



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ANTUREIDEN KÄYTTÖ ROBOTEISSA

Ali Zakai

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Antureiden käyttö roboteissa

Ali Zakai

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 30 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tämän kandidaatin tutkielman tavoitteena oli tuoda esille antureiden käyttöä, merkitystä ja toimintaa roboteissa. Tutkielmassa esitellään lukijalle yleisesti käytettyjä antureita roboteissa sekä käydään läpi niiden sovellutuksia.

Tutkimusmenetelmänä on pääasiassa käytetty aiheeseen sopivia tietokannoista löytyviä artikkeleita, joihin on viitattu tarpeen mukaan.

Asiasanat: Anturitekniikka, robotiikka, anturi, robotti

ABSTRACT

Use of sensors in robots

Ali Zakai

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 30 p.

Supervisor at the university: Yrjö Louhisalmi

The aim of this bachelor's thesis was to highlight the use, importance and function of sensors in robots. The thesis introduces the reader to commonly used sensors in robots and discusses their applications.

The research method used is mainly based on relevant articles from databases, referred to where appropriate.

Keywords: Sensor technology, robotics, sensor, robot

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	6
2 Robotit.....	7
2.1 Robottien historia	8
2.2 Robottien luokittelu.....	9
2.2.1 Teollisuusrobotit	10
2.2.2 Liikkuvat robotit	11
2.2.3 Humanoidirobotit.....	12
2.3 Robottiikan kehitys	12
3 Anturit	14
3.1 Yleistä antureista.....	15
3.2 Anturitekniikka robotiikassa	17
3.3 Etäisyyden mittaus	17
3.4 Tuntoanturit.....	18
3.4.1 MEMS-tuntoanturi.....	19
3.5 Visuaaliset anturit.....	20
3.6 Inertiavoiman tunnistusjärjestelmä	21
3.7 Enkooderit	21
3.8 Laseranturit	22
4 Antureiden sovellutukset.....	23
4.1 Ihmisen ja robotin yhteistyö.....	23
4.2 AGV-navigointi.....	23
4.3 Tarttuminen ja kokoonpano	24
4.4 Anturifuusio	25
4.5 Anturiverkko	25
4.6 Eleiden tunnistus	26
5 Yhteenveto	27
LÄHDELUETTELO	28

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AGV	Automaattisesti ohjatut ajoneuvot (Automated guided vehicles)
CCD	Varauskytketty piiri (Charge-coupled device)
CMOS	Komplementaarinen metallioksidipuolijohde (Complementary metal-oxide-semiconductor)
MEMS	Mikrosysteemit (Micro electromechanical systems)
PDMS	Polydimetyylisiloksaani (Polydimethylsiloxane)
TOF	Lentoaika (Time of flight)

1 JOHDANTO

Tämä tutkielma esittelee lukijalle robotiikassa käytettyjä erilaisia antureita kirjallisuuskatsauksena. Koska roboteista on tehty paljon tutkielmia, en varsinaisesti lähde pohtimaan robotiikkaan liittyviä kysymyksiä, vaan keskityn spesifisesti anturitekniikkaan. Yleisesti käytetyistä antureista roboteissa on pyritty esittämään lyhyt katsaus kirjallisten lähteiden ja artikkeleiden avulla. Tavoitteena on, että lukija ymmärtää robotiikassa käytetyn kyseisen anturitekniikan peruseriaatteen ja sen sovellutuksen.

2 ROBOTIT

Robotti on konkreettinen kokonaisuus, joka havaitsee ympäröivän fyysisen maailman ja on vuorovaikutuksessa sen kanssa. Se on varustettu antureilla, joilla se havaitsee ympäristönsä, ja efektoreilla, joilla se voi kohdistaa ympäristöön fyysistä voimaa. Robotilla on kolme ominaisuutta: Se on fyysinen kokonaisuus, toimii itsenäisesti ja se sijaitsee ympäristössään. (Niemueller and Widyadharma 2003; Kaplan 2005)

Toisin kuin tavalliset arkipäiväiset esineet, robotti toimii itsenäisesti. Se ei ole pelkkä meidän jatke, sillä voimme ohjelmoida sen, antaa sille ohjeita tai jopa kouluttaa sitä, mutta emme voi täysin hallita sitä. Tämä autonomian taso erottaa robotit muista koneista, joita käytämme jokapäiväisessä elämässämme, kuten esimerkiksi pyykinpesukoneista tai kahvinkeitinistä, jotka myös toimivat jossain määrin itsenäisesti. (Kaplan 2005)

Lisäksi robotti erottuu selvästi vuorovaikutuksessaan ympäristönsä kanssa. Ympäristö, joka käsittää sekä fyysisen ympäristön että sosiaaliset tekijät, vaikuttaa suoraan robotin käyttäytymiseen. Tämä robotin ja sen ympäristön välinen vuorovaikutus määrittelee sen luonteen. Robotti reagoi jatkuvasti ympäristöönsä ja mukautuu jatkuvasti havaitsemiinsa ärsykkeisiin. Se ei ainoastaan käsittele tietoa vaan on myös vuorovaikutuksessa fyysisten objektien kanssa, mikä tekee sen toiminnasta konkreettista ja vaikuttavaa. (Kaplan 2005)



Kuva 1. Robotti työpisteellä (Ortiz 2022).

2.1 Robottien historia

Robotteja ja robotin kaltaisia koneita on ollut olemassa jo kauan, jopa keskiajalla. Tuon ajan ihmiset eivät käyttäneet sanaa "robotti", mutta heillä oli käsityksiä koneista, jotka pystyivät tekemään asioita ihmisten tavoin. (Hagis 2003)

Yksi näistä laitteista oli "clock jack", joka pystyi lyömään kirveellä kelloa kellonajan näyttämiseksi. Tämä oli hyvin kehittynyttä tekniikkaa 1200-luvulla. Myöhemmin, 1700-luvulla, näiden koneiden pienoismalliversioista tuli suosittuja rikkaiden ihmisten leluina. Nämä lelut näyttivät ja liikkuiivat kuin ihmiset tai eläimet. (Hagis 2003)

Vuonna 1818 Mary Shelley kirjoitti Frankensteinin, joka kertoo ihmisen kaltaisen olennon luomisesta. Hänestä robotti näytti ihmiseltä mutta toimi kuin kone. Se oli tehty ihmisen osista, jotka oli kiinnitetty toisiinsa muttereilla ja pulteilla. Vuonna 1921 kirjailija Karel Čapek keksi sanan "robotti" keinotekoisesti luotua ihmistä varten näytelmässä. Sana tulee tšekin kielestä ja tarkoittaa "työntekijää". Tämä ajatus ihmisen näköisistä roboteista alkoi jo kauan sitten, ja se on edelleen olemassa. (Hagis 2003)

Termi "robotiikka" syntyi vuonna 1941, ja sillä tarkoitetaan robottien tutkimusta ja käyttöä. Isaac Asimov, tiedemies ja kirjailija, keksi "robotiikan lait", jotka ovat sääntöjä siitä, miten robottien pitäisi käyttäytyä. Näissä laeissa puhutaan siitä, että robotit eivät saa vahingoittaa ihmisiä ja että ne noudattavat ihmisten antamia käskyjä. (Hagis 2003)

