

Mikko Tervonen

# KULJETTAJAA AVUSTAVAT TOIMINNOT MANIPULAATTOREISSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Pauli Mustalahti  
Helmikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Mikko Tervonen: Kuljettajaa avustavat toiminnot manipulaattoreissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2023

---

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella, minkälaisilla menetelmillä kuljettajaa avustavia toimintoja on toteutettu manipulaattoreihin. Manipulaattori on käsittelylaite, jota ohjaamalla kuljettaja voi suorittaa erilaisia työtehtäviä. Tässä työssä tarkastellaan erityisesti raskaina työkoneina käytettäviä manipulaattoreita, joita ovat esimerkiksi nosturit, metsäkoneet ja kaivinkoneet. Kuljettajaa avustavat toiminnot ovat järjestelmiä ja laitteita, jotka helpottavat työkonetta hallintaa. Avustavien toimintojen avulla pystytään muun muassa parantamaan tuottavuutta, lisäämään turvallisuutta ja auttamaan kuljettajaa jaksamaan paremmin työtehtävissään.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Työn alussa tarkastellaan työkonetta turvallisuusvaatimuksia, ja siinä lähteinä on käytetty erityisesti työkonetta liittyviä standardeja. Selvitettäessä menetelmiä, joilla kuljettajaa avustavat toiminnot ovat toteutettu, lähteinä on käytetty tieteellisiä julkaisuja. Lisäksi on tarkasteltu kaupallisissa sovelluksissa käytössä olevia avustavia toimintoja.

Kuljettajaa avustavien järjestelmien toiminta perustuu ohjausjärjestelmään, jossa toimilaitteita ohjataan säätimellä anturitiedon perusteella. Toiminnon toteutuksessa voidaan käyttää myötäkkyntä, takaisinkyntä tai molempia näistä. Myötäkkyntä on näistä toteutukseltaan yksinkertaisin, koska se voidaan toteuttaa ilman anturointia. Pelkästään myötäkkyntä käyttämällä ei kuitenkaan päästä yleensä kovin tarkkaan lopputulokseen. Yhdessä takaisinkyntän kanssa käytettynä myötäkkyntällä pystytään parantamaan lopputulosta ja yksinkertaistamaan tarvittavan takaisinkyntäsäätimen rakennetta. Säätimen rakenne voidaan suunnitella monen eri menetelmän avulla, ja näistä menetelmistä yleisimpiä on esitelty tässä työssä. Työssä tarkastellaan myös erilaisia antureita, joita manipulaattoreissa voidaan käyttää. Säätimen ja anturoinnin valintoihin vaikuttavat muun muassa järjestelmän vaatimukset.

Tässä työssä kuljettajaa avustavista järjestelmistä tarkastellaan erityisesti nostureiden kuormanvakautusjärjestelmiä ja työkonetta ohjaamoiden vaimennusjärjestelmiä. Lisäksi esitellään manipulaattorin liikkeen ohjausta avustavia järjestelmiä ja erilaisiin kartoitusteknologioihin perustuvia toimintoja. Kaikkia näitä avustavia järjestelmiä kehitetään jatkuvasti. Tulevaisuudessa myös täysin autonomisten työkonetta määrä tulee lisääntymään. Etenkin vaarallisissa työympäristöissä kuljettaja pyritään saamaan pois koneen ohjaamosta. Tällöin koneen ohjaaminen ja valvominen voidaan suorittaa etävalvomossa. Työkonetta, joissa kuljettajaa tarvitaan, pyritään uusilla liikkeen ohjausta avustavilla toiminnoilla ja kartoituslaitteilla helpottamaan kuljettajan työtä ja päätöksentekoa entisestään. Avustavien toimintojen kehityksen mahdollistaa etenkin anturitekniikan kehitys. Tekniikan kehittyessä antureiden hinnat laskevat, jolloin niiden asentaminen yhä useampiin laitteisiin tulee kannattavaksi.

Avainsanat: manipulaattori, työkone, avustavat toiminnot, kuljettaja, kuormanvakautusjärjestelmä, vaimennusjärjestelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO.....	1
2.MANIPULAATTOREIDEN VAATIMUKSET .....	3
2.1 Standardit .....	3
2.2 Turvallisuusvaatimukset.....	6
3.NOSTUREIDEN KUORMANVAKAUTUSJÄRJESTELMÄT .....	9
3.1 Kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät menetelmät .....	9
3.1.1 Myötäkytkentään perustuvat menetelmät.....	10
3.1.2 Takaisinkytkentään perustuvat menetelmät.....	12
3.2 Kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät anturit .....	14
4.OHJAAMOIDEN VAIMENNUSJÄRJESTELMÄT .....	16
4.1 Vaimennusjärjestelmissä käytettävät menetelmät .....	16
4.2 Vaimennusjärjestelmissä käytettävät anturit .....	21
5.MUUT KULJETTAJAA AVUSTAVAT JÄRJESTELMÄT .....	23
5.1 Liikkeiden ohjausta avustavat toiminnot.....	23
5.2 Paikannus- ja kartoitusteknologioihin perustuvat toiminnot .....	25
6.YHTEENVETO .....	28
LÄHTEET .....	30

# 1. JOHDANTO

Manipulaattori on käsittelylaite, jota ohjaamalla kuljettaja voi suorittaa monenlaisia työtehtäviä. Sitä käytetään laajalti sovelluksissa, joissa tarvitaan suuria voimia ja tarkkuutta, esimerkiksi erilaisissa raskaissa työkoneissa. Manipulaattorin ohjaaminen on kuitenkin vaativa tehtävä, ja se edellyttää kuljettajalta ammattitaitoa ja tarkkaavaisuutta. Kuljettajan työn helpottamiseksi, turvallisuuden lisäämiseksi ja tuottavuuden parantamiseksi manipulaattoreihin on kehitetty monia työskentelyä avustavia toimintoja. Näillä toiminnoilla tarkoitetaan järjestelmiä tai laitteita, jotka helpottavat kuljettajan työkoneen hallintaa tai tekevät muuten työtehtävien suorittamisesta helpompaa.

Työn tuottavuuden parantaminen on siis yksi suurimmista syistä avustavien toimintojen kehittämiseksi. Tuottavuus on työn tehokkuuden mittari, ja yksi tapa sen laskemiseen on jakaa työn tuotos tehtyjen työtuntien määrällä. Esimerkiksi puunkorjuussa tuottavuus voidaan siis laskea jakamalla tehtyjen kuormien määrä niihin käytetyllä ajalla. Työn tuottavuuden parantaminen on tärkeää muun muassa kilpailukyvyn kannalta, ja työkonetta vaativissa töissä se riippuu suurelta osin kuljettajasta. Manipulaattorien kohdalla tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että mitä nopeammin kuljettaja pystyy manipulaattoria ohjaamaan halutun työtehtävän mukaisesti, sitä tuottavampaa työ on.

Manipulaattorin ohjaaminen samanaikaisesti sekä nopeasti että tarkasti on kuitenkin usein vaikeaa. Manipulaattorin puomi koostuu yleensä useista osista, ja kuljettaja voi joutua ohjaamaan jokaista osaa erikseen. Kuljettajan liian nopeat ja äkkinäiset ohjausliikkeet taas saattavat aiheuttaa värähtelyä puomissa ja sen päässä olevassa kuormassa. Oman haasteensa kuljettajan työhön aiheuttavat myös työskentelyolosuhteet, koska manipulaattoreita käytetään usein vaativissakin työympäristöissä, kuten metsissä, kaivoksissa ja vesillä. Tämän työn tavoitteena on tarkastella, minkälaisia toimintoja manipulaattoreihin on kehitetty kuljettajan avustamiseksi ja minkälaisilla menetelmillä.

Aluksi työssä esitellään manipulaattoreita koskevia standardeja ja turvallisuusvaatimuksia. Kolmannessa luvussa keskitytään kuormausnosturien kuormanvakautusjärjestelmiin. Siinä tarkastellaan muun muassa erilaisia menetelmiä ja antureita, joita niissä järjestelmissä käytetään. Neljännessä luvussa käsitellään menetelmiä, joilla vaimennetaan työkoneen ohjaamoon kohdistuvia iskuja ja värähtelyjä,

mikä on tärkeää kuljettajan työssä jaksamisen kannalta. Viidennessä luvussa tarkastellaan muita kuljettajaa avustavia toimintoja, joita ovat esimerkiksi erilaiset liikkeiden ohjausta avustavat ja kartoitusteknologioihin perustuvat järjestelmät. Viimeisessä luvussa esitetään työn yhteenveto ja pohditaan lyhyesti, minkälaisia kuljettajaa avustavia toimintoja tulevaisuudessa kehitetään.

## 2. MANIPULAATTOREIDEN VAATIMUKSET

Yksi kuljettajaa avustavien toimintojen tärkeimmistä tehtävistä on lisätä kuljettajan sekä työkoneen lähellä liikkuvien ihmisten turvallisuutta, koska liikkuvien työkoneiden käyttöön liittyy aina riskejä. Manipulaattoreita käytetään paljon vaarallisissa ympäristöissä, kuten kaivoksissa ja erilaisilla työmailla. Lisäksi työkoneen ympäristössä liikkuvien ihmisten loukkaantumisriskiä lisää se, että vaara-alue muuttuu ja liikkuu koneen mukana. Manipulaattoreilla, kuten esimerkiksi nostureilla, käsitellään paljon painavia kuormia, mikä saattaa myös aiheuttaa vaaratilanteita.

Vuosina 1985–2007 Suomessa tapahtui 296 kuolemaan johtanutta onnettomuutta, joissa oli osallisena työkone. Näistä 97 kuolemaa aiheuttivat liikkuvat työkoneet ja 54 kuolemaa erilaiset nostokoneet. [1] Eniten onnettomuuksia työkoneiden kanssa aiheuttaa uhrin jääminen jumiin ja koneesta tai sen kuormasta tullut kova isku [2]. Työkoneita käytettäessä onnettomuuksien lisäksi kuljettajan terveyttä uhkaavat myös muun muassa melu, pöly ja värinä [3].

Kuljettajan ja ympäristön turvallisuuden takaamiseksi on kehitetty paljon erilaisia lakeja, asetuksia ja standardeja. Standardit ovat toimialakohtaisia ja määrittelevät esimerkiksi työkoneiden ajonopeuksia, testimenetelmiä, turva-alueita, toimintavaatimuksia järjestelmän havaitessa vian ja riskianalyyseja, joita tulisi suorittaa konetta suunniteltaessa. Joillekin työympäristöille on tehty omia standardejaan, joissa määritellään, mitä asioita siellä täytyy ottaa huomioon työkoneilla työskenneltäessä. Tästä esimerkkinä toimii Suomen Standardisoimisliiton standardi SFS-EN 14033-2 *Railway applications*, joka määrittelee muun muassa pienimmät sallitut etäisyydet rautatien ajojohtimien ja työkoneen osien välille [4, s. 22].

### 2.1 Standardit

Standardit ovat julkaisuja, jotka sisältävät yhteisesti sovittuja vaatimuksia ja suosituksia. Suomessa standardeja julkaisee standardisoinnin keskusjärjestö Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Sen standardeista suurin osa perustuu kansainvälisten ja eurooppalaisten standardisomisjärjestöjen tekemiin standardeihin. Näistä järjestöistä merkittävimpiä työkoneiden kannalta ovat kansainvälinen standardisomisjärjestö ISO (International Organization for Standardization) ja kansainvälinen sähköalan standardisointiorganisaatio IEC (International Electrotechnical Commission).

