walsh, J. (2019). Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment. *Procedia manufacturing*. [Online]. Vol. 38, pp. 1524–1531.

Hu, J., Bhowmick, P., Jang, I., Arvin, F. & Lanzon, A. (2021). A Decentralized Cluster Formation Containment Framework for Multirobot Systems. *IEEE transactions on robotics*. [Online] Vol. 37(6), pp.1936–1955.

ISO 19649 (2017). Mobile robots – Vocabulary. ISO/TC 299 Robotics. 10 p.

ISO/IEC 18031 (2011). Information technology – Security techniques – Random bit generation. 142 p.

Kobayashi, M. & Motoi, N. (2022). Local Path Planning: Dynamic Window Approach With Virtual Manipulators Considering Dynamic Obstacles. *IEEE access*. [Online] Vol. 10, pp. 17018–17029.

Lamini, C., Behlima, S. & Elbekri, A. (2018). Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning. *Procedia computer science*. [Online] Vol.127, pp.180–189.

Logistics IQ (2022). AGV-AMR Market Map 2022. Saatavissa (viitattu 3.3.2022): <https://www.thelogisticsiq.com/research/automated-guided-vehicles-agv-market/>

Montgomery, A. (2015). *Mobile robotics: principles, techniques and applications*. Nova Publishers. New York.

Nelson, A.L., Barlow, G.J. & Doitsidis, L. (2009). Fitness functions in evolutionary robotics: A survey and analysis. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57(4), pp. 345–370.

Ng, S. Y. & Ahmad, N. S. (2019). A Bug-Inspired Algorithm for Obstacle Avoidance of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot with Constraints. in *Intelligent Computing*. [Online]. Cham: Springer International Publishing. pp. 1235–1246.

Omron (2022). HD-1500. Saatavissa (viitattu 3.3.2022): <https://industrial.omron.fi/fi/products/hd-1500>

Outón, J. L., Villaverde, I., Herrero, H., Esnaola, U. & Sierra, B. (2019). Innovative mobile manipulator solution for modern flexible manufacturing processes. *Sensors (Basel, Switzerland)*. [Online] Vol. 19(24), pp. 1–26.

Pandey, A., Pandey, S. & Parhi, D.R. (2017) Mobile Robot Navigation and Obstacle Avoidance Techniques: A Review. *International Robotics & Automation Journal*. [Online] Vol. 2(3).

Patle, B., Babu L, G., Pandey, A., Parhi, D. & Jagadeesh, A. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence technology*. [Online]. Vol. 15(4), pp. 582–606.

Payá, L., Gil, A. & Reinoso, O. (2017). A State-of-the-Art Review on Mapping and Localization of Mobile Robots Using Omnidirectional Vision Sensors. *Journal of sensors*. [Online] Vol. 2017, pp.1–20.

Pershina, J. S., Kazdorf, S.Ya. & Lopota, A.V. (2019). Methods of Mobile Robot Visual Navigation and Environment Mapping. *Optoelectronics, instrumentation, and data processing*. [Online] Vol. 55(2), pp. 181–188.

Razak, A. A. A., Abdullah, A.H., Kamarudin, K., Bakar, M.A.A., Salih, J.E.M., Ilias, B., Shukor, S.A.A., Sa'ad, F.S.A & Mustafa, M.H. (2017). Development of mobile robot in confined space application, in *2017 IEEE 13th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (CSPA)*. [Online]. pp. 190–195.

Ruan, X., Ren, D., Zhu, X. & Huang, J. (2021). Mobile robot navigation based on deep reinforcement learning and artificial potential field method. *Yunnan da xue hsüen bao. Zi ran ke xue ban*. Vol. 43(6), p. 1125.

Rubio, F., Valero, F. & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. [Online] Vol. 16(2), pp. 1–22.

Saranrittichai, P., Niparnan, N. & Sudsang, A. (2013). Robust local obstacle avoidance for mobile robot based on Dynamic Window approach. In *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. [Online]. IEEE. pp. 1–4.

Sleaman, W. K. & Yavuz, S. (2020). Indoor mobile robot navigation using deep convolutional neural network. *Journal of intelligent & fuzzy systems*. [Online] Vol. 39(4), pp. 5475–5486.

Tometzki, T. & Engell, S. (2011). Systematic Initialization Techniques for Hybrid Evolutionary Algorithms for Solving Two-Stage Stochastic Mixed-Integer Programs. In *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 15(2), pp. 196–214.

Tzafestas, S. G. (2013). *Introduction to Mobile Robot Control*. 1st ed. [Online]. Elsevier, Saint Louis. 691 p.

Tzafestas, S. G. (2018) Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of intelligent & robotic systems*. [Online] Vol. 91(1), pp.35–58.

Wang, Y., Li, X., Zhang, J., Li, S., Xu, Z. & Zhou, X. (2021). Review of wheeled mobile robot collision avoidance under unknown environment. *Science progress*. [Online] Vol. 104(3), pp. 1–26.

Zafar, M. N. & Mohanta, J.C. (2018). Methodology for Path Planning and Optimization of Mobile Robots: A Review. *Procedia computer science*. [Online] Vol. 133, pp. 141–152.