

Max Kuusela

AUTONOMISEN MOBIILIROBOTIN KUNNONVALVONTA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Tammikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Max Kuusela: Autonomisen mobiilirobotin kunnonvalvonta
Tampereen yliopisto
Konetekniikka tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Tammikuu 2025

Autonomiset mobiilirobotit ovat käytössä monella eri alalla, ja niille ominaista on itsenäinen toiminta omassa ympäristössään. Tässä kandidaatintyössä esitetään autonomisen järjestelmän kunnonvalvonnan tavoitteet ja kunnonvalvontakeinot.

Autonomisen robotin tavoite on toimia itsenäisesti muuttuvissa tilanteissa. Ihmisoperaattori ohjaa ja valvoo matalan autonomian tason robottia ja on vastuussa sen kunnonvalvonnasta. Korkean autonomian tason robotti on vähäisessä vuorovaikutuksessa ihmisen kanssa ja on vastuussa omasta kunnonvalvonnastaan. Kunnonvalvonnan avulla pystytään havaitsemaan järjestelmän häiriöt ja toimimaan niiden mukaisesti. Robotit voivat muokata tehtävän kulkua häiriön ympärille.

Perinteiset kunnonvalvontakeinot ovat tietyissä tilanteissa sopivia autonomiselle mobiilirobotille, kuten värähtelyn ja sähkömoottorin kunnon valvonnassa. Värähtelyn valvontaan voidaan käyttää kiihtyvyyssmittaria ja sähkömoottoriin moottoriin analyysiä. Mobiiliroboteille ominaisia ongelmia ovat virrankulutus ja sensorien toimintakunto. Virrankulutusta seurataan akunhallinta-järjestelmällä ja sensorien toimintakunto pystytään selvittämään vertaamalla saatua tietoa ympäristöstä.

Muokattu KUKA youBot -robotti mittaa omien liikkeiden jännitettä ja sähkövirtaa, joita vertaamalla raja-arvoihin saadaan tietoon komponenttien kunto. Raja-arvojen ylittyessä toiminta keskeytetään ja tehdään uusi toimintasuunnitelma tehtävän loppuun viemiseksi.

Avainsanat: autonomia, kunnonvalvonta, autonominen mobiilirobotti

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KUNNONVALVONTA	2
2.1 Perinteiset kunnonvalvontakeinot	2
2.2 Mobilirobotille ominaiset kunnonvalvontakeinot.....	4
3. AUTONOMISET JÄRJESTELMÄT.....	5
3.1 Autonomian tasot.....	5
3.2 Autonomisen järjestelmän päätöksenteko.....	8
4. KUNNONVALVONTA AUTONOMISESSA JÄRJESTELMÄSSÄ.....	10
4.1 Autonomisen robotin käyttökohteet.....	10
4.2 Kunnonvalvonta KUKA youBot -robotissa.....	11
5. YHTEENVETO.....	13
LÄHTEET	14

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMR	engl., Autonomous Mobile Robot, autonominen mobiilirobotti
EC	engl., Electronically Commutated, sähköisesti välitetty
HRI	engl., Human-Robot-Interaction, ihmisen ja robotin välinen vuorovaikutus
LiDAR	engl., Light Detection and Ranging, laserkeilaus
LORA	engl., Levels of Robot Autonomy, robotin autonomian tasot
SAE	Society of Automotive Engineers

1. JOHDANTO

Perinteisesti työkoneiden ja laitteiden viat voidaan havaita ennen vakavaa häiriötä ihmisen eri aistien avulla, kuten kuulon tai näön perusteella. Myös erilaisilla mittareilla pystytään havaitsemaan järjestelmässä ilmenevät ongelmat, jos ihminen tarkastelee niitä. Autonomisen systeemin yksi kriittisistä ominaisuuksista on niiden kyky toimia itsenäisesti ilman ihmisen avustusta ja palautumaan vikatilaa jälkeen (Fragapane 2021). Ilman ihmisen läsnäoloa autonomisen systeemin täytyy myös pystyä havaitsemaan vikatiloja omassa systeemissään. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tutkia, mitä haasteita autonomia tuo systeemin kunnonvalvontaan ja miten niitä voidaan ratkaista.

Työssä tarkastellaan autonomisia mobiilirobotteja, jotka osaavat itsenäisesti siirtyä toimintaympäristössään ja suorittaa tehtäviä ilman ihmisen avustusta. Kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Miksi autonomiset järjestelmät tarvitsevat kunnonvalvontaa?
- Miten eri kunnonvalvontamenetelmiä käytetään autonomisissa järjestelmissä?

