



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Mobiilirobotin navigointijärjestelmät

Samuli Korhonen

KONETEKNIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2020

TIIVISTELMÄ

Mobiilirobotin navigointijärjestelmät

Samuli Korhonen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2020, 30 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Työssä on tavoitteena tehdä kirjallisuuskatsaus mobiilirobotin navigointijärjestelmistä. Työn alussa tarkastellaan mobiilirobotin käyttämiä sensoreita navigoinnissa. Tämän jälkeen käydään lävitse kolme tärkeää osa-aluetta, josta navigointi koostuu. Osa-alueet ovat lokalisaatio, kartan rakennus ja ratasuunnittelu. Työn tavoitteena on jättää lukijalle käsitys siitä, mistä navigointi koostuu sekä minkälaisilla järjestelmillä voidaan navigointi ratkaista.

Asiasanat: mobiilirobotiikka, navigointi

ABSTRACT

Navigation systems for mobile robots

Samuli Korhonen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2020, 30 pp.

Supervisor(s) at the university: Yrjö Louhisalmi

The aim of this thesis is to make a literature review of mobile robot navigation systems. First there is information about sensors involved in the navigation of a mobile robot. After that, navigation systems are explained by splitting the subject in three corner stones of navigation, localization, map building and path planning. The goal is to introduce the reader to what mobile robot navigation consists of and systems that help solve the problem.

Keywords: mobile robotics, path planning, navigation

ALKUSANAT

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena on tutustuttaa lukija mobiilirobotin navigointijärjestelmiin. Työn ajanjakso oli talvella 2020. Haluan kiittää yliopisto-opettaja Yrjö Louhisalmea työn ohjauksesta.

Oulu, 10.04.2020



Samuli Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Havainnointi	8
2.1 Sensorien luokittelu	8
2.2 Kulma-anturi	9
2.3 Suuntasensorit	10
2.3.1 Kompassi	10
2.3.2 Gyroskooppi	11
2.4 Aktiiviset etäisyysensorit	12
2.4.1 TOF	12
2.4.2 Kolmiomittaus	13
2.5 Visuaalisensorit	14
2.5.1 CCD ja CMOS	14
2.5.2 Stereonäkö	14
2.6 GPS	15
3 Lokalisatio ja kartoitus	16
3.1 Sensorifuusio	16
3.2 Absoluuttinen lokalisatio	16
3.3 Relatiivinen lokalisatio	17
3.4 SLAM	18
4 Ratasuunnitelu	19
4.1 Konfiguraatioavaruus	19
4.2 Tiekarttamenetelmät	20
4.2.1 Visibility graph	20
4.2.2 Voronoi diagrammi	21
4.3 Soluihin jako	22
4.3.1 Tarkka solun jakaminen	22
4.3.2 Likimääräinen solun jakaminen	23

4.4 Keinotekoinen potentiaalikenttämenetelmä	24
4.5 Otantamenetelmä	25
4.5.1 RRT.....	26
4.5.2 PRM.....	27
5 Yhteenveto	28

LÄHDELUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
d	etäisyys esteeseen
EKF	extended Kalman filter
F	kokonaisvoima
F_B	esteiden tuottama voima
F_{goal}	maalin tuottama voima
GPS	Global Positioning System
K	symmetrinen positiivinen matriisi
k	skaalaustekijä
LADAR	laser radar
LIDAR	light detection and ranging
P	kokonaispotentiaali
P_B	esteen B muodostama potentiaali
P_{goal}	maalin muodostama potentiaali
PRM	probabilistic roadmaps
Q	konfiguraatioavaruus
Q_{free}	konfiguraatioavaruuden vapaa alue
Q_{obst}	este konfiguraatioavaruudessa
q	kappaleen konfiguraation vektori
q_{goal}	kappaleen lopputila
q_{start}	kappaleen alkutila
RRT	rapidly exploring random trees
SLAM	simultaneous localization and mapping
TOF	Time of Flight

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena on kirjallisuuskatsaus mobiilirobotin navigoinnista. Valitsin aiheen valmiista vaihtoehdoista oman kiinnostuksen vuoksi. Työn tavoitteena on avata lukijalle tekijät, joista mobiilirobotin navigointi koostuu. Mobiilirobotiikka on suhteellisen uusi ja nopeasti kehittyvä tutkimusalue, jossa tulee jatkuvasti uusia innovaatioita. Uuden teknologian myötä saadaan parempia sensoreita ja enemmän laskentavoimaa pienempään tilaan. Nämä tekijät mahdollistavat enemmän liikkuvaa robotiikkaa. Mobiilirobotin navigointi on iso osa itsenäisesti toimivan robotin kehityksessä. Työn alussa käsitellään mobiilirobotin havainnointia sekä sensoreita, jotka ovat oleellisia navigoinnissa. Mobiilirobotin navigointia käsitellään kolmesta osa-alueesta, lokalisaatio, kartoitus sekä ratasuunnittelu. Nämä osa-alueet ovat erittäin laajasti tutkittuja erikseen sekä yhdessä. Tämän laajuuden vuoksi aihe on rajattu. Työssä käsitellään osa-alueiden käyttöä ja toimintaa navigoinnissa, mutta metodeihin ei voida perehtyä syvällisemmin.

2 HAVAINNOINTI

Mobiilirobotilla oleellinen tehtävä on ympäristön havainnoiminen. Avaruuden, jossa mobiilirobotti liikkuu, esittäminen täydellisesti on harvoin mahdollista. Myös mekaniikan liikkuminen ilman virhettä ei ole realistista. Tätä varten tarvitaan sensoreita mittaamaan sekä ympäristöä, että robotin liikkeitä. Tässä kappaleessa käydään läpi mobiilirobotin navigoinnissa oleellisia sensoreita ja kuinka niitä voidaan hyödyntää robotin paikantamisessa tai ympäristön havainnoitsemisessa.

2.1 Sensorien luokittelu

Sensoreita voidaan luokitella monella tavalla robotiikassa, mutta mobiilirobotiikkaan liittyen on kaksi olennaista luokittelua. Sensori voi olla joko aktiivinen tai passiivinen, tai sensoria voi myös mitata robotin sisäisiä arvoja tai robotin ympäristöä.

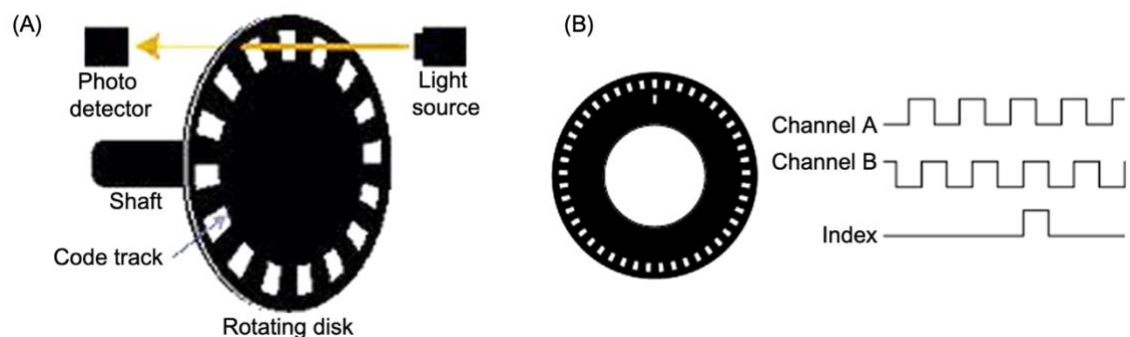
Passiivinen sensoria mittaa ambientista ympäristöstä sensoria tulevaa energiaa (Siegwart, 2004). Passiivisia sensoreita voivat olla esimerkiksi lämpömittari ja mikrofoni. Aktiivinen sensoria sen sijaan emittoi energiaa ympäristöön ja mittaa ympäristön reaktiota. Aktiivisella sensorilla saavutetaan usein parempia tuloksia, koska sillä voidaan mitata hallitummin ympäristöä. Toisaalta riskinä on aktiivisen sensorin vaikutus juuri mitattavaan suureeseen ympäristössä tai häiriö signaalissa, josta tuloksia käsitellään. Häiriöitä voi syntyä esimerkiksi muiden robottien tai saman robotin sensoreista. Ultraäänisensorit ja laser-sensorit ovat esimerkkejä aktiivisista sensoreista.