Robotit yleistyivät 1950- ja 1960-luvuilla erityisesti tehtaissa. Ne autoivat ihmisiä suorittamalla vaarallisia tehtäviä, kuten pommien deaktivoimista tai avaruuden tutkimista. Nämä robotit eivät aina näyttäneet ihmisiltä. Jotkut olivat kuin käsivarret, jotka pystyivät hitsaamaan tai maalaamaan autoja liukuhihnalla. (Hagis 2003)

Nykyään robotit eivät aina näytä ihmisiltä. Niissä voi olla erilaisia osia eri tehtäviä varten. Kanadassa on jopa tehty robotteja, jotka auttavat rakentamaan ja ylläpitämään kansainvälistä avaruusasemaa. Näitä robotteja ohjataan tietokoneilla, ja ne käyttävät kameroita nähdäkseen, mitä ovat tekemässä. (Hagis 2003)

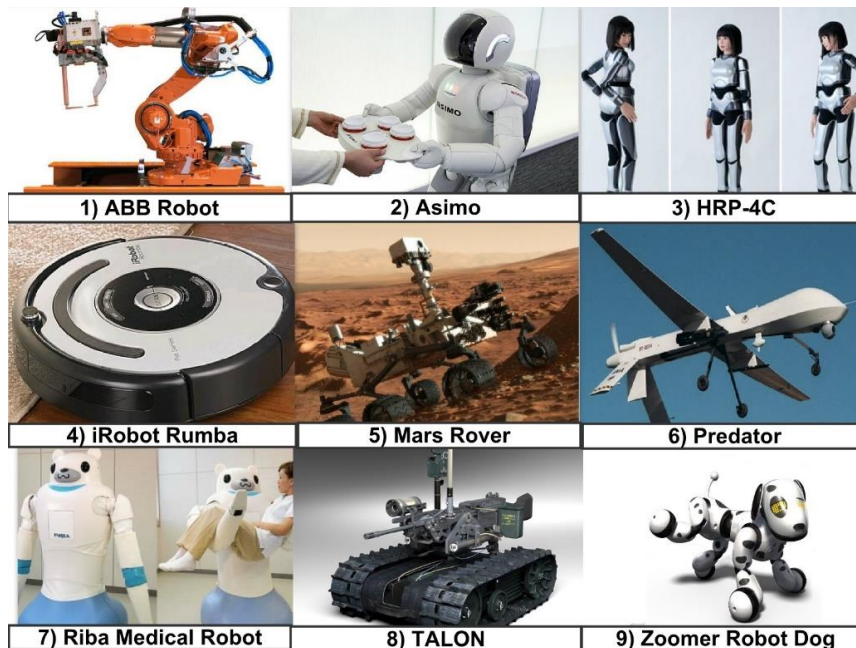
2.2 Robottien luokittelu

Robotit voidaan luokitella sen mukaan, missä ne suorittavat tehtävänsä. Yksi keskeinen ero on paikallaan olevien ja liikkuvien robottien välillä. Näillä kahdella tyypillä on hyvin erilaiset työpisteet, joten ne tarvitsevat erilaisia ominaisuuksia. Paikallaan olevia robotteja on yleensä tehtaissa. Ne ovat erityisiä robottikäsiä, jotka tekevät samaa asiaa yhä uudelleen ja uudelleen. Ne saattavat esimerkiksi juottaa tai maalata auton osia tehtaissa. Teknologian kehittyessä näitä robotteja käytetään nykyään paikoissa, joita ei voida yhtä hyvin valvoa, kuten leikkauksissa. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Toisaalta liikkuvat robotit liikkuvat ympäriinsä tehdäkseen työnsä. Ne työskentelevät suurissa tiloissa, joita ei ole perustettu vain niitä varten. Niiden on käsiteltävä tilanteita, joita ei ole suunniteltu etukäteen ja jotka voivat muuttua matkan varrella. Näitä voivat olla esimerkiksi ihmiset ja eläimet. Esimerkiksi lattian imuroivat robotit tai itseohjautuvat autot ovat liikkuvia robotteja. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Robotit voidaan ryhmitellä myös sen mukaan, mitä niiden on tarkoitus tehdä ja missä niitä käytetään. Esimerkiksi teollisuusrobotit, jotka työskentelevät selkeissä kokoonpanotehtävissä ja tuotteiden valmistuksessa. Teollisuusrobotit olivat ensimmäisiä, koska niiden työ oli helpompi hahmottaa näissä tarkoin määritellyissä paikoissa. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Lisäksi on olemassa myös palvelurobotteja, jotka auttavat ihmisiä. Ne siivoavat taloja (kuten pölynimurit), antavat kyytejä (kuten itseajavat autot) ja auttavat jopa turvallisuudessa (kuten tietoa keräävät lennokit). Myös lääketieteen alalla robotteja käytetään yhä enemmän. Niitä käytetään leikkauksissa, toipumisessa ja opetuksessa. Nämä ovat uudempia käyttötarkoituksia, joissa tarvitaan parempia antureita ja tiiviimpää yhteistyötä ihmisten kanssa. (Ben-Ari and Mondada 2018)



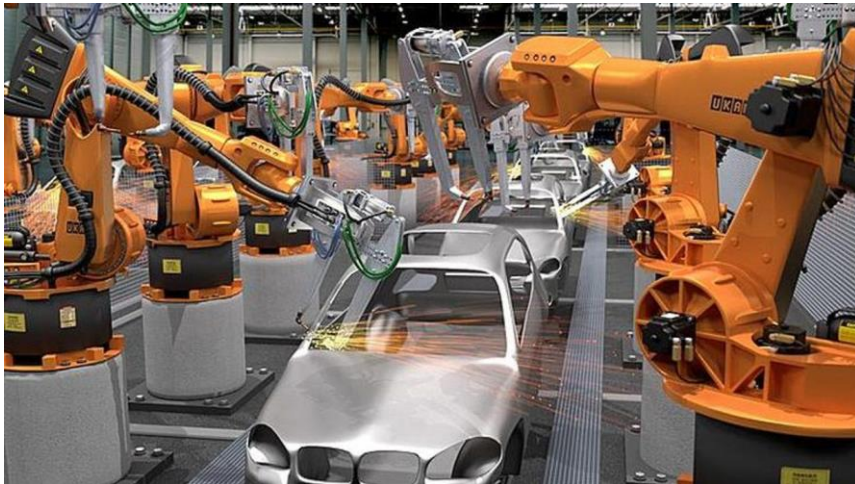
Kuva 2. Robottien luokittelu (Fox 2023).