Työn toisessa luvussa tutkitaan kunnonvalvonnan perusteita ja teoriaa. Kyseisessä luvussa kuvataan, miten eri vikatiloja havaitaan ja millaisia antureita vaaditaan muutosten selvittämiseen. Kolmannessa luvussa keskitytään autonomisten järjestelmien teoriaan. Luvussa esitellään autonomian perusteet, mitä autonomian tasot ovat ja miten autonominen järjestelmä tekee päätöksiä. Viimeisessä luvussa käsitellään autonomisen järjestelmän vaikutusta kunnonvalvontaan. Luvussa esitetään autonomisen robotin eri käyttökohteita ja syvennytään autonomisen järjestelmän kunnonvalvontaan.

2. KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonta määritellään koneen kuntoa ilmaisevien tietojen ja datan saantina ja käsittelemällä ajan myötä (Suomen Standardoimisliitto SFS 2013, s. 8). Kunnonvalvonnan tarkoitus on seurata laitteen kuntoon vaikuttavia parametreja, kuten värähtelyn muutosta ajan myötä. Tämä tieto on tarpeellista, kun halutaan selvittää huollon tarvetta laitteelle. Muutokset parametreissa viittaavat laitteen kunnon tilan muutokseen. Asettamalla raja-arvot parametrin muutokselle saadaan reaaliaikaisesti tietää, milloin laitteen toiminta ei ole enää normaalia. Tämän avulla pystytään estämään mahdolliset häiriöt tai vahingot. (Pascual 2015, s. 63)

Ihmisen suorittama kunnonvalvonta perustuu aisteihin, joissa laitteen operaattori kuuntelee, tunnustelee ja tarkastelee muutoksia toiminnassa. Värähtelyn muutoksen pystyy kuulemaan tai tuntemaan, mutta sen lähde ei ole aina helposti selvitettävissä. Tarkastelemalla pystyy havaitsemaan pinnallisia ongelmia toiminnassa, mutta koneen sisälle pystyy näkemään vain tarkemmalla tarkastelulla. Sensoreiden avulla ihminen pystyy havaitsemaan pieniä muutoksia koneen eri toiminnoissa ja sensoritiedon avulla pystytään selvittämään vioittumiseen liittyviä parametreja.

Kunnonvalvonnassa keskitytään tiettyjen parametrien tutkimiseen. Tässä työssä käsitellään seuraavien parametrien ja kohteen tilan analysointia:

- värähtely
- sähkömoottorin toimintakunto
- virrankulutus
- sensorien toimintakunto.

Kunnonvalvontaa hyödynnetään erilaisissa järjestelmissä ja autonomisissa mobiilirobo-teissa voidaan hyödyntää vakiintuneita menetelmiä. Roboteilla on myös vain niille ominaisia ongelmia, joiden valvontaan täytyy soveltaa erilaisia keinoja.

2.1 Perinteiset kunnonvalvontakeinot

Värähtelyn tarkastelulla pystytään määrittämään laitteen kokonaiskunnan tai yksittäisen komponentin kunnan tila. Värähtely määritellään koneen ja sen komponenttien liikkeenä verrattuna lepotilaan. Ulkoiset voimat aiheuttavat ominaista liikettä koneelle ja sen komponenteille. Liikkeen aiheuttamaa värähtelyä seurataan pitkällä aikavälillä ja siitä etsitään muutoksia. Muutos värähtelyssä voi merkitä ongelmatilannetta. (Pascual 2015)

Värähtelyä mitataan sille tarkoitetuilla laitteilla, kuten kiihtyvyyssmittarilla, joka muuttaa värähtelevän liikkeen elektroniseksi signaaliksi analyysiä varten. Värähtelyn lähteenä toimivat toistuvat voimat, osien löysyys, resonanssi tai jokin näiden yhdistelmä. (Pascual 2015)

Toistuvat voimat johtuvat pyörivien komponenttien epätasapainosta, väärin suuntauksesta, kulumisesta tai väärinkäytämisestä. Komponenttien löysyys aiheuttaa värähtelyä. Jos osat löystyvät, värähtelyn taso kasvaa normaalia hyväksyttävän yläpuolelle. Osien välinen löysyys voi aiheuttaa värähtelyä. Löysyys johtuu yleensä liiallisista laakerien väljyydestä, löysistä kiinnityspulteista, yhteensopimattomista osista, syöpmisestä tai halkeamista. (Pascual 2015)

Resonanssi tarkoittaa tilaa, jossa operaation herätetaajuus on lähellä koneen rakenteen luonnollista taajuutta. Tällä taajuudella värähtelyn vaimennus on alhaista ja lopputuloksena on resonanssi. Resonanssin tapahtuessa värähtelyn taso voi olla hyvin korkea ja aiheuttaa vahinkoa. (Pascual 2015)