Autonomisiin työkoneisiin liittyvien standardien keinot turvallisuuden lisäämiseksi voidaan jaotella kolmeen eri lähestymistapaan. Yksi niistä perustuu työkoneessa oleviin turvajärjestelmiin, jotka sisältävät muun muassa antureita ja kartoitusteknologioita. Toinen lähestymistapa ehdottaa automaattisten työkoneiden eristämistä ja kulunvalvonnan käyttämistä alueilla, joissa työkoneet toimivat. Kolmas perustuu pääosin kuljettajan kykyyn ymmärtää eri tilanteita ja reagoida niihin oikealla tavalla saatavilla olevan informaation perusteella. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että kun ongelmallinen tilanne havaitaan, automaattinen toiminta pysähtyy ja ohjaus siirretään täysin kuljettajalle. [5]

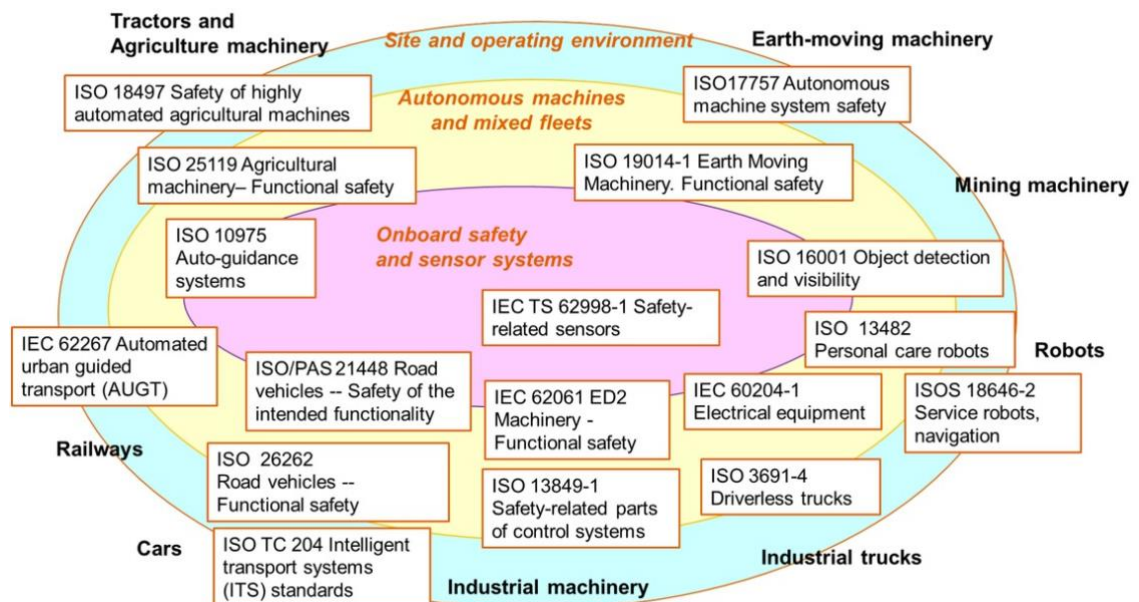
Koneiden yleiset suunnittelun periaatteet turvallisuuden takaamiseksi määritellään standardissa ISO 12100 *Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen*. Siinä on kuvattu menetelmät vaarojen tunnistamiseksi ja riskien arvioimiseksi koneen elinkaaren eri vaiheissa [6, s. 19]. Standardissa myös kerrotaan menetelmiä näiden vaarojen poistamiseksi tai vähentämiseksi [6, s. 27]. Standardi ISO 4413 *Hydraulinen tehonsiirto. Järjestelmiä sekä niiden komponentteja koskevat yleiset periaatteet ja turvallisuusvaatimukset* täydentää edellistä standardia määrittelemällä yleiset turvallisuusvaatimukset hydraulisille tehonsiirtojärjestelmille. Standardissa kerrotaan hydraulisiin tehonsiirtojärjestelmiin liittyviä vaaroja ja esitetään periaatteita, joita voidaan käyttää kyseisten vaarojen välttämiseksi [7, s. 10]. Tämä on erittäin oleellinen standardi manipulaattoreiden kannalta, koska suuri osa niistä toimii hydraulisella tehonsiirrolla.

Manipulaattoreiden turvallisuusvaatimuksia käsitellään myös monissa tiettyyn työkoneeseen kohdistuvassa standardissa. Metsäkoneiden yleiset turvallisuusvaatimukset on määritelty standardissa ISO 11850 *Machinery for forestry. General safety requirements*. Se käsittelee merkittäviä vaaroja, jotka ovat yleisiä erilaisille metsäkoneille [8, s. 1]. Standardissa myös esitetään esimerkiksi vaatimukset kuljettajaa suojaaville rakenteille ja koneen ohjaustoiminnoille [8 s. 4,7–8]. Nostureiden suunnitteluperiaatteita käsitellään standardissa SFS-EN 13001-1 *Nosturit. Yleissuunnittelu. Osa 1: Yleiset periaatteet ja vaatimukset* [9]. Tiettyyn nosturityyppiin kohdistuvia standardeja on myös julkaistu monia. Manipulaattoreiden kannalta erityisen oleellinen on kuormausnostureiden suunnittelua, laskelmia ja kokeiden vähimmäisvaatimuksia määrittelevä standardi SFS-EN 12999 *Nosturit. Kuormausnosturit* [10, s. 5].

Myös kaivoksissa käytettäville työkoneille ja maansiirtokoneille on omia standardejaan. Standardissa ISO 19296 *Mining. Mobile machines working underground. Machine safety* on määritelty liikkuvien kaivostyökoneiden eri osien ja järjestelmien

turvallisuusvaatimuksia. Siinä käsitellään myös erilaisia vaaratilanteita, joita voi aiheutua näiden koneiden käytöstä. [11, s. 6] Maansiirtokoneiden yleisiä turvallisuusvaatimuksia käsitellään standardissa EN 474-1 *Earth-moving machinery. Safety. Part 1: General requirements* [12]. Tämän työn kannalta oleellinen standardi on myös samaan standardisarjaan kuuluva EN 474-5 *Earth-moving machinery. Safety. Part 5: Requirements for hydraulic excavators*, joka määrittelee turvallisuusvaatimuksia hydraulisille kaivinkoneille [13].

Kuvassa 1 on esitetty yleiskuva autonomisten koneiden merkittävimmistä ISO ja IEC standardeista. Standardit on aseteltu kuvaan sen mukaan, mihin toimialaan ne liittyvät ja mitä osa-aluetta koneella työskentelystä ne käsittelevät. Näistä standardeista tämän työn kannalta merkittävimpiä on esitelty kuvan jälkeen.



**Kuva 1.** Autonomisten koneiden merkittävimmät standardit [5].

Standardi ISO 17757 *Earth-moving machinery and mining. Autonomous and semiautonomous machine system safety* tarjoaa turvallisuusvaatimuksia autonomisille ja puoliautonomisille maansiirto- ja kaivostyökoneille sekä niihin liittyville järjestelmille ja infrastruktuurille. Se tarjoaa ohjeita koneiden turvalliseen käyttöön määritellyissä toimintaympäristöissä koneen ja sen järjestelmän elinkaaren aikana. [14, s. 7]

Standardi ISO 18497 *Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines – Principles for design* määrittelee maataloudessa käytettävien pitkälle automatisoitujen koneiden suunnittelua turvallisuusnäkökulmasta. Siinä on muun



muassa annettu vaatimuksia koneiden kartoitusjärjestelmille, kuten esimerkiksi se, että niiden on oltava kykeneviä havaitsemaan koneen lähellä olevat ihmiset ja esteet [15, s. 14]. Neljäosainen standardisarja ISO 25119 *Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems* käsittelee maatalouskoneiden ohjausjärjestelmien turvallisuuteen liittyviä osia [16,17,18,19]. Maatalouskoneiden turvallisuuteen liittyy myös standardi ISO 10975 *Tractors and machinery for agriculture – Auto-guidance systems for operator-controlled tractors and self-propelled machines – Safety requirements*, joka määrittelee turvallisuusvaatimuksia maatalouskoneiden automaattiohjausjärjestelmille [20].

Maansiirtokoneiden ohjausjärjestelmän turvallisuuteen liittyvien osien suorituskykyvaatimuksia määrittää standardi ISO 19014 *Earth-moving machinery. Functional safety. Part 1: Methodology to determine safety-related parts of the control system and performance requirements*. Siinä esitellään turvallisuusanalyysi, jonka avulla pystytään varmistamaan ohjausjärjestelmän toiminnallinen turvallisuus [21, s. 6]. Maansiirtokoneiden turvallisuuteen liittyy myös standardi ISO 16001 *Earth-moving machinery. Object detection systems and visibility aids. Performance requirements and tests*. Standardissa esitellään vaatimukset ja menetelmät, joiden avulla voidaan arvioida ja testata työkoneen kohteen havaitsemisjärjestelmät ja näkyvyyttä parantavat apuvälineet [22, s. 5].

Standardi ISO 13849-1 *Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet* sisältää vaatimukset ja ohjeistuksen ohjausjärjestelmien turvallisuuteen liittyvien osien suunnitteluun yleisesti koneille [23]. Sähkölaitteistojen turvallisuutta määrittelee standardi IEC 60204-1 *Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset*, jota sovelletaan koneiden sähköisiin, elektronisiin ja ohjelmoitaviin järjestelmiin [24, s. 11]. Standardi IEC 62061 *Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus* määrittelee vaatimuksia ja antaa suosituksia koneiden turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien suunnitteluun [25, s. 10]. Koneiden turvallisuutta käsittelee myös standardi IEC TS 62998-1 *Safety of machinery – Safety-related sensors used for the protection of persons*, joka sisältää vaatimukset turvallisuuteen liittyvien anturijärjestelmien kehittämiseen ja integrointiin [26, s. 8].

## 2.2 Turvallisuusvaatimukset

Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin merkittävimpiä standardeissa esiintyviä manipulaattoreita koskevia vaatimuksia. Esimerkiksi kuormausnostureilla käsitellään painavia kuormia, joten turvallisuuden takia on tärkeää, että niiden rakenteelle on

määritelty vaatimukset. Standardin SFS-EN 12999 mukaan kaikissa nostureissa, joiden nostokyky on vähintään 1000 kg tai suurin nettonostomomentti on 40 000 Nm, on oltava nostokyvyn rajoitin. Rajoittimen käynnistyminen riippuu puomin vaakasuorasta ulottumasta. Nostokyvyn rajoitin valvoo myös nosturin mahdollisten tukijalkojen levittämistä ja voi pysäyttää liikkeen, jos tukijalkoja ei ole levitetty kokonaan. [9, s. 27]

Jos kuormausnosturin kuormaa kantava hydraulipiiri ei kestä suurinta mahdollisesti esiintyvää painetta, täytyy siinä käyttää myös paineenrajoituslaitetta. Sen on oltava asennettu siten, että hallitsematonta liikettä ei voi tapahtua paineessa, joka on alle 1,1-kertainen kuin paine, joka on laskettu koneen nostokyvyn rajoittimen sallitulle vaihteluvälille. Kaikissa kuormaa kantavissa sylintereissä on oltava myös automaattiset laitteet, esimerkiksi kuormanpitoventtiilit, jotka pysäyttävät sylinterin liikkeen, jos hydraulijohdotus rikkoutuu. [9, s. 26] Muita kuljettajaa avustavia turvatoimintoja kuormausnostureissa ovat muun muassa laskutoiminto, nostokyvyn ilmaisin, liikkeen rajoitin, nopeuden rajoitin, pysäytinlaite sekä erilaiset varoitusjärjestelmät. [9, s. 30–31]

Metsäkoneilla työskennellään haastavassa ympäristössä ja usein kuljettaja on yksin metsässä. Apua on siis harvoin nopeasti saatavilla, joten on tärkeää huolehtia kuljettajan turvallisuudesta. Standardi ISO 11850 määrittää monia metsäkoneen kuljettajan turvallisuutta koskevia vaatimuksia. Metsäkoneen ohjaamon täytyy esimerkiksi suojata kuljettajaa lentäviltä osilta, kuten hakkuukoneen teräketjulta, joka voi katketessaan lentää ympäristöön suurella nopeudella [8, s. 4].

ISO 11850 -standardi määrittelee myös monia metsäkoneen ohjaamiseen liittyviä vaatimuksia. Koneen ohjaimien täytyy automaattisesti palata neutraaliin asentoon, kun kuljettaja vapauttaa ne [8, s. 8]. Ohjaimet täytyy varustaa myös neutraalin asennon lukitsijoilla, jotta minimoidaan niiden tahattoman liikkumisen mahdollisuus, kun kuljettaja tulee koneeseen tai poistuu siitä. Koneen osia täytyy pystyä myös laskemaan, vaikka moottori olisi sammutettuna. [8, s. 9]. Automaattisille käsittelytoiminnoille standardi määrittelee, että niiden on pysähdyttävä automaattisesti, kun kuljettaja poistuu paikaltaan. Automaattisten toimintojen yksittäiset sähköviat tai tehohäviöt eivät myöskään saa aiheuttaa vaaratilannetta. [8, s. 11] Myös valtioneuvoston asetus puunkorjuun turvallisuudesta määrittelee turvallisuusvaatimuksia. Tärkeitä kohtia asetuksessa ovat muun muassa vaaditut turvaetäisyydet metsäkoneen ja muiden työntekijöiden välillä sekä vähimmäisetäisyys metsäkoneen ja sähkölinjojen välillä. [27]

Hydraulisten kaivinkoneiden turvallisuutta käsitellään standardissa EN 474-5. Kaivinkoneissa voidaan käyttää kameraa avustamaan kuljettajaa näkemään katvealueelle. Standardin mukaan kaivinkoneen näytön tulee automaattisesti näyttää

kameran kuvaa, kun koneen liikuttaminen on mahdollista. Kuljettaja voi väliaikaisesti sulkea kameran kuvan, esimerkiksi parametrien säädön ajaksi, mutta kameran kuvan täytyy automaattisesti palata näyttöön tämän jälkeen. [13, s. 12] Tukijaloilla varustetuille kaivinkoneille määritellään, että kaikkien tukijalkojen sylintereissä on oltava lukkoventtiilit, jotka estävät kaivinkonetta tulemasta epävakaaksi hydraulisen vian johdosta [13, s. 15].