2.2.1 Teollisuusrobotit

Aluksi teollisuusrobotteja käytettiin tehtaissa sellaisten töiden tekemiseen, joita ihmiset tekivät yhä uudelleen ja uudelleen. Nämä työt olivat yksinkertaisia ja niitä toistettiin paljon. Robotit ottivat nämä tehtävät ja tekivät niitä tehtaiden liukuhihnoilla. Nämä linjat toimivat tietyllä tavalla, ja asiat laitettiin järjestykseen robotin käyttöä varten. Jotkut voivat väittää, että nämä varhaiset robotit ovat enemmänkin koneita, eivät varsinaisesti robotteja. Mutta nykyään jopa koneista on tullut robottien kaltaisia, koska ne käyttävät antureita ymmärtääkseen, mitä niiden ympärillä tapahtuu. Niiden suunnittelu on kuitenkin tehty yksinkertaiseksi, koska ne toimivat paikassa, jossa ihmiset eivät saa olla läsnä robotin työskennellessä. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Nykypäivän robottien on kuitenkin tehtävä enemmän asioita. Niiden pitäisi esimerkiksi pystyä poimimaan esineitä eri tavoin ja tietää, mitä ne ovat. Niiden on siirrettävä asioita eri paikkojen välillä. Tähän tarvitaan enemmän vapautta, vaikka tila, jossa ne työskentelevät, on edelleen rajattu ja asetettu robotteja varten. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Kun robotit työskentelevät ihmisten lähellä, niiden on oltava vielä varovaisempia. Tämä tarkoittaa, että robottien on hidastettava vauhtia niin, että ne eivät vahingoita ihmisiä. Hyvä asia on, että ihmiset ja robotit voivat työskennellä yhdessä. Robotit voivat tehdä toistuvia tai riskialttiita asioita, kun taas ihmiset voivat tehdä monimutkaisempia tehtäviä ja kertoa roboteille, mitä tehdä. Ihmiset huomaavat nopeasti, kun jokin asia ei ole oikein, ja voivat parantaa sitä. (Ben-Ari and Mondada 2018)



Kuva 3. Autotehtaalla teollisuusrobotit nostavat raskaita esineitä ja suorittavat toistuvia tehtäviä (McSweeney 2017).

2.2.2 Liikkuvat robotit

Monia liikkuvia robotteja ohjataan kaukaa. Niitä käytetään esimerkiksi putkistojen tarkastamiseen, kuvien ottamiseen taivaalta tai pommien käsittelyyn. Nämä robotit eivät ole omillaan, vaan ne käyttävät antureitaan, jotta ihminen voi ohjata niitä turvalliselta etäisyydeltä. Jotkut näistä roboteista voivat tehdä osan työstään automaattisesti. Esimerkiksi lennokin automaattiohjaus pitää sen lentokyvyn vakaana, kun ihminen päättää, minne se menee. Putkessa robotti voi liikkua, kun ihminen etsii korjattavia ongelmia. (Siegwart et al. 2011)

Toisaalta on robotteja, jotka voivat työskennellä itsekseen ilman, että ihminen kertoo niille, mitä tehdä. Ne voivat tehdä omia päätöksiä ja tehdä tehtäviä, kuten kuljettaa tavaroita hankalissa paikoissa (liikkua rakennusten läpi, joissa on seiniä ja ovia, tai ylittää katuja). Ne pystyvät tähän myös silloin, kun asiat muuttuvat jatkuvasti niiden ympärillä, kuten ihmisten käveleminen tai autojen liikkuminen. Ensimmäiset liikkuvat robotit tehtiin

helppoihin paikkoihin, kuten uima-altaita puhdistavat tai nurmikkoa leikkaavat robotit. (Siegwart et al. 2011)

Jotkin robotit on rakennettu auttamaan ammattilaisia organisoiduissa paikoissa, kuten varastoissa. Yksi esimerkki on robotti, joka poistaa rikkaruohot pelloilta. Tällainen paikka on järjestetty, mutta se tarvitsee älykkäitä antureita löytääkseen rikkaruohot ja päästäkseen niistä eroon. Jopa hyvin organisoiduissa tehtaissa robotit joutuvat työskentelemään ihmisten parissa, joten niiden antureiden on oltava todella tehokkaita. (Siegwart et al. 2011)

2.2.3 Humanoidirobotit

Humanoidirobotit ovat erityisiä robotteja, jotka pyrkivät näyttämään ja liikkumaan kuin ihmiset. Niillä on monimutkainen rakenne, joka saa niiden kädet liikkumaan ja jalat kävelemään aivan kuten ihmiset. Näitä robotteja käytetään tutkittaessa, miten ihmiset kävelevät ja miten ihmiset ovat vuorovaikutuksessa koneiden kanssa. Ihmiset uskovat, että ne voisivat auttaa hoitamaan vanhuksia, jotka voisivat tuntea olonsa paremmaksi ihmiseltä vaikuttavan robotin seurassa. Jos robotti näyttää lähes ihmiseltä, se saattaa kuitenkin aiheuttaa ihmisille epämukavuutta. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Humanoidirobottien tekeminen on todella vaikeaa. Ne ovat monimutkaisia ja tarvitsevat paljon osia, jotka voivat liikkua monin eri tavoin. Siksi pyörillä tai telaketjuilla varustetut robotit ovat usein parempia erilaisiin töihin. Ne ovat yksinkertaisempia, maksavat vähemmän ja pystyvät selviytymään erilaisista tilanteista. (Ben-Ari and Mondada 2018)

2.3 Robottiikan kehitys

Nykyään robotiikan alalla tehdään paljon työtä, jotta robotit olisivat älykkäämpiä ja pystyisivät tekemään asioita itsenäisesti. Tämä tapahtuu parantamalla niiden antureita, jotka auttavat robotteja ymmärtämään, mitä niiden ympärillä tapahtuu, ja tekemällä niiden ohjauksjärjestelmistä älykkäämpiä. Paremmat anturit auttavat robotteja ymmärtämään monimutkaisempia tilanteita entistä tarkemmin, mutta näiden tilanteiden hallitsemiseksi robotin toimintatapojen on oltava todella joustava ja kyettävä muuttumaan. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Yksi tärkeä painopiste on konenäkö, jossa käytetään kameroita asioiden näkemiseen. Kameranat ovat halpoja ja niillä voidaan kerätä paljon hyödyllistä tietoa. Ihmiset työskentelevät sen eteen, että robotit oppisivat ihmisiltä tai sopeutuisivat uusiin tilanteisiin, mikä tarkoittaa, että niiden joustavuus paranee. (Ben-Ari and Mondada 2018)

Toinen tärkeä tutkimusalue on se, miten robotit ja ihmiset ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Tämä tarkoittaa sitä, että mietitään, miten robotit voivat aistia, mitä ihmiset haluavat, ja myös sitä, miten ihmiset suhtautuvat robotteihin. Kyse ei ole vain antureista ja älykkästä ohjelmoinnista, vaan myös siitä, miten ihmiset ajattelevat ja tuntevat olonsa robottien kanssa. (Ben-Ari and Mondada 2018)

3 ANTURIT

Robottiikassa anturit ovat robottien ja niiden ympäristön välinen vuorovaikutusjärjestelmä, jossa robotit havaitsevat ympäristöä. Ensinnäkin on passiivisia antureita, kuten kameroita, jotka keräävät ympäristön muiden lähteiden tuottamia signaaleja. Lisäksi on olemassa aktiivisia antureita (esimerkiksi kaikuluotain, tutka, laser), jotka säteilevät energiaa ympäristöön. Tämä energia heijastuu ympäristön kohteista. Näitä heijastuksia voidaan hyödyntää tarvittavan tiedon keräämiseen. Yleensä aktiiviset anturit tuottavat enemmän tietoa kuin passiiviset anturit. Ne kuluttavat kuitenkin myös enemmän energiaa. Tämä voi aiheuttaa ongelmia varsinkin liikkuvissa roboteissa, joiden energia on akuissa.