Suurin osa sähköisesti aiheutuneista vioista sähkömoottoreissa johtuu oikosuljettujen käämien kierroksista. Käämityskontaminaatio ja huonot liitokset voivat myös johtaa moottorin häiriöön. Käämien viat ovat yleensä kierrosten loppupuolella, joissa eristäminen on heikointa ja rasitus on suurinta. Suurin osa sähkömoottorien vioista on pieniä alussa, mutta pahenevat ajan myötä ja aiheuttavat häiriön. Moottoripiirin analyysillä pystytään selvittämään moottorin kunto tarkkailemalla seuraavia sähköisiä ominaisuuksia moottorin käämeissä: (Pascual 2015)

- käämien resistanssi, induktanssi ja impedanssi
- eristeen resistanssi maadoitukseen
- vaiheen kulma käyttämällä matalajännitteistä AC-signaalia
- usean taajuuden virran vastetesti
- vaiheen epätasapaino
- suhdevirta/taajuus impedanssin funktiona
- roottorisauvojen tila
- purkausvälin yhdenmukaisuus. (Pascual 2015)

Moottoripiirin analyysin tarkoitus on mitata moottorin sähkömagneettisia ominaisuuksia, jossa sen kuntoa arvioidaan tarkkailemalla sitä sähkövirtapiirinä. Nämä mittaukset ovat

tasapainossa hyväkuntoisessa moottorissa. Jos edes yksi on epätasapainossa, vian tapahtuminen on mahdollista. Tietoa pystytään keräämään virtapiiriin eri kohdista, kuten moottorin kytkentärasiasista, virrankatkaisijasta, sulakkeista, kontaktorista tai ohjaustaulusta. Ongelman juurisyyn selvittämiseksi on tarpeellista tehdä mittausta virtapiiriin eri kohdista. (Pascual 2015)

2.2 Mobiilirobotille ominaiset kunnonvalvontakeinot

Yleisin autonomisten robottien energianlähde on sähköakku. Akunhallintajärjestelmän avulla pystytään tarkkailemaan ja hallinnoimaan akun tilaa. Tärkeimmät seurattavat parametrit ovat sähkövirta, jännite ja akun lämpötila. Energiankulutuksen arviointiin on useita eri keinoja. Fysiikkaan perustuvassa mallissa seurataan toimintaan kuluva voimaa, vääntöä ja energian katoamista. Tietoon perustuvassa mallissa käytetään koneoppia ja aiempaa aineistoa arvion saamiseen. Välimuotomallissa käytetään hyväksi molempia edellä mainittuja keinoja. (Wu et al. 2023)

Autonomiset mobiilirobotit käyttävät erilaisia sensoreita keräämään tietoa ympäristöstä, liikkeistä ja tehtävästä. Näitä sensoreita on esimerkiksi LiDAR (Light Detection and Ranging), kamerat ja matkamittarit. (Liu et al. 2024) Yksi kunnonvalvontakeino on kerätä ympäristöstä dataa usealla eri sensorilla ja verrata niitä keskenään. Lu et al. (2017) esittävät kunnonvalvontakeinoa Pioneer 3-DX -robotille, jossa sen liikkeen paikantamiseen käytetään käskettyä nopeutta, pyörien digitaalista asentoanturia ja kameraa. Robotin liikkuessa liikkeen muutos lasketaan jokaisen sensorin havaitsemasta asennon muutoksesta. Arvoja verrataan pareittain tosiinsa, ja niistä kerätään jäännösarvo. Jäännösarvoille on selvitetty ideaalisessa tilanteessa raja-arvo, jonka ylittäessä voidaan selvittää vika sensorissa. (Lu et al. 2017)

3. AUTONOMISET JÄRJESTELMÄT

Tässä työssä käytetään esimerkkeinä autonomisia järjestelmiä, joilla on mahdollisimman vähän robotin ja ihmisen välistä vuorovaikutusta. Aistinvarainen kunnonvalvonta on tärkeää, kun ihmisoperaattori käyttää laitetta. Itsenäisesti toimiville laitteille on siis tärkeää, että ne pystyvät havaitsemaan viat itse. Autonominen järjestelmä pystyy suorittamaan annetut tehtävät muuttuvassa ympäristössä keräämällä tietoa ympäristöstään. Järjestelmä pystyy tekemään työtä pitkiä aikoja ilman ihmisen ohjausta tai väliintuloa. Esimerkkejä tästä on itse ohjautuvat autot tai autonomiset mobiilirobotit (eng. Autonomous Mobile Robots, AMR).

