



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan korkeakoulu

Ville Matikainen

## **Traktorin kehittyneen takanostolaitteen karteellinen ohjaus**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 21.5.2012

Valvoja: Professori Arto Visala

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Juha Backman

AALTO-YLIOPISTO PL 15500, 00076 Aalto <a href="http://autsys.tkk.fi/">http://autsys.tkk.fi/</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Ville Matikainen			
Työn nimi: Traktorin kehittyneen takanostolaitteen karteeminen ohjaus			
Korkeakoulu: Sähkötekniikan korkeakoulu			
Laitos: Automaatio- ja systeemitekniikka			
Professori: Autonomiset järjestelmät		Koodi: Aut-84	
Työn valvoja: Professori Arto Visala			
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Juha Backman			
<p>Traktorin tavanomainen takanostolaite tarjoaa yhden ajon aikana ohjattavan vapausasteen. Monissa työtehtävissä olisi kuitenkin hyötyä nostolaitteen vapaammasta liikuteltavuudesta. Tässä tutkimuksessa instrumentoitiin testitraktori lisäsynterein ja tarvittavin mittauksin siten että saavutettiin neljä ohjattavaa vapausastetta. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää kehittyneemmälle nostolaitteelle operaattorin kannalta helppokäyttöinen ohjaus, jossa yksittäisten sylinterien sijaan ohjataan nostolaitteen paikkaa ja asentoa karteesisessä avaruudessa.</p> <p>Jotta nostolaite olisi karteesisesti ohjattavissa, laadittiin nostolaitteesta neljä erilaista käänteistä kinemaattista mallia ja vertailtiin näitä. Ensimmäinen malli määritettiin nostolaitteen geometriasta työntövartta lukuunottamatta, joka laskettiin rotaatiomatriisilla. Toisessa mallissa vetovarsien ohjaukset laskettiin iteratiivisella DLS-mallilla ja työntövarsi määritettiin rotaatiomatriisilla. Kolmas malli perustui myös DLS-ratkaisuun, mutta työntövarren jakobiaani oli augmentoitu varsinaisen nostolaitteen käännetyin jakobiaanin perään. Neljäs, algebrallinen malli osoittautui laskennallisesti monimutkaiseksi ja jätettiin siksi pois varsinaisista testeistä.</p> <p>Ohjausjärjestelmän testaamiseksi todellisessa laitteistossa laadittiin kaksitasoinen sulautettu ohjausjärjestelmä. PhyCORE MPC555 –tietokone suoritti analogisten mittausten luvun ja yksittäisten sylinterien ohjauksen. Toradex Colibri –tietokone kommunikoi käyttäjän kanssa virtuaaliterminaalin ja joystickin välityksellä, laski käänteisen kinemaattisen muunnoksen halutun karteesisen paikan perusteella ja lähetti sylinterien ohjaukset MPC:lle. Molempien tietokoneiden ohjelmistokehityksessä hyödynnettiin Matlabin Simulink-työkalun C-koodigenerointimahdollisuuksia. Nostolaitteelle toteutettiin myös virtuaaliterminaalikäyttöliittymä PoolEdit-työkalulla.</p> <p>Kaikki kolme testattua mallia toimivat loogisesti oikein ja tarjosivat käyttäjälle intuitiivisen ohjaustuntuman. Mallien absoluuttisessa tarkkuudessa ja toistotarkkuudessa oli pieniä, mutta havaittavia eroja. Voidaan todeta, että saadut ratkaisut tarjoavat takanostolaitteelle monipuolisempaa ohjattavuutta aiheuttamatta operaattorille merkittävää lisäkuormitusta.</p>			
Päivämäärä: 21.5.2012		Kieli: suomi	Sivumäärä: 10 + 69
Avainsanat: ISO 11783, robotiikka, mekatronikka, käänteinen kinematiikka			

AALTO UNIVERSITY PO Box 15500, FI-00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>	ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Ville Matikainen		
Title: Cartesian control of an advanced tractor's rear hitch		
School: School of Electrical Engineering		
Department: Automation and Systems Technology		
Professorship: Autonomous Systems	Code: Aut-84	
Supervisor: Professor Arto Visala		
Instructor: Master of Science Juha Backman		
<p>The movement of a traditional three-point hitch of an agricultural tractor provides one degree of freedom. This limits the use of hitched implements and forces implement manufacturers to build additional hydraulics into the implement. In this research a tractor was instrumented to provide two rotational and two translational degrees of freedom for the rear hitch. The goal was to develop a control system which allows the operator to control the rear hitch in Cartesian space.</p> <p>To allow Cartesian control four different models of the inverse kinematics of the rear hitch were developed. Three of them were chosen for field tests based on feasibility for real-time control. First model was a geometrical one. A hybrid model used the iterative DLS-method for calculating the inverse kinematics for the lower links from the direct kinematic transform and rotation matrix for calculating the upper link control. Third model used DLS-method with a few modifications: the restriction for the lower hitch point span was considered as one state of the system and also the jacobian of the upper link was augmented to the inversed jacobian. Algebraic solution proved too complex and was thus not tested.</p> <p>For controlling the rear hitch a system of two ECUs was made. A PhyCORE MPC555-computer module was used to read analog measurements and control the cylinders of the rear hitch. A Toradex Colibri computer module was used to calculate the inverse kinematics and to handle communications with the user via a joystick and a virtual terminal. In software development Simulink C-code generation was utilized for both computers. A user interface for VT was also developed with PoolEdit.</p> <p>All three kinematical models provided logically correct behavior in the actual test tractor, with minor differences in repeatability and absolute accuracy. The system provides a good solution to situations where controllability of the implement is advantageous without requiring extra effort from the operator.</p>		
Date: 21.5.2012	Language: Finnish	Number of pages: 10 + 69
Keywords: ISO 11783, robotics, mechatronics, inverse kinematics		

## Alkusanat

*Kiitokset valvojalleni professori Arto Visalalle mahdollisuudesta työskennellä tämän haastavan ja mielenkiintoisen aiheen parissa. Kiitos myös lujasta uskosta työn hyödyllisyyden suhteen ja innostuksesta aihetta kohtaan.*

*DI Juha Backmanille erityiskiitokset työni ohjauksesta. Ilman hänen vahvaa teknillistä osaamistaan työni anti olisi jäänyt paljon köyhemmäksi.*

*Kiitos DI Sami Kielostolle elektroniikan arvioinnista ja avusta valmistusprosessissa. Kiitos myös MTT Vakolan Raimo Linkolehdolle teknisestä konsultaatiosta kentällä sekä traktorin instrumentoinnista.*

Espoo 21.5.2012

*Ville Matikainen*

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat.....	IV
Sisällysluettelo .....	V
Symbolit.....	VII
Määritelmät .....	IX
Lyhenteet.....	X
1 Johdanto .....	1
1.1.1 Tutkimusongelma.....	1
1.1.2 Tutkimuksen tavoite.....	1
1.1.3 Tutkimuksen rajaukset .....	2
1.1.4 Työn rakenne.....	2
1.2 Takanostolaite .....	2
1.2.1 Yleistä .....	2
1.2.2 Vetovastussäätö.....	4
1.2.3 Hydraulinen työntövarsi.....	4
1.2.4 Farmix-takanostolaite.....	5
1.2.5 John Deeren heksapodinostolaite.....	5
1.2.6 Lhlink .....	6
1.3 ISO 11783.....	6
1.4 Hydraulisynterinin mallinnus .....	11
1.5 Sarjakinemaattinen rakenne.....	12
1.5.1 Suora kinemaattinen ratkaisu .....	13
1.5.2 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu .....	14
1.6 Rinnakkaiskinemaattinen rakenne .....	14
1.6.1 Suora kinemaattinen ratkaisu .....	15
1.6.2 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu .....	16
2 Menetelmät.....	17
2.1 Traktorin ominaisuudet ja instrumentointi .....	17
2.2 Takanostolaitteen mallinnus.....	18
2.2.1 Muunnos kulmakoordinaateista toimilaittekoordinaatteihin.....	20