ISO 17757 -standardissa on määritelty monia autonomisia työkoneita ja avustavia järjestelmiä koskevia vaatimuksia. Siinä on määritelty esimerkiksi, että autonomisen työkoneen etävalvojalla täytyy olla mahdollisuus pysäyttää työkoneen liike kokonaan, ja uudelleen liikkeelle lähtemisen on vaadittava toimia valvojalta. Työkoneen toimintatila pitää myös ilmoittaa visuaalisesti. Kun kone on manuaalisessa ohjauksessa, siinä välkkyvät vihreä valo, kun taas automaattisessa ohjauksessa välkkyvät sininen valo. [14, s. 12] Autonomisen työkoneen paikannus- ja suuntausjärjestelmällä tulee olla keino havaita järjestelmän tarkkuus ja mittausvirheen todennäköisyys. Kun järjestelmän tarkkuus ei ole vaaditulla tasolla, työkoneen järjestelmän tulee huolehtia koneen pitämisestä safe state -tilassa. [14, s. 16] Autonomisissa työkoneissa käytetään myös paljon digitaalisia maastokarttoja, kartoitusteknologioita ja suunnistusjärjestelmiä. Näitä koskevat samat vaatimukset, eli jos niiden tarkkuus ei ole vaaditulla tasolla, koneen tulee ylläpitää safe state -tilaa. [14, s. 16–19]

Standardissa ISO 17757 määritellään myös autonominen alue, joka tarkoittaa suunniteltua aluetta, jossa työkoneet voivat toimia autonomisessa toimintatilassa [14, s. 9]. Standardissa kehoitetaan käyttämään hallinnollista tai teknistä valvontaa estämään luvaton pääsy alueelle [14, s. 22]. Lisäksi työmaalle tehdyn riskianalyysin perusteella voidaan katsoa tarpeelliseksi, että jokaista konetta ja ihmistä autonomisella alueella on valvottava. Riittää myös, jos valvomattomat ihmiset ovat joko valvottavan koneen kyydissä tai valvottavan ihmisen saatettavana. Autonomisen alueen jokaisessa sisääntulo- ja poistumiskohdassa täytyy olla selkeät visuaaliset ilmoitukset alueesta. [14, s. 23]

### 3. NOSTUREIDEN KUORMANVAKAUTUSJÄRJESTELMÄT

Nosturit ovat välttämättömiä monilla aloilla. Niitä käytetään siirtämään hyötykuorma haluttuun paikkaan ja työn tuottavuuden kannalta on sitä parempi mitä nopeammin se pystytään tekemään. Kuorman nopeaa siirtelyä vaikeuttaa kuitenkin kuorman värähtely, joka johtuu usein nosturin kärjen suurista kiihtyvyyksistä. Ulko-olosuhteissa värähtelyä voi aiheuttaa myös esimerkiksi tuuli.

Kuormanvakautusjärjestelmä pienentää värähtelyä, mikä lisää turvallisuutta ja helpottaa nosturin käytön opettelua. Järjestelmän ansiosta myös työn tuottavuus paranee, kun kuljettajan tarvitsee tehdä korjausliikkeitä harvemmin ja aikaa ei tarvitse käyttää kuorman vakautumisen odottamiseen. Kuorman värähtely aiheuttaa nosturin osien kulumista, joten kuormanvakautusjärjestelmällä pystytään myös vähentämään käyttökustannuksia.

Nostureita on olemassa paljon erilaisia ja tässä kappaleessa esitellään niistä yleisimpiä. Torninosturi on suurikokoinen nosturi, jossa pystysuoran maston varassa olevaa vaakasuoraa puomia pitkin kulkee kuorman ohjaukseen käytettävä vaunu. Siltanosturi (engl. overhead crane) on toiminnaltaan hyvin samanlainen, mutta kuormaa ohjaava vaunu kulkee pitkin palkkia, joka tyypillisesti sijaitsee hallin katossa. Pukkinosturi (engl. gantry crane) eroaa siltanosturista vain siten, että sen rakenteessa on omat pylväät, joiden varassa palkki on. Puominosturi (engl. boom crane) on nosturi, jossa kuormaa liikutetaan puomin avulla. Siitä käytetään monesti myös nimeä kääntöpuominosturi (engl. rotary crane). Jos nosturin puomissa on yksi tai useampi nivel, puhutaan nivelpuominosturista (engl. knuckle boom crane). Tästä voidaan käyttää myös nimeä kuormausnosturi. Teleskoopinosturi on nosturi, jonka teleskooppiuomilla voidaan ulottua hyvinkin pitkälle. Tässä työssä käytetyissä aineistoissa kuormanvakautusjärjestelmiä on suunniteltu erityisesti silta-, puomi- ja nivelpuominostureille.

#### 3.1 Kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät menetelmät

Kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät menetelmät voidaan jaotella myötäkytkentään ja takaisinkytkentään perustuviin menetelmiin. Takaisinkytkentä perustuu mittauksiin ja arvioihin järjestelmän tilasta, kun taas myötäkytkennässä kuljettajan antamaa ohjauskomentoa muokataan siten, että kuorman värähtely pienenee. Garrido et al. tutkimuksen mukaan takaisinkytkennän suorituskykyä voidaan

usein parantaa huomattavasti käyttämällä järjestelmässä myös myötäkytkentää. Oikein suunnitellulla myötäkytkennällä voidaan pystyä myös vähentämään merkittävästi takaisinkytkentäsäätimen monimutkaisuutta. [28]

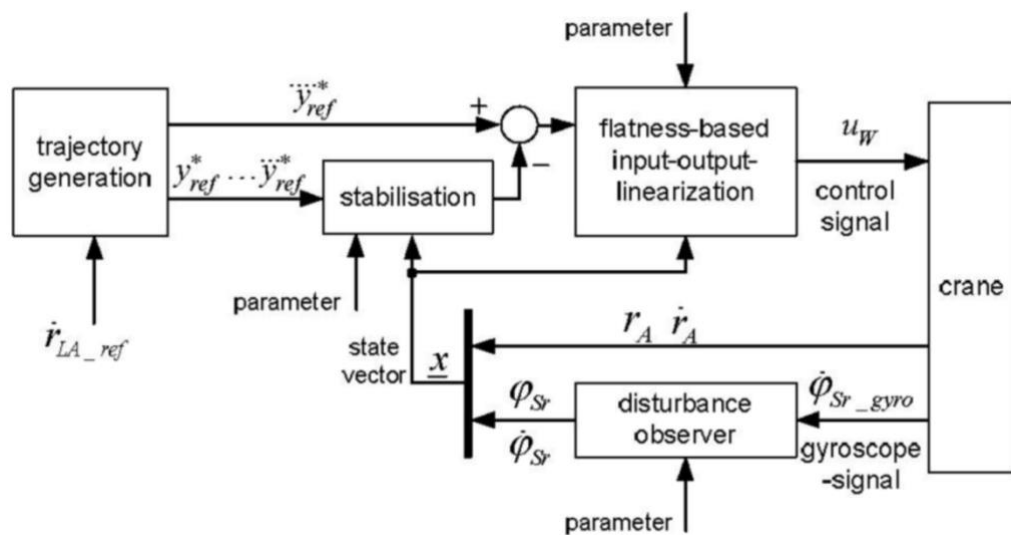
### 3.1.1 Myötäkytkentään perustuvat menetelmät

Myötäkytkennällä pyritään mahdollistamaan nosturin tarkka ohjaus siten, että ohjaussignaali ei perustu erosuureeseen. Sen sijaan myötäkytkentä perustuu tietoon nosturin ominaisuuksista, esimerkiksi erilaisten matemaattisten mallien kautta. Myötäkytkennällä voidaan myös vaimentaa mitattavissa olevia ulkoisia häiriöitä ennen niiden näkymistä takaisinkytkentämittauksessa. Yksi yleisimpiä myötäkytkentään perustuvia menetelmiä nosturin ohjaukseen on ohjauskomennon muotoilu (engl. input shaping). Tarkoituksena siinä on suodattaa kuljettajan antamasta ohjauskomennosta pois sellaiset komponentit, jotka aiheuttavat kuorman värähtelyä. Lewis et al. ovat tutkimuksessaan suunnitelleet komennon muotoilun puominosturille. Kuljettajan antamaa ohjauskomentoa konvoloidaan impulsseilla, jotka on suunniteltu minimoimaan värähtelyn liikkeen lopussa. [29] Jotkut vakautusjärjestelmät ovat suunniteltu siten, että liike alkaa levosta. Silloin järjestelmä ei ilman takaisinkytkentää pysty poistamaan värähtelyä, joka johtuu siitä, että kuorma ei aluksi olekaan levossa. Esimerkiksi ulkona tuuli tai merellä aallot saattavat aiheuttaa sen, että järjestelmän alkutila poikkeaa nolasta. Newman ja Vaughan ovat tutkimuksessaan suunnitelleet puominosturille ohjauskomennon muotoilun, joka pyrkii eliminoimaan alkutilasta johtuvan värähtelyn. Menetelmä perustuu siihen, että säädin luo arvioidulle alkutilan värähtelylle samansuuruisen, mutta vastakkaisen vaiheen impulssivasteen. Alkutilan värähtelyn suuruus ja vaihe arvioidaan nosturin ominaisuuksien perusteella. [30]

Toinen myötäkytkentämenetelmä on nimeltään *optimal control*. Arnold et al. esittelevät tähän perustuvan kuormanvakautusjärjestelmän tutkimuksessaan puominosturille. Nosturille johdetaan aluksi epälineaarinen dynaaminen malli, jonka jälkeen tarkastellaan nosturin liikeratojen suunnittelemista siten, että päätavoitteena on kuorman värähtelyjen vähentäminen. Optimointitehtävässä on luotu kohdefunktio, jossa on mukana kuormaa kannattelevan köyden neliöllisiä kulmanopeuksia. Nosturin fyysisistä rajoituksista sekä muista vaatimuksista saadaan kohdefunktion ratkaisuja rajoittavia epäyhtälöitä. Optimaalinen säädin saadaan, kun etsitään epäyhtälöiden sallimissa rajoissa ratkaisu, joka minimoi kohdefunktion. Numeerisen ratkaisun laskemiseen voidaan käyttää monia eri menetelmiä. [31]

Kuorman värähtelyjen vähentämiseksi voidaan käyttää myös lovisuodattimia (engl. notch filters). Lovisuodattimet vaimentavat signaalia tietyllä taajuusalueella, ja päästävät lävitseen kaikki signaalit tämän taajuusalueen ylä- ja alapuolella [32, s. 168]. Parker et al. esittelevät tutkimuksessaan tämän menetelmän kääntöpuominosturille. Menetelmä perustuu siihen, että kuljettajan antamasta ohjauskomennosta suodatetaan pois sellaiset taajuudet, jotka aiheuttavat eniten kuorman värähtelyä. [33]

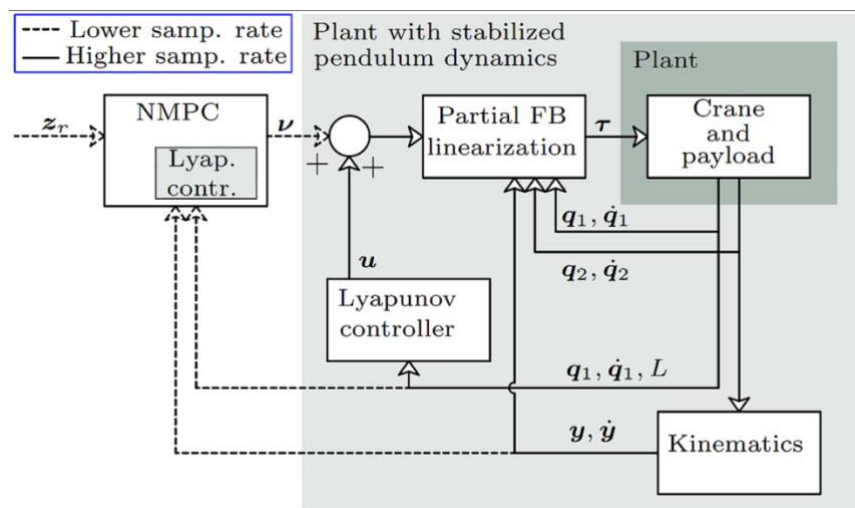
Eräs menetelmä, jonka avulla pystytään ohjaamaan joitakin epälineaarisia järjestelmiä, perustuu järjestelmän ominaisuuteen nimeltä tasaisuus (engl. flatness). Sen sijaan, että järjestelmän dynamiikkaa kuvattaisiin sen koko tilavektorilla, vektorissa käytetään tiettyjä muuttujia, joita kutsutaan järjestelmän tasaisiksi ulostuloiksi (engl. flat outputs). Tämä mahdollistaa monimutkaistenkin epälineaaristen järjestelmien dynamiikan linearisoinnin ja siten järjestelmään liittyvien ohjausongelmien ratkaisemisen. [34] Esimerkiksi Neupert et al. ovat käyttäneet tätä menetelmää kehittäessään puominosturille värähtelyä vähentävää ohjausjärjestelmän. Tutkimuksessa nosturille on luotu epälineaarinen malli, joka on linearisoitu käyttämällä järjestelmän tasaisuuteen perustuvaa menetelmää. Vaikka menetelmä itsessään perustuu vain myötäkytkentään, sen kanssa käytetään usein takaisinkytkentää, kuten myös tässä tutkimuksessa on tehty. Kuvassa 2 on esitetty tutkimuksessa käytetyn ohjausjärjestelmän rakenne. [35]