Anturit ovat olleet ihmisten apuna pitkään ja kehittyneet vuosien aikana yhä tarkemmaksi ja tehokkaammaksi. Yhtenä esimerkkinä voidaan mainita Horace Bénédict de Saussuren kehittämä anturi vuonna 1783, jossa tuntoelimenä toimiva hius venyy ilman kosteuden lisääntyessä. Tämä täysin mekaaninen esimerkki on osoitus siitä, että ajan saatossa ihmiset ovat halunneet mitata ja saada informaatiota ympäröivästä olosuhteesta. (Ahola and Aitto-Oja 2014)

Tänä päivänä kuitenkin anturit ovat tekniikan ja teknologian selkäranka. Anturitekniikan kehityksen avulla on olemassa esimerkiksi kiihtyvyyssantureita, nopeusantureita ja lämpötila-antureita. Näillä antureilla voidaan mitata värinää, suoraviivaisen liikkeen kiihtyvyyttä, suoraviivaisen liikkeen nopeutta, pyörimisnopeutta sekä ulko- ja sisälämpötiloja.



Kuva 4. Antureiden luokittelu (Paavilainen 2010).

3.1 Yleistä antureista

Anturi on laite, joka muuntaa fyysisen ilmiön sähköiseksi signaaliksi. Fyysinen ilmiö, jonka anturi tunnistaa syötteenä, voi esimerkiksi olla lämpötila, voima, paine, virta tai intensiteetti. Nämä fyysiset ilmiöt toimivat ikään kuin ärsykkeinä ja anturin lähtökäsitellään vastaavan fyysisen ominaisuuden mittauksen aikaansaamiseksi. Anturit ovat yleensä osa laajempaa järjestelmää kuten prosessinohjausjärjestelmä, mittausjärjestelmä tai tiedonhankintajärjestelmä. Näissä järjestelmissä antureiden lisäksi toimivat myös erilaiset signaalinkäsittelylaitteet sekä analogiset ja digitaaliset signaalinkäsittelypiirit. (Sensor Technology Handbook - Jon S. Wilson)

Taulukko 1. Yleiset anturit (Storr 2014).

<u>Mitattava suure</u>	<u>Syöttölaite</u>	<u>Ulostulolaite</u>
Valon taso	Valosta riippuvainen vastus Fotodiodi Valotransistori Aurinkokenno	Valot ja lamput LEDit ja näytöt Kuituoptiikka
Lämpötila	Termopari Termistori Termostaatti	Lämmitin Puhallin
Voima/paine	Jännemittari Painekytkin	Sähkömagneetti Värinä
Asema	Potentiometri Enkooderi Optokytkin	Moottori Solenoidi Paneelin mittarit
Nopeus	Takogeneraattori Doppler-ilmiöanturit	AC- ja DC-moottorit Jarrut

Ääni	Hiilimikrofoni	Summeri
		Kaiutin

3.2 Anturitekniikka robotiikassa

Antureiden merkitys robotiikassa on keskeistä, sillä antureiden avulla robotti havainnoi ympärillä olevaa maailmaa. Robotissa anturi mittaa fyysisen suureen, jonka se muuttaa sähköiseksi signaaliksi. Esimerkkejä mitattavista suureista ovat voima, paine, etäisyys, nopeus, lämpötila, kiihtyvyys, virta, jännite ja suunta. Koska mitattavia suureita on lukuisia, on tärkeää, että valitaan sopiva anturi robotin käyttötarkoituksen ja ympäristön perusteella. (Robinson 2018)

3.3 Etäisyyden mittaus

Robotiikassa kolmiulotteisen tiedon välittäminen käyttäjän ja robotin välillä on keskeisessä osassa. Koska antureiden avulla pitää pystyä mittaamaan etäisyyttä, tunnistaa objekteja ja kartoittaa erilaisia ympäristöjä, yksinkertaiset anturit ja valonsäteet eivät riitä, vaan vaaditaan mekanismeja, joilla on sekä korkeampi tunnistusnopeus että spatiaalinen resoluutio ja pidempi kantama. (Hebert 2000)

Yksi vaihtoehto etäisyyden mittaamiseen ja fyysisten esteiden välttämiseen on infrapuna-antureiden käyttö. Robotiikassa infrapuna-antureiden sovellutus on yleistä, sillä ne ovat kustannukseltaan edullisia, ja niillä on nopeammat vasteajat kuin esimerkiksi ultraääniantureilla (ultrasonic sensors). Kuitenkin infrapuna-anturit ovat epätarkkoja etäisyyden mittaamisen suhteen, koska ne ovat epälineaarisia ja ovat myös riippuvaisia ympärillään olevien objektien heijastuksen intensiteetistä. Siksi infrapuna-antureita käytetään enimmäkseen läheisyysanturina läheisyyden mittaamiseen. Toisaalta ultraäänisensorit ovat parempi ratkaisu etäisyyksien mittaamiseen. Ultraäänianturit ovat myös kustannukseltaan edullisia ja etäisyysmittauksen tarkkuusväli on 1 - 6 cm. (Benet et al. 2002)

Lisäksi infrapuna- ja ultraääniantureita voidaan käyttää yhdessä täydentävällä tavalla, jolloin yhden anturin edut kompensoivat toisen anturin haitat. Esimerkkinä voidaan mainita navigointijärjestelmä, joka yhdistää tiedot molemmista antureista ja näin saadaan aikaan tarkempi kartta. (Benet et al. 2002)

3.4 Tuntoanturit

Robotit myös tarvitsevat kosketustunnistuskoneistuksen kuten ihmiset hahmottaakseen ja tunnistaakseen ulkoista maailmaa. Tämän vuoksi tuntoanturit ovat tärkeässä asemassa robottien kehittymisen ja älykkyyden kannalta. Tuntoanturi on suunniteltu siten, että se pystyy esimerkiksi lukemaan sijaintia, lämpötilaa, painetta ja jäykkyyttä sekä tunnistaa erilaisia muotoja. Tuntoanturit voidaan jakaa pääasiassa neljään eri ryhmään: kapasitiivinen, pietsosähköinen, pietsoresistiivinen ja optinen tuntoanturi. (Yu et al. 2019)