2.2.2	Muunnos toimilaittekoordinaateista kulmakoordinaatteihin.....	22
2.2.3	Suora kinemaattinen ratkaisu .....	25
2.2.4	Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 1: geometrinen .....	28
2.2.5	Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 2: algebrallinen .....	29
2.2.6	Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 3: DLS.....	30
2.2.7	Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 4: hybridiratkaisu .....	33
2.2.8	Kinemaattiset rajoitukset.....	34
2.3	Sylinterien yksikkösäätö.....	34
2.3.1	Sylinterien parametrien identifiointi .....	34
2.3.2	Säätimien viritys .....	35
2.4	Elektroniikka .....	35
2.4.1	PhyCORE-MPC555 .....	36
2.4.2	Toradex Colibri PXA320 ja Toradex Protea.....	37
2.4.3	Liitäntälevy .....	37
2.4.4	BlackBox.....	38
2.5	Ohjelmisto .....	39
2.5.1	AgroMassi-alusta ja työkaluketju .....	39
2.5.2	PoolEdit ja johdannaiset.....	40
2.5.3	MPC555 ja työkaluketju .....	40
2.5.4	Nostolaitesimulaattori .....	40
2.5.5	SAE J1939-joystickemulaattori .....	42
2.5.6	MPC555-ohjelmat .....	42
2.5.7	Amecu_rearhitch –pääohjelma.....	44
3	Tulokset.....	47
3.1	Sylinterien parametrien identifioinnit.....	47
3.2	Nostolaitteen paikoitus .....	49
4	Tulosten arviointi .....	55
4.1	Yleisesti nostolaitteesta .....	55
4.2	Elektroniikka .....	55
4.3	Ohjelmisto .....	56
4.4	Nostolaitteen mallit .....	56
4.5	Yksikkösäätimet .....	57
4.6	Painesäätö .....	57
4.7	Käytettävyys .....	57

4.8 Sovelluskohteet .....	58
5 Päätelmät .....	59
Lähdeluettelo .....	60
LIITE A: Määritetyt valmistajakohtaiset viestit .....	63
LIITE B: Paikoituskokeiden mittaustulokset .....	64
LIITE C: yhtälöiden ratkaisuja .....	67

## Symbolit

<b>A</b>	Nostotangon kiinnityspiste vetovarressa
<b>B</b>	Sivurajoittimen kiinnityspiste vetovarren kiinnityskorvakkeeseen
<b>B'</b>	Kiinnityskorvakkeen kiinnityspiste vetovarteon
<b>C</b>	Sivurajoittimen traktorin pään kiinnityspiste
$d_A^B$	Kahden pisteen, tässä A ja B, välinen etäisyys
<b>e</b>	Nostolaitteen nykyisen ja halutun karteesisen posen välinen erotus
<b>i, j</b>	Tason kantavektorit
<b>L</b>	Vasemman vetovarren pään paikka
<b>L<sub>0</sub></b>	Vasemman vetovarren kiinnityspiste traktorissa
<b>O</b>	Origo
<b>Q</b>	Nostovarren kiinnityspiste traktoriin
<b>R</b>	Oikean vetovarren pään paikka
<b>R<sub>0</sub></b>	Oikean vetovarren kiinnityspiste traktorissa
<b>S</b>	Nostovarren kiinnityspiste nostotankoon
<b>s</b>	Nostolaitteen nykyinen karteesinen pose
<b>T</b>	Nostolaitteen haluttu karteesinen pose
<b>U</b>	Työntövarren kiinnityspiste työkoneessa
$x_T$	Pisteen T x-koordinaatti, vastaavasti muille koordinaateille ja muille pisteille
$\alpha$	Roll-kulma
$\beta$	Pitch-kulma
$\gamma$	Yaw-kulma
$\theta$	Ohjauskulmavektori
$\theta_{xl}$	Kiertymä. Ensimmäinen alaindeksi ilmaisee akselin, toinen käytettävän varren
$\lambda$	Vaimennuskerroin DLS:n laskennassa
$\mu$	Askelpituus DLS:n laskennassa



## Määritelmät

AD-muunnin	Muuttaa analogisen signaalin digitaaliseksi
Heksapodi	Kuudella jalalla alustastaan kiinnitetty toinen alusta
Kehys	Tapa kuvata tietyn pisteen paikka ja orientaatio avaruudessa
Käänteinen kinemaattinen muunnos	Muunnos karteesisesta koordinaatistosta nivelkoordinaateiksi
Nostolaite	Laite nostettavan työkoneen kiinnittämiseksi traktoriin
Pose	Pisteen paikka ja asento
Suora kinemaattinen muunnos	Muunnos nivelkoordinaateista kaarteeseen koordinaatistoon
Traktorikoordinaatisto	Traktoriin kiinnitetty karteesinen koordinaatisto
Transformaatiomatriisi	Matriisi, joka kuvaa sekä kehyksen siirtymän että kiertymän
Translaatiovektori	Vektori, joka kuvaa kehyksen siirtymän

## Lyhenteet

AM	Agromassi
CAN	Controller Area Network
DLS	Damped Least Squares, vaimennettu pienin neliösumma
ETP	Extended Transport Protocol, ISO 11783:n määrittämä protokolla suurien viestien lähetykseen
GE	Group Extension, ryhmälaajenne, lisäviestiavaruus kohdentamattomille viesteille
GPIO	General Purpose Input-Output, yleiskäyttöinen IO
IMU	Inertial Measurement Unit
ISO	International Organization for Standardization
MTT	Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus
OSI	Open Systems Interconnection
PDU	Protocol Data Unit
PGN	Parameter Group Number, viestin tunnistetieto
PS	PDU Specific, tietylle osoitteelle kohdennettu viestitunniste
SA	Source Address, lähdeosoite
SBC	Single Board Computer
TECU	Tractor Electronic Control Unit
TEKES	Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus
UT	Universal Terminal, entinen Virtual Terminal
VT	Virtual Terminal, nykyisin UT

# 1 Johdanto

Traktorin takanostolaite on pysynyt rakenteellisesti muuttumattomana 1930-luvulta lähtien. Nostolaitteen vapaampi ohjattavuus mahdollistaisi kuitenkin nykyisten työkoneiden monipuolisemman käytön sekä kenties täysin uudentyyppisten työkoneiden suunnittelun. Tässä työssä tutkittiin miten kehittyneempää nostolaitetta tulisi ohjata.

Tämä diplomityö on osa Agromassi-projektia (assisting and adaptive agricultural machine), jossa ovat Aalto-yliopiston lisäksi mukana Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT), Helsingin yliopisto sekä 11 maatalouskone ja –ohjelmistovalmistajaa: Arctic Machine, Elho, Junkkari, Kemira, Parker-Hannifin, Potila, Suonentieto, Valio, Valtra, Vieskan Metalli ja Wapice. Agromassi on osa Effima-ohjelmaa, jossa 70% tutkimuslaitosten ja 30% yritysten työstä on TEKESin rahoittamaa.

Agromassi-projektissa on tarkoitus kehittää maatalouteen ratkaisuja, jotka helpottavat operaattorin tehtäviä sekä parantavat työn tehokkuutta ja taloudellisuutta. Projektin eri osa-alueet ovat mekatroninen automaatio ja ohjaus, operointiaika, maanviljelysprosessin hallinta sekä urakoinnin tukitoiminnot.

## 1.1.1 Tutkimusongelma

Takanostolaitteen rakenne on ensisijaisesti suunniteltu työkoneiden vetämiseen. Perinteisessä takanostolaitteessa ainoastaan nostokorkeus on ajonaikaisesti ohjattavissa. Tutkimuksen nostolaitteeseen lisättiin ajon aikana ohjattavia vapausasteita: sivurajoittimet, kallistus ja työntövarsi. Näiden hallitseminen yksitellen on käyttäjälle hankalaa ja epäintuitiivista jonka vuoksi on tarvetta kehittää käyttäjälle loogisempi ohjaustapa.

## 1.1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on laatia malli takanostolaitteen kinematiikasta ja toteuttaa tämän pohjalta karteeminen ohjaus. Lisäksi suunnitellaan ja rakennetaan tarvittavat laitteistot, joilla ohjausta pystytään testaamaan todellisessa traktorissa. Toissijaisena tavoitteena on myös edelleen testata ja tarvittaessa kehittää Agromassi-projektissa kehitettyä työkaluketjua.

