

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KAKSINIVELISELLE ROBOTILLE SOVELLETTUJEN
KOORDINAATTIOHJAUSTEN VERTAILU

COMPARISON OF POSITION CONTROL METHODS FOR TWO-JOINTED ROBOTS

Timo Eskelinen

22.5.2013

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Tutkimusongelma	5
1.2	Työn tavoitteet	5
1.3	Työn rajaus	6
2	KAKSINIVELISEN ROBOTIN KINEMATIikka.....	7
2.1	Suora kinematiikka	10
2.2	Käänteiskinematiikka.....	11
2.2.1	Pisteen asema geometrisella ratkaisulla.....	11
2.2.2	Pisteen nopeus algebrallisella ratkaisulla	12
3	KUORMAIMEN OHJAUS JA TULOKSET	17
3.1	Asemakoordinaattiohjaus sylinterin aseman perusteella	19
3.2	Asemakoordinaattiohjaus absoluuttisten kulmien perusteella.....	22
3.3	Nopeuskoordinaattiohjaus	24
3.4	Sensorikorjaukset.....	25
4	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	26
4.1	Asemakoordinaattiohjausten vertailu	26
4.2	Asemakoordinaattiohjauksen ja nopeuskoordinaattiohjauksen vertailu.....	26
4.3	Ohjauksen tarkkuuden parantaminen.....	27
5	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	30

SYMBOLILUETTELO

α	Kahden akselin välinen kulma [rad]
β	Absoluuttinen kulma [rad]
γ	Kulman arvo [rad]
δ	Kulman arvo [rad]
θ	Mielivaltaisen jäsenparin kiertymä [rad]
$\dot{\theta}$	Mielivaltaisen jäsenparin kiertymän kulmanopeus [rad/s]
Θ	Kaikkien jäsenparien kulmamatriisi
$\dot{\Theta}$	Kaikkien jäsenparien kulmanopeusmatriisi
μ	Kulman arvo [rad]
ϑ	Karteesi nopeusvektori
φ	Orientaatiokulma [rad]
ω	Kulmanopeusvektori
Ω	Koordinaatistojen välinen kulmanopeusvektori
A	Mielivaltaisen jäsenen nimi
B	Jäsenestä A seuraavan jäsenen nimi
C	Jäsenestä B seuraavan jäsenen nimi
c	Pisteen c etäisyys origosta [mm]
F	Mielivaltainen funktio
i	Mielivaltaisen jäsenen järjestysnumero
J	Jacobin matriisi
L	Mielivaltaisen jäsenen pituus [mm]
P	Mielivaltaisen jäsenen mielivaltaisen piste
\mathbf{P}	Mielivaltaisen jäsenen mielivaltaisen pisteen paikkavektori
Q	Pisteen Q paikkavektori
R	Kiertomatriisi

T	Homogeeninen transformaatiomatriisi
<i>v</i>	Lineaarinopeusvektori
V	Matriisin lineaarinopeusvektori
X	Koordinaatiston suunta-akseli
Y	Koordinaatiston suunta-akseli
Z	Koordinaatiston suunta-akseli

LYHENNELUETTELO

mA	Milliamperi
mm	Millimetri
V	Voltti
D/A	Digitaalinen/Analoginen

1 JOHDANTO

Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimuslaboratorion käytössä on Keslan valmistama Patu 655 -kuormain, joka koostuu rungosta, nostopuomista, taittopuomista ja työpäästä. Puomien liike toisiinsa nähden on mahdollistettu nostosylinterillä, taittosylinterillä ja laakeroinnilla nivelkohdissa. Sylintereitä ohjataan servoventtiileillä ja voimansiirto tapahtuu hydraulikalla. Taittopuomissa on myös pidennysmahdollisuus, jota ei kuitenkaan huomioida tässä työssä. Liikkeet on rajoitettu kahteen niveleen tilarajoitusten vuoksi, joten mallinnus tapahtuu kaksiulotteisessa tasossa. Kuormaimen on asennettu kaksi rullapotentometriä mittaamaan sylintereiden asemaa ja kaksi inklinometriä mittaamaan puomien absoluuttista nivelkulmaa.

1.1 Tutkimusongelma

Robottiohjausta on tutkittu paljon ja erilaisia ohjaustapoja löytyy valmiiksi kirjallisuudesta. Ohjaustavan soveltuvuus halutulle robotille, ohjaustapojen määrästä johtuen, voi olla huono. Tässä kandidaatintyössä on tarkoitus vertailla Keslan valmistaman Patu 655 -kuormaimelle soveltuvia ohjausmenetelmiä. Patu 655 -kuormaimelle ei ole valmistettu valmiita kuormaimen ohjaamiseen soveltuvia ohjelmia, joten tässä kandidaatin työssä on tarkoitus soveltaa kirjallisuudesta löytyviä ohjaustapoja Patu 655 -kuormaimen ohjaamiseen. Kandidaatintyön aikana valmistettujen ohjelmien soveltuvuus kuormaimelle ei ole ennalta tiedossa, joten soveltuvuutta tutkitaan tässä kandidaatin työssä.

1.2 Työn tavoitteet

Kandidaatintyön tavoitteena on muodostaa käänteiskinemaattinen malli PATU 655 -kuormaimelle. Käänteiskinemaattisesta mallista muodostetaan ohjelmia, joilla voidaan ohjata kuormaimen servoventtiilejä, jotta kuormain toteuttaisi halutut liikkeet. Tavoitteena on tuottaa kolme erillistä ohjelmaa, joista ensimmäinen on asemakoordinaatiohjaus sylinterien asemasta, toinen on asemakoordinaatiohjaus absoluuttisista nivelkulmista ja kolmas on nopeuskoordinaatiohjaus nivelkulmanopeuksista. Muodostettuja ohjelmia vertaillaan keskenään ja tutkitaan niiden soveltuvuutta kuormaimen ohjaamiseen. Lopuksi tutkitaan mahdollisuuksia ohjaustapojen tarkkuuden lisäämiseksi sensoreilla.

1.3 Työn rajaus

Ohjausmenetelmistä tähän työhön on rajattu vertailtaviksi asemakoordinaatiohjaus ja nopeuskoordinaatiohjaus. Asemakoordinaatiohjaus toteutetaan molempia jo valmiiksi kuormaimeen asennettuja sensorityyppejä käyttäen. Nopeuskoordinaatiohjaus toteutetaan vain kuormaimeen asennettuja inklinometrejä käyttäen. Ohjaustapojen soveltuvuutta tutkitaan vain teoriassa, eikä käytännön kokeita ohjaustapojen toiminnasta toteuteta. Ohjaustapojen tarkkuuden lisäämisen mahdollisuuksista on työhön rajattu tutkittavaksi lisäsensorien käyttö. Työssä tutkitaan millaiset lisäsensorit voivat tarkentaa ohjausta ja kuinka ne voidaan liittää muodostettuihin ohjelmiin. Valmiiksi kuormaimeen asennettujen sensorien korvaamista muilla sensoreilla ei tässä työssä tutkita.

2 KAKSINIVELISEN ROBOTIN KINEMATIikka

Kinematiikka perustuu geometrian käsitteisiin ja sillä tutkitaan liikkuvan pisteen tai pistejoukon geometriaa. Kinemaattisella tarkastelulla voidaan selvittää pisteen ja kappaleen asema, nopeus ja kiihtyvyys eri ajanhetkellä. (Salmi, 1996, s.11.) Kinemaattisessa mallissa voi olla useita kappaleita eli jäseniä ja jäsenissä useita tarkastelupisteitä. Jäsenet voidaan yhdistää toisiinsa niin että ne pystyvät liikkumaan toistensa suhteen. Yhdistäessä jäsenet ketjumaisesti toisiinsa kutsutaan mallia kinemaattiseksi ketjuksi. Kinemaattisen ketjun kinematiikkaa kutsutaan sarjakinematiikaksi. Tyypillisesti vain suljettu kinemaattinen ketju, jonka yksi osa on kiinteä, kutsutaan mekanismiksi. Roboteissa käytetään kuitenkin avoimia pakkoliikkeisiä kinemaattisia ketjuja, mutta tyypistä huolimatta niitä kutsutaan mekanismeiksi. (Airila, 1996, luku3 s.1.) Kaksinivelistä kuormainta tasossa voidaan siis kutsua mekanismiksi, johon voidaan soveltaa sarjakinematiikan laskutapoja kinematiikan selvittämiseksi.

Suoralla kinematiikalla saadaan selvitettyä mekanismin työkalun asema ja nopeus koordinaatistossa, kun tiedetään jäsenten väliset kulmat ja kulmanopeudet. Käänteiskinematiikalla vastaavasti saadaan selvitettyä mekanismin nivelien kulmat ja kulmanopeudet, joilla työpään haluttu paikka ja nopeus globaalissa koordinaatistossa saavutetaan. Käänteiskinemaattista mallia voidaan käyttää asemakoordinaatiohjauksessa ja nopeuskoordinaatiohjauksessa, joissa mekanisme ohjataan antamalla työpään paikka tai nopeus ohjelmalle suoritettavaksi. Annetuista arvoista lasketaan käänteiskinematiikalla ohjaustavasta riippuen joko jäsenten väliset kulmat tai kulmanopeudet. Tässä tapauksessa saadaan laskettua kuormaimen molempien nivelien kulma ja kulmanopeus työpään paikasta ja nopeudesta riippuen. (Airila, 1996, luku3s.2-3.)