Mobiilirobotin sisäisillä arvoilla, kuten nivelen kulman muutoksella, voi olla navigoinnissa tärkeä rooli. Robotin sisäisten arvojen lisäksi navigoinnissa on kuitenkin myös suuri vaikutus ympäristöllä. Ympäristöä mittaavat sensorit, kuten etäisyysmittaus tai valon intensiteetin mittaus, tuovat kriittistä tietoa navigointiin. Harva mobiilirobotti pystyy toimimaan ilman ympäristöä mittaavia sensoreita ja kosketusantureita. (Siegwart, 2004)

2.2 Kulma-anturi

Yksi paikkatiedon hankkimisen metodi on määrittää kuljettu etäisyys ja suunta tunnetusta pisteestä (dead reckoning) (Everett 1995). Mobiilirobotiikassa on vielä yleistä, että liike tapahtuu renkaiden avulla. Tämä mahdollistaa kuljetun matkan mittaamisen renkaiden kulmanmuutoksen avulla. Tiedettäessä renkaan koko, saadaan laskettua pyörähdysten avulla kuljettu matka.

Yksi yleisimmistä sensoreista renkaan kulman tai kulmanopeuden mittaukseen on optinen inkrementaali enkooderi eli pulssianturi. Yksinkertainen optinen pulssianturi koostuu valonlähteestä, valoa vastaanottavasta diodista ja niiden välissä olevasta pulssikiekosta (kuva 1). Pulssikiekossa on vuorotellen valoa läpi päästäviä ja valoa estäviä sektoreita tai viivoja. Viivojen lukumäärä vastaa anturin resoluutiota eli erottelutarkkuutta. Kiekon pyöriessä valo vuorotellen näkyy ja ei näy vastaanottimelle. Tästä saadaan muodostettua usein kanttiaaltoja digitaaliseen muotoon. (Fonselius, 1994)



Kuva 1. A) Pulssikiekko, valonlähde sekä valon havaitsija. B) Pulssikiekko sekä kahden kanavan kanttiaalto. (Tzafestas, 2015 s. 105)

Mobiilirobotiikassa tarvitaan usein myös tieto suunnasta, johon rengas pyörii. Jotta pyörimissuunta saadaan selville anturista, tarvitaan kaksi viivakehää, A ja B. Viivakehät ovat 90 asteen vaihe-erossa. Suunnan saa selville kanttiaaltoja tutkimalla. Kun A-signaali on nouseva reuna ja B on 1, voidaan todeta laitteen menevän myötäpäivään. Vastakkaisen pyörimissuunnan tunnistaa siitä, kun A-signaali on nouseva reuna silloin kun B-signaali on 0. (Siegwart 2004)

Vain renkaiden pyörimisen avulla mitattu paikannus ei ole kuitenkaan paras mahdollinen metodi navigointia ajatellen. Pulssianturi on robotin sisäistä ominaisuutta, renkaan kulman muutosta rungon suhteen mittaava laite. Tämän tiedon anturi voi antaa erittäin tarkasti. Ongelma ilmenee, kun renkaan pyörintä muutetaan matkaksi ympäristössä. Esimerkiksi renkaiden liukuminen aiheuttaa suurta virhettä. Odometriaa käytetään silti navigoinnin perustana systeemeissä, mutta virheiden vähentämiseen siihen yhdistetään muita sensoritietoja. (Everett 1995)

2.3 Suuntasensorit

Pelkkä etäisyys ei riitä paikantamiseen edellisestä tunnetusta paikasta. Etäisyyden lisäksi tarvitaan suuntatieto. Suuntatieto voi olla joko ympäristöstä mitattu tai se voidaan käsittää robotin sisäiseksi tiedoksi. Yhdistämällä suuntatieto gyroskoopista tai kompassista matkan pituuteen, voidaan saada paikannettua sijainti.

2.3.1 Kompassi

Kompassi on laite, joka mittaa maan magneettikentän suuntaa. Kaksi yleistä anturia, jotka mittaavat magneettikentän suuntaa ovat Hall-ilmio-kompassi ja fluxgate-kompassi. Hallin ilmiö kuvaa puolijohteen elektronista käyttäytymistä, kun se on magneettikentässä. Kun puolijohteessa on vakiovirta, syntyy jännite-ero kohtisuoraan virran suunnasta. Jännite-eron suuruus riippuu puolijohteen orientaatiosta magneettikentän suhteen. Magneettikentän suunta saadaan eroteltua jännitteen merkistä. Näin ollen saadaan yhdestä puolijohteesta vuo ja sen suunta. Hallin ilmiötä käyttävä kompassi koostuu kahdesta puolijohteesta, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan kohden. Näin saadaan määriteltä yksi kompassin kahdeksasta suunnasta. Hyvä puoli anturista on sen halpa hinta, mutta huonoina puolina ovat sen huono resoluutio ja hidas asettumisaika. (Siegwart 2004)

Fluxgate-kompassi toimii hieman eri periaatteella kuin Hallin ilmiöön perustuva. Kaksi käämiä asetetaan kohtisuoraan toisiinsa nähden. Kun käämeihin kohdistuu vaihtovirta, magneettikenttä aiheuttaa vaihe-eroja riippuen sen suunnasta käämeihin nähden. Vaihe-eroja mittaamalla saadaan laskettua magneettikentän suunta. Fluxgate-kompassi on tarkempi kuin Hall-ilmio kompassi, mutta myös paljon kalliimpi ja suurmpia

Kompassista riippumatta ongelmana maan magneettikentän hyödyntämisessä navigoinnissa, ovat häiriöt muista magneettisista rakenteista robotissa tai sen ympärillä. Myös antureiden robustisuus tuo haasteita. Erityisesti sisällä liikuttaessa robotiikassa on vältetty kompassin käyttöä, mutta siitä voi olla hyötyä lokaalissa orientaation hankkimisessa.

2.3.2 Gyroskooppi

Gyroskoopit ovat toinen vaihtoehto kompassin rinnalla määrittämään robotin suunta. Gyroskoopit säilyttävät suuntaorientaation suhteessa kiinteään referenssiin. Gyroskooppeja on mekaanisia, optisia ja MEMS-teknologiaa käyttäviä.

Mekaanisilla gyroskoopeilla ja hyrräkompassseilla on ollut pitkä historia navigoinnissa. Ensimmäiset dokumentoidut gyroskoopit ovat 1850-luvulta. Gyroskoopit perustuvat liikemäärämomenttiin. Kun pyörivään kappaleeseen ei kohdistu muita momentteja, kappale jatkaa pyörimistä samalla kulmanopeudella saman akselin ympäri. Gyroskooppia voi käyttää kompassin tavoin navigointiin. (Everett 1995) Mobiilirobotiikassa on kuitenkin yleisempää käyttää gyroskooppia paikallisen orientaation muutoksen mittaukseen. Gyroskoopilla voi absoluutisen orientaation lisäksi esimerkiksi määrittää kulman muutoksen nopeuden lisäämällä jousivaimennuksen vapaasti pyöriviin osiin. Mekaaniset gyroskoopit ovat kalliita, isokokoisia sekä herkkiä rakenteeltaan, joten niiden käyttö mobiilirobotiikassa on vähentynyt. (Siegwart 2004)

Optinen gyroskooppi eliminoi liikkuvat osat kokonaan käyttämällä valoa kulman mittaukseen. Mittaus perustuu Sagnac-ilmiöön. Jos kaksi valopulssia lähetetään vastakkaisiin suuntiin ympyrän kehälle, valopulssit päätyvät lähtöpisteeseen samassa ajassa. Oletetaan nyt kehän pyörivän tietyn asteen myötäpäivään. Myötäpäivään kulkeva valopulssi kulkee nyt pidemmän matkan saavuttaakseen lähtöpisteen. Vastapäivään kulkeva valopulssi kulkee lyhyemmän matkan. Pulssien aikaeron avulla saadaan laskettua kehän kulmanmuutos. (Siciliano 2008)

Mikrosysteemeihin (MEMS) perustuvia gyroskooppeja on olemassa monenlaisia, mutta suurin osa niistä perustuu pyörimisen tunnistamiseen värähtelyn avulla. Nämä anturit käyttävät hyväksi Coriolis-ilmiötä. Mittaamalla pyörivästä kappaleesta Coriolis-voimaa, saadaan mitattua tapahtunut rotaatio. MEMS gyroskoopit ovat erittäin pieniä ja kevyitä

verrattuna samaan tarkkuuteen pääsevään mekaaniseen gyroskooppiin. Tämä on usein etuna mobiilirobotiikassa, koska halutaan säästää painoa. Lisäksi MEMS gyroskoopeilla on pieni virrankulutus.

