

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jukka Parkkinen

HAMMASHIHNAJOHDEAKSELEIDEN LIIKKEIDEN SYNKRONOINTI

Työn tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
 TkT Markku Niemelä

Työn ohjaajat: TkT Markku Niemelä
 TkT Markku Jokinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jukka Parkkinen

HAMMASHIHNAJOHDEAKSELEIDEN LIIKKEIDEN SYNKRONOINTI

Diplomityö
2011
71 sivua, 47 kuvaa, 6 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
TkT Markku Niemelä

Hakusanat: liikkeenohjaus, synkronointi, isäntä-orja, hajautettu ohjaus, lineaarihammashihnajohde

Nykyisessä valmistusteollisuudessa erilaisten robottien ja automatisoitujen tuotantovaiheiden rooli on erittäin merkittävä. Tarkasti suunnitellut liikkeet ja toimintavaiheet voidaan nykyisillä järjestelmillä ajoittaa tarkasti toisiinsa nähden, jolloin erilaisten virhetilanteidenkin sattuessa järjestelmä pystyy toimimaan tilanteen edellyttämällä tavalla. Automatisoinnin etuna on myös tuotannon muokkaaminen erilaisten tuotteiden valmistamiseen pienillä muutoksilla, jolloin tuotantokustannukset pysyvät matalina myös pienten valmistuserien tapauksissa.

Usean akselin laitteissa eli niin sanotuissa moniakselikäyttöissä laitteen toimintatarkkuus riippuu jokaisen liikeakselin tarkkuudesta. Liikkeenohjauksessa on perinteisesti ollut käytössä myötäkytketty paikkakaskadi, jonka virityksessä otetaan huomioon akselilla olevat erilaiset dynaamiset tilat ja käytettävät referenssit. Monissa nykyisissä hajautetuissa järjestelmissä eli moniakselikäyttöissä, joissa jokaiselle akselille on oma ohjauslaite, ei yksittäisen akselin paikkavirhettä huomioida muiden akseleiden ohjauksessa.

Työssä tutkitaan erilaisia moniakselijärjestelmien ohjausmenetelmiä ja myötäkytketyn paikkakaskadin toimintaa moniakselikäytössä pyritään parantamaan tuomalla paikkasäätimen rinnalle toinen säädin, jonka tulona on akseleiden välinen paikkaero.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
LUT Energy
Degree Programme in Electrical Engineering

Jukka Parkkinen

SYNCHRONIZATION OF MOVEMENTS OF LINEAR TOOTH BELT AXIS

Master's Thesis

2011

71 pages, 47 figures, 6 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen
D.Sc. (Tech.) Markku Niemelä

Keywords: motion control, synchronization, master-slave, decentralized control, linear tooth belt axis

Nowadays, different kinds of robots and other automated manufacturing processes are very much used in manufacturing industry. Precise movements and action phases of different systems can be timed very accurately and systems are designed to operate even one part of movement has some kind of error in process. Automated manufacturing is usually easy to modify to manufacture products with large scale which makes it suitable for manufacturing smaller production runs.

In multi-axis systems the operating accuracy is dependent of every single axis of the system. In motion control systems position cascade with speed forward structure is used traditionally. With this structure all different dynamic situations and used references has to be taken into account when control system is tuned. In multi-axis systems where every single axis has its own control system only the position error of its own is used in the controller.

Different kinds of control methods for multi-axis systems and position compensation with position cascade structure are in the focus of this thesis. A compensator will be added in the cascade structure parallel with the original position controller.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty ABB:n ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston yhteiselle Carelian Drives and Motor Centre (CDMC) tutkimus- ja tuotekehityskeskukseen. Hankkeen rahoittajan on toiminut ABB Oy.

Kiitän professori Juha Pyrhöstä mielenkiintoisesta aiheesta ja työni tarkastamisesta. Työn toista tarkastajaa ja ohjaajaa TkT Markku Niemelää haluan kiittää työn aikana saamistani neuvoista ja ohjauksesta. TkT Markku Jokista kiitän suuresti työni ohjaamisesta ja mielenkiinnosta työtä kohtaan.

Kiitokset opiskeluajasta ansaitsevat kaikki hyvät ystävät ja opiskelutoverit, joiden kanssa on saanut viettää unohtumatonta opiskelijaelämää.

Erityisesti lämpimät kiitokset osoitan vanhemmilleni ja veljilleni saamastani tuesta ja kannustuksesta opiskelujeni aikana.

Lappeenrannassa 17.10.2011

Jukka Parkkinen

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	8
1.1	Synkronointi	8
1.2	Liikkeenohjaus	10
1.3	Liikkeenohjauksen synkronointi	11
1.4	Liikkeenohjauskäyttöjen keskinäinen kommunikointi.....	12
1.5	Työn tavoitteet ja keskeiset tulokset	13
2	MONIAKSELIOHJAUSMENETELMÄT	14
2.1	Isäntä-orjamenetelmä hajautetussa järjestelmässä	16
2.2	Hajautettu rinnanohjaus.....	18
3	SEURANTAVIRHE JA SEN KOMPENSOIMINEN.....	20
3.1	Seurantavirheen kompensoiminen	21
4	TESTILAITTEISTO	27
4.1	SERCOS II -kenttäväylä	33
4.2	Linearihammashihnan matemaattinen malli.....	35
4.3	Johteiden liikekitkat	39
4.4	Paikka- ja nopeussäätimen virittäminen.....	41
4.5	Kompensaattorin vaikutus järjestelmään.....	42
5	MITTAUSTULOKSET	44
5.1	Isäntä-orjamenetelmä	45
5.2	Rinnanohjaus	50
5.3	Seurantavirheen kompensointi	54
5.3.1	Kompensointi isäntä-orjamenetelmässä.....	55
5.3.2	Kompensointi rinnanohjauksessa.....	59
5.4	Johtopäätökset	66
6	YHTEENVETO	68
	LÄHTEET	69
	 LIITTEET	
	LIITE I MOOTTOREIDEN JA JOHTEIDEN PARAMETRIT	72
	LIITE II MATEMAATTISEN MALLIN PARAMETRIT	73
	LIITE III AKSELEIDEN SIIRTOFUNKTIOT.....	74

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

a	kiihtyvyys [m/s^2]
C	säädin
e	kulmaero [rad]
F	voima [N]
G	järjestelmä
I	virta [A]
J	hitausmomentti [kgm/s^2]
K	jousivakio [N/m]
k	kulmakerroin
l	pituus [m]
M	moottori
m	massa [kg]
P	vahvistus [1/s]
R	säde [m]
T	vääntömomentti [Nm]
t	aika [s]
U	ohje [rad/s]
v	nopeus [m/s]
x	paikka [m]
δ	venymä [m]
ε	suhteellinen venymä
θ	kulma [°]
τ	viive [s]
φ	kiertymäkulma [rad]
ω	kulmanopeus [rad/s]

Alaindeksit

0	alku
act	todellinen, <i>actual</i>
c	kohtisuora
d	viive

der	derivointi
FB	takaisinkytkentä, <i>feedback</i>
f	kitka
ffa	kiihtyvyyssmyötäkytkentä
ffv	nopeusmyötäkytkentä
i	integrointi
in	tulo, <i>input</i>
k	kytkin
L	kuorma, <i>load</i>
MAX	suurin arvo
out	lähtö, <i>output</i>
p	paikka
pos	paikka, <i>position</i>
ref	ohje, referenssi
rf	pyörimiskitka
s	jakso
sw	kytkentä, <i>switching</i>
t	tangentiaalinen, sivuava
tr	siirto, <i>transmission</i>
v	nopeus
vel	nopeus, <i>velocity</i>
vf	liikekitka, <i>viscous friction</i>

Lyhenteet

ADR	osoite, <i>address</i>
AT	orjan viesti, <i>amplifier/drive telegram</i>
BOF	viestin aloitussarja, <i>beginning of frame</i>
<i>d2d</i>	taajuusmuuttajien välinen, <i>drive-to-drive</i>
DTC	suora vääntömomenttisäätö, <i>direct torque control</i>
EOF	viestin lopetussarja, <i>end of frame</i>
FCS	tarkistussarja, <i>frame check sequence</i>
MDT	isännän ohjeviesti, <i>master data telegram</i>
MST	isännän synkronointiviesti, <i>master synchronization telegram</i>
SERCOS	<i>Serial Real-time Communication System</i>

1 JOHDANTO

Nykyaikainen valmistusteollisuus on vahvasti automatisoitua, ja erilaiset robotit tekevät tuotteita nopeasti ja tarkasti. Erilaisten robottien liikkeiden ja automatisoitujen tuotantovaiheiden ajoittaminen toisiinsa nähden onnistuu nykyisillä laitteilla tarkasti, ja prosessin muutokset onnistuvat helposti. Myös vapaus tehdä erilaisia tuotteita nopeasti tilausten vaatimia määriä on tärkeää, kun valmistetaan erikoisempia valmisteita, joita asiakkaat ovat ennen joutuneet odottamaan pitkiäkin aikoja tai niiden valmistuskustannukset ovat olleet kohtuuttoman korkeat.

Tyypillisesti valmistusjärjestelmää ohjaa yksi isäntälaitte, joka tuottaa vaaditut ohjeet järjestelmän laitteille. Ohjeet voivat olla erilaisia eri laitteille ja käytetty ohje riippuu sovelluksesta. Ohje itsessään voi olla paikka-, nopeus- tai vääntömomenttiferenssi. Taajuusmuuttajien kehitys on tuonut ne lähemmäksi tavanomaisesti valmistusteollisuudessa käytettyjä vääntömomenttivahvistimia, ja nykyään järjestelmät voivat olla hajautettuja, joissa isäntälaitte jakaa järjestelmän taajuusmuuttajille vain yksinkertaiset paikkaohjeet ja käynnistyskäskyt synkronoidusti. Isäntälaitteena voi järjestelmissä myös joidenkin valmistajien taajuusmuuttajilla toimia yksi taajuusmuuttajista. Tällöin yksi taajuusmuuttaja synkronoi muut järjestelmän taajuusmuuttajat ja ohjaa liikkeitä järjestelmän tarpeiden mukaisesti. (Jokinen 2010)

1.1 Synkronointi

Synkronointi sanana tulee kreikan kielestä sanoista *syn* 'samaan' ja *chronos* 'aikaan'. Kun jotain tapahtuu synkronisesti, ovat toiminnot silloin suoritettu synkronissa eli yhtä aikaa. Synkronisesti tapahtuvat asiat voivat myös olla vaihesiirrossa keskenään, mutta tapahtumat suoritetaan kuitenkin samassa tahdissa toisiinsa nähden. Yleisesti sanaa käytetään nykyään kuvaamaan esimerkiksi tietojen päivittämistä samaan tilaan kahden eri laitteen välillä. Toimi voi olla varmuuskopion teko tai kännykän ja tietokoneen kalenterien tapahtumien tietojen päivittäminen.

Synkronointia ilmiönä tutki ensimmäisenä alankomaalainen luonnontieteilijä Christiaan Huygens 1600-luvulla heilurikellojen avulla. Hän kytki kaksi heilurikelloa puupuomiin koukkujen avulla ja tarkkaili heilureiden liikkeitä. Heilurit asettuivat aina samaan tahtiin ja kellojen ääni kuului yhtäaikaaisesti. Huygens selvitti, että liikkeet synkronoituivat

puomin liikkeiden kautta, vaikka se ei ollut selkeästi havaittavaa. Varsinaisesti synkronointi ymmärrettiin 1920-luvulla, kun E. V. Appleton ja B. Van der Pol tutkivat triodigeneraattoreita ja synkronoivat niiden toimintaa heikolla ulkoisella signaalilla, jolla oli hieman eri taajuus. (Pikovsky 2001)

Ennen kehittyneitä liikkeenohjausjärjestelmiä usean akselin tai laitteiden liikkeitä synkronoitiin mekaanisesti. Yksi esimerkki on valta-akseli. Akselia pyöritetään sähkömoottorilla, tarvittaessa vaihteen välityksellä. Akselilta liike välitetään hihnojen ja kierukka- ja kartiovaihteiden avulla käyttökohteille. Kuvassa 2.1 on Imatran Stora Enson paperitehtaan kartonkikoneen 1 eräs kuivausryhmän valta-akseli.



Kuva 1.1 Imatran paperitehtaan kartonkikoneen 1 eräs kuivausryhmän valta-akseli. Kuvassa näkyy hihna, jonka välityksellä moottori pyörittää akselia, kytkin ja muutama kannatinlaakeri. (Hartikainen 2011)

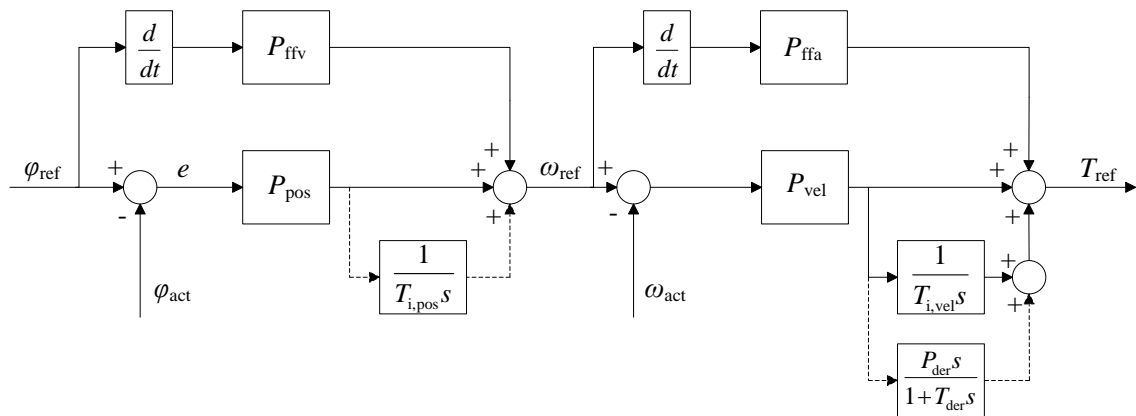
Mekaaninen yhteys liikkeiden välityksessä tarkoittaa, että kaikki siihen liitetyt laitteet pyörivät aina välityssuhteiden mukaista nopeutta ja liikkeiden nopeuden muuttaminen toisiinsa nähden vaatii aina välityssuhteiden muuttamista. Taajuusmuuttajien avulla jokainen toimilaite saadaan erillisten moottoreiden avulla pyörimään haluttua nopeutta ja eri osien liikkeet voidaan suunnitella vapaasti. Samassa prosessissa voi olla täysin eri pyörimisnopeudella pyöriviä moottoreita ja lisäksi liikkeet voivat olla täysin erilaisia,

kuten askelmaisia siirtoja tavarankuljetuksessa asemalta toiselle tai tasaisesti liikkuvia kuljettimia, joiden pitää edetä toisen prosessin mukaisesti.

1.2 Liikkeenohjaus

Liikkeenohjauksessa käytettävien taajuusmuuttajien säätöjärjestelmät valitaan ohjattavan prosessin mukaisesti, ja tarjolla onkin monenlaisia säätöratkaisuja. Lisäksi monissa taajuusmuuttajissa on vielä mahdollisuus käyttäjän muokata taajuusmuuttajan valmista sovellusohjelmaa omien tarpeiden mukaisesti. Kun käytettävä taajuusmuuttaja tarjoaa mahdollisuuden käyttää erilaisia referenssejä ja käyttäjälle mahdollisuuden ohjelmoida omia toimintoja, puhutaan korkean suorituskyvyn taajuusmuuttajista. Korkean suorituskyvyn taajuusmuuttajat omaavat paremmat ominaisuudet myös arvojen päivitykseen ja takaisinkytkentätietojen luenta-/päivitysasteen osalta kuin heikon suorituskyvyn taajuusmuuttajat, jotka eivät myöskään tarjoa mahdollisuuksia omien sovelluksien lisäämiseen valmiiseen ohjelmaan. (Jokinen 2010)

Liikkeenohjauksessa käytettävien taajuusmuuttajien säätörakenne on usein kuvan 1.2 mukainen myötäkytketty paikkakaskadi, jossa paikkasäädin on P- tai PI-tyyppinen ja nopeussäädin PI- tai PID-tyyppinen. Paikkasäätimen rinnalle tuodaan nopeuden myötäkytkentä ja nopeussäätimen rinnalle voidaan lisätä kiihtyvyyden myötäkytkentä.

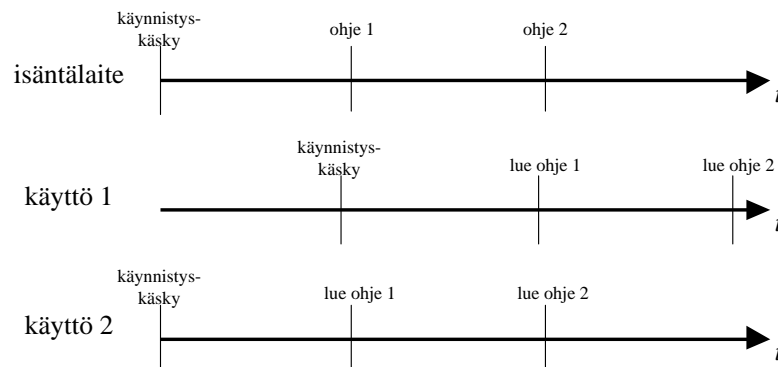


Kuva 1.2 Myötäkytketyn paikkakaskadin rakenne. φ_{ref} on kulmaohje, φ_{act} todellinen kulmatieto, e eroarvo, P_{ffv} nopeuden myötäkytkennän vahvistus, P_{pos} paikkasäätimen vahvistus, $T_{i,\text{pos}}$ paikkasäätimen integrointiaika, ω_{ref} kulmanopeusreferenssi, ω_{act} kulmanopeus, P_{ffa} kiihtyvyyden myötäkytkennän vahvistus, P_{vel} nopeussäätimen vahvistus, $T_{i,\text{vel}}$ nopeussäätimen integrointiaika, P_{der} nopeussäätimen derivointiosan vahvistus, T_{der} nopeussäätimen derivointiaika ja T_{ref} vääntömomenttiferenssi.

Kuvaan 1.2 ei ole merkitty suodatuksia, joista tärkeimmät ovat takaisinkytkentöjen suodatukset. Lisäksi erilaisia suodatuksia voi esiintyä erosuureiden ja myötäkytkentöjen yhteydessä estämässä korkeataajuisien häiriöiden vahvistuminen säätimissä. Vääntöreferenssi syötetään vääntösäätimelle, joka voi perustua suoraan vääntömomenttisäätimeen (*DTC, Direct Torque Control*) tai korkeatasoiseen vektorisäätöön. (Jokinen 2010)

1.3 Liikkeenohjauksen synkronointi

Liikkeenohjausjärjestelmissä taajuusmuuttajien synkronointi takaa sen, että prosessissa olevien laitteiden liikkeet tapahtuvat oikeilla hetkillä toisiinsa nähden. Eri aikatasojen toiminnot synkronoidaan isäntälaitteen synkronointisignaaliin, jolloin kaikkien järjestelmän laitteiden sisäiset toiminnot suoritetaan samalla hetkellä tai halutulla poikkeamalla signaaliin nähden. Servojärjestelmissä isäntälaitte huolehtii oikeat ohjeet laitteille oikealla hetkellä tuotannon kannalta ja lopputuotteesta saadaan tarkasti halutunlainen. Synkronoinnilla on erittäin suuri merkitys juuri tuotannon tarkkuudessa, jolla on erittäin suuri arvo erityisesti erilaisissa leikkaussovelluksissa. Jos laitteita ohjattaisiin synkronoimattomina, voisi tilanne olla pahimmillaan kuvan 1.3 mukainen liikkeitä ohjaavien laitteiden välillä.



Kuva 1.3 Ajoituskaavio järjestelmässä, jossa laitteet eivät ole synkronoituja ja väylä isännältä käyttöille oletetaan viiveettömäksi.

Kuvassa 1.3 kuvataan tilannetta, jossa kaikki laitteet toimivat samalla aikatasolla, mutta koska laitteita ei ole synkronoitu, tapahtuvat kaikki suoritukset käytössä 1 lähes yhden jakson myöhemmin kuin käytössä 2. Liikkeenohjauksessa kuvan mukainen poikkeama suorituksissa tarkoittaisi paikkaeroa käyttöjen ohjaamien akselien välillä. Paikkaeron suuruus olisi suoraan verrannollinen käytettyyn nopeuteen ja suoritusten väliseen viiveeseen. Alussa poikkeaman vaikutus olisi pieni, kun molemmat kiihdyttävät liikkeelle,

mutta suurilla nopeuksilla ero kasvaa. Nopeudet usean akselin liikkeenohjauksessa voivat olla 10 m/s erityisesti, jos käytetään lineaarimoottoreita ja tällöin esimerkiksi 100 µs viive käyttäjien saamien ohjeiden välillä merkitsee 1 mm poikkeamaa akseleiden paikoissa, jos akselit ovat muuten identtiset säädön ja dynamiikan kannalta. Kuvan 1.3 mukainen tilanne muuttuu hieman, kun otetaan huomioon siirtotien viive. Käyttäjien tulee lukea ohjeet tällöin siirtoviiveen verran myöhemmin isäntälaitteen lähetettyä ohje, jotta suoritukset tulevat halutulla hetkellä oikeita ohjeita käyttäen. Usean laitteen järjestelmissä viive tulee ottaa huomioon tarkasti, jotta tarkkuus usean akselin suorituksen välillä ei kärsi. Nykyisillä synkronoiduilla kenttäväylillä, kuten SERCOS, EtherCAT ja CANSync, kenttäväylän alustusvaiheessa järjestelmän toimilaitteet saavat ajanhetket synkronointisignaaliin nähden suorittaa toimintonsa. Tällöin laitteet saavat ohjeet, suorittavat ohjeet, lukevat takaisinkytkentäarvot ja palauttavat vaaditut tiedot kaikki samoilla määrättyillä ajanhetkillä. Tässäkin tapauksessa pitää käyttäjän muistaa ottaa huomioon eri laitteiden erilaiset sisäiset toimintaviiveet, jotta kaikki toimilaitteet pystyvät esimerkiksi käsittelemään uusimmat takaisinkytkentätietonsa ennen lähetystä.

1.4 Liikkeenohjauskäyttöjen keskinäinen kommunikointi

Joidenkin taajuusmuuttajien valmistajat tarjoavat nykyisiin laitteisiinsa myös suoran keskinäisen kommunikoinnin, jolla taajuusmuuttajat voivat siirtää erilaista tietoa suoraan toisilleen parantaakseen järjestelmän toimintaa. Taajuusmuuttajien linkittäminen toisiinsa mahdollistetaan erillisellä väylällä, joka voi olla taajuusmuuttajissa valmiina tai väylää varten voidaan liittää erillinen kommunikointiosäosa. Valmistajat käyttävät menetelmästä erilaisia nimiä. Esimerkiksi ABB on nimennyt menetelmän ACSM1-taajuusmuuttajassa *drive-to-drive*-yhteydeksi (*d2d*), SEW käyttää nimitystä *axis-to-axis*-kommunikointi MOVIAXIS[®]-järjestelmissä ja Siemensin SINAMICS S120-taajuusmuuttajissa menetelmä on nimetty *Slave-to-Slave*-kommunikoinniksi. Suoran taajuusmuuttajien välisen yhteyden kautta viive, joka muodostuisi tiedon siirtämiseen kenttäväylän avulla isäntälaitteelle ja sieltä toiselle taajuusmuuttajalle poistuu, jolloin järjestelmän eri osat voivat reagoida erilaisiin muutostilanteisiin nopeammin. Lisäksi tarkkuutta usean akselin järjestelmästä voidaan parantaa erilaisilla kompensattoreilla, jollainen löytyy esimerkiksi SEWin MOVIAXIS[®]-järjestelmissä valmiina nopeusohjeen kompensointiin usean akselin välillä (SEW 2010).

MOVIAXIS[®]-järjestelmissä oleva useampi käyttö saa saman nopeusohjeen ylemmän tason toimilaitteelta ja käytöt kommunikoivat keskenään *axis-to-axis*-väylän avulla tasaten paikkaeronsa korjaamalla nopeusohjetta akselikohtaisesti. Akselit korjaavat nopeusohjettaan määrittämällä poikkeamansa oman ja muiden akseleiden paikkojen välillä. Edellä olevat akselit saavat poikkeamalle negatiivisen arvon ja jäljessä olevat positiivisen arvon siten, että järjestelmän kaikkien akseleiden summapoikkeama on nolla. Edellytyksenä kompensoinnin toiminnalle on, että akseleiden nopeusohje ei ole raja-arvossa tai lähellä sitä. Tällöin poikkeaman aiheuttama muutos nopeusohjeessa ei välttämättä vaikuta tarpeeksi korjaavasti ohjeeseen, koska ohjetta joudutaan rajoittamaan. MOVIAXIS[®]-järjestelmissä ylemmän tason säädin lähettää nopeusohjeensa käytöille nopeimmillaan 500 μ s aikasykleissä ja *axis-to-axis*-rinnakkaiskommunikointi tapahtuu 1 ms aikasykleissä. (SEW 2010)

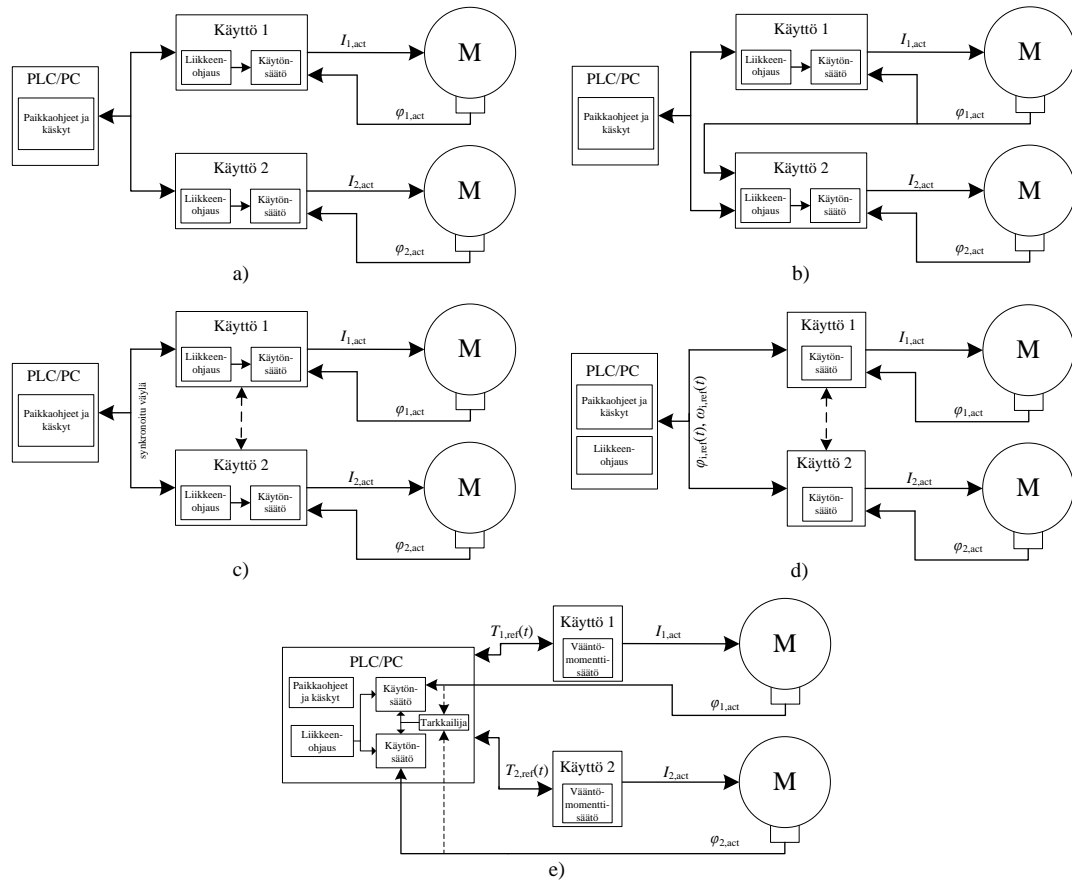
1.5 Työn tavoitteet ja keskeiset tulokset

Synkronointia ja siihen vaikuttavia asioita tutkitaan synkronoimalla käytöt käyttäen hajautettua liikkeenohjausta portaalirobotisovelluksessa, jossa liikkeet liikeakseleille välitetään hammashihnajohteiden välityksellä. Työssä keskitytään parantamaan synkronointiajtoa hihnoja vetävien moottoreiden osalta, joten hammashihnajohteiden järjestelmään tuottamat omat rajoituksensa ja epätarkkuudet jätetään huomiotta. Mittauksissa käytettävän portaalirobotin johteista esitetään myös matemaattiset mallit, joiden avulla simuloidaan yksinkertaisen ristiinkytketyn paikkakompensaattorin toimintaa ja sen käyttöön vaikuttavia tekijöitä.