Mekanismin kinematiikan laskemiseksi pitää mekanismin jäsenten paikat ja kiertymät selvittää globaalissa koordinaatistossa. Globaalin koordinaatiston origo voidaan sijoittaa mekanismin kiinteään jäseneseen eli runkoon. Jokaisen jäsenen paikka ja orientaatio voidaan lopulta kuvata globaalissa koordinaatistossa homogeenisella transformaatiomatriisilla. Transformaatiomatriisin saamiseksi jäsenen mielivaltainen piste voidaan esittää 3×1 –

kokoisella paikkavektorilla. Tasotapauksessa paikkavektori on kokoa 2×1 , koska tasotapaus tuntee vain kaksi koordinaatiston akselia. (Airila, 1996, luku3s.11.)

$${}^A\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

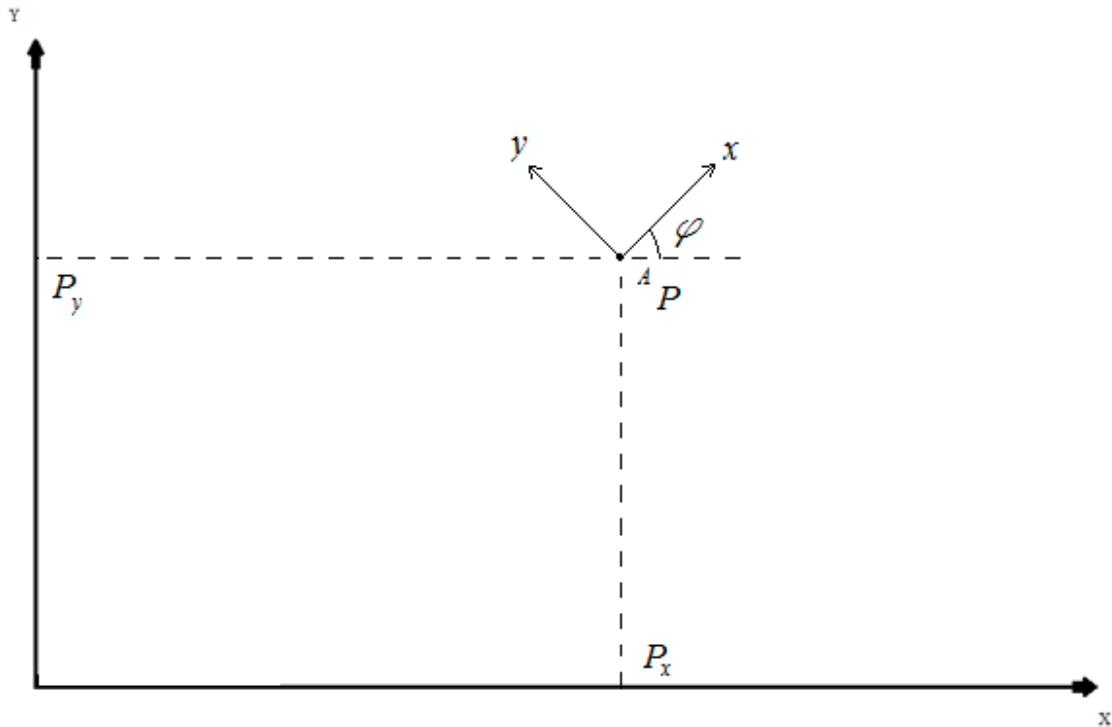
Jäsenen A mielivaltaisen pisteen P:n paikka ilmaistaan paikkavektorilla ${}^A\mathbf{P}$. Paikkavektori esitetään yhtälössä 1, jossa P_x on pisteen X -akselin suuntainen paikka, P_y on Y -akselin suuntainen paikka ja P_z on Z -akselin suuntainen paikka koordinaatistossa. Tasotapauksessa oleva piste P on esitetty kuvassa 1. Jäsenen orientaatio voidaan esittää avaruustapauksessa 3×3 kiertomatriisilla. Avaruustapauksessa jäsenellä voi olla orientaatiota kaikkien kolmen akselin suhteen. (Airila, 1996, luku3s.12.)

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

X -akselin ympäri tapahtuva orientaatio kuvataan kiertomatriisilla \mathbf{R}_x yhtälössä 2, jossa φ on kiertymää ilmaiseva orientaatiokulma, kun kierto suunta on vastapäivään. Y -akselin ympäri tapahtuva orientaatio kuvataan kiertomatriisilla \mathbf{R}_y yhtälössä 3. Avaruustapauksessa täytyy kuvata myös Z -akselin ympäri tapahtuva orientaatio, kuten yhtälössä 4. (Craig, 1986, s.46-47.)



Kuva 1 Mielivaltaisen jäsenen A mielivaltainen piste P ja jäsenen kiertymä φ koordinaatistossa

Tasotapauksessa tapahtuva kiertymä φ on kuvattu kuvassa 1. Kuvan 1 tapauksessa orientaatio tapahtuu Z -akselin ympäri. Kahden mielivaltaisen, mutta peräkkäisen jäsenen, jäsenen A ja jäsenen B, väliset orientaatiot voidaan yhdistää yhdeksi kiertomatriisiksi ${}^A_B\mathbf{R}$ yhtälön 5 mukaisesti, jolloin orientaatioiden huomioiminen jatkossa helpottuu. (Airila, 1996, luku3 s.14-16.)

$${}^A_B\mathbf{R} = [\mathbf{R}_x \quad \mathbf{R}_y \quad \mathbf{R}_z] \quad (5)$$

$${}^A_B\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^A_B\mathbf{R} & {}^A\mathbf{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Kappaleen asemasta ja kiertomatriisista saadaan johdettua homogeenin transformaatiomatriisi ${}^A_B\mathbf{T}$ yhtälön 6 mukaisesti, jossa ilmenee paikkavektori ${}^A\mathbf{P}$ ja kiertomatriisi ${}^A_B\mathbf{R}$. Yhtälössä 6 on lisäksi perspektiivimuunnos, joka on muotoa $[0 \ 0 \ 0]$ ja mittakaavamuunnos $[1]$. Mekanismin jokaisen jäsenen transformaatiomatriisi lasketaan

edellisen jäsenen lokaalissa koordinaatissa. Ensimmäisen jäsenen eli jäsenen A ja viimeisen jäsenen C välinen transformaatiomatriisi saadaan kertomalla yksittäisten jäsenten transformaatiomatriisit keskenään yhtälössä 7. (Airila, 1996, luku3 s.14-16.)

$${}^A_C\mathbf{T} = {}^A_B\mathbf{T}{}^B_C\mathbf{T} \quad (7)$$

Yhtälössä 7 on transformaatiomatriisi ${}^A_C\mathbf{T}$, joka on jäsenen C transformaatiomatriisi jäsenen A koordinaatistossa, transformaatiomatriisi ${}^A_B\mathbf{T}$, sekä transformaatiomatriisi ${}^B_C\mathbf{T}$, joka on jäsenen C transformaatiomatriisi jäsenen B koordinaatistossa. (Airila, 1996, luku3 s.22-23.)

2.1 Suora kinematiikka

Suoralla kinematiikalla saadaan ilmoitettua mekanismin jäsenten paikat, kun tiedetään jäsenten väliset kulmat. Edellä mainituilla tavoilla saattaa transformaatiomatriisin luominen olla hankalaa avaruustapauksessa. Avaruustapauksessa mekanismin suoran kinemaattisen mallin luomiseksi käytetäänkin yleisesti Denavit-Hartenberg -parametreja. (Airila, 1996, luku3 s.27-30.)

$${}^{i-1}_i\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Yhtälössä 8 on Denavit-Hartenberg -parametreista muodostetun transformaatiomatriisin yleinen muoto ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$, jossa kuvataan mielivaltaisen jäsenen i ja edellisen jäsenen i-1 välinen transformaatiomatriisi. Transformaatiomatriisissa a_{i-1} on Z -akselien välinen etäisyys edellisen koordinaatiston X -akselin suhteen, α_{i-1} on Z -akselien välinen kulma edellisen koordinaatiston X -akselin suhteen, d_i on X -akselin välinen etäisyys Z -akselin suhteen ja θ_i on koordinaatiston kiertymä edellisen koordinaatiston suhteen. Denavit-Hartenberg -parametrit on kehitetty helpottamaan avaruustapauksessa mekanismin kinemaattisen mallin laskemista, mutta sitä voidaan käyttää myös tasotapauksessa. (Craig, 1986, s.73-75.)

2.2 Käänteiskinematikka

Kuormaimen koordinaattiohjauksessa käytetään käänteiskinemaattista ratkaisua. Käänteiskinemaattinen ratkaisu on mahdollista saada sekä numeerisesti että analyttisesti. Numeerisessa ratkaisussa iteroidaan suoraa kinemaattista ratkaisua. Iterointi ratkaisutapana on kuitenkin hyvin hidasta, joten se soveltuu huonosti reaaliaikaiseen mallintamiseen. Reaaliaikaisessa mallintamisessa voidaan käyttää analyttistä ratkaisua, joka saadaan geometrisellä ratkaisulla ja algebrallisella ratkaisulla. Etenkin tasotapauksessa geometrinen ratkaisu soveltuu kaksinivelisen mekanismin käänteiskinemaattisen mallin luomiseen. (Craig, 1986, s.103-104.)

2.2.1 Pisteen asema geometrisella ratkaisulla

Geometrisen ratkaisun tapauksessa muunnosmatriisia ei voida käyttää, vaan puomien väliset kulmat ratkaistaan geometriaa hyväksikäyttäen. Kuvan 2 kaltaisessa kaksinivelisen mekanismin tasotapauksessa, saadaan nivelkulmat laskettua työpään pisteen c etäisyydestä origoon. (Craig, 1986, s.110-111.)

$$c = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (9)$$

Trigonometrian mukaan pisteen c etäisyys origosta saadaan laskettua yhtälön 9 mukaisesti, jossa x on X -akselin suuntainen paikka ja y on Y -akselin suuntainen paikka koordinaatistossa. (Craig, 1986, s.110-111.)