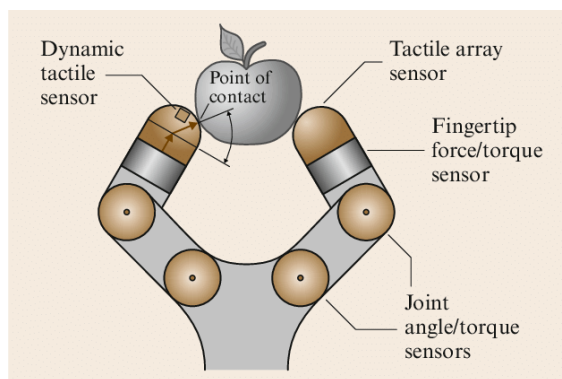
Kapasitiivinen tuntoanturi hyödyntää kapasitanssin muutosta kosketusvoiman mittaamiseen. Sillä on suuri spatiaalinen resoluutio ja alhainen virrankulutus, mutta se on herkkä ulkoisille häiriöille. Pietsosähköinen tuntoanturi perustuu pietsosähköisen vaikutuksen teoriaan, mikä tarkoittaa, että sähkövaraus ilmaantuu pietsosähköisten materiaalien pinnoille, kun siihen kohdistuu ulkoista kuormitusta. Lisäksi pietsosähköisellä tuntoanturilla on hyvä taajuusvaste ja laaja mittausalue, mutta sen resoluutio on heikko verrattuna kapasitiiviseen tuntoanturiin. (Yu et al. 2019)

Pietsoresistiivinen tuntoanturi perustuu pietsoresistiivisen vaikutuksen periaatteeseen, joka viittaa vastuksen varianssiin, kun siihen kohdistuu ulkoinen voima. Pietsoresistiivisellä tuntoanturilla on myös laaja mittausalue ja hyvä kestävyys, mutta se on altis hystereesille. Optinen tuntoanturi voi puolestaan muuttaa ulkoisen informaation valon parametrien varianssiksi. Se kestää ulkoista häiriötä ja sillä on suuri spatiaalinen resoluutio. (Yu et al. 2019)

3.4.1 MEMS-tuntoanturi

Nykyään useimmissa tuntoantureissa on alettu käyttämään MEMS-teknologiaa, joiden materiaali voi vaihdella piistä polymeeripohjaisiin orgaanisiin substraatteihin. Polymeeripohjaisissa tuntoantureissa käytetään yleensä pietsoresistiivisiä kumia voimantunnistuselementtinä. Polymeeripohjaiset anturit sopivat paremmin laaja-alaisille tuntoantureille kuin piianturit, koska niiden valmistuskustannukset ovat alhaisemmat yksikköpinta-alaa kohden. Kuitenkin niiden haittapuolena on alhainen spatiaalinen resoluutio. Piipohjaiset tuntoanturit puolestaan hyödyntävät suurta vetolujuutta, alhaista lämpölaajenemista ja hystereesiä, joka tekee niistä tehokkaan materiaalivaihtoehdon tuntoantureille. Lisäksi piipohjaiset tuntoanturit mahdollistavat suuremman spatiaalisen resoluution verrattuna polymeeripohjaisiin tuntoantureihin. (Girão et al. 2013)

Kuitenkin hyvistä ominaisuuksista huolimatta MEMS-tuntoanturit ovat luonteeltaan alttiita mekaanisille vaurioille. Tämän ongelman ylitse pääsemiseksi voidaan käyttää polydimetyylisiloksaanipinnoitetta (PDMS), joka tarjoaa myös ihon kaltaisen pinnoitteen tuntoantureiden päälle. PDMS on vedenpitävä, kemiallisesti inertti ja myrkytön piipohjainen orgaaninen polymeeri, joka toimitetaan kaksiosaisena seoksena, monomeerina ja kovettajana, jotka yhdistetään painosuhteessa 10:1. Näitä käytetään yleisesti elektroniikkakomponenttien upottamiseen tai kapseloimiseen. (Girão et al. 2013)



Kuva 5. Robottikäsi, jossa on sormenpään voima- ja tuntoaisti. Voima-antureiden antamat tiedot voidaan yhdistää sormenpään geometrian tuntemukseen kosketuksen sijainnin arvioimiseksi (Cutkosky et al. 2008).

3.5 Visuaaliset anturit

Visuaalinen tunnistustekniikka on kehittynyt nopeasti viimeisten vuosien aikana, ja nykyään sitä käytetään laajasti monilla aloilla, kuten kasvojentunnistuksessa, kolmiulotteisessa maailmassa ja useissa roboteissa. Visuaalisten antureiden suosion syynä ovat niiden alhaiset kustannukset, monipuolisen informaation tarjonta sekä helppokäyttöisyys. Visuaaliset anturit sisältävät pääasiassa erilaisia kameroita, kuten RGB-kamerat, monispektrikamerat, ja syvyyskamerat. Kameroissa käytetyt valoherkät elementit ovat yleensä CCD- tai CMOS-tyyppisiä, jotka voivat muuntaa valoinformaation sähköiseksi signaaliksi valosähköisen ilmiön periaatteella. CCD-kameroiden joustavuus ja kuvanlaatu ovat parempia kuin CMOS-kameroiden, mutta CMOS on ylivoimainen kustannusten ja virrankulutuksen suhteen. Lisäksi erityyppiset kameralat voivat tarjota monipuolista tietoa. (Yu et al. 2019)

RGB-kameroita käytetään eniten ihmisten jokapäiväisessä elämässä. Niiden avulla voidaan kaapata kromaattisia kuvia sen teorian perusteella, että jokainen näkyvä väri voidaan tuottaa kolmella perusvärillä: punainen, vihreä, sininen sekä niiden yhdistelmänä. Monispektrikamerat puolestaan pystyvät ottamaan kuvia eri taajuuksilla, jotka sisältävät näkyvää ja näkymätöntä aallonpituutta. Näin ne voivat saada tietoa, jota RGB-kamerat eivät pysty tarjoamaan. Vastaavasti syvyyskamerat pystyvät lisäämään etäisyystiedon kaksiulotteisiin kuviin, jonka avulla syvyyskameroita käytetäänkin ihmisten tunnistamisessa teollisuusrobottien toiminta-alueella turvallisuuden varmistamiseksi. (Yu et al. 2019)



Kuva 6. TOF-kameroita käytetään aktiivisina antureina kolmiulotteisen tiedon nopeaan ja tarkkaan keräämiseen. Ne yhdistetään CCD-kameroiden kanssa visuaaliseksi anturiksi,

joka mahdollistaa reaaliaikaisen väritiedon ja erittäin tarkan 3D-tiedon keräämisen, joka on tärkeää kohteiden tunnistamisen kannalta (Attamimi and Nagai 2018).