2 MONIAKSELIOHJAUSMENETELMÄT

Moniakselisovelluksissa synkronointi usean taajuusmuuttajan välillä vaatii suoritusten aikatasojen kohdentamisen, jotta toiminnot tapahtuvat taajuusmuuttajien kesken yhtä aikaa. Aikatasot kohdennetaan yleensä isäntälaitteen aikatason mukaisesti, joka voi olla jokin käytöistä tai kenttäväylän kautta järjestelmää ohjaava korkeamman tason säädin kuten teollisuus-PC tai PLC (*Programmable Logic Controller*). Varsinaisesti ohjausmenetelmät voidaan jakaa sen mukaan, kuinka käytöt saavat ohjeensa ja suorittavat ohjauksensa. Keskitetyissä järjestelmissä kaikki toiminnot liikeprofiilien laskennasta vääntöreferenssin muodostamiseen tapahtuvat isäntälaitteena toimivassa teollisuus-PC:ssä tai PLC:ssä, josta vääntöreferenssit jaetaan kenttäväylän tai analogisten signaalien avulla akseleita ohjaaville käytöille, jotka toimivat vääntömomenttivahvistimina. Käytöt palauttavat isäntälaitteelle takaisinkytkentätietonsa, joiden avulla uudet ohjeet muodostetaan. Takaisinkytkentätietojen välittäminen moottorilta tai järjestelmästä isäntälaitteelta voidaan tehdä esimerkiksi kenttäväylän kautta, analogisilla tai digitaalisilla signaaleilla tai takaisinkytkentäanturit voivat olla suoraan kytkettynä isäntälaitteeseen sopivan rajapinnan kautta.

Hajautetuissa järjestelmissä toimintoja suoritetaan enemmän itse akseleita ohjaavissa käytöissä, jolloin isäntälaitte voi jakaa käytöille vain yksinkertaiset paikkapisteet ja käynnistyskäskyt, jonka jälkeen kaikki tapahtumat profiilin muodostamisesta vääntömomenttisäättöön asti tapahtuu jokaisessa käytössä. Kuvassa 2.1 esitetään erilaisia moniakselikäyttöjen välisiä ohjausmenetelmiä, joissa järjestelmään kuuluu myös isäntälaitte. Isäntälaitte on kytketty käyttöihin kenttäväylän välityksellä. Sen kautta annetaan käytöille erilaiset ohjeet ja käskyt, kuten käynnistys ja lupa liikkua. Kuvassa menetelmät on kuvattu yksinkertaisimmillaan eli moniakselikäytöt ovat kaksiakselikäyttöjä.



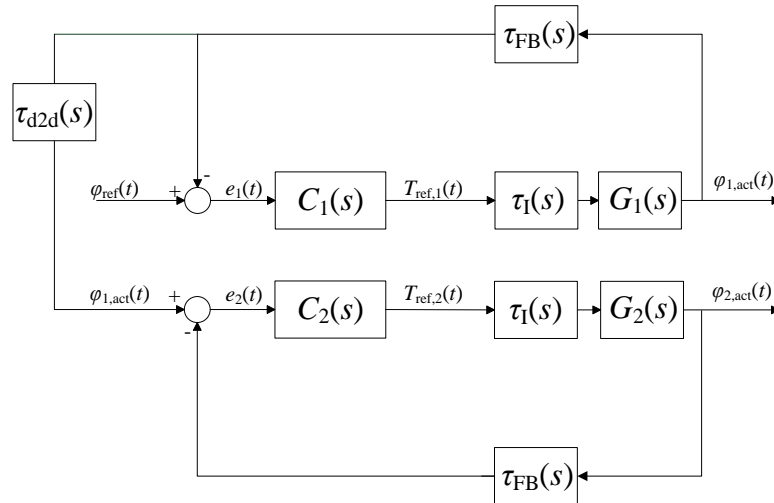
Kuva 2.1 Moniakseliohjausmenetelmät, joissa erillinen isäntälaitte antaa ohjauskäskyt, kuten luvan käynnistyä tai liikkua, järjestelmän laitteille. a) Ulkoiset ohjeet ja käskyt kaikille käytöille synkronoimattoman väylän kautta ja käytöillä itsenäiset profiilin muodostus sekä säätö. b) Klassinen isäntä-orjaohjaus, jossa käytölle 1 ohjeet ylempältä tasolta ja käytölle 2 ohje suoraan moottorin 1 paikka-anturilta. c) Synkronoidut ohjeet ja käskyt molemmille käytöille ylempältä tasolta, käytöjen välillä mahdollisesti myös keskinäinen kommunikointi. d) Keskitetty liikkeenohjaus, jossa käytöille synkronoidut paikka- ja nopeusohjeet ylempän tason säätimeltä kenttäväylän välityksellä. e) Keskitetty järjestelmä, jossa kenttäväylän välityksellä siirretään käytöille vääntömomenttiferenssit. Järjestelmään on myös lisätty mahdollinen tarkkailija, joka paikkatietojen perusteella voi tuoda säätöön kompensointia keskinäisen paikkavirheen poistamiseksi käytöjen väliltä.

Kuvan 2.1a) menetelmä, jossa käytöt itse muodostavat liikeprofiilinsa synkronoimattoman kenttäväylän ohjeiden mukaisesti, on yleinen alhaisen suoritusasteen poiminta-asetussovelluksissa (*pick and place*). Käytöt toimivat tällöin ilman suoraan tietoa toisen käytön tilasta ja ulkoinen isäntälaitte joutuu huolehtimaan turvalliset liikkeet, jos esimerkiksi toiseen käyttöön syntyy virhetilanne. Joissakin sovelluksissa isäntälaitte ei välttämättä pysty luomaan useampaa paikkaohjetta samanaikaisesti, jolloin toisen akselin

liike aloitetaan vasta, kun ensimmäisen akselin liike on suoritettu. Tällöin suoritusajat kasvavat tarpeettomasti. Synkronoinnin puuttuessa käyttöjen suoritushetket voivat poiketa toisistaan suurestikin, minkä vuoksi akseleiden välillä voi esiintyä viiveestä johtuva paikkaero liikkeiden aikana. Käyttämällä kuvan 2.1c) mukaista synkronoitua väylää käytöt saavat ohjeensa ja suorittavat toimintonsa keskenään samaan aikaan, jolloin järjestelmästä poistuu yksi akseleiden paikkaeroa tekevä tekijä. Jotkin nykyisistä liikkeenohjauskäytöistä mahdollistavat myös erillisen väylän suoraan käyttöjen välille kenttäväylän lisäksi, jolloin esimerkiksi käytöt voivat siirtää tietoa toimitilastaan suoraan toisille käytöille. Kuvan 2.1 e) mukainen keskitetty järjestelmä pystyy tuottamaan tarkan paikoituksen erityisesti, kun menetelmässä on mukana tarkkailija, joka mukauttaa akseleiden välistä säätöä tai ohjetta takaisinkytkentätietojen perusteella. (Jokinen 2010)

2.1 Isäntä-orjamenetelmä hajautetussa järjestelmässä

Isäntä-orjamenetelmässä on yleensä kaksi akselia, jossa isäntä saa paikkareferenssin paikkageneraattorilta ja orja käyttää ohjeenaan isännän todellista paikkatietoa. Järjestelmässä voi olla useampikin isäntä-orjapari tai yhtä isäntää voi seurata useampi orja. Periaate menetelmässä on kuitenkin sama riippumatta järjestelmässä olevien laitteiden määrästä, joten käsitellään jatkossa ainoastaan tilannetta, jossa järjestelmään kuuluu ainoastaan yksi orja. Menetelmän lohkokaavio viiveineen esitetään kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Isäntä-orjamenetelmän yksinkertainen lohkokaaavioesitys, jossa kummankin käytön tulisi liikkua samalla tavoin. Kuvassa käytetyt merkinnät ovat φ_{ref} kulmaohje, e_i akselin paikkaero todellisen ja ohjeen välillä, $C_i(s)$ säätimen ja $G_i(s)$ vastaavan järjestelmän siirtofunktio, $T_{\text{ref},i}$ vääntömomenttiohje järjestelmälle, τ_i virta- tai vääntömomenttisäädön viive, τ_{FB} takaisinkytkennän viive, τ_{d2d} viive paikkatiedon siirtämisessä taajuusmuuttajien välillä ja $\varphi_{i,\text{act}}$ akselin paikkatieto. Kuvassa on oletettu, että akseleita ohjaavat käytöt ovat samanlaiset, jolloin niissä esiintyvät viiveet ovat ainakin periaatteessa samansuuruiset.

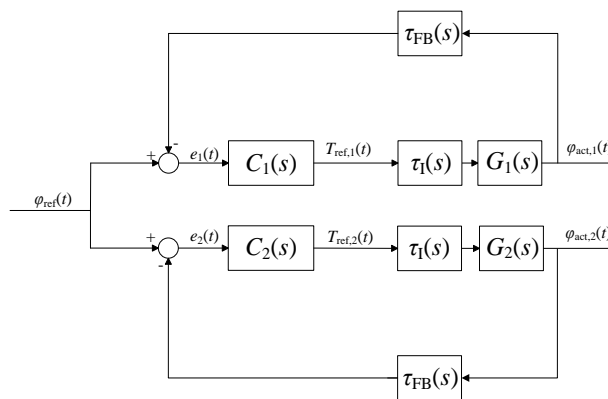
Orjan kulmaohje voi olla suoraan isännän todellinen paikka tai jokin funktio kyseisestä paikasta, jolloin saadaan aikaiseksi monimutkaisia liikeratoja. Itse takaisinkytkentätieto voidaan siirtää taajuusmuuttajien välillä usealla eri tavalla riippuen käytettyjen laitteiden ominaisuuksista. Paikkatieto voidaan siirtää kenttäväylän tai taajuusmuuttajien keskinäisen väylän välityksellä ja myös joidenkin valmistajien takaisinkytkentäraajapinnat antavat mahdollisuuden siirtää paikkatiedon eteenpäin toiselle takaisinkytkentäraajapinnalle.

Isäntä-orjamenetelmän suurin heikkous on orjalle tulevan ohjeen viiveellisyys ja mahdolliset vääristymät tai virheet takaisinkytkentätiedossa. Kaikki virheet ja siirtotiehen tarttuva kohina vahvistuvat orjan paikkasäädössä, jolloin orjan lopullinen paikkakin voi olla virheellinen. Kohinan poistamiseksi ohjetta joudutaan suodattamaan, mikä lisää viivettä järjestelmään. Menetelmä soveltuu tilanteisiin, joissa akseleita ajetaan kotiutus-tilaan tai tiettyyn pisteeseen ja vaaditaan, että molemmat akselit ovat samassa pisteessä tai orjan paikka on jotenkin verrannollinen isännän paikkaan liikkeen päätyttyä. Lisäksi menetelmän etuna on, että orjan liike on suorituksen aikana aina lähellä isännän todell-

lista liikettä, jolloin esimerkiksi kaikki isännän liikkeeseen suorituksen aikana tulevat muutokset näkyvät myös orjan liikkeessä. (Kok Kiong 2008)

2.2 Hajautettu rinnanohjaus

Hajautetussa rinnanohjauksessa viive eri käyttöjen saamien ohjeiden välillä saadaan poistettua, kun ohjeet jaetaan synkronoidun väylän avulla. Kuvassa 2.3 on esitetty lohkokaavio kahden käytön hajautetusta järjestelmästä, jossa molemmat käytöt saavat saman paikkaohjeen synkronoidun väylän välityksellä.

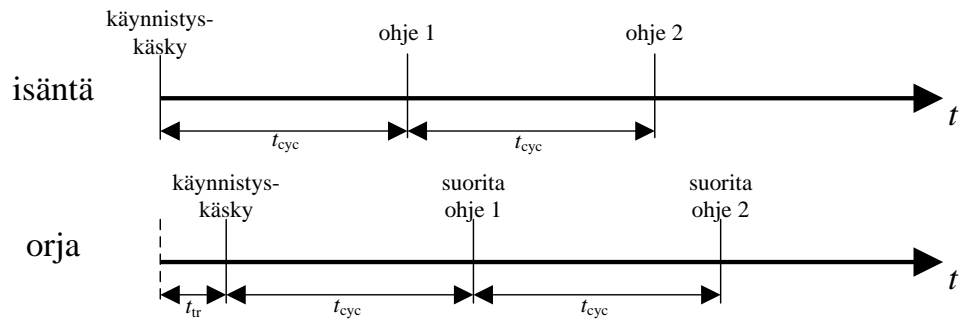


Kuva 2.3 Hajautetun rinnanohjatun järjestelmän lohkokaavioesitys.

Hajautetussa rinnanohjatussa menetelmässä ei välttämättä tarvita kenttäväylän kautta tulevaa synkronointia ja ohjeiden jakoa, jos taajuusmuuttajien välillä on jokin muu tiedonsiirtoväylä, ja se on lisäksi synkronoitu. Esimerkiksi ABB:n *drive-to-drive* väylä pystyy synkronoimaan käytöt ja siirtämään haluttua dataa käyttöjen välillä. Isäntä voi jakaa muille käyttöille paikkaohjeen suoraan päätepisteestä tai antaa jokaiselle ohjaus- ja siirtämiseen haluttua dataa käyttöjen välillä. Orjat voivat suoraan seurata isännän ohjepistettä tai muodostaa oman ohjeensa isännän paikkaohjeen funktiona omalla paikkaohjegeneraattorilla. Lisäksi erilaisten NOKKA-taulukoiden (CAM) käyttö on mahdollista akseleiden liikeprofiilien muodostamisessa.

Menetelmässä ei ole ylimääräistä viivettä paikkaohjeessa, kun se tulee käyttöille synkronoidun kenttäväylän välityksellä. Ilman synkronoitua kenttäväylää toimivien järjestelmien ohjeiden välillä voi syntyä viivettä. Myös järjestelmissä, joissa isäntälaitteena toimii taajuusmuuttaja, joka synkronoi keskinäisen väylän avulla järjestelmän muut taajuusmuuttajat, voi esiintyä tilanne, jossa taajuusmuuttajat suorittavat toimintonsa eri

ohjeilla väylän viiveen vuoksi. Siirtotiessä oleva viive voi helposti saada aikaan sen, että orjat suorittavat vaaditut ohjeet myöhemmin kuin käyttäjä haluaisi. Kyseisen viiveen ilmetessä tulee isännän säädön suorituksia viivästä järjestelmässä sen verran, että säätö suoritetaan vasta, kun orjataajuusmuuttajat ovat saaneet ohjeen. Jos taajuusmuuttajassa eri toimintojen aikatasot ovat kiinteät eikä isännän lähetyksen ja ohjeen suorituksen välisiä suoritushetkiä voida siirtää, joudutaan väylän viiveestä aiheutuvaa virhettä kompensoimaan orjan puolella. Tällöin vastaanottavien taajuusmuuttajien aikatasoja siirretään myöhäisemmäksi siirtotiessä olevan viiveen verran, jolloin orjat suorittavat säädön heti sen jälkeen, kun ohje on saatu perille. Tällöin tilanne on kuvan 2.4 mukainen.



Kuva 2.4 Ajoituskaavio tilanteesta, jossa orjalla on käytännössä siirretty aikataso isännän aikatasoon nähden siirtoväylän viiveen vuoksi.

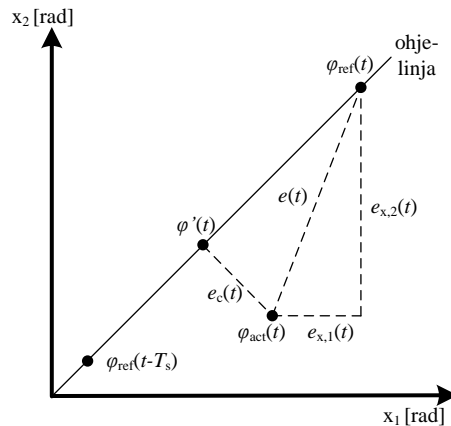
Kuvan 2.4 tilanteesta oletetaan, että isäntä suorittaa käskyt ja ohjeet samalla hetkellä kuin ne lähetetään orjalle. Väylän ollessa viiveellinen isännän ja orjan suorituksen välille asetetaan sopiva vaihesiirto, jonka suuruus on siirtotiessä esiintyvä viive. Tällöin viiveen vaikutuksesta, taajuusmuuttajien ohjaamien akseleiden väliin tulee viiveeseen verrannollinen virhe, mutta virheen suuruus olisi tunnettu ja sitä voitaisi kompensoida esimerkiksi korjaamalla ohjetta nopeuteen verrannollisella korjaustermillä. Tilanne on hyvin samankaltainen kuin kuvassa 1.3 esitetty tilanne synkronoimattomassa järjestelmässä, mutta siirtotien viiveen ollessa pieni ja tunnettu, ei viiveen vaikutuksesta aiheudu suurta virhettä järjestelmään.

3 SEURANTAVIRHE JA SEN KOMPENSOIMINEN

Seurantavirhe tarkoittaa moniakselijärjestelmässä virhettä järjestelmän todellisen paikan ja ohjelinjan välillä. Ohjelinjan asettavat paikkaohjepisteet ja kyseinen linja voidaan esittää kahden akselin tapauksessa akselien asettamassa tai kumpikin omana ajan ja paikan koordinaatistossa. Kuvassa 3.1 on esitetty seurantavirhe käytetyn testilaitteiston x-akseleiden asettamassa koordinaatistossa. Ohjelinja on suora ja sen kulmakerroin pysyy vakiona, kun akselien ohjeiden muutokset ovat suoraan verrannollisia toisiinsa.

$$k = \frac{\varphi_{\text{ref},2}(t) - \varphi_{\text{ref},2}(t - T_s)}{\varphi_{\text{ref},1}(t) - \varphi_{\text{ref},1}(t - T_s)}. \quad (3.1)$$

Tässä $\varphi_{\text{ref},2}(t)$ ja $\varphi_{\text{ref},1}(t)$ ovat akselien x_2 ja x_1 pyörivien moottorien kulmaohjeet ajanhetkellä t ja T_s ohjegeneraattorin syklin aika.



Kuva 3.1 Seurantavirhe $e_c(t)$ x-akseleiden asettamassa koordinaatistossa ajan hetkellä t . Kuvassa ohjelinjan muodostavat nykyinen ja edellinen kulmaohje $\varphi_{\text{ref}}(t)$ ja $\varphi_{\text{ref}}(t - T_s)$. $\varphi_{\text{act}}(t)$ on todellinen paikka, $\varphi'(t)$ on piste ohjelinjalta, josta on lyhin etäisyys $e_c(t)$ todelliseen paikkaan, $e(t)$ on kokonaiskulmavirhe, $e_{x,1}(t)$ ja $e_{x,2}(t)$ ovat akselien suuntaiset kulmavirheet.

Kuvan 3.1 tilanteessa akselleille tulevat ohjeet ovat samat, jolloin ohjelinjaksi muodostuu suora, jonka kulmakerroin on 1. Kokonaiskulmavirhe $e(t)$ voidaan määrittää akselien suuntaisten kulmavirheiden avulla

$$e(t) = \sqrt{(e_{x,1}(t))^2 + (e_{x,2}(t))^2}. \quad (3.2)$$

Sovelluksissa, joissa säädössä käytetään ainoastaan akselin suuntaista virhetermiä, seurantavirhettä ei pystytä suoraan pienentämään, vaan se on aina riippuvainen akseleiden paikkavirheistä. Akseleiden paikkavirheeseen vaikuttavat eniten käytetty referenssi sekä akselin dynamiikka ja sen muutokset. Johtuen monenlaisista muutoksista akseleilla, liikkeenohjauksessa käytettävä paikkakaskadi on kompromissi erilaiset tilanteet huomiottaen.

3.1 Seurantavirheen kompensoiminen

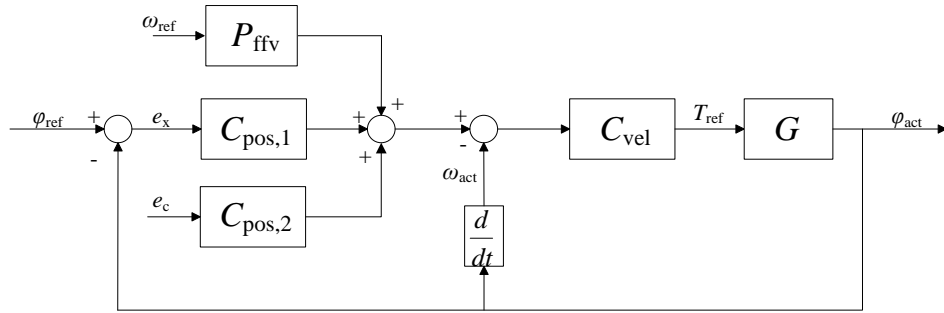
Liikkeenohjauksessa käytettävä kuvan 1.2 mukainen paikkakaskadisäädin muodostaa nopeusohjeensa kulmavirheen perusteella eli akselia x_1 ohjaava säädin pyrkii poistamaan virheen $e_{x,1}$ ja akselin x_2 säädin käyttää säätöön virhetermiä $e_{x,2}$. Lisäksi näiden rinnalla voi olla nopeuden myötäkytkentä parantamassa säädön toimintaa. Menetelmässä ei siis huomioida ollenkaan seurantavirheen suuruutta suoraan säädössä.

Synkronoinnin parantamiseksi kahden akselin tapauksessa ja akseleiden välisen poikkeaman poistamiseksi, pitäisi todellinen paikka saada ohjelinjalle. Tällöin kokonaisvirhe e olisi ohjelinjan suuntainen ja virhetermit akseleiden suuntaisesti olisivat toisiinsa nähden suoraan verrannollisia ohjeiden mukaisesti

$$e_{x,1}(t) = k e_{x,2}(t), \quad (3.3)$$

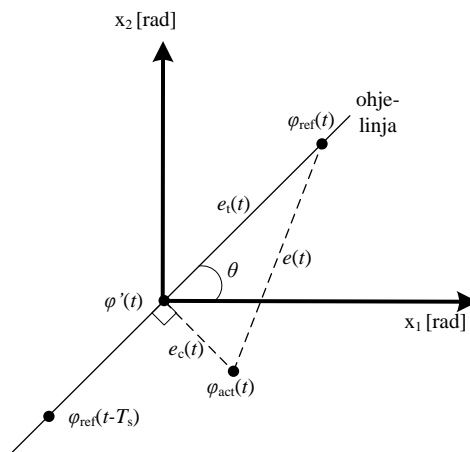
jossa k on ohjelinjan kulmakerroin.

Seurantavirheen poistamiseksi voidaan säätöön tuoda paikkasäätimen rinnalle toinen paikkasäädin, jonka lähtöön vaikuttaa akseleiden seurantavirhe kuvan 3.2 mukaisesti.



Kuva 3.2 Lohkokaavio myötäketyksetystä paikkakaskadista, johon paikkasäättäjän rinnalle on lisätty toinen paikkasäädin, jonka tulona on akseleiden seurantavirhe.

Kuvan 3.2 mukaisessa säätörakenteessa tulo e_c joudutaan vielä ratkaisemaan akseleiden kulmavirheiden avulla. Kuvassa 3.3 esitetään kuvan 3.1 tilanne siten, että piste $\varphi'(t)$ on siirretty origoon ja kulmavirhe muodostuu komponenteista, jotka ovat ohjelinjan suuntaisesti ja sitä kohtisuoraan. Suuntaa ohjelinjan mukaisesti merkitään t:llä ja ohjelinjaa kohtisuoraan merkitään c:llä.



Kuva 3.3 Kulmavirhe $e(t)$ ohjelinjan suuntaisen komponentin $e_t(t)$ ja sitä kohtisuorassa olevan komponentin $e_c(t)$ esittämänä. Kulma θ on x_1 -akselin ja ohjelinjan välinen kulma.

Kulmavirheet e_c ja e_t voidaan määrittää kulmavirheiden $e_{x,1}$ ja $e_{x,2}$ kautta koordinaatiston kierron avulla. Kiertäminen vastapäivään tehdään matriisilla

$$\Phi = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

jolloin virhekomponentit t- ja c-suuntaan ovat

$$\begin{bmatrix} e_t \\ e_c \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi} \begin{bmatrix} e_{x,1} \\ e_{x,2} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Kulma θ voidaan ratkaista kulmakertoimen avulla

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\varphi_{\text{ref},2}(t) - \varphi_{\text{ref},2}(t - T_s)}{\varphi_{\text{ref},1}(t) - \varphi_{\text{ref},1}(t - T_s)} \right) = \tan^{-1}(k). \quad (3.6)$$

Kulman laskennassa pitää muistaa ottaa huomioon poikkeustilanne, joka syntyy akselin x_1 nollassa, jolloin peräkkäisten paikkaohjeiden erotus on nolla ja yhtälöstä (3.6) tulee määrittelemätön. Tällöin kulman arvoksi tulee $\pi/2$ tai $-\pi/2$ osoittajan merkin mukaisesti.