Autonomiset järjestelmät pystyvät tekemään itsenäisesti päätöksiä. Näitä päätöksiä ei pystytä laskemaan etukäteen ympäristön monimutkaisuuden ja muuttuvuuden takia. Sen sijaan päätökset on tehtävä reaaliajassa tehtävän aikana. Tätä varten järjestelmä kerää tietoa ympäristöstä ja tekee muutoksia toiminnassaan tarpeen mukaan. Automaattinen järjestelmä sen sijaan reagoi yksinkertaisesti, ennalta arvattavasti ja etukäteen asetettujen ohjeiden mukaisesti. Autonomian ja automaation erot perustuvat tehtävän monimutkaisuuteen ja ympäristön muuttuvuuteen. Autonomisen ja automaattisen systeemin raja ei ole selkeä, vaan täysin reagoivan automaattisen systeemin ja harkitsevan autonomisen systeemin välillä on spektri. (Baudin et al. 2016, s. 5)

3.1 Autonomian tasot

Autonomian tasoille ei ole yhtä kaikkea kattavaa ohjenuoraa. SAE Mobiluksella (2021) on standardi itseohjautuville ajoneuvoille, mikä rajaa autonomiset toiminnot tieliikenteen tilanteisiin. Kuva 1 on tiivistetty versio standardista, missä autonomian tasot on jaettu kuudelle eri tasolle. Rajauksen takia se ei kuitenkaan sovellu kaikkiin tilanteisiin, kuten sisätiloissa toimiviin robotteihin.



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™

Learn more here: sae.org/standards/content/j3016_202104

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	

Copyright © 2021 SAE International.

	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Kuva 1: Itseohjautuvien ajoneuvojen automaation tasot. (SAE Mobilus 2021)

Tässä työssä käytetään enimmäkseen Beer et al. (2014) ehdottamaa luokittelua autonomisten robottien tasoille (eng. Levels of Robot Autonomy, LORA). Taulukko 1 autonomian tasoja kuvataan vertaamalla ihmisen ja robotin tekemän työn määrää tehtävän suorittamiseksi. Taulukon ääripäissä ei ole ollenkaan ihmisen ja robotin välistä vuorovaikutusta. Ensimmäisellä rivillä ihminen tekee kaikki toiminnot ja viimeisellä rivillä robotti suorittaa kaikki tehtävän vaiheet. Näiden rivien välillä ihminen ja robotti on vuorovaikutuksessa ja ihmisen tarve vähenee, mitä alemmas taulukkoa mennään. Asteikolle sijoittuminen perustuu siihen, miten itsenäisesti robotti tuntee, suunnittelee ja toimii annetussa tehtävässä ja kuinka paljon ihminen vaikuttaa tehtävän suorittamiseen. (Beer et al. 2014)

Taulukko 1: Robottien autonomian tasot. Lyhenteet: I = Ihminen suorittaa, R = robotti suorittaa, I/R = ihminen tai robotti avustaa, tai ovat vuorovaikutuksessa.

LORA	Tunteminen	Suunnittelu	Toiminta	Selitys
Manuaalinen	I	I	I	Ihminen suorittaa kaiken tehtävään liittyvän tuntemisen, suunnittelun ja tekemisen.
Kauko-ohjaus	I/R	I	I/R	Robotti avustaa ihmistä tekemisessä, esimerkiksi tarttumalla esineeseen. Ihminen on vastuussa tuntemisesta ja suunnittelusta, ja suorittaa tehtävän ohjaamalla robottia.
Avustettu kauko-ohjaus	I/R	I	I/R	Ihminen avustaa robottia kaikissa tehtävän vaiheissa, mutta robotti pystyy havaitsemaan ympäristönsä ja väistämään esteitä.
Eräkäsittely	I/R	I	R	Ihminen ja robotti aistivat ympäristön. Ihminen suunnittelee ja antaa tehtävän robotille, jonka robotti suorittaa.
Päätöksenteon tukeminen	I/R	I/R	R	Ihminen ja robotti aistivat ympäristön ja suunnittelevat tehtävän. Ihminen tekee lopullisen päätöksen ja antaa robotille käskyn suorittaa tehtävän.
Jaettu ohjaus ihmisen väliintulolla	I/R	I/R	R	Robotti autonomisesti aistii ympäristönsä, suunnittelee tehtävän ja suorittaa toimenpiteet. Ihminen tarkkailee ja antaa ohjeita ongelmatilanteissa.
Jaettu ohjaus robotin väliintulolla	I/R	I/R	R	Robotti suorittaa kaikki tehtävään liittyvät tarpeet ja voi pyytää ihmiseltä apua uusien tavoitteiden kanssa.
Johtotason ohjaus	R	I/R	R	Ihminen antaa robotille tehtävän yleisellä tasolla, esimerkiksi liikkuminen tiettyyn pisteeseen jossakin ympäristössä. Robotti autonomisesti aistii ympäristön, tekee suunnitelman ja suorittaa sen.
Valvonnan ohjaus	I/R	R	R	Robotti suorittaa kaikki tehtävään liittyvät tarpeet, mutta ihminen tarkkailee robottia, sen toimintaa ja ympäristöä. Ihminen voi antaa tarvittaessa uusia tavoitteita, jolloin autonomian taso siirtyy joko johtotason ohjaukseen, jaettuun ohjaukseen tai päätöksenteon ohjaukseen.
Täysi autonomia	R	R	R	Robotti suorittaa kaikki tehtävään liittyvät tarpeet ilman ihmisen kanssa vuorovaikutamista.