## 1.1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa ei ole kehitetty ohjausta mitään tiettyä työkonetta silmällä pitäen, vaan yleisesti generiselle kolmipistekiinnitteiselle työkoneelle. Kuten tutkimusprojekteissa

yleensäkin, tutkimuksen tarkoituksena ei ole kehittää valmista kuluttajatuotetta, vaan prototyyppi menetelmien testaamiseen. Tämän vuoksi laitteen käyttöliittymä on suunniteltu valistuneelle käyttäjälle, jolle sen toiminta on perehdytetty. Elektroniikan ympäristön kestävyys ja myöhempään saatavuuteen ei myöskään ole kiinnitetty erityisempää huomiota.

#### **1.1.4 Työn rakenne**

Tässä luvussa kuvataan ensin tutkimuksen tausta, tutkimusongelma, asetetut tavoitteet sekä työn yleinen rakenne. Sen jälkeen esitellään traktorin takanostolaite jota seuraa nostolaitteen ohjauksen kannalta olennaisen ISO 11783-standardin esittely. Kappaleessa 1.4 kerrotaan hydraulisynterinin mallinnuksesta, jonka jälkeen kappaleissa 1.5 ja 1.6 esitellään sarja- ja rinnakkaiskinemaattiset rakenteet.

Tämän jälkeen luvussa kaksi esitetään kehitetyt menetelmät, johon kuuluvat nostolaitteen mallinnus sekä elektroniikan ja ohjelmistojen suunnittelu. Seuraavaksi luvussa kolme esitetään saadut tulokset, joiden pohjalta tehtyä pohdintaa on luvussa neljä. Viimeisessä luvussa tehdään johtopäätökset tehdyn työn pohjalta.

### **1.2 Takanostolaite**

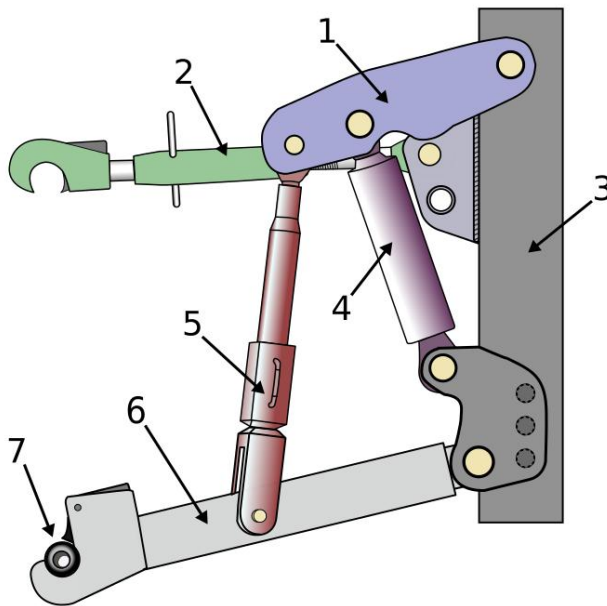
Tässä kappaleessa esitellään ensin takanostolaitteen historia ja sen olennaisimmat komponentit, jonka jälkeen kerrotaan vetovastussäädöstä ja hydraulisesta työntövarresta. Seuraavaksi kerrotaan aikaisemmassa Farmix-projektissa kehitetystä nostolaiteratkaisusta, jota seuraa John Deeren patentoiman kuuden vapausasteen nostolaitteen esittely. Lopuksi mainitaan suomalaisen Lhliftin kehittämä käännettävä etunostolaite Lhlink.

#### **1.2.1 Yleistä**

Kolmipistenostolaitteita löytyy nykyisin sekä traktorin edestä että takaa, joista takanostolaite on yleisempi. Tässä työssä vastedes puhutaan traktorin kolmipistetakanostolaitteesta vain lyhyesti nostolaitteena.

Harry Ferguson ei suoranaisesti keksinyt kolmipistenostolaitetta, mutta hänen ideoidensa ansiosta siitä tuli toimiva ja houkutteleva järjestelmä. Kantava ajatus oli, että ylin varsi, työntövarsi, siirtää osan vedettävän työkoneseen, kuten auran, vetovastuksesta painoksi traktorin takapyörille, jolloin saadaan parempi pito.(Morling 1979) Fergusonin alkuperäisessä prototyypissä vetovarret olivat nykyisestä poiketen ylhäällä ja työntövarsi alhaalla.(Ferguson Family Museum 2011)

Helppokäyttöisyytensä ja yksinkertaisuutensa ansiosta kolmipistenostolaitteesta tuli vallitseva standardi. Nostolaitteesta on olemassa eri kategorioita, joissa mitat poikkeavat traktorin tehon mukaan (ISO 2006). Takanostolaitteen osat on esitetty alla (Kuva 1-1). Työntövartta lukuunottamatta kuvan asetelma löytyy symmetrisesti työntövarren molemmin puolin. Selvyyden vuoksi piirroksesta on jätetty pois sivurajoittimet, joilla lukitaan vetovarsien sivuttaissuuntainen liike.

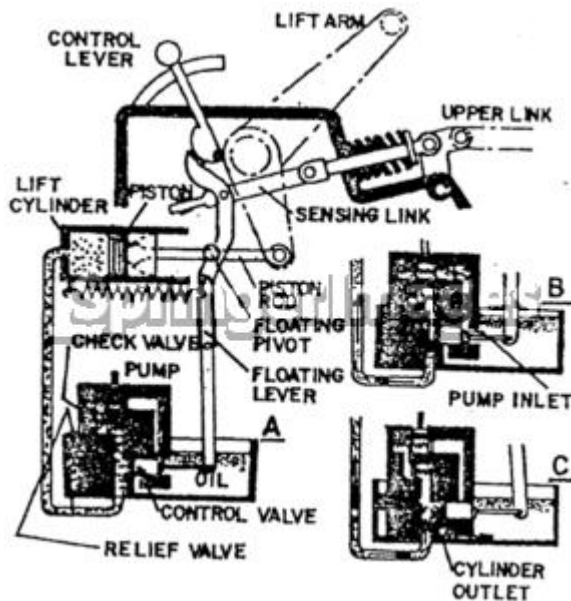


**Kuva 1-1** Takanostolaitteen eri komponentit: (Wikipedia, 2011)

1. Nostovarsi
2. Työntövarsi
3. Traktorin runko
4. Hydraulisylinteri
5. Nostotanko
6. Vetovarsi
7. Pikakytentäkoura

### 1.2.2 Vetovastussäätö

Fergusonin alkuperäisessä nostolaitteessa oli hydraulis-mekaaninen vetovastussäätö. Vetovastussäädössä työkonen korkeutta muutetaan vetovastuksen mukaan, eli sen mukaan paljonko työkonen vastustaa traktorin etenemistä. Vastusta voidaan mitata joko työntövarresta tai vetovarsista. Nykyisissä traktoreissa on myös elektronisia toteutuksia vetovastussäädöstä. Fergusonin säätökaavio on esitetty alla (Kuva 1-2). (Morling 1979)



Kuva 1-2 Fergusonin nostolaitteen säätökaavio A. Neutraali B. Nosto C. Lasku (SpringerImages 2011)

### 1.2.3 Hydraulinen työntövarsi

Hydraulinen työntövarsi helpottaa monen työtehtävän suorittamista, sillä työkoneen kaltevuutta voidaan säätää ajon aikana. Se vaatii traktorista yhden kaksitoimisen hydraulikkaventtiilin. Sylinterit on varustettu lukkoventtiilillä, joka suojaa traktorin hydraulikkaa paineiskuilta. Esimerkkinä Long lifen hydraulinen työntövarsi (Kuva 1-3). (IKH 2012)