Käyttämällä rinnalla virhetermejä t - ja c -suunnassa, joita säädetään P -tyyppisillä säätimillä, saadaan kompensattorin tuottamaksi nopeusohjeeksi t - ja c -suunnassa

$$\begin{bmatrix} U_t \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_t & 0 \\ 0 & P_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_t \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_t e_t \\ P_c e_c \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

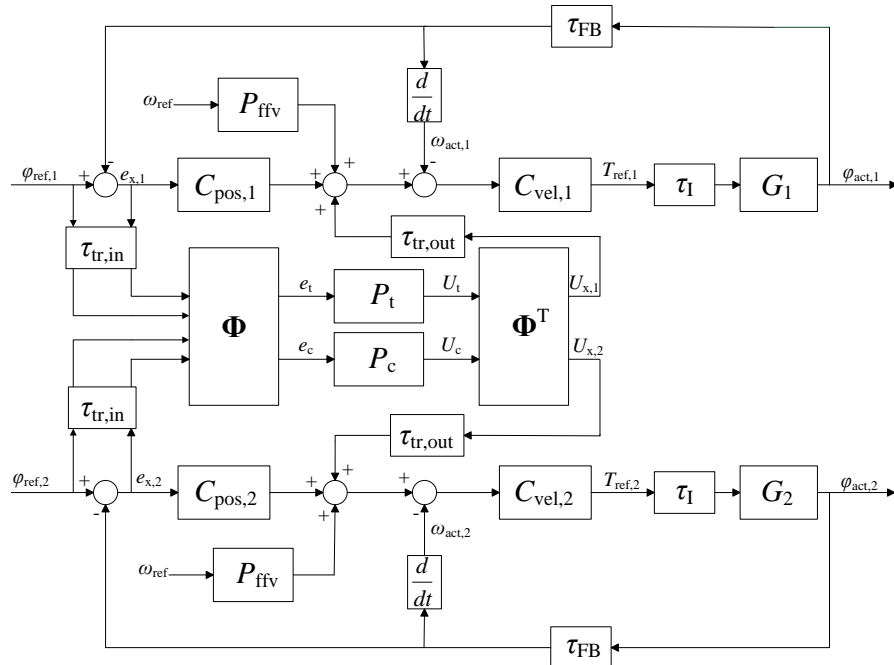
jossa P_t on vahvistus ohjelinjan suuntaiselle virheelle ja P_c vahvistus ohjelinjaan nähden kohtisuorassa olevalle virheelle. Nopeusohjeet tulee vielä kääntää kompensantiohjeeksi akselien x_1 ja x_2 suuntaisiksi, joka tapahtuu matriisin (3.3) transpoosilla

$$\begin{bmatrix} U_{x,1} \\ U_{x,2} \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}^T \begin{bmatrix} U_t \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Sijoittamalla matriisiin (3.8) nopeusohjeiden paikalle matriisien (3.7) vahvistetut virhetermit ja sijoittamalla virhetermien e_t ja e_c paikalle matriisin (3.5) virhetermit x_1 - ja x_2 -suunnassa, saadaan kompensantiohjeiksi

$$\begin{bmatrix} U_{x,1} \\ U_{x,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_t \cos \theta (e_{x,1} \cos \theta + e_{x,2} \sin \theta) + P_c \sin \theta (e_{x,1} \sin \theta - e_{x,2} \cos \theta) \\ P_t \sin \theta (e_{x,1} \cos \theta + e_{x,2} \sin \theta) + P_c \cos \theta (-e_{x,1} \sin \theta + e_{x,2} \cos \theta) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Kompensaattori tuodaan järjestelmään paikkasäätimien rinnalle, jolloin kaksiakselisen järjestelmän lohkokaavioesitys on kuvan 3.4 mukainen.



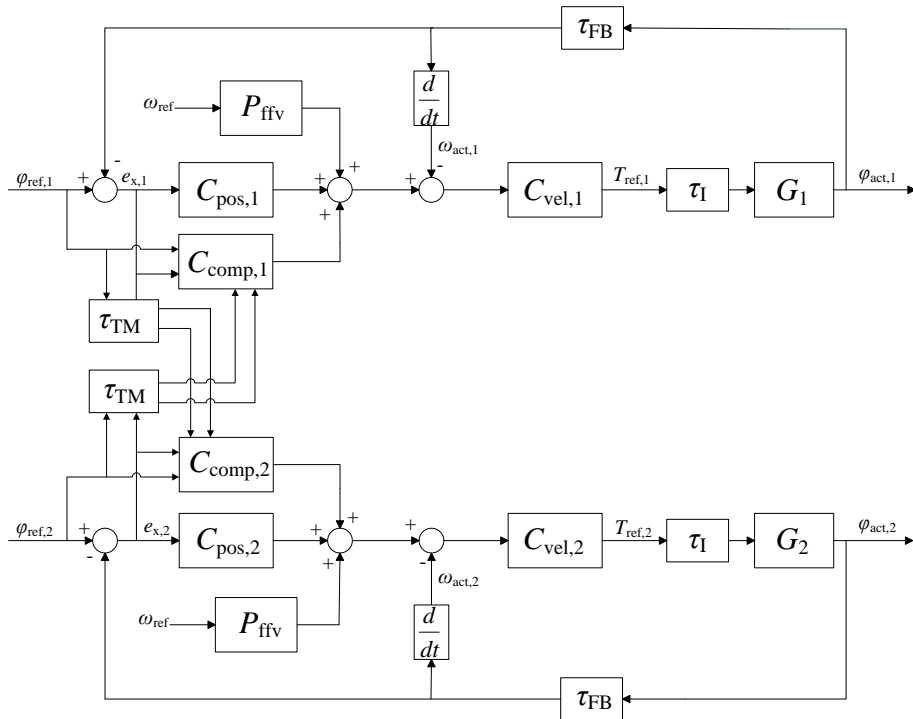
Kuva 3.4 Lohkokaavioesitys kaksiakselijärjestelmästä, johon on lisätty seurantavirheen kompensointori. $\tau_{tr,in}$ on paikkavirheen lähetysviive ja $\tau_{tr,out}$ on kompensointiohjeen lähetysviive.

Kuvan 3.3 järjestelmässä on yksi kompensointori, joka voi käytännön järjestelmissä sijaita järjestelmässä olevassa korkeamman tason säätimessä, kuten PLC:ssä. Isäntälaitte laskee kompensointitermit ja lähettää ne kulma- tai nopeusohjeiden rinnalla käyttöille. Ilman kenttävylyä toimivissa järjestelmissä kompensointori voisi olla myös yhdessä järjestelmän taajuusmuuttajissa. Synkronoinnin parantamiseksi virheen e_t kompensoiminen ei tuo todellista paikkaa lähemmäksi ohjelinjaa, joten sen vahvistaminen ei ole tarpeellista synkronointisovelluksessa. Sovelluksissa, joissa koko paikkasäätö tehtäisiin virhetermien e_t ja e_c pohjalta eikä akseleiden virhetermeillä, voisi myös virhettä e_t käyttää parantamaan säädön toimintaa.

Ajattaessa akseleita x_1 ja x_2 samalla ohjeella, on muutos molempien akseleiden ohjeissa yhtä suuri jokaisella hetkellä ja ohjelinjan kulmakertoimeksi tulee 1. Yhtälön (3.5) mukaisesti kulma ohjelinjan ja x_1 -akselin välillä on tällöin 45° ja matriisista (3.9) saadaan

$$\begin{bmatrix} U_{x,1} \\ U_{x,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}P_t(e_{x,1} + e_{x,2}) + \frac{1}{2}P_c(e_{x,1} - e_{x,2}) \\ \frac{1}{2}P_t(e_{x,1} + e_{x,2}) + \frac{1}{2}P_c(-e_{x,1} + e_{x,2}) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Esitetty kompensattori voidaan lisätä hajautettuun järjestelmään molempien akseleiden paikkasäätimien rinnalle. Lisäämällä molemmille käytöille oma kompensattori saadaan kompensointitermin lähetysviive poistettua. Huonona puolena rakenteessa on, että akseleiden välillä joudutaan siirtämisen dataa ristiin ja toiselta akselilta saatavat kulmavirhetieto ja ohje ovat viiveellisiä verrattuna akselin omiin arvoihin. Ohjeen siirtäminen ei ole välttämätöntä tilanteissa, joissa akseleiden ohjeiden muutokset ovat aina yhtä suuret eli muunnos tehdään aina samalla kerroinmatriisilla. Viiveen suuruus riippuu käytetystä tiedonsiirtoväylästä ja työssä tutkitaan simuloimalla tämän viiveen vaikutusta kompensointiin. Järjestelmissä, joissa takaisinkytkentätiedot saadaan yhdeltä anturilta molemmille taajuusmuuttajille ja akseleiden ohjeiden muutokset toisiinsa nähden tunnetaan etukäteen, voidaan päästä tilanteeseen, jossa minkäänlaisia viiveitä kompensattorilla ei esiinny. Kuvassa 3.5 on esitetty lohkokaaavioesitys hajautettuun järjestelmään liitetyistä kompensattoreista, jotka saavat toistensa kulmavirhetiedon ja ohjeensa jonkin väylän välityksellä.

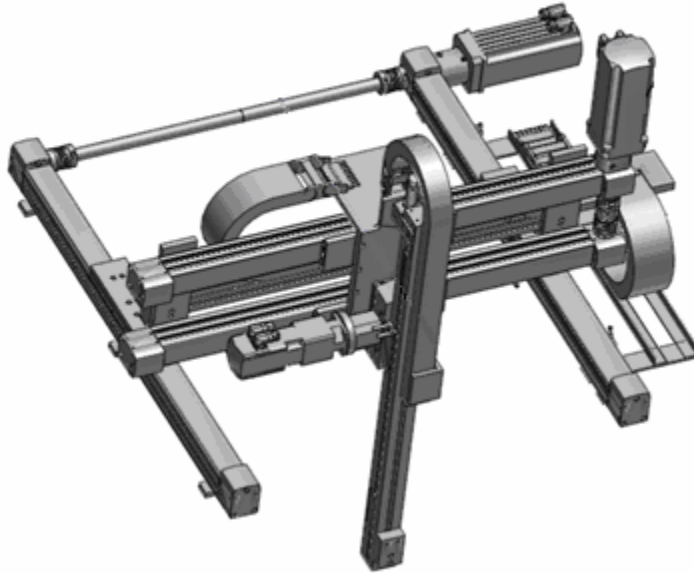


Kuva 3.5 Lohkokaavioesitys kaksiakselijärjestelmästä, jossa on molempien paikkasäätimien rinnalla omat seurantavirhekompensoattorit. τ_I on viive kulmavirheen siirrossa toiselle taajuusmuuttajalle.

Kuvan 3.5 mukaisessa järjestelmässä kompensoattorit ovat sijoitettu paikkasäätimien rinnalle ja oletetaan, että niiden suoritukset tehdään samalla hetkellä kuin paikkasäätimien, jolloin kompensointiohjeen lähetykseen ei synny viivettä.

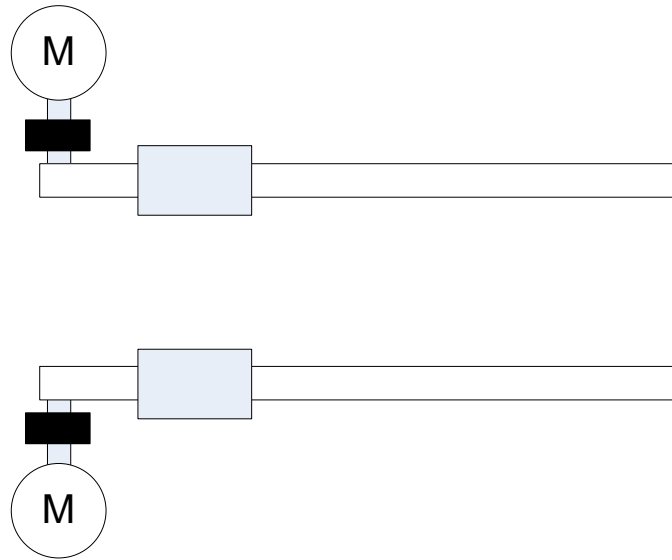
4 TESTILAITTEISTO

Eri synkronointimenetelmiä testataan kuvan 4.1 mukaisen Feston portaalirobotin x-akseleiden hammashihnaajohteilla. Alkuperäisessä laitteistossa x- ja y-akselin suuntaisesti on kaksi johdetta, jotka ovat yhdistetty teräksisillä yhdystangoilla. Kaksi johdetta tarjoaa mahdollisuuden suuremman voiman siirtämiseen akselille, jolloin suorituskyky paranee suurempien kiihtyvyyksien ja hidastuvuuksien ollessa mahdollisia. Alkuperäisessä laitteistossa jokaisella akselilla on oma kestomagneettiservomoottori, joista x- ja y-akselin moottorit ovat suoravetoisia ja z-akselilla on moottoriin kytketty vaihdelaatikko, jonka välityssuhde on 1:3.



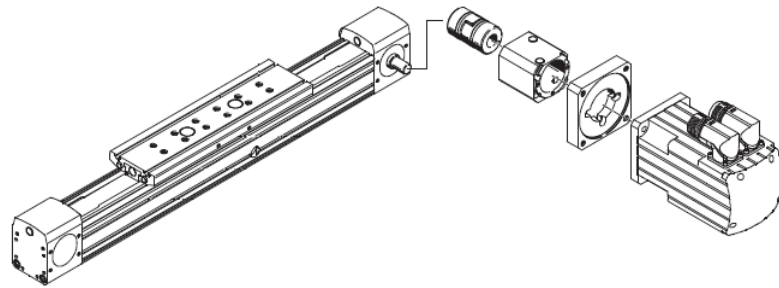
Kuva 4.1 Feston portaalirobotti alkuperäisasussaan.

Alkuperäisen robotin x-akselin hammashihnaajohteiden välisen yhdystangon sekä y- ja z-akselin poistamisen jälkeen toisellekin johteelle on kiinnitetty oma servomoottori. Testilaitteiston periaatekuva on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 Testilaitteiston periaatekuva.

x-akselin johteiden synkronointi on valittu testiympäristöksi, koska laitteiston suorituskykyä pyritään parantamaan, ja rajoittavana tekijänä on ollut nimenomaan x-akselin johteiden välillä oleva yhdystanko. Tanko on malliltaan Feston KSK-40 ja johteiden väli on 1430 mm, jolloin se rajoittaa johteilla käytettävän suurimman sallitun nopeuden 1,8 m/s (Festo 2007b) ja tuo lisäksi järjestelmään matalan resonanssitaajuuden, joka on välillä 20–50 Hz riippuen johteilla olevien kelkkojen paikasta (Jokinen 2010). Lisäämällä toinen moottori pienennetään kuorman ja moottorin välistä hitausmassojen suhdetta, joka alkuperäisessä laitteistossa oli noin 15 (Jokinen 2010). Poistamalla muut akselit x-akseleiden johteilta saadaan kaksi samanmittaista hammashihnajohdetta, joille kiinnitettyjen kelkkojen kuormitusta on helppo vaihdella ja sen vaikutusta synkronointiin ja seurantavirheen muodostumiseen voidaan myös tarkastella. Käytettävät hammashihnajohdeet ovat Feston DGE-ZR-RF-40 ja järjestelmässä käytetään ESR MR 7454-U5-N030 ja SEW CFM90M kestomagneettitahtimoottoreita. Johteen ja moottoreiden parametrit ovat esitetty liitteessä I. Kuvassa 4.3 on esitetty rakennekuva yhden johteen ja moottorin osalta.



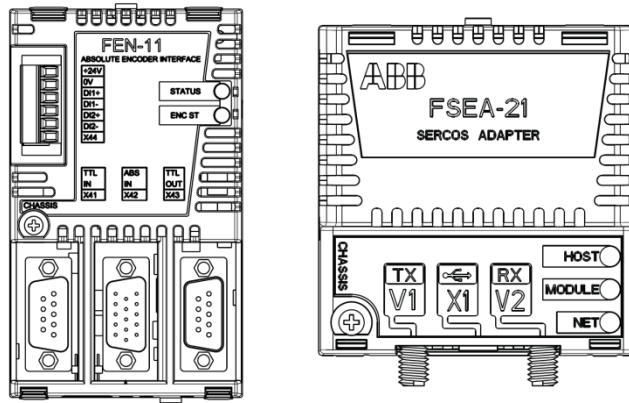
Kuva 4.3 Hammashihnajohdin Festo DGE-ZR-RF. Todellisen hinnan hinnapyörien väli on 2,1 m ja kelkan pituus 0,3 m. (Festo 2007)

Moottoreiden ohjaukseen käytetään ABB:n valmistamia ACSM1-taajuusmuuttajia, jotka ovat erityisesti suunnitellut liikkeenohjaukseen ja taajuusmuuttajissa on asennettuna liikkeenohjausohjelmistot. Kuvassa 4.4 on esitetty eräs ACSM1-taajuusmuuttaja.



Kuva 4.4 ACSM1-taajuusmuuttaja. (ABB 2011)

Kuvan 4.4 mukaisiin taajuusmuuttajiin on lisäksi kytketty FEN-11 absoluuttianturimoduulit, joissa on tulot sekä inkrementti- että absoluuttianturille ja lisäksi lähtö inkrementtisihtaalille, josta voidaan lähettää emuloitu paikkatieto tai kiihtää inkrementtitulon signaali. Kenttäväylää varten taajuusmuuttajissa on myös FSEA-21 SERCOS (*Serial Real-time COmmunication System*) II -kenttäväylärajapinta. Käytetyt moduulit on esitetty kuvassa 4.5 ja taajuusmuuttajien ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 4.2.

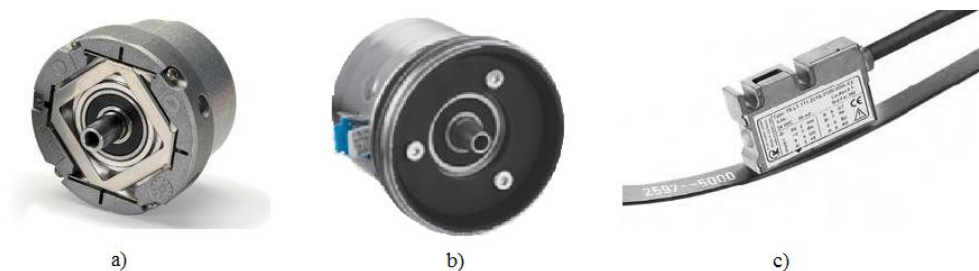


Kuva 4.5 FEN-11 -absoluuttianturimoduuli ja FSEA-21 -kenttäväylärajapinta.

Taulukko 4.1 Testilaitteistossa käytetyn taajuusmuuttajien ominaisuudet kytkentätaajuudella $f_{sw} = 8$ kHz. (ABB 2007)

taajuusmuuttaja	ACSM1-04AM-024A-4
lähtövirta I_{out} [A]	24
suurin sallittu lähtövirta $I_{out,MAX}$ [A]	42
lähtöjännite U_{out} [V]	$0-U_{in}$
lähtötaajuus f_{out} [Hz]	0-500
tyypillinen moottorin teho P_{out} [kW]	11

Moottoreiden takaisinkytkentätiedot saadaan *sin/cos multiturn* -absoluuttiantureilla. Johteella x_1 olevan ESR:n moottorin akselilla on kiinnitettynä Heidenhainin EQN-1325 EnDat absoluuttianturi ja toisella johteella olevassa SEW:in moottorissa on Sick/Stegmann SRS50 Hiperface-absoluuttianturi. Kelkkojen paikkatietojen mittaamisessa käytetään Küblerin LIMES LI20/B1-magneettinauhajärjestelmää, joka sisältää magneettinauhan ja anturin. Magneettinauha-anturi on inkrementtianturi, joten FEN-11-moduulilla voidaan lukea aina johteen moottorin kulmatieto ja kelkan paikkatieto. Käytetyt anturit esitetään kuvassa 4.6.



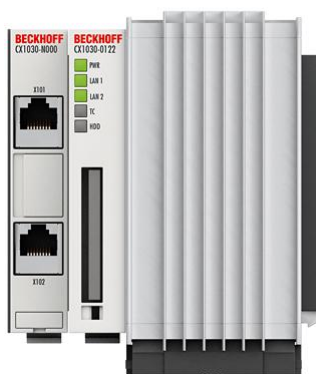
Kuva 4.6 Testilaitteistossa käytössä olevat anturit. a) EQN-1325, b) SRS50 ja c) Limes LI20/B1 -magneettinauhajärjestelmä. (Heidenhain 2010, Stegmann 2011 ja Kübler 2011)

Antureiden mittausepävarmuudet on esitetty taulukossa 4.3. Absoluuttiantureiden epävarmuudet esitetään kulmasekunteinä, radiaaneina sekä redusoituna johteelle käyttäen valmistajan ilmoittamaa hihnapyörän sädettä $r = 19,89$ mm.

Taulukko 4.2 Käytettyjen antureiden epävarmuudet. (Heidenhain 2010, Stegmann 2011 ja Kübler 2011)

anturi	epävarmuus	epävarmuus [rad]	epävarmuus johteelle redusoituna [mm]
EQN-1325	$\pm 60''$	$\pm 2,91 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,0058$
SRS50	$\pm 45''$	$\pm 2,18 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,0043$
LIMES LI20/B1	-	-	$\pm 0,09$

Testilaitteistossa paikkaprofiilien luomisessa käytetään Beckhoff CX1030 sulautettua PC:tä, joka on esitetty kuvassa 4.7. Käyttöjärjestelmänä laitteella on Windows CE ja lisäksi käytössä on TwinCAT automaatio-ohjelmisto, joka tarjoaa tehokkaan ohjelmoitavan logiikan eli PLC:n. Suorittimena CX1030 PC:llä pyörii 1,8 MGHZ Intel® Pentium® M-suoritin. Järjestelmä on hankittu testilaitteistoon aikaisemmin, eivätkä tässä työssä laitteella tehtävät toiminnot vaadi näin suuria resursseja.



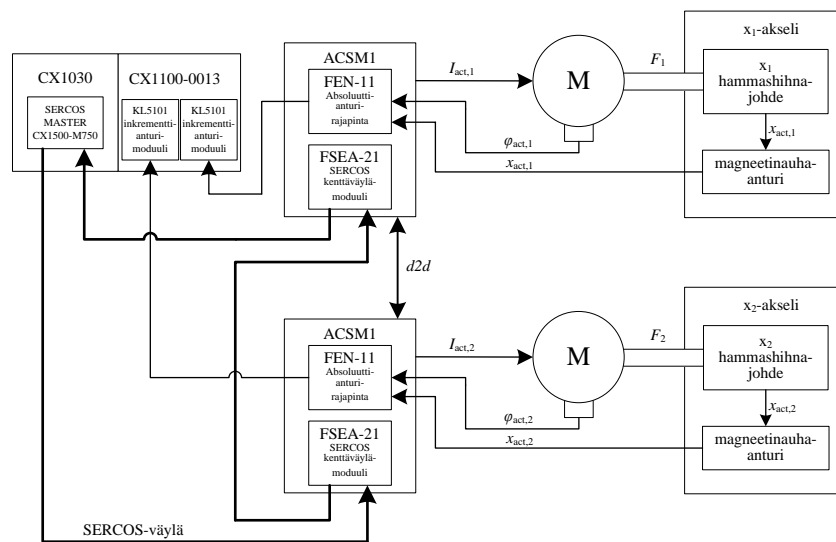
Kuva 4.7 Beckhoff CX1030 sulautettu-PC. (Beckhoff 2011)

Sulautetun-PC:n lisäosana on CX1030-N010 DVI/USB-rajapinta ja SERCOS-isäntämoduuli CX1500-M750. Teholähteenä ja K-väylän rajapintana järjestelmälle toimii CX1100-0013 -yksikkö. K-väylällä on liitetty KL5101-inkrementtienkooderimoduulit, magneettinauha-antureiden paikkatiedon lukemiseksi, ja KL1408-digitaalitulomoduuli. Edellä esitetyt osat on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.8 CX1500-M750 -SERCOS isäntämoduuli, CX1030-N010 DVI/USB-rajapinta, CX1100-0013-tehoyksikkö, KL5101-inkrementti-anturimoduuli ja KL1408-digitaalitulomoduuli. (Beckhoff 2011)

Kaaviokuva koko testijärjestelmästä on esitetty kuvassa 4.9.



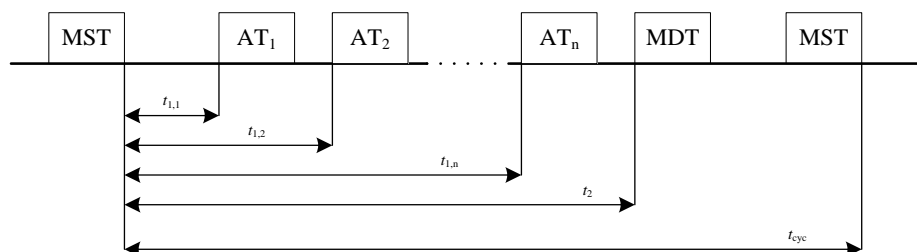
Kuva 4.9 Testijärjestelmän kaaviokuva.

Taajuusmuuttajat synkronoidaan SERCOS-isännän synkronointisignaaliin ja väylän kautta jaetaan myös käynnistyskäskyt ja ohjeet. Kenttäväylälle taajuusmuuttajat asettavat tilatietonsa sekä todelliset paikka- ja nopeustiedot. Taajuusmuuttajien välistä $d2d$ -väylää tullaan käyttämään isäntä-orjamenetelmässä siirtämään isännän kulmatietoa $\varphi_{act,1}$ ohjeeksi orjataajuusmuuttajalle, joka ohjaa akselia x_2 . Taajuusmuuttajien suoralla yhteydellä testataan myös rinnan ohjauksen toimintaa mittausten yhteydessä.

4.1 SERCOS II -kenttäväylä

Kuten aikaisemmin mainittiin, on järjestelmässä käytössä SERCOS II -kenttäväyläprotokolla. SERCOS II on erityisesti liikkeenohjaukseen suunniteltu synkroninen väylä, jonka pienin mahdollinen syklin aika on $62,5 \mu\text{s}$ (Sercos 2011). Testilaitteistossa taajuusmuuttajien paikkasäätö toimii $500 \mu\text{s}$:n ja nopeus- sekä momenttisäätö $250 \mu\text{s}$:n aikatasolla. Taajuusmuuttajien FSEA-21-väylämoduulien pienin sallittu syklin aika on myös $500 \mu\text{s}$, joka on riittävän pieni, kun järjestelmää ajetaan hajautetusti paikkaohjeiden avulla.

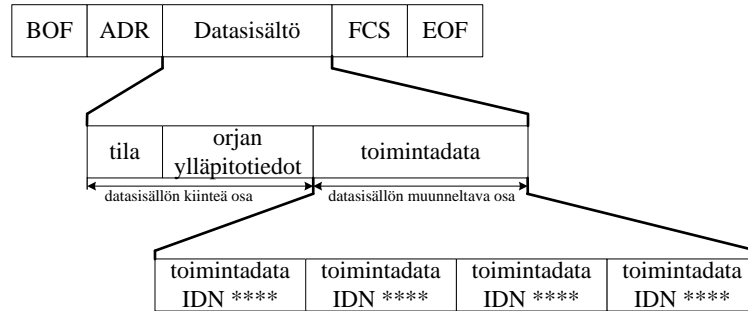
SERCOS II -väylä on topologialtaan *daisy-chain* eli laite A on kytketty laitteeseen B ja niin edelleen kuten kuvasta 4.9 voidaan nähdä. Fyysinen linkitys laitteiden välillä on toteutettu optisella kaapelilla. Yhden ringin koko on yksi isäntälaitte ja 1-254 orjalaitetta. SERCOS-väylällä isäntälaitte määrää ajanhetket eri datojen siirtämiseen väylällä. Ringin pystytysvaiheessa isäntälaitte määrää orjalaitteille ajanhetket synkronointisignaalista lukien, milloin niiltä pyydetty data asetetaan väylälle. Viimeisen orjan laitettua data väylälle, isäntä muodostaa seuraavat ohjeet ja lähettää ne orjalaitteille. Kuvassa 4.10 on esitetty yhden SERCOS-syklin datapaketit, kun ringissä on n -kappaletta orjalaitteita.



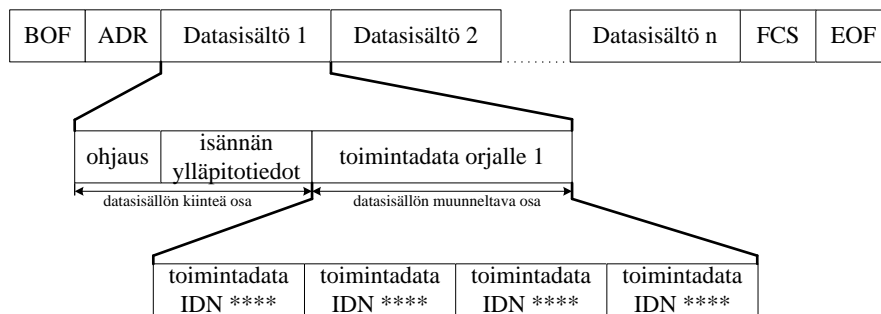
Kuva 4.10 SERCOS-väylän sykli. MST on isännän synkronointiviesti (*Master Synchronization Telegram*), AT on käytön viesti (*Amplifier/Drive Telegram*) ja MDT on isännän viesti (*Master Data Telegram*).