3.6 Inertiavoiman tunnistusjärjestelmä

Koska robotit toimivat yhdessä ihmisten kanssa monenlaisissa ympäristöissä, ne on varustettava antureilla, jotka havainnoivat inertian voimaa, jotta ne voivat vastustaa muutoksia ja liikkua tarvittavalla hitaudella. Inertiavoiman tunnistusjärjestelmä muodostuu kolmesta kiihtyvyyssanturista, kolmesta kulmanopeusanturista ja digitaalisesta signaaliprosessorista. Järjestelmässä voidaan esimerkiksi käyttää autojen antureita, kuten kiihtyvyyss- ja kulmanopeusantureita, jotka ovat kooltaan pieniä, edullisia ja niillä on korkea tarkkuus. (Nonomura 2020)

Digitaalinen signaaliprosessori laskee asennon kiihtyvyyss- ja kulmanopeusanturin signaaleista. Se laskee asentokulmat, kulmapaikat, kulmakiihtyvyydet, sijainnit, translaationopeudet ja translaatiokiihtyvyydet. Kulmanopeusanturin signaalit johdetaan integroimalla tarkasti mitatut asentokulmat, joilla on vähäinen häiriötekijä ja korkea taajuuskomponentti. Kiihtyvyyssanturin signaaleista saaduilla asentokulmilla ei ole poikkeavuutta, koska ne eivät ole integroituja. Näin kiihtyvyyssanturin signaalit ovat alkuperäisiä ja eivät ole vielä käyneet läpi lisäkäsittelyä asentokulmien saamiseksi. Kuitenkin niissä on suurta melua ja alhaista vastetta koskevia ongelmia. (Nonomura 2020)

3.7 Enkooderit

Enkooderi on eräänlainen anturi, joka voi muuntaa kulmasiirtymän tai nopeuden sähköiseksi impulssiksi. Sen toimintaperiaate voidaan jakaa neljään luokkaan: valosähköinen, magneettinen, induktiivinen ja kapasitiivinen. Usein käytetty tyyppi on valosähköinen enkooderi, joka hyödyntää valosähköisen teorian vaikutusta signaalin muuntamiseen. Se koostuu yleensä optisesti koodatusta levystä ja valosähköisestä ilmaisinalitteesta. (Yu et al. 2019)

Valosähköiset enkooderit voidaan luokitella inkrementtiantureiksi ja absoluuttiantureiksi. Inkrementaalisen anturin ulostulo on sarja neliöaaltopulsseja. Lisäksi pyörimiskulma

voidaan laskea pulssien määrän perusteella. Enkoodereita on käytetty laajalti useiden vuosien ajan niiden etujen ansiosta. Ne ovat esimerkiksi kompakteja ja niillä on pitkä käyttöikä. Ne ovat myös käyttöisiä ja kehittyneitä tekniikkaa. (Yu et al. 2019)

3.8 Laseranturit

Laseranturit käyttävät lasertekniikkaa mittaustehtävien suorittamiseen. Ne koostuvat yleensä lasersäteilijöistä, ilmaisimista ja mittauspiiristä. Lasersäteilijän työaine voidaan pääasiassa jakaa neljään eri luokkaan: kiinteä, nestemäinen, kaasu ja puolijohde. Laserantureita käytetään enimmäkseen fyysisten parametrien, kuten etäisyyden, nopeuden ja värinän mittaamiseen. Laserantureiden yleisimmät tyypit ovat laseretäisyysmittari, lasersiirtymäanturi, laserskanneri ja laserseuranta. Laseretäisyysmittauksen mittaus voidaan suorittaa seuraavilla menetelmillä: lentoaika (TOF), kolmiomittausmenetelmä ja optinen häiriö.

TOF viittaa aikaväliin, jonka aikana laser lähettää ja vastaanottaa katoptrista valoa (catoptric light). Sitä käytetään usein laseretäisyysmittarissa pitkän matkan mittaukseen ja sen tarkkuus riippuu lentoajan mittauksen tarkkuudesta suuren valonnopeuden syystä. Kolmiomittausmenetelmässä käytetään homoteettisen kolmion teoriaa ja trigonometristä funktiota, joilla voidaan laskea esineiden etäisyys. Lasersiirtymäanturi perustuu myös tähän menetelmään, mutta sillä mitataan vain lyhyttä kantamaa. (Yu et al. 2019)

Optinen häiriö on ilmiö, jossa kahden valonsäteen superpositio, joilla on erilaiset vaiheerot, aiheuttaa kirkkaita ja tummia raitoituksia. Tätä ilmiötä hyödynnetään laserseurantalaitteissa, joissa mitataan etäisyyksiä heijastavan pinnan kohteeseen. Laseranturit voivat toteuttaa kontaktittoman kaukomittauksen, ja mittaussnopeus ja -tarkkuus ovat tyydyttäviä. Laserin aallonpituuteen voi kuitenkin vaikuttaa lämpötila, ilmakehän paine ja ilman kosteus, joten kompensatiota vaaditaan, kun yllä olevat parametrit muuttuvat. (Yu et al. 2019)

4 ANTUREIDEN SOVELLUTUKSET

4.1 Ihmisen ja robotin yhteistyö

Ihmisen ja robotin välinen yhteistyö on viime aikoina herättänyt paljon kiinnostusta tutkimuksessa. Sen sijaan, että robotit korvaisivat ihmistyöntekijät työpaikoilla, ihmisen ja robotin yhteistyö mahdollistaa sen, että ihmistyöntekijät ja robotit voivat työskennellä yhdessä yhteisessä työympäristössä. Ihmisen ja robotin yhteistyö voi vapauttaa ihmistyöntekijät raskaista tehtävistä avustavien robottien avustuksella, jos ihmisten ja robottien välille saadaan luotua toimivat ja tehokkaat viestintäkanavat. (Liu and Wang 2018)

Ihmisen ja robotin välisellä yhteistyöllä tarkoitetaan työntekijöiden ja robottien yhteistoimintaa, jossa yhdistyy ihmisten kognitiivinen kyky ja suorituskyky sekä robottien tarkkuus ja väsymättömyys. Tämän yhdistelmän avulla voidaan parantaa valmistusjärjestelmien joustavuutta ja mukautuvuutta. (Michalos et al. 2014)

Kuitenkin yksi tärkeä tekijä tulee ottaa huomioon, joka on turvallisuus. Robottien pitäisi pystyä havaitsemaan ja tunnistamaan objektit välttääkseen törmäykset sekä pysäyttää liike välittömästi törmäyksen sattuessa. Yleisiä antureita tämän toiminnon toteuttamiseen ovat näköanturit, laseranturit, läheisyysanturit, vääntömomenttianturit ja kosketusanturit. (Michalos et al. 2014)

4.2 AGV-navigointi

Nykyään AGV:tä (Automated Guided Vehicle) käytetään laajalti teollisuusympäristössä esimerkiksi materiaalikuljetuksiin ja joustaviin tuotantolinjoihin. AGV-robotti on ohjelmoitava liikkuva robotti, johon on integroitu anturilaite, joka voi automaattisesti havaita ja liikkua suunniteltua reittiä pitkin. Tämä järjestelmä koostuu erilaisista osista, kuten ohjauslaitteista, keskitetystä ohjausjärjestelmästä, latausjärjestelmästä ja viestintäjärjestelmästä. AGV:tä käytetään laajalti eri aloilla teollisuudessa, kuten valmistusteollisuudessa tehtaissa ja varastoissa materiaalinkäsittelyyn. Vuosikymmenten kehityksen jälkeen se on laajalti käytössä korkean tehokkuuden, joustavuuden,

luotettavuuden ja turvallisuuden ansiosta. Lisäksi sitä voidaan järjestelmällisesti skaalata ja soveltaa erilaisiin tehtäviin. (Moshayedi et al. 2019)

