



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

LIDAR TUTKAN HYÖDYNTÄMINEN ROBOTIIKASSA

Valteri Lappeteläinen

TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2023

TIIVISTELMÄ

LiDAR tutkan hyödyntäminen robotiikassa

Valteri Lappeteläinen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 32s. + 1 liite

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tässä kandidaatin työssä tavoitteena on perehtyä LiDARIin ja tehdä kirjallisuuskatsaus LiDARin hyödyntämisestä robotiikassa.

Työ aloitetaan perehtymällä robotiikkaan, sen historiaan ja käydään yleistä asiaa ja teoriaa muun muassa erilaisista robottityypeistä. Seuraavaksi käydään läpi LiDARIA, sen historiaa sekä teoriaa ja rakennetta. Lopuksi kerrotaan miten LiDARIA hyödynnetään robotiikassa ja kerrotaan sen sovelluskohteista esimerkiksi tehtaissa. Yhteenvedossa mietitään, miten LiDAR on muuttanut robotiikkaa ja miten se voisi muuttaa sitä tulevaisuudessa. Työn lukija saa peruskäsityksen monelle tuntemattomasta LiDARista ja siitä, miten robotiikka sitä hyödyntää.

Asiasanat: LiDAR, Robotiikka, Automaatio

ABSTRACT

Use of LiDAR radar in robotics

Valteri Lappeteläinen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 32 pp. + 1 Appendix

Supervisor(s) at the university: Yrjö Louhialmi

In this bachelor's thesis, the goal is to become familiar with LiDAR and to do a literature review on the use of LiDAR in robotics.

The work begins by familiarizing yourself with robotics, its history, and general issues and theory about different types of robots, among other things. Next, we will review LiDAR, its history, theory and structure. Finally, it will be explained how LiDAR is used in robotics and its applications in factories, for example. In the summary, we think about how LiDAR has changed robotics and how it could change it in the future. The reader of the work gets a basic understanding of LiDAR, unknown to many, and how robotics utilizes it.

Keywords: LiDAR, Robotics, Automation

ALKUSANAT

Työn aiheen valitseminen oli osittain helppoa, sillä robotiikka on kiinnostanut minua jo pitkään. LiDAR valotutkasta en vielä tiennyt paljoa, vaikka sitä on käytetty työpaikkassani. Tämän vuoksi halusin oppia siitä lisää.

Kiitän työssäni ohjaajaani Yrjö Louhialmea aiheen valinnasta ja neuvomisesta.

Oulu, 23.03.2023

Valtteri Leppeteläinen
Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO.....	7
2 ROBOTIIKKA.....	8
2.1 Historia ja kehitys.....	9
2.2 Robotiikka teollisuudessa ja tuotannossa.....	11
2.3 Teollisuusrobotiikka ja yhteistoimintarobotiikka.....	12
2.4 Robottityypit.....	13
2.4.1 Suorakulmainen robotti.....	13
2.4.2 Sylinterinen robotti.....	14
2.4.3 SCARA robotti.....	14
2.4.4 Kiertyvänivelinen robotti.....	15
3 LIDAR.....	16
3.1 Historia.....	18
3.2 Sähkömekaaninen skannaus.....	18
3.3 TOF.....	18
3.4 LiDAR rakenne.....	19
3.4.1 Laser.....	21
3.4.2 GPS vastaanotin.....	21
3.4.3 Skanneri ja optiikka.....	21
4 LIDAR ROBOTIIKASSA.....	23
4.1 LiDARin sovelluskohteet robotiikassa.....	24
5 YHTEENVETO.....	28
LÄHDELUETTELO.....	29

LIITEET:

Liite 1. Yhteistoimintarobottien periaatteelliset sovellukset

MERKINNÄT JA LYHENTEET

ADAS	Kehittynyt kuljettajan avustusjärjestelmä
CW	Jatkuva-aaltainen
IMU	Inertiamittausyksikkö
LiDAR	Valon lentoajan avulla etäisyyttä mittaava järjestelmä
MEMS	Mikrosysteemi
TOF	Signaalin lentoaika

1 JOHDANTO

Robotiikka ja automaatio ovat koko ajan kasvussa maailmassa. Teollisuuden yritykset investoivat uusia laitteita vanhojen rikki mennessä. Entinen laite on saattanut olla manuaalisesti toimiva, mutta uusi laite toimii automaattisesti. Kaikki laitteet eivät kuitenkaan ole suoraan toimivia tiettyyn tehtävään, jolloin uusia menetelmiäkin täytyy keksiä.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi LiDAR tutkan hyödyntämistä robotiikassa. Robotiikassa sitä käytetään usein navigointiin, autonomisiin laitteisiin ja teollisuusrobotteihin. Asia voi olla monelle uusi ja tuntematon, joten asiasta on mielenkiintoista lähteä etsimään uutta tietoa ja tuottaa siitä kirjallisuuskatsaus. Lisäksi aihe on ajankohtainen nyt ja tulevaisuudessakin, sillä autonomia ja sen laitteet yleistyvät vuosi vuodelta.

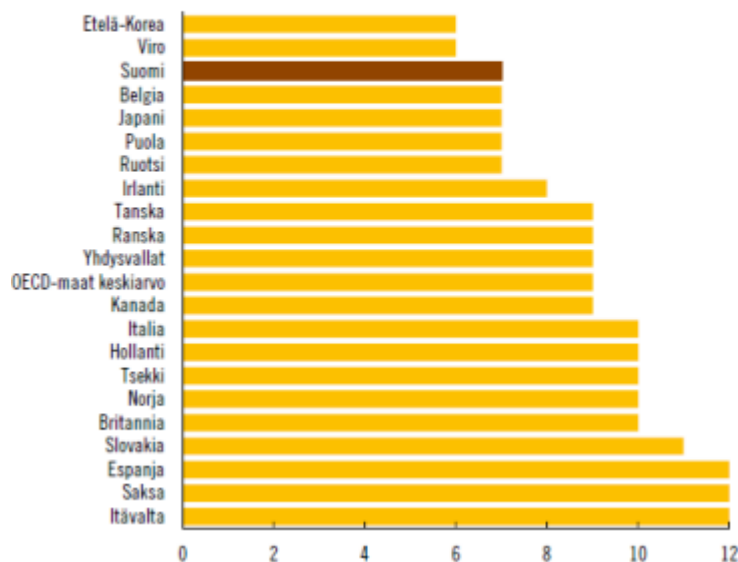
Työstä on rajattu pois LiDARin eri skannausmenetelmiä sekä LiDARin rakenteesta on kerrottu vain oleellimmat komponentit.

2 ROBOTIIKKA

Robotti on mekaaninen laite tai kone, joka osaa jollain tavoin toimia fyysisessä maailmassa. Robotiikka on taas kasvava synteettinen tiedeala, joka liittyy ohjelmointityöhön, automaatioon, elektroniikkaan sekä konetekniikkaan. Siinä energia sekä tieto vaihtuu koneen ja sen ympäristön välillä kohti tiettyjä tavoitteita. Robotiikan ammattiosaajilla on yleensä automaation moniteknisen koulutuksen tausta. Automaation lisäksi robotiikkaan yhdistetään sanat tekoäly, neurolaskenta, digitaaliset alustat, konenäkö, mittaustekniikka, signaalinkäsittely sekä simulointi. Robotiikka on jo nyt tärkeää suomalaisella teollisuudenalalla, vaikka se viekin osittain ihmisten työpaikkoja. Toisaalta osa roboteista kykenee toimimaan yhteistyössä ihmisten kanssa, jolloin uusia ja erilaisia työpaikkoja syntyy. Voimme siis sanoa, että työn sisältö ja työnimikkeet vain muuttuvat. Automaatio ja robotiikka onkin korvannut ruumiillista työtä vaativia töitä. Kuvan 1 mukaan on ennustettu, että automatisoituminen uhkaa seitsemää prosenttia Suomen tämän hetken työpaikoista 20 vuoden kuluessa. (Ventä et al., 2018)

**KUVIO 1 AUTOMATISOITUMISEN UHKAAMAT TYÖPAIKAT*
OECD-MAISSA (PROSENTTIA TYÖPAIKOISTA)**

* KORKEAN RISKIN TYÖPAIKAT, JOIDEN AUTOMAATIOILLA KORVAAMISEN TODENNÄKÖISYYS VÄHINTÄÄN 70 PROSENTTIA. LÄHDE: ARNTZ YM. (2016).