(Perustuu lähteeseen Beer et al. 2014, s. 87)

Tunteminen, suunnittelu ja toiminta ovat kolme robotiikan perusalkiota ja eri robotiikan rakenteet määrittävät näiden alkioden välisen suhteen. Näitä kolmea tarvitaan, jotta roboti pystyy toimimaan autonomisesti. Robotilla on oltava kyky havaita ympäristönsä, jotta se voi toimia muuttuvissa olosuhteissa. Robotin on myös pystyttävä tunnistamaan ympäristössä olevat esteet ja liikkumisen apuvälineet. Ympäristön havaitsemiseen käytetään sensoreita, joiden avulla havaitaan muutoksia ja tapahtumia ympäristössä. Sensoreita on erilaisiin käyttötarkoituksiin ja käytössä olevia sensoreita on esimerkiksi valosensorit, lämpötilasensorit, kosketussensorit, painesensorit ja etäisyysensorit. Kun havaittu tieto ympäristössä on kerätty, roboti tarvitsee toimintasuunnitelman suorittaakseen annetun tehtävän. Tätä varten tarvitaan ohjelma, mikä vastaanottaa tiedon ympäristöstä ja tavoitteen, ja näiden avulla luo suunnitelman tehtävän suorittamiseksi. Riippuen tehtävätyypistä eri ohjelmia ja algoritmeja tarvitaan toimintasuunnitelman luomiseksi. Toimintasuunnitelman saatuaan roboti aloittaa suorittamaan tehtävää. Tätä varten roboti käyttää ohjaimia luomaan liikettä. Ohjaimia on kolmenlaisia: hydraulisia, pneumaattisia ja sähköisiä. (Srivastava 2019, s. 1–2)

3.2 Autonomisen järjestelmän päätöksenteko

Yksi päätavoitteista robotin suunnittelussa on systeemin vakaus. Robotit ovat oppineet selviämään epävarmalla tiedolla esimerkiksi dynaamisissa esteissä. Kaikkia mahdollisia tilanteita ei ole mahdollista ennustaa etukäteen. Ohjausjärjestelmän on pystyttävä käsittelemään sokean pisteen tilanteita. Sensoridatan tulkinta on yksi suuri ongelma, esimerkiksi lasertutkaimen virhe läpinäkyvän pinnan takia. Tämän lisäksi valoanturit luovat virheellistä dataa heijastavien pintojen takia. Jos vastaan tulee epävarma tilanne, yleensä paras vaihtoehto on keskeyttää kaikki toiminto sen sijaan, että jatkaisi tuntemattomaan lopputulokseen. Selkeää palautumiskäytäntöä ja uudelleen suunnittelua käytetään tehtävän jatkamiseen. Liikkuvalla robotilla ei ole laitepuolella varmennusta, joten ohjelmistopuoli hoitaa häiriöiden käsittelyn. (Carstensen, J. et al. 2016, s. 564)

Autonomisten robottien päätöksentekokyky mahdollistaa niiden toimimisen muuttuvassa ympäristössä. Tarpeen mukaan robotin liikkeen suunnittelija mukauttaa liikkeen nopeutta tai pysäyttää liikkeen kokonaan. Alkuperäinen liikerata voidaan korvata, jos suunnitellulla reitillä on ylitsepäsemätön este. Roboti pystyy itse tekemään muutoksia reittiin tai esteiden väistämiseen. (Fragapane 2021)

Useiden autonomisten robottien on mahdollista toimia samassa toimintaympäristössä. Jokaisella robotilla on päätäntävalta omasta ohjauksesta, mutta tehtävien suunnittelun ja jakamisen suorittaa ulkoinen ohjausyksikkö. Robottien ohjaamisen keskittäminen vä-

hentää toimintakykyä, kun robottien määrä kasvaa suureksi. Varastoissa voi olla tuhansia robotteja, jolloin ohjauksen hajauttaminen on tehokkaampaa. Tällöin ohjaaminen voidaan toteuttaa tietylle alueelle tai tiettyihin tehtäviin. (Fragapane 2021)

4. KUNNONVALVONTA AUTONOMISESSA JÄRJESTELMÄSSÄ

Autonomiset robotit ovat hyödyllisiä monessa eri käyttötarkoituksessa, ja järjestelmän sisäinen kunnonvalvonta mahdollistaa vikojen havaitsemisen toiminnassa. Tässä luvussa kerrotaan, millaisia käyttökohteita autonomisilla järjestelmillä on eri aloilla ja syvennytään muunnellun KUKA youBotin kunnonvalvontaan.