**Kuva 2.** Järjestelmän tasaisuuteen perustuvan ohjausjärjestelmän rakenne [35].

### 3.1.2 Takaisinkytkentään perustuvat menetelmät

Takaisinkytkentään perustuvan kuormanvakautusjärjestelmän säädin voidaan suunnitella esimerkiksi Lyapunovin funktioon perustuvalla menetelmällä. Kyseessä on funktio, jolla pystytään todistamaan differentiaaliyhtälön vakaus tasapainopisteessä ja sen läheisyydessä. Lyapunovin menetelmä perustuu fysikaaliseen ajatukseen, jonka mukaan eristetyn järjestelmän energia laskee [36, s. 226]. Tysse et al. ovat kehittäneet Lyapunovin funktioon perustuvan vaimennussäätimen nivelpuominosturille. Tutkimuksessa säädintä käytetään yhdessä NMPC:n eli epälineaarisen mallipredktiivisen säädön (engl. nonlinear model predictive control) kanssa. Nosturia oletetaan ohjattavan sen toimilaitteiden voimilla, kun taas Lyapunov- ja NMPC-säädinten ohjausmuuttujina käytetään nosturin kärjen kiihtyvyyttä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi ehdotetaan ohjausmenetelmää, joka perustuu osittaiseen takaisinkytkentälinearisointiin. Järjestelmän ohjattava osa on nosturi ja ohjaamaton osa on kuorma. Lyapunov-säädintä käytetään vakauttamaan nosturin kuorman dynamiikkaa, jonka jälkeen vakautettua dynamiikka ohjataan NMPC-säätimellä. Lyapunov-säädin vakauttaa järjestelmän dynamiikan suurella näytteenottotaajuudella, kun taas NMPC-säädin ohjaa vakautettua järjestelmää hitaammalla taajuudella. Säätimen rakenne on esitetty kuvassa 3. Vakauttamalla järjestelmä Lyapunov-säätimellä, saadaan vähennettyä NMPC-säätimen monimutkaisuutta. [37]



**Kuva 3.** Lyapunovin funktion avulla toteutetun ohjausjärjestelmän lohkokaavio [36].

Eräs menetelmä toteuttaa nosturin ohjausjärjestelmä on nimeltään *sliding mode control*. Ho Duc et al. ovat kehittäneet tähän perustuvan säätimen nosturissa olevalle pyörivälle koukkulaitteelle. Koukkulaite kiinnittyy nosturilla nostettavaan kuormaan, esimerkiksi konttiin, ja säätää kuorman sivuttaisen kulman oikeaksi. Tässä tutkimuksessa on suunniteltu koukkulaitteen ohjaus, joka ajaa kuorman automaattisesti haluttuun kulmaan vaimentaen samalla kuorman sivuttaista värähtelyä. *Sliding mode control* on epälineaarinen ohjausmenetelmä, joka käyttää epäjatkuvaa ohjaussignaalia. Järjestelmälle on suunniteltu pinta, josta käytetään nimeä *sliding surface*, ja ohjaussignaali on muodostettu siten, että järjestelmä ”liukuu” tätä pintaa pitkin. [38]

Yang et al. ovat kehittäneet keinotekoisiiin neuroverkkoihin perustuvan heilahteluja vaimentavan adaptiivisen säädön laivaan asennetulle nosturille. Adaptiivinen säätö on ohjausmenetelmä, jossa säädin pystyy mukautumaan järjestelmän vaihteleviin parametreihin. Meriolosuhteet luovat monia haasteita nosturin säätimen suunnittelulle, suurimpana näistä laivan keinuminen, joka johtaa kuorman heilahteluihin. Lisäksi joihinkin nosturin parametreihin saattaa liittyä epävarmuuksia, esimerkiksi puomin pituus ja kuorman massa voivat vaihdella. Tutkimuksessa esitellyllä kaksikerroksiseen keinotekoiseen neuroverkkoon perustuvalla adaptiivisella säädöllä pystytään toteuttamaan nosturin tarkka ohjaus näistä haasteista huolimatta. [39] Keinotekoiset neuroverkot ovat joukko algoritmeja, jotka pyrkivät tunnistamaan sille annetusta tietojoukosta taustalla olevat suhteet tavalla, joka jäljittelee ihmisaivojen toimintaa [40].

Nosturin ohjausjärjestelmä voidaan toteuttaa myös käyttämällä GS-menetelmää (Gain Scheduling). Zavari et al. ovat käyttäneet tätä menetelmää suunnitellessaan ohjauksen siltanosturille. Nosturia mallinnetaan tässä LPV-mallilla (Linear Parameter-Varying). Tällä mallilla kuvataan lineaaristen järjestelmien dynamiikkaa, joka muuttuu ajasta riippuvien parametrien, niin kutsuttujen ajoitusparametrien (engl. scheduling parameters), mukaan. Tällaisen mallin ohjaamiseksi tarvitaan GS-säädintä, joka käyttää mittauksia tai arvioita ajoitusparametreista laskiessaan ohjaussignaalin. LPV-mallilla voidaan mallintaa myös epälineaarisia järjestelmiä linearisoimalla ne tietyn liikeradan ympärillä. GS-säädin on toteutettu suunnittelemalla ensin joukko LTI-säätimiä (Linear Time-Invariant) eri LPV-järjestelmän toimintaolosuhteisiin, ja sen jälkeen LTI-säätimet on interpoloitu, jotta on saatu GS-säädin ajoitusparametrien funktiona. Tutkimuksessa siltanosturin kuormaa kannattelevan köyden pituutta on käytetty ajoitusparametrina. [41]



### 3.2 Kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät anturit

Takaisinkytkentään perustuvissa kuormanvakautusmenetelmissä tarvitaan antureita, joiden mittauksiin säätimien toiminta perustuu. Antureita on olemassa monia erilaisia ja tässä esitellään niistä yleisimpiä. Eräs uusimmista tutkimuksissa paljon käytetty mittaustilaite on inertiamittausyksikkö (engl. Inertial Measurement Unit) eli IMU. Tätä käytettiin esimerkiksi Rauscher et al. tutkimuksessa, jossa suunniteltiin ohjaus siltanosturille [42].

Inertiamittausyksiköt koostuvat yleensä kiihtyvyyssanturin ja gyroskoopin yhdistelmästä [43, s. 187]. Molempia näistä, kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja, voidaan käyttää kuormanvakautusjärjestelmissä myös yksinään [44,45]. Kiihtyvyyssanturit mittaavat kappaleen itseiskiihtyvyyttä ja sen avulla pystytään arvioimaan esimerkiksi kuorman heilahduksen kulmaa. Kiihtyvyyssanturin etuja on muun muassa sen suhteellisen halpa hinta, lyhyt vasteaika ja asennuksen helppous. [44] Gyroskooppi taas on pyörä tai kiekko, joka on asennettu pyörimään nopeasti akselinsa ympäri [46]. Sitä käytetään asennon mittaamiseen. Näin on tehty muun muassa Schaper et al. tutkimuksessa, jossa gyroskoopeilla mitataan nosturin puomin nostoköysien asentoa [45].

Inertiamittausyksiköissä on yleensä monta gyroskooppia ja kiihtyvyyssanturia. Esimerkiksi Rauscher et al. tutkimuksessa käytetään IMU:a jossa on kaksiakselinen gyroskooppi ja kolmeakselinen kiihtyvyyssmittari [42]. Tätä IMU:a voidaan siis kutsua viisiakseliseksi järjestelmäksi ja siitä saadaan yhteensä viisi mittausta. Yleensä IMU:ssa gyroskoooppikin on kolmiakselinen, jolloin IMU on kuusiakselinen järjestelmä. Rauscher et al. tutkimuksessa näitä mittauksia käytetään Kalman-suotimessa, jonka avulla saadaan arvio siltanosturin kuormaa kannattelevan nostoköyden kulmalle. Kalman-suotimella pystytään myös muun muassa suodattamaan pois mittauskohinaa. [42]

Kim et al. ovat kehittäneet konttinosturille heilahduksia estävän ohjausjärjestelmän, jossa käytetään inklinometriä (engl. inclinometer) eli kallistuskulma-anturia. Anturi on kiinnitetty nosturin levittimeen (engl. spreader), jolla tartutaan kiinni konttiin, ja anturia käytetään mittamaan levittimen kallistuskulmaa. Siitä saadaan selville kuorman heilahduskulma. Kaltevuusanturin etuja on muun muassa sen halpa hinta, kestävyys ja hyvä huollettavuus. [47]

Eräs tapa saada nosturin tila selville on käyttää stereokameroita. Yoshida ja Tsuzuki ovat kehittäneet tutkimuksessaan siltanosturille ohjausjärjestelmän, jossa stereokamerat tuottavat takaisinkytkentämittauksen. Nosturin kuorman kolmiulotteinen sijainti saadaan selville käyttämällä kahden kameran kuvatietoja. [48] Vaikka monissa sovelluksissa

käytetään stereokamerajärjestelmiä, niissä on myös huonoja puolia. Ne ovat suhteellisen kalliita ja niiden toimintakyky heikkenee huonossa valaistuksessa. [44]

Kiertokulmia saadaan mitattua inkrementaalilla kulma-anturilla (engl. incremental rotary encoder). Käpernick ja Graichen ovat käyttäneet näitä tutkimuksessaan mittaamaan siltanosturin kuorman heilahduskulmaa [49]. Toisin kuin absoluuttiset anturit, inkrementaaliset kulma-anturit mittaavat akselin suhteellisen liikkeen, joten absoluuttisen kulman selvittämiseksi on käytettävä myös muita keinoja [50, s. 312].

## 4. OHJAAMOIDEN VAIMENNUSJÄRJESTELMÄT

Kuljettaja altistuu metsäkoneella työskennellessään ohjaamon heilahduksille ja värähtelylle, johtuen muun muassa maaston epätasaisuudesta. Työn tuottavuuden ja laadun kannalta kuljettajan mukavuus on keskeinen tekijä, joten on tärkeää pyrkiä vaimentamaan kuljettajaan kohdistuvaa värähtelyä. ”Kun maaston epätasaisuus ei rasita kuljettajaa, hän pysyy virkeänä ja jaksaa keskittyä pitkänkin työvuoron ajan.” [51]. Kuljettajan kokemaa heilahtelua ja värähtelyä pystytään vähentämään ohjaamon jousituksella ja vakautuksella sekä työkoneen akselien jousituksella [52]. Vaimennusjärjestelmien lisäksi ohjaamon tärinää ja heiluntaa pystytään vähentämään metsäkoneen suunnittelulla. Esimerkiksi Ponsen Scorpion-metsäkoneessa on kolmiosainen runkorakenne, jotka on yhdistetty toisiinsa kiertonivelillä. Ohjaamo sijaitsee keskimmaisessa osassa ja on näin eristetty takaosassa olevasta moottorista, jolloin sen tärinä ei vaikuta ohjaamoon. Sivuttaisheilahduksia pystytään vähentämään suunnittelemalla ohjaamon nivelpiste alhaalle. [53]

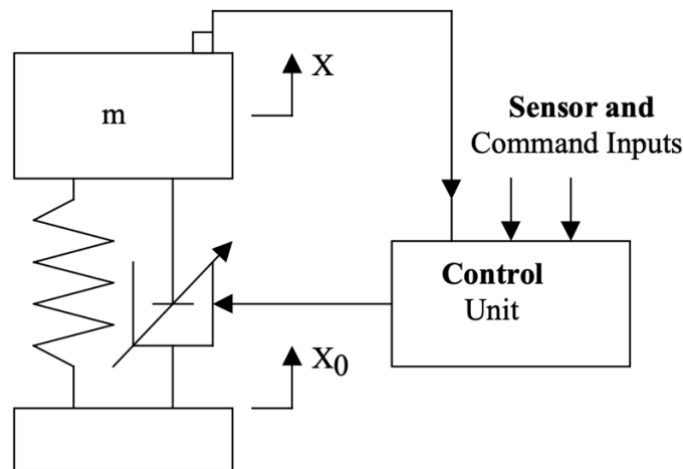
### 4.1 Vaimennusjärjestelmissä käytettävät menetelmät

Työkoneissa käytettävät heilahdusten ja värähtelyjen vaimennusjärjestelmät pyrkivät muuntamaan liike-energian johonkin toiseen energiamuotoon, yleensä lämpöenergiaksi. Järjestelmät voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään: passiivisiin, puoliaktiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. Järjestelmät eroavat toisistaan siinä, tuodaanko siihen energiaa järjestelmän ulkopuolelta ja voidaanko järjestelmän vaimennukseen vaikuttaa. Passiiviseen vaimennusmenetelmään ei tuoda energiaa järjestelmän ulkopuolelta, eikä sen vaimennusta pystytä muuttamaan. Passiivisina vaimennusmenetelminä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia rakennemateriaaleja ja liitosvaimennuksia. [54, s. 26] Tässä työssä keskitytään puoliaktiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin.