Kuva 1. Taulukko automatisoitumisen uhkaamista työpaikoista (Ventä et al., 2018)

2.1 Historia ja kehitys

Vuonna 1948 Norbert Wiener muotoili käytännön robotiikan perustan, mutta täysin autonomiset robotit ilmestyivät vasta 1900-luvun lopussa. Ensimmäinen digitaalisesti ohjattava ja ohjelmoitava robotti oli nimeltään Unimate vuonna 1961. Sen tarkoitus oli nostaa kuumia metallikappaleita painevalukoneesta ja pinota ne. Ensimmäistä kertaa sanaa ”robotiikka” käytti Isaac Asimov vuonna 1942 romaanissaan ”Runaround”. Tuossa romaanissa hän määritteli kolme robotiikan sääntöä, joita kutsutaan nykyään robotiikan laiksi. Teollisuusrobotiikka alkoi 1950-luvulla. (Gasparetto & Scalera, 2019)

Voimme jakaa robotiikan aikakauden kolmeen sukupolveen: vuodet 1950–1967, 1968–1977 ja 1978–1999. Tässä katsauksessa emme käy läpi vuosia 2000–2022.

Ensimmäisen sukupolven (1950–1967) robotit olivat periaatteessa ohjelmoitavia koneita. Ne eivät oikeastaan kyenneet hallitsemaan tehtävien suorittamista. Robotit varustettiin matalan teknologian laitteilla ja lähes kaikki käyttivät pneumaattisia toimilaitteita, joita ohjattiin eräänlaisilla loogisilla porteilla. Lopulta ensimmäisen sukupolven robotit pystyivät suorittamaan lastaus- ja purkutoimenpiteitä tai materiaalinkäsittelyä. Vuonna 1954 George Devol suunnitteli laitteen ”Programmable Article Transfer”, joka oli perusta Unimate-kehitykselle. Unimatea pidetään ensimmäisenä todellisena teollisuusrobotina. Vuonna 1961 hydraulisesti toimiva Unimate asennettiin General Motorsin tehtaaseen, jossa sitä käytettiin osien poistamiseen painevalukoneesta. Tämän jälkeen robottien kysyntä ja kasvu nousi. Muun muassa AMF Corporation valmisti uuden robotin ”Versatran” vuonna 1962. Se oli myös ensimmäinen robotti, joka asennettiin Japaniin. Tämä johti Kawasaki-Unimate 2000:n kehittämiseen Japanissa. Nykyään Japani on yksi alan johtava maa maailmassa. Ensimmäinen eurooppalainen robotti asennettiin Ruotsiin vuonna 1967. Tämä robotti suoritti yksinkertaista poimintaa ja keräilyä. Hitsausrobotin kehitti ensimmäisenä Unimation. (Gasparetto & Scalera, 2019)

Toisen sukupolven (1968–1977) robotit olivat ohjelmoitavia peruskoneita, joilla oli alkeelliset kyvyt tunnistaa ulkoinen ympäristö. Niiden ohjausjärjestelmästä koostui mikroprosessoreista ja ohjelmoitavasta logiikasta. Nämä robotit pystyivät suorittamaan monimutkaisempia tehtäviä, mutta jokaisella robotilla oli oma tehtävänsä, jonka takia ne

jouduttiin ohjelmoimaan aina uudelleen eri tehtäviin. Hydraulisista toimilaitteista siirtyminen sähköisiin toimilaitteisiin tapahtui 1970-luvulla, kun ohjaamiseen tarvittavat elektroniset komponentit saavuttivat teknisen kypsyyden. Myös taloudellinen tilanne painosti siirtymään sähkökäyttöisiin robotteihin: esimerkiksi raakaöljyn hinta kasvoi niin suuresti. Tämä oli myös osasyynä teollisuusrobottien asennuksille, jolloin ne lisääntyivät jopa 30 % vuodessa 1970-luvun lopulla. Sähkökäyttöiset robotit olivat konetekniikan opiskelija Victor Scheinmanin ansiota. Hän rakensi kuuluisan Stanford Arm -robotin vuonna 1969, jossa oli sähkömoottori ja jota ohjattiin PDP-6 mikroprosessorilla. Robottiin oli asennettu myös joitain sensoreita nivelten sijainnin ja nopeuden mittaamiseksi. Vuonna 1973 Scheinman suunnitteli toisen sähkörobotin Vicarmin. Se oli pienempi, jonka takia sen käyttötarkoitus oli osien kokoamisessa. Vuonna 1978 Unimation osti Vicarmin tehneen yhtiön, jonka jälkeen syntyi kuuluisa PUMA -robotti. PUMA robotin kinematiikkaa saatetaan käyttää tänä päivänäkin kouluissa. Vuonna 1974 ASEA rakensi kuuluisia IRB-sarjan robotteja. Näistä tunnetuin oli IRB-6, joka pystyi tekemään monimutkaisia tehtäviä kuten kaarihitsausta tai koneistusta. (Gasparetto & Scalera, 2019)

Kolmannen sukupolven roboteilla (1978–1999) oli entistä laajempi vuorovaikutus operaattorin sekä ympäristön (näkö, ääni) kanssa. Robotit varustettiin servo ohjaimilla ja ne pystyivät suorittamaan monimutkaisiakin tehtäviä. Lisäksi ne pystyttiin ohjelmoimaan joko online tai offline -tilassa, joka oli kytketty PLC:hen tai PC:hen. Vuonna 1978 japanilainen tiedemies ehdotti uutta kinemaattista rakennetta: kolme kiertoliitosta, joissa on yhdensuuntaiset akselit ja prismaliitos, joka on kinemaattisen ketjun päässä. Tämän robotin nimeksi tuli SCARA. Se soveltui yksinkertaiseen ja nopeaan esineiden kokoamiseen. Robotiikan suosio kasvoi 1980-luvulla, kun se herätti toimittajien, tiedemiesten ja tavallisten ihmisten kiinnostuksen. Tämä aika oli robottien kehityksen kannalta oleellinen, sillä niistä tuli monipuolisempia laitteiston ja ohjelmiston suhteen. Robotteihin lisättiin erilaisia skannereita ja sensoreita, jolloin niistä tuli enemmän ”älykkäitä”. Vuonna 1992 ilmestyneessä Delta -robotissa oli kolme translaatiota ja yksi rotaatio DOF. Nämä ominaisuudet kopioitiin moniin manipulaattoreihin ja ensimmäisen sovelluksen kehitti sveitsiläinen yritys Demarex vuonna 1992. Vielä vuonna 1994 Motoman kehitti ensimmäisen robotin ohjausjärjestelmän, jolla synkronoitiin kahta robottia. (Gasparetto & Scalera, 2019)