4.1 Autonomisen robotin käyttökohteet

Joitakin autonomisten järjestelmien sovelluksia on seuraavat: (Cognominal & Wańkowicz 2021, s. 192–193)

- varastointi ja jakelukeskukset
- siivoaminen ja desinfiointi
- turvallisuus ja vartiointi
- terveydenhuolto
- vähittäiskaupat
- lyhyen matkan kuljetukset. (Cognominal & Wańkowicz 2021, s. 192–193)

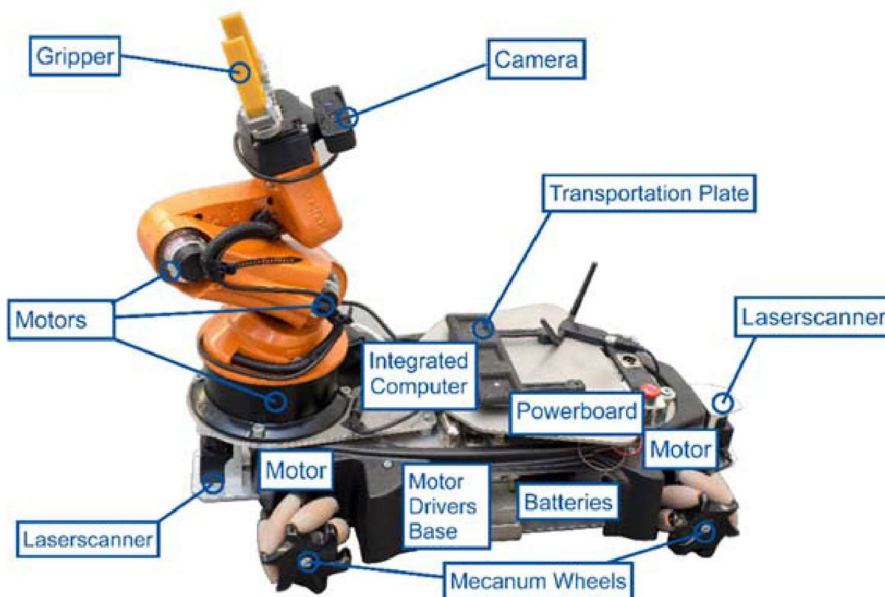
Autonomisia robotteja käytetään varastoissa ja jakelukeskuksissa palettien tai muiden isojen pakettien purkamiseen, lastaamiseen, pinoamiseen ja noutamiseen (Cognominal & Wańkowicz 2021, s. 192–193). ABB tarjoaa näihin käyttötarkoituksiin Flexley-tuotesarjan robotteja (ABB 2024).

Starship Technologies tarjoaa lyhyen matkan kuljetuksiin omaa robottiaan. Kuljetukset on pääasiassa tarkoitettu ruoan kuljettamiseen ravintoloista ja vähittäiskaupoista. Robotit kulkevat itsenäisesti lähtöpaikasta edeltä määritettyihin poimimispisteisiin, joista asiakkaat hakevat tuotteet. Starship Technologies ilmoittaa robotin toimivan autonomian tasolla neljä, millä todennäköisesti viitataan Kuva 1 esittävään ajoneuvojen automaation tasojen standardiin. Robotti kulkee itsenäisesti jalkakäytävillä, mutta tarpeen vaatiessa ihminen voi ottaa ohjauksen hallintaan. (Starship Technologies 2024)

4.2 Kunnonvalvonta KUKA youBot -robotissa

Carstensen et al. (2016) ovat rakentaneet autonomisen mobiilirobotin RoboCup@Work-kisaa varten. Kisan tarkoitus on parantaa robottien kehitystä ja sopeuttamista teolliseen ympäristöön. Robotit suorittavat teollisuuteen liittyviä tehtäviä, kuten ruuvien, muttereiden tai työkappaleiden asettamista niille tarkoitettuihin paikkoihin. Työkappaleita käsitellään tuotantolinjoilla ja pyörivillä tasoilla. Robotit myös kuljettavat kappaleita. (Carstensen et al. 2016, s. 561–562)

Autonomisen mobiilirobotin pohjana on käytetty KUKA youBot -robotia, joka esitetään Kuva 2. EC-moottoreilla (engl. Electronically Commutated) ohjataan robotin Mecanum-pyöriä ja viiden vapaustasteen manipulaattoria, jonka päässä on robottikäsi. Ympäristön havaitsemiseen käytetään kahta laseretäisyysmittaria ja robottikäden tyveen kiinnitettyä kameraa. Robotti on Bluetoothin välityksellä yhteydessä serveriin, joka käsittelee kunnonvalvontadataa ja tekee päätöksiä sen perusteella. (Carstensen et al. 2016, s. 560–562)



Kuva 2. Kuka youBot ja sen osien erittely (Carstensen et al. 2016, s. 561).