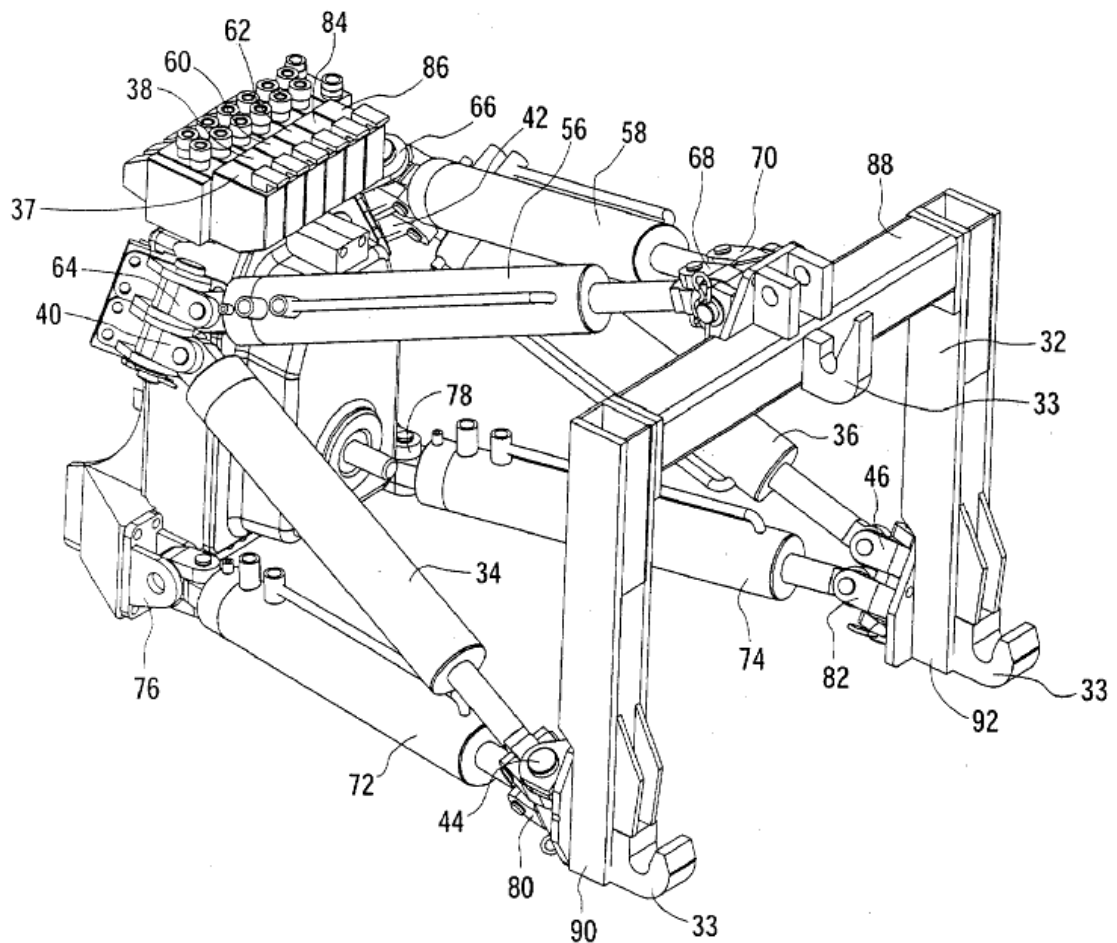
Kuva 1-3 Long lifen hydraulinen työntövarsi (IKH 2012)

### 1.2.4 Farmix-takanostolaite

Aikaisemmassa Farmix-projektin puitteissa tehdyssä tutkimuksessa traktorin instrumentointi oli sama kuin tässä tutkimuksessa. Traktorin nostolaitteen omaa ohjainta ei tuolloin pystytty ohittamaan, mikä hankaloitti järjestelmän säätöä. Koko ohjaus oli tuolloin toteutettu Phytectin MPC555-ohjaimella, joten laskentatehoa oli käytettävissä huomattavasti vähemmän kuin tällä kertaa. (Farmix-loppuraportti, 2009)

### 1.2.5 John Deeren heksapodinostolaite

Kappaleessa 1.6 esiteltävää heksapodirakennetta hyödyntää John Deeren patentoima kuuden vapausasteen nostolaite (Kuva 1-4). Nostolaitteessa on kiinteä pikakiinnityskolmio, eli siihen voidaan kytkeä vain tietyn kategorian työkone. Heksapodirakennetta voidaan käyttää esimerkiksi peränylityksen pienentämiseen kaarreajossa (US 6,688,402 B2), työkoneneen sivuttaiseen siirtämiseen optimaalisen vetolinjan saavuttamiseksi (US 6,698,524 B2) tai apuna työkoneneen automaattisessa kiinnityksessä (US 6,581,695 B2).



Kuva 1-4 John Deeren heksapodinostolaite (Pat. US 2003/0217852 A1)

### 1.2.6 Lhlink

LH Lift Oy:n Valtralle tekemä LHLink-etunostolaite mahdollistaa traktorin eteen kiinnitettävän työkoneneen kallistuksen säädön sekä käännön pysty akselin suhteen. Työkoneneen kääntöä voidaan joko ohjata täysin itsenäisesti tai se voidaan sitoa etupyörien ohjauskulmaan halutussa suhteessa aina 35 asteen kääntöön asti. Kääntyvä nostolaite tehostaa esimerkiksi niittokoneyhdistelmällä ajoa, kun kaarteissa ei jää ajamattomia kais-

taleita. Samoin työkoneeseen kohdistuvat sivuttaisvoimat vähenevät kun työkonetta käännetään traktorin kulkusuuntaan. (Lhlift 2011)



Kuva 1-5 LHlink-etunostolaite (Lhlift 2011)

### 1.3 ISO 11783

ISO 11783 on standardi traktorin ja työkoneen väliseen kommunikointiin. Sen perustana on CAN 2.0B –protokolla. Ennen varsinaisen standardin läpikäymistä esitellään lyhyesti OSI-malli, joka on avuksi standardin eri osien merkityksen hahmottamisessa.

OSI-mallia (Kuva 1-6) käytetään yleisesti tiedonsiirron eri tasojen hahmottamiseen. Ideana on, että yksi kerros viestii vain yhtä alemman ja yhtä ylemmän kerroksen kanssa. Esimerkkejä eri tason toteutuksista on kuvassa 1-6 vihreällä tekstillä.





Kuva 1-6 OSI-malli (Wikipedia, 2012)

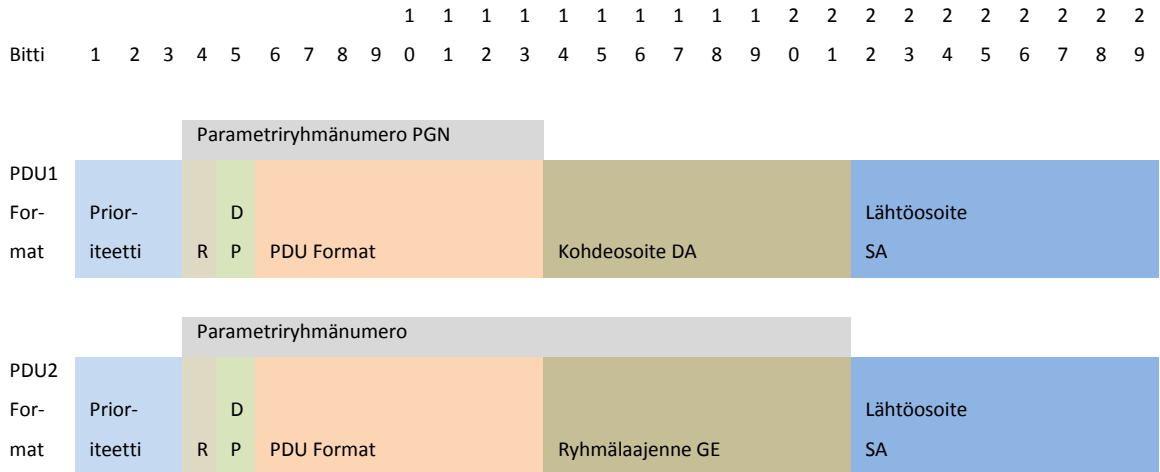
ISO 11783-standardissa on 13 osaa, joista ensimmäinen kuvaa standardin yleisesti. (ISO, 2005a)