Vuodesta 2000 alkaen katsotaan alkavan robottien neljäs sukupolvi. Tämän sukupolven roboteilla on korkean tason ominaisuuksia kuten laskelmien suorittaminen, looginen päättely, syväoppiminen ja yhteistyökäyttäytyminen. (Gasparetto & Scalera, 2019)

2.2 Robotiikka teollisuudessa ja tuotannossa

Robotiikan ja automaation kehitys on kohentanut suuresti tehdastyön tuottavuutta. Se on muuttanut työtehtävien sisältöä ja sitä kautta tuottavuutta. Tuottavuus on ollut lähes 35-kertainen vuoden 1926 tasoon verrattuna. Teollisuuden lisäksi robotiikan kehitys on vaikuttanut kaupankäyntiin. Internetin välityksellä voidaan tavarantoimittajien toimintaa koordinoita ja sopeuttaa se paremmin omaan toimintaan. Robotiikan soveltamismahdollisuudet ovat siis monipuoliset ja erilaiset eri toimialoille. (Ventä et al., 2018)

Tuotannossa robotiikka on yleistynyt melkein jokaisessa tehtaassa. Robottijärjestelmät seuraavat kameroilla ja sensoreilla tuotannon liikettä. Ohjausjärjestelmä pystyy tunnistamaan ihmisen, jolloin robottien kanssa toimiminen on turvallista. Työturvallisuus onkin tärkeä osa-alue, kun robotiikka on kyseessä. Robotille yleisimpiä ja sopivimpia tehtäviä ovat mm. tavaroiden haku ja erilaiset siirrot, sillä robotille voidaan opettaa rajaton määrä kulkuratakombinaatioita sekä työtehtäviä. (Ventä et al., 2018)

Robottien ohjausta voidaan säädellä myös puhumalla ja robotti voi kertoa havainnoistaan puhumalla muun muassa radioteitse. Lisäksi se voi hyödyntää konenäköominaisuuksiaan, jolloin sillä voi tehdä laaduntarkastusvaiheita ja lajitteluja, jos tuote on vioittunut. Voimme luottaa siihen, että robotti tekee aina saman rutiinin työtehtävässään ja tekeminen ei poikkea työtehtävästä koskaan. Lisäksi robotti ei voi olla myöhässä työstään toisin kuin työntekijä. Soveltavuutta rajoittaa kuitenkin aivotoiminnan puute eli robotit selviytyvät tehtävistä, jotka niille on ohjelmoitu ennalta. Silloin tällöin syntyy kuitenkin odottamattomia tilanteita, joille ei voi mitään. (Ventä et al., 2018)

2.3 Teollisuusrobotiikka ja yhteistoimintarobotiikka

Robotiikassa on useita eri alakäsitteitä. Koska työ koskee konetekniikkaa, käyn tässä katsauksessa läpi vain teollisuusrobotiikkaa ja yhteistoimintarobotiikkaa.

Teollisuusrobotti on laite, joka hyödyntää automaatiota monipuolisesti teollisuudessa. Niillä on hyvin rajallinen kyky olla vuorovaikutuksessa ja fyysisesti tekemisissä ihmisten kanssa. Standardin SFS-EN ISO 10218-1 mukaan teollisuusrobotti on ”automaatiosovelluksissa käytettäväksi tarkoitettu automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmitavissa oleva monikäyttöinen käsittelylaite, jonka akseleista vähintään kolme on ohjelmitavissa ja joka voi olla kiinteästi asennettu tai liikkuva”. (SFS-EN ISO 10218-1, 2009) Lisäksi standardin mukaan siihen kuuluvat:

- käsittelylaite, toimilaitteet mukaan lukien
- ohjauslaite, mukaan luettuna kannettava ohjelmointilaitte ja tiedonsiirron rajapinnat. (SFS-EN ISO 10218-1, 2009)

Yhtä liikettä varten tehtyä mekaanista laitetta ei siis voida luokitella teollisuusrobotiksi. Täysin itsenäisesti ajattelevia robotteja ei vielä kuitenkaan ole keksitty. (Kragic et al., 2018)

Yhteistoimintarobottien tarkoitus on tehdä yhteistyötä ihmisten kanssa. Se ei korvaa suoraan ihmistä vaan se tekee esimerkiksi voimaa vaativat työt. Sovellusesimerkkejä löytyy paljon erilaisia (liite 1). Standardin SFS-EN ISO 10218-2 mukaan yhteistoimintarobotit määritellään näin: ”Yhteistoiminta on erityinen ihmisen ja robotin välinen toiminta, jossa robotti jakaa yhteisen työtilan”. (SFS-EN ISO 10218-2, 2011)

Lisäksi yhteistoiminta on:

- käytettävissä vain etukäteen määritetyissä tehtävissä
- mahdollinen vain, kun kaikki vaadittavat turvallisuustoimenpiteet ovat aktiivisena

- vain roboteille, joiden ominaisuudet on erityisesti suunniteltu yhteistoimintaan standardin ISO 10218-1 mukaisesti. (SFS-EN ISO 10218-2, 2011)

Jotta yhteistyörobotit voisivat oppia ihmisistä, niiden on ensin kyettävä tunnistamaan merkitykselliset toimet. Tehokkain tapa tehdä tämä on varustaa robotti kyvyllä ymmärtää ihmisen fyysisiä toimintoja ja verbaalista viestintää. On kuitenkin mahdotonta oppia tämä vain muutamasta ihmisesittelystä, sillä se vaatii lisäksi malleja dynamiikasta. Tämä tarkoittaa, että tällä hetkellä ei ole realistista rakentaa täysin autonomista robottia. (Kragic et al., 2018)

2.4 Robottityypit

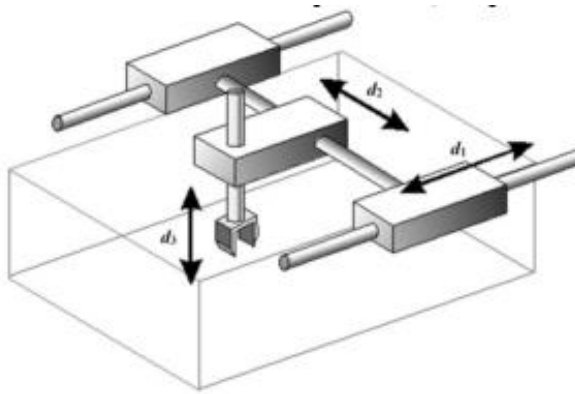
Valmistajat kehittävät uusia robottityyppejä jatkuvasti. Tällä hetkellä käytössä ovat ainakin:

- Suorakulmainen robotti
- Sylinterinen robotti
- SCARA robotti
- Kiertyvänivelinen robotti

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan robottityypeistä hieman.