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - c^2}{2L_1L_2}\right) \quad (10)$$

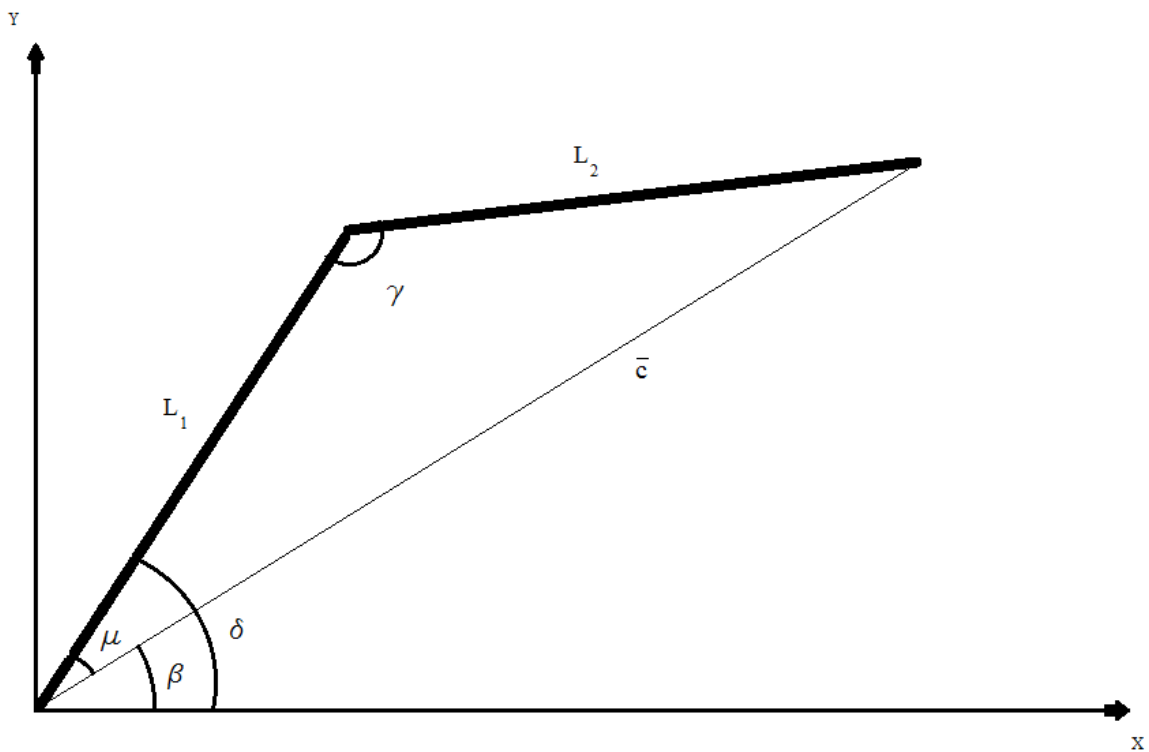
Kosinilauseen yleisestä muodosta saadaan johdettua jäsenten välinen kulma γ yhtälössä 10, jossa L_1 on ensimmäisen jäsenen pituus ja L_2 on toisen jäsenen pituus. Kulma γ voi saada yhtälöstä 10 useita ratkaisuja, joten kulman arvo täytyy määrittää sen mukaisesti, mihin ympyrän neljännekseen kulman halutaan asettuvan. Kuvassa 2 olevan jäsenen L_1 ja vektorin \bar{c} välinen kulma μ saadaan myös johdettua kosinilauseesta, jolloin kulma μ saadaan laskettua yhtälön 11 mukaisesti. (Craig, 1986, s.110-111.)

$$\mu = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (11)$$

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (12)$$

$$\delta = \mu + \beta \quad (13)$$

Vektorin \bar{c} absoluuttinen kulma β (kuva 2) saadaan trigonometriaa hyödyntäen yhtälön 12 mukaisesti. Laskemalla yhteen kulmat μ ja β saadaan ensimmäisen jäsenen absoluuttinen kulma δ yhtälöstä 13. (Craig, 1986, s.110-111.)



Kuva 2 Kaksinivelinen mekanismi tasotapauksessa

2.2.2 Pisteen nopeus algebrallisella ratkaisulla

Käänteiskinemaattisesta mallista saadaan laskettua työpään jäsenten kulmanopeudet työpään lineaarinopeuksista. Algebrallisessa analyysissä lasketaan ensin jäsenen lineaarinopeus ja kulmanopeus suorasta kinemaattisesta mallista. Kiertomatriisissa ${}^A_B\mathbf{R}$ olevien orientaatioiden ollessa muuttumattomia ajan suhteen on pisteen Q lineaarinopeusvektori ${}^A\mathbf{V}_Q$ globaalissa koordinaatistossa laskettavissa yhtälön 14 mukaisesti. (Craig, 1986, s.135.)

$${}^A\mathbf{V}_Q = {}^A\mathbf{V}_{BORG} + {}^A\mathbf{R}^B\mathbf{V}_Q \quad (14)$$

Yhtälössä 14 ${}^A\mathbf{V}_{BORG}$ on jäsenen B koordinaatiston aikaderivaatta jäsenen A koordinaatistossa. ${}^A\mathbf{R}$ on yhtälön 5 mukainen kiertomatriisi ja vektori ${}^B\mathbf{V}_Q$ on pisteen Q paikan aikaderivaatta jäsenen B koordinaatistossa. (Craig, 1986, s.135-136.)

Lineaarisen nopeuden sijaan jäsenellä voi olla kulmanopeus. Globaalin ja lokaalin koordinaatistojen origoiden ollessa samassa pisteessä niin että niiden välillä ei ole lineaarinopeutta, voidaan laskea jäsenen kulmanopeus yhtälön 15 mukaisesti (Craig, 1986, s.136-137.)

$${}^A\mathbf{V}_Q = {}^A\Omega_B \times {}^A\mathbf{Q} \quad (15)$$

$${}^A\mathbf{V}_Q = {}^A\mathbf{V}_{BORG} + {}^A\mathbf{R}^B\mathbf{V}_Q + {}^A\Omega_B \times {}^A\mathbf{R}^B\mathbf{Q} \quad (16)$$

Yhtälössä 15 oleva ${}^A\Omega_B$ on jäsenten A ja B lokaalien koordinaatistojen välinen kulmanopeus ja ${}^A\mathbf{Q}$ on pisteen Q paikkavektori eri ajan hetkellä jäsenen A koordinaatistossa. Jäsenellä voi kuitenkin olla samaan aikaan sekä lineaari- että kulmanopeutta. Tapauksessa, jossa jäsenellä on sekä lineaari- että kulmanopeus, saadaan globaalissa koordinaatistossa laskettua pisteen Q nopeus yhtälön 16 mukaisesti. Kaavassa ${}^A\mathbf{R}^B\mathbf{Q}$ ottaa huomioon vektorin \mathbf{Q} mahdollisen muuttumisen lokaalissa koordinaatistossa millä tahansa ajan hetkellä. (Craig, 1986, s.136-138.)

Robotin kaltaisessa mekanismissa jäsenten liike välittyy seuraavalle jäsenelle ja sitä kautta aina kinemaattisen ketjun päähän asti. Jäsenen i+1 nopeusvektori ${}^i\boldsymbol{\omega}_{i+1}$ saadaan laskettua edellisen jäsenen i nopeusvektorista ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$, johon lisätään rotaatio yhtälössä 17. (Craig, 1986, s.139-141)

$${}^i\boldsymbol{\omega}_{i+1} = {}^i\boldsymbol{\omega}_i + {}_{i+1}^i\mathbf{R}\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{Z}_{i+1} \quad (17)$$

$${}^{i+1}\boldsymbol{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}\mathbf{R}^i\boldsymbol{\omega}_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{Z}_{i+1} \quad (18)$$

Yhtälössä 17 oleva ${}^{i+1}\mathbf{R}$ on rotaatiomatriisi, joka ilmaisee jäsenen i+1 ympäri tapahtuvan kiertymän jäsenen i koordinaatistossa, $\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{Z}_{i+1}$ on jäsenen i+1 kulmanopeus lokaalin koordinaatiston Z -akselin ympäri. Kertomalla kaava 17 puolittain rotaatiomatriisilla ${}^{i+1}{}_i\mathbf{R}$ saadaan jäsenen i+1 kulmanopus ${}^{i+1}\boldsymbol{\omega}_{i+1}$ koordinaatiston i+1 suhteen laskemalla yhtälön 18 mukaisesti. (Craig, 1986, s.139-141.)

$${}^i\mathbf{v}_{i+1} = {}^i\mathbf{v}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1} \quad (19)$$

Jäsenen i+1 lineaarinopeus jäsenen i koordinaatissa saadaan laskemalla nopeusvektori ${}^i\mathbf{v}_{i+1}$ yhtälössä 19. Yhtälössä 19 oleva ${}^i\mathbf{v}_i$ on jäsenen i lineaarinen nopeusvektori lokaalissa koordinaatistossa, ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$ on jäsenen i kulmanopeusvektori lokaalissa koordinaatistossa ja ${}^i\mathbf{P}_{i+1}$ jäsenen i+1 koordinaatiston origon paikka jäsenen i koordinaatistossa. Kertomalla yhtälö 19 puolittain kiertomatriisilla ${}^{i+1}{}_i\mathbf{R}$ saadaan laskettua jäsenen i+1 lineaarinen nopeus ${}^{i+1}\mathbf{v}_{i+1}$ yhtälössä 20. (Craig, 1986, s.139-141.)

$${}^{i+1}\mathbf{v}_{i+1} = {}^{i+1}{}_i\mathbf{R}({}^i\mathbf{v}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{P}_{i+1}) \quad (20)$$

Kaksinivelisen kuormaimen tapauksessa työpään nopeus saadaan laskettua yhtälön 20 avulla, jolloin työpään lineaarinopeusvektori ${}^3\mathbf{v}_3$ lokaalissa koordinaatistossa voidaan laskea yhtälön 21 mukaisesti. (Craig, 1986, s.142-144.)

$${}^3\mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} L_1 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 \\ L_1 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 + L_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Nopeusvektorin yhtälössä 21 oleva $\dot{\theta}_1$ on ensimmäisen ja toisen jäsenen välinen kulmanopeus, $\dot{\theta}_2$ on toisen ja kolmannen jäsenen välinen kulmanopeus ja θ_2 toisen ja kolmannen jäsenen välinen kulma. Yhtälöstä 18 voidaan laskea työpään kulmanopeusvektori ${}^3\boldsymbol{\omega}_3$ yhtälön 22 mukaisesti. (Craig, 1986, s.142-144.)

$${}^3\boldsymbol{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Ratkaistaessa työpään nopeus globalissa koordinaatistossa kerrotaan termit rotaatiomatriisilla, jolloin työpään nopeusvektori voidaan kirjoittaa yhtälön 23 mukaisesti (Craig, 1986, s.142-144.)

$${}^0\boldsymbol{v}_3 = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ L_1 \cos(\theta_1) \dot{\theta}_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Työpään nopeusvektorissa globalissa koordinaatistossa on aikaisempien muuttujien lisäksi muuttuja θ_1 , joka on ensimmäisen ja toisen jäsenen välinen kulma. (Craig, 1986, s.142-144.)