2.4 Aktiiviset etäisyysensorit

Aktiiviset etäisyysensorit ovat suosittuja mobiilirobotiikassa. Aktiivinen sensori lähettää ympäristöön säteilyä, tässä tapauksessa usein lasersädettä, ja määrittää heijastuneen signaalin perusteella ympäristöä. Etäisyysensori on hyödyllinen havaitsemaan esteitä, jotka tulevat mobiilirobotin tielle. Etäisyystietoa voi myös käyttää kartan rakennuksessa sekä robotin paikantamisessa. Esimerkiksi paikallinen tieto esteistä robotin lähialueella on ratasuunnittelussa hyödyllinen tieto. Etäisyysensoreilla saadaan rakennettua 2D ja 3D skannauksia, joista voidaan muodostaa esimerkiksi ympäristön karttaa. (Ge 2006) Seuraavissa kappaleissa on esillä kaksi yleistä etäisyysensoria.

2.4.1 TOF

Time of Flight-etäisyysensorit (TOF) perustuvat ajan mittaukseen, joka pulssilla kestää kulkea lähteestä kohteeseen ja sieltä takaisin vastaanottimeen. Aika, joka pulssilla kestää matkaan, kerrotaan vain valonnopeudella ja saadaan etäisyys esteeseen. Näitä sensoreita nimitetään usein LIDAR- (light detection and ranging) tai LADAR- (laser radar) sensoreiksi.

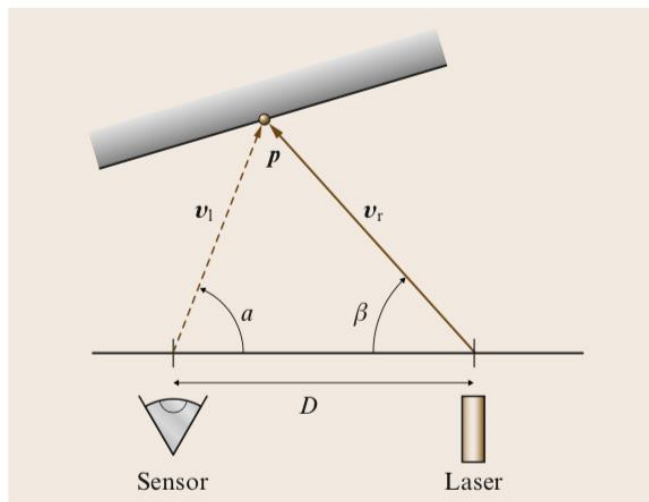
Sensorien tarkkuus riippuu minimihavainnointiajasta, vastaanottimen ajallisesta tarkkuudesta sekä laserpulssin leveydestä. Sensorin minimihavainnointiaika määrittää minimietäisyyden, jonka laitteella voi mitata. Vastaanottimen tarkkuus ja laserpulssin leveys vaikuttavat lopputuloksen luotettavuuteen. Koska tämä on aktiivinen sensori, ympäristö voi vaikuttaa tuloksen laatuun. Signaalin imeytyminen tai heijastus kohteesta voi vaikeuttaa kuvausta. Myös liikuttaessa nopeuden muutokset, sekä liikkuvat kohteet voivat olla haasteita. (Siegwart 2004)

Suurin osa sensoreista pystyy lähettämään vain yhden lasersäteen, joten sillä saa kuvattua vain yhden pisteen ympäristöstä. Mobiilirobotiikassa halutaan usein enemmän tietoa. Lasersäde pyyhkäistään halutun ympäristön läpi peilien avulla ja näin saadaan kuvattua tasoja tai jopa 3D pintoja. Uusin kehittyvä teknologia on flash LADAR. Kehityksen on

mahdollistanut ajoitetut piirit joka pikselissä, jonka ansiosta jokaisessa pikselissä voidaan laskea pituusarvot. Tässä tapauksessa ei riitä vain yksi lasersäde, vaan haluttu alue tulee samanaikaisesti skannata. Flash LADAR mahdollistaa 3D videoiden muodostamisen. (Siciliano 2008)

2.4.2 Kolmiomittaus

Kolmiomittaus laseretäisyysmittarilla on periaatteeltaan yksinkertainen ja näkyy kuvassa 2. Lasersäde projisoidaan mitattavalle pinnalle tunnetusta paikasta. Valopiste jonka lasersäde luo, havaitaan sensorilla. Kun lasersäteen lähteen ja sensorin paikka sekä orientaatio tunnetaan, voidaan trigonometrian avulla ratkaista pisteen 3D positio. Etäisyyden tarkkuus riippuu siis siitä, kuinka tarkasti sensorilla pystytään määrittämään valaistu piste.



Kuva 2. Kuva kolmiomittauksen toteutuksesta. (Siciliano 2008 s.529)

Mittauksen parantamiseksi voidaan parittaa tietyllä taajuudella toimiva laser sopivan filtterin kanssa. Tämä helpottaa valopisteen tunnistusta ja vähentää taustavalon häiriötä. Lisäksi kolmiomittauksessa lasersäteestä voi muodostaa viivan, josta saa useamman pisteen mitattua samaan aikaan. Tämän viivan voi pyyhkäistä ympäristössä ja luoda 3D mallin. Viivaan sijaan voi myös käyttää eri muotoja, kuten ruudukkoita tai pistejoukkoja. Negatiivisena puolena ovat tässäkin heijastavat pinnat. Heijastavat pinnat voivat väärentää paikkaa missä piste on. Lisäksi tiettyjen laserien käyttö ihmisten ympärillä voi aiheuttaa vaurioita silmissä.

2.5 Visuaaliset sensorit

Näkö on ihmiselle erittäin tehokas aisti, joten on selvää, että sitä yritetään kopioida robotille. Visuaaliset sensorit ovat passiivisia sensoreita, jotka havaitsevat ympäristön säteilyä. CCD ja CMOS ovat valoherkkiä kennoja, joilla saa kuvattua ympäristön säteilyä. Näitä kuvasensoreita hyödynnetään visuaalisissa sensoreissa esimerkiksi etäisyyden mittaukseen. Lisäksi kameroista saa enemmän ja enemmän tietoa navigointiin, kun kuvankäsittelyalgoritmit kehittyvät jatkuvasti. Kameroiden avulla voidaan muodostaa karttoja, sekä esimerkiksi havainnoida esteitä.

2.5.1 CCD ja CMOS

CCD- ja CMOS-kennoilla on osittain sama periaate kuvan kaappaamiselle. Kennot muodostuvat valoherkistä elementeistä, eli pikseleistä, joita voi olla kymmenistä tuhansista miljooniin. Voidaan kuvitella, että pikseli on valolle herkkä purkautuva kondensaattori. Kun ajan kuluessa fotoneita osuu pikseleihin, niihin kertyy eri suuruisia varauksia. Nämä varaukset luetaan ja niiden perusteella muodostetaan kuva. Suurin ero CCD- ja CMOS-sensoreilla on, kuinka pikselin tieto luetaan. CCD-kennolla jokaisen pikselin tieto pitää siirtää kulmassa sijaitsevaan pikseliin luettavaksi. CMOS-kennolla jokaiseen pikseliin on liitetty transistori, joka mahdollistaa mittauksen jokaisen pikselin vieressä erikseen. Tämä signaali vahvistetaan ja lähetetään pikseliltä käsiteltäväksi. (Siegwart 2004)

CMOS sensoreilla on etuna helppo pääsy yksittäisiin pikseleihin. Tämä mahdollistaa välittömän tarkastelun kiinnostavista alueista ilman integraatioaikaa, kellotusta ja shift-rekisterejä, joita CCD vaatii. Lisäksi CMOS-sensoriin on helpompi lisätä piirejä, jotka auttavat kuvan laadun parantamisessa. Esimerkiksi dynaamista laatua ja kuvan ylivalottumista saa parannettua CMOS-sensorissa. CCD-sensorilla voi kuitenkin saada tarkempia kuvia, koska piirit CMOS-sensorin pikseleiden vieressä vievät tilaa ja fotonit voivat osua niihin eikä pikseleihin.