Puoliaktiivisissa vaimennusjärjestelmissä suhteellisen pienellä energialla muutetaan jonkin rakennekomponentin ominaisuutta, esimerkiksi jäykkyyttä tai vaimennusta, ja näin saavutetaan haluttu vaimennusvaikutus. Järjestelmään ei kuitenkaan tuoda jatkuvasti ulkopuolista energiaa, kuten aktiivisissa järjestelmissä. [54, s. 49] Puoliaktiivisten vaimennusjärjestelmien etu on se, että ne tuottavat vaimennuksen pienellä energiankulutuksella, ja niiden valmistuskustannukset ovat alhaisemmat kuin aktiivisilla järjestelmillä [55]. Passiivisiin menetelmiin verrattuna taas puoliaktiivisten järjestelmien etuna on se, että kun vaimennuksen jäykkyyttä voidaan säätää, esimerkiksi ajotilanteen ja maaston mukaan, ei tarvitse tehdä niin suurta kompromissia ajomukavuuden ja

ajettavuuden välillä. Toimilaitteina puoliaktiivisissa sovelluksissa käytetään muun muassa hydropneumaattisia jousia ja viskoelastisia nesteitä. [54, s. 51]

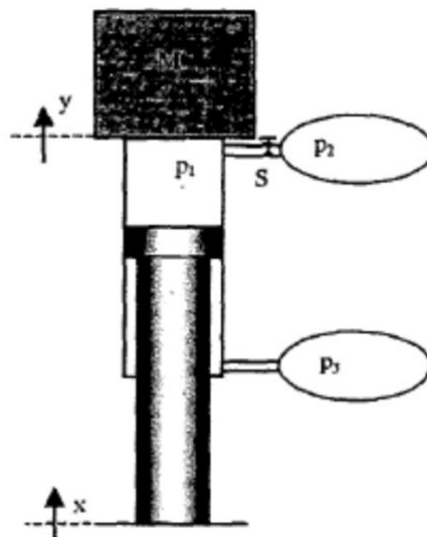
Puoliaktiivisessa massavaimentimessa massa on kytketty alustaan vaimenninelementillä, jonka vaimennusta pystytään säätämään. Säädetty vaimennusvoima on verrannollinen massan absoluuttiseen nopeuteen ja sen suunta määräytyy hetkellisen nopeuseron mukaan. Vaimennin ei pysty tuottamaan tehoa vaan ainoastaan kuluttamaan sitä. [54, s. 53] Puoliaktiivisen massavaimentimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Puoliaktiivisen massavaimentimen toimintaperiaate [54].

Eräs tapa toteuttaa puoliaktiivinen vaimennus on käyttää viskoelastisia nesteitä. Vaimennuksessa voidaan käyttää joko elektreoreologisia (ER) tai magnetoreologisia (MR) nesteitä. ER-neste sisältää hiukkasia, jotka saadaan sähkökentän avulla järjestäytymään. Nesteen viskositeetti kasvaa, kun sähkökentän voimakkuus nousee. ER-nesteen etu on se, että jäykkyyttä ja vaimennusta voidaan muuttaa hyvin nopeasti, koska säätösilmukka ei sisällä toimilaitteille tyypillistä dynamiikkaa. [54, s. 54] Esimerkiksi Kuo et al. ovat käyttäneet ER-vaimentimia kehittäessään autolle vaimennusjärjestelmän [56]. MR-vaimentimien toimintaperiaate on samanlainen kuin ER-vaimentimilla, mutta sähkökentän sijasta nesteen viskositeettia muutetaan magneettikentällä. MR-vaimentimilla saadaan aikaisiksi jäykempi toiminta, eikä korkeaa sähkökenttää tarvita. [54, s. 55] Spelta et al. ovat kehittäneet MR-vaimentimeen perustuvan traktorin ohjaamon puoliaktiivisen vaimennuksen, jolla vaimennetaan ohjaamon pystysuuntaista värähtelyä [55].

Hydropneumaattinen vaimennussysteemi sopii erityisesti maastoajoneuvoille. Maastossa ajettaessa tarvitaan pehmeä jousitus, mutta hyvällä tiellä suuremmilla nopeuksilla ajettaessa on ajoneuvon hallittavuuden kannalta parempi, että jousitus ei ole liian pehmeä. [54, s. 55] Deprez et al. ovat kehittäneet hydropneumaattisen puoliaktiivisen vaimennusjärjestelmän, jonka laitteisto koostuu hydraulisylinteristä, kahdesta typpisäiliöstä ja hydrauliventtiilistä. Tämän vaimennusjärjestelmän rakenne on esitetty kuvassa 5. Tutkimuksessa on haluttu ensiksi vaimentaa värähtelyn alle 2 Hz taajuudet, mikä on mahdollista vain, jos vaimennusjärjestelmän luonnollinen taajuus on tämän taajuuden alapuolella. Tämä on saatu aikaiseksi lisäämällä järjestelmään kaksi paineakkua. Toiseksi tutkimuksessa on haluttu estää jousituksen värähtelyn luonnollisen taajuuden vahvistuminen, mikä on saatu toteutettua hydraulinestevaimennuksella. Vaimennuksen suuruus vaihtelee kahden tason välillä järjestelmän sisään virtaavan ja ulos virtaavan hydraulinesteen nopeuden perusteella. [57]



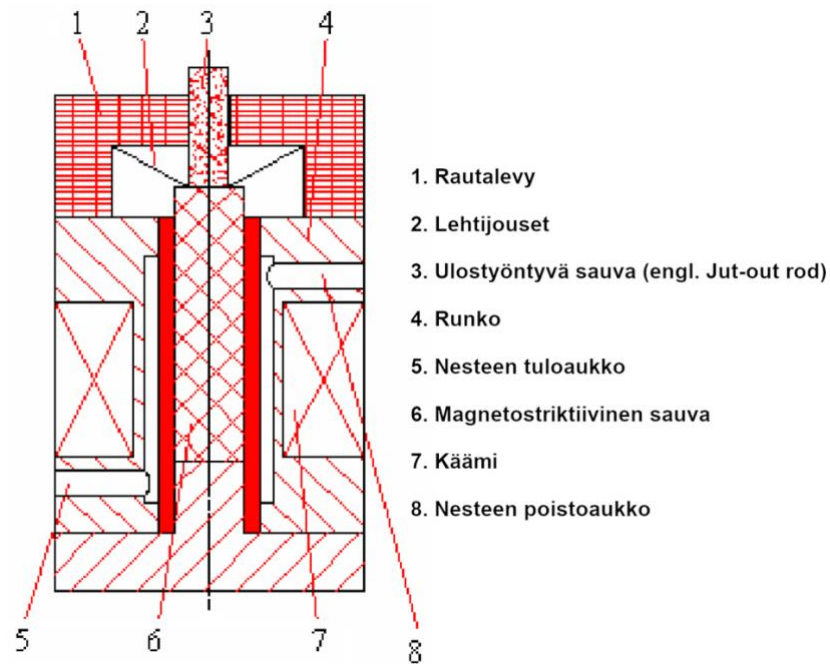
**Kuva 5.** Hydropneumaattinen vaimennusjärjestelmä [57].

Aktiivisissa järjestelmissä rakenteen värähtelyä pyritään kumoamaan vastaliikkeellä, jonka tuottamiseen tarvitaan ulkopuolista energiaa. Tarkoituksena on kumota häiriön aiheuttama värähtely tuottamalla samansuuruinen mutta vastakkaisvaiheinen värähtely. Aktiivisissa järjestelmissä toimilaitteina käytetään muuan muassa hydraulisia, pietsosähköisiä ja magnetostriktiivisiä toimilaitteita. [54, s. 78] Ohjaamon vakauttaminen, eli sen pitäminen vaakatasossa epätasaisessakin maastossa, on mahdollista toteuttaa ainoastaan aktiivisilla järjestelmillä, ja toimilaitteina siinä käytetään hydraulisylintereitä.

Aktiivisen vaimennusjärjestelmän hydraulisyntereitä ohjataan joko regel- tai servoventtiileillä [54, s. 78]. Hydraulisyntereillä voidaan pitää ohjaamo koko ajan vaakatasossa, kuten esimerkiksi Ponssen Scorpion-harvesterissa on tehty [53]. Jönsson et al. ovat tutkimuksessaan vertailleet kahta eri metsäkoneen aktiivista ohjaamon vaimennusjärjestelmää. Ponssen ADS (Active Damping System) perustuu kahteen hydraulisynteriin, joita järjestelmä ohjaa etuakselin kaltevuuden mittauksen perusteella. Toinen vaimennusjärjestelmä, Rottnen Comfort Line, eristää ohjaamon neljän hydraulisynterin avulla. Tutkimuksessa molemmat vaimennusjärjestelmät vähensivät ohjaamon tärinää merkittävästi. [58]

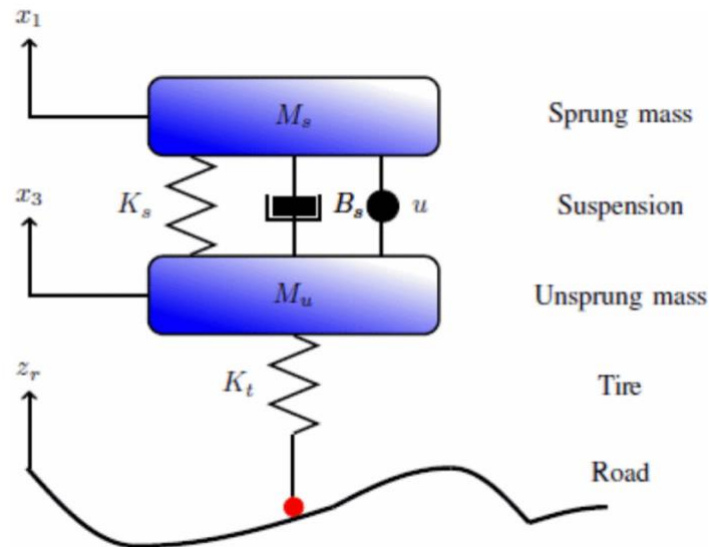
Joissakin järjestelmissä käytetään vaimennukseen hybriditoimilaitetta, jossa hydraulikkaan on yhdistetty pietsosähköinen pino. Pietsosähköiseen materiaaliin syntyy sähkövarausta, kun siihen kohdistuu mekaanista rasitusta. Pietsosähköinen työnnin saadaan aikaan esimerkiksi laittamalla pinoon sähköisesti rinnankytkettyjä keramiikkalevyjä. Kun pinoon kytketään jännite, jokainen levy osoittaa polarisaation suuntaan ja pinon korkeus kasvaa. [54, s. 79]

Magnetostriktiiviseksi ilmiöksi kutsutaan toimilaitteissa hyväksikäytettävää ilmiötä, joka perustuu siihen, että ferromagneettisessa aineessa tapahtuu muodonmuutos, kun se viedään magneettikenttään. Magnetostriktiivisestä aineesta valmistettu sauva pitenee sekä positiivisessa että negatiivisessa magneettikentässä. Jotta saadaan aikaiseksi kaksisuuntainen toimilaite, sauva esimagnetoidaan siten että sauva venyy puoleen maksimivenymästä. [54, s. 80–81] Kuvassa 6 on esitetty Li et al. suunnittelema magnetostriktiivinen toimilaite [59].



**Kuva 6.** Magnetrostriktiivisen toimilaitteen rakenne, muokattu lähteestä [59].

Toimilaitteiden lisäksi puoliaktiivisissa ja aktiivisissa vaimennusjärjestelmissä tarvitaan säädin. Säädintä suunniteltaessa täytyy järjestelmälle muodostaa jonkinlainen malli. Eräs yksinkertaisimmista ja tutkimuksissa paljon käytetyistä malleista ajoneuvon vaimennusjärjestelmälle on Quarter Car Model, joka on esitetty kuvassa 7 [60]. Malli koostuu vaimentamattomasta ja vaimennetusta massasta, sekä niiden välissä olevasta vaimennuksesta. Monimutkaisempia malleja ajoneuvojen vaimennukselle ovat Half Car Model ja Full Car Model. Vaimennusjärjestelmän mallin suunnittelussa voidaan käyttää apuna mittausdataa. Esimerkiksi Deprez et al. ovat hydropneumaattista vaimennusjärjestelmää suunnitellessaan käyttäneet kiihtyvyyssanturista saatua dataa mallin parametrien optimointiin [57].



Kuva 7. Quarter Car Model [60].

Säätimen rakenteen muodostamiseen on olemassa monia eri menetelmiä ja monet näistä ovat samoja kuin kuormanvakautusjärjestelmissä. Menetelmiä ovat esimerkiksi *sliding mode control*, *optimal control*, adaptiivinen säätö, sumea säätö (engl. fuzzy control) ja mallipohjainen säätö. Yksi yleisimpiä vaimennusjärjestelmissä käytettäviä teorioita on skyhook-teoria. Skyhook-teoria pohjautuu ajatukseen, jonka mukaan ihanteellinen jousitus pitäisi ajoneuvon koko ajan vakaassa asennossa, ikään kuin se olisi ripustettu kuvitteelliseen koukkuun taivaalle. Normaali skyhook-säädin vähentää hyvin vaimennetun massan värähtelyä, mutta lisää vaimentamattomaan massaan kohdistuvaa värähtelyä. Skyhook-säätimen suorituskykyä voidaan parantaa arvioimalla järjestelmän epävarmuuksia ja häiriöitä. Se voidaan toteuttaa käyttämällä esimerkiksi jonkinlaista häiriön tarkkailijaa (engl. disturbance observer) tai inertiaaliviveohjausta (engl. inertial delay control, IDC). [60] IDC-menetelmässä järjestelmän häiriöitä ja epälineaarisuuksia voidaan arvioida esimerkiksi alipäästösuodattimen avulla [61].