Suorasta kinemaattisesta mallista voidaan nyt johtaa käänteiskinemaattinen malli. Käänteiskinemaattisen mallin luomiseksi käytämme Jacobin matriisia derivoimistyökaluna. Jacobin matriisi on yleinen työkalu kuvaamaan muunnosta kahden koordinaatiston välillä. (Craig, 1986, s.144-145.)

$$Y = F(X) \quad (24)$$

$$\delta Y = \frac{\partial F}{\partial X} \delta X \quad (25)$$

Tapauksessa, jossa on olemassa kuusi funktiota kuudesta riippumattomasta muuttujasta vektorimuodossa yhtälön 24 mukaisesti, voidaan käyttää Jacobin matriisia. Yhtälössä 24 oleva Y on usean funktion vektori ja $F(X)$ usean muuttujan vektori. Seuraavaksi halutaan laskea Y :n differentiaalit X differentiaalinen funktiona yhtälön 25 mukaisesti. Nyt voidaan käyttää osittaisderivaattamatriisiksi sopivaa Jacobin matriisia differentiaalinen laskemiseen. Jacobin matriisia kuvataan jatkossa symbolilla \mathbf{J} . Jakamalla yhtälön 25 molemmat puolet vielä differentiaalisella aika-askeleella, voidaan yhtälö kirjoittaa yhtälön 26 mukaisesti. (Craig, 1986, s.144-145.)

$$\dot{Y} = \mathbf{J}(X)\dot{X} \quad (26)$$

Kaksinivelisen kuormaimen tapauksessa voidaan laskea nivelnopeuksista työpään karteesi nopeus yhtälössä 27. (Craig, 1986, s.144-145.)

$${}^0\boldsymbol{\vartheta} = {}^0\mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta})(\dot{\boldsymbol{\Theta}}) \quad (27)$$

Yhtälössä 27 työpään karteesi nopeusvektori ${}^0\boldsymbol{\vartheta}$ sisältää lineaarisen nopeusvektorin ${}^0\boldsymbol{v}$ sekä kulmanopeusvektorin ${}^0\boldsymbol{\omega}$ yhtälön 28 mukaisesti. Lisäksi yhtälö 27 sisältää kulmamatriisin $\boldsymbol{\Theta}$ sekä kulmanopeusmatriisin $\dot{\boldsymbol{\Theta}}$. (Craig, 1986, s.144-145.)

$${}^0\boldsymbol{\vartheta} = \begin{bmatrix} {}^0\boldsymbol{v} \\ {}^0\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Sovellettaessa Jacobin matriisia robottiin saa matriisi kokonsa vapausasteiden ja nivelien määrän mukaan. Rivien lukumäärä vastaa mekanismin vapausasteiden määrää kun taas sarakkeiden määrä vastaa nivelien määrää. Tasotapauksessa olevan kaksiniveliselle kuormaimelle saadaan siis Jacobin matriisi kokoa 2×2 . Kaavasta 21 saadaan johdettua kuormaimelle Jacobin matriisi yhtälön 29 mukaisesti, kun tarkastellaan työpään Jacobin matriisia lokaalista koordinaatistosta.. (Craig, 1986, s.144-145.)

$${}^3\mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta}) = \begin{bmatrix} L_1 \sin(\theta_2) & 0 \\ L_1 \cos(\theta_2) + L_2 & L_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

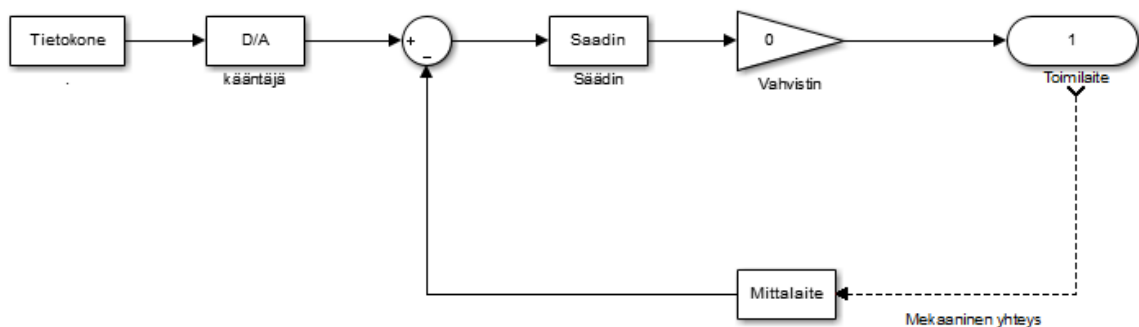
$${}^0\mathbf{J}(\boldsymbol{\Theta}) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1) - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\Theta})\boldsymbol{\vartheta} \quad (31)$$

Tarkasteltaessa työpäätä Globaalista koordinaatistosta voidaan Jacobin matriisi kuormaimelle kirjoittaa yhtälön 30 mukaisesti. Nivelkulmien kulmanopeusvektori eli käänteiskinemaattinen malli saadaan nyt laskettua käänteisestä Jacobin matriisista yhtälön 31 mukaisesti. (Craig, 1986, s.146.)

3 KUORMAIMEN OHJAUS JA TULOKSET

Robotit voivat olla joko servo-ohjattuja tai ei servo-ohjattuja. Servo-ohjatuissa roboteissa voi olla avoin servosysteemi tai suljettu servosysteemi. Avoimessa servosysteemissä säädin lähettää signaalin ohjatakseen robotin liikettä. Säätimelle ei tule takaisin tietoa robotin jäseniltä, joten säädin ei myöskään tiedä missä paikassa robotin jäsenet oikeasti ovat. Suljetussa servosysteemissä säädin saa jäseneltä tiedon todellisesta paikastaan. Tiedon saanti toteutetaan halutun tyyppisellä mittalaitteella. Mittalaite mittaa jäsenen todellisen aseman, jota säädin vertaa haluttuun asemaan. Servo-ohjatun robotin suljetun servo-ohjauksen kaavio on kuvattu kuvassa 3. Servo ohjattu robotti koostuu kaavion mukaan tietokoneesta, jossa käyttäjä pystyy antamaan robotille käskyjä digitaalisessa muodossa. D/A -kääntäjässä signaali muutetaan analogiseksi. Signaalien erotuksen laskevaa komponenttia kutsutaan vertailijaksi. Säädin säätää signaalia vertailijalta tulevan signaalin mukaan. Vahvistimella voidaan muuttaa signaalin voimakkuutta halutulla kertoimella toimilaitteelle sopivaksi. Mittalaite mittaa toimilaitteen todellisen paikan ja lähettää siitä signaalin vertailijalle. (Hoekstra, 1986, s.465-473)



Kuva 3 Hoekstran mukainen kaavio suljetusta servo-ohjauksesta. (Hoekstra, 1986, s.470.)

Robottiohjausta sovellettaessa Patu 655 -kuormaimen, kuormaimen sylintereitä ohjataan Boch 0 811 404 612 -servoventtiileillä, joten laitteisto voidaan luokitella servo-ohjatuksi robotiksi. Säätimenä toimii käänteiskinemaattisesta mallista tehty ohjelma, joka ohjaa servoventtiileitä. Rullapotentiometrit tai inklinometrit ohjaustavasta riippuen mittaavat kuormaimen nivelkulmaa ja ilmoittavat sen säätimelle, jolloin säädin tietää onko haluttu

paikka saavutettu. Laitteisto toimii suljetun servo-ohjatun robotin tavoin ja siihen voidaan soveltaa suljetun servosysteemin ohjaustapaa. Patu 655 -kuormaimen tapauksessa suljettu servo-ohjaus koostuu tietokoneesta, vertailijasta, säätimestä, toimilaitteesta sekä mittalaitteesta.

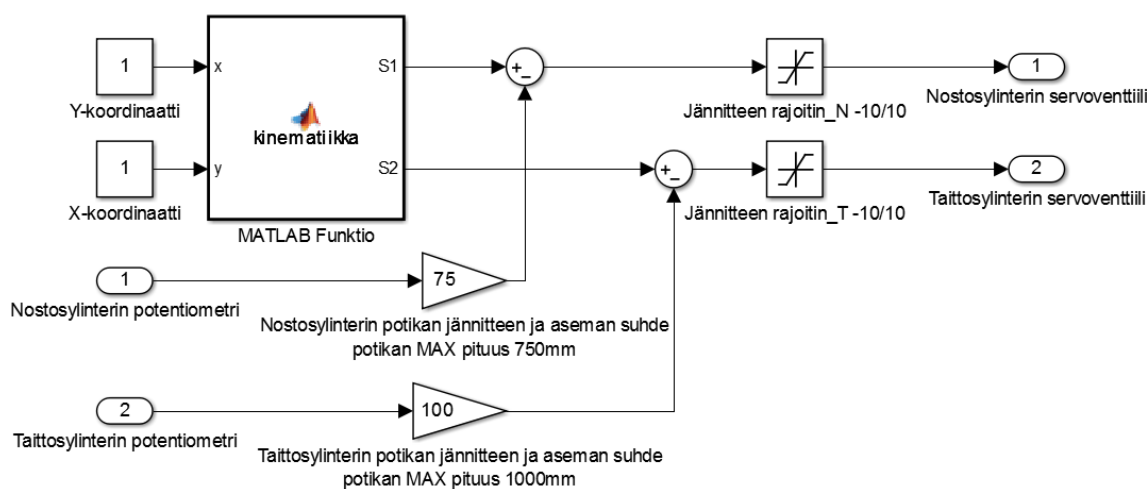
Patu 655 -kuormaimen tapauksessa ohjaus toteutetaan Simulink ohjelmalla. Suljetun servo-ohjauksen mallin mukaisesti analogiset komponentit, kuten tietokone, vertailija ja vahvistin saadaan toteutettua Simulink ohjelmalla digitaalisena. Signaalin ollessa jokaisella komponentilla digitaalisessa muodossa ei väliin tarvita D/A -kääntäjää. Säätimenä toimii Matlab funktio, joka on osa Simulink ohjelmistolla tehtyä ohjelmaa. Säätimiä tehdään jokaiselle ohjaustavalle omansa. Vertailijana toimi summakomponentti, joka laskee kahden signaalin erotuksen. Vahvistin on korvattu ohjelmassa signaalin huippuarvoja leikkaavalla komponentilla. Ohjelman käyttäjä toimii osana tietokonetta, jolloin käyttäjä antaa manuaalisesti ohjelmalle sisääntuloarvon, eli halutut työpään koordinaatit tai nopeuden.