Isännän synkronointiviesti on kuuden tavun mittainen, ja se lähetetään kaikkiin ringin orjalaitteisiin. Kaikki ringin laitteet synkronoivat toimintonsa tämän viestin mukaisesti ja lähettävät viestinsä isännän määräämän ajan kuluttua synkronointiviestistä. Laitteille asetetaan ringin pystytysvaiheessa myös tarkat ajanhetket, jolloin tärkeimmät toiminnot kuten takaisinkytkentätieto luetaan tai väylältä tullut ohje suoritetaan. Nämä ajanhetket ovat kaikille ringin laitteille samat, joten esimerkiksi isäntälaitteelle käytöiltä tulevat takaisinkytkentätiedot ovat kaikki luettu samalla ajanhetkellä. (Sercos 2011)

Orjalaitteiden ja isännän viestit ovat rakenteeltaan samanlaisia, mutta isännän viesti on pidempi sisältäen ohjeen jokaiselle ringin laitteelle. Kuvassa 4.11 on esitetty orjan lähettämän viestin AT rakenne ja kuvassa 4.12 isäntälaitteen viesti MDT.



Kuva 4.11 Orjalaitteen lähettämän viestin rakenne. BOF tarkoittaa aloitussarjaa (*Beginning Of Frame*), ADR osoitetta (*Address*), FCS tarkistussarjaa (*Frame Check Sequence*) ja EOF lopetusta (*End Of Frame*).



Kuva 4.12 Isäntälaitteen lähettämän viestin rakenne.

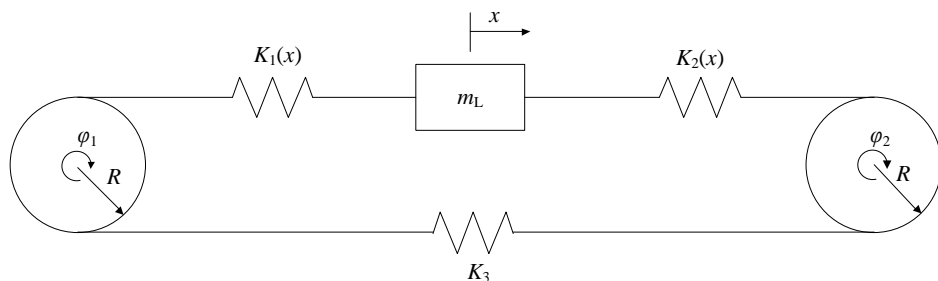
Viestin aloittaa aina aloitussarja ja sitä seuraa osoite. Itse datasisältö, joka lähetetään orjalaitteelta isännälle, sisältää kiinteän ja käyttäjän valitseman osan. Kiinteässä osassa siirretään tieto laitteen tilasta, joka voi olla esimerkiksi valmis toimimaan tai laitteen virhesanoma. Orjan ylläpitotiedoissa siirretään tietoa, joka ei ole tarpeellista siirtää jatkuvasti, kuten erilaiset orjalaitteeseen asetetut vääntömomentti- ja paikkarajoitukset tai vahvistukset. Varsinaisen toimintadatan käyttäjä voi itse muodostaa ja tässä osassa voidaan siirtää 1-16 erilaista tietoa orjalaitteelta isännälle. Tieto voi olla esimerkiksi orjalaitteen paikka-, nopeus- tai vääntömomenttitieto. Testilaitteessa orjalaitteina toimivat taajuusmuuttajat lähettävät 32 bittiset todelliset paikka- ja nopeustietonsa isäntälaitteelle. (Sercos 2011)

Isännältä orjalaitteille siirrettävät ohjeet ovat jokaiselle omassa paketissaan. Orjalaitteen saadessa vuorollaan koko isännän ohjeviesti (MDT) se poimii oman ohjeensa ja toimii sen mukaisesti. Itse ohje sisältää kiinteän osan ja käyttäjän valitseman datan, kuten orjan viestikin. Kiinteässä osassa on alussa kahdeksan bittinen ohjaussana, jolla käynnistetään tai sammutetaan orjalaite. Tätä seuraa isännän ylläpitotiedot, jonka mukana tulee tieto esimerkiksi kotiutuksesta tai koordinaattipoikkeamista ohjeessa. Tämä osa voi olla 2, 4, 6 tai 8 tavua pitkä. Varsinaisessa toimintadatassa siirretään reaaliaikaiset tiedot ja käskyt orjalaitteille. Testilaitteistossa taajuusmuuttajat saavat toimintadatassa 32 bittiset paikkaohjeet. (Sercos 2011)

4.2 Linearihammashihnan matemaattinen malli

Testilaitteiston muodostavien lineaaristen hammashihnajohteiden mallinnus on esitetty aikaisemmin Seppo Saarakkalan diplomityössä *Lineaarisen hammashihnaservokäytön tilasäätö* (Saarakkala 2008) ja Markku Jokisen väitöskirjassa *Centralized Motion Control of a Linear Tooth Belt Drive: Analysis of the Performance and Limitations* (Jokinen 2010). Itse mallintaminen on muodostettu lähteen Hace 2004 pohjalta. Matemaattista mallia käytetään tutkittaessa eri viiveiden ja dynaamisten ominaisuuksien vaikutuksia seurantavirheeseen MATLAB:in Simulink ympäristössä.

Testilaitteisto koostuu kahdesta samanmittaisesta linearihammashihnajohteesta ja niihin kytketyistä moottoreista, kuten kuvassa 4.2 esitettiin. Hammashihnat aiheuttavat sen, että mallintamisessa järjestelmä yhden johteen osalta ajatellaan jousimassasysteeminä kuvan 4.13 mukaisesti.



Kuva 4.13 Linearihammashihnajärjestelmän malli, jossa φ_1 on vetävän hihnapyörän kiertymäkulma, φ_2 vapaan hihnapyörän kiertymäkulma, R hihnapyörän säde, $K_1(x)$ jousivakio massan ja vetävän hihnapyörän välillä, $K_2(x)$ jousivakio massan ja vapaan hihnapyörän välillä, K_3 hihnapyörien välinen jousivakio, x kelkan paikka ja m_L kuorman massa.

Moottori on kytketty suoraan hihnapyörään 1, jolloin johteelle voidaan kirjoittaa

$$(J_1 + J_M)\ddot{\varphi}_1 + F_{\text{rf1}} = T_{\text{ref}} - R[K_1(x) \cdot (R\varphi_1 - x) - K_3 \cdot (R\varphi_2 - R\varphi_1)], \quad (4.1)$$

$$J_2\ddot{\varphi}_2 + F_{\text{rf2}} = R[K_2(x) \cdot (x - R\varphi_2) - K_3 \cdot (R\varphi_2 - R\varphi_1)], \quad (4.2)$$

$$m_L\ddot{x} + F_f = K_1(x)(R\varphi_1 - x) - K_2(x)(x - R\varphi_2), \quad (4.3)$$

joissa J_1 ja J_2 ovat vetävän ja vapaan hihnapyörien hitausmassat, J_M moottorin hitausmassa, F_{rf1} ja F_{rf2} ovat pyörimiskitkat johteen päissä olevissa hihnapyörissä, T_{ref} moottorin tuottama vääntömomentti ja F_f hihnaan kohdistuva liikekitka. Testilaitteiston parametrit yhtälöille (4.1)–(4.3) on esitetty liitteessä II.

Jousivakiot K_1 , K_2 ja K_3 voidaan määrittää valmistajan ilmoittamien venymätietojen perusteella hihnalle. Valmistaja on ilmoittanut hihnalle suhteelliseksi venymäksi 0,11 % suurimmalla sallitulla voimalla $F_{\text{max}} = 610$ N (Festo 2007). Jousivoima voidaan esittää Hooken lain avulla

$$F = K\delta = Kl_0\varepsilon, \quad (4.4)$$

jossa K on jousivakio, δ venymä, l_0 jousen alkupituus ja ε suhteellinen venymä. Ratkaisemalla yhtälö jousivakion suhteen, merkitsemällä osien alkupituuksia l_1 , l_2 ja l_3 sekä valitsemalla positiiviseksi suunnaksi suunta moottorista pois päin, saadaan jousivakioiksi

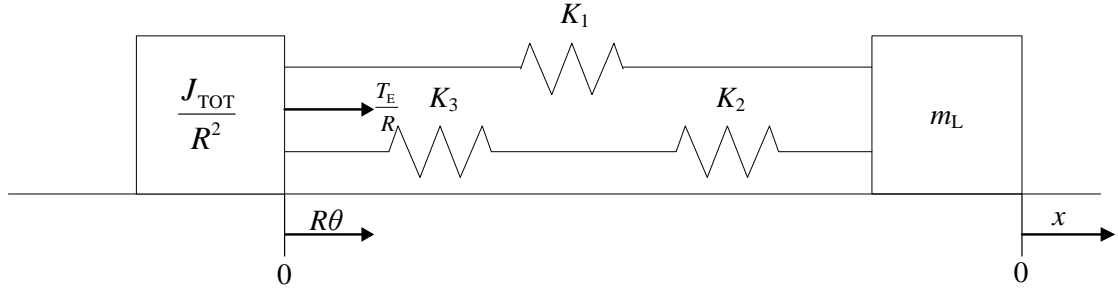
$$K_1(x) = \frac{F}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{l_1 + x}, \quad (4.5)$$

$$K_2(x) = \frac{F}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{l_2 - x}, \quad (4.6)$$

$$K_3 = \frac{F}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{l_3}. \quad (4.7)$$

Säätösuunnittelua varten esitetty malli on monimutkainen ja sitä yksinkertaistetaan jättämällä huomiotta vapaan pään dynamiikka (4.2), koska sen hitausmassa on selkeästi pienempi kuin moottorin ja kuorman aiheuttamat hitausmassat järjestelmässä. Lisäksi

liike hihnapyörien yli oletetaan lineaariseksi. Tällöin malli yksinkertaistuu kuvan 4.14 mukaiseksi kahden massan ja kolmen jousen systeemiksi. (Saarakkala 2008)



Kuva 4.14 Yksinkertaistettu kahdesta massasta ja kolmesta jousesta muodostuva hammashihnajärjestelmän malli. J_{TOT} on vetävään hihnapyörään vaikuttavien hitausmomenttien summa.

Kokonaishitausmassa on

$$J_{\text{TOT}} = J_{\text{P}} + J_{\text{M}} + J_{\text{k}} + J_0 + J_{\text{H}}l, \quad (4.8)$$

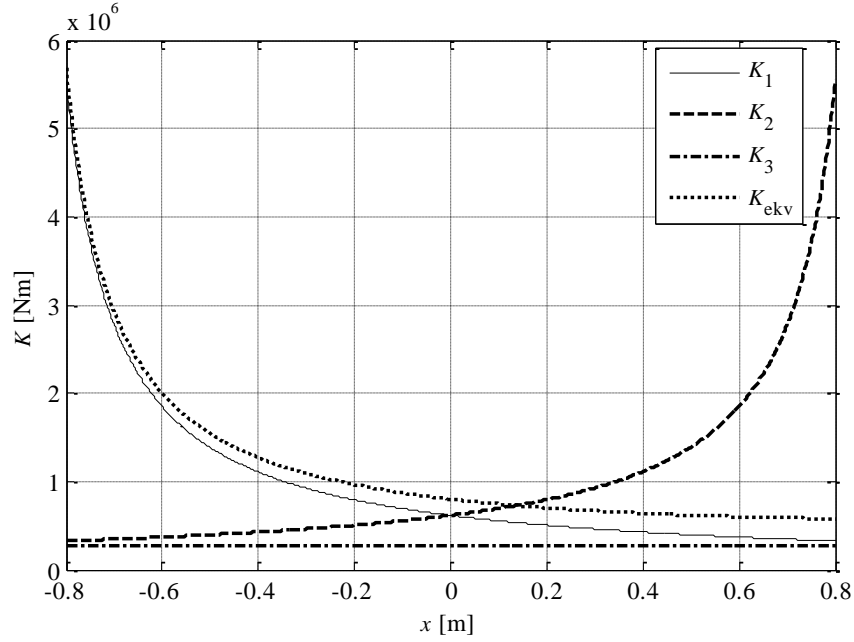
jossa J_{P} on hihnapyörän, J_{M} moottorin, J_{k} kytkimen, J_0 johteen valmistajan ilmoittama ylimääräinen pyörievien osien ja J_{H} työskentelyalueen pituudesta l riippuvainen hitausmassa. Arvot J_0 ja J_{H} ovat valmistajan ilmoittamat ja niiden arvot löytyvät liitteestä II.

Kuvan 4.14 mukaisessa mallissa jouset 2 ja 3 ovat sarjassa keskenään ja jousi 1 on näiden kahden jousen rinnalla. Tällöin kolmen jousen systeemin jousivakio voidaan kirjoittaa

$$K_{\text{ekv}}(x) = K_1(x) + \frac{1}{\frac{1}{K_2(x)} + \frac{1}{K_3(x)}} = K_1(x) + \frac{K_2(x) \cdot K_3(x)}{K_2(x) + K_3(x)}. \quad (4.9)$$

Hihnan kokonaispituus hihnapyörien välissä on $l = l_3 = 2,1$ m ja kelkan pituus $l_{\text{k}} = 0,3$ m, jolloin pituudet hihnan pituus kelkan ja hihnapyörän välillä vaihtelee välillä 0–1,8 m. Valitsemalla nollakohtaksi hihnan puoliväli ja hihnapyörien ollessa suojattuna kotelolla, jätetään päätyihin 0,1 m turva-alueet, saadaan paikka $x \in [-0,8; 0,8]$ m. Kelkan ollessa keskellä hihnojen pituudet ovat $l_1 = l_2 = 0,9$ m ja eri osien jousivakioiksi saadaan kelkan

paikan funktiona kuvan 4.15 mukaiset arvot. Jousivakio K_3 on paikasta riippumaton ja suuruudeltaan $2,64 \cdot 10^5$ N/m.



Kuva 4.15 Jousivakioiden arvot kelkan paikan funktiona, kun hihnan keskikohta on valittu pisteeksi 0 m ja johteen päihin on jätetty 10 cm turva-alueet.

Kuvasta 4.15 nähdään, että jousivakiolla K_1 on suurin vaikutus ekvivalenttiseen jousivakioon K_{ekv} ja ero näiden välillä kasvaa suuremmaksi, kun liikutaan poispäin moottorista. Esitetyillä yksinkertaistuksilla järjestelmän malliksi saadaan

$$J_{TOT}\ddot{\varphi}_1 + F_{rfl} = T_{ref} - RK_{ekv}(x)(R\varphi_1 - x), \quad (4.10)$$

$$m_L\ddot{x} + F_f = K_{ekv}(x)(R\varphi_1 - x). \quad (4.11)$$

Yhtälöiden (4.10) ja (4.11) perusteella järjestelmän siirtofunktio vääntömomenttireferenssistä kulmaksi φ_1 saadaan

$$\frac{\varphi_1}{T_{ref}}(s) = \frac{1}{(J_{TOT} + m_L R^2)s^2} \cdot \frac{m_L s^2 + K_{ekv}}{\frac{J_{TOT} m_L}{J_{TOT} + m_L R^2} s^2 + K_{ekv}}. \quad (4.12)$$

Siirtofunktion vääntömomenttireferenssistä kulmanopeuteen on vastaavasti

$$\frac{\omega_1}{T_{\text{ref}}}(s) = \frac{1}{(J_{\text{TOT}} + m_L R^2)s} \cdot \frac{m_L s^2 + K_{\text{ekv}}}{\frac{J_{\text{TOT}} m_L}{J_{\text{TOT}} + m_L R^2} s^2 + K_{\text{ekv}}}. \quad (4.13)$$

Hammashihnajohteella esiintyy myös venymistä, joka riippuu venyvän hihnan osuuden pituudesta eli hihnan pituudesta kelkan ja hihnapyörän välillä. Johteessa hihnan pituus päädyistä kelkkaan on välillä 0–1,8 m. Venymä voidaan laskea valmistajan antaman suhteellisen venymän, hihnaa vetävän voiman, asennuskireyden ja hihnan pituuden avulla yhtälöllä

$$\delta(l) = \varepsilon \frac{F_{\text{veto}} l}{F_{\text{asennus}}}. \quad (4.14)$$

Suurimmillaan venymä on, kun kelkkaa ajetaan suurimmalla sallitulla voimalla 610 N. Asennuskireys hihnalla on $F_{\text{asennus}} = 640$ N, ja valmistajan ilmoittama suhteellinen venymä suurimmalla sallitulla voimalla $\varepsilon = 0,11$ %. Näin ollen hihnan venymä, hihnan pituuden ollessa 0–1,8 m, on 0–1,9 mm.

Tämä venyminen voidaan havaita testijärjestelmässä, kun verrataan magneettinauha-anturin ja moottorin kulma-anturin antamia paikkatietoja. Laitteiston tarkkuuteen venymällä on heikentävä vaikutus, kun takaisinkytkentätietona säädössä käytetään moottorin anturin tietoa, jossa venymistä ei voi havaita. Työssä tavoitteena on kuitenkin tutkia synkronointia ja saada vähennettyä seurantavirhettä moottoreiden osalta, joten venymisen vaikutuksia ei tässä työssä pyritä kompensoimaan.

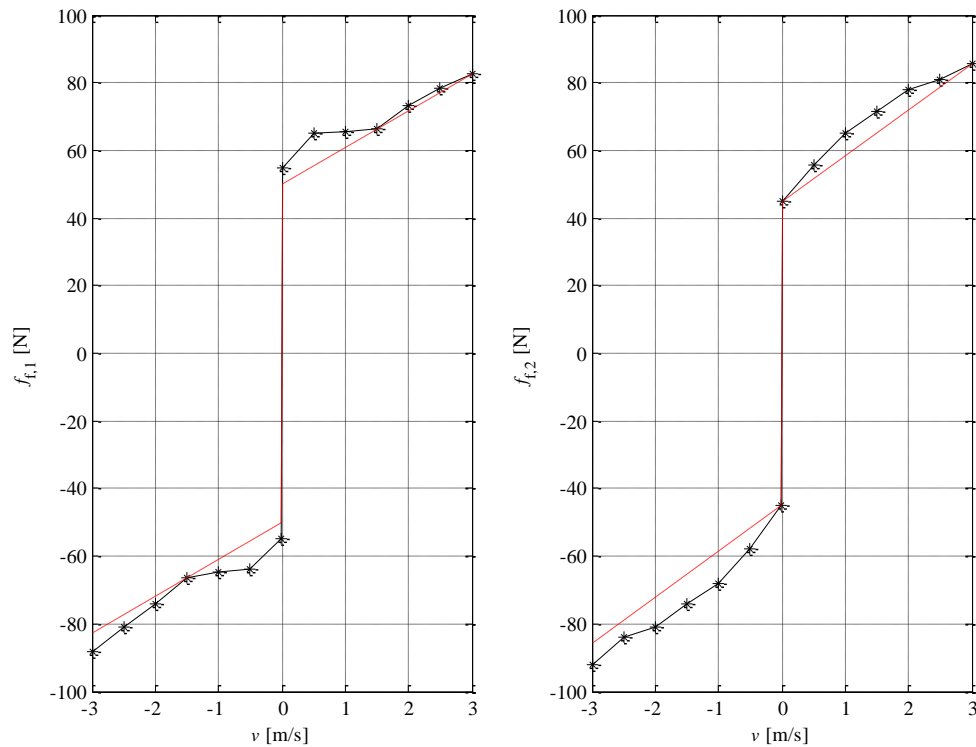
4.3 Johteiden liikekitkat

Johteiden liikekitkat ovat epälineaariset, mistä johtuvat suurimmat poikkeavuudet mallin ja todellisen laitteen välillä. Lisäksi kitka on johteilla paikkariippuvainen, mikä tuo lisää epätarkkuutta mallin ja todellisen järjestelmän välillä. Kitkavoimien suuruudet arvioidaan suorittamalla liikkeellelähtöjä johteiden kelkoilla mahdollisimman pienellä vääntömomentilla, kun molempien kelkkojen kuormitus on 18,3 kg. Tuloksien perusteella voidaan arvioida johteella vaikuttavan lepokitkan suuruutta. Liikekitkan määrittämiseksi molempia kelkkoja ajetaan vakionopeudella ja vääntömomentti mitataan. Ar-

viot johteen liikekitkan F_{vf} suuruudesta voidaan laskea vakionopeusalueen vääntömomentin keskiarvon ja hihnapyörän säteen avulla

$$F_{vf} = \frac{T_{\text{avg}}}{r}. \quad (4.15)$$

Aikaisemmin käytetyllä testilaitteistolla suoritettujen kitkamittausten aikana käytössä on ollut vain yksi moottori ja johteilla on ollut kuormana laitteiston muut akselit, joten yksilöllisiä tuloksia johteiden välillä ei ole selvitetty. Kitkamittausten tulokset ja mallissa käytetyt kitkamallit johteille on esitetty kuvassa 4.16.



Kuva 4.16 Johteiden kitkamittausten tulokset ja mallissa käytettävät kitkamallit. Vasemmalla johteen x_1 kitka ja oikealla johteen x_2 .

Kuvasta 4.16 nähdään, että johteen x_2 lepokitka on pienempi kuin johteella x_1 , mutta liikekitkakerroin suurempi, jolloin suuremmilla nopeuksilla kitkavoimat johteella x_2 ovat suuremmat. Kitkamallit on tehty kitkavoiman positiivisen liikesuunnan arvoilla, joka näkyy suurempana poikkeamana mallin ja mittausarvojen välillä negatiivisella nopeudella.

4.4 Paikka- ja nopeussäätimen virittäminen

Testilaitteiston liikkeenohjaus on toteutettu kuvan 1.2 mukaisella myötäkytketyllä paikkakaskadilla, jonka säätimen parametrit ovat viritetty QFT (*Quantitative Feedback Theory*) -menetelmällä. Säättösuunnittelumenetelmä ottaa huomioon mallissa esiintyvät parametrien vaihtelut ja epätarkkuudet suunniteltaessa yksinkertaista, alhaisen kertalu-
vun ja minimikaistanleveyden omaavaa säädintä. QFT-menetelmä on taajuustasoon perustuva menetelmä, joka käyttää mallin avoimen piirin siirtofunktiota ottaen eri parametrien vaihtelut huomioon säätimien virityksessä. Tarkemmin QFT-menetelmän soveltamisesta hammashihnajohteilla liikkuvan portaalirobotin säättösuunnitteluun käsittelee Markku Jokisen väitöskirja: *Centralized Motion Control of a Linear Tooth Belt Drive: Analysis of the Performance and Limitations* (Jokinen 2010).

Testilaitteistossa ja simulointimallissa käytettävät paikkasäätimet ovat P-tyyppisiä ja nopeussäätimet PID-tyyppisiä. Järjestelmän suuret massan vaihtelut ja jousivakioiden muuttumiset paikan funktiona aiheuttavat suuria muutoksia dynamiikassa, jolloin virittäminen on kompromissi haluttujen ominaisuuksien kesken. Vaihteluvälit eri parametreissa, jotka otetaan huomioon säätimien virityksessä, on esitetty taulukossa 4.3.

Taulukko 4.3 Säätimien virityksessä huomioituiden parametrien vaihteluvälit.

parametri	arvo
J [kgm ²]	0.0016–0.004
m_L [kg]	5–30
K_{ekv} [N/m]	$4 \cdot 10^5$ – $5 \cdot 10^6$

Lisäksi järjestelmään on huomioitu viivettä takaisinkytkentään $\tau_{FB} = 300 \mu\text{s}$ ja vääntömomenttisäätö on kuvattu viiveellä $\tau_I = 200 \mu\text{s}$. Viiveet ovat mallinnettu järjestelmään käyttäen Padén approksimaatiota

$$\tau(s) \approx e^{-\tau_d s} \approx \frac{-\frac{\tau_d}{2}s + 1}{\frac{\tau_d}{2}s + 1}, \quad (4.16)$$

jossa τ_d on mallinnettava viive sekunteina. Käytettävän PID-tyyppisen nopeussäätimen siirtofunktio on

$$C_{\text{vel}}(s) = P_{\text{vel}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{i,vel}}s} + \frac{P_{\text{der}}s}{T_{\text{der}}s + 1} \right). \quad (4.17)$$

QFT-menetelmän tuottamat arvot säätimille edellä esitetyillä parametrien vaihteluilla ja epävarmuuksilla on esitetty taulukossa 4.4.

Taulukko 4.4 Säätimien parametrit.

parametri	arvo
paikkasäätimen vahvistus P_{pos} [1/s]	55
nopeussäätimen vahvistus P_{vel} [1/s]	1,1288
nopeussäätimen integrointi-aika $T_{\text{i,vel}}$ [s]	0,0037
derivoinnin vahvistus P_{der} [1/s]	0,000324
derivointi-aika T_{der} [s]	$7,4 \cdot 10^{-5}$

Lisäksi nopeuden myötäktykennässä käytetään vahvistusta $P_{\text{ffv}}=1$ 1/s ja kiihtyvyyden myötäktykennän vahvistus on asetettu nolllaksi. Suuret vaihteluvälit parametreissa vaikuttaa siihen, että vahvistukset jäävät pieniksi ja nopeussäätimen derivoivan osan parametrit ovat niin pienet, että taajuusmuuttajan tarkkuus ei riitä, jonka vuoksi derivoivan osan arvot ovat asetettu mittauksissa ja simuloinneissa nollliksi.