**Toinen osa** määrittää kommunikaation fyysiset rajapinnat eli OSI-mallin ensimmäisen kerroksen. Tähän kuuluu muun muassa kierretyn, suojaamattoman nelijohtimisen kaapelin käyttö. Kahden CAN-johtimen lisäksi johtimessa on kaksi johdinta väylän aktiiviseen terminointiin. CAN 2.0B määrittää osittain ensimmäistäkin kerrosta, kuten signaalien jännitetasot. Lisäksi määritellään väylän suurin mahdollinen pituus ja suurimmat sallitut haarojen pituudet, kuin myös käytettävät liittimet. (ISO, 2002a)

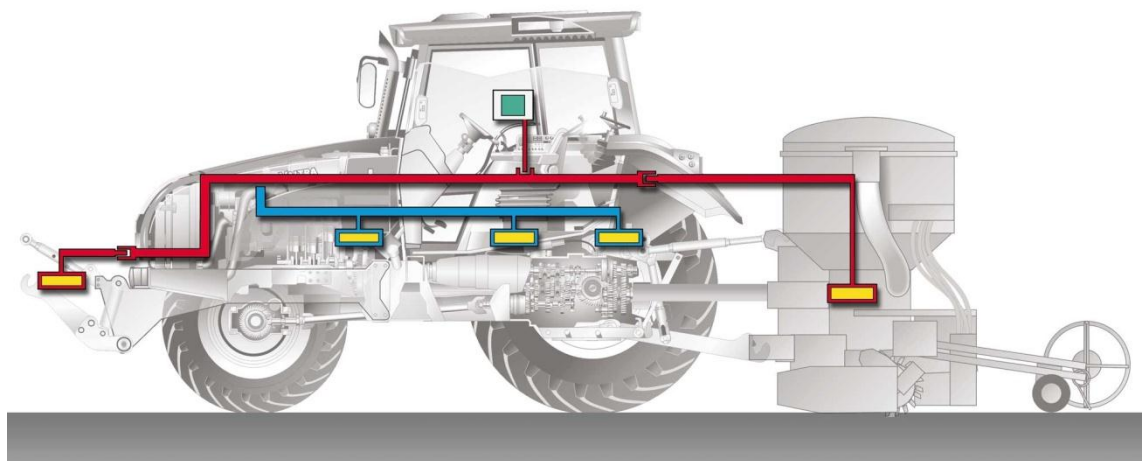
**Kolmas osa**, data link layer, tarkoittaa CAN 2.0B:n määrittelemää 29-bittistä tunniste-kenttää. Osa CAN-kehiksen biteistä on jätetty pois ISO 11783:n määrittelemästä kehiksestä, PDU:sta (Protocol Data Unit). Poisjääneet osat ovat CAN-spesifikaation ohjaajia ja näkymättömiä ylemmille OSI-kerroksille. PDU koostuu seitsemästä kentästä: prioriteetti, varattu, datasivu, PDU Format, PDU Specific(PS), lähdeosoite ja data. Prioriteetti on määräävin termi laskettaessa väylän varausta, seuraavat termit vaikuttavat viestin prioriteettiin väylällä laskevassa järjestyksessä. Varattu-bitti on varattu standardiin mahdollisesti tuleville muutoksille ja on osa parametriryhmännumeroa (PGN, Parameter Group Number). Datasivu laajentaa parametriryhmännumeroiden avaruutta ja on arvoltaan 0 tai 1. Datasivukin on osa parametriryhmännumeroa. PDU Format on osa parametriryhmännumeroa ja määrää lisäksi sen, onko viesti tyyppiä PDU1 vai PDU2: arvoa 239 suuremmat arvot tarkoittavat PDU2-tyyppistä viestiä, siitä pienemmät arvot puolestaan PDU1-tyyppistä. PDU1-viestissä parametrikohtainen tavu on kohde-ECU:n osoite (DA, Destination Address), PDU2:n tapauksessa se on ryhmäläajenne (GE, group extension), jolloin parametriryhmännumero lasketaan PDU Formatista ja GE:stä. Rakenne selviää parhaiten alla olevasta taulukosta 1-1. Standardin kolmas osa määrittää myös

siirtoprotokollan kahdeksaa tavua suurempien viestien lähettämiseen, jonka toteutusta on käytetty myös tässä työssä. (ISO, 1998)

**Taulukko 1-1 ISOBUS-viestitunnisteen rakenne**



**Neljäs osa**, verkkokerros, määrittää eri väyläsegmenttien välisen liikennöinnin. Väyläsegmenttien välissä voidaan käyttää toistimia, siltoja, reitittäjiä ja yhdyskäytäviä. Lisäksi eräs tärkeä liitäntäyksikkö on traktori-ECU (TECU), joka yhdistää traktori-väylän ja työkoneväylän. Eräs väyläesimerkki on esitetty kuvassa 1-7, jossa sinisellä piirretyssä traktoriväylässä ovat moottorin, voimansiirron ja voimanulosoton ohjaimet ja punaisella piirretyssä työkoneväylässä virtuaaliterminaali sekä etu- ja takanostolaitekiinnitteiset työkoneet. (ISO 2001a)



**Kuva 1-7 Eräs traktori-työkoneyhdistelmän väylärakenne (Valtra 2012)**

**Viides osa**, verkonhallintakerros, määrittää ECUjen lähdeosoitteiden (SA) hallinnan, verkon toimintaan liittyvien virheiden raportoinnin sekä toiminnan käynnistyksen yhteydessä. Osoitteenvarauksen suhteen ECUt voidaan jakaa neljään ryhmään: ei-konfiguroitavat, huoltokonfiguroitavat, komentokonfiguroitavat ja itsekonfiguroitavat.

Ei-konfiguroitava ECU nimensä mukaisesti varaa kiinteän, valmistajan määräämään osoitteen. Tällainen on esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetty MPC-555. Huoltokonfiguroitavan ECU:n lähdeosoite voidaan huoltomoodissa ohjelmoida huoltotyökälulla, jollakin valmistajakohtaisella menetelmällä tai komennettu osoite –viestillä. Komento-konfiguroitavan ECU:n osoite voidaan muuttaa normaalin käytön aikana komennettu osoite –viestillä. Itsekonfiguroituva ECU varaa osoitteen omien laskelmiensa perusteella ja osoitteen ollessa korkeamman prioriteetin laitteen varaama, vaihtaa toiseen osoitteeseen, joka tyypillisesti on numerojärjestyksessä seuraava osoite.

Mikäli väylälle kytkeytyvä laite ei ole vielä varannut itselleen osoitetta, se lähettää tyhjästä osoitteesta 254 väylälle Request for address claimed –viestin, johon väylällä olevien laitteiden tulee vastata Address claimed –viestillä omasta osoitteestaan, jonka data-osassa on laitteen NAME-tunniste. Laite voi lähettää pyyntöviestin globaalisti osoitteeseen 255, jolloin kaikkien väylällä olevien laitteiden tulee vastata, mutta väyläliikenteen minimoimiseksi olisi suotavaa lähettää viesti todennäköisesti vapaana olevaan kohdeosoitteeseen. Mikäli kaksi laitetta haluaisi saman lähdeosoitteen, vertaillaan NAME-tunnisteita ja pienemmän tunnisteen omaava laite saa osoitteen itselleen. Mikäli toinen laite on itsekonfiguroituva, yrittää se varata uuden osoitteen, muussa tapauksessa se lähettää Cannot claim source address –viestin tyhjästä osoitteesta ja jättäytyy pois myöhemmästä väyläliikennöinnistä. Osoite katsotaan laitteen onnistuneesti varaamaksi vasta, kun 250ms on kulunut sen Address claimed –viestistä ilman kilpailevaa viestiä. (ISO 2001b)