2.5.2 Stereonäkö

Yhden kuvan ongelma on syvyyden tunnistaminen, koska kaikki kuvat ovat 2D malleja 3D maailmasta. Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä vähintään kahta kameraa. Yleinen asetelma on kaksi kameraa, jotka ovat asetettu rinnakkain. Kameroiden etäisyys,

eli baseline, on tunnettava. Etäisyys saadaan selville vertaamalla tarkasteltavaa pistettä kahdessa kuvassa. Pisteiden etäisyydestä toisistaan, yhdessä kameran teknisten tietojen kanssa, saadaan etäisyystieto selville.

Suuri haaste stereonäössä on löytää vastaavat pisteet kahdesta kuvasta. Pisteiden löytämistä voidaan parantaa lisäämällä useampi kamera systeemiin. Kun syteemissä on useampi kamera, saadaan enemmän stereopareja eri baseline mitalla. Näin voidaan laskea useamman kameran antama etäisyys ja verrata tuloksia referenssikameraan. Useasta tuloksesta voidaan laskea virheet ja käyttää tulosta, joka on antanut pienimmän virheen. (Ge 2006)

2.6 GPS

GPS on erittäin tunnettu mekanismi paikan arvioimiseen. Alun perin sotilaskäyttöön kehitetty systeemi antaa 3D-arvion paikan koordinaateista maan pinnalla. GPS perustuu NAVSTAR-satelliittisysteemiin, joka on Yhdysvaltojen kehittämä ja ylläpitämä. 24 kappaleen satelliittikonstellaatio kiertää maata ja mahdollistaa GPS-satelliittiverkon. Satelliittien liikkeitä suhteessa maahan on suunniteltu siten, että aina on vähintään 4 satelliittia näkyvissä kaikkialle. Tämä on yksi kriteeri GPS-paikannukselle. Jokainen satelliitti lähettää jatkuvasti datapaketteja jotka GPS-vastaanotin vastaanottaa. Datapaketissa tulee satelliitin sijainti, sekä tarkka aikatieto. Vastaanotin voi eri satelliiteilta saatuja arvoja vertailemalla laskea sijainnin. (Siegwart 2004)

GPS-paikannus ei ole mobiilirobotin navigoinnissa yksin riittävän tarkka keino paikantamiseen. GPS:n tarkkuus vaihtelee noin yhden ja 20 metrin välillä. Luetettavuus GPS:llä on myös vaihteleva. Signaalin saaminen vaatii esteetöntä näköyhteyttä satelliittiin. Sisätilojen ja tunneleiden lisäksi signaaliin voi myös vaikuttaa atmosfäärin tila.

3 LOKALISATIO JA KARTOITUS

Lokalisatio ja kartoitus ovat kaksi navigoinnin kolmesta osa-alueesta, jotka johdannossa mainittiin. Robotin tulee olla mahdollista sensorien avulla löytää oma sijainti valmiilta kartalta tai kartalta, jota muodostetaan robotin liikkuesssa. Tämä mahdollistaa ratasuunnittelun kyseisestä sijainnista maaliin. Lokalisatio voi olla absoluuttista tai relatiivista. Koska lokalisatioon ja kartan muodostamiseen käytetään sensoreita, sensoreiden tarkkuus vaikuttaa huomattavasti paikkatietoon ja karttaan. Sensoridatan yhdistäminen pienentää virhettä ja parantaa tarkkuutta, joten se on suuri osa lokalisatiota.

3.1 Sensorifuusio

Edellisessä kappaleessa oli useampi sensori, jolla pystytään mittaamaan paikantamiselle hyödyllisiä parametreja. Valitettavasti kaikissa navigointiin käytettävissä sensoreissa on virhettä, sekä niiden toiminta-alueella voi olla joitakin puutteita. Virheitä sensoreissa voidaan kompensoida yhdistämällä useamman sensorin dataa. Yhdistämällä usean eri sensorin data saadaan tarkempi lopputulos, kuin yksittäisen sensorin datasta. Useita algoritmeja on kehitetty tiedon älykästä yhdistämistä varten. Suosituimmat ovat tilastotieteellisiä menetelmiä. Menetelmät perustuvat satunnaisuuteen sekä edelliseen tilaan, kuten Bayesilainen menetelmä sekä Kalman-filteri. (Lamkin-Kennard 2019)

Sensorit voivat mitata samaa ominaisuutta ympäristöstä, joita vertaillaan tai sensorit voivat mitata ympäristön eri ominaisuuksia. Esimerkiksi 3D-rotatioon voidaan käyttää dataa gyroskoopista, kompassista sekä kiihtyvyysanturista. Usein myös visuaalisen anturin lisäksi on useita eri antureita kuten LIDAR-systeemejä. (Tzafestas 2014)

3.2 Absoluuttinen lokalisatio

Absoluuttinen lokalisatio perustuu maamerkkeihin ja majakoihin (beacon). Maamerkillä tai majakalla voi olla identiteetti, joka helpottaa paikantamista. Ilman maamerkkien identiteettiä, paikantaminen vaatii lisätietoja. Maamerkki voi olla keinotekoinen ja aktiivinen, keinotekoinen ja passiivinen tai luonnollinen ja passiivinen. Aktiivinen maamerkki lähettää ympärille signaalia, joka on helppo havaita. Näin robotti vaatii vain

vastaanottimen signaaliin. Passiivinen maamerkki vaatii usein enemmän sensorilta sen havaitsemiseen. Passiivinen maamerkki voi olla esimerkiksi viivakoodi, johon robotin aktiivisen sensori reagoi. Luonnollisia maamerkkejä on hyvä käyttää, jos siihen on mahdollisuus. Luonnolliset maamerkit tuovat joustavuutta ympäristön vaihteluun, suhteellisen pienellä vaivalla. Sisällä luonnolliset maamerkit voivat olla esimerkiksi tuoleja tai ikkunoita. (Tzafestas 2014)

Aktiivisilla maamerkeillä ja majakoilla lokalisaatio voidaan tehdä trilateraation avulla tai kolmimittausta hyödyntämällä. Trilateraatiossa käytetään usein kolmea tai useampaa lähetintä ympäristössä ja yhtä vastaanotinta robotissa. On myös mahdollista pistää lähetin robottiin ja vastaanottimet ympäristöön. Lähettimien paikka on tiedettävä. Jokaisen maamerkin ympärille muodostuu ympyrä, jonka säde on etäisyys robotista lähettimeen. Robotin sijainti on ympyröiden leikkauspisteessä. Pienissä tiloissa voidaan käyttää esimerkiksi ultraääneen perustuvaa mittausta. GPS käyttää ulkotiloissa trilateraatiota. Kolmiomittaukseen vaaditaan myös kolme tai useampi aktiivinen majakka ympäristöön. Robotissa on pyörivä sensori, joka havaitsee majakoiden signaalit. Sensori mittaa kulman, jossa signaali tulee majakalta robottiin. Näin saadaan laskettua paikka sekä orientaatio robotille. (Tzafestas 2014)

Passiivisia maamerkkejä lokalisaatiossa voidaan käyttää hyväksi karttojen vertailussa (map matching). Robotti käyttää esimerkiksi kameraa tai lasermittausta löytääkseen ympäristöstä yksilöllisiä maamerkkejä. Tästä tiedosta rakennetaan paikallinen kartta, jota verrataan muistissa olevaan valmiiseen karttaan alueesta. Kartta voi olla esimerkiksi CAD-malli ympäristöstä tai aikaisemmin mitattu kartta. (Tzafestas 2014)

3.3 Relatiivinen lokalisaatio

Relatiivinen lokalisaatio tarkoittaa paikan ja orientaation määrittämistä robotin sisäisiä arvoja mittaamalla (Goel 1999). Periaatteena on mitata robotin liike kahden pisteen välillä. Tätä tehdään jatkuvasti, kunnes saavutetaan loppupiste. Lopullisen matkan pituuden sekä suunnan avulla saadaan arvioitua loppupisteen sijainti. Pyörällisen mobiilirobotin tapauksessa on yleistä käyttää pulssianturia pyörien kulman muutoksen mittaukseen. Tällä tavoin saa helposti mitattua kuljetun matkan pyörän dimensioiden avulla.