Mittalaitteena käytetään joko rullapotentiometrejä, jotka mittaavat sylinterin asemaa tai nivelkohtiin asetettuja inklinometrejä, jotka mittaavat nivelvarren eli puomin absoluuttista kulmaa maan vetovoimaan nähden. Inklinometreinä, sekä taittonivelessä että nostonivelessä, on käytössä Asekon QG30-KI-090-AI-K, joka kykenee mittaamaan kulmaa välillä -90 – 90 astetta. Inklinometrit antavat ohjausvirtaa välillä 4 – 20 mA. Kulman ollessa -90 astetta inklinometri antaa virtaa 4 mA ja kulman ollessa 90 astetta antaa inklinometri virtaa 20 mA. Inklinometrin voidaan sanoa olevan lineaarinen vastus kulman suhteessa. Inklinometrin tarkkuus on molempiin suuntiin 2,5 %. (Aseko.) Rullapotentiometreinä on käytössä ASM GmbH:n WS1.1 mallinen asemasensori. Asemasensorissa on liitetty naru rullapotentiometriin, jolloin narun lineaarinen liike vaikuttaa rullapotentiometrin rotaatioon. WS1.1 mallin asemasensoreita saa useilla eri narun pituuksilla. Nostosylinterin asemaa tarkkailevaksi sensoriksi on valittu 1000mm:ä pitkällä narulla oleva asemasensori ja taittosylinterille 750mm:ä pitkällä narulla oleva asemasensori. Molemmissa antureissa rullapotentiometri toimii jännitteen jakajana, jolloin ohjausjännite määräytyy narun pituuden suhteen. Jännitteen jakajana on yhden kilo-ohmin impedanssi, jonka tarkkuus on 10%. Asemasensorin tarkkuuteen vaikuttaa myös lämpötila, joten lämpötilaan suhteen vaikuttava tarkkuus on 0,0025%/Kelvin (ASM GmbH.)

Toimilaitteena toimii Bosch 0 811 404 612-servoventtiili. Venttiili on kolmeasentoinen, jonka ohjausjännite on välillä -10 – 10 Volttia. Ohjausjännitteen ollessa 0 V venttiili on keskiasennossa, jolloin tilavuusvirta ei kulje venttiilin läpi. Ohjausjännitteen ollessa 10V on venttiili täysin ääriasennossa, jolloin tilavuusvirta pääsee kulkemaan vapaasti venttiilin läpi. Ohjausjännitteen ollessa -10 V on venttiili vastakkaisessa asennossa, jolloin tilavuusvirta kulkee venttiilin läpi mutta vastakkaiseen suuntaan. Venttiilin kara liikkuu portaattomasti asemien välillä. (Bosch Rexroth)

3.1 Asemakoordinaattiohjaus sylinterin aseman perusteella

Asemakoordinaattiohjaus sylintereiden asemasta toteutetaan kuvan 4 mukaisesti Simulink ohjelmalla. Ohjelmassa käyttäjä voi manuaalisesti antaa työpään halutun Y -koordinaatin ja X -koordinaatin globaalista koordinaatistosta. Annetuista arvoista Matlab funktio laskee johdetun kinematiikan mukaisesti nostosylinterin ja taittosylinterin pituudet, jotta haluttu työpään asema toteutuisi.

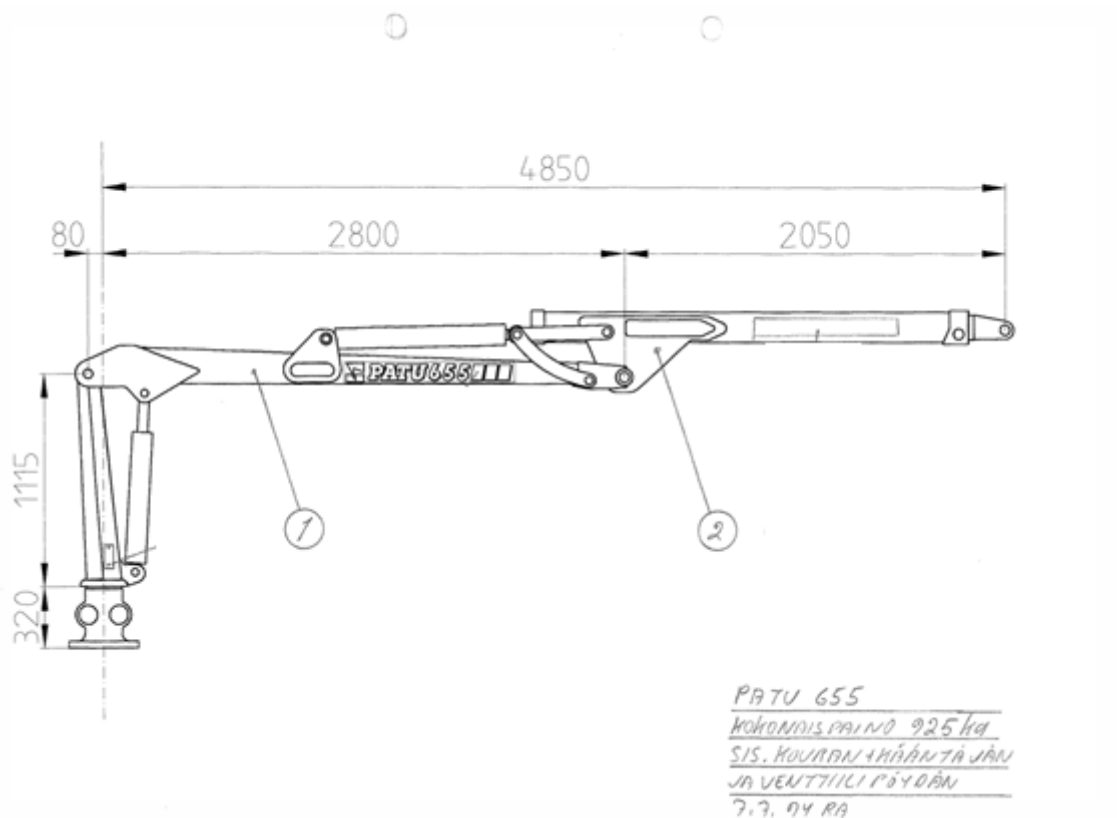


Kuva 4 Ohjainmalli asemakoordinaattiohjaukselle sylinterien asemasta

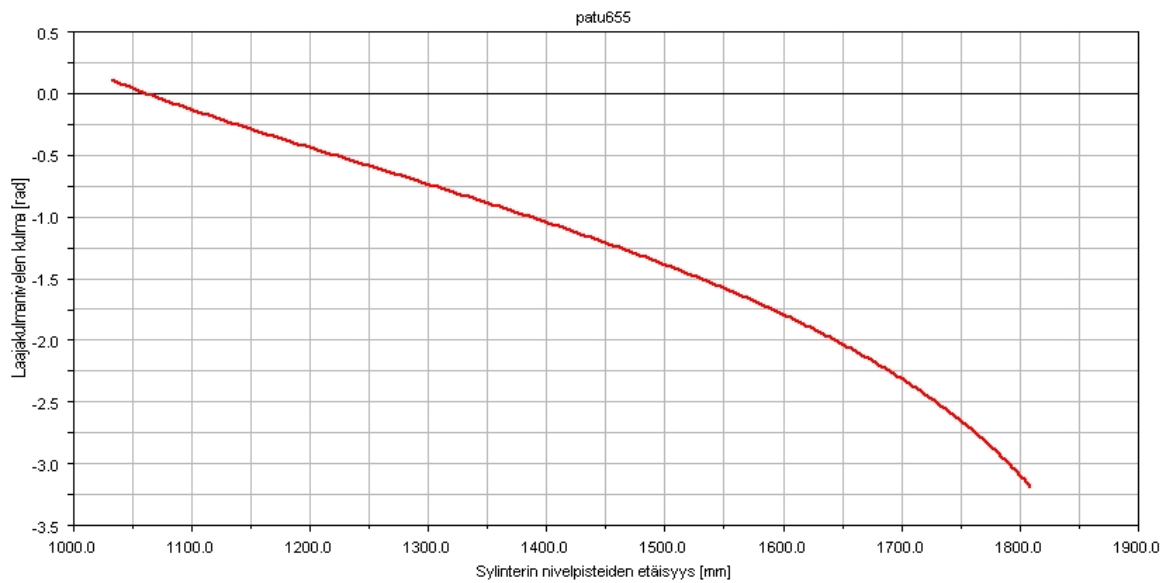
Matlab funktiossa nimeltään Kinematiikka (kuva 4), joka on kokonaisuudessaan liitteessä 1, ensimmäiseksi määritetään halutuille koordinaateille raja-arvot. Y -koordinaatti rajataan olemaan suurempi kuin -1435mm, koska muuten työpää pääsisi osumaan lattiaan kuvassa 5 esitetyn Patu 655 -kuormaimen geometrian mukaisesti. X -koordinaatille määritetään myös rajoitteet laboratorion, jossa Patu 655 -kuormain sijaitsee, tilarajoituksista johtuen. Kuvassa 5 on numeroitu kuormaimen jäsenet. Kuvassa 5 oleva ensimmäinen jäsen

kuvataan jatkossa nimellä nostopuomi. Toinen jäsen kuvataan jatkossa nimellä taittopuomi. Puomien nivelten etäisyydet vastaavat puomien pituuksia ja ne lasketaan kokoonpanopiirustuksista. Kokoonpano piirustukset eivät sisältäneet kuitenkaan kaikkia tarvittavia mittoja, joten puuttuvat mitat mitattiin itse Patu 655 -kuormaimesta.

Kinematiikka -funktiossa lasketaan Patu -655 kuormaimen geometrian mukainen käänteiskinematiikka käyttäen geometrinen ratkaisua. Käyttämällä yhtälöä 9 saadaan määritettyä taittopuomin ja nostopuomin välinen kulma eli taittokulma. Vaihtoehdot ratkaisut rajataan pois määrittämällä mihin ympyrän neljännekseen kulman halutaan asettuvan. Tässä tapauksessa taittokulmalle asennetaan ehto, joten taittokulman ollessa suurempi tai yhtä suuri kuin nolla vähennetään taittokulmasta puoli ympyrää. Taittopuomin absoluuttinen kulma ratkaistaan yhtälön 13 mukaisesti, josta saadaan laskettua myös nostokulma ja taittopuomin absoluuttinen kulma yhtälöiden 14 ja 15 mukaisesti. Nostopuomin kulman ja nostosylinterin pituuden välinen suhde lasketaan nivelien paikoista trigonometrian avulla. Kertomalla nostopuomin kulma tällä suhdeluvulla saadaan kulman arvo muutettua nostopuomin sylinterin pituudeksi. Taittopuomin kulman ja taittosylinterin aseman suhde ei ole kuormaimen geometriasta johtuen lineaarinen. Taittopuomin kulma laskettiin usealla eri taittosylinterin pituudella, jolloin saatiin kuvan 6 mukainen pistejoukko. Pistejoukosta mallinnettiin kuudennen asteen funktio, jonka arvioitiin vastaavan riittävän hyvin pistejoukosta saatuja tuloksia. Kertomalla taittopuomin kulman arvo muodostetulla kuudennen asteen funktiolla, saadaan kulman arvo muutettua taittopuomin sylinterin pituudeksi. Funktiiossa sylinterien nivelten etäisyys vastaa sylinterin pituutta. Vähennettäessä nivelten etäisyyksistä sylinterin pienin mahdollinen pituus saadaan etäisyys vastaamaan sylinterivarren asemaa sylinterissä.