**Kuudennessa osassa** standardi määrittelee käyttäjän ja traktori-työkoneyhdistelmän rajapinnaksi virtuaaliterminaalin, VT:n. Kun työkone kytketään väylälle, se lähettää VT:lle olioaltaansa (object pool), joka määrittelee käyttöliittymässä esitettävät asiat. VT:ssä on tyypillisesti joitakin ohjelmallisesti määritettäviä painonappeja (soft key), sekä pyöritettävä valitsin numeroarvojen muokkaamiseen. Terminaalissa voi olla ladattuna useammankin eri työkoneen olioaltaat, esimerkiksi etu- ja takanostolaitekytkentäiset työkoneet, jolloin käyttäjä valitsee napilla kulloinkin aktiivisena olevan näkymän. Koska VT:n ominaisuuksia ei ole tarkkaan määritetty, tulee ECU:n lähettää VT:lle viesti selvittääkseen sen ominaisuudet. Alla esimerkki tässäkin tutkimuksessa käytetystä VT:stä, kuva 1-8. (ISO 2004)



Kuva 1-8 Parkerin valmistama VT (Prlog 2012)

**Seitsemäs osa**, joka oli tämän työn kannalta olennaisin, määrittää työkoneen ja traktorin väliset viestit ja edustaa sikäli OSI-tasoa seitsemän. Viestit voidaan jakaa mittausviesteihin ja komentoviesteihin. Mittausviestejä ovat esimerkiksi traktorin maanopeus, voimanulosoton tila ja nostolaitteen korkeus. Komentoviestejä ovat esimerkiksi valojen ohjaus, voimanulosoton ohjaus ja ulkoisen hydrauliiikan ohjaus. Tämän tutkimuksen kannalta olennaisimmat komentoviestit olivat ulkoisen hydrauliiikan ohjausviestit ja mittaviesteistä takanostolaitteen korkeus. (ISO 2002b)

**Kahdeksas osa**, joka käsittelee voimansiirron viestejä, viittaa suoraan SAE J1939-standardiin käytettävien viestien osalta. (ISO 2005b)

**Yhdeksäs osa** määrittelee traktorin sähköisen ohjausyksikön (Tractor ECU, TECU), joka toimii siltana työkoneväylän ja traktorin omien ECUjen välillä, esimerkiksi moottorinohjaimen ja nostolaitteohjaimen. Lisäksi yhdeksäs osa määrittelee kolme traktori-työkone –rajapintaluokkaa, jotka määräävät mitä mittauksia ja ohjauksia traktoriväylältä tarjotaan työkoneväylälle, sekä lisämääreet N ja F, joista F tarkoittaa tukea etunostolaitteelle ja N navigointitukea.

Ensimmäinen luokka, Class 1, tukee lähinnä mittautiedon välittämistä työkoneen tietoon: virranhallinta, nopeustieto, nostolaitteen tila, voimanulosoton tila ja valaistus. Class 2 tarjoaa lisäksi tietoa kuljetusta matkasta, takanostolaitteen vetovastuksen, kattavammat valaistusviestit sekä ulkoisen hydrauliiikan venttiilien tilat. Class 3 on ensimmäinen luokka joka tarjoaa työkoneelle mahdollisuuden käskää traktorin toimintoja, kuten takanostolaitteen korkeutta, voimanulosottoa ja ulkoisen hydrauliiikan ohjausta. (ISO 2002c)

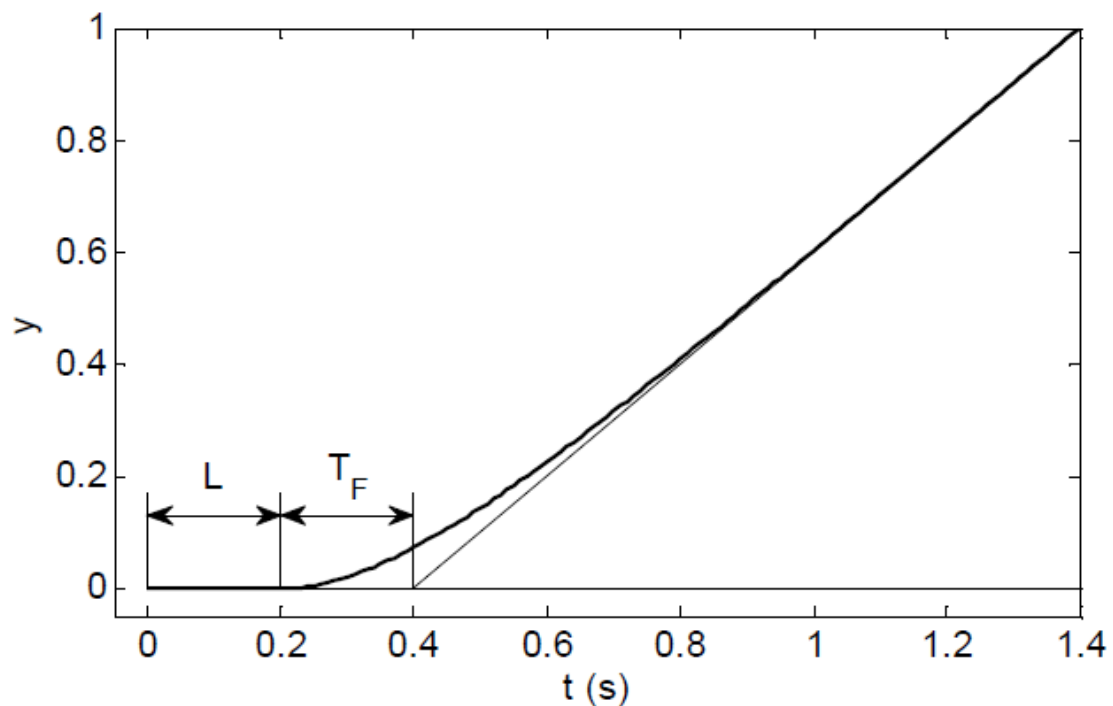
**Kymmenes osa** määrittelee tehtäväohjaimen (Task Controller, TC) ja maatalan hallintajärjestelmän välisen viestinnän. (ISO 2005c) Yhdestoista osa määrittelee prosessidata-viestien sisällön. (ISO 2005d) Kahdestoista osa määrittelee diagnostiikkajärjestelmän traktorin ja työkoneen ECUjen diagnosoimiseen. (ISO 2005e) Kolmastoista osa määrittää tiedostopalvelimen, jota traktori ja työkone voivat käyttää tiedon talletukseen ja haakuun. (ISO2005f)

### 1.4 Hydraulisynterinin mallinnus

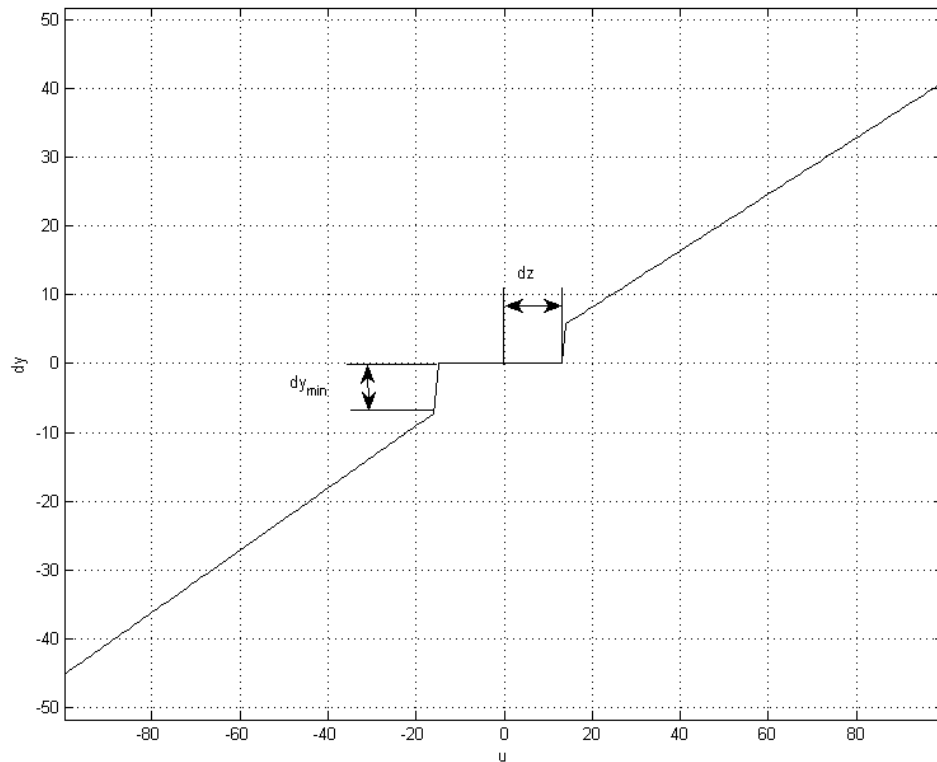
Hydraulisynterinin ja venttiilin dynamiikka voidaan estimoida viiveellisenä integroivana ensimmäisen kertaluvun prosessina,