2.4.1 Suorakulmainen robotti

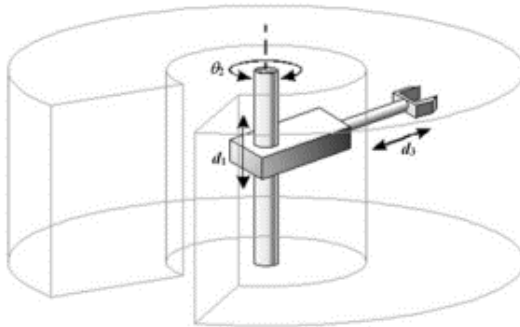
Suorakulmaisella robotilla on kolme lineaarista liikeakselia (X, Y, Z). Ne on rakennettu kolmesta keskenään ortogonaalisista P-liitoksista, vaihtelevilla pituuksilla d1, d2 ja d3. Suorakulmaisia robotteja käytetään yleensä poiminnan ja asettelun työtehtäviin ja raskaiden kuormien liikuttamiseen. Suorakulmaisen robotin hahmotelma on kuvassa 2. (Williams, 2019)



Kuva 2. Hahmotelma suorakulmaisesta robotista. (Williams, 2019)

2.4.2 Sylinterinen robotti

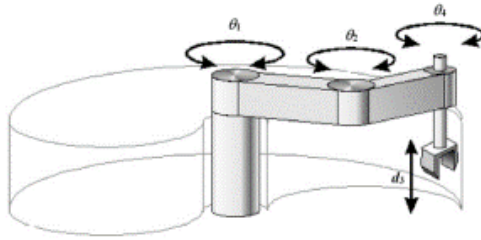
Sylinterirobotit ovat nykyään harvinaisempia. Niitä ohjataan säädettävällä korkeudella d_1 , kulmalla θ_2 ja säädettävällä säteellä d_3 (P-nivel, R-nivel, P-nivel). Sylinterisiä robotteja käytetään yleisesti kokoonpanotehtävissä. Sylinterisen robotin hahmotelma on kuvassa 3. (Williams, 2019)



Kuva 3. Hahmotelma sylinterirobotista. (Williams, 2019)

2.4.3 SCARA-robotti

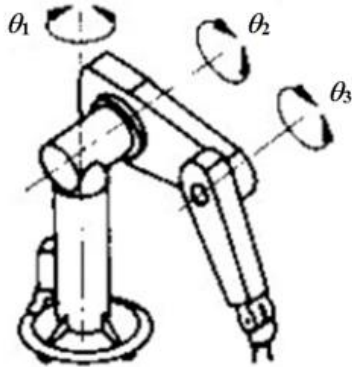
SCARA tulee sanoista Selective Compliance Assembly Robot Arm. Roboteissa on kaksi R-nivelä (θ_1 , θ_2) sekä P nivel d_3 , joka on kohtisuorassa kyseiseen liiketasoon nähden. saavuttaakseen 3D (xyz) -työtilan. R nivelkulma θ_4 on yksikiertoinen SCARA-robotin ranne. Käytetään yleensä kappaleiden nostamiseen liukuhihnalta ja kokoonpanorobottina. SCARA robotin hahmotelma on kuvassa 4. (Williams, 2019)



Kuva 4. Hahmotelma SCARA -robotista (Williams, 2019)

2.4.4 Kiertyvänivelinen robotti

Kiertyväniveliset robotit muistuttava ihmisen kättä 3D-liikkeessään. Niissä on kolme R-niveltä, joissa on kolme kulmaa θ_1 , θ_2 ja θ_3 . Kiertyväniveliset robotit ovat monipuolisia, vaikka niillä onkin vaikeampi kinematiikka ja dynamiikka verrattuna muihin. Ne ovat yleisimpiä teollisuusrobotteja. Kiertyvänivelisen robotin hahmotelma on kuvassa 5. (Williams, 2019)

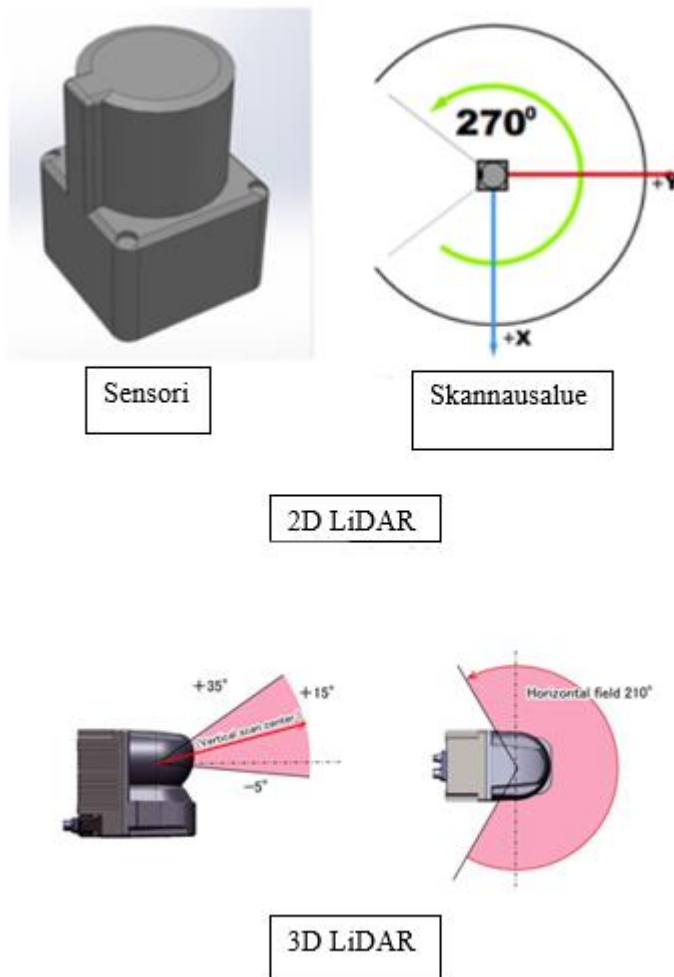


Kuva 5. Hahmotelma kiertyvänivelisestä robotista. (Williams, 2019)

3 LIDAR

LiDAR on valontunnistus- ja etäisyysteknologiaa, joka yleistynyt viime vuosina monissa sovelluksissa kuten navigoinnissa, robotiikassa, kaukokartoituksissa ja ajoavusteisissa järjestelmissä (ADAS). Tämä johtuu pääasiassa LiDARin ominaisuuksien parantumisista, joita ovat etäisyyden mittaaminen, tarkkuus, virrankulutus sekä mitat ja paino. Skannausmekanismeja on neljä erilaista: optomekaaniset, sähkömekaaniset, MEMS ja solid-state skannausmenetelmät. LiDAR -järjestelmissä yleisin mekanismi on sähkömekaaninen skannaus, kun taas LiDAR instrumenteista kaupallisesti saatavilla oleva TOF (time of flight) on yleisin vaihtoehto 1D -muuntamisesta 3D -järjestelmään. Se mittaa aikaa, kun valosignaali on lähtenyt sensorista kohti ympäristöä ja tullut takaisin vastaanottimeen.

LiDAR voi skannata aluetta 1D, 2D sekä 3D -muodoissa kuten kuvassa 6. 2D-skannerit ovat käytännöllisempiä, kun suoritetaan havaitsemis- tai etäisyystehtäviä. Kaksiulotteiset LiDARit toimivat siis vain yhdellä skannaustasolla, kun taas kolmiulotteiset antavat mittaustietoja kolmessa suunnassa. Tässä katsauksessa käydään läpi vain sähkömekaanista skannausta sekä TOF-instrumenttia. Erilaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että sähkömekaaninen skannaus onkin saavuttanut korkean laadun muihin verrattuna. (Raj et al., 2020)



Kuva 6. 2D ja 3D LiDARien ulottuvuudet. (Hokuyo Automatic, 2009)

LiDAReita on kahdenlaista: pulssitettu ja jatkuva-aaltainen LiDAR. Pulssitettu LiDAR toimii huomattavasti jatkuva-aaltaisia signaaleja suuremmilla valopulsseilla, jonka takia sillä, voidaan mitata suurempia etäisyyksiä. CW (continuous wave) LiDAR moduloi amplitudia tai taajuutta lähettääkseen jatkuvaa valosignaalia. Amplitudumoduloidussa LiDARissa valosignaalin amplitudia moduloidaan joko sinifunktion mukaisesti tai satunnaisesti. Taajuusmoduloidussa LiDARissa moduloidaan valosignaalin intensiteettiä ohjaavan funktion taajuutta. CW LiDARilla etäisyystarkkuus on parempi kuin pulssitetulla. (Lum et al., 2018)