Kuva 5 Patu 655 -kuormaimen geometria. (Kesla Oy, 1994, s.1)



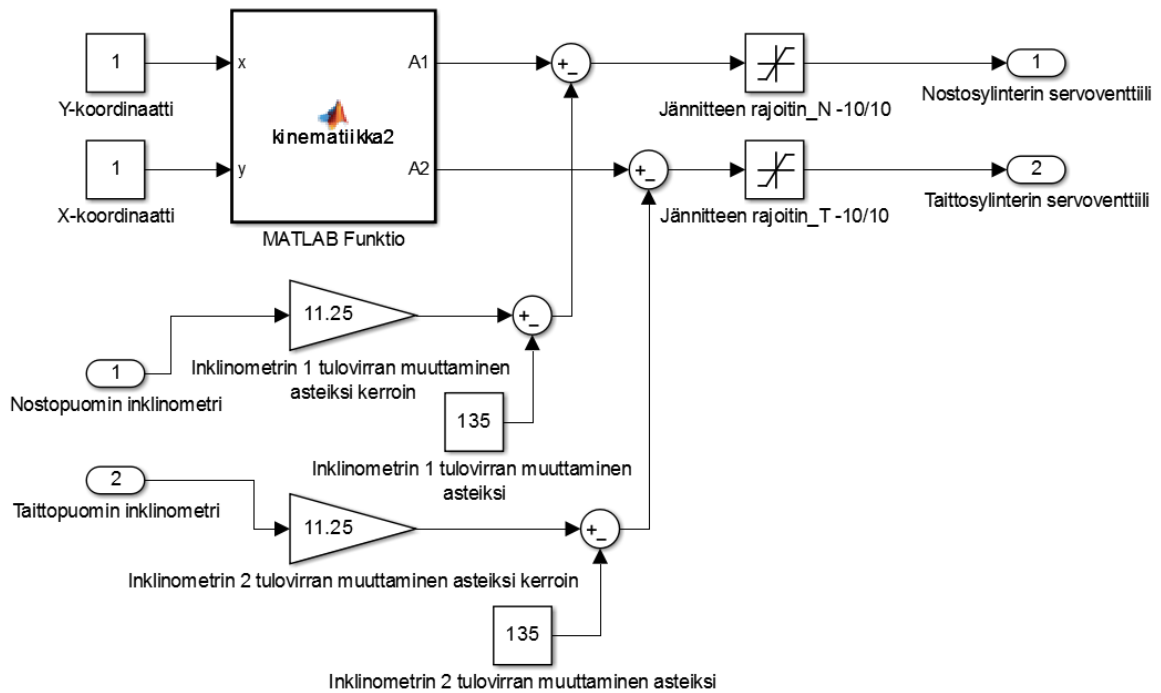
Kuva 6 Pistejoukko taittopuomin kulman suhteesta taittosylinterin nivelpisteiden etäisyyteen

Potentiometrit antavat lineaarisesti aseman muuttuessa jännitettä nolasta kymmeneen volttiin. (ASM GmbH.) Nostosylinterissä on kiertopotentiometri, johon on kiinnitetty naru. Narun pituus on 750mm, eli potentiometri pystyy mittaamaan etäisyyttä välillä 0mm-750mm. Potentiometrin suurin jännite 10V vastaa 750 mm:ä joten pitää ohjausjännite kertoa 75:llä, jotta jännite vastaa asemaa. Vastaavasti taittosylinterin potentiometrin narun pituus on 1000mm, joten täytyy potentiometriltä tuleva signaali kertoa sadalla kuvan 4 mukaisesti.

Vertailu tapahtuu kun Matlab funktiosta tulleesta signaalista vähennetään inklinometreiltä tullut signaali, jolloin tiedetään kuinka lähellä työpäätä on haluttua asemaa. Erotuksen ollessa nolla on sylinteri juuri siinä asemassa kun sen haluttiinkin olevan. Erotuksen poiketessa nolasta signaali ohjaa venttiiliä siihen suuntaan että erotuksen arvo pieneneisi. Erotuksen etumerkistä ja suuruudesta riippuen ohjelma antaa servoventtiileille ohjaussignaalin. Tavoiteaseman ja todellisen aseman ollessa suuri voi ohjaussignaali kasvaa suureksi, joten servoventtiileille menevä signaali on rajoitettu välille -10 – 10, koska Bosch 0 811 404 612-servoventtiilin sallitut ohjausjännitteet ovat välillä -10 – 10 Volttia.

3.2 Asemakoordinaattiohjaus absoluuttisten kulmien perusteella

Asemakoordinaattiohjaus absoluuttisten kulmien perusteella tapahtuu osittain samalla periaatteella kuin asemakoordinaattiohjaus sylinterien asemasta. Asemakoordinaattiohjaus absoluuttisten kulmien perusteella toteutetaan kuvan 7 mukaisesti Simulink -ohjelmalla. Ohjelmassa käyttäjä voi manuaalisesti antaa työpäähän halutun Y -koordinaatin ja X -koordinaatin globaalista koordinaatistosta. Annetuista arvoista Matlab funktio nimeltään Kinematiikka 2 laskee johdetun kinematiikan mukaisesti nostopuomin absoluuttisen kulman ja taittopuomin absoluuttisen kulman, jotta haluttu työpäähän asema toteutuisi.



Kuva 7 Ohjainmalli asemakoordinaatiohjaukselle nivelkulmista

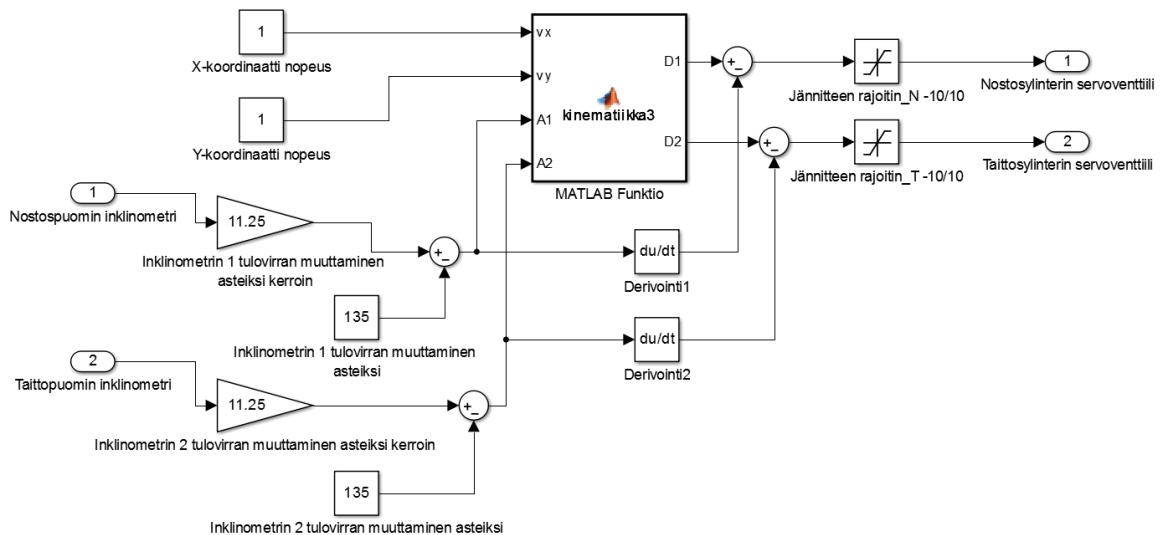
MATLAB funktiossa nimeltään Kinematiikka 2, joka on kokonaisuudessaan liitteessä 2, määritellään samat raja-arvot kuten aikaisemmin. Myös kinemaattinen malli on samanlainen, koska kinematiikka määräytyy kuormaimen geometriasta. Kinemaattisesta mallista saadaan laskettua taittopuomin ja nostopuomin absoluuttiset kulmat.

Käytössä on Asekon QG30-KI-090-AI-K inklinometri, joka kykenee näyttämään kulmaa välillä $-90 - 90$ astetta. Inklinometrit antavat ohjausvirtaa välillä $4 - 20$ mA. Ohjausvirta kerrotaan 11,25:llä ja siitä vähennetään 135, jolloin virta saadaan vastaamaan asemaa -90 ja 90 asteen välillä kuvan 7 mukaisesti.

Vertailu tapahtuu kun Matlab funktiosta tulleesta signaalista vähennetään inklinometreiltä tullut signaali, jolloin tiedetään kuinka lähellä työpäätä on haluttua asemaa. Vertailun perusteella ohjelma säättää servoventtiilien asentoa, kuten asemakoordinaatiohjauksessa sylinterien asemasta.

3.3 Nopeuskoordinaatiohjaus

Nopeuskoordinaatiohjaus toteutetaan inklinometreja käyttäen Simulink ohjelmalla kuvan 8 mukaisesti. Käytössä on sama Asekon QG30-KI-090-AI-K inklinometri, kuin asemakoordinaatiohjauksessa. Nopeuskoordinaatiohjauksessa Matlab funktio tarvitsee käyttäjän haluaman nopeuden lisäksi tietää nivelkulmien arvot. Asemakoordinaatiohjauksen absoluuttisista nivelkulmista tavoin inklinometritä tuleva ohjausvirta muutetaan vastaamaan nivelen kulmaa. Muista ohjaustavoista poiketen inklinometreiltä saatu kulman arvo derivoidaan ajan suhteen, jolloin saadaan tietää todellinen nivelten kulmanopeus.



Kuva 8 Ohjainmalli nopeuskoordinaatiohjaukselle nivelkulmista

Matlab funktio nimeltään Kinematiikka 3 on toteutettu yhtälön 31 mukaisesti ja se on kokonaisuudessaan liitteessä 3. Ensimmäisenä funktiossa on määritelty jäsenten eli nostopuomin ja taittopuomin pituudet. Inklinometreilta saadaan suoraan nivelten kulmat. Funktiossa lasketaan käänteinen Jacobin matriisi Patu 655 -kuormaimelle, joka kerrotaan käyttäjän antamasta nopeudesta muodostetulla nopeusvektorilla. Näistä tiedoista funktio laskee tarvittavat nivelten kulmanopeudet, jotta käyttäjän haluama liikenopeus toteutuisi.