4.5 Kompensaattorin vaikutus järjestelmään

Tutkitaan kompensaattorin vaikutusta akselin toimintaan muodostamalla siirtofunktiot kiertymäkulman ja kulmareferenssin välille. Käytettäessä kaskadirakennetta muodostetaan ensin nopeussäätimen ja järjestelmän välinen siirtofunktio kulmanopeuden ja kulmanopeusreferenssin välille

$$G_v(s) = \frac{\omega_{\text{act}}(s)}{\omega_{\text{ref}}(s)} = \frac{C_{\text{vel}}(s)\tau_I(s)G_x(s)}{1 + C_{\text{vel}}(s)\tau_I(s)G_x(s)}, \quad (4.18)$$

jossa $C_{\text{vel}}(s)$ on nopeussäätimen siirtofunktio, $\tau_I(s)$ on vääntömomenttisäätimen siirtofunktio, jota kuvataan viiveellä ja $G_x(s)$ on johteen siirtofunktio vääntömomenttireferenssistä kulmanopeuteen, joka on esitetty yhtälössä (4.13). Siirtofunktio kulmareferenssistä kiertymäkulmaan on johdettu liitteessä III ja lopulliseksi siirtofunktioksi akselille x_1 saadaan

$$\frac{\varphi_{\text{act},1}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,1}(s)(s + C_p(s) + P_t) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}, \quad (4.19)$$

jossa $G_{v,1}(s)$ on akselin x_1 siirtofunktio kulmanopeusreferenssistä kulmanopeuteen ja $G_{v,2}(s)$ vastaava siirtofunktio akselille x_2 , $C_p(s)$ on paikkasäätimen siirtofunktio, P_t ja P_c ovat kompensattorin vahvistukset. Siirtofunktiossa on oletettu, että referenssit akseleille on samat. Vastaava siirtofunktio akselille x_2 on

$$\frac{\varphi_{\text{act},2}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,2}(s)(s + C_p(s) + P_t) \left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}. \quad (4.20)$$

Kompensaattorin vaikutus kumpaankin akseliin on suurin, kun akseleiden välisessä dynamiikassa on suurin mahdollinen poikkeama, jos oletetaan että akseleiden säätimet ovat identtiset. Siirtoviiveen vaikutus tulee näkyviin siirtofunktiossa ristiin siirrettävän paikkatiedon mukana, jolloin siirtofunktioksi saadaan

$$\frac{\varphi_{\text{act},1}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,1}(s)(s + C_p(s) + P_t) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)\tau_r(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)\tau_r(s)}, \quad (4.21)$$

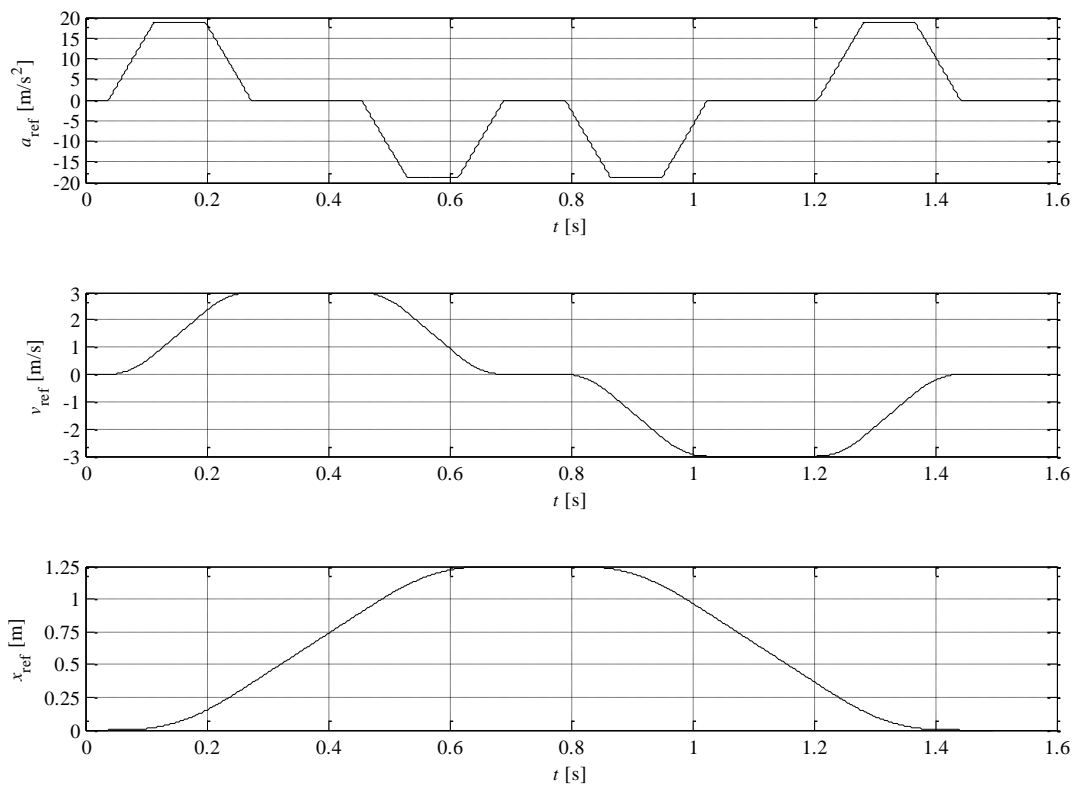
jossa $\tau_r(s)$ on siirtoviiveen siirtofunktio, joka on muodostettu yhtälössä (4.16) esitetyllä Padén approksimaatiolla. Siirtoviiveen vaikutus tulee akselin x_2 siirtofunktioon vastaavalla tavalla, joten sille saadaan

$$\frac{\varphi_{\text{act},2}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,2}(s)(s + C_p(s) + P_t) \left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)\tau_r(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right) \left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)\tau_r(s)}. \quad (4.22)$$

5 MITTAUSTULOKSET

Kappaleessa esitetään testilaitteiston avulla mitatut hajautetun järjestelmän isäntä- orjaohjauksen ja rinnan ohjauksen seuranta poikkeamat sekä verrattu niitä simulointituloksiin, joissa mallina on käytetty kappaleessa 4 esitettyä matemaattista mallia järjestelmästä. Simulointiympäristössä tarkastellaan myös kuvan 3.4 mukaisen kompensattorin vaikutusta synkronointimenetelmiin.

Mittauksissa kelkkojen kuormitusta vaihdellaan siten, että molemmilla kelkoilla on yhtä suuret kuormat, joiden suuruus on 18,3 kg, ja tilanteissa, joissa akselin x_1 kelkalla on 28,4 kg kuorma ja akselin x_2 kelkka on tyhjä. Käytetyt kuormitukset valittiin laboratorion löytyneiden sopivien metallikappaleiden perusteella. Lisäksi pyrittiin myös tilanteeseen, jossa yhdellä johteella on suurin sallittu valmistajan ilmoittama kuormitus, joka on 30 kg. Kuormituksia vaihdeltaessa pyritään saamaan esiin dynamiikan vaikutukset seurantavirheeseen ja toisaalta lähes identtisillä akseleilla saadaan esiin mahdolliset viiveet, jotka heikentävät synkroniajoa. Profiili, jota toistettiin jokaisessa mittauksessa, on kuvan 5.1 mukainen.



Kuva 5.1 Mittauksissa käytetyn profiilin kiihtyvyys-, nopeus- ja paikkareferenssit ajan funktiona.

Profiilin nollakohta on asetettu siten, että kelkan reuna on noin 20 cm johteen moottorin puoleisesta päädyistä. Käytetty kiihtyvyys on $18,75 \text{ m/s}^2$ ja kiihtyvyyttä on rajoitettu siten, että suurin sallittu kiihtyvyyden muutos on $\dot{a} = \pm 250 \text{ m/s}^3$. Ohje muodostetaan kenttäväylän isäntälaitteen puolella ja ainoastaan paikkareferenssi x_{ref} lähetetään taajuusmuuttajille.

Mittauksissa tarkastellaan kelkkoja ajavien moottoreiden kulmaeroa absoluuttiantureiden kulmatietojen erotuksena sekä kelkkojen paikkaeroa magneettinauha-antureiden paikkatietojen erotuksena

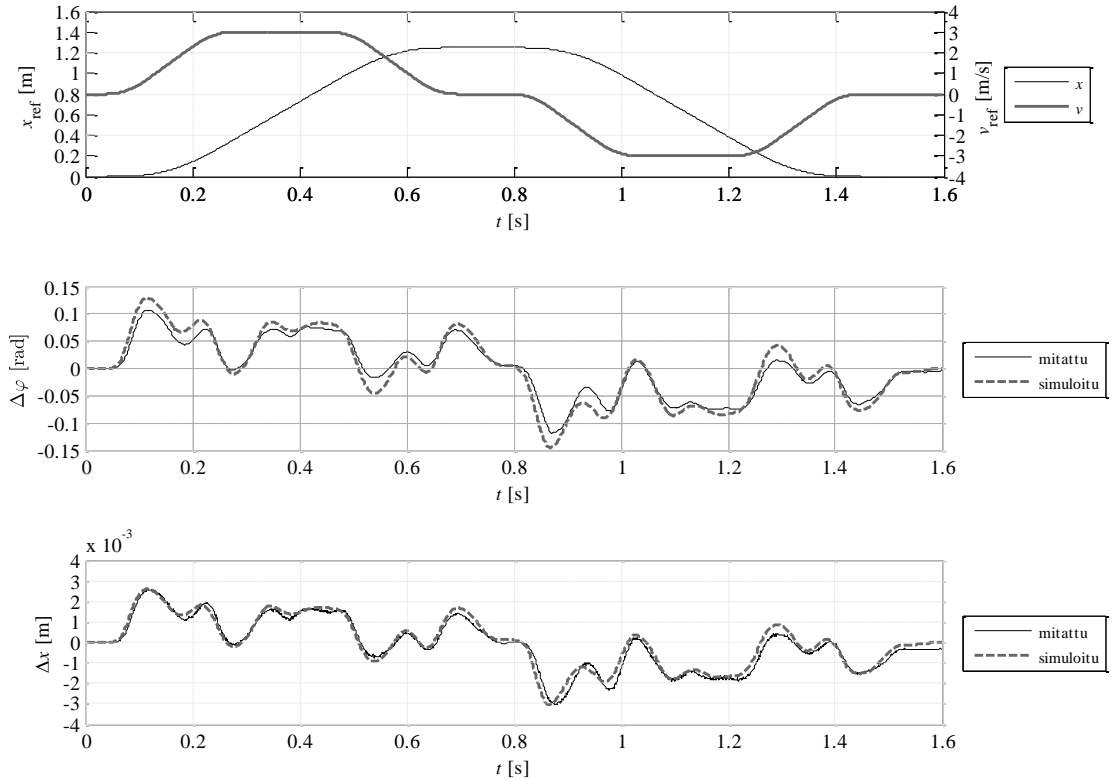
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (5.1)$$

$$\Delta x = x_1 - x_2. \quad (5.2)$$

Paikkatiedot mitataan sekä ACSM1:ten sisäisillä *dataloggereilla*, että kenttäväylän kautta TwinCAT:in *Scope View* -ohjelmalla. Molemmilla laitteilla näytteistysaika on $500 \mu\text{s}$. Lisäksi tuloksissa esitetään kulmavirheet, joita taajuusmuuttajat käyttävät paikkasäätimen tulona, ja näistä arvoista lasketut kulmavirheet ohjelinjan suuntaisesti ja ohjelinjaa kohtisuorasti. Ohjelinjan suuntaa merkitään t:llä ja sitä kohtisuoraan olevaa suuntaa c:llä. Simulointitulokset ovat liitetty samoihin kuvaajiin, jotta erot mallin ja todellisen tilanteen välillä tulevat näkyviin.

5.1 Isäntä-orjamenetelmä

Isäntä-orjamenetelmässä akselin x_1 taajuusmuuttaja toimii isäntänä ja akselin x_2 taajuusmuuttaja orjana, joka saa isännän paikkatiedon taajuusmuuttajien välisen *drive-to-drive* -väylän kautta. Tämä tarkoittaa, että ohjelinja ei ole suora, vaan vääristyy isännän kulmavirheen mukana. Molemmat käytöt synkronoidaan kenttäväyläisännän signaalin mukaisesti ja isäntätaajuusmuuttaja saa ohjeensa kenttäväylältä. Kuvassa 6.2 on esitetty kelkkojen kulma- ja paikkaerot ajan funktiona, kun molemmilla kelkoilla on yhtä suuri kuormitus. Kuvaan on myös lisätty käytetyt paikka- ja nopeusprofiilit.

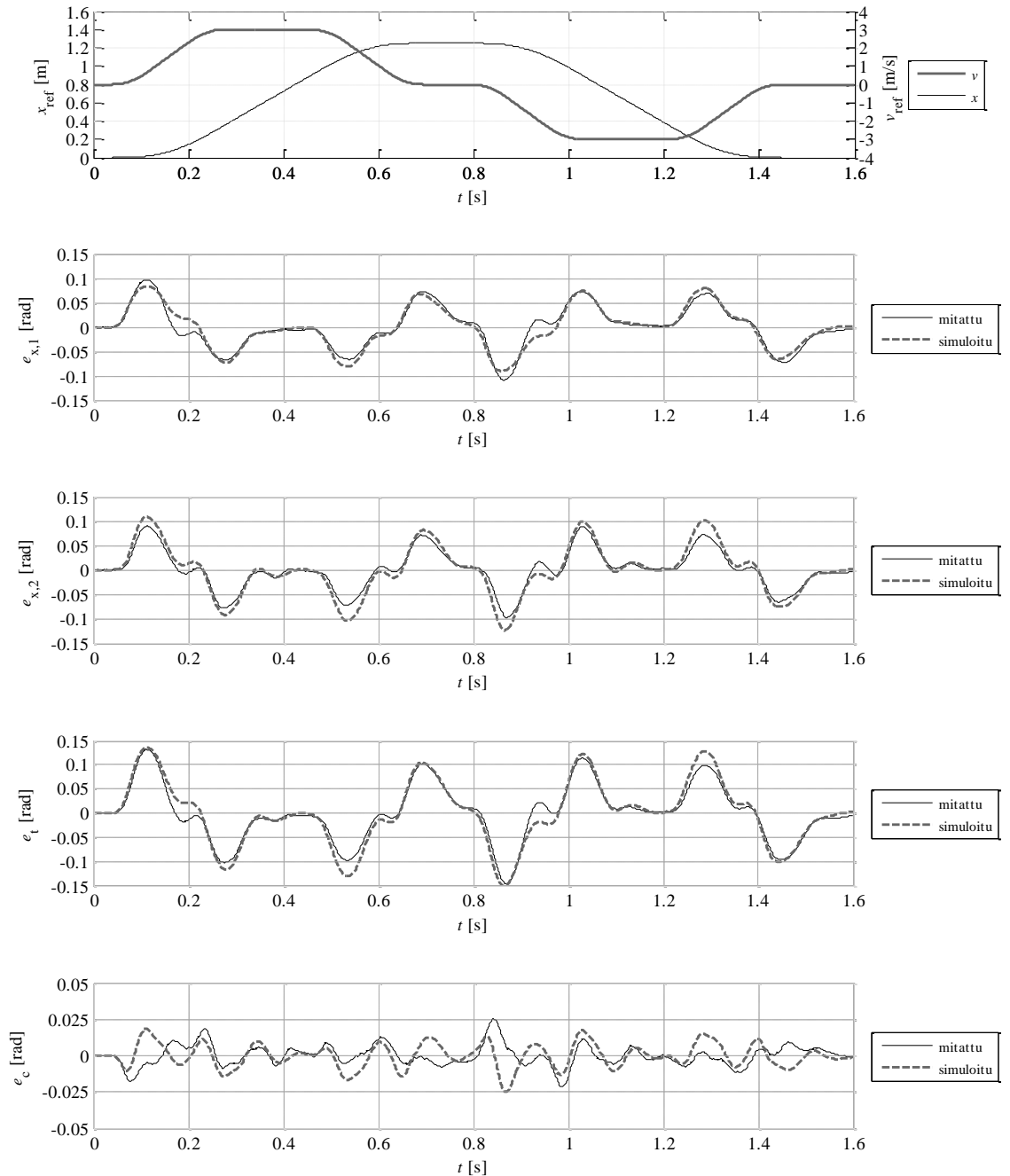


Kuva 5.2 Ylimpänä käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit, keskellä kelkkoja ajavien moottoreiden kulmaero ja alimpana kelkkojen välinen paikkaero ajan funktiona isäntä-orjamenetelmässä, kun kelkoilla on yhtä suuret kuormat.

Kuvan 5.2 keskimmaisesta ja alimmaisesta kuvaajasta nähdään, että suurimmat virheet kelkkojen välillä tulevat liikkeellelähdön ja alkukiihdytyksen aikana ja vakionopeudella ero tasaantuu arvoon 0,075 rad ja 1,5 mm. Vakionopeudella esiintyvä paikkaero johtuu pelkästään viiveestä, joka muodostuu, kun akselin x_1 takaisinkytkentätietoa käsitellään ja lähetetään akselin x_2 käytölle. Viiveen suuruus on mittaustulosten perusteella määritettävissä nopeuden ja paikkaeron avulla yhtälöllä

$$\tau_{d2d} = \frac{\Delta x}{v}. \quad (5.3)$$

Vakionopeuden ollessa 3 m/s saadaan viiveeksi taajuusmuuttajien välille 500 μ s. Tämä on *drive-to-drive*-väylän aikataso, joten todellinen viive väylällä on alle 500 μ s ja orja voi käyttää paikkatietoa ohjeenaan heti seuraavalla paikkasäätimen suorituksella. Paikkasäätimien käyttämät kulmavirheet sekä yhtälöllä (3.5) laskettu kulmavirheen t- ja c-suuntaiset komponentit ovat esitetty kuvassa 5.3.

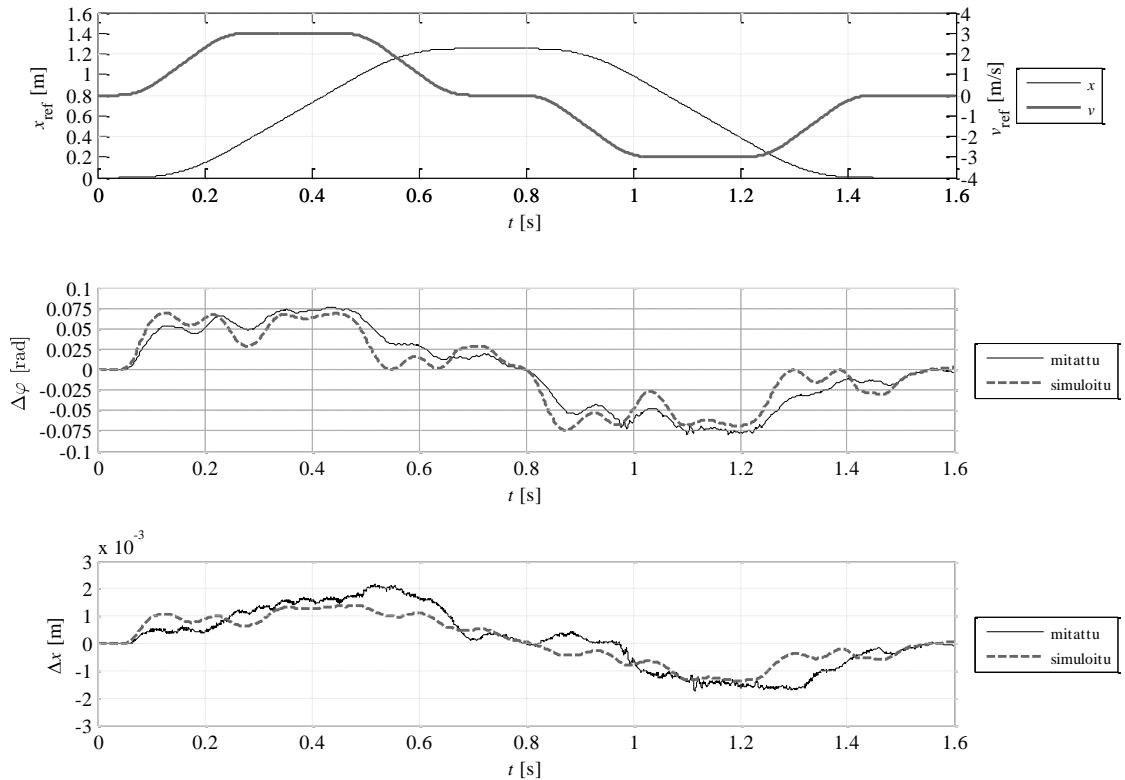


Kuva 5.3 Käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit sekä kulmavirheet x_1 -, x_2 -, t - ja c -suunnassa mitattuna ja simuloituna isäntä-orjamenetelmässä, kun molemmilla kelkoilla yhtä suuret kuormat. Kulmavirheiden x -akselin suuntaiset komponentit ovat paikkasäätimien tuloina ja t - ja c -suuntaiset komponentit laskettu yhtälöllä (3.5).

Kuvan 5.3 tuloksista nähdään, että molemmilla akseleilla kulmavirhe on lähes samansuuruinen. Mitattujen ja simuloitujen arvojen erot johtuvat todellisen järjestelmän mallintamattomista ominaisuuksista. Kuvaajissa on myös selkeästi näkyvissä kuinka kul-

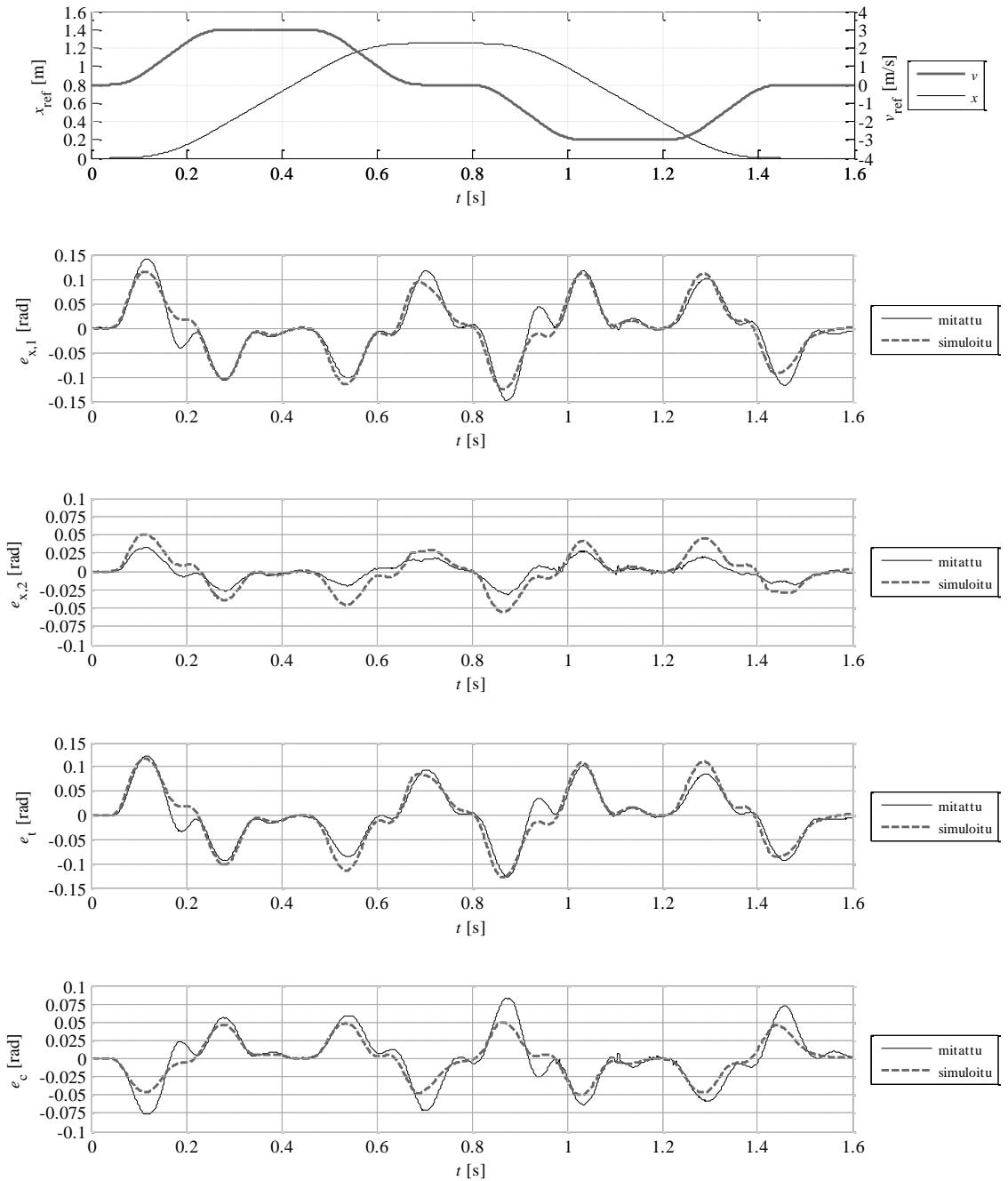
maero poistuu hitaasti profiilin jälkeen. Virhe e_c on pieni ja vaihtelee epämääräisesti referenssiin nähden toisin kuin t-suuntainen virhe, joka kasvaa aina, kun kiihdytetään.

Muuttamalla kelkoilla olevia massoja saadaan dynamiikkaan selkeä ero akseleiden välillä ja kuvassa 5.4 on esitetty tilanne, jossa massat ovat 28,4 kg ja 0 kg.



Kuva 5.4 Ylimpänä käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit. Keskellä kelkkoja ajavien moottoreiden kulmaero ja alimpana kelkkojen välinen paikkaero ajan funktiona mitattuna ja simuloituna isäntä-orjamenetelmässä, kun akselin x_1 kelkalla on kuormaa 28,4 kg ja akselin x_2 kelkka on kuormittamaton.

Kuvassa 5.4 näkyvä ero kulma- ja paikkaeron käyrien muodossa johtuu hihnan venymisestä, jota tapahtuu suuremmin kuormitetun isäntäakselin hihnassa paljon enemmän kuin kuormittamattoman orja-akselin hihnassa. Venyminen tulee esiin, kun kelkka on kaukana vetävästä hihnapyörästä eli kun jarrutetaan ensimmäisen kerran ja lähdetään liikkeelle kelkan ollessa paikassa 1,25 m. Kuvassa 5.5 on esitetty paikkasäädöissä käytetyt kulmavirheet ja niistä yhtälöllä (3.5) muodostetut virhetermien t- ja c-suuntaiset arvot.

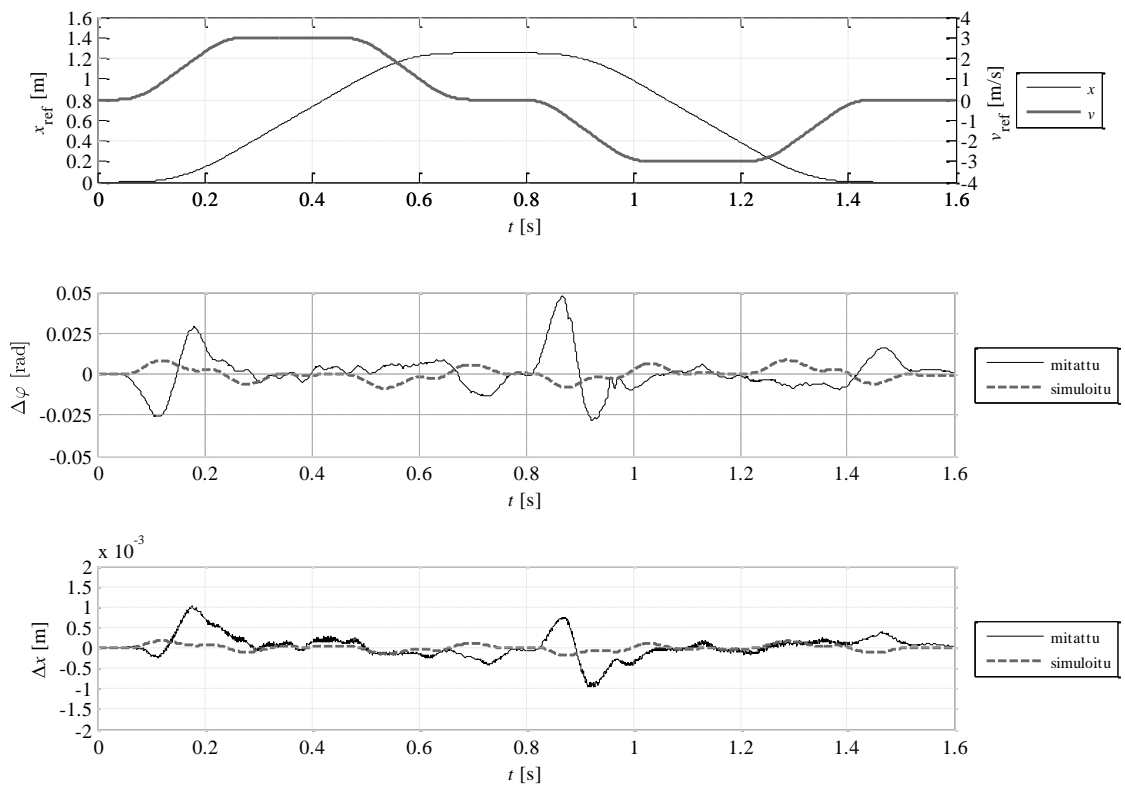


Kuva 5.5 Käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit sekä kulmavirheet x_1 -, x_2 -, t - ja c -tasossa mitattuna ja simuloituna isäntä-orjamenetelmässä, kun akselin x_1 kelkalla on kuormaa 28,4 kg ja akselin x_2 kelkka on kuormittamaton.