## 4.2 Vaimennusjärjestelmissä käytettävät anturit

Ohjaamon vaimennusjärjestelmässä tarvitaan myös antureita, joiden mittauksien perusteella säädin ohjaa toimilaitteita. Antureiden valintaan vaikuttaa muun muassa, että mitä toimilaitteita järjestelmässä käytetään, ja mitä järjestelmältä vaaditaan. Väre et al. ovat tutkimuksessaan vertailleet erilaisia anturointiratkaisuja puoliaktiivisissa järjestelmissä. Tutkimuksen mukaan vaihtoehtoja järjestelmästä mitattaviksi suureiksi ovat muun muassa jousitetun massan kiihtyvyys, jousittamattoman massan kiihtyvyys ja



vaimentimen paine-ero. [54, s. 52] Näitä anturointeja käytetään myös aktiivisissa vaimennusjärjestelmissä.

Kiihtyvyyssanturi on yksi yleisimmistä vaimennusjärjestelmissä käytettävistä antureista. Se voidaan siis asettaa joko vaimennettuun tai vaimentamattomaan massaan, ja yleinen ratkaisu on käyttää sitä molemmissa. Vaimennettuun massaan kiinnitetystä kiihtyvyyssanturista saadaan esimerkiksi rungon nopeus integroimalla. Kiinnittämällä kiihtyvyyssanturi vaimentamattomaan massaan, saadaan tietoa maastosta. [54, s. 52] Eräessä menetelmässä koneen taka-akselille on asetettu kaksi kiihtyvyyssmittaria. Kun toisen puolen renkaat ylittävät jonkin esteen, vastaanottaa sillä puolella oleva anturi suuremman kiihtyvyyssignaalin, jolloin tämän anturin ohjaama sylinteri tekee suuremman iskun eliminoidakseen ohjaamon liikettä. [54, s. 101]

Aktiivisissa järjestelmissä, joissa ohjaamo vakautetaan hydraulisynterien avulla, voidaan käyttää paineantureita. Esimerkiksi Ponsen Scorpion-harvesterissa, jossa konetta vakautetaan myös painattamalla takarunkoa työskentelysuuntaan, paineanturit tunnistavat puomin nostosylinterien paineen ja järjestelmä syöttää sen perusteella tarvittavasti painetta puomin puoleiselle vakautussynterille. Ohjaamon ja nosturin anturointi mittaavat tätä varten myös puomin kääntösuuntaa ja -kulmaa. [53] Ohjaamon nykyisen asennon mittaamista varten voidaan hydraulisyntereissä käyttää asemaantureita [54, s. 85].

Eräs anturiratkaisu vaimennusjärjestelmissä on mitata etuakselin asentoa. Grott et al. tutkimuksessa traktorin etuakseliin on asennettu siirtymäanturi (engl. displacement sensor) [62]. Siirtymäanturilla voidaan mitata esimerkiksi suhteellista akselivärinää tai suhteellista akselin asemaa. Etuakselin asentoa voidaan mitata myös inklinometrillä [58]. Jos järjestelmässä halutaan mitata absoluuttista siirtymää, voidaan käyttää myös laseranturia [54, s. 97].

Vaimennusjärjestelmille löytyy myös tutkimuksia, joissa on käytetty antureina inertiamittausyksiköitä. Esimerkiksi Jeongin ja Choin tutkimuksessa on käytetty ajoneuvolle IMU:a arvioimaan suhteellista nopeutta, ja sillä on saatu korvattua viisi kiihtyvyyssanturia. Näin voidaan vähentää tarvittavien antureiden lukumäärää, mikä helpottaa anturijärjestelmän asentamista. [63] Suhteellista nopeutta voidaan mitata myös *Relative Velocity Sensor* -anturilla, kuten Nehl et al. ovat kehittämässään puoliaktiivisessa vaimennusjärjestelmässä tehneet. Tällä anturilla saadaan mitattua pelkästään suhteellista nopeutta, eikä tietoa saada absoluuttisista kiihtyvyyksistä tai nopeuksista. [64]

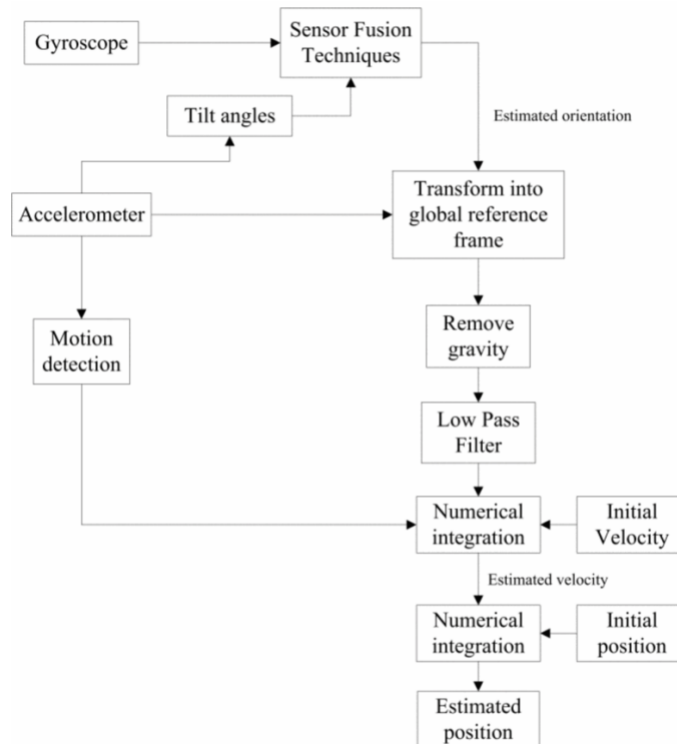
## 5. MUUT KULJETTAJAA AVUSTAVAT JÄRJESTELMÄT

Kuormanvakautusjärjestelmän ja ohjaamon vakautuksen lisäksi kuljettajaa voidaan manipulaattoreissa avustaa monenlaisilla muilla toiminnoilla. Tällaisia ovat esimerkiksi tässä luvussa käsiteltävät erilaiset liikkeiden ohjausta avustavat toiminnot ja paikannus- ja kartoitusteknologioihin perustuvat järjestelmät. Liikkeiden ohjaamisen avustaminen helpottaa kuljettajaa tekemään laadukasta työtä turvallisesti. Paikannus- ja kartoitusteknologioilla taas pystytään helpottamaan erityisesti kuljettajan päätöksentekoa.

### 5.1 Liikkeiden ohjausta avustavat toiminnot

Vaikka tässä työssä käsitellyissä työkoneissa puomin ohjaaminen on kuljettajan vastuulla, voidaan koneissa tietyt liikkeet automatisoida tai tehdä niistä muuten helpompia ohjata. Eräs puomin ohjausta helpottava menetelmä on se, että kuljettaja ohjaa pelkästään puomin kärjen liikettä, sen sijaan että ohjaisi puomin jokaista osaa erikseen. Tämä on merkittävä apu erityisesti metsäkoneissa, joiden puomeissa on usein kaksi niveltä ja jatke. Kaupallisissa metsäkoneissa tämä on jo yleinen toiminto, esimerkiksi Ponssellalla tätä kutsutaan *Active Crane* -ominaisuudeksi ja John Deerellä käytetään nimeä *Intelligent Boom Control* [65,66].

Kärkiohjaus on yksi metsäkoneen monimutkaisimmista ominaisuuksista toteuttaa. Puomissa täytyy olla kiinni antureita, joiden avulla järjestelmä tietää puomin asennon ja kärjen sijainnin. Inertiamittausyksiköiden käyttäminen on yleinen ratkaisu anturoinniksi. Ortiz-Salazar et al. ovat tutkimuksessaan luoneet inertiamittausyksiköihin perustuvan manipulaattorin ohjauksen [67]. Kuvassa 8 on esitetty tutkimuksessa käytetyn puomin aseman arviointiin käytetty logiikka.



**Kuva 8.** Puomin asennon arvioinnin logiikka [67].

Kun puomin asento on tiedossa, järjestelmä sovittaa puomin osien liikeradat automaattisesti siten, että kärki liikkuu kuljettajan ohjaamalla tavalla. Tämän ohjauksen suunnittelemiseksi, tehdään puomille ensin kinemaattinen malli, jonka jälkeen käytetään käänteistä kinematiikkaa. Käänteinen kinematiikka tarkoittaa kinemaattisten yhtälöiden käyttöä siten, että lasketaan puomin kärjen halutun sijainnin perusteella millä nivelten asennoilla tämä sijainti saavutetaan. Tämän jälkeen voidaan esimerkiksi Jaakobin matriisilla esittää puomin osien nopeuksien suhde kärjen nopeuteen. Puomista täytyy luoda myös dynaaminen malli, joka määrittää matemaattiset suhteet puomin liikkeille, voimille ja vääntömomenteille. Tämä tehdään puomin mittojen perusteella. Lopuksi järjestelmälle suunnitellaan liikeratojen tuottaminen, jonka tekemiseen on olemassa monia eri menetelmiä. Liikeratojen muodostamiseen voivat vaikuttaa esimerkiksi tila- ja aikarajoitukset, sekä erilaiset laatuvaatimukset, kuten liikeradan sujuvuus ja tarkkuus [67].

Metsäkoneisiin on kehitetty myös monia muita liikkeiden ohjauksia avustavia toimintoja. Kuljettajan ei tarvitse itse arvioida sopivaa pituutta tukeille, vaan tukkien pituus mitataan puuta pitkin rullaavalla mittapyörällä ja saha katkaisee puun mittauksen perusteella automaattisesti sopivasta kohdasta [68]. John Deeren uusimmissa metsäkoneissa on syötön ja sahan avustin. Kone tunnistaa harvesteripään asennon ja estää kuljettajaa

syöttämästä tai sahaamasta puuta ohjaamoja kohti. [66] Tämä lisää kuljettajan turvallisuutta, koska metsäkoneen teräketjun katketessa kesken puun sahaamisen saattaa katkenneen ketjun osat singota ympäristöön suurella nopeudella. Metsäkoneen osia suojellaan muun muassa ylipöörityksen estolla ja päätyvaimennuksella. John Deeren ylipöörityksen esto estää kuljettajaa pyörittämässä harvesteripäätä liikaa, mikä estää letkuvauriot. Automaattisella päätyvaimennuksella taas estetään hydraulisylinterien iskumaiset kuormitukset päätyasennoissa [65]. Kuljettajan työ nopeutuu, kun näistä ei tarvitse itse huolehtia.

Kaivinkoneen ohjaaminen on monesti hyvin vaativa ja tarkka tehtävä. Virheliikkeitä ei voi tehdä, esimerkiksi kaivaa liian syväälle, jos maan alla on putki tai sähkökaapeli. Kaivinkoneisiin onkin kehitetty monia toimintoja, jotka avustavat kuljettajaa kauhan ohjaamisessa. Eräs esimerkki tästä on Novatronin Xsite-koneohjausjärjestelmä [69]. Kuljettaja voi valita kosketusnäytöltä kaivussyvyyden, jonka jälkeen järjestelmä pitää huolen, että kauha ei mene tämän tason alapuolelle. Kuljettajan on helppo ohjata kauhaa tätä tasoa pitkin ja saada näin aikaan tasainen lopputulos. Antureina järjestelmässä käytetään puomin eri kohtiin kiinnitetyjä Novatronin G2-antureita, joissa hyödynnetään inertiamittausyksiköitä, jotka sisältävät gyroskoopin ja kiihtyvyydantureita [70]. Näiden ja hytin kääntymistä mittaavan kulma-anturin avulla järjestelmä tietää kauhan sijainnin ja asennon. Lisäksi kaivinkoneessa on kaksi GNSS-anturia (Global Navigation Satellite System), joiden avulla saadaan selville koneen sijainti. Xsite-koneohjausjärjestelmässä kuljettaja pystyy myös asettamaan turvallisuusrajoja, joiden yli kauha ei saa ulottua. Rajojen asettamisen jälkeen järjestelmä rajaa liikkeitä siten, ettei kauha ylitä turvarajoja. Tämä voi olla hyödyllistä esimerkiksi liikenteen lähellä työskennellessä. Lisäksi järjestelmässä on vaaka, jonka avulla kuljettajalla on koko ajan tieto käsitellyn materiaalin massasta. [69]