Yksi AGV:n suurista hyödyistä on, että se toimii koko päivän yhtäjaksoisesti. Tämänkaltaista työkapasiteettia ihmistyöntekijät eivät voi saavuttaa. Siksi esimerkiksi materiaalin tehokkuuden käsittelyä voidaan tehostaa ottamalla käyttöön useita AGV:tä, jotka toimisivat yhdessä. Lisäksi AGV pystyy välttämään törmäyksiä sekä aktivoimaan hätäjarrituksen. AGV:tä myös valvotaan ohjausjärjestelmällä niin, että luotettavuus ja turvallisuus ovat varmistettuja. (Moshayedi et al. 2019)

4.3 Tarttuminen ja kokoonpano

Esineisiin ja objekteihin tarttuminen on yleinen toiminto teollisessa valmistuksessa. Tämän tehtävän suorittamiseksi robottien on tunnistettava kohde-esine ja määritettävä sen sijaintikoordinaatit, minkä jälkeen toimilaitteen on poimittava se oikealla voimalla. Tässä prosessissa usein käytettävät anturit ovat yleensä näköanturit, lähestymisanturit, vääntömomenttianturit ja tuntoanturit. Esimerkiksi syvyyskameroita voidaan käyttää kohteiden sijainnin ja asennon tunnistamiseksi, jotta ohjain voisi suunnitella robotin liikeradan. Lisäksi läheisyysantureiden avulla voidaan muokata poikkeamaa ja parantaa tarttumisen tarkkuutta. Toisaalta robotin päätepisteen tarttumisvoima arvioidaan ja ohjataan tavallisesti vääntömomenttiantureilla. (Yu et al. 2019)

Jotta voidaan havaita ja välttää tarttuvan kohteen liukumista, käytetään usein tuntoantureita tarttumisvoiman säätämisessä. Vastaavasti teollisuuden tuotantolinjoilla kokoonpanossa on tärkeää tunnistaa kokoonpanon sijainti, jotta kokoonpano olisi mahdollisimman autonominen. Tämä voidaan saavuttaa hyödyntämällä näköantureita asennuspaikan havaitsemisessa ja paikallistamisessa. Lisäksi vääntömomenttiantureita ja laserantureita voidaan konfiguroida avustamaan ja kompensoimaan visuaalisten antureiden sijaintivirhettä tarkkuuden parantamiseksi ja tehokkuuden parantamiseksi kokoonpanossa. (Yu et al. 2019)

4.4 Anturifuusio

Anturifuusiolla tarkoitetaan useiden antureiden antaman tiedon yhteistoiminnallista käyttöä jonkin toiminnon suorittamisen helpottamiseksi, jonka tarkoituksena on parantaa robotin suorituskykyä. Yksinkertaisesti voidaan todeta, että anturifuusio on useista lähteistä peräisin olevan tiedon integrointia tarkkuuden ja laadukkaan sisällön parantamiseksi, ja tavoitteena on myös vähentää kustannuksia. (Alatise and Hancke 2020)

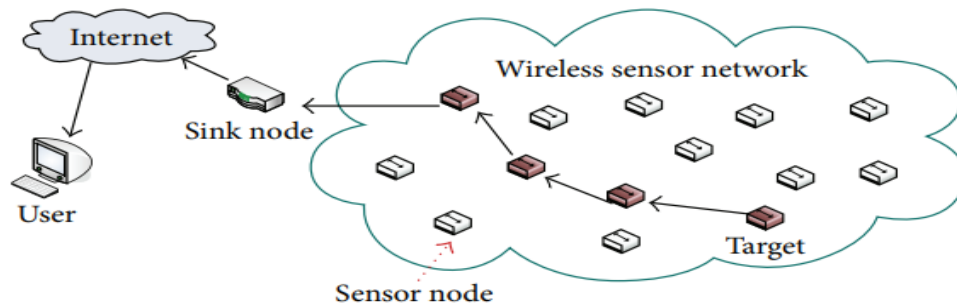
Anturifuusiota sovelletaan laajalti robotiikassa, kuten objektien tunnistamisessa, ympäristön kartoituksessa ja paikannuksessa. Fuusiointitekniikkaa pidetäänkin sopivimpana menetelmänä objektien seuraamiseen ja niiden sijainnin määrittämiseksi. Anturifuusion edut ovat seuraavat: poikkeavuuksien vähentäminen, tarkkuuden lisääminen ja kustannusten aleneminen. Tämän vuoksi useat tutkijat ovat ehdottaneet, että tietyn tarkkuuden saavuttamiseksi on tarpeen integroida useita eri antureita, jolloin yhden anturin vajautta voidaan täydentää toisella anturilla. Esimerkiksi kameran ottaman kuvan avulla voidaan korjata inertia-antureiden poikkeavuuksia. Fuusiotekniikassa käytettävä data määräytyy kyseisen sovellutuksen tavoitteesta, jossa se auttaa rakentamaan tarkempaa mallia, jonka avulla robotti voi navigoida ja toimia onnistuneesti. (Alatise and Hancke 2020)

4.5 Anturiverkko

Anturiverkkoihin kuuluvat anturilaitteet, jotka liikkuvat yhdessä tilassa havainnoiden ja seuraten erilaisia ympäristöolosuhteita. Nykyään anturiverkot ovat keskeisessä osassa tuotekehitystä ja tutkimustyötä ominaisuuksiensa vuoksi. Anturiverkko koostuu anturisolmuista, joissa jokaisessa solmussa on havainto-, laskenta-, viestintä- ja liikkumismoduulit. Kukin anturisolmu pystyy liikkumaan itsenäisesti tai ihmisen ohjaamana. Anturiverkkoja voidaan käyttää ympäristön, terveydenhuollon, maatalouden ja puolustussovellusten seurantaan sekä vaarallisilla ja katastrofialttiilla alueilla. (Ryu et al. 2015)

Erytisesti robotiikassa anturiverkoilla on monia sovellutuksia, kuten robotiikan kehittynyt anturointi, robottien koordinointi, robottien reittisuunnittelu, robottien paikannus, robottien navigointi, verkon kattavuus, tiedonsiirto ja tiedonkeruu.

Anturiverkkojen käyttö auttaa robotteja olemaan tietoisia olosuhteista esimerkiksi sähkömagneettisen kentän seurannalla tai metsäpalojen havaitsemisella. Näin anturiverkot parantavat robottien aistimista ja voivat myös auttaa robottia löytämään reitin halutulle alueelle. Lisäksi anturiverkkojen avulla voidaan koordinoita useita robotteja, sillä verkko pystyy jakamaan anturitietoa ja seuraamaan niiden toimintaa. (Ryu et al. 2015)



Kuva 7. Anturiverkko on anturisolmujen verkko, joka kerää tietoja tietyistä kohdealueesta. Tiedot lähetetään nielusolmuun, joka on yhteydessä internetiin. Käyttäjät voivat käyttää kerättyjä tietoja etänä internetin kautta erilaisia sovelluksia ja tarkoituksia varten. (Ryu et al. 2015).