$$tf(s) = \frac{K}{s(1 + T_F s)} e^{-sL} \quad (1.1),$$

jossa K on järjestelmän vahvistus,  $T_F$  dynaaminen viive ja L putkiviive. Tämän mallin lisäksi on syytä huomioida sylinterin epäideaalisuuksia, kuten kuollut alue ja ohjauksen saturoituminen (Oksanen 2010). Kuva 1-9 havainnollistaa viiveen ja dynamiikan vaikutuksen, kuva 1-10 kuolleen alueen. Lisäksi käytetyssä mallissa on termillä  $dy_{\min}$  huomioitu se, ettei virtaus lähde tasan nolasta kun ohjauksen kuollut alue ylitetään.



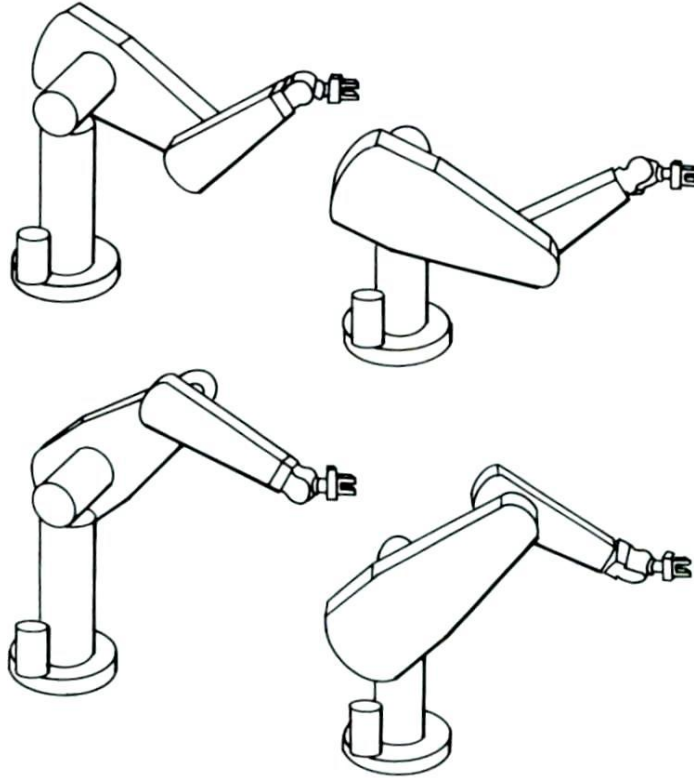
Kuva 1-9 Putkiviive ja dynaaminen viive sylinteri-venttiili –järjestelmässä (Oksanen 2010)



Kuva 1-10 Käytetty venttiilin malli

### 1.5 Sarjakinemaattinen rakenne

Sarjatyypisessä kinematiikassa alustasta työkalupisteeseen on olemassa yhtenäinen, varsien ja nivelten muodostama ketju. Rotaatiomatriisin, jonka esitysmuotoja on useita, ja translaatiovektorin yhdessä muodostaman transformaatiomatriisin avulla kertomalla edetään nivel kerrallaan alustasta työkalupisteeseen ja saadaan näin suora kinemaattinen muunnos. Käänteinen kinemaattinen muunnos sen sijaan ei useinkaan ole yksikäsitteinen, kuten alla olevasta kuvasta nähdään (Kuva 1-11): sama työkalupisteen paikka ja orientaatio voidaan saavuttaa neljällä eri nivelkoordinaattiratkaisulla. Tällöin joudutaan laskettaessa valitsemaan oikea ratkaisu joko ennalta tunnettujen rajoitteiden perusteella (esimerkiksi työtilassa saattaa olla esteitä, jotka sulkevat pois osan nivelkonfiguraatioista), lyhimmän liikeradan perusteella tai puhtaasti arpomalla. (Craig, 2005, s. 109-113)



Kuva 1-11 Sarjamuotoinen manipulaattori PUMA 560 samassa pisteessä neljällä eri nivelkonfiguraatiolla (Craig, 2005, s. 105)

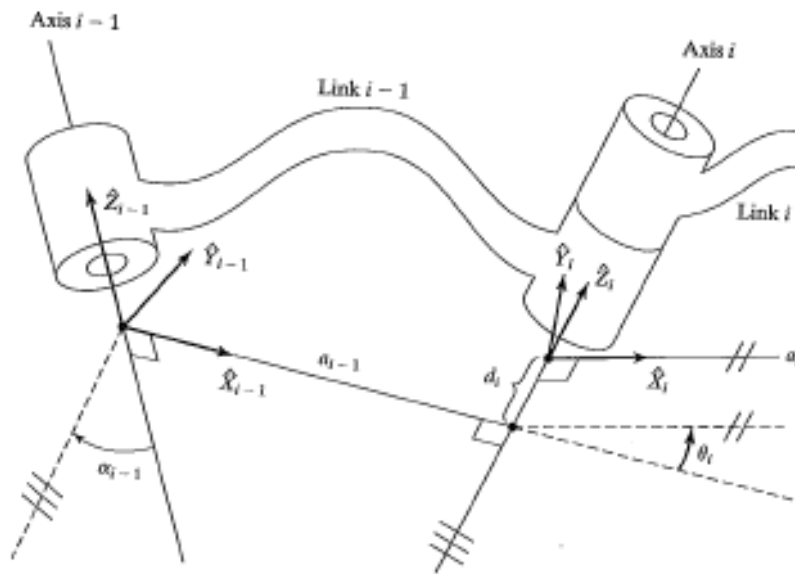
### 1.5.1 Suora kinemaattinen ratkaisu

Suora kinemaattinen ratkaisu saadaan sarjakinemaattisessa rakenteessa transformatiomatriisien avulla, koska kaikki liikkeet ovat joko lineaarisia siirtymiä tai rotaatioita jonkin nivelen ympäri. Ratkaisu saadaan helpoiten määrittämällä jokaiselle nivelelle Denavit-Hartenberg –parametrit, jotka puolestaan voidaan sijoittaa valmiiseen pohjaan, jolla saadaan vastaava transformatiomatriisi, kaava 1.2. Denavit-Hartenberg-parametrit (Kuva 1-12) ovat seuraavat:

- $a_i$  = etäisyys  $Z_i$ :stä  $Z_{i+1}$ :n  $X_i$ :tä pitkin,
- $\alpha_i$  = kulma  $Z_i$ :stä  $Z_{i+1}$ :n  $X_i$ :n ympäri,
- $d_i$  = etäisyys  $X_{i-1}$ :stä  $X$ :n  $Z_i$ :tä pitkin ja
- $\theta_i$  = kulma  $X_{i-1}$ :stä  $X$ :n  $Z_i$ :n ympäri.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

(Craig, 2005)



Kuva 1-12 Denavit-Hartenberg –parametrit (Craig, 2005)