Akselilla x_1 kuorma lisää kulmavirhettä ja mittaustuloksissa kulmavirhe $e_{x,1}$ on yli viisinkertainen ilman kuormaa ajettavan akselin x_2 moottorin kulmavirheeseen $e_{x,2}$. Tämä suuri kulmavirheiden ero näkyy selkeästi myös virheessä e_c .

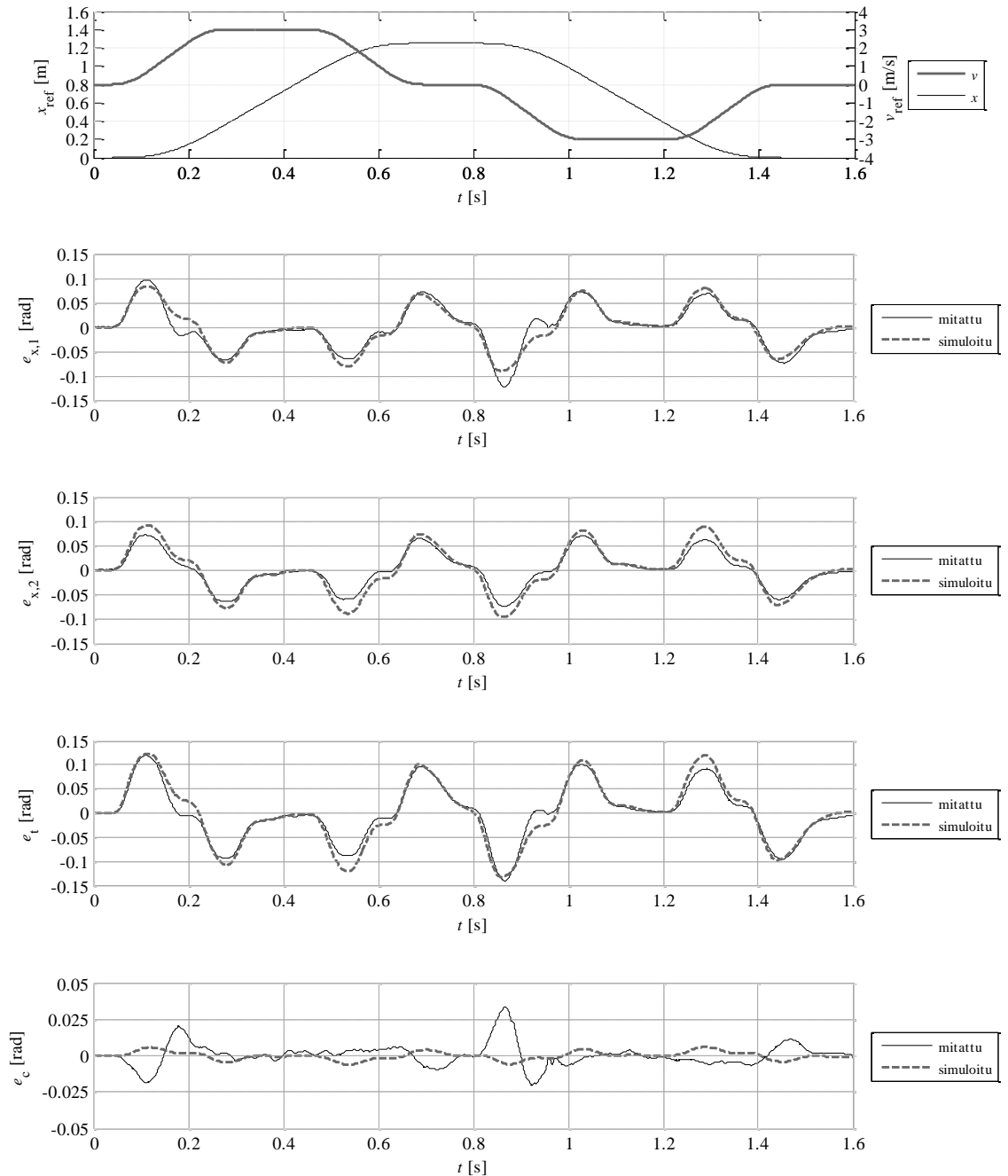
5.2 Rinnanohjaus

Rinnanohjauksessa molemmat käytöt saavat saman ohjeen samalla ajanhetkellä, jolloin eroa aiheuttavat kelkkojen välillä ainoastaan poikkeamat akseleiden dynamiikassa. Kuvassa 5.6 esitetään akseleita ajavien moottoreiden kulmaero ja kelkkojen paikkaero ajan funktiona tilanteessa, jossa johteiden kelkoilla on yhtä suuret kuormat (18,3 kg) ja synkronointi on suoritettu kenttäväylän signaaliin.



Kuva 5.6 Ylimpänä käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit, keskellä kelkkoja ajavien moottoreiden kulmaero ja alimpana kelkkojen välinen paikkaero ajan funktiona mitattuna ja simuloituna rinnan ohjattuna, kun kelkoilla yhtä suuret kuormat.

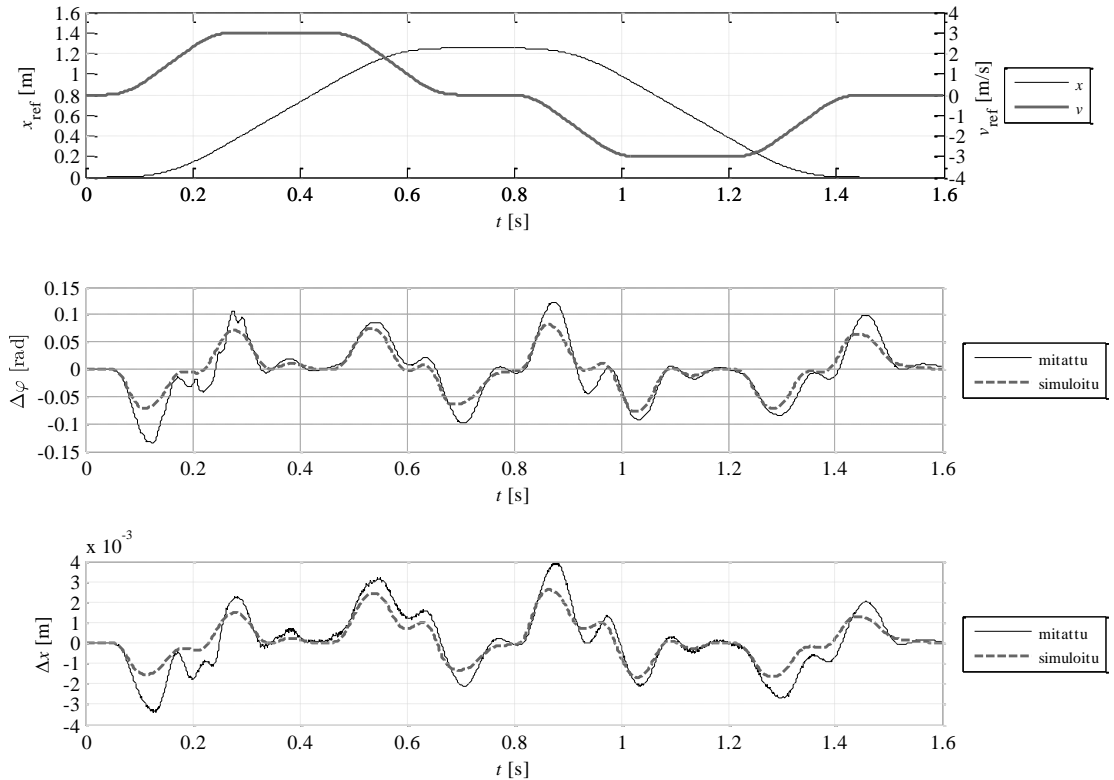
Kuvassa 5.6 näkyvät paikkaerot kelkkojen välillä mittauksissa ovat suurimmillaan liikkeellelähdössä. Akselin x_2 kelkka lähtee molempiin suuntiin selkeästi nopeammin liikkeelle, joka aiheuttaa selkeät piikit erityisesti kulmaeroon. Eroon liikkeellelähdössä vaikuttaa jonkin verran erilaiset lepokitkat ja eri tavalla nopeuden ja paikan suhteen muuttuvat kitkat akseleiden välillä. Liikkeellelähdyksen jälkeen paikkaero poistuu ja ero kelkkojen välillä on alle 0,5 mm. Pienet virheet syntyvät erilaisista kitkoista hihnojen välillä, jotka vaihtelevat paikan funktiona. Kuvassa 5.7 esitetään paikkasäätimien tuloina olevat kulmavirheet ja niiden avulla lasketut kulmavirheet t - ja c -suuntaan.



Kuva 5.7 Käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit sekä kulmavirheet x_1 -, x_2 -, t - ja c -suunnassa mitattuna ja simuloituna, kun molemmilla kelkoilla yhtä suuret kuormat ja samat ohjeet.

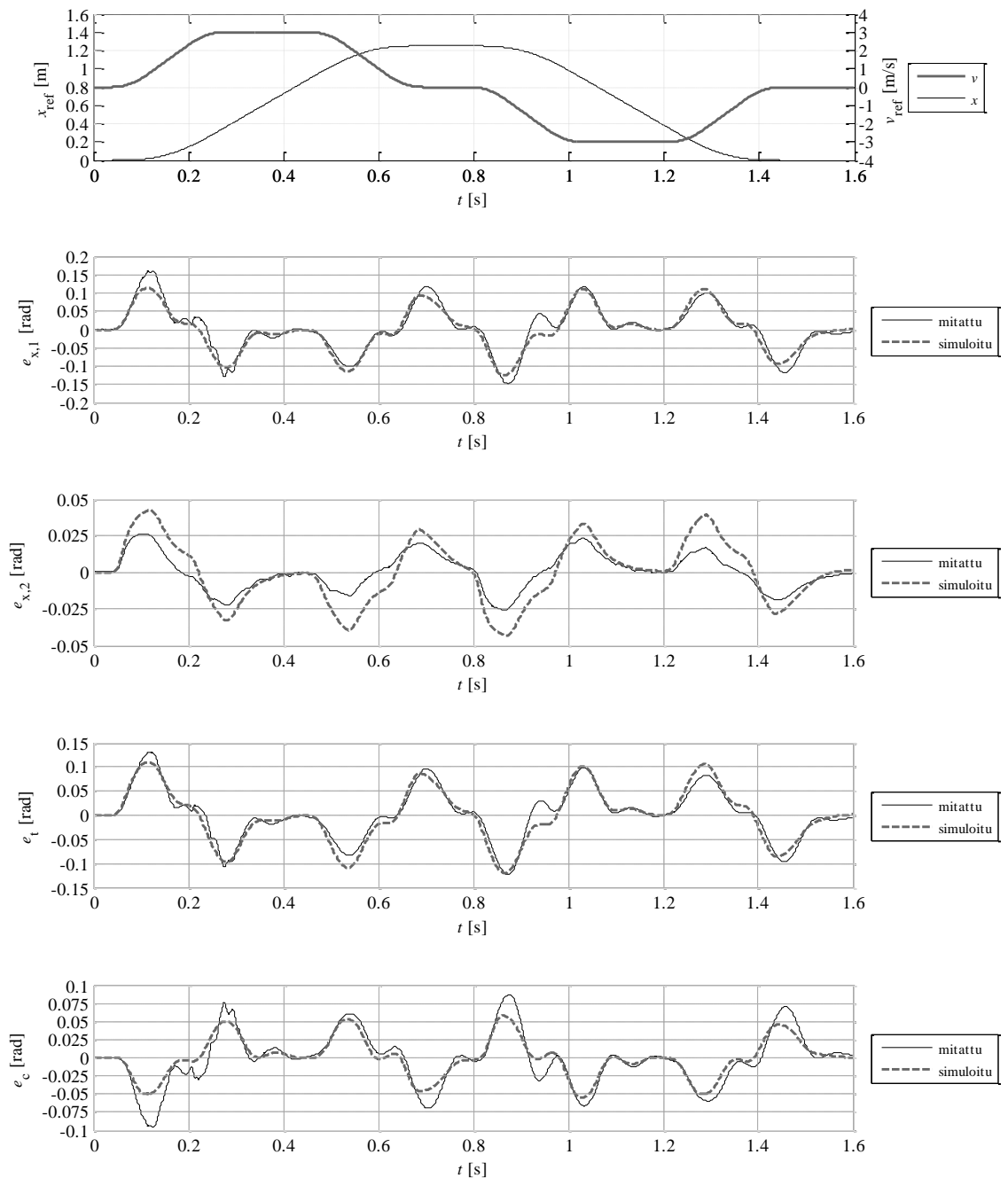
Kuvasta 5.7 nähdään, kuinka kulmavirhe akselilla x_1 on mitattuna suurempi kuin akselilla x_2 , joten kyseisen akselin kitkat ja muu dynamiikka aiheuttavat hieman suuremman kuormituksen kuin toisella akselilla on. Koska johteiden dynamiikka on lähes samanlainen ja säätimet ovat viritetty samanlaisiksi, pysyvät kelkat hyvin rinnakkain ja virhe e_c pienenä.

Muutettaessa akseleiden dynamiikkaa selkeästi toisistaan poikkeaviksi kuormittamalla johteen x_1 kelkkaa 28,4 kg kuormalla ja poistamalla johteen x_2 kelkan kuorma, saadaan kuvan 5.8 mukaiset tulokset moottoreiden kulmaeroksi ja kelkkojen paikkaeroksi.



Kuva 5.8 Ylimpänä käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit. Keskellä kelkkoja ajavien moottoreiden kulmaero ja alimpana kelkkojen välinen paikkaero ajan funktiona mitattuna ja simuloituna rinnan ohjauksessa, kun akselin x_1 kelkalla on kuormaa 28,4 kg ja akselin x_2 kelkka on kuormittamaton.

Dynamiikan muuttaminen aiheuttaa selkeät erot kulmien ja kelkkojen paikkojen välillä. Hihnan venyminen on myös nähtävissä kelkkojen välisessä paikkaerossa, kun kelkat ovat liikkuneet kauemmaksi alkupaikasta. Kuvassa 5.9 esitetään tilanteen kulmavirheet paikkasäätimille ja niiden avulla lasketut virheet t- ja c-suuntaan.



Kuva 5.9 Käytetyt paikka- ja nopeusreferenssit sekä kulmavirheet x_1 -, x_2 -, t - ja c -tasossa mitattuna ja simuloituna rinnan ohjauksessa, kun akselin x_1 kulkalla on kuormaa 28,4 kg ja akselin x_2 kulkalla on kuormittamaton.

Kuvassa 5.9 näkyy selkeästi kulkalla olevan kuorman vaikutus kulmavirheeseen, kuten se näkyy myös isäntä-orja ohjauksessa. Virhe e_c on tämän vuoksi selkeästi suurempi kuin tilanteessa, jossa akselien kuormitukset ovat yhtä suuret. Moottoreiden kulmaerossa ja kulkkojen paikkaerossa näkyvä pieni värähtely mittaustuloksissa tulee kuvan

5.9 tuloksien perusteella johteelta x_1 . Väriä ei ole kovin suuri ja poistuu heti vankionopeudella.

Rinnan ohjausta testattiin myös käyttäen taajuusmuuttajien välistä $d2d$ -väylää, jolloin akselin x_1 taajuusmuuttaja sai ohjeensa kenttäväylän välityksellä ja sama ohje välitettiin siitä akselin x_2 taajuusmuuttajalle. Tulokset tässä ohjauksessa jätetään esittämättä, koska ainoa paikkaero syntyi viiveen vaikutuksesta, kun akselin x_2 taajuusmuuttaja sai ohjeensa yhden syklin myöhemmin kuin akseli x_1 . Tämän viiveen kompensointi onnistui taajuusmuuttajassa suoraan, asettamalla akselin x_1 paikkasäätimen yhden syklin viive, jolloin molemmat taajuusmuuttajat suorittivat säätönsä samalla referenssillä yhtä aikaa ja tulokset vastasivat kuvien 5.6–5.9 tuloksia.

5.3 Seurantavirheen kompensointi

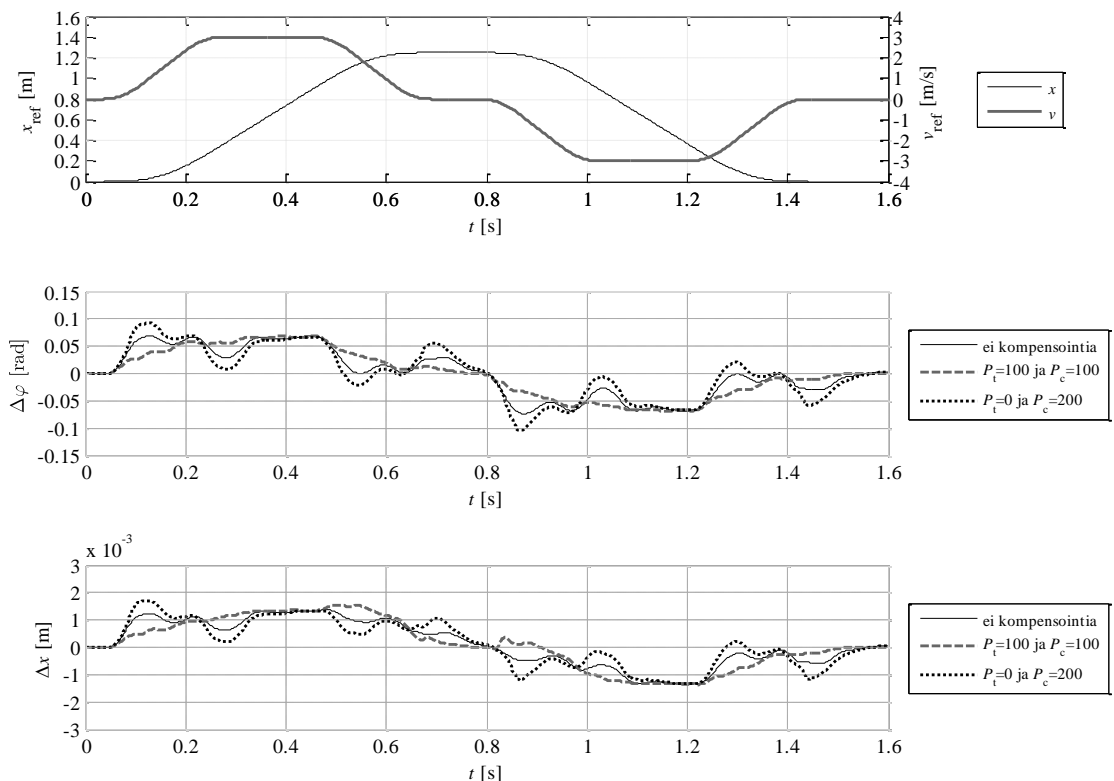
Kompensaattorin vaikutusta hajautettuun järjestelmään tutkitaan kuvan 3.4 mukaisella mallilla, jossa kulmavirheet lasketaan paikkasäädön yhteydessä ja lähetetään toiselle käytölle. Tällöin molempien paikkasäätimien rinnalla on oma paikkakompensaattori, joka saa oman akselin kulmavirheen suoraan ilman viivettä ja toisen akselin kulmavirheen viiveellisenä. Viive siirrettäessä kulmavirhettä suoraan taajuusmuuttajien välillä taajuusmuuttajien omalla $d2d$ -väylällä voi olla 0,5–1 ms riippuen toimintojen suoritusjärjestyksestä. Jos kulmavirhe lähetetään esimerkiksi synkronoimattoman kenttäväylän kautta, voi viive kasvaa useisiin millisekunteihin. Viiveet kenttäväyläympäristössä voivat syntyä erityisesti kommunikoinnissa taajuusmuuttajalta isäntälaitteelle ja isäntälaitteen kommunikoidessa takaisin taajuusmuuttajille. Jos käytettävä väylä on synkronoimaton, ei taajuusmuuttaja välttämättä palauta uusinta kulmatietoaan tai isäntälaitte voi lähettää kompensointiohjeen väärällä hetkellä ja taajuusmuuttaja suorittaa kompensoinnin käyttäen vanhaa ohjetta.

Kompensointia tutkitaan sekä isäntä-orjamenetelmään ja rinnan ohjaukseen, kun akselien dynamiikat ovat selkeästi erilaiset eli kuorma akselin x_1 kolkalla on 28,4 kg ja akselin x_2 kolkalla 0 kg. Näin suurta dynaamista eroa ei todellinen järjestelmä saa, mutta tavoitteena on simuloida kompensaattorin vaikutusta, kun seurantavirhe on suurimmillaan. Lisäksi simulointiympäristössä tutkitaan kompensoinnin vaikutusta tilanteessa, jossa akselilla x_1 oleva kuorma poistuu ja palautuu askelmaisesti.

Kompensaattorin tuottama korjaus nopeusohjeeseen vaikuttaa erityisesti kevyempään akseliin x_2 . Valitut vahvistukset eri viiveiden arvoilla valitaan tarkastelemalla siirtokäytännön (4.21) ja (4.22) napa-nolla-kuvaajia ja tarkastamalla, ettei järjestelmään tule kompensoinnin vuoksi epästabiileja napoja.

5.3.1 Kompensointi isäntä-orjamenetelmässä

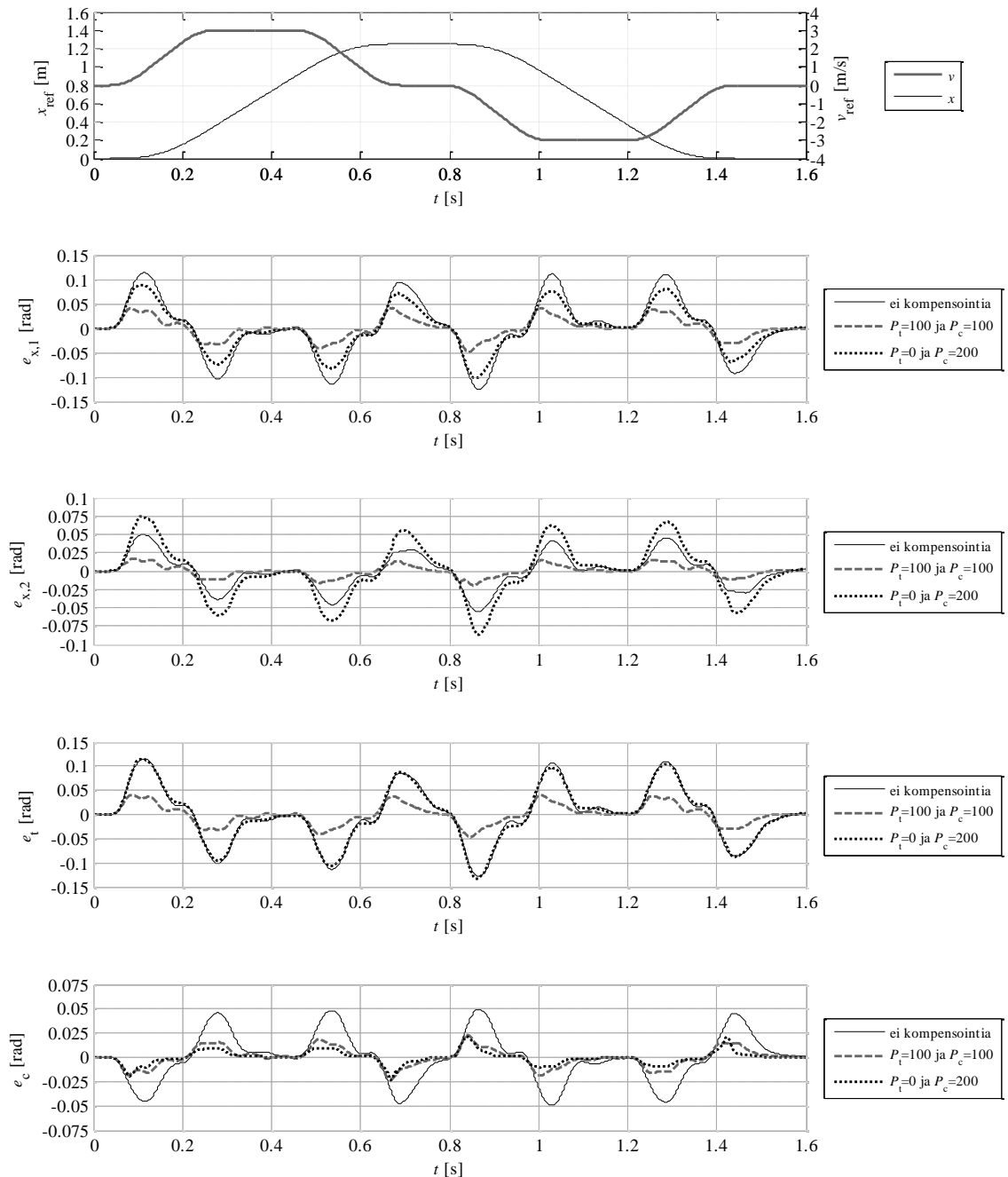
Kuvassa 5.10 esitetään kompensaattorin vaikutusta isäntä-orjamenetelmässä moottoreiden kulmaeroon ja kelkkojen väliseen paikkaeroon simuloitussa tilanteessa. Simuloinneissa t - ja c -suuntaiset kulmavirheet ovat laskettu matriisilla (3.10), vaikka orjalle tuleva ohjeen muutokset eivät ole yhtä suuria kuin isännän ohjeen muutokset, jolloin ohje-linja x_1x_2 -tasossa esitettyä ei ole suora. Myöskään akseleille esitetyt siirtokäytännöt eivät vastaa aiemmin esitettyä, koska tilanteessa ohjeena akselille x_2 on akselin x_1 kiertymäkulma ja siirtokäytännöksi akselille x_2 tulisi näin ollen akselin x_1 kiertymäkulmasta akselin x_2 kiertymäkulmaan $\varphi_{act,2}/\varphi_{act,1}$.



Kuva 5.10 Kompensaation vaikutus kulma- ja paikkaeroon isäntä-orjaohjauksessa eri kompensaattorin vahvistuksen arvoilla, kun viive paikkavirheen siirrossa $\tau_{tr} = 500 \mu s$.

Kuvan 5.10 tuloksista näkyy kuinka kompensoimalla virhettä sekä t - ja c -suunnassa kulma- ja paikkaerot menevät suoraan verrannollisiksi eli orjalle tulevan kulmaohjeen

viiveen vaikutus näkyy kulma- ja paikkaerossa. Kompensoimalla pelkästään c-suunnan virhettä näkyy eroarvoissa suuremmat muutokset kiihdytysten ja jarrutusten aikana. Kuvassa 5.11 esitetään, kuinka kompensointi vaikuttaa kulmavirheisiin ja niiden perusteella laskettuihin virheisiin t- ja c-suuntiin.