Matlab funktiosta saadusta nivelten kulmanopeudesta vähennetään inklinometrien kulmasta derivoitu kulmanopeus. Erotuksen arvo ja etumerkki määrittävät servoventtiilille menevän ohjaussignaalin. Kuten muissakin ohjaustavoissa signaalin maksimiarvot ovat rajoitettu servoventtiilien rajoitusten mukaisesti. Rajoituksesta johtuen käyttäjän halutessa liian suuria liikenopeuksia ei kuormain pysty välttämättä toteuttamaan niitä.

3.4 Sensorikorjaukset

Sylinterin pituutta mittaavat potentiometrit ja nivelkulmaa mittaavat inklinometrit ovat molemmat asema-antureita, joilla on tietty virhemarginaali. Nivelkohtiin asetetut anturit eivät myöskään kykene tunnistamaan massan aiheuttamia taipumia puomeissa. Työpään aseman paikoitusta voisi tarkentaa lisäantureilla, jotka toimivat yhdessä jo olevien antureiden kanssa. Puomin taipuminen saadaan huomioitua asentamalla työpäähän anturi, joka mittaa työpään todellista asemaa. Mahdollisia antureita työpäähän asennettavaksi ovat esimerkiksi etäisyyttä mittaavat anturit ja voimia mittaavat anturit (Airila. 1996. Luku4).

Työpään etäisyyden muutosta kiinteään kohteeseen voidaan mitata esimerkiksi laserinterferometriaan perustuvalla mittauksella. Tapa perustuu laser valosta puoliläpäisevällä peilillä erotetun kahden säteen vaihe-eroon. Mittaustarkkuus voi olla jopa 200 nanometriä. Menetelmällä kyetään mittaamaan etäisyyttä mikrometriä tarkkuudella vielä kymmenien metrien etäisyydellä. Tapa on kuitenkin tarkka mitattaessa etäisyyden muutosta, eikä sillä kyetä mittaamaan absoluuttista etäisyyttä. (Airila, 1996, luku4 s.24.)

Työpäähän asettuva kuorma aiheuttaa kuormaimen vaikuttavia erilaisia voimia. Kuormasta johtuva voima on maan vetovoiman suuntainen ja aiheuttaa taipumista kuormaimen puomeihin. Voimien mittaamiseen käytetään esimerkiksi venymäliuska-antureita. Venymäliuskassa tapahtuu muodonmuutoksia siihen kohdistuvien voimien mukaisesti. Muodonmuutokset aiheuttavat muutoksen liuskan resistanssiin. Resistanssin muutoksesta voidaan laskea liuskaan kohdistuva voima, joka voidaan ottaa huomioon kuormaimen ohjauksessa, kun tiedetään kuormaimen puomien jäykkyydet. (Airila, 1996. Luku4 s.30-31.)

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

Ohjelmien toimivuutta pystyisi tarkastelemaan tarkemmin käytännön kokeilla, mutta ne on rajattu tästä työstä pois. Ohjelmista saatujen tulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa algebrallisen ja geometrisen ratkaisutavan soveltuvan hyvin kuormaimen kinemaattisen ratkaisun luomiseen.

4.1 Asemakoordinaatiohjausten vertailu

Asemakoordinaatiohjauksessa sylinterien asemasta ja nivelkulmista käytetään samaa kinemaattista mallia. Tässä työssä asemakoordinaatiohjauksessa sylinterin asemasta pystytään käyttämään osin samaa Matlab funktiota kuin asemakoordinaatiohjauksessa absoluuttisista kulmista. Asemakoordinaatiohjauksessa sylinterien asemasta lasketaan absoluuttisten kulmien lisäksi geometrian perusteella sylinterien asemat. Jokaisen rivin laskeminen vie lisää aikaa, joten voidaan sanoa asemakoordinaatiohjauksen nivelkulmista soveltuvan paremmin reaaliaikaohjaukseen. Nykyisillä tietokoneilla molemmilla ohjaustavoilla laskenta-ajat ovat kuitenkin hyvin pienet, joten reaaliaikainen ohjaus onnistuu hyvin. Ohjaustapojen soveltuvuuteen vaikuttaakin enemmän ohjaustavassa käytetyt sensorit, koska käytettyjen sensorien tarkkuuksissa on eroja.

Sensorien ominaisuudet vaikuttavat myös niiden soveltuvuuteen asemakoordinaatiohjauksessa. Potentiometrin tarkkuuteen vaikuttavat lämpötilanmuutokset, joten se soveltuu tasalämpöisiin paikkoihin, kuten sisätiloihin. Potentiometrit ovat myös herkkiä ulkoisille vaikutteille, koska potentiometrin mittanarut ovat täysin suojaamatta. Naruun osuessa jokin ulkopuolinen esine vääristyy mitattu sylinterin asema. Inklinometrit ovat paremmin suojattuja ulkoisilta vaikutteilta, joten ne soveltuvat asemakoordinaatiohjaukseen paremmin kuin rullapotiometrit, kun on mahdollisuus ulkoisiin vaikutteisiin.

4.2 Asemakoordinaatiohjauksen ja nopeuskoordinaatiohjauksen vertailu

Molemmissa tapauksissa, asemakoordinaatiohjauksessa ja nopeuskoordinaatiohjauksessa, ohjelmien rivimäärät ovat niin pieniä että molemmat soveltuvat hyvin reaaliaikaiseen Patu 655 -kuormaimen ohjaamiseen. Ohjaustavan

soveltuvuus reaaliaikaiseen ohjaukseen vaikuttaa enemmän käyttökohde. Asemakoordinaatiohjouksessa työpäälle annetaan haluttu asema, mutta käyttäjä ei pysty vaikuttamaan aikaan, jolloin kuormaimen työpää on saavuttanut halutun aseman. Nopeuskoordinaatiohjouksessa taas työpäälle annetaan haluttu nopeus, jonka mukaan se liikkuu. Tietyn aseman saavuttaminen on hankalaa, koska käyttäjän pitäisi tietää tarkalleen aika, jossa työpää saavuttaa halutun aseman. Asemakoordinaatiohjaus soveltuu paremmin tapaukseen, jossa työpää saavuttaa tietyn aseman, jonka jälkeen se saa seuraavan käskyn. Tällainen tapaus on kun tarvitaan esimerkiksi siirtää kappaleita paikasta toiseen. Nopeuskoordinaatiohjaus soveltuu taas paremmin tapaukseen, jossa työpään täytyy seurata tietyllä nopeudella liikkuvaa kohdetta. Tällainen tapaus on esimerkiksi liukuhihnalla liikkuva kappale, johon työpää pystyy tekemään halutun toiminnon ilman kappaleen tarvetta pysähtyä. Nopeuskoordinaatiohjaus soveltuu myös suoraan ohjainsauvaohjaukseen, jolloin säädin muuttaa ohjainsauvan aseman nopeudeksi. Tällaisia kohteita on yleisesti käytössä työkoneisiin asennetuissa kuormaimissa.

4.3 Ohjauksen tarkkuuden parantaminen

Asemakoordinaatiohjaus ja nopeuskoordinaatiohjaus on toteutettu täysin jäykälle kuormaimelle ideaalitapauksessa. Ohjaustavat eivät ota huomioon esimerkiksi nivelissä mahdollisesti olevia välyksiä. Välykset voidaan huomioida joko käytännön testeillä kalibroimalla ohjelma tarvittavilla kertoimilla tai käyttää etäisyyttä mittaavia sensoreita mittaamaan työpään todellista paikkaa. Kuormaimen joustavuutta ei myöskään ole huomioitu tehdyissä ohjelmissa, joten tarkkuutta voidaan lisätä myös antureilla, joilla saadaan huomioitua joustavuus.

Ohjelman kalibroinnissa käytännön testeillä voidaan asema-anturin signaalia muuttaa sen mukaan kuinka paljon haluttu asema poikkeaa halutusta käytännön testeillä. Työpää ajetaan mielivaltaiseen paikkaan, jonka jälleen mitataan työpään todellinen paikka. Signaalille annetaan arvioitu arvo ja toistetaan mittaukset. Näin saadaan iteroimalla kalibroituja ohjelmalle tarvittavat kertoimet. Tässä työssä ei kuitenkaan käytännön testeihin ollut mahdollisuutta, joten ohjelman kalibrointia ei voitu suorittaa. Tarkkuutta voidaan lisätä myös sensoreilla, jotka mittaavat työpään todellista asemaa. Sensorit voidaan lisätä säätimeen inklinometrin tai potentiometrin rinnalle muodostamalla toinen vertailija. Tässä

tapauksessa voidaan asema-anturilla korvata välyksistä johtuvat virheet, joten välyksistä johtuvaa kalibrointiakaan ei tarvitse käytännön testeillä suorittaa.

Käytetyillä sensoreilla on myös virhettä, kuten jo aikaisemmin on huomattu. Sensorien virhe johtaa myös työpään aseman epätarkkuuteen. Sensorien virheestä johtuvaa epätarkkuutta voidaan vähentää joko valitsemalla tarkemmat sensorit tai suorittamalla jo edellä mainittu käytännön testeillä suoritettu ohjelman kalibrointi. Ohjelmaa luodessa voi myös geometriset virheet olla mahdollisia. Geometria on mallinnettu osittain valmistuspiirustuksien mukaisesti eivätkä ne välttämättä toleransseista johtuen täsmää kyseiseen kuormaimen. Jokaiselle kuormaimelle joudutaan tekemään ohjelman kalibrointi, jotta ohjelma toimisi mahdollisimman tarkasti juuri kyseisellä kuormaimella.

Kinematiikka olettaa nivelvarret jäykiksi. Todellisuudessa kuormaimen puomit joustavat, jolloin työpään asema poikkeaa oletetusta paikasta puomin jäykkyyden mukaisesti. Mitä enemmän työpäähän asetetaan massaa sitä enemmän puomit taipuvat. Puomien joustavuus voidaan huomioida kinemaattisen mallin luomisessa, kun tiedetään työpäähän kohdistuva kuormasta aiheutuva voima. Työpäähän asetettu venymäliuska ilmaisee kuormasta aiheutuvan voiman. Venymäliuskan resistanssin muutos voidaan huomioida ohjelmassa, jossa resistanssin muutos suhteutetaan puomin jäykkyyteen. Muodostamalla uusi vertailija saadulle tulokselle, osaa ohjelma huomioida kuormasta aiheutuvan taipumisen puomeissa.