Relatiivisessa lokalisaatiossa huono puoli on sen herkkyys virheelle. Esimerkiksi pyörällisellä mobiilirobotilla voi tulla virhettä pyörien erikokoisuudesta. Enkoodereiden virheet sekä resoluutio ja näytteenottotaajuus vaikuttavat myös. Näitä kutsutaan systemaattisiksi virheiksi. Ei systemaattiset virheet johtuvat usein ympäristöstä. Renkaiden sutiminen liukkaan alustan vuoksi sekä epätasainen alusta voi vaikuttaa paljon tulokseen. Virhe on relatiivisessa lokalisaatiossa verrannollinen aikaan, joka tekee virheestä suuremman haasteen. Virhe kasvaa ajan kuluessa. Esimerkiksi Kalman suodattimella voi parantaa tarkkuutta tuloksissa. (Tzafestas 2014)

3.4 SLAM

Autonomisen mobiilirobotiikan yhtenä suurena tavoitteena on saada robotit suorittamaan tehtäviä ilman ihmisen vaikutusta. Robotille suotava ominaisuus olisi kyky luoda karttaa ympäristöstä sen liikkeessa, sekä paikantaa itsensä tästä kartasta saman aikaisesti. Tätä ongelmaa kutsutaan lyhenteellä SLAM (simultaneous localization and mapping). SLAM ongelman ratkaistua pystyy mobiiliroboti toimimaan ympäristössä jossa laitteella ei ole mitään esitietoja alueesta. Tätä varten vaaditaan usea eri sensori sekä metodeja tiedon käsittelyyn. (Savaria 2010)

Suosituimmat metodit SLAM:n implementointiin ovat EKF (extended Kalman filter), Bayesilainen arviointi sekä PF. EKF oli ensimmäisiä vaikuttavia SLAM-metodeja. EKF arvio jatkuva-arvoisen tilan havainnoimalla jaksollisesti tilaa (Siciliano 2008). Kun robotti liikkuu ympäristössä ja havainnoi omaa tilaa sekä ympäristön objektien tilaa useamman kerran, saadaan arvio paikasta ja rakennettua esteitä karttaan. Bayesilainen arviointi käyttää tiheysfunktioita sekä Bayesin teoremaa todennäköisyyksien laskemiseen. PF on toiselta nimeltään sequential Monte Carlo-metodi. Tämä metodi perustuu simulointiin. (Tzafestas 2014) Näitä metodeja voi esimerkiksi soveltaa robotin kanssa, joka sisältää kameran, laseretäisyysmittarin sekä orientaatioanturin. Robotille annetaan algoritmi, joka saa robotin tutkimaan uusia alueita. Eri sensoreita yhdistämällä sekä tunnistamalla vanhat ja uudet maamerkit, pystyy robotti muodostamaan kartan. Kartasta tulee tarkempi, mitä useammin robotti tunnistaa maamerkit.

4 RATASUUNNITELU

Liikeradan suunnittelu on suuri osa-alue robotiikassa. Mobiiliroboteilla liikeradan suunnittelu tarkoittaa yksinkertaisuudessaan törmäysvapaan reitin etsimistä alkuasemasta loppuasemaan. Usein suunnitteluun yhdistetään muita tavoitteita tulosten rajaamista varten. Esimerkiksi lyhyimmän reitin löytäminen tai esteitä kaukaa kiertävä liikerata voivat olla rajaavia kriteerejä (Klancar 2017). Tieto ympäristöstä vaikuttaa liikeradan suunnitteluun huomattavasti. Ympäristö voi olla täysin tiedossa, osittain tiedossa tai täysin tuntematon. Yleisin tapaus on osittain tuntematon ympäristö. (Tzafestas 2014)

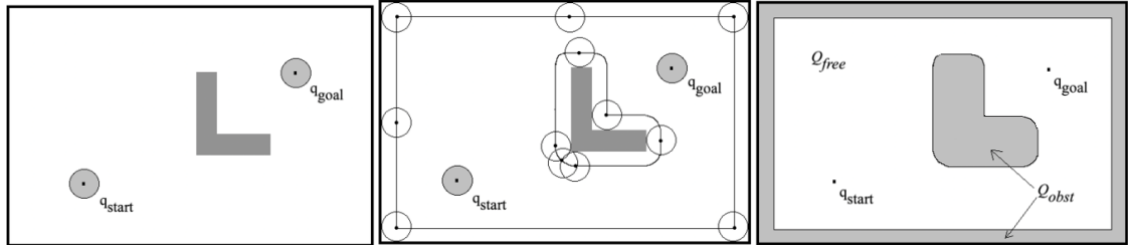
Liikeradan suunnittelu voi olla joko globaalia tai lokaalia. Globaalissa suunnittelussa liikerata muodostetaan ennen robotin liikkeelle lähtöä. Tässä tapauksessa ympäristön tulee olla täysin tiedossa ja ympäristö ei saa muuttua kesken ajon. Lokaalissa suunnittelussa reittiä suunnitellaan robotin ollessa liikkeessä. Hyötynä tässä on, että ympäristöä ei tarvitse täysin tietää ennen liikkeelle lähtöä. Robotti voi tuntemattoman esteen tullessa laskea uuden reitin loppuasemaan.

4.1 Konfiguraatioavaruus

Konfiguraatioavaruus (configuration space) on tapa esittää jokainen mahdollinen paikka ja asento, mihin robotti voi päästä. Kappaleen konfiguraatio eli asema, esitetään vektorilla q . Asema q sijaitsee konfiguraatioalueella Q , joka esittää kaikki mahdolliset konfiguraatiot mobiilirobotille. Osa konfiguraatioalueesta on esteitä Q_{obst} . Näin ollen vapaa alue Q_{free} konfiguraatioavaruudesta on esteiden Q_{obst} ja alueen Q erotus. Jos esteet Q_{obst} jakavat vapaan tilan Q_{free} kahteen osaan ja alkutila q_{start} ja lopputila q_{goal} eivät ole samalla alueella, ei ole olemassa törmäysvapaata reittiä. (Klancar 2017)

Mobiilirobottien suhteen on yleistä yksinkertaistaa robotti siten, että sillä ei ole liikerajoituksia. Ohjattavia vapausasteita on silloin yhtä monta kuin vapaita vapausasteita (holonomic). Oletetaan siis, että robotti pystyy liikkumaan xy-tasossa vapaasti. (Siegwart 2004) Lisäksi robotin kuvaaminen pisteellä jättää jäljelle robotin kuvaamiseen vain x- ja y-akselin. Näin ollen konfiguraatioalue muistuttaa todellisen alueen pohjapiirustusta. Koska robotti on yksinkertaistettu pisteeksi, tarvitsee kuitenkin esteitä suurentaa.

Esimerkiksi ympyrän muotoinen robotti, joka voi liikkua xy-tasossa vapaasti, kuvataan robotin keskipisteellä (x, y) . Tässä tapauksessa konfiguraatioalue Q voidaan määrittää liikuttamalla robottia esteitä pitkin (kuva 3). Näin ollen robotin keskipiste kuvaa vapaan alueen Q_{free} ja esteen Q_{obst} rajan. Esteet kasvavat siis robotin säteen verran suuremmiksi.



Kuva 3. Ympyrän muotoisen robotin konfiguraatioavaruus.