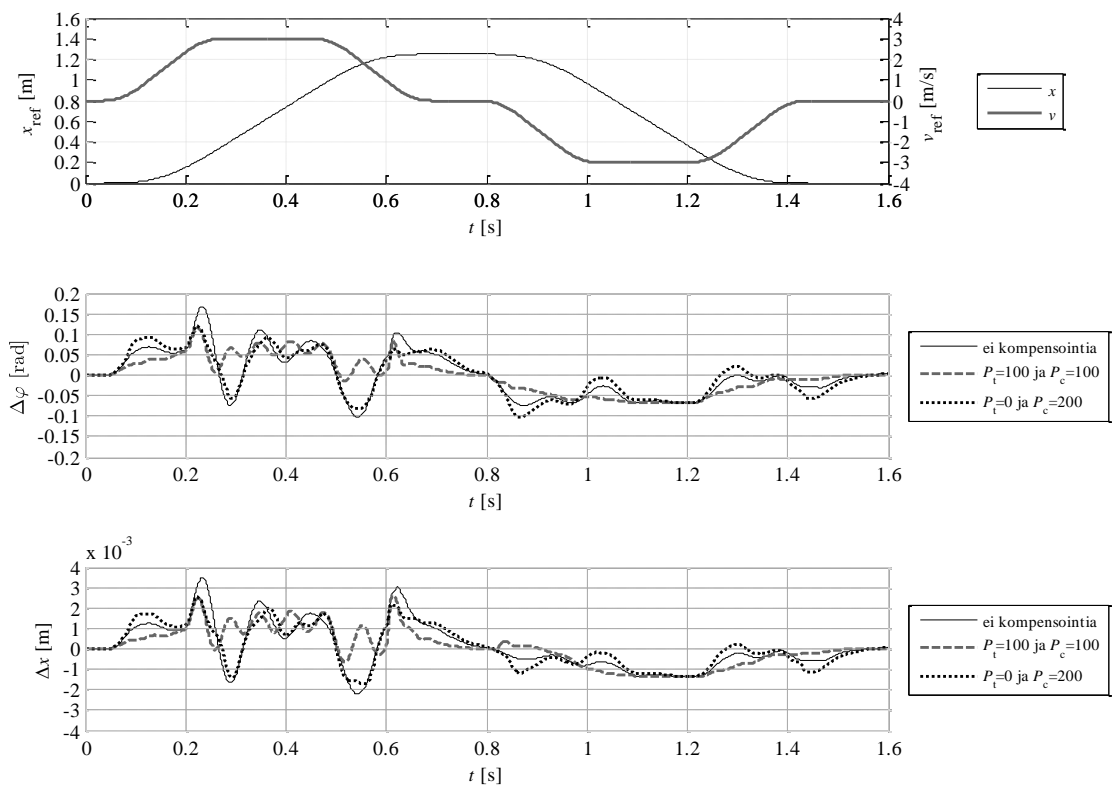


Kuva 5.11 Kompensaattorin vaikutus kulmavirheisiin isäntä-orjamenetelmässä eri kompensoinnin vahvistuksen arvoilla, kun viive kulmavirheen siirrossa $\tau_{tr} = 500 \mu\text{s}$.

Kuvan 5.11 virhetermit pienenevät kaikki selkeästi kompensoinnin vaikutuksesta erityisesti, kun kompensoidaan molempia virhetermejä. Kompensointi poistaa akseleiden

dynaamisen eron tehokkaasti, ja kulmaero moottoreissa johtuu ainoastaan viiveestä, kun isännän kulmatieto siirretään orjalle. Isäntä-orjaohjauksessa tarkoituksena on yleensä saada orja seuraamaan täysin isännän paikkaa, jolloin pitäisi pyrkiä saamaan virhetermi $e_{x,2}$ mahdollisimman pieneksi. Pienimmäksi virhe tulee, kun kompensattorilla kompensoidaan sekä t- että c-suunnan kulmavirheitä.

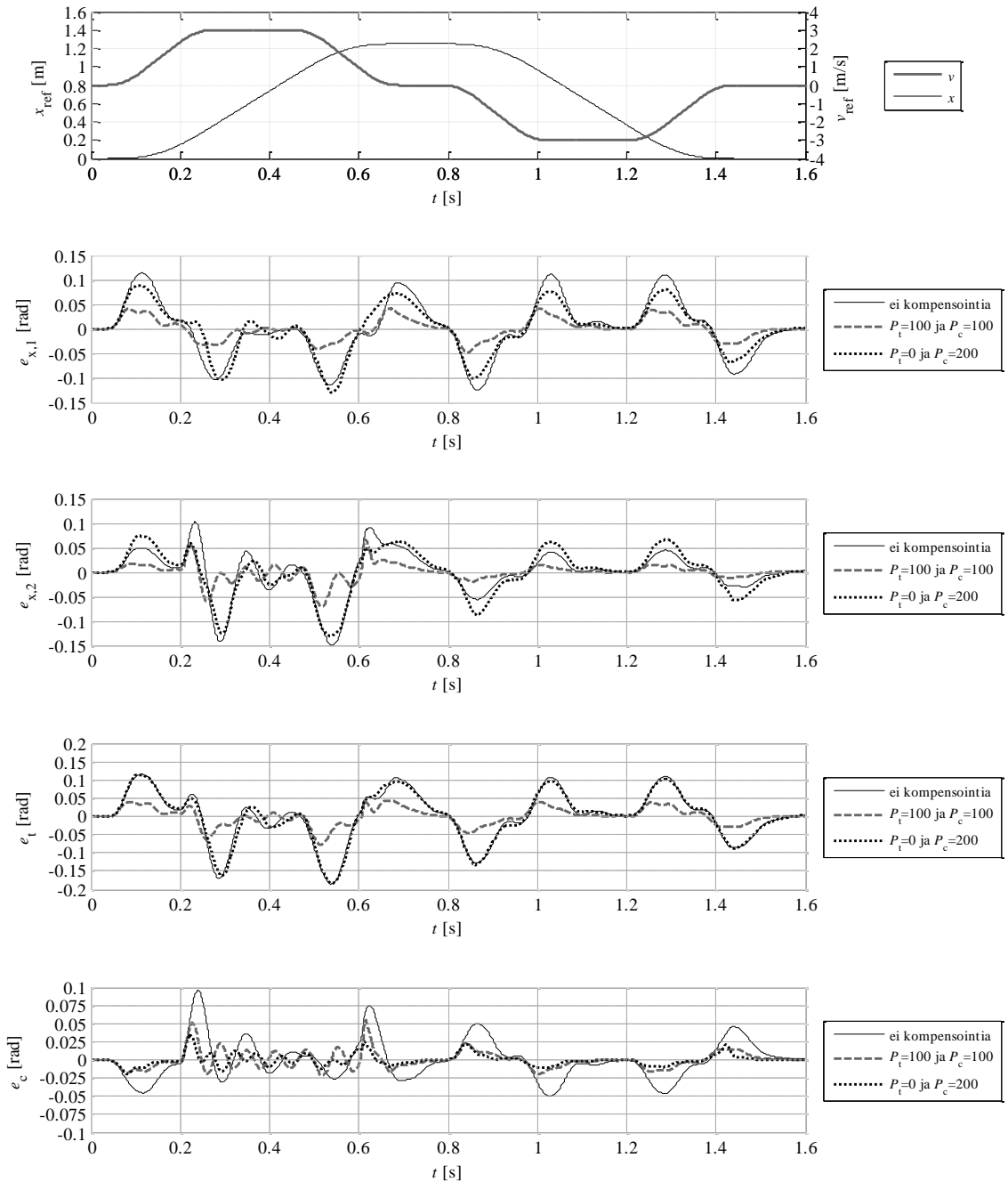
Kompensaattorin toimintaa äkillisissä dynaamisissa muutoksissa simuloidaan tuomalla orjalle kuorma kiihdytyksen aikana askelmaisesti. Kuorman suuruus on sama kuin akselilla x_1 oleva massa eli 28,4 kg ja kuorma poistuu jarrutuksen aikana askelmaisesti. Kuorma tuodaan orja-akselille, koska siellä tapahtuvat muutokset eivät ilman kompensattoria näy koskaan isäntäakselin puolella. Kuormaiskun vaikutus kulma- ja paikkaeroon on esitetty kuvassa 5.12



Kuva 5.12 Kuormaiskun vaikutus isäntä-orjamenetelmässä kulma- ja paikkaeroon kompensoimattomassa ja kompensoidussa tilanteessa. Orjalle eli akselille x_2 kuorma tulee ajan hetkellä 0,2 s ja kuorma poistuu ajan hetkellä 0,6 s.

Kuvasta 5.12 nähdään, että akselille x_2 tuleva äkillinen kuormitus saa kulma- ja paikkaeroon suuren vaihtelun ilman kompensattoria toimivassa järjestelmässä. Kompensaattorin avulla muutokset kuormituksen muutostilanteissa jäävät varsin vähäisiksi. Kuvassa

5.13 esitetään tilanteen vaikutus akselien kulmavirheisiin ja virheisiin t- ja c-suunnissa.

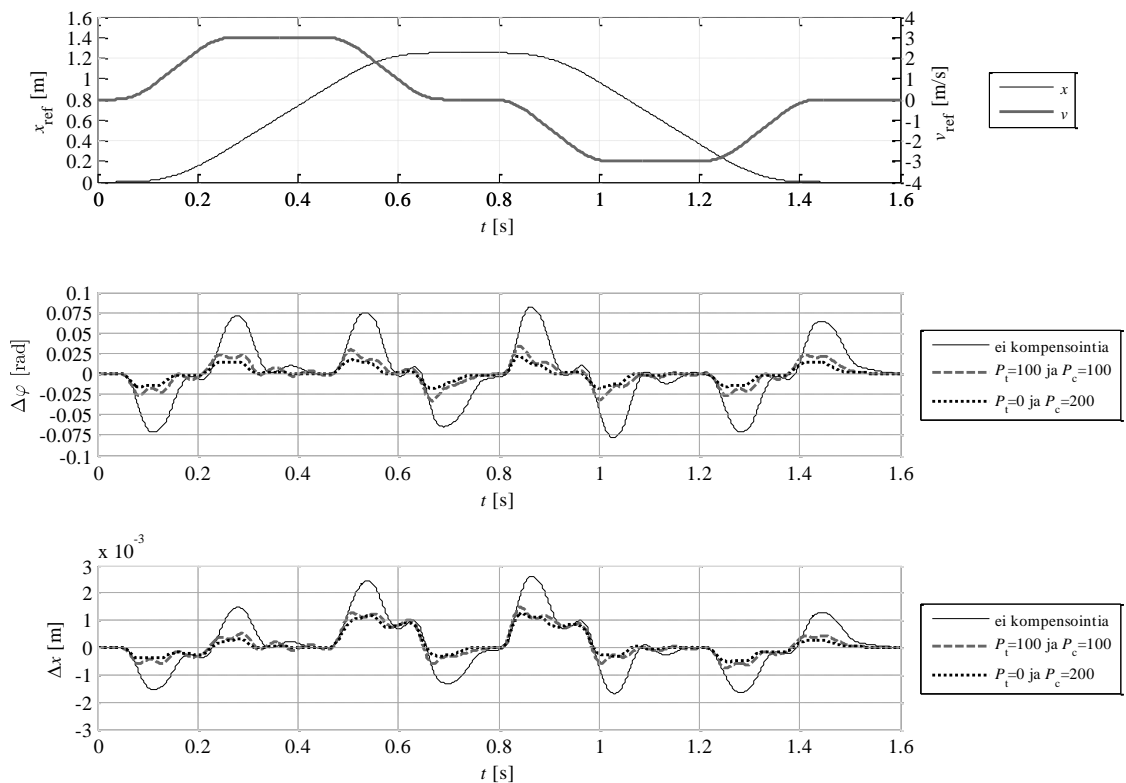


Kuva 5.13 Kuormaiskun vaikutus isäntä-orjamenetelmässä kulmavirheisiin kompensoimattomassa ja kompensoiduissa tilanteessa.

Orjan akselilla kuormaisu aiheuttaa selkeää värähtelyä, joka näkyy myös selkeästi virhetermissä e_c . Kuten edellisissäkin tuloksissa, joissa akselille x_2 ei tullut kuormaiskuja, pysyy virhe $e_{x,2}$ pienimpänä tilanteessa, jossa kompensattori kompensoi sekä t- että c-suunnan kulmavirheitä.

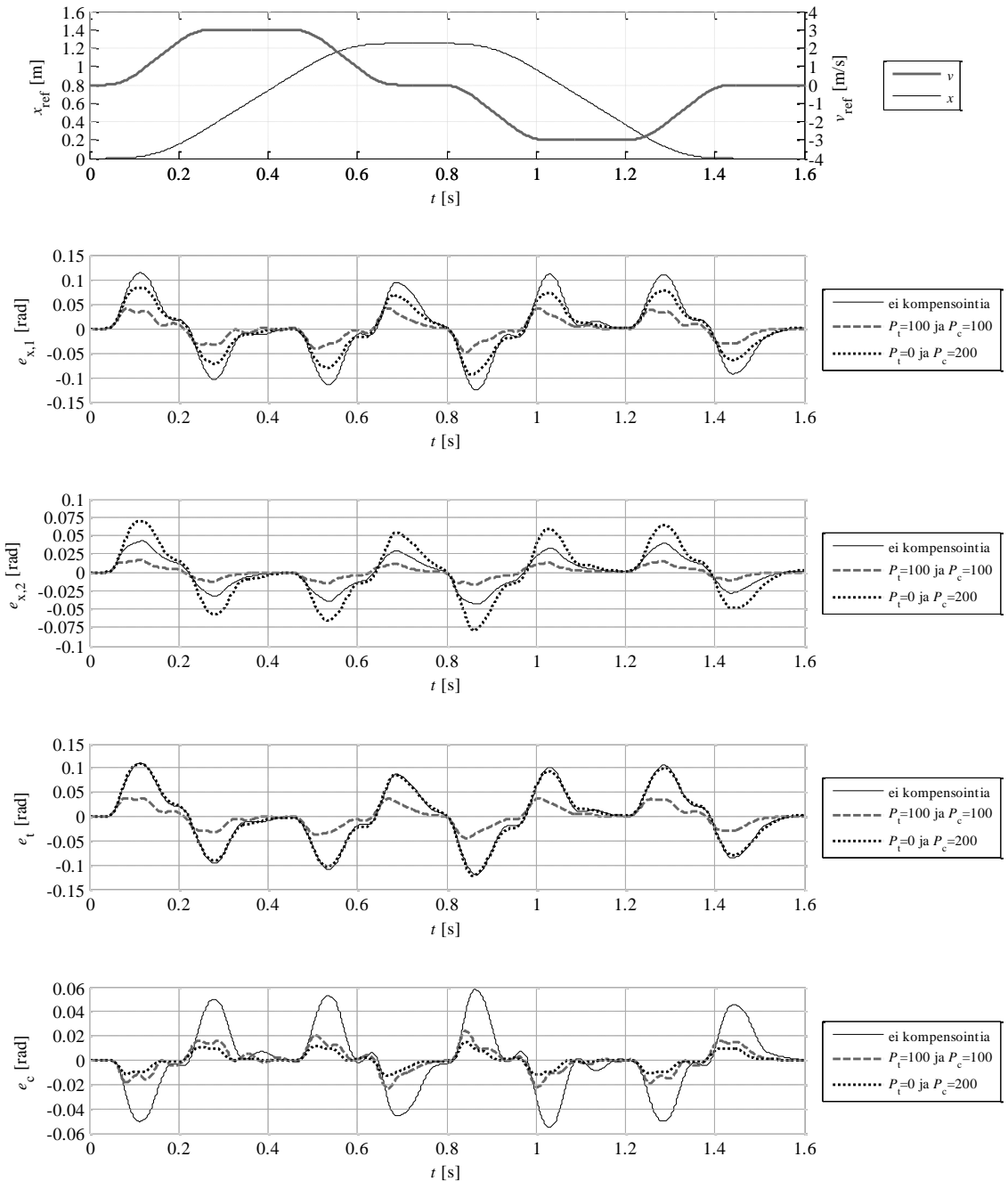
5.3.2 Kompensointi rinnanohjauksessa

Rinnan ohjauksessa kompensattorin vaikutusta synkronointiin simuloidaan eri vahvistuksen ja siirtoviiveen arvoilla. Kuvassa 5.14 esitetään kompensoinnin vaikutusta kulma- ja paikkaeroon eri kompensattorin vahvistuksen arvoilla. Ohjeen ja kulmatiedon siirtoviiveelle taajuusmuuttajien välillä on käytetty arvoa $500 \mu\text{s}$.



Kuva 5.14 Kompensattorin vaikutus kulma- ja paikkaeroon eri kompensattorin vahvistusten arvoilla, kun viive kulmavirheen siirrossa $\tau_{tr} = 500 \mu\text{s}$.

Kompensointi c-suuntaan parantaa selkeästi rinnan ohjauksen tulosta, joka näkyy erityisesti kulmaeron kuvaajissa. Käyttämällä myös t-suunnan kompensointia saadaan eroa vähennettyä, mutta c-suunnan vahvistusta joudutaan pienentämään, jotta järjestelmä pysyy stabiilina. Kelkkojen välinen paikkaero muuttuu eri tavalla kuin kulmaero hammashinnan venymän vuoksi ja venymän vaikutus on nähtävistä ensimmäisen jarrutuksen ja toisen kiihdytyksen aikana eli kun kelkat ovat liikkuneet mahdollisimman kauas alkupisteestä. Kuvassa 5.15 esitetään kompensoinnin vaikutus kulmavirheisiin.



Kuva 5.15 Kompensaattorin vaikutus kulmavirheisiin rinnan ohjauksessa eri c -suunnan vahvistuksen arvoilla, kun viive kulmavirheen siirrosta $\tau_{tr} = 500 \mu\text{s}$.

Kompensaattorin vaikutus näkyy selkeästi kummankin akselin omassa kulmavirheessä. Kompensoimalla sekä t - että c -suuntaista virhettä, pienenee kummankin akselin oma kulmavirhe selkeästi. Vastaavasti, kun kompensaattori vaikuttaa vain c -suuntaiseen komponenttiin, kasvaa kevyemmin kuormitetun akselin x_2 kulmavirhe lähemmäksi akselin x_1 kulmavirhettä, jolloin virhe e_c pienenee selkeästi. Kompensaattorin P_t vahvistuksen ollessa 0 ei virhe e_t merkittävästi muutu tilanteiden välillä. Taulukossa 5.1 on

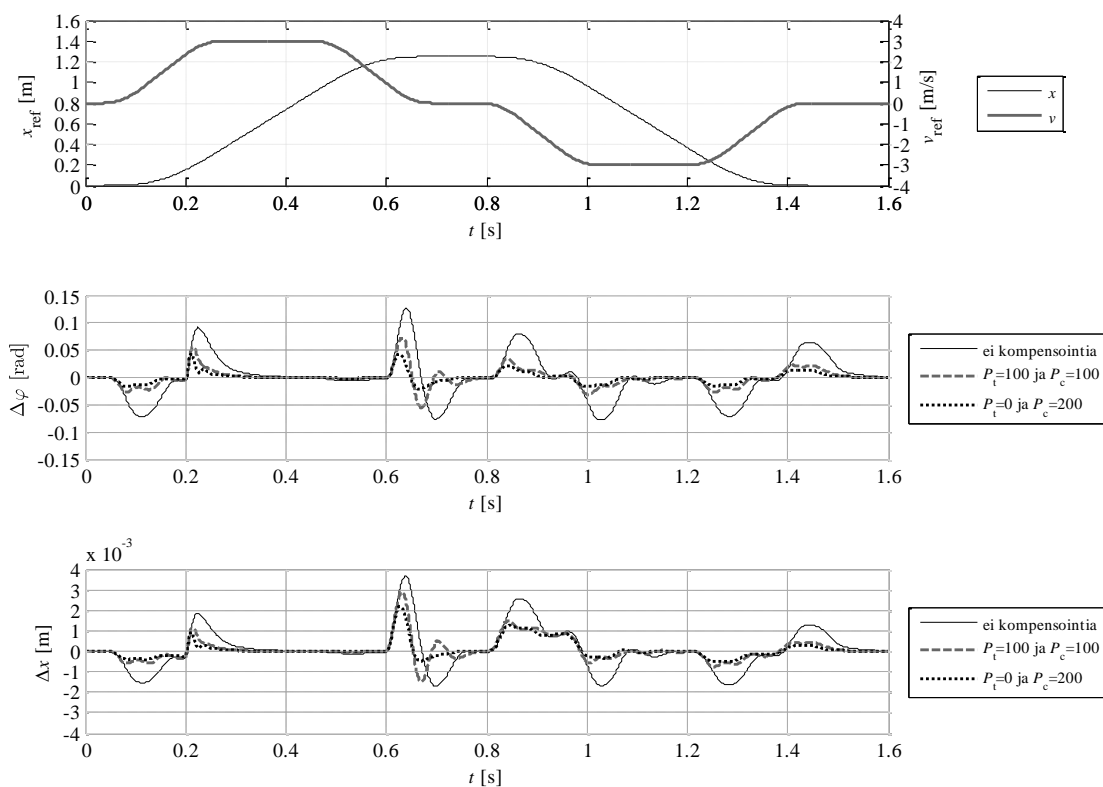
esitetty vielä kompensattorin vaikutus laskennallisesti integroimalla kulmaero ja esit-
tämällä kulmaeron suurin arvo. Arvot ovat lisäksi esitetty suhteellisenä arvona kompen-
soimattomaan tulokseen.

Taulukko 5.1 Kulmaeron itseisarvon integraali ja suurin arvo rinnanohjauksessa eri kompensattorin
parametreilla.

P_t [1/s]	P_c [1/s]	τ_{tr} [ms]	$\int \Delta\varphi dt$	$\frac{\int \Delta\varphi dt}{\int \Delta\varphi_{no\ comp} dt}$	$ \Delta\varphi _{max}$ [rad]	$\frac{ \Delta\varphi _{max}}{ \Delta\varphi_{no\ comp} _{max}}$
0	0	0	$8,60 \cdot 10^{-2}$	1	$8,22 \cdot 10^{-2}$	1
100	100	0,5	$3,21 \cdot 10^{-2}$	0,37	$3,38 \cdot 10^{-2}$	0,41
0	200	0,5	$1,90 \cdot 10^{-2}$	0,22	$2,17 \cdot 10^{-2}$	0,26

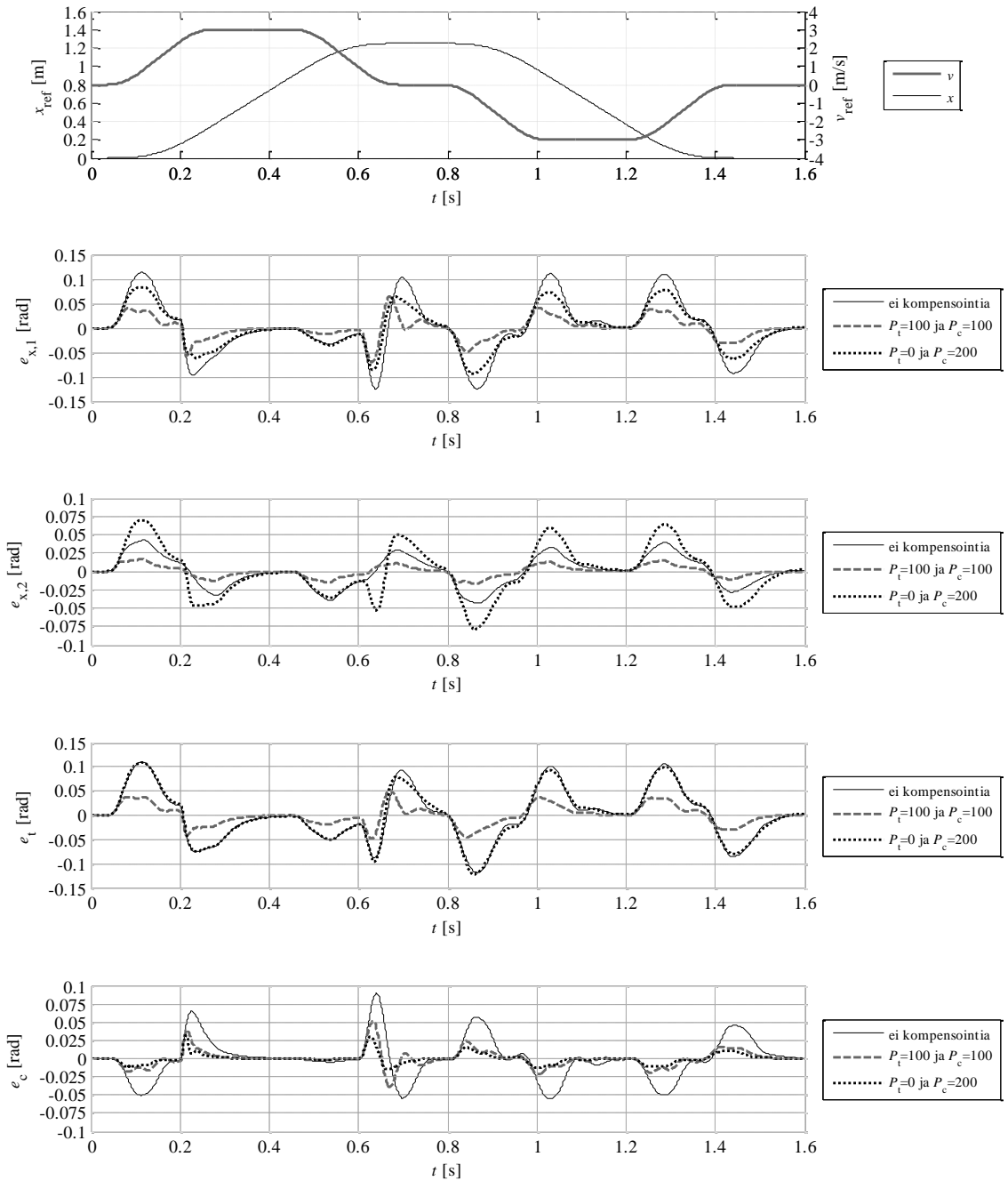
Taulukosta 5.1 nähdään, että kompensattori pienentää merkittävästi sekä eron akseleita
ajavien moottoreiden kulmien välillä ja eron suurimman arvon, mikä oli nähtävissä jo
kuvissa 5.14–5.15.

Kompensaattorin toimintaa äkillisissä dynamiikan muutostilanteissa simuloidaan tilan-
teella, jossa akselilla x_1 tulee askelmaisesti kuormitusiskuja kuorman poistuessa kesken
kiihdytyksen ajassa 0,2 s ja kuorman palautuessa takaisin jarrituksen aikana ajanhetkel-
lä 0,6 s. Kuvassa 5.16 on esitetty kulma- ja paikkaero eri kompensattorin vahvistuksen
arvoilla kuormitusiskujen tullessa akselille x_1 .



Kuva 5.16 Kompensaattorin vaikutus kulma- ja paikkaeroon eri kompensaattorin vahvistuksen arvoilla kuormitusiskussa, kun viive kulmavirheen siirrossa $\tau_{tr} = 500 \mu\text{s}$.