## **5.2 Paikannus- ja kartoitusteknologioihin perustuvat toiminnot**

Kuljettajan päätöksentekoa voidaan helpottaa opastamalla kuljettajaa työkoneessa käytettävien ympäristöä havainnoivien järjestelmien avulla. Kartoitukseen voidaan käyttää monia eri menetelmiä, joiden tarkkuus ja ominaisuudet vaihtelevat. Käytetyimpiä menetelmiä ovat lidar (light detection and ranging) ja kamerat. Paikannusjärjestelmissä käytetään yleensä GNSS-satelliittipaikannusta. Sen tarkkuus ei yksinään riitä esimerkiksi metsäkoneessa käytettäväksi yksittäisten puiden tunnistamiseen tai optimaalisen ajoreitin suunnitteluun, mutta GNSS-tietoja voidaan käyttää yhdessä jonkin kartoitusmenetelmän kanssa esimerkiksi puukartan tuottamiseen [71]. GNSS-järjestelmiä

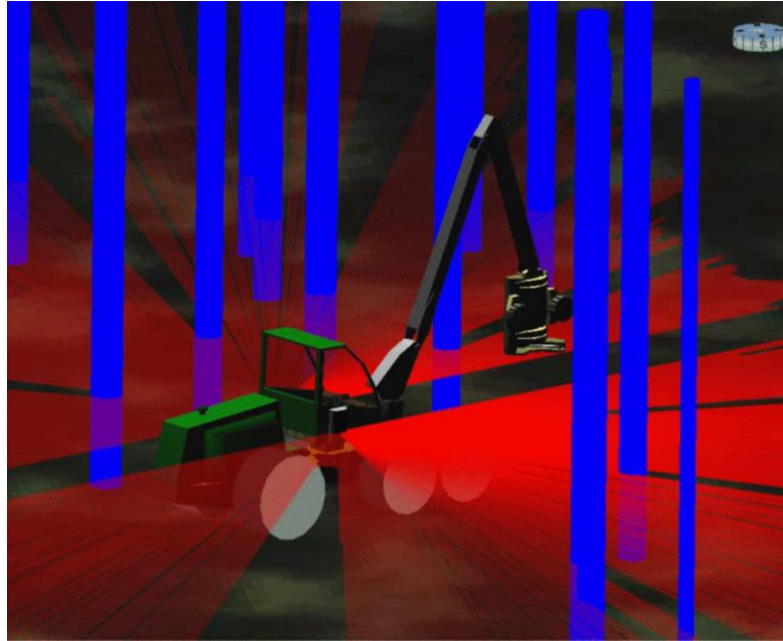
ovat muun muassa yhdysvaltalainen GPS, eurooppalainen Galileo, kiinalainen BeiDou ja venäläinen GLONASS.

Lidar on työkoneissa yleisimmin käytetty kartoitusmenetelmä, koska sillä saadaan kartoitettua suuretkin etäisyydet hyvällä tarkkuudella [72]. Lidar-järjestelmä lähettää laserpulsseja ympäristöön, ja kohteiden etäisyys saadaan mittaamalla aika, joka kuluu kohteesta heijastuneen pulssin palaamiseen [73]. Ajan arvioimiseen on olemassa monia eri tekniikoita, eniten käytetty näistä on *time-to-digital converter* (TDC). TDC-menetelmässä käytetään yleensä suuritehoisia, lyhyitä laserpulsseja, ja mitataan aika lähetetyn ja vastaanotetun pulssin välillä. Menetelmän heikkous on se, että suuria etäisyyksiä mitattaessa saattaa pulssin vastaanotin reagoida kohinapiikkiin, jolloin syntyy virheellinen mittaustulos. Tämä on kuitenkin yleisin menetelmä, koska se on helppo integroida laitteistoihin ja se on moniin sovelluksiin riittävän tarkka. [72]

Muita lidar-järjestelmissä käytettyjä menetelmiä ovat muun muassa *full-waveform*, *continuous wave* ja *photon-counting lidar*. *Full-waveform* -menetelmässä tarkoituksena on pyrkiä hyödyntämään vastaanotettu pulssimuoto mahdollisimman tehokkaasti. Siinä ei siis mitata pelkkää aikaa, vaan otetaan suurella näytteenottotaajuudella näytteitä vastaanotetusta pulssimuodosta ja saadaan sen avulla tietoa ympäristöä. Huono puoli tässä menetelmässä on se, että tarvittava analogi-digitaalimuunnin on kallis näin suurille näytteenottotaajuuksille ja virrankulutus on suuri. *Continuous wave* -menetelmä on toimintaperiaatteeltan hyvin samanlainen kuin radioaaltoihin perustuva radar-järjestelmä. *Countinuous wave* -menetelmässä lähetetään ja vastaanotetaan jatkuvaa aaltomuotoa. Menetelmä vaatii suuria kaistanleveyksiä ja monimutkaista laitteistoa. *Photon-counting* -menetelmässä lasketaan lähetetyn pulssimuodon ja vastaanotettujen fotonien aikakorrelaatio, josta saadaan laskettua fotonien lentoajat. Histogrammitiedoista pystytään sitten arvioimaan tarkemmat lentoajat ja laskemaan etäisyydet. Tällä saavutetaan hyvä tarkkuus, mutta menetelmää ei voida käyttää, jos fotonien vastaanottimen taustavalaistus on voimakas. [72]

Esimerkkinä lidarin käytöstä kuljettajan avustamisessa voidaan käyttää Ponsen esittelemää konseptia harvennushakkuille. Metsäkoneessa käytettävän lidar-järjestelmän avulla mitataan konetta ympäröivää metsää, ja saadaan näin tietoa metsään jäävästä puustosta. Järjestelmä tunnistaa konetta ympäröivät puut ja niiden sijainnin koneeseen nähden. Kerätyn tiedon avulla pystytään opastamaan kuljettajaa löytämään kaadettavat puut siten, että saavutetaan optimaalinen harvennustiheys. Kuljettajalla on myös koko ajan tarkka tieto ajourien sijainnista. [65] Kuvassa 9 on esitetty visualisointi lidarin lasersäteistä käytettynä puiden tunnistamiseen. Kyseisessä tapauksessa etäisyyksiä mitataan vain yhdessä tasossa, mutta monissa sovelluksissa

lidar-järjestelmällä mitataan useaa tasoa. Lidaria käytetään myös esimerkiksi Novatronin kaivinkoneissa. Lidarien avulla saadaan selville koneen sijainti työmaalla ja algoritmien avulla pystytään luomaan koneen ympäristöstä reaaliaikainen ja jatkuvasti päivittyvä dynaaminen tilannekuva. [74]



**Kuva 9.** Havainnekuva lidarin käytöstä metsäkoneessa [71].

Kartoitukseen voidaan käyttää myös kameroita. Niiden toiminta perustuu kuvatessa kameran sisään tulevaan valoon. Yleisin kartoituksessa käytetty kamerajärjestelmä on stereonäkö. Stereonäön toiminta perustuu kahteen kameraan, joilla se pystyy kolmiomittauksen avulla määrittämään jokaisen pikselin etäisyyden [75]. Periaate on hyvin samanlainen kuin ihmisen näköjärjestelmällä. Stereokameroiden etu on se, että ne ovat huomattavasti halvempia kuin lidar-järjestelmät. Filho et al. ovat käyttäneet stereonäköä tutkimuksessaan, jossa on kehitetty konseptuaalinen malli etäkäyttöiselle manipulaattorille, jolla leikataan kasvillisuutta sähkölinjojen läheltä. Stereonäön käyttämiseen lidarin sijasta on vaikuttanut alhaisempien kustannuksien lisäksi myös se, että sillä on helpompi havaita linjat. [75] Kameroita voidaan hyödyntää työkonereissa myös tuottamalla kuljettajalle kuvaa katvealueilta, autojen peruutuskameroiden tapaan. Näin voidaan parantaa etenkin turvallisuutta.

## 6. YHTEENVETO

Kuljettajaa avustavista toiminnoista on paljon hyötyä manipulaattoreissa. Avustavien toimintojen avulla pystytään muun muassa lisäämään turvallisuutta, parantamaan tuottavuutta ja helpottamaan kuljettajan työskentelyä. Turvallisuutta pyritään lisäämään myös erilaisilla standardeilla. Suuri osa työkoneisiin liittyvistä standardeista koskee koneen suunnitteluperiaatteita. Koneiden automaatioasteen kasvaessa tulee tarvetta myös uusille standardeille. Jonkin verran autonomisia työkoneita koskevia standardeja onkin jo julkaistu viime vuosina.

Nostureiden kuormanvakautusjärjestelmissä käytettävät menetelmät voidaan jakaa myötäkytkentään ja takaisinkytkentään perustuviin menetelmiin. Myötäkytkennässä pyritään muotoilemaan kuljettajan ohjauskomentoa siten, että se aiheuttaa mahdollisimman vähän värähtelyä kuormassa. Takaisinkytkentään perustuvilla menetelmillä voidaan värähtelyjä vaimentaa tehokkaasti, koska niissä manipulaattorin asema ja liike ovat tiedossa anturoinnin ansiosta. Käyttämällä myötäkytkentää yhdessä takaisinkytkennän kanssa, voidaan myötäkytkennän avulla yksinkertaistaa tarvittavan takaisinkytkentäsäätimen rakennetta. Ohjaamoiden vaimennusjärjestelmät taas voidaan jaotella passiivisiin, puoliaktiivisiin ja aktiivisiin järjestelmiin. Metsäkoneen ohjaamon vakautus voidaan toteuttaa aktiivisilla järjestelmillä, joissa hydraulisynterien avulla pidetään ohjaamo vaakatasossa epätasaisessakin maastossa.

Liikkeiden ohjausta avustavista järjestelmistä yksi merkittävimmistä on etenkin metsäkoneissa käytettävä puomin kärjen ohjaus, jonka ansiosta kuljettajan ei tarvitse ohjata jokaista puomin osaa erikseen. Myös kaivinkoneisiin on kehitetty monia liikkeitä avustavia toimintoja. Kuljettaja voi esimerkiksi asettaa kaivussyvyyden ja turva-alueita, ja järjestelmä huolehtii automaattisesti, että kauha ei mene rajojen yli. Kuljettajan työtä voidaan helpottaa myös paikannus- ja kartoitusteknologioihin perustuvilla toiminnoilla, joilla helpotetaan erityisesti kuljettajan päätöksentekoa. Näissä yleisimmin käytettyjä antureita ovat lidar-anturit, kamerat ja GNSS-anturit. Lidar-antureilla kartoitetaan ympäristöä, ja niiden avulla pystytään esimerkiksi tuottamaan puukartta metsäkoneen kuljettajalle. Kameroita voidaan käyttää ympäristön kartoitukseen tai tuottamaan kuljettajalle kuvaa katvealueilta. GNSS-antureita taas käytetään työkoneiden paikannukseen.

Tulevaisuudessa kuljettajaa avustavia toimintoja tullaan kehittämään lisää. Tämän mahdollistaa muun muassa kehitys anturiteknologiassa ja halu parantaa tuottavuutta

sekä lisätä työkoneiden turvallisuutta. Anturiteknologian kehityksen myötä anturien hinnat tulevat laskemaan, jolloin niiden käyttäminen yhä useammissa työkoneissa tulee kannattavaksi. Esimerkiksi lidar-anturien käyttämistä vähentää tällä hetkellä niiden kallis hinta. Myös autonomisten työkoneiden määrä tulee lisääntymään. Kuljettajat pyritään saamaan pois työkoneista etenkin vaarallisissa työympäristöissä, kuten kaivoksissa.



# LÄHTEET

- [1] J. Kivistö-Rahnasto, Machine-related fatalities, Proceedings of the 17th World Congress on Ergonomics IEA, Beijing, China, August 9–14, 2009, 4 p.
- [2] Accidents at work - statistics on causes and circumstances, Eurostat, 2022. Saatavissa (viitattu 26.10.2022): [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents\\_at\\_work\\_-\\_statistics\\_on\\_causes\\_and\\_circumstances](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_on_causes_and_circumstances).
- [3] G. Molari, P. Ayers, H. Meyer, V. Rondelli, Special Issue: Engineering advances to improve the safety of agricultural machines, ScienceDirect, Vol. 185, 2009. pp. 1–3, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.07.005>.
- [4] Railway applications. Track. Railbound construction and maintenance machines. Part 2: Technical requirements for travelling and working, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 14033-2:2017, Helsinki, 2017, 75 p.
- [5] R. Tiusanen, T. Malm, A. Ronkainen, An overview of current safety requirements for autonomous machines – review of standards, De Gruyter, 2020, <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0074>.
- [6] Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 12100, Helsinki, 2010, 186 s.
- [7] Hydraulinen tehonsiirto. Järjestelmiä sekä niiden komponentteja koskevat yleiset periaatteet ja turvallisuusvaatimukset, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 4413, Helsinki, 2011, 90 s.
- [8] Machinery for forestry. General safety requirements, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 11850, Helsinki, 2012, 23 p.
- [9] Nosturit. Yleissuunnittelu. Osa 1: Yleiset periaatteet ja vaatimukset, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 13001-1, Helsinki, 2015, 63 s.
- [10] Nosturit. Kuormausnosturit, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 12999, Helsinki, 2020, 201 s.
- [11] Mining. Mobile machines working underground. Machine safety, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 19296, Helsinki, 2019, 50 p.
- [12] Earth-moving machinery. Safety. Part 1: General requirements, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 474-1, Helsinki, 2022, 61 p.
- [13] Earth-moving machinery. Safety. Part 5: Requirements for hydraulic excavators, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 474-5, Helsinki, 2022, 43 p.
- [14] Earth-moving machinery and mining – Autonomous and semi-autonomous machine system safety, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-ISO 17757:2019, Helsinki, 2019, 54 p.
- [15] Agricultural machinery and tractors. Safety of highly automated agricultural machines. Principles for design, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 18497, Helsinki, 2018, 26 p.
- [16] Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design and development, International Organization for Standardization, ISO 25119-1, Geneve, 2018, 23 p.