Ohjauksen tarkkuuden lisääminen toteutetaan sen mukaan millaisiin tarkkuuksiin halutaan päästä. Sensorien lisääminen vaatii lisää laskentatehoa ohjelman käyttämiseksi. Ohjelmaa käyttäessä ohjaussauvalla, voi käyttäjä itse huomioida työpään aseman, joten ohjelmalta ei tarvita niin suurta tarkkuutta. Automatisoinnissa tarkkuutta kuitenkin tarvitaan, joten tarkkuutta voidaan parantaa edellä mainituin keinoin, jotta kohteesta riippuva automatisointi saadaan toimivaksi.

5 YHTEENVETO

Työssä johdettiin käänteiskinemaattinen malli Patu 655 -kuormaimelle geometrisella ratkaisutavalla sekä algebrallisella ratkaisutavalla. Geometrisellä ratkaisutavalla saatua käänteiskinemaattista mallia sovellettiin asemakoordinaattiohjaukseen. Asemakoordinaattiohjaus toteutettiin sylinterien asemasta käyttäen mittasensoreina rullapotentiometrejä. Asemakoordinaattiohjaus toteutettiin myös puomien välisten nivelkulmien absoluuttisten kulmien perusteella, jolloin sensoreina käytettiin inklinometrejä mittaamaan nivelkulmia. Algebrallisella ratkaisutavalla saatua käänteiskinemaattista mallia käytettiin nopeuskoordinaattiohjauksessa. Nopeuskoordinaattiohjauksessa käytettiin sensorina nivelkulmia mittaavia inklinometrejä, joiden mittaustulokset saatiin kulmanopeudeksi derivoimalla kulmaa ajan suhteen.

Koordinaattiohjausten soveltuvuutta PATU -655 kuormaimelle vertailtiin. Paremman vertailun saamiseksi huomattiin tarvittavan käytännön koejärjestelyjä. Vertailu toteutettiin tässä työssä vain teoriassa. Vertailun mukaan käytetyt sensorit vaikuttavat enemmän ohjaustavan soveltuvuuteen kuin itse ohjaustavassa käytetty ohjelma. Sensoreiden virheissä oli eroja, sekä kyvyssä sopeutua ulkopuolisiin vaikutteisiin, kuten lämpötilaeroihin. Soveltuvuuteen vaikuttaa myös olennaisesti kuormaimen käyttökohde. Etenkin automatisoinnissa soveltuvuuteen vaikuttaa, onko tarkoitus käyttää kuormainta paikallaan olevaan työkohteeseen vai liikkuvaan työkohteeseen. Asemakoordinaattiohjaus soveltui paremmin paikallaan olevaan työkohteeseen, kun taas nopeuskoordinaattiohjaus soveltui paremmin liikkuvaan työkohteeseen.

Lisäsensoreiden mahdollista käyttöä kuormaimen työpään aseman tarkkuuden parantamiseksi tutkittiin. Etäisyyttä mittaavien sensorien käytön huomattiin parantavan ohjauksen tarkkuutta. Voimia mittaavien sensorien huomattiin parantavan ohjauksen tarkkuutta, kun työkohteen paino kohdistuu kuormaimen.

LÄHTEET

Airila, Mauri. 1996. Mekatroniikka. 4. korjattu painos. Espoo: Otatieto. luku3s.1 – luku4s.31. ISBN 951-672-239-3

Aseko, Qudro-G opas [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2013] Saatavilla: <http://aseko09.onet.tehonetti.fi/data/attachments/QUADRO.pdf>

ASM GmbH, Positions-Sensor Model WS1.1 [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2013] Saatavilla: http://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/ws1_1_en.pdf

Bosch Rexroth, Servo solenoid valves with on-board electronics [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.5.2013] Saatavilla: <http://www.57382299.com/admin/wendang/4/0811404601.pdf>

Craig, John J. 1986. Introduction to robotics, mechanics & control. USA: Addison-Wesley Publishing Company. s.46 – 146. ISBN 0-201-10326-5

Hoekstra, Robert L. 1986. Robotics and automated systems. North-Holland. s.465 – 473. ISBN 0-444-879021

Kesla Oy. 1994. Patu 655 Osaluettelo. s.1.

Kurfess, Thomas R. 2005. Robotics and automation handbook. Yhdysvallat: CRC Press. --s. ISBN 0-8493-1804-1

Salmi, Tapio. 1996. Dynamiikka 1 kinematiikka. 4. Painos. Tampere: Pressus. s.11. ISBN952-9835-20-5

Matlab funktio asemakoordinaattiohjaukselle sylinterien asemasta

```

% KÄÄNTEISKINEMATIikka PATU 655-KUORMAIMELLE
% KANDIDAATINTYÖ
% TIMO ESKELINEN

function [S1,S2] = kinematiikka(x,y)
%inputs: x,y -koordinaatit
%outputs: S1,S2 = sylinterien iskunpituudet
% liikealueen rajoitus demoa varten
if y<-1435
y=-1435;
elseif y>1000
y=1000;
end
if x<2500
x=2500;
elseif x>4500
x=4500;
end
% Käänteiskinematiikka
% Nostopuomin pituus
lNosto=sqrt(2880);
% Taittopuomin pituus
lTaitto=sqrt((2050)^2+(272.21-24.21)^2);
nostokulma=0;
% Nostopuomin ja taittopuomin välinen kulma
c=sqrt(x^2+y^2);
taittokulma=acos(((lNosto)^2+(lTaitto)^2-c^2)/(2*lNosto*lTaitto));
if taittokulma>=0
taittokulma=taittokulma-pi;
end
% Taittopuomin ja x-akselin välinen kulma
d=acos((x^2+y^2+(lNosto)^2-(lTaitto)^2)/(2*lNosto*sqrt(x^2+y^2)));
if x>=0
e=atan(y/x);
nostokulma=e+d;
end
if x<0
e=pi-atan(y/abs(x));
nostokulma=e+d;
end
% Nostosylinterin paikoituksesta johtuvat hukkakulmat
alfa=atan(105/302.5);
beta=atan(260/1040);
nostokulma=nostokulma+pi/2-alfa-beta;
% FUNKTIO KULMAN JA NOSTOSYLINTERIN ASEMAN VÄLILLE:
BD=sqrt(302.5^2+105^2);
BC=sqrt(260^2+1040^2);
s1=sqrt(BD^2 + BC^2 - 2*BD*BC*cos(nostokulma));
% Poistetaan nostosylinterin nollapituus
S1=s1-800;
if S1<0
S1=0;
elseif S1>535
S1=535;

```

```
end
% FUNKTIO KULMAN JA TAITTOSYLINTERIN ASEMAN VÄLILLE:
s2= 0.43225879*taittokulma.^6 + 6.05762*taittokulma.^5
+ 36.607826*taittokulma.^4 + 114.397719*taittokulma.^3
+ 130.809090*taittokulma.^2 - 277.59654*taittokulma + 1061.115446;
% Poistetaan taittosylinterin nollapituus
S2=s2-1050;
if S2<0
S2=0;
elseif S2>780
S2=780;
end
end
% eof
```


Matlab funktio asemakoordinaattiohjaukselle absoluuttisista kulmista

```

% KÄÄNTEISKINEMATIikka PATU 655-KUORMAIMELLE
% KANDIDAATINTYÖ
% TIMO ESKELINEN

function [A1,A2] = kinematiikka2(x,y)
%inputs: x,y -koordinaatit
%outputs: S1,S2 = sylinterien iskunpituudet
% liikealueen rajoitus demoa varten
if y<-1435
y=-1435;
elseif y>1000
y=1000;
end
if x<2500
x=2500;
elseif x>4500
x=4500;
end
% Käänteiskinematiikka
% Nostopuomin pituus
lNosto=sqrt(2880);
% Taittopuomin pituus
lTaitto=sqrt((2050)^2+(272.21-24.21)^2);
nostokulma=0;
% Nostopuomin ja taittopuomin välinen kulma
c=sqrt(x^2+y^2);
taittokulma=acos(((lNosto)^2+(lTaitto)^2-c^2)/(2*lNosto*lTaitto));
if taittokulma>=0
taittokulma=taittokulma-pi;
end
A2=taittokulma
% Taittopuomin ja x-akselin välinen kulma
d=acos((x^2+y^2+(lNosto)^2-(lTaitto)^2)/(2*lNosto*sqrt(x^2+y^2)));
if x>=0
e=atan(y/x);
nostokulma=e+d;
end
if x<0
e=pi-atan(y/abs(x));
nostokulma=e+d;
end
% Nostosylinterin paikoituksesta johtuvat hukkakulmat
alfa=atan(105/302.5);
beta=atan(260/1040);
A1=nostokulma+pi/2-alfa-beta;

end
% eof

```

Matlab funktio nopeuskoordinaattiohjaukselle kulmanopeuksista

```

% KÄÄNTEISKINEMATIikka PATU 655-KUORMAIMELLE
% KANDIDAATINTYÖ
% TIMO ESKELINEN

function [D1,D2] = kinematiikka3(vx,vy,A1,A2)
%inputs: vx,vy -nopeuskoordinaatit ja s1, s2 paikkakoordinaatit
%outputs: D1,D2 = Kulmanopeudet

% Nostopuomin pituus
lNosto=sqrt(2880);

% Taittopuomin pituus
lTaitto=sqrt((2050)^2+(272.21-24.21)^2);

% Inklinometriltä saadutu kulman asemat
taittokulma=A2;
nostokulma=A1;

%Käänteinen Jacobin matiriisi determinantin avulla laskettuna
detJ=1/((lNosto*cos(A1+A2)*(-lNosto*sin(A1)-lTaitto*sin(A1+A2)))-(-lTaitto*sin(A1+A2)*(lNosto*cos(A1)+lTaitto*cos(A1+A2))));

Jref=[lTaitto*cos(taittokulma+nostokulma) -lNosto*cos(nostokulma)-lTaitto*cos(nostokulma+taittokulma)
lTaitto*sin(nostokulma+taittokulma) -lNosto*sin(nostokulma)-lTaitto*sin(nostokulma+taittokulma)];

kaantJ=detJ*Jref

% Haluttujen nopeuksien nopeusvektori
v=[vx; vy];

% Lasketaan nopeusmatriisi
nopeusmatriisi=kaantJ*v

% Kulmien kulmanopeudet
D1=nopeusmatriisi(1,1)
D2=nopeusmatriisi(2,1)
end
% eof

```