Robotin liikkuaessa ennalta tuntemattomalla alueella se muodostaa systemaattisesti itselleen kuljettavan alueen kartan. Kartan tietoa käytetään liikkumiseen liittyvissä tehtävissä. Algoritmin avulla luodaan suunnitelma tehtävälle. Algoritmi tekee päätöksen käsittelemällä tehtävään käytettyä aikaa, epäonnistumisen todennäköisyyttä ja oletettua tulosta. Ohjaustehtäviä varten liikuttavat matkat on laskettu muodostetun kartan perusteella ja

sen perusteella voidaan laskea liikkumiseen kuluva aika. Toimintoihin kuluva aika saadaan aikaisemmista suorituksista. Jos robotti ei pysty korjaamaan tekemäänsä virhettä, tehtävä joko siirretään myöhemmälle tai suunnitellaan uudelleen. (Carstensen et al. 2016, s. 564)

Työtehtävän onnistumisen kannalta on hyödyllistä tietää robotin jokaisen osan tila. Tämä tieto mahdollistaa häiriön havaitsemisen tehtävän aikana. Sen avulla voidaan reagoida tilanteeseen ja välttyä vaurioilta. Osien käsittelyn aikana eri osien tilaa monitoroidaan. Esimerkiksi voiman takaisinkytkentää käytetään robottikäden tartuntavoiman päättämiseen ja tunnistetaan mahdolliset viat kädessä. Voiman määrä arvioidaan käden servomoottorin sähkövirran avulla. Integroiduilla sensoreilla voidaan päätellä manipulaattorin liike, mikä antaa informaatiota yksittäisten servomoottorien asennosta, nopeudesta ja sähkövirrasta. Energianmittauslaitteella seurataan sähköenergian kulutusta robotissa. Tärkein systeemin etu on havaita kuorman jakautumista ja mahdollistaa kunnonvalvonta. Mittauslaite mittaa jännitettä ja sähkövirtaa laskeakseen tarvittavan voiman ja energian määrän. Mitattua dataa verrataan robotin sisäiseen malliin. Raja-arvon ylittäminen pysäyttää sen hetkisen toiminnon ja aloittaa normaaliin tilaan palautumisen. (Carstensen et al. 2016, s. 562–564)

Käyttämällä todennäköistä energiankulutusta mittarina voidaan suunnitella energiaoptimoitu tehtävä. Robotti voi esimerkiksi välttää alueita, joissa lattia on epäsuotuisassa kunnossa tai voi suunnitella lyhyempiä matkoja painavien lastien kanssa. Akun kapasiteettia voidaan käyttää myös rajoitteena algoritmille. Yhdistämällä energianmittaus, tehtävän suunnittelu sekä liikkeen vertailudata voidaan ennustaa akun varauksen kulutus. Tämän avulla saadaan arvioitua jäljellä oleva aika ennen kuin akun varauksen taso on liian pieni tehdäksään enempää liikkeitä. Suurempi tehdas voi siis ajoittaa vaihdon tai yleisesti reagoida tietoon ajoissa. Tallennettua dataa voidaan käyttää myös energiatehokkuuden varmennukseen. Kunnonvalvonta ja häiriön havaitseminen voidaan toteuttaa vertaamalla energiankulutuksen keskiarvoa ja virran korkeimpia arvoja robotin energiamalliin. (Carstensen et al. 2016, s. 567–568)

5. YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin autonomisia mobiilirobotteja kunnonvalvonnan näkökulmasta. Tutkimuskysymyksinä käytettiin seuraavia:

- Miksi autonomiset järjestelmät tarvitsevat kunnonvalvontaa?
- Miten eri kunnonvalvontamenetelmiä käytetään autonomisissa järjestelmissä?

Autonomiset robotit eroavat automaattisista järjestelmistä niiden ympäristöön reagoimisen perusteella. Autonomiset robotit pystyvät toimimaan itsenäisesti monimutkaisissa ja muuttavissa ympäristöissä. Usein ympäristö tai tehtävä voivat asettaa robotin tilanteeseen missä sen toiminta poikkeaa normaalista ja joutuu häiriötilaan. Häiriön havaitsemiseen ja paikantamiseen tarvitaan kunnonvalvontamenetelmiä. Ihmisen läsnäolo vähentää robotin tarvetta itsenäisyydelle. Robotin autonomian tason kasvaessa ihmisen ja robotin välinen vuorovaikutus kuitenkin laskee, ja järjestelmän kunnan tietoisuudesta tulee tärkeämpää. Ongelmatilanteessa robotti havaitsee toiminnassaan vian, tekee suunnitelman ja toimii ongelman ympäriltä. Mahdollisia toimintoja on siirtää tehtävä myöhemmälle tai antaa toisen robotin hoitaa tehtävä.