3.1 Historia

Etäisyyden mittausta valonsäteellä on käytetty ensimmäisen kerran jo 1930-luvulla. Pilvien määrittämiseen käytettiin valopulsseja vuonna 1938. Pian laserin keksimisen jälkeen keksittiin ensimmäinen LiDAR, jota hyödynnettiin lentokoneissa. Sen esitteli Malcom Stich Hughes Aircraftilta vuonna 1961. He käyttivät sitä seurantaan. (Mehendale & Neoge, 2020)

Aluksi LiDARia kutsuttiin Colidariksi eli ”Koherentti valon havaitseminen ja vaihtelu”. Colidarin avulla on johdettu monia muita järjestelmiä kuten laseretäisyysmittarit tai laserkorkeusmittarit. Aluksi sitä hyödynsi enimmäkseen armeija, mutta 1970-luvulla NASA alkoi hyödyntämään sitä vesien ja ilmakehän mittauksissa. (Mehendale & Neoge, 2020)

1980-luvun puolivälissä oli luotettavien paikannusjärjestelmien puute ja antureiden tarve kasvoi nopeasti. Tämä lopulta johti LiDAR -tutkimukseen ja sen kehittämiseen. LiDAR osoittautui parhaaksi anturiksi ilmafotogrammetriassa. 1990-luvun loppuun mennessä tämä tekniikka oli johtavassa asemassa erittäin tarkassa paikkatiedossa. (Mehendale & Neoge, 2020)

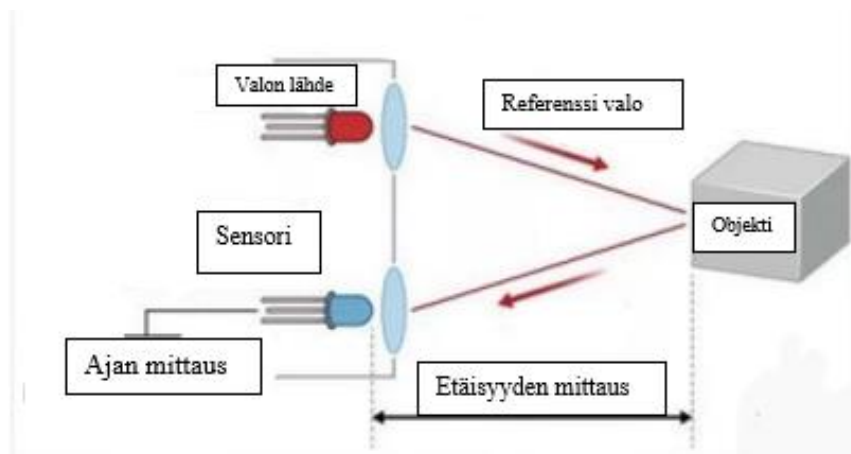
3.2 Sähkömekaaninen skannaus

Sähkömekaanisella skannauksella tarkoitetaan sähkömoottoreiden käyttöä mekaanisella vaiheella. 3D -instrumentti rakennetaan 2D LiDARin pohjalle siten että 2D -instrumentti ja sähkömoottorit suunnataan ja asennetaan erilaisiin mahdollisiin yhdistelmiin 3D -skannauksen saamiseksi. Välttämätöntä on optimoida skannerin suunta sovelluksen tarpeen mukaan. (Raj et al., 2020)

3.3 TOF

TOF eli ”time of flight” on yleisin vaihtoehto LiDARin käyttöön. Toimintaperiaate perustuu nimensä mukaisesti lentoaikaan perustuvaksi etäisyysmittausjärjestelmäksi. Ne tuottavat syvyyskuvan, jonka jokainen pikseli ”kuvataan”. 3D-rakenne arvioidaan

suoraan ilman perinteisen tietokonenäön apua. Tälle tunnistusmuodolle on monia käytännön sovelluksia kuten robottinavigointi ja 3D rekonstruktio. Ongelmia TOF -kameralle on alhainen syvyystarkkuus ja alhainen resoluutio. Mittaustarkkuutta rajoittaa esimerkiksi IR-signaali. Ongelmia syntyy myös, jos kamera tai kohde liikkuu, jolloin mittaus voi epäonnistua. Kuvassa 7 esitetään TOF toiminnon toimintaperiaate. (Liu et al., 2018)



Kuva 7. TOF toiminnon periaate. (Liu et al., 2018)

3.4 LiDAR rakenne

LiDARin suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä on monia, vaikka LiDAR periaatteessa koostuu vain vastaanottimesta ja lähettimestä. Lähettimestä lähtee lasersäde lyhyinä valopulseina, jotka synnyttävät tietyt spektriominaisuudet. Jotkin järjestelmät käyttävät säteenlaajentajaa vähentämään säteen hajoamista ilmakehään. Vastaanottimessa teleskooppi kerää ilmakehästä takaisin sironeet fotonit. LiDARin yksinkertainen signaali voidaan kirjoittaa muodossa yhtälön (1) mukaisesti: (Weitkamp, 2006)

$$P(R) = KG(R)\beta(R)T(R) \quad (1)$$

jossa P on paluusignaalin voimakkuus, R on etäisyys kohteesta, K on LiDAR järjestelmän suorituskyky ja G on etäisyysriippuva mittausero. β kuvaa takaisinsironnan voimakkuutta ja T eli transmissio-termi signaalin vaimenemista, kun se on kimmonnut

takaisin sensorille sironnan jälkeen. Suorituskykyä kuvaava K voidaan esittää yhtälön (2) muodossa:

$$K = P_0 c \tau 2A \eta \quad (2)$$

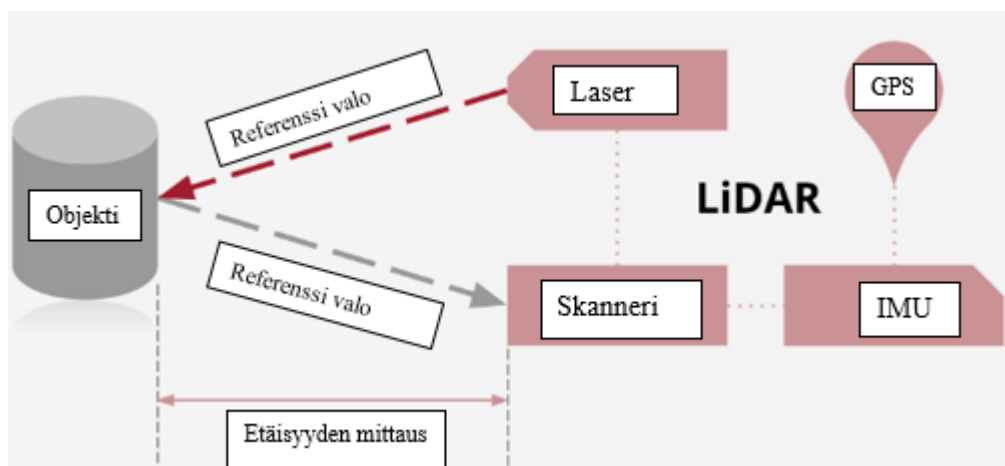
jossa P_0 on laserpulssin teho, c on valonnopeus, τ on pulssin pituus, A on vastaanottimen optiikan pinta-ala ja η on komponenttien kokonaishyötysuhde. Linssien läpäisevyys ja sensorin herkkyys muodostavat kokonaishyötysuhteen.