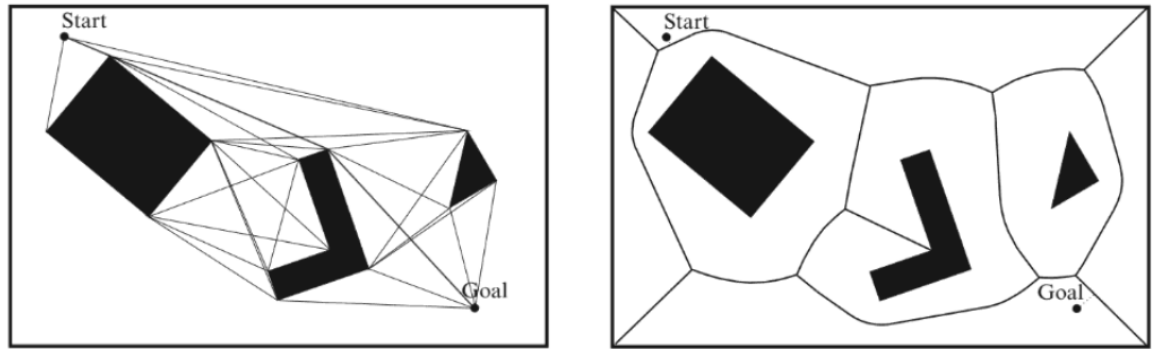
4.2 Tiekarttamenetelmät

Tiekarttamenetelmällä (roadmap method) on tavoitteena kartoittaa robotin konfiguraatioavaruuden vapaan tilan yhdistettävyyden viivoilla. Kun tiekartta on tehty, sitä käytetään polkujen verkostona suunniteltaessa liikerataa. Kun alkupiste ja loppupiste sijoitetaan karttaan, jää tehtäväksi vain löytää ja yhdistää oikeat polut verkostosta.

Tiekartta perustuu erityisesti konfiguraatioavaruuden esteiden geometriaan. Haasteena on muodostaa joukko polkuja, joilla mahdollistaa liikkuminen koko vapaassa tilassa, mutta minimoida samalla polkujen määrä järkeväksi. Tiekartoilla usein saadaan alue täysin kartoitettua, eli vapaalle alueelle ei jää saavuttamattomia alueita. On olemassa kaksi yleistä tapaa muodostaa tiekarttoja, visibility graph ja Voronoin diagrammi.

4.2.1 Visibility graph

Visibility graph esityksessä konfiguraatioavaruuden esteiden on oltava monikulmaisia. Jokaisesta kulmasta muodostetaan viiva kaikkiin näkyviin kulmiin. Aloituspistettä ja loppupistettä käsitellään kuin kulmia. Jokaisen monikulmaisen kulman viereinen kulma yhdistetään myös. Näin syntyy verkosto, joka keskittyy usein esteiden lähelle (Kuva 4). Se tarkoittaa myös sitä, että syntyy lyhyin mahdollinen reitti (Klancar 2017). Liikeradan suunnittelussa tarvitsee siis löytää vain yhdistelmä reitistä, jonka pituus on lyhyin.



Kuva 4. Vasemmalla visibility graph ja oikealla Voronoin diagrammi. (Klancar 2017, s. 173)

Visibility graph on erittäin yksinkertainen ja tehokas tapa löytää lyhin reitti nopeasti, jos esteitä on vähän. Jos alueella on suuri määrä esteitä, niin monikulmaisten sivujen ja kulmien määrä kasvaa todella suureksi. Tämä kasvattaa laskentakuormaa niin paljon, että visibility graphin käyttö ei ole enää tehokasta. Tapa, jolla visibility graph löytää nopean reitin, on myös heikkous. Reitin vieminen mahdollisimman lähelle esteitä, suurentaa törmäysriskiä. Riskiä on mahdollista minimoida suurentamalla esteitä. Tämä tietysti vaikuttaa lyhimmän reitin löytämiseen.

4.2.2 Voronoin diagrammi

Voronoin diagrammissa on lähes päinvastainen periaate kuin visibility graphissa. Voronoin diagrammi etsii reittiä mahdollisimman kaukaa esteistä. Diagrammia muodostaessa ensimmäinen askel on laskea jokaiselle pisteelle vapaassa konfiguraatiotilassa etäisyys esteeseen. Etäisyyden voi piirtää korkeutena taulukkoon. Korkeus kasvaa aina liikuttaessa esteestä pois päin. Pisteistä jotka ovat yhtä kaukana esteistä muodostuu harjanne kuvaan. Kun esteet ovat monikulmaisia, Voronoin diagrammi koostuu tämän harjanteen muodostamista suorista viivoista ja kaarista.

Etuna Voronoin diagrammissa on siis etäisyyden maksimointi esteistä (kuva 4). Tämä kuitenkin tarkoittaa, että reitin pituus on kaukana optimaalisesta pituudesta. Koska reitti on mahdollisimman kaukana esteistä, robotin sensoreilta vaaditaan enemmän. Jos robotissa käytetään vain lyhyen matkan sensoreita lokalisointiin, on Voronoin diagrammin tapaa lähes mahdoton käyttää. Kun tavoitteena on päästä mahdollisimman kauas esteistä, voi robotti menettää sijaintitietonsa helposti. Toisaalta, jos on käytössä etäisyysensorit, Voronoin diagrammin reittiä on suhteellisen yksinkertaista kulkea.

4.3 Soluihin jako

Soluihin jakamisen periaatteena on jakaa alue soluihin sekä erotella vapaat solut soluista, jotka ovat varattuja. Kun kaikki vapaat solut ovat löydetty, määritetään mitkä vapaat solut ovat vierekkäin. Vierekkäisistä soluista voidaan muodostaa yhdistettävyysskuvaaja. Yhdistettävyysskuvaajassa esitetään jokaisen vapaan solun yhteys viereiseen vapaaseen soluun. Kun tiedetään missä solussa alkupiste ja loppupiste sijaitsevat, voidaan etsiä pisteitä yhdistävä reitti yhdistettävyysskuvaajasta. Se, miten solut rajataan, on merkittävä asia. Tästä syystä menetelmä voidaan rajata tarkkaan soluihin jakamiseen tai likimääräiseen soluihin jakamiseen.

4.3.1 Tarkka solun jakaminen

Solut on jaettu tarkasti, jos kaikki solut ovat joko kokonaan vapaassa tilassa tai kokonaan esteessä. Tämä tarkoittaa, että vapaa reitti tulee löytymään, jos sellainen on mahdollista muodostaa. Ei ole tarkkaa minkä muotoisia solut ovat, mutta usein soluista tehdään puolisuunnikkaita tai kolmioita. Tärkeintä on robotin kyky päästä vapaasta solusta viereisiin vapaisiin soluihin.

Yksi tapa jakaa alue tarkasti soluihin on alueen pystysuora jakaminen. Esteiden tulee olla monikulmaisia tässä esitystavassa. Lähdetään vasemmalta liikkeelle ja kuljetaan niin kauan, kunnes esteen kulma tulee vastaan. Riippuen esteen sijainnista, piirretään solujen reuna pystysuoraan alueen ylä- tai alareunaan. Kun päästään alueen oikeaan reunaan, on koko vapaa-alue jaettu soluihin. Tarkasti soluihin jaettu tila voidaan esittää tilanvaihtokaaviossa. Tilanvaihtokaavio koostuu jokaisen solun keskipisteistä. Siirtymät solujen välillä voidaan esittää esimerkiksi aina solujen rajojen keskipisteiden läpi (Klancar 2017).

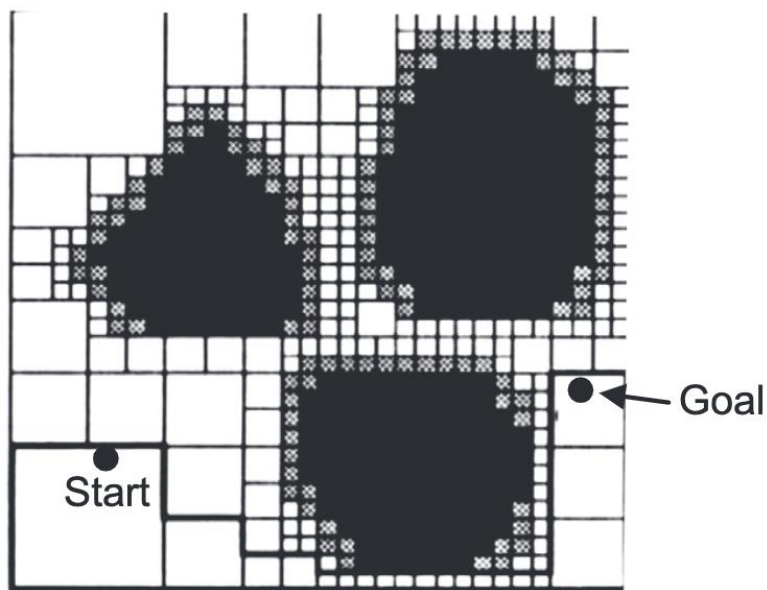
Hyöty solujen tarkkaan jakoon tulee ilmi esteiden määrästä, tiheydestä ja muodosta. Jos alueella on tiheästi monimutkaisia esteitä, pitää alue jakaa todella moneen soluun. Näin ollen laskennallinen tehokkuus laskee liian paljon. Toisaalta jos esteitä on vähän ja harvaan sijoiteltuna, alueen jakaminen soluihin on helppoa ja nopeaa. Vaikka alue olisi geometrisiltä mitoiltaan suuri, tulisi sinne pieni lukumäärä soluja. (Siegwart 2004)

4.3.2 Likimääräinen solun jakaminen

Alueen jakaminen likimääräisesti tarkoittaa, että solu voi olla vapaa, kokonaan esteessä tai osittain esteessä. Solu ei ole riippuvainen siis esteiden muodoista tai lukumäärästä. Kaikki solut, joissa esiintyy estettä, merkitään usein varatuiksi. Jos tila on jaettu yhtä suurin soluihin, ollaan näin saatu kaavio kuvaamaan tilan käyttöastetta.