Autonomisissa mobiiliroboteissa käytetään useita eri kunnonvalvontamenetelmiä. Usein uusien menetelmien keksiminen ei ole tarpeellista, vaan voidaan käyttää perinteisiä menetelmiä. Suurin osa mobiiliroboteista ovat sähköllä toimivia, jolloin sähkökomponenttien valvonta korostuu. Värähtelyn muutoksien mittaamiseen voidaan käyttää kiihtyvyyssmittaria ja sähkömoottorin toimintakuntoa voidaan seurata moottoripiirin analyysillä. Autonomisilla roboteilla on myös niille ominaisia ongelmia, joita pitää valvoa erilaisilla keinoilla. Virrankulutusta seurataan akunhallintajärjestelmällä, joka seuraa virtaa, jännitettä ja lämpötilaa. Fysiikkaan ja tietoon perustuvalla mallilla ennustetaan energiankulutusta. Sensorien toimintakunnon valvontaan ehdotetaan ristiin vertailun menetelmää. Samaa tietoa, kuten liikuttua etäisyyttä, mitataan usealla eri sensorilla ja niiden arvoja verrataan pareittain.

LÄHTEET

- ABB Oy. Autonomous Mobile Robots (AMRs). Verkkoaineisto. (Viitattu 18.12.2024). Saatavilla: <https://new.abb.com/products/robotics/autonomous-mobile-robots>
- Baudin, É., Blanquart, J., Guiochet, J. & Powell, D. (2007). Independent Safety Systems for Autonomy : State of the Art and Future Directions. Tutkimusraportti <https://hal.science/hal-01292675v1>
- Beer, J. M., Fisk, A. & Rogers, W. A. (2014). Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 3(2), pp. 74–99. <http://dx.doi.org/10.5898/JHRI.3.2.Beer>
- Carstensen, J., Carstensen, T., Pabst, M., Schulz, F., Friederichs, J. & Aden, S. et al. (2016). Condition Monitoring and Cloud-based Energy Analysis for Autonomous Mobile Manipulation - Smart Factory Concept with LUHbots. *Procedia Technology*, Vol. 26, pp. 560–569. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.070>
- Cognominal, M., Patronymic, K. & Wańkiewicz, A. (2021). Evolving Field of Autonomous Mobile Robotics: Technological Advances and Applications. *Fusion of Multidisciplinary Research, An International Journal*, Vol. 2(2), pp. 189-200. FMR. <https://fusionproceedings.com/fmr/1/issue/view/6>
- Gielis, J., Shankar, A. & Prorok, A. (2022). A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems. *Curr Robot Rep*. Vol. 3(4), pp. 213–225. Springer. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00090-9>
- Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, Vol. 294(2), pp. 405–426. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019>
- Liu, Y., Wang, S., Xie, Y., Xiong, T., & Wu, M. (2024). A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots. *Sensors*, Vol. 24(4), pp. 1222. MDPI. <https://doi.org/10.3390/s24041222>
- Lu, X., Faragasso, A., Ji, Y., Kono, H., Yamashita, A. & Asama, H. (2017). Combining multi-localization methods for fault diagnosis in autonomous mobile robot systems. 2017 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics (RCAR), pp. 200–205. IEEE. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311860>

Pascual, D. G. (2015). Artificial intelligence tools : decision support systems in condition monitoring and diagnosis. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18384>

SAE Mobilus. (3.5.2021). SAE Levels of Driving Automation™ Refined for Clarity and International Audience. Blogikirjoitus. SAE Blog. <https://www.sae.org/blog/sae-i3016-update>

Srivastava, A. (2019). Sense-Plan-Act in Robotic Applications. ResearchGate. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21308.36481>

Starship Technologies. FAQs. Verkkoaineisto. (Viitattu 18.12.2024). Saatavissa: <https://www.starship.xyz/faq/>

Suomen Standardoimisliitto SFS (2013). Koneiden kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Sannasto. (SFS/ISO Standardi 13372). <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/ISO/ID2/1/235146.html.stx#>

Wu, M., Yeong, C.F., Su, E.L.M., Holderbaum, W. & Yang, C. (2023). A review on energy efficiency in autonomous mobile robots. Robotic Intelligence and Automation. Vol. 43(6), pp. 648-668. Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/RIA-05-2023-0060>