Lisäksi etäisyys saadaan laskettua kaavalla (3):

$$d = 0.5 * c * t \quad (3)$$

jossa d on anturin ja kohteen välinen etäisyys, c on valon nopeus ja t on aika, joka tarvitaan laserpulssin kulkeutumiseen laiteesta kohteeseen ja takaisin. (Silva et al., 2018)

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan hieman laserista, sensorista ja optiikasta. Kuvassa 8 on esitetty LiDARin rakennetta.



Kuva 8. LiDAR rakenne. (Puzzo L, 2021)

3.4.1 Laser

Lasereita on olemassa montaa erilaista ominaisuuksien suhteen. Eroja syntyy hinnassa, tehossa, onko laser jatkuva vai pulssitettu sekä saavutettu monokromaattisuus eli aallonpituuskaistanleveys valolla. Lisäksi tietyillä lasereilla saadaan vain tietty aallonpituus, joten käyttökohde rajoittaa laserin vaihtoehtoja. Kaikki laserit toimivat kuitenkin samalla periaatteella eli valo vahvistetaan stimuloidulla emissiolla.

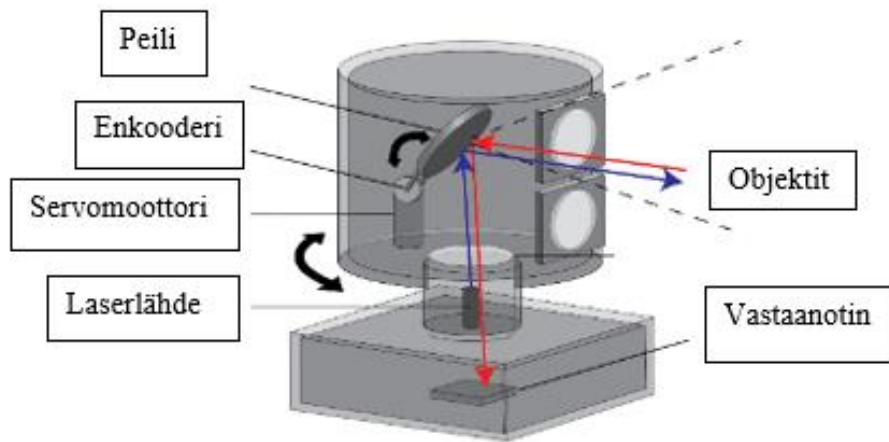
Suurimmat haasteet lasereissa ovat kokonaisteho, pulssin leveys ja aallonpituus. Kokonaisteho rajoittaa maksimietäisyyttä, pulssinleveys määrittää lyhimmän mahdollisen sensorin aktivointiajan ja aallonpituudessa täytyy ottaa huomioon olosuhteet kuten absorptiokerroin. Muita haasteita ovat silmäturvallisuus ja sensorin vaste aallonpituuksille. (Bretenaker & Treps, 2014)

3.4.2 GPS vastaanotin

Paikannus perustuu GPS-järjestelmään ja mobiilijärjestelmien tapauksessa IMU:un. Yhdessä nämä muodostavat anturin sijainnin joka hetkessä, ja jos korreloimme tarkasti LiDAR hakuajat sijaintiin, skannaus sijoitetaan tarkasti georeferoituun tilaan esimerkiksi UTM-koordinaattijärjestelmällä. Skannerin sijainnin tuntemus on välttämätöntä, kun muunnetaan kerätyt tiedot pistepilviksi. (Harrap & Lato, 2010)

3.4.3 Skanneri ja optiikka

LiDAR skannausjärjestelmä koostuu laseretäisyysmittarista, jossa on pyörivä skannauspeili. Skannausjärjestelmässä on kahta peilijärjestelmää, joko nyökkäävä- tai monikulmiopeilijärjestelmä. Nyökkäyspeilit ovat yleisempiä, vaikka molemmissa periaate on sama. Useimmissa malleissa pyörivä anturi on asennettu peilin akseliin sähkömagneettisen moottorin rinnalle, joka pystyy kallistamaan peiliä myötä- ja vastapäivään kallistusakselin ympäri. Huippumodernit laserskannerit käyttävät nykyään laseriodi- ja valodiodipareja lisäämään pistepilvien tiheyttä ja vähentämään liikkuvien osien määrää. Kuvassa 9 on esitetty LiDARin optiikan rakennetta. (Renishaw, 2021)



Kuva 9. LiDARin optiikan rakenne (Renishaw 2021).

4 LIDAR ROBOTIIKASSA

Monet teollisuuden alat hyödyntävät robotiikkaa päivittäisissä prosesseissa. Siksi on välttämätöntä, että robotit, erityisesti ne, jotka voivat liikkua ja suorittaa tehtäviä itsenäisesti, voivat turvallisesti havaita liikkuvat esineet ja ihmiset ympäristössään. Turvallisen liikkumisen ja havaitsemisen voi mahdollistaa LiDAR.

LiDAR teknologiaa käytetään robotiikassa ympäristön havainnointiin sekä objektien määrittelyyn. Näitä ympäristön objekteja voivat olla esimerkiksi seinät, ovet, ihmiset tai muut esineet. LiDARin antureiden avulla saadaan mitattua tarkasti etäisyyksiä, jotta robotti voisi kulkea tarkasti. Kuvassa robotti havaitsee esineen LiDARin avulla.

Navigointiin perustuvia LiDAR-antureita käytetään tyypillisesti ympäröivän ympäristön kartan luomiseen. Esteiden välttämiseen tarkoitettuja LiDAR-antureita asennetaan useammin liikkuvien robottien runkoon havaitsemaan ja estämään järjestelmän törmäys lähestyvän kohteen kanssa. Vaikka esteen välttämisen LiDAR-antureilla on alhaisempi tekninen kynnyks kuin navigoinnin LiDAR-antureilla, se on ylivoimainen kohteen tunnistusominaisuksiltaan. (Benedette Cuffari M, 2022)

Vaikka LiDAR-antureilla varustetut robottijärjestelmät voivat helposti laskea robotin ja staattisten kohteiden välisen etäisyyden, näiden antureiden on haastavampaa määrittää etäisyys liikkuvasta kohteesta tai henkilöstä, varsinkin kun robotti on myös liikkuva. (Benedette Cuffari M, 2022) Kuvassa 10 on esimerkki teollisuusrobotista.

Lukuisat yritykset tarjoavat LiDAR-antureita, jotka voidaan helposti liittää monenlaisiin robottisovelluksiin. Esimerkiksi Active Robotics tarjoaa useita erilaisia LiDAR-antureita, mukaan lukien Yujin YRL3 -anturit. (Benedette Cuffari M, 2022)



Kuva 10. Esimerkki teollisuusrobotista, joka käyttää LiDARia. (Francis S, 2019)

4.1 LiDARin sovelluskohteet robotiikassa

Seuraavissa kappaleissa on lueteltu esimerkkejä robotiikan kohteista, joissa LiDARia on hyödynnetty.

Navigoivat robotit:

Autonomiset ajoneuvot käyttävät LiDARia liikkumiseen. Koska LiDAR -teknologia pystyy muodostamaan 3D-karttoja havaitsemalla etäisyydet lähellä oleviin objekteihin, se mahdollistaa itseohjautuvien autojen havaitsemisen ja näkemisen sekä reagoimisen niiden mukaisesti. Voidaan sanoa, että LiDAR vastaa kuljettajattomien autojen silmiä, jotka voivat havaita henkilön tai toisen auton ja välttää mahdolliset törmäykset. Lisäksi teknologia pystyy havaitsemaan myös vivahteikkaammat kohteet, kuten maalatut viivat, jotka erottavat liikennekaistoja ja tien ominaisuuksia. (Puzzo L, 2021) Kuvassa 11 on esimerkki navigoivasta Velodyne -robotista.