Jokaisen solun keskipiste toimii pisteenä tilanvaihtokaavioille. Solusta toiseen voidaan siirtyä joko neljällä tai kahdeksalla tavalla. Vaihtoehtojen määrä riippuu siitä, sallitaanko diagonaalinen liike. Tämä on siis hyvin yksinkertainen tapa suorittaa jako, mutta approksimaation takia osa informaatiosta voi jäädä huomaamatta. Esimerkiksi esteet suurenevät ja kapeita väyliä voi jäädä huomaamatta tämän takia. Muisti tuottaa myös ongelmia. Alueen suurentaminen tai resoluution suurentaminen lisää muistin käyttöä huomattavasti.

Alueen jakaminen erikokoisiin soluihin on tuonut ratkaisuja vähäiseen tiedon häviämiseen pienellä muistilla. Esimerkkinä alueen jakamisesta erikokoisiin soluihin on quadtree menetelmä. Periaate tässä on jakaa solu, joka on osittain esteessä, neljään osaan. Näin tehdään niin kauan, kunnes on saavutettu haluttu resoluutio (kuva 5). Aloitettaessa yhdellä solulla, joka kattaa koko alueen, saadaan lopputulokseksi erisuuruiseksi soluiksi jaettu alue. (Klancar 2017)



Kuva 5. Quadtree menetelmällä jaettu alue. (Klancar 2017)

4.4 Keinotekoinen potentiaalitenttämennetelmä

Keinotekoinen potentiaalitenttämennetelmä on suosittu sen yksinkertaisuuden vuoksi. Idea tähän menetelmään on tullut luonnosta, esimerkkinä magneettitenttä tai pallo, joka vierii mäkeä alas. Magneettitentässä oleva partikkeli tai mäkeä alas vierivä pallo, pyrkivät aina kohti voiman lähdeä. Samaa ilmiötä pyritään jäljittelemään keinotekoisella potentiaalitentällä, joka vie robottia maaliin.

Alueella oleva maali ja esteet muodostavat joko hylkivän tai puoleensa vetävän voiman. (Garibotto 1991) Robotti oletetaan usein pisteeksi, joka kulkee kartassa esteiden ja maalin tuottavien voimien mukaan. Jos alueella on vain maali, syntyy vain puoleensa vetävä voima robottiin. Jokaisella ajanhetkellä lasketaan robotin sijaintiin vaikuttava maalin voima. Tuloksena robotti liikkuu voiman vaikuttamana maaliin. Jos alueella on esteitä, ne muodostavat hylkivän voiman. Näin ollen robotti pyrkii pois esteistä. Kun puoleensa vetävä voima ja hylkivä voima summataan, saadaan robotti joka kiertää esteet sulavasti ja päätyy maaliin.

Oletetaan robotti pistemäiseksi konfiguraatioavaruudessa. Maali q_{goal} esitetään usein neliöllisenä ”potentiaalienergiakaivona”, jossa maalissa on nolla energiaa,

$$P_{goal}(q) = \frac{1}{2}(q - q_{goal})^T K(q - q_{goal}) \quad (1)$$

missä K on symmetrinen varmasti positiivinen matriisi. Potentiaali tuottaa voiman

$$F_{goal}(q) = -\frac{\partial P_{goal}}{\partial q} = K(q_{goal} - q) \quad (2)$$

Voima on puoleensa vetävä suhteessa etäisyyteen maalista. Esteen B muodostama potentiaali voidaan laskea etäisyydestä $d(q,B)$ esteeseen

$$P_B(q) = \frac{k}{2d^2(q,B)} \quad (3)$$

missä k skaalaustekijä. Potentiaali on määritelty vain esteiden ulkona oleville pisteille. Esteiden tuottama voima on

$$F_B(q) = -\frac{\partial P_B}{\partial q} = \frac{k}{d^3(q,B)} \frac{\partial d}{\partial q} \quad (4)$$

Kokonaispotentiaali saadaan summaamalla puoleensa vetävän maalin potentiaali ja hylkivien esteiden potentiaali

$$P(q) = P_{goal}(q) + \sum_i P_{B_i}(q) \quad (5)$$

Näin kokonaisvoimaksi saadaan

$$F(q) = F_{goal}(q) + \sum_i F_{B_i}(q) \quad (6)$$

Huomioitavaa on, että puoleensa vetävien ja hylkivien voimien summa ei välttämättä anna minimiä tarkalleen pisteessä q_{goal} . (Lynch 2017) On myös yleistä asettaa raja potentiaalilin ja esteen maksimille. Ilman rajaa yksinkertainen este voisi tuottaa erittäin suuria voimia esteiden lähellä.

Potentiaalitenttämennetelmällä on kuitenkin rajoituksia. Paikallisia nollakohtia voi muodostua muuallekin kuin maaliin. Esteen muodosta ja koosta johtuen maalin puoleensa vetävä voima ja esteen hylkivä voima voivat olla yhteensä nolla tietyissä kohdissa. Esteet tulisi pyrkiä muodostamaan kuperiksi tämän riskin minimoimiseksi. Jos karttaan silti muodostuu paikallisia minimejä, on olemassa ratkaisuja niistä pois pääsyyn. On mahdollista peruuttaa pois minimistä ja käyttää vaihtoehtoista reittiä. Voi myös asettaa minimin kohdalle virtuaalivoiman tai suorittaa satunnaisia liikkeitä toivoen, että pääsee pois minimistä. Suurin ongelma on kuitenkin määrittää, milloin robotti on paikallisessa minimissä.

4.5 Otantamenetelmä

Tähän mennessä mainitut ratasuunnittelumennetodit vaativat tarkan esityksen konfiguraatioavaruuden vapaasta tilasta. Nostamalla vapausasteita niistä usein muodostuu hyvin raskaita laskettavia ja laskenta-aika kasvaa suureksi. Näissä tapauksissa otantamenetelmä voi olla ratkaisu.

Otantamenetelmässä satunnaisista pisteistä, jotka kuvaavat robotin konfiguraatiota, otetaan näytteitä. Tämän jälkeen tarkistetaan törmäysvaara pisteissä ja todetaan,

kuuluuko piste vapaaseen tilaan. Näin saadaan joukko pisteitä vapaalla alueella, joita yhdistämällä saadaan reitti alkupisteestä loppupisteeseen.

Tarkasti optimaalisen reitin löytämisen sijaan, otantamenetelmän tarkoitus on löytää nopeasti tyydyttävä ratkaisu moniulotteisessa ympäristössä. Valitut pisteet muodostavat tiekarttoja tai puita, jotka nopeasti arvioivat vapaan alueen. Tässä käytetään huomattavasti vähemmän pisteitä vapaan alueen arvioimiseen kuin korkea-resoluutioisella ruudukolla, jonka pisteet kasvavat eksponentiaalisesti dimensioiden kasvaessa.

Otantamenetelmä voidaan jakaa kahteen luokkaan, rapidly exploring random trees (RRT) ja probabilistic roadmaps (PRM). Näistä ensimmäinen käyttää puu-esitystä löytääkseen yksittäisen reitin, kun taas PRM luo usein reitistön konfiguraatioavaruuteen, josta on mahdollista etsiä useita reittejä.