4.6 Eleiden tunnistus

Eleet ovat yksi viestinnän keino. Pään nyökkäys, käsien liikkeet ja kehon asennot ovat tehokkaita viestintäkanavia ihmisen ja robotin välisessä yhteistyössä. Robottien on ymmärrettävä ihmisten eleitä oikein ja toimia eleiden perusteella tehokkaasti, jotta yhteistyö ihmisten kanssa sujuisi moitteettomasti. Eleiden identifiointi on ensimmäinen vaihe eleiden tunnistamisessa sen jälkeen, kun antureista on saatu raakadataa. Eleiden identifioinnilla tarkoitetaan eleinformaation havaitsemista ja vastaavan eleinformaation erottelua raakadatasta. Yleisesti käytetyt tekniikat eleiden identifiointiongelman ratkaisemiseksi perustuvat visuaalisiin ominaisuuksiin ja oppimisalgoritmeihin. (Liu and Wang 2018)

5 YHTEENVETO

Nykytekniikka ja teknologia kehittyvät ennennäkemättömällä tahdilla, joten on loogista päätellä, että antureidenkin kehitys roboteissa on taattu. Jatkuva kehitys- ja tutkimustyö voidaan päätellä, että antureiden kokoa pyritään pienentämään, jonka seurauksena kustannukset laskevat. Lisäksi viitteitä on, että antureiden suorituskykyä parannetaan jatkuvasti.

Tulevaisuudessa voidaan odottaa, että eri anturien integrointi roboteissa tulee olemaan entistä enemmän keskeisessä roolissa. Näin anturien herkkyyttä saadaan kasvatettua, jolloin oleellisten ilmiöiden esimerkiksi lämmön, äänen ja valon havainnointi ja reagointi paranevat. Lisäksi kehittyneen anturitekniikan ansiosta robotit voivat kommunikoida ja toimia ihmisten kanssa turvallisemmin sekä ymmärtää ihmisten eleitä ja puhetta helpommin.

Robottien autonomisesta toiminnasta on myös tehty paljon tutkimusta. Näin ollen voidaan päätellä, että anturitekniikan kehittyessä robotit kykenevät toimimaan yhä enemmän autonomisesti varsinkin sellaisissa olosuhteissa, jotka tyypillisesti olisivat ihmisille vaarallisia. Esimerkiksi mainitaan alueet, jotka ovat alttiita katastrofeille, säiden ääri-ilmiöille tai radioaktiiviselle säteilylle.

LÄHDELUETTELO

Ahola, M. and Aitto-Oja, H., 2014. Anturiteknologian hyödyntämismahdollisuudet navettaympäristössä Esiselvitys. *Theseus* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/75210> [Viitattu 22.8.2023].

Alatise, M. B. and Hancke, G. P., 2020. A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*, 8, 39830–39846.

Attamimi, M. and Nagai, T., 2018. A Visual Sensor for Domestic Service Robots. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)* [Verkkodokumentti], 2 (1). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/334321344_A_Visual_Sensor_for_Domestic_Service_Robots [Viitattu 6.12.2022].

Ben-Ari, M. and Mondada, F., 2018. Robots and Their Applications. *Elements of Robotics*, 1–20.

Benet, G., Blanes, F., Simó, J. E. and Pérez, P., 2002. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 40 (4), 255–266.

Cutkosky, M. R., Howe, R. D. and Provancher, W. R., 2008. Force and Tactile Sensors. *Springer Handbook of Robotics* [Verkkodokumentti], 455–476. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/227013300_Force_and_Tactile_Sensors [Viitattu 5.12.2022].

Girão, P. S., Ramos, P. M. P., Postolache, O. and Miguel Dias Pereira, J., 2013. Tactile sensors for robotic applications. *Measurement*, 46 (3), 1257–1271.

Hagis, C., 2003. History of Robots. *Citeseer* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c7dadcf0c86f3fcb6429d11c086ff61b29d3855e> [Viitattu 14.8.2023].

Hebert, M., 2000. Active and passive range sensing for robotics. *In: Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. IEEE, 102–110.

Kaplan, F., 2005. Everyday robotics: Robots as everyday objects. *ACM International Conference Proceeding Series [Verkkodokumentti]*, 121, 59–64. Saatavissa: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1107548.1107570> [Viitattu 4.8.2023].

Liu, H. and Wang, L., 2018. Gesture recognition for human-robot collaboration: A review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 68, 355–367.

McSweeney, K., 2017. *Industrial robots are good for the economy, study suggests | ZDNET* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.zdnet.com/article/industrial-robots-are-good-for-the-economy/> [Viitattu 6.9.2023].

Michalos, G., Makris, S., Spiliotopoulos, J., Misios, I., Tsarouchi, P. and Chryssolouris, G., 2014. ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories of the Future. *Procedia CIRP*, 23 (C), 71–76.

Moshayedi, A. J., Jinsong, L. and Liao, L., 2019. AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering [Verkkodokumentti]*, 12 (4), 5–18. Saatavissa: https://jsme.khsh.iau.ir/article_669256.html [Viitattu 16.2.2023].

Niemueller, T. and Widyadharma, S., 2003. *Artificial Intelligence-An Introduction to Robotics*.

Nonomura, Y., 2020. Sensor Technologies for Automobiles and Robots. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering [Verkkodokumentti]*, 15 (7), 984–994. Saatavissa: <https://Verkkodokumenttilibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tee.23142> [Viitattu 7.12.2022].

Ortiz, S., 2022. *NASA's next-gen robot will explore space and do your chores at home* | ZDNET [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.zdnet.com/article/nasas-next-gen-robot-will-explore-space-and-do-your-chores-at-home/> [Viitattu 12.8.2023].

Paavilainen, H., 2022a. Yleistä antureista - Koneautomaatio - Metropolia Confluence [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pageId=12160009> [Viitattu 8.9.2022].

Robinson, I., 2022d. *An Introduction to the Sensors in Robotics* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17346> [Viitattu 12.9.2022].

Ryu, J. H., Irfan, M. and Reyaz, A., 2015. A Review on Sensor Network Issues and Robotics. *Journal of Sensors*, 2015.

Siegwart, R., Nourbakhsh, I. and Scaramuzza, D., 2011. Introduction to autonomous mobile robots.

Storr, W., 2014. *Sensors and Transducers and Introduction* [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_1.html [Viitattu 3.10.2022].

Wilson, Jon S., 2022b. *Sensor Technology Handbook* - Jon S. Wilson - Google-kirjat [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=5UE6YCjDGMC&oi=fnd&pg=PP1&dq=sensor+technology&ots=jgMUk9gEQ0&sig=BTt37QEdYMv7RBFjBvjOyv8sl-E&redir_esc=y#v=onepage&q=sensor%20technology&f=false [Viitattu 3.10.2022].

Yu, X., Hu, Q., Xu, D., Li, P. and Liu, X., 2019a. Common Sensors in Industrial Robots: A Review. *Journal of Physics: Conference Series* [Verkkodokumentti], 1267 (1), 012036. Saatavissa: <https://iopscience-iop-org.pc124152 oulu.fi:9443/article/10.1088/1742-6596/1267/1/012036> [Viitattu 5.12.2022].