Kuva 11. Velodyne -yrityksen suunnittelema autonominen kuljetin. (Evans S, 2022)

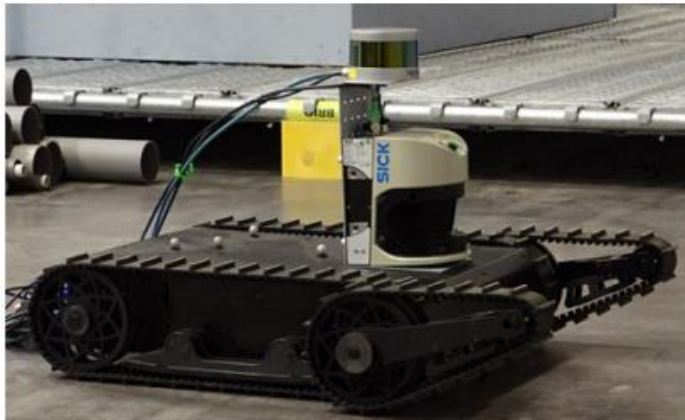
Teollisuusrobotit:

Nykyään monissa tehtaissa liikkuu erilaisia kuljetinrobotteja. Ne kuljettavat tavaroita paikasta paikkaan helpottaen ja nopeuttaen tehtaiden tavaroiden liikkumista. Useimmat näistä roboteista käyttävät navigointiinsa LiDARia. Teollisuudessa esiintyy poimintarobotteja, jotka käyttävät paikannustehtäviinsä 2D ja 3D LiDARia kuten kuvassa 12.



Kuva 12. Varastohallin robotti, joka kuljettaa tavaroita. (Robotics247, 2021)

LiDARin avulla robotti pystyy suunnittelemaan reittinsä, kulkemaan sitä ja toimimaan turvallisesti ympäristössään. Sen on kyettävä partioimaan koko päivä ja sen suorituskykyyn ei saa vaikuttaa sääolosuhteet. Tämän takia LiDAR-antureita suositaankin näköantureiden sijaan tehdasolosuhteissa. Kuvassa 13 robotti nimeltään Jaguar käyttää navigointiinsa SICK LMS511 LiDARia, jonka kulmaresoluutio on 0.5 astetta ja näkökenttä 190 astetta. (Merriaux et al., 2018)



Kuva 13. Jaguar robotti, jolla testattiin eritasoisia pintoja teollisuudessa. (Merriaux, P, 2018)

Palvelurobotit:

Palvelurobotit tekevät monia tehtäviä sairaaloissa, aluksissa, kaupoissa ja hotelleissa. Robotti voi tarjota opastusta tai auttaa jopa kotitöissä. 2D LiDARin avulla palvelurobotit havaitsevat ympäristönsä jokaisen yksityiskohdan ja mukautuvat olosuhteisiin ollakseen vuorovaikutuksessa ihmisten kanssa. Viime vuosina kysyntä on lisääntynyt myös anturille, joka tarjoaa sekä kenttäarviointia että mittaustietojen tulosta. Tämän anturin pääominaisuus on mittausarvojen samanaikainen käyttö lokalisoititehtävissä ja kenttäarvointi törmäysten estämiseksi. (Rothmeyer A, 2021)

Esimerkiksi monet robotti-imurit käyttävät LiDAR -sensoreita navigoimiseensa. LiDARin ansiosta imuri saa jokaisen kulman puhdistettua tarkasti. Halvemmissa robotti-imureissa hyödynnetään törmäysantureita, joka tarkoittaa, etteivät imurit suorita niin tehokasta puhdistusta, sillä törmätessään imuri liikahtaa aina hieman johonkin suuntaan.

Lääketiede:

Terveystieteissä organisaatiot luottavat LiDARin käyttöön. Robotti pystyy sen avulla tekemään asioita kuten desinfiointi, etäläsnäolo sekä lääkkeiden ja lääkintatarvikkeiden toimittaminen. Lisäksi ne vapauttavat henkilöstöä viettämään enemmän aikaa potilaiden kanssa. Kun AMR:t on varustettu valontunnistus- ja etäisyysmittausjärjestelmillä (LiDAR), visuaalisilla laskenta- tai kartoitusominaisuuksilla, ne voivat navigoida itse tutkimus- tai sairaalahuoneissa olevien potilaiden luo, jolloin lääkärit voivat olla vuorovaikutuksessa potilaisiin vaikkapa toimistosta. Tämä hyöty on näkynyt ennen kaikkea siitä lähtien kun COVID-19 virus alkoi levitä maailmalla. (Intel, 2019)

5 YHTEENVETO

Suurin hyöty, jonka LiDAR-tekniikka tarjoaa käyttäjilleen, on sen luoman kuvan tai kartan korkea resoluutio ja tarkkuus. Tulevaisuuden ajoneuvoissa, kaikissa itseajavissa ruokalähteissä tai autoissa pitää olla tarkat kartat, jotta ne voivat valmistautua tarkasti tuleviin matkoihin.

Toinen etu on sen reaaliaikainen visualisointi, joka mahdollistaa kohteen havaitsemisen ja reagoimisen kohteeseen. Tämä on tärkeää itseajavissa autoissa esineiden välttämiseksi tai miksi ei vaikka lentokoneissakin.

Robotiikassa LiDARin käyttäminen yleistyy vuosi vuodelta, sillä robottien kehittymisen vuoksi tarvitsemme entistä parempia antureita ja skannereita. Lisäksi LiDAR on halpa ja helppo käyttää robotiikkaan. Robotit voivat LiDARin avulla tehdä älykkäämpiä ja tehokkaampia päätöksiä, kuten valita eri polun sen sijaan, että pysähtyisivät ja odottaisivat toisen robotin ohittamista – mikä lisää sekä tehokkuutta että turvallisuutta.

Tämä johtaa meidät uuteen autonomiseen elämään, jossa koneet, robotit ja ajoneuvot pystyvät ymmärtämään ympäristöään ja sitä kautta kulkemaan itse turvallisesti. Lisäksi tehtaiden, varastojen, kaivosten ja muiden sovellusten älykkään automaation kehittyessä LiDARilla varustetut robotit pystyvät suorittamaan yhä monimutkaisempia tehtäviä itsenäisesti ja tarjoavat ratkaisun työntekijöiden turvallisuuden ja tehokkuuden parantamiseen. Tarve älykkäämmille ja tehokkaammille roboteille kasvaa ja 3D LiDARin edistysaskeleet vastaavat tähän kysyntään. Omaksumalla uusimman anturitekniikan robottitoimittajat voivat ratkaista monet varasto- ja jakelukeskusten haasteista. Seuraavan sukupolven robotit voivat auttaa lievittämään työvoimapulaa, lisäämään tehokkuutta ja mahdollistamaan nopeamman toteutuksen ja joustavuuden jatkuvasti muuttuviin kuluttajien tarpeisiin.