4.5.1 RRT

RRT on metodi löytää reitti tietyistä alkupisteestä yhteen maaliin. Metodi kasvattaa yhden puukaavion alkupisteestä. Jokaisella iteraatiolla RRT lisää uuden yhteyden satunnaisesti valitun pisteen suunnassa olevaan pisteeseen kaaviossa.

Ensimmäisessä iteraatiossa aloituskonfiguraatio q_i esittää puukaaviota. Jokaisessa seuraavassa iteraatiossa konfiguraatio q_{rand} valitaan satunnaisesti ja lähin piste puukaaviosta q_{near} etsitään. Uusi piste q_{new} muodostetaan ennalta määrätyn pituuden d verran pisteestä q_{near} suuntaan q_{rand} . Jos q_{new} ja sen yhteys on pisteeseen q_{near} ovat vapaalla alueella, voidaan lisätä tämä yhteys puukaavioon. (Klancar 2017)

Puukaavion rakennus on valmis silloin, kun saavutetaan tietty iteraatioiden määrä tai kun tietty todennäköisyys saavutetaan. Kun algoritmi on valmis, ei oteta satunnaista pistettä alueelta yhdistettäväksi, vaan otetaan loppupiste. Loppupiste tarkastetaan, pystytäänkö se yhdistämään puukaavioon. Jos loppupistettä ei pysty yhdistämään, voi algoritmin ajoa jatkaa. Tämä metodi on todennäköisyyden osilta täydellinen tapa löytää reitti, joka tarkoittaa näytteiden lähestyessä ääretöntä, ratkaisuprosentti lähestyy 100%. Ongelmana voivat olla kapeat väylät esteiden välissä, joita on hankala löytää.

4.5.2 PRM

PRM metodin tavoitteena on muodostaa tiekartta vapaasta tilasta ennen kuin tarvitaan mitään yksityiskohtaista reittiä. Tiekartalla ei ole suuntaa, eli robotti voi liikkua kumpaankin suuntaan pisteiden välillä. Tiekartan valmistuttua alkupiste ja loppupiste lisätään karttaan ja reitinetsintäalgoritmillä haetaan optimaalisin reitti. PRM antaa mahdollisuuden rakentaa tiekartta nopeasti verrattuna tiekartan muodostamiseen korkearesoluutioisella ruudukolla. (Lynch 2017)

Alussa kartta on tyhjä, mutta se muodostuu toistamalla seuraavia askeleita. Satunnaisesti valittu piste q_{rand} valitaan vapaasta alueesta ja se lisätään karttaan. Yhtymäkohdat Q_n etsitään kartalta. Nämä yhtymäkohdat voi määrittää joko etsimällä $K:n$ verran viereisiä yhtymäkohtia tai pisteitä, tai etsimällä kaikki viereiset yhtymäkohdat jotka ovat etäisyyden D päässä pisteestä. Pitää huomata, että alussa ei välttämättä löydy viereisiä yhtymäkohtia tai pisteitä. Kun haluttu määrä pisteitä ja yhtymäkohtia on määritetty, on kartta valmis.

Lopullinen reitti löytyy sijoittamalla alkupiste ja loppupiste puukaavioon. Pisteet yhdistetään satunnaisten pisteiden tapaan lähimpään yhtymäkohtaan. Näin saadaan tiekartta, jota tutkimalla voi löytää optimaalisen reitin pisteiden välille. Kartan muodostamisen ja reitin etsimisen ei välttämättä tarvitse tapahtua täysin erillään. Reittiä voidaan etsiä rinnakkain karttaa muodostaessa. Jos reittiä ei löydy, voi kartan muodostamista jatkaa. Näin ollen sopiva määrä yhtymäkohtia saadaan etsittyä karttaa muodostaessa.

PRM on tehokas keino moniulotteiselle ympäristölle, mutta metodilla voi olla vaikeuksia löytää reitti, jos esteiden välissä kulkee kapeita polkuja. Ongelmaa voidaan lieventää muokkaamalla PRM algoritmia. Yksi tapa on täysin satunnaisesti pisteiden etsimisen sijaan painottaa pisteiden etsimistä esteiden lähelle. Näin saadaan etsittyä kapeita väyliä tehokkaammin ja tiekartta saadaan muodostettua pienemmällä määrällä työtä.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä käytiin läpi yleisesti erilaisia mobiilirobotin navigointijärjestelmiä. Ilman oikeanlaisia sensoreita, ei mobiilirobotti pysty toimimaan. Onnistuneeseen navigointiin vaaditaan usean sensorin tiedon yhdistäminen. Navigoinnin voidaan sanoa koostuvan kolmesta osa-alueesta, kartoitus, lokalisaatio sekä ratasuunnittelu. Robotin tulee pystyä löytämään oma sijainti valmiista kartasta tai kartasta, jota muodostetaan robotin liikkuesssa. SLAM on oleellinen asia erityisesti autonomisille mobiiliroboteille, koska se mahdollistaa navigoinnin ennalta tuntemattomassa ympäristössä. Ratasuunnittelulla on tarkoitus löytää törmäysvapaa reitti lähtöpisteestä loppupisteeseen. Ratasuunniteluun on monta eri lähestymistapaa. Riippuen esimerkiksi ympäristöstä, esteiden määrästä tai vapausasteista, voidaan valita sopiva ratasuunnittelutapa.

Mobiilirobotiikka on erittäin nopeasti kehittyvä osa-alue tekniikkaa. Mobiilirobotiikassa tila ja paino ovat usein rajoittavia tekijöitä. Tekniikan kehittyessä laskentatehoa sekä sensoreita saadaan pienempään tilaan. Näin saadaan kehitettyä uusia algoritmeja sekä tarkempia sensoreita mobiilirobottiin. Tällä hetkellä mobiilirobotit ovat käytössä lähinnä teollisuudessa, mutta navigointijärjestelmien kehittyessä mobiilirobotit voivat tuoda sovellutuksia teollisuuden ulkopuolelle.

LÄHDELUETTELO

Latombe, J.-C., 1991. Robot Motion Planning. New York: springer science, 651 s. ISBN 0-7923-9129-2

Tzafestas, S. G., 2014. Introduction to Mobile Robot Control. London: Elsevier, 663 s. ISBN 978-0-12-417049-0

Lynch, K. M. and Park, F. C., 2017. Modern Robotics Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press, 624 s. ISBN 9781107156302

Siegwart, R. and Nourbakhsh, I. R., 2004. Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge, Mass: MIT Press, 321 s. ISBN 0-262-19502-X

Klancar G., Zdesar A., Blazic S., Skrjanc I., 2017. Wheeled Mobile Robotics: From Fundamentals Towards Autonomous Systems. Butterworth-Heinemann, 492 s. ISBN 978-0-12-804204-5

Garibotto G., Masciangelo S., 1991. Path planning using the potential field approach navigation. Pisa: IEEE ISBN 0-7803-0078-5

Siciliano B. & Khatib O., 2008. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer., 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4

Corke P., 2011. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in Matlab. Berlin: Springer., 570 s. ISBN 978-3-642-20143-1

Everett H.R., 1995. Sensors for mobile robots: theory and application. Wellesley: A K Peters, Ltd, 528 s. ISBN 1-56881-048-2

Fonselius J., Laitinen E., Pekkola K., Sampo A., Välimaa T., 1994. Koneautomaatio. Anturit. 3. Painos. Helsinki: Painatuskeskus Oy, 167 s. ISBN 951-37-1480

Ge S., Lewis F., *Autonomous Mobile Robots: sensing, control, decision making and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 696 s. ISBN 0-8493-3748-8

Lamkin-Kennard K., Popovic M., 2019. *Sensors: Natural and Synthetic Sensors*. Elsevier, 668 s. ISBN 978-0-12-812939-5

Goel P., Roumeliotis S., Sukhatme G., 1999. *Robot Localization Using Relative and Absolute Position Estimates*. Los Angeles: University of Southern California, 7 s.

Savaria D., 2010. *V-SLAM: Vision-Based Simultaneous Localization and Map Building for an Autonomous Mobile Robot*. Salt Lake City: IEEE, ISBN 978-1-4244-5426-6