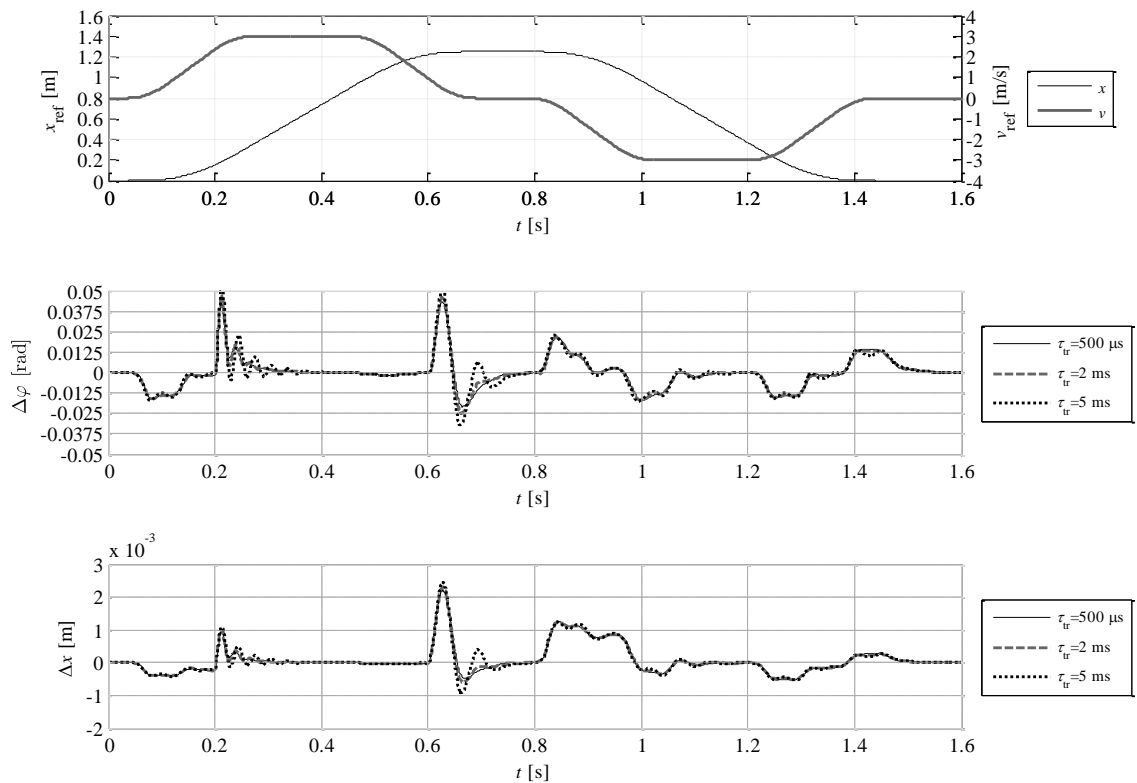
Ilman kompensointia toimivassa järjestelmässä äkillinen kuormitusisku tekee akseleiden välille selkeän kulmaeron joka poistuu hitaasti. Kompensaattorin vaikutuksesta dynamiikan äkillinen muuttuminen akseleiden välillä saadaan nopeasti kompensoitua eikä kulmaero kasva merkittävästi. Paikkaerossa kompensaattorin vaikutus ei ole yhtä selkeästi havaittavissa, koska äkillinen kuorman lisäys saa hihnan venymään joka kasvattaa paikkaeroa. Kuvassa 5.16 esitetään kompensoinnin vaikutus eri kulmavirheen arvoihin eri vahvistuksen arvoilla kuormaiskun aikana.



Kuva 5.17 Kompensaattorin vaikutus kulmavirheisiin isäntä-örjamenetelmässä eri kompensoinnin vahvistuksen arvoilla kuormitusiskussa, kun viive kulmavirheen siirrossa $\tau_{tr} = 500 \mu\text{s}$.

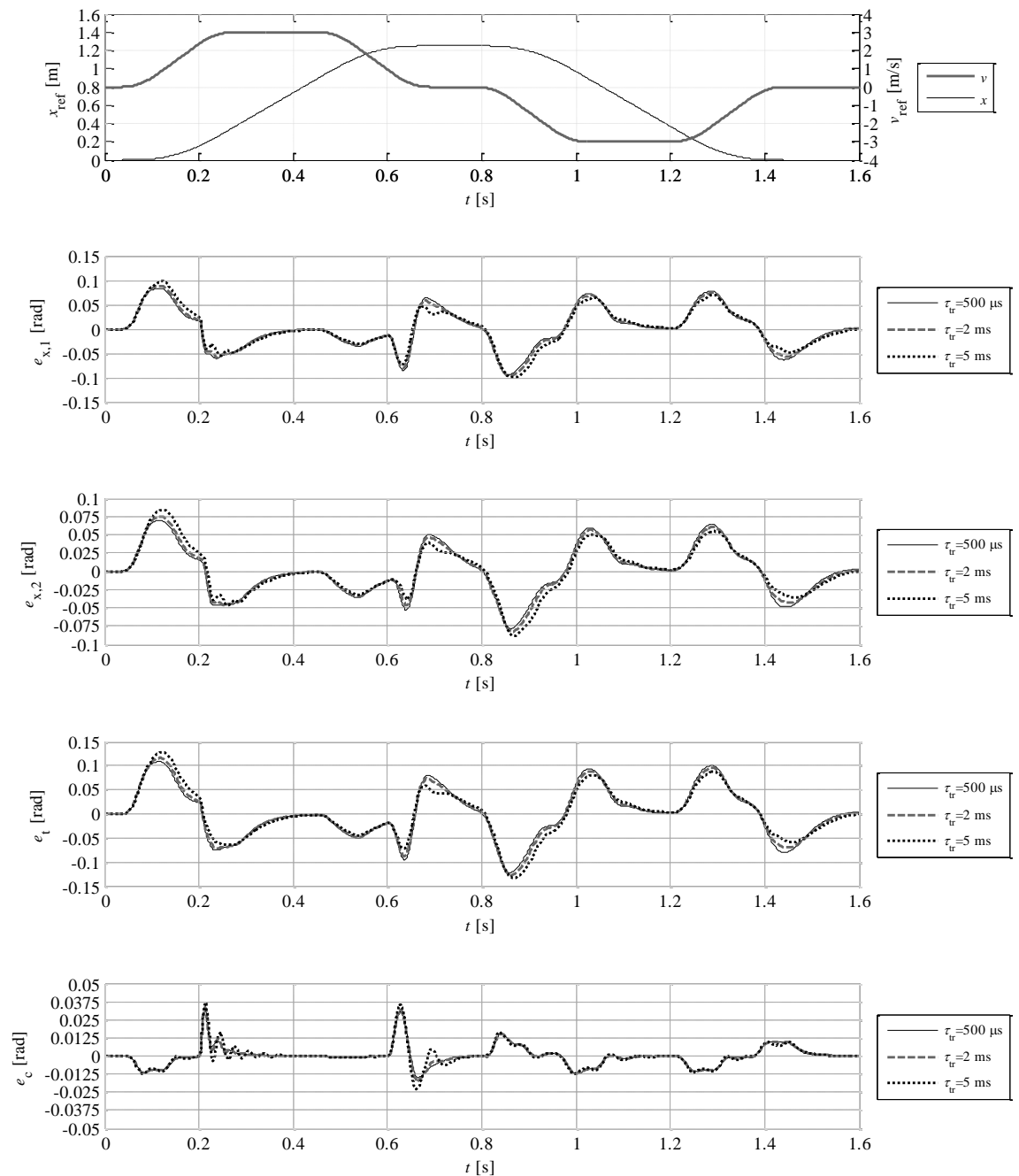
Kuvasta 5.17 nähdään kuinka kompensaattori vaikuttaa erityisesti akselin x_2 kulmavirheeseen. Ilman kompensaattoria kuormaiskuna aiheuttama muutos akselilla x_1 ei muuta akselin x_2 tilannetta millään tavalla. Käyttämällä pelkästään c -suunnan kompensointia tulevat akselilla x_1 tapahtuvat muutokset selkeästi esiin myös akselilla x_2 . Kun kompensoidaan t - ja c -suuntaisia virheitä, eivät muutokset akselilla x_1 välity selkeästi akselille x_2 .

Akseleita ohjaavien taajuusmuuttajien tiedonsiirron viivästymisen vaikutusta kompensointiin tutkitaan kasvattamalla siirtoviivettä 5 ms asti. Kuvassa 5.18 esitetään viiveen vaikutus kulma- ja paikkaeroon, kun kompensattorin vahvistukset ovat $P_t = 0$ ja $P_c = 200$ ja akselille x_1 tuodaan kuormitusiskut samalla tavalla kuin edellisissä tuloksissa.



Kuva 5.18 Siirtoviiveen τ_{tr} vaikutus kulma- ja paikkaeroon rinnan ohjauksessa, kun akselille x_1 tuodaan kuormitusisku ja kompensattorin vahvistukset ovat $P_t = 0$ ja $P_c = 250$.

Kuten kuvasta 5.18 nähdään, ei viive suuresti vaikuta tulokseen, vaan ainoastaan erot muutostilanteissa kasvavat hieman ja eroarvoihin tulee värähtelyä. Kuvassa 5.19 esitetään viiveen vaikutus eri kulmavirheisiin.



Kuva 5.19 Siirtoviiveen τ_{tr} vaikutus kulmavirheisiin rinnan ohjauksessa, kun akselille x_1 tuodaan kuormitusisku ja kompensattorin vahvistukset ovat $P_t = 0$ ja $P_c = 250$.

Viiveen kasvaminen pienentää kulmavirheiden e_{x1} ja e_{x2} huippuarvoja, mutta haittapuolelana tulee virheen hitaampi poistuminen vakionopeudella. Viiveen kasvaessa kuormitusiskuilla akseleiden kulmavirheisiin tulee pientä värähtelyä, joka ei ole toivottavaa.

Taulukossa 5.2 esitetään laskennalliset arvot kompensattorin toiminnasta, kun akselille x_1 tuodaan kuormitusisku, ja siirtoviive kasvaa taajuusmuuttajien välillä. Arvot on esitetty laskennallisina arvoina ja suhteellisena arvoina kompensoimattomaan tilanteeseen.

Taulukko 5.2 Kulmaeron itseisarvon integraali ja suurin arvo rinnan ohjauksessa kuormitusiskussa eri kompensattorin parametreilla.

P_t [1/s]	P_c [1/s]	τ_{tr} [ms]	$\int \Delta\varphi dt$	$\frac{\int \Delta\varphi dt}{\int \Delta\varphi_{no\ comp} dt}$	$ \Delta\varphi _{max}$ [rad]	$\frac{ \Delta\varphi _{max}}{ \Delta\varphi_{no\ comp} _{max}}$
0	0	0	$8,24 \cdot 10^{-2}$	1	$12,67 \cdot 10^{-2}$	1
100	100	0,5	$3,23 \cdot 10^{-2}$	0,39	$7,24 \cdot 10^{-2}$	0,57
0	200	0,5	$1,88 \cdot 10^{-2}$	0,23	$4,67 \cdot 10^{-2}$	0,37
0	200	2	$1,97 \cdot 10^{-2}$	0,24	$5,21 \cdot 10^{-2}$	0,41
0	200	5	$1,87 \cdot 10^{-2}$	0,23	$4,39 \cdot 10^{-2}$	0,35

Taulukon 5.2 perusteella kompensattori pystyy kompensoimaan akseleiden välisen nopeankin dynamiikan muuttumisen aiheuttaman eron tehokkaasti, kuten aikaisemmin esitetyistä kuvista oli havaittavissa. Erityisesti eron huippuarvon pieneneminen on tärkeää, kun pyritään ajamaan akseleita samanaikaisesti samalla ohjeella, vaikka akseleiden dynamiikka muuttuisi nopeasti kesken suorituksen.

5.4 Johtopäätökset

Esitetty kompensattori poistaa kelkkojen välistä paikkaeroa tehokkaasti, vaikka akseleiden välillä esiintyisi nopeita dynaamisia muutoksia. Isäntä-orjamenetelmässä kompensattorin aikaansaama parannus jää heikoksi menetelmässä esiintyvän orjan ohjeen viiveen vuoksi. Kompensattori parantaa tuloksia merkittävästi vain, jos kelkkojen välillä on dynaamista eroa. Paikkakaskadin vurityksessä kaikkia tilanteita ei voida ottaa huomioon, kun säätimet joudutaan virittämään kompromissina järjestelmän dynamiikaltaan erilaisia tilanteita huomioiden. Yleisesti haittapuolena esitetyssä kompensointimenetelmässä on että, se soveltuu vain kahden akselin liikkeiden paikkaeron poistamiseen. Lisäksi virheiden muuntaminen ohjelinjan mukaiseen ja sitä kohtisuoraan olevaan komponenttiin vaatii ohjeen tuntemisen etukäteen. Ajattaessa akseleita synkronoituna suoraan toisiinsa verrannollisilla ohjeilla tämä ei ole suuri ongelma, mutta akseleiden liikkuessa täysin omia reittejä tulee ohjeestakin akseleiden asettamassa koordinaatistossa käyrä ja kompensoinnin kertoimet tulee laskea joka kerta uudestaan. Rinnanohjauksessa kompensattori ei, kuten isäntä-orjamenetelmässä, sovellu viiveiden kompensointiin, joten suunnittelussa on huolehdittava siitä, että laitteet saavat ohjeensa samaan aikaan.

Yhdenkin syklin poikkeama saman ohjeen suorituksessa aiheuttaa selkeän poikkeaman akseleiden välillä.

6 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin kahden akselin synkronointia erilaisilla ohjausmenetelmillä lineaarihammashihnaajohteiden avulla sekä mittaamalla että simulointimallin avulla. Johteita ajavien moottoreiden ohjaus toteutettiin hajautetulla järjestelmällä, jossa taajuusmuuttajat saivat paikkaohjeensa synkronoidun kenttäväylän avulla. Simulointiympäristössä tutkittiin myös mahdollisuutta parantaa akseleiden synkronointia kompensattorin avulla.

Nykyisissä liikkeenohjaussovelluksissa käytetty myötäkytketty paikkakaskadi ei ota huomioon säädössä muuta kuin ajettavan akselin paikkavirheen. Monissa sovelluksissa suoritusten aikana tai suoritusten välillä voi kuitenkin esiintyä erilaisia muutoksia akseleiden dynamiikassa, jolloin järjestelmän kokonaistarkkuus voi heikentyä. Lisäämällä paikkasäätäjän rinnalle paikkakompensaattorin, joka muodostaa ohjeet akseleille poikkeaman perusteella, saatiin kahden akselin järjestelmän tarkkuutta parannettua erilaisissa kuormitustilanteissa. Todellisessa järjestelmässä kompensattorin lisääminen hajautettuun järjestelmään vaatii taajuusmuuttajien keskinäistä kommunikointia, koska kompensointitermi muodostetaan molempien kulmavirhetietojen käyttämisestä. Tällöin siirrossa esiintyy viivettä, mutta simulointitulosten perusteella tällä ei ole suurta heikentävää vaikutusta kompensattorin toimintaan. Suuremmat poikkeamat akseleiden välillä saadaan helpommin aikaiseksi, jos paikkaohjeiden suoritusten välillä on viivettä järjestelmän taajuusmuuttajien välillä. Viivettä ohjeiden välillä esiintyy aina isäntäorjamenetelmässä ja akseleilla näkyvä poikkeama on suoraan verrannollinen käytettyyn nopeuteen ja kyseiseen viiveeseen.

Tulevaisuudessa testilaitteiston muiden akseleiden liikkeiden synkronointi tulee tarkastelun kohteeksi. x-akseleiden massat tulevat lähemmäs toisiaan, jolloin kompensoinnin tarvetta johteiden välillä ei ole. Todennäköisesti tärkeintä on kompensoida liikkeet x- ja y-akseleiden osalta.

LÄHTEET

- (ABB 2007) ABB ACSM1. 2007. Hardware Manual ACSM1-04 Drive Modules (0.75 to 45 kW). Effective: 11.6.2007.
- (Beckhoff 2011) Beckhoff. 2011. Tuotteet ja tuotteiden tiedot. Verkkolähde: www.beckhoff.fi. Viitattu 05.07.2011.
- (ESR 2008) ESR Pollmeier GmbH. 2008. MR 74 AC Servo Motors. Data Sheet 6674.260, V 3.0. Saatavana verkosta: http://www.esr-pollmeier.de/en/pdf/6674_260_30.pdf. Viitattu 10.05.2011.
- (Festo 2007a) Festo. 2007. Key Products. Tuotekatalogi 07/2007 issue. Saatavana myös verkkolähteenä: http://www.festo.com/cat/fi_fi/data/doc_engb/PDF/EN/DGE-ZR_EN.PDF. Viitattu 10.05.2011.
- (Festo 2007b) Festo. 2007. Connecting Shafts KSK. Tuotekatalogi. 2007/10 – Products 2008.
- (Haapala 2008) Haapala M. 2008. Sähköisen liikkeenohjauksen mitoitus, käyttöönoton dokumentointi ja pakkauslinjasovellukset. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, sähkötekniikan koulutusohjelma.
- (Hace 2004) Hace A., Jezernik K., Sabanovic A. 2004. A New Robust Position Control Algorithm for a Linear Belt-Drive, *Proceedings of the IEEE international Conference on Mechatronics*, s. 358-363.
- (Hartikainen 2011) Hartikainen A. 2011. Kartonkikoneen sähkökäyttöjen päivitys valta-akselin poiston yhteydessä. Opinnäytetyö. Saimaan

ammattikorkeakoulu, Imatra, tekniikka, sähkötekniikan koulutusohjelma.

- (Heidenhain 2010) Heidenhain. 2010. Encoders for servo drives. Tuotekatalogi. December 2010. Saatavana verkosta: http://www.heidenhain.fi/fileadmin/pdb/media/img/encoders_for_servo_drives_208_922-2B.pdf. Viitattu: 16.05.2011.
- (Kok Kiong 2008) Kok Kiong T., Tong Heng L., Huang S. 2008. Precision Motion Control: Design and Implementation. - 2nd edition. Springer-Verlag London Limited. ISBN 978-1-84800-020-9.
- (Kübler 2011) Kübler. 2011. Linear Measuring Technology - Linear magnetic measurement system. LIMES LI20/B1. Datalehti.
- (Jokinen 2010) Jokinen M. 2010. Centralized Motion Control of a Linear Tooth Belt Drive: Analysis of the Performance and Limitations. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Digipaino 2010. ISBN 978-952-214-999-2.
- (Pikovsky 2001) Pikovsky A., Rodenblum M., Kurths J. 2001. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge Nonlinear Science Series 12. Cambridge University Press. ISBN 0-521-59285-2.
- (Saarakkala 2008) Saarakkala S. 2008. Lineaarisen hammashihnaservokäytön tilasäätö. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, sähkötekniikan koulutusohjelma.
- (Sercos 2011) Sercos. 2011. Technology, Sercos I and II. Verkkolähde: <http://sercos.com/technology/sercos.htm>. Viitattu 10.05.2011.

- (SEW 2008) SEW-Eurodrive. 2008. Synkroniservomootorit DFS / CFM. Käyttöohje. Julkaistu 11/2008. Saatavana verkosta: <http://www.sew-eurodrive.fi/download/pdf/11354437.pdf>. Viitattu 10.05.2011.
- (SEW 2010) SEW-Eurodrive. 2010. System manual. MOVIAXIS® Multi-Axis Servo Inverter. Edition 06/2010.
- (Stegmann 2011) Sick/Stegmann. 2011. SinCos® SRS50, SRM50, SRS60, SRM60, SRS50 Stanalone, SRM50 Standalone: Motor Feedback Systems with HIPERFACE®-Interface for Servo Motors. Datalehti.

LIITE I MOOTTOREIDEN JA JOHTEIDEN PARAMETRIT

Moottoreiden parametrit. (ESR 2008, SEW 2008)

valmistaja	ESR	SEW
malli	MR 7454-U5-N030	CFM90M
nimellisteho P_n	4080 W	4555 W
nimellispyörimisnopeus n_n	3000 min ⁻¹	3000 min ⁻¹
nimellisvääntömomentti T_n	13 Nm	14,5 Nm
vääntömomentin suurin arvo T_{max}	52 Nm	52,2 Nm
moottorin hitausmassa J_M	1,58·10 ⁻³ kgm ²	2,23·10 ⁻³ kgm ²

Hammashihnajohteen parametrit. (Festo 2007)

malli	DGE-ZR-RF-40
työalueen pituus l	1600 mm
suurin kuorma $m_{L,max}$	30 kg
suurin sallittu kuormitusvoima F_{max}	610 N
suurin sallittu vääntömomentti T_{max}	12,1 Nm
suurin sallittu nopeus v_{max}	10 m/s
suurin sallittu kiihtyvyys a_{MAX}	50 m/s ²
toistotarkkuus	±0,1 mm
hihnapyörän säde r	19,89 mm
hihnan aiheuttama hitausmassa J_L	0,0112 kgm ²
kytkimen hitausmassa J_k	42,3·10 ⁻⁶ kgm ²

LIITE II MATEMAATTISEN MALLIN PARAMETRIT

Parametrit hammashihnajohdemallille.

parametri	arvo
hihnapyörän hitausmassa J	$9,9 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$
hihnapyörän säde R	19,89 mm
jousivakiot K_1 ja K_2	$3,26 \cdot 10^5$ - $5,55 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
jousivakio K_3	$2,64 \cdot 10^5 \text{ N/m}$
ekvivalenttinen jousivakio K_{ekv}	$5,78 \cdot 10^5$ - $5,69 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
kuorman massa m_L	0-30 kg
hihnapyörän pyörimiskitka f_{t1} ja f_{t2}	$2,49 \cdot 10^{-4} \text{ N/rad/s}$
liikekitka hihnalla 1 $f_{t,1}$	$50 \text{ N} + 10,9 \text{ N/m/s}$
liikekitka hihnalla 2 $f_{t,2}$	$45 \text{ N} + 13,6 \text{ N/m/s}$
suurin sallittu kuormitusvoima F_{MAX}	610 N
hihnan suhteellinen venymä ε	0,11 %
hihnan hitausmassa pituusyksikköä kohti J_H	$0,933 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2/\text{m}$
ylimääräinen pyörivien osien hitausmassa J_0	$9,89 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$
kytkimen hitausmassa J_k	$42,3 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$
hihnapyörien välinen etäisyys	2,1 m
kokonaishitaussmassa hihnan 1 vetävässä päässä $J_{\text{tot},1}$	$2,82 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$
kokonaishitaussmassa hihnan 2 vetävässä päässä $J_{\text{tot},2}$	$3,85 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$

LIITE III AKSELEIDEN SIIRTOFUNKTIOT

Akseleiden siirtofunktioita muodostettaessa oletetaan, että molemmat akselit saavat saman referenssin samalla hetkellä ja, että käytetyt paikkasäätimet ovat identtiset, jolloin siirtofunktiot saadaan yksinkertaisempiin muotoihin.

Akselin x_1 siirtofunktio kulmanopeusreferenssistä kulmanopeuteen on

$$G_{v,1}(s) = \frac{\omega_{act,1}}{\omega_{ref,1}}(s) = \frac{C_{vel,1}(s)\tau_{I,1}(s)G_{x,1}(s)}{1 + C_{vel,1}(s)\tau_{I,1}(s)G_{x,1}(s)}. \quad (1)$$

Kulmalle $\varphi_{act,1}$ voidaan kirjoittaa

$$\varphi_{act,1} = \frac{1}{s} \omega_{act,1} = \frac{1}{s} \omega_{ref,1} G_{v,1}(s). \quad (2)$$

Kulmanopeusreferenssi $\omega_{ref,1}$ muodostuu myötäktykennän, paikkasäätimen ja kompensattoreiden lähtöjen summana

$$\omega_{ref,1} = \varphi_{ref,1} \cdot s + e_{x,1} C_{p,1}(s) + U_{x,1}, \quad (3)$$

jossa $e_{x,1}$ on akselin x_1 kulmavirhe, $C_{p,1}(s)$ on akselin x_1 paikkasäätimen siirtofunktio ja $U_{x,1}$ kompensattorin lähtö. Kulmavirhe on kiertymäkulman ja kulmareferenssin erotus ja kompensattorin lähtö on esitetty kappaleessa 3.1 yhtälössä (3.9)

$$e_{x,1} = \varphi_{ref,1} - \varphi_{act,1}, \quad (4)$$

$$U_{x,1} = P_t \cos \theta (e_{x,1} \cos \theta + e_{x,2} \sin \theta) + P_c \sin \theta (e_{x,1} \sin \theta - e_{x,2} \cos \theta), \quad (5)$$

jossa kulma θ on ohjeiden muutosten välinen kulma. Kun molempia akseleita ajetaan samalla referenssillä, jota jatkossa merkitään φ_{ref} , tulee kulmaksi $\theta = 45^\circ$, jolloin kompensattorin lähtö on

$$U_{x,1} = \frac{1}{2} P_t (e_{x,1} + e_{x,2}) + \frac{1}{2} P_c (e_{x,1} - e_{x,2}). \quad (6)$$

Korvaamalla kulmavirheet yhtälöllä (4) ja kulmareferenssien ollessa sama molemmille akseleille, kompensattorin lähdöksi tulee

$$U_{x,1} = \frac{1}{2}P_t(2\varphi_{\text{ref}} - \varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{2}P_c(-\varphi_1 + \varphi_2). \quad (7)$$

Sijoittamalla yhtälöiden (4) ja (7) lausekkeet yhtälöön (3) ja sijoittamalla saatu kulmanopeuden referenssi yhtälöön (3) saadaan kiertymäkulmalle yhtälö

$$\varphi_{\text{act},1} = \frac{1}{s} \left(\varphi_{\text{ref}} \cdot s + (\varphi_{\text{ref}} - \varphi_{\text{act},1})C_{p,1}(s) + \frac{1}{2}P_t(2\varphi_{\text{ref}} - \varphi_1 - \varphi_2) + \frac{1}{2}P_c(-\varphi_1 + \varphi_2) \right) G_{v,1}(s). \quad (8)$$

Ryhmittelemällä yhtälö (8), saadaan

$$\varphi_{\text{act},1} = \frac{\varphi_{\text{ref}}G_{v,1}(s)(s + C_{p,1}(s) + P_t) + \frac{1}{2}\varphi_{\text{act},2}(-P_t + P_c)G_{v,1}(s)}{\left(s + C_{p,1}(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s) \right)}. \quad (9)$$

Kiertymäkulman yhtälössä näkyy akselin x_2 kiertymäkulma, jolle vastaava yhtälö on samanlainen, mutta kompensattorin lähtö on

$$U_{x,2} = \frac{1}{2}P_t(e_{x,1} + e_{x,2}) + \frac{1}{2}P_c(-e_{x,1} + e_{x,2}). \quad (10)$$

Tekemällä vastaavat sijoitukset kuin akselin x_1 kiertymäkulmalle tehtiin ja järjestelmällä termit, saadaan akselin x_2 kiertymäkulman yhtälöksi

$$\varphi_{\text{act},2} = \frac{\varphi_{\text{ref}}G_{v,2}(s)(s + C_{p,2}(s) + P_t) + \frac{1}{2}\varphi_{\text{act},1}(-P_t + P_c)G_{v,2}(s)}{\left(s + C_{p,2}(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s) \right)}. \quad (11)$$

Sijoittamalla akselin x_2 kiertymäkulma yhtälöön (9) saadaan akselin x_1 kiertymäkulmaksi

$$\varphi_{\text{act},1} = \frac{\varphi_{\text{ref}} G_{v,1}(s)(s + C_{p,1}(s) + P_t)}{\left(s + C_{p,1}(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s)\right)} + \frac{\frac{1}{2}\left(\varphi_{\text{ref}} G_{v,2}(s)(s + C_{p,2}(s) + P_t) + \frac{1}{2}\varphi_{\text{act},1}(-P_t + P_c)G_{v,2}(s)\right)(-P_t + P_c)G_{v,1}(s)}{\left(s + C_{p,1}(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s)\right)\left(s + C_{p,2}(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s)\right)} . \quad (12)$$

Ryhmittelemällä yhtälö (12) uudestaan ja käyttämällä kummallekin akselille samanlaisia paikkasäädintä, jota merkitään $C_p(s)$, saadaan siirtofunktio kulmareferenssistä kulmaksi

$$\frac{\varphi_{\text{act},1}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,1}(s)(s + C_p(s) + P_t)\left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s)\right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s)\right)\left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s)\right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)} . \quad (13)$$

Vastaavasti akselin x_2 siirtofunktio kulmareferenssistä kulmaksi on

$$\frac{\varphi_{\text{act},2}}{\varphi_{\text{ref}}} = \frac{G_{v,2}(s)(s + C_p(s) + P_t)\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s)\right) + \frac{1}{2}(-P_t + P_c)(s + C_p(s) + P_t)G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)}{\left(s + C_p(s)G_{v,1}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,1}(s)\right)\left(s + C_p(s)G_{v,2}(s) + \frac{1}{2}(P_t + P_c)G_{v,2}(s)\right) - \frac{1}{4}(-P_t + P_c)^2 G_{v,1}(s)G_{v,2}(s)} . \quad (14)$$