LÄHDELUETTELO

- Benedette Cuffari, M., (2022). The benefits of LiDAR sensors in mobile robots. Azoro robots.
- Bretenaker, F., & Treps, N. (2014). *Laser: 50 years of discoveries*. World Scientific.
- Evans, S. (2022). Velodyne brings Lidar tech to spot the robot dog. Iot world today.
- Francis, S., (2019). SICK launches its 'most powerful and accurate' 2D LiDAR sensor yet.
 Saatavissa: <https://roboticsandautomationnews.com/2019/12/19/sick-launches-its-most-powerful-and-accurate-2d-lidar-sensor-yet/27695/> [viitattu 28.2.2023]
- Gasparetto, A., & Scalera, L. (2019). A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, 8(1), 24–35.
- Harrap, R., & Lato, M. (2010). An overview of LIDAR: collection to application. *NGI Publ*, 2, 1–9.
- Hokuyo Automatic. (2009, 8 20). URG-04LX_UG01_Specification.pdf Haettu sivustolta Hokuyo Automatic URG-04LX internetosoite: <https://www.hokuyoaut.jp/search/single.php?serial=166> [viitattu 28.2.2023]
- Intel (2019) Healthcare, Robotics in Healthcare, Modular robots. Saatavissa: <https://www.intel.com/content/www/us/en/healthcare-it/robotics-in-healthcare.html> [viitattu 8.3.2023]
- Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018). Interactive, Collaborative Robots: Challenges and Opportunities. *IJCAI*, 18–25.
- Liu, J., Sun, Q., Fan, Z., & Jia, Y. (2018). TOF lidar development in autonomous vehicle. *2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 185–190.
- Lum, D. J., Knarr, S. H., & Howell, J. C. (2018). Frequency-modulated continuous-wave LiDAR compressive depth-mapping. *Optics Express*, 26(12), 15420–15435.

- Mehendale, N., & Neoge, S. (2020). Review on LiDAR technology. *Available at SSRN 3604309*.
- Merriaux, P., Dupuis, Y., Boutteau, R., Vasseur, P., & Savatier, X. (2018). Robust robot localization in a complex oil and gas industrial environment. *Journal of Field Robotics*, 35(2), 213–230. <https://doi.org/10.1002/rob.21735>
- Puzzo L, “What is LiDAR, how does it work, and what is it used for?”, 2021, Mosaic, Saatavissa: <https://www.mosaic51.com/technology/what-is-lidar-how-does-it-work-and-what-is-it-used-for/> [viitattu 10.2.2023]
- Raj, T., Hashim, F. H., Huddin, A. B., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms. *Electronics*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>
- Renishaw (2021) Home, Position and motion control, Knowledge and support, Case studies and application notes, Application note: Optical encoders and LiDAR scanning. Saatavissa: <https://www.renishaw.com/en/optical-encoders-and-lidar-scanning--39244> [viitattu 10.2.2023]
- Robotics247 (2021) Topics, Mobile Robots, Mobile robots, Velodyne Lidar, Mov.AI Team up to help developers of industrial mobile robot applications. Saatavissa: https://www.robotics247.com/article/velodyne_lidar_mov.ai_team_help_developers_in_dustrial_mobile_robot_applications [viitattu 14.3.2023]
- Rothmeyer A. (2021) All about LiDAR and how it helps during a robotics boom. Automation.com.
- SFS-EN ISO 10218-1. 2009. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SFS-EN ISO 10218-2. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sharma, B. (2020, 10 16). What is LiDAR technology and how does it work?

Silva, C., Klauberg, C., Mohan, M., & Bright, B. (2018). *LiDAR Analysis in R and rLiDAR for Forestry Applications*.

Ventä, O., Honkatukia, J., Häkkinen, K., Kettunen, O., Niemelä, M., Airaksinen, M., & Vainio, T. (2018). *Robotisaation ja automatisaation vaikutukset Suomen kansantalouteen 2030*.

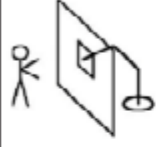
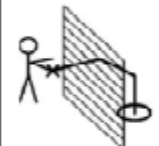

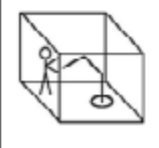
Weitkamp, C. (2006). *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere* (Vol. 102). Springer Science & Business.

Williams, B. (2019). An introduction to robotics. *Mechanical Engineering, Ohio University*.

Liite 1. Yhteistoimintarobottien periaatteelliset sovellukset (SFS-EN ISO 10218-2:2011).

(opastava)
Yhteistoimintarobottien periaatteelliset sovellukset (EN)

HUOM. Katso vaatimukset kohdassa 5.11.

Sovelluksen tyyppi	Kuvaus	Turvallitteet	Käyttötarkoitus
 <p>Työkappaleen ojentaminen aukosta</p>	<ul style="list-style-type: none"> - itsetoiminen automaattinen toiminta suojatussa tilassa - robotti liikkuu aukon läpi - työkappaleen ojentaminen ei keskeytä automaattista toimintaa 	<ul style="list-style-type: none"> - työtilan ympärillä on kiinteät tai kosketukseen perustuvat suojukset - pienennetty nopeus ja rajoitettu työtila aukon lähellä - aukon ulkopuolella ei ole työtilaa - jos aukon alareuna on alempana kuin 1000 mm, on käytettävä turvalaitteita kohdan 5.10.3 mukaisesti 	<ul style="list-style-type: none"> - lastaus, purkaminen - testaus, kiinnittäminen, puhdistaminen - huolto
 <p>Aukko rajapintana</p>	<ul style="list-style-type: none"> - itsetoiminen automaattinen toiminta suojatussa tilassa - robotti pysähtyy aukon rajapinnassa ja sitä voidaan sen jälkeen liikuttaa käsikäyttöisesti rajapinnan ulkopuolelta 	<ul style="list-style-type: none"> - työtilan ympärillä on kiinteät tai kosketukseen perustuvat suojukset - pienennetty nopeus ja rajoitettu työtila ulkopuolella ja aukon lähellä - liikkeen ohjausta varten on pakkokäyttöinen ohjain 	<ul style="list-style-type: none"> - automaattinen ladonta ja/tai purku - ohjattu kokoonpano - ohjattu täyttö/purku - testaus, kiinnittäminen, puhdistaminen - huolto
 <p>Yhteistoimintatila</p>	<ul style="list-style-type: none"> - itsetoiminen automaattinen toiminta yhteisessä (yhteistoiminta) työtilassa - robotin nopeus pienenee ja/tai pysähtyy, kun ihminen tulee yhteiseen (yhteistoiminta) työtilaan 	<ul style="list-style-type: none"> - ihmisen tunnistava järjestelmä, jossa on yksi tai useampia antureita - pienennetty nopeus suhteessa etäisyyteen (5.11.5.4) - robotti pysähtyy turvallisesti, jos ihminen tulee kiellettyyn tilaan ja kun sen jälkeen ihminen on etäämpänä, robotti voi mahdollisesti käynnistyä automaattisesti uudelleen, jos tämä on varmistettu turvallisuusteknisellä toimenpiteellä 	<ul style="list-style-type: none"> - yleinen kokoonpano - yleinen työkappaleen käsittely - testaus, kiinnittäminen, puhdistaminen - huolto
 <p>Tarkastus</p>	<ul style="list-style-type: none"> - itsetoiminen automaattinen toiminta suojatussa tilassa - ihmisen tullessa yhteistoimintatilaan robotti jatkaa toimintaa pienennetyllä nopeudella ja lyhennetyllä liikkeellä 	<ul style="list-style-type: none"> - kiinteät tai kosketukselle herkät suojukset työtilan ympärillä - ihmisen tunnistava järjestelmä tai sallintalaite - ihmisen tullessa työtilaan robotin nopeus pienenee ja työtilaa rajataan - toimenpiteet väärinkäytön estämiseksi 	<ul style="list-style-type: none"> - tarkastus ja säätöprosessit, esim. hitsaussovellukset