- [17] Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems – Part 2: Concept phase, International Organization for Standardization, ISO 25119-2, Geneve, 2019, 47 p.
- [18] Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems – Part 3: Series development, hardware and software, International Organization for Standardization, ISO 25119-3, Geneve, 2018, 59 p.
- [19] Tractors and machinery for agriculture and forestry – Safety-related parts of control systems – Part 4: Production, operation, modification and supporting processes, International Organization for Standardization, ISO 25119-4, Geneve, 2018, 22 p.
- [20] Tractors and machinery for agriculture – Auto-guidance systems for operator-controlled tractors and self-propelled machines – Safety requirements, International Organization for Standardization, ISO 10975, Geneve, 2009, 5 p.
- [21] Earth-moving machinery. Functional safety. Part 1: Methodology to determine safety-related parts of the control system and performance requirements, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 19014-1, Helsinki, 2018, 25 p.
- [22] Earth-moving machinery. Object detection systems and visibility aids. Performance requirements and tests, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 16001, Helsinki, 2017, 79 p.
- [23] Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN ISO 13849-1, Helsinki, 2015, 194 s.
- [24] Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 60204-1, Helsinki, 2018, 269 s.
- [25] Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN IEC 62061, Helsinki, 2021, 291 s.
- [26] Safety of machinery – Safety-related sensors used for the protection of persons, International Electrotechnical Commission, IEC TS 62998-1, Geneve, 2019, 91 p.
- [27] Valtioneuvoston asetus puunkorjuun turvallisuudesta, L 23.8.2001/749, 2001. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20010749>.
- [28] S. Garrido, M. Abderrahim, A. Gimenez, R. Diez, C. Balaguer, Anti-swinging input shaping control of an automatic construction crane, IEEE, 2008, <https://doi.org/10.1109/TASE.2007.909631>.
- [29] D. Lewis, G.G. Parker, B. Driessen, R.D. Robinett, Command shaping control of an operator-in-the-loop boom crane, IEEE, 1998, <https://doi.org/10.1109/ACC.1998.688328>.
- [30] D. Newman, J. Vaughan, Command shaping of a boom crane subject to nonzero initial conditions, IEEE, 2017, <https://doi.org/10.1109/CCTA.2017.8062620>.
- [31] E. Arnold, O. Sawodny, A. Hildebrandt, K. Schneider, Anti-sway system for boom cranes based on an optimal control approach, IEEE, 2003, <https://doi.org/10.1109/ACC.2003.1244016>.
- [32] G. Ellis, Control system design guide, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2012, 520 p.
- [33] G. Parker, R. Robinett, B. Driessen, C. Dohrmann, Operator in-the-loop control of rotary cranes, Proceedings of the SPIE, Vol.2721, May 1996, pp. 364–372.
- [34] G. Rigatos, P. Sauno, Distributed parameter systems control and its applications to financial engineering, in: M. Khosrow-Pour (ed.), Encyclopedia of Information Science and Technology, Fourth Edition, vol. 10, Information Resources Management Association, 2017, USA, pp. 15–35.

- [35] J. Neupert, A. Hildebrandt, O. Sawodny, K. Schneider, Trajectory tracking for boom cranes using a flatness based approach, IEEE, 2006, <https://doi.org/10.1109/SICE.2006.315717>.
- [36] K. Najim, E. Ikonen, A. Daud, Stochastic Processes Estimation, Optimization & Analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2004, p. 332.
- [37] G. Tysse, A. Cibicik, L. Tingelstad, O. Egeland, Lyapunov-based damping controller with nonlinear MPC control of payload position for a knuckle boom crane, ScienceDirect, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110219>.
- [38] T. Ho Duc, T. Ryosuke, K. Terashima, M. Tsume, K. Suzuki, Robust Sliding Mode Control of a Rotary Hook, ScienceDirect, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1378>.
- [39] T. Yang, N. Sun, H. Chen, Y. Fang, Neural Network-Based Adaptive Control of an Underactuated Ship-Mounted Crane With Roll Motions and Input Dead Zones, IEEE, 2019, <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2910580>.
- [40] A. Khan, S. Hayat, Y. Zhong, A. Arif, L. Zada, M. Fang, Computational and topological properties of neural networks by means of graph-theoretic parameters, ScienceDirect, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.001>.
- [41] K. Zavari, G. Pipeleers, J. Swevers, Gain-Scheduled Controller Design: Illustration on an Overhead Crane, IEEE, 2013, <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2270213>.
- [42] F. Rauscher, S. Nann, O. Sawodny, Motion control of an Overhead Crane Using a Wireless Hook Mounted IMU, IEEE, 2018, <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431170>.
- [43] J. Yang, Bistatic Synthetic Aperture Radar, Elsevier, Amsterdam, 2022, 317 p.
- [44] K. Park, D. Kwon, Swing-Free control of Mobile Harbor crane with accelerometer feedback, IEEE, 2010, <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2010.5670298>.
- [45] U. Schaper, C. Sagert, O. Sawodny, K. Schneider, A load position observer for cranes with gyroscope measurements, ScienceDirect, 2011, <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01456>.
- [46] Gyroscope, Merriam-Webster.com Dictionary, Saatavissa (viitattu 17.12.2022): <https://www.merriam-webster.com/dictionary/gyroscope>.
- [47] Y. Kim, K. Hong, S. Sul, Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclinometer, Observer, and State Feedback, in: K. Hong (ed.), International Journal of Control Automation and Systems, vol. 2, no. 4, Springer, 2004, Berliini, Saksa, pp. 435–449.
- [48] Y. Yoshida, K. Tsuzuki, Visual Tracking and control of a moving overhead crane load, IEEE, 2006, <https://doi.org/10.1109/AMC.2006.1631733>.
- [49] B. Käpernick, K. Graichen, Model predictive control of an overhead crane using constraint substitution, IEEE, 2013, <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580447>.
- [50] B. Holdsworth, R. Woods, Digital Logic Design, Newnes, Oxford, 2003, 519 p.
- [51] Ponsse, Ponsselta uutta teknologiaa tuottavuuteen ja ergonomiaan, Saatavissa: (viitattu 19.12.2022): [https://www.ponsse.com/fi/news2/-/asset\\_publisher/ZE4CiSrtQpXR/content/ponsse-introduces-new-technology-for-productivity-and-ergonomics#/](https://www.ponsse.com/fi/news2/-/asset_publisher/ZE4CiSrtQpXR/content/ponsse-introduces-new-technology-for-productivity-and-ergonomics#/).
- [52] F. Biral, M. Grott, R. Oboe, C. Maffei, E. Vincenti, Modelling, control and design of heavy duty suspension systems, IEEE, 2008, <https://doi.org/10.1109/AMC.2008.4516164>.

- [53] Ponsse, Scorpion, Saatavissa: (viitattu 2.1.2023): [https://www.ponsse.com/fi/tuotteet/harvesterit/tuote/-/p/scorpion#](https://www.ponsse.com/fi/tuotteet/harvesterit/tuote/-/p/scorpion#/)/.
- [54] M. Hentinen, P. Hynnä, T. Lahti, K. Nevala, A. Vähänikkilä, M. Järviluoma, Värähtelun ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa työkoneissa, VTT, Espoo, 2002, 118 s.
- [55] C. Spelta, F. Previdi, S. Savaresi, D. Delvecchio, S. Tremolada, Semi-active control of cab suspension in an agricultural tractor via magneto-rheological actuator, IEEE, 2011, <https://doi.org/10.1109/ICCA.2011.6138074>.
- [56] W. Kuo, Y. Wang, Y. Shiao, J. Guo, M. Chiang, Y. Din, Semi-active Control of Vehicle Suspension System Using Electrorheological Dampers, IET, 2007, Saatavissa: (viitattu 1.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/document/4383640>.
- [57] K. Deprez, K. Maertens, H. Ramon, Comfort improvement by passive and semi-active hydropneumatic suspension using global optimization technique, IEEE, 2002, <https://doi.org/10.1109/ACC.2002.1023233>.
- [58] P. Jönsson, B. Löfgren, M. Thor, Aktiv dämpning minskar helkroppsvibrationerna i skotare, Skogforsk, Uppsala, 2010, 4 s.
- [59] X. Li, K. Tian, H. Li, D. Chen, L. Li, T. Meng, C. Zhang, Active suspensions based on the principles of giant magnetostriction, IEEE, 2008, <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677474>.
- [60] A. Tiwari, M. Lathkar, P. Shendge, S. Phadke, Skyhook control for active suspension system of heavy duty vehicles using inertial delay control, IEEE, 2016, <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853289>.
- [61] A. Bhowmik, A. Marar, D. Ginoya, S. Singh, S. Phadke, Inertial delay control based sliding mode control for active suspension with full car model, IEEE, 2016, <https://doi.org/10.1109/CMI.2016.7413774>.
- [62] M. Grott, F. Biral, A. Sorniotti, R. Oboe, E. Vincenti, Vehicle Simulation for the Development of an Active Suspension System for an Agricultural Tractor, SAE, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-1608>.
- [63] K. Jeong, S. Choi, Vehicle Suspension Relative Velocity Estimation Using a Single 6-D IMU Sensor, IEEE, 2019, <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2920876>.
- [64] T. Nehl, J. Betts, L. Mihalko, An integrated relative velocity sensor for real-time damping applications, IEEE, 1996, <https://doi.org/10.1109/28.511644>.
- [65] Ponsse, Ponsse mukana uutuusratkaisuilla FinnMETKO 2022 -messuilla, 2022, Saatavissa (viitattu 10.1.2023): [https://www.ponsse.com/fi/yhtio/uutiset/a\\_p/P4s3zYhpxHUQ/c/ponsse-to-demonstrate-new-solutions-at-finnmetko-2022#](https://www.ponsse.com/fi/yhtio/uutiset/a_p/P4s3zYhpxHUQ/c/ponsse-to-demonstrate-new-solutions-at-finnmetko-2022#/)/.
- [66] John Deere, Puomin älykäs kärkehjäus, Saatavissa (viitattu 12.1.2023): <https://www.deere.fi/fi/metsakoneet/ibc/>.
- [67] M. Ortiz-Salazar, A. Rodríguez-Liñán, L. Torres-Treviño, I. López-Juárez, IMU-Based Trajectory Generation and Modelling of 6-DOF Robot Manipulators, IEEE, 2015, <https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2015.27>.
- [68] UPM Metsä, Miten hakkuukoneen mittaustarkkuus varmistetaan?, Saatavissa (viitattu 12.1.2023): <https://www.upmmetsa.fi/tietoa-ja-tapahtumia/artikkelit/hakkuukoneen-mittaustarkkuus/>.
- [69] Novatron, Automation system with RTEC technology, Saatavissa (viitattu 12.1.2023): <https://novatron.fi/en/automation-for-excavators/>.

- [70] Novatron, Uudet G2-anturit koneohjaukseen – Uskomatonta nopeutta ja tarkkuutta, Saatavissa (viitattu 12.1.2023): <https://novatron.fi/novatronin-uudet-g2-anturit-koneohjaukseen-uskomatonta-nopeutta-ja-tarkkuutta-samassa-paketissa/>.
- [71] J. Rossmann, M. Schluse, C. Schlette, A. Buecken, P. Krahwinkler, M. Emde, Realization of highly accurate mobile robot system for multi purpose precision forestry applications, IEEE, 2009, Saatavissa (viitattu 9.1.2023): <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5174687>.
- [72] D. Bastos, P. Monteiro, A. Oliveira, M. Drummond, An Overview of LiDAR Requirements and Techniques for Autonomous Driving, IEEE, 2021, <https://doi.org/10.1109/ConfTELE50222.2021.9435580>.
- [73] E. Tudor, I. Vasile, G. Popa, M. Gheti, LiDAR Sensors Used for Improving Safety of Electronic-Controlled Vehicles, IEEE, 2021, <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425123>.
- [74] Dimecc, Tuoreita tekoälyratkaisuja teollisuuden automaatiassa, Saatavissa (viitattu 10.1.2023): <https://www.dimecc.com/tuoreita-tekoalyratkaisuja-teollisuuden-automaatiassa/>.
- [75] J. Filho, L. Siebert, V. Mariani, L. Coelho, A Conceptual Model of a Stereo Vision System to Aid a Teleoperated Robot in Pruning Vegetation Close to Overhead Urban Power Lines, IEEE, 2018, <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445341>.