### 1.5.2 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu

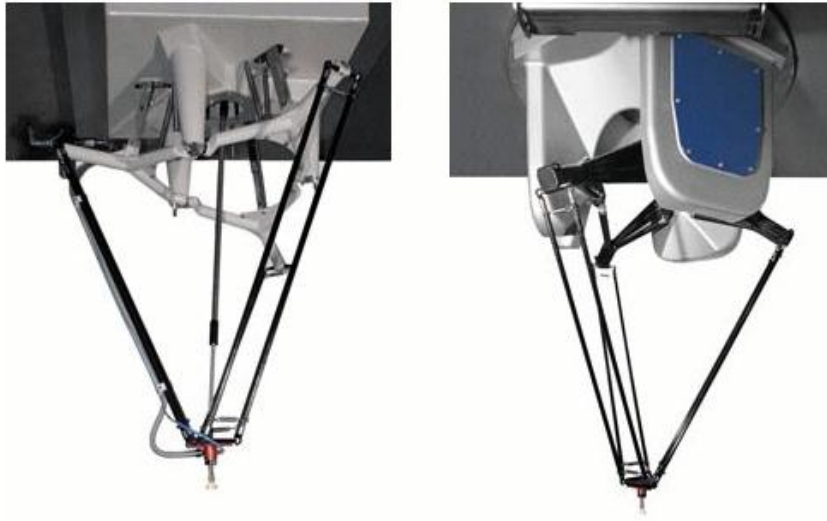
Käänteisen kinematiikan ratkaisuun on olemassa analyttisiä ja iteratiivisia menetelmiä. Analyttiset menetelmät voidaan edelleen jakaa algebrallisiin ja geometrisiin menetelmiin. Geometrisissa menetelmissä avaruusgeometrinen ongelma yritetään jakaa useammaksi tasogeometriseksi ongelmaksi, joihin voidaan soveltaa esimerkiksi kosinilakia. Algebrallisissa menetelmissä tunnetut kinematiikkayhtälöt pyritään muokkaamaan sellaiseen muotoon, josta käänteinen kinematiikka voidaan ratkaista. Algebrallisen ratkaisun laskemiseen ei ole olemassa yleistä ratkaisumallia. (Craig, 2005)

DLS eli Damped Least Squares, vaimennettu pienin neliösumma, on esimerkki numeerisesta menetelmästä, jossa iteratiivisesti minimoidaan asemointivirhettä korjaamalla toimilaitteiden ohjauksia virhettä pienentävään suuntaan. Virheen pienenevä suunta saadaan suoran kinemaattisen mallin jakobiaanista. (Buss 2009)

## 1.6 Rinnakkaiskinemaattinen rakenne

Rinnakkaisessa kinematiikassa alustasta työkalupisteeseen on useamman varsi-nivel – ketjun muodostama yhteys. Yksittäiset ketjut ovat useassa tapauksessa hyvin yksinkertaisia, yhden vapausasteen ketjuja, jolloin käänteinen kinematiikka on yksiselitteinen ja sarjamallista helpommin laskettavissa. Tunnetuimpia rinnakkaiskinemaattisia rakenteita ovat Delta-robotti (Kuva 1-13) ja Stewart-Gough'n alusta (Kuva 1-14).





**Kuva 1-13 SIG Pack Systemsin Delta-robotteja(Parallemic, 2001)**



**Kuva 1-14 Singaporen yliopiston Stewart-Gough -alusta (National University of Singapore, 2011)**

Rinnakkaisella kinematiikalla toimivia laitteita on mitä erilaisemmissa sovelluksissa, lähtien Gough'n kuuden vapausasteen rengastestausalustasta aina putkea pitkin kiipeäviin robotteihin (Aracil et al. 2006) ja ambulanssin parien stabilointijärjestelmään (Bruzzone 2003).

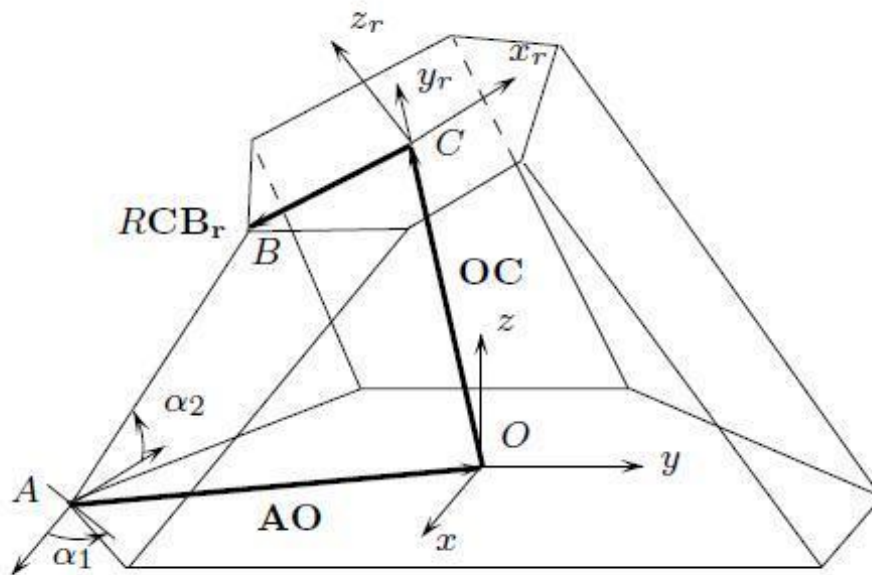
### **1.6.1 Suora kinemaattinen ratkaisu**

Suora kinemaattinen muunnos ei rinnakkaiskinemaattisessa rakenteessa ole yksikäsitteinen ja jo eri ratkaisujen lukumäärän laskeminen on ollut oma ongelmansa (Hunt 1983). Vaikka ratkaisujen lukumäärä saataisiinkin laskettua ja jopa nämä yksittäiset

ratkaisut laskettua, ei voida tietää mikä ratkaisusta vastaa todellista asemaa. Ratkaisuyhtälöiden aste saattaa olla jopa 40. Rinnakkaisissa mekanismeissa suoran kinematiikan ratkaisemiseen käytetäänkin usein iteratiivisia menetelmiä, kuten Newton-Rhapsonia. Reaaliaikaiseen ohjaukseen soveltuvia menetelmiä ei kuitenkaan ole olemassa. (Merlet 2006)

### 1.6.2 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu

Kuten jo aiemmin todettua, rinnakkaisten kinemaattisten koneiden käänteisen kinematiikan laskeminen on hyvin yksinkertaista, kun rakenteet ovat riittävän yksinkertaisia. Esitetään selvennykseksi edellä mainitun heksapodin (Kuva 1-15), josta Stewart-Gough'n alusta on erikoistapaus, käänteisen kinematiikan laskenta.



Kuva 1-15 Heksapodin periaatekuva(Merlet, 2006)

Piste O, alustan keskipiste, oletetaan tunnetuksi ja käänteistä kinematiikkaa laskettaessa liikkuvan tason keskipiste C sekä sen kallistus R ovat annettuja. Niinpä yksittäinen jalakavektori voidaan laskea helposti:

$$\mathbf{AB} = \mathbf{AO} + \mathbf{OC} + \mathbf{RCB} \quad (1.3)$$

Vektorin  $\mathbf{AB}$  pituudesta saadaan helposti haluttu ohjausarvo ja laskemalla nämä jokaiselle jalalle, on käänteinen kinematiikka valmis.(Merlet, 2006)

## 2 Menetelmät

Tässä luvussa esitellään ensin käytetty traktori lisäinstrumentointineen. Seuraavaksi kerrotaan takanostolaitteen mallinnuksesta, jota seuraa sylinterien yksikkösäädön esittely. Tämän jälkeen esitellään käytetty elektroniikka, jonka jälkeen viimeisenä kappaleena on käytettyjen ja laadittujen ohjelmien esittely.

### 2.1 Traktorin ominaisuudet ja instrumentointi

Traktorina tässä työssä oli kehitysversio Valtran T132-traktorista, johon oli toteutettu tutkimuskäyttöön Isobus Class 3 –TECU. Traktorin alkuperäisen nostolaitteen sylinterit on irrotettu nostolaitteen omasta hydraulikasta ja kytketty kaksitoimisena ulkoiseen hydraulikkaan. Nostolaitteen asennon lukuun käytetään kuitenkin alkuperäistä kulmaanturia. Hydrauliset sivurajoittimet, työntövarsi ja kallistussylinteri ovat myös kytkettyinä ulkoiseen hydraulikkaan. Sylinterien asema saadaan sylinterien sisäisillä lineaarisilla potentiometreillä.



Kuva 2-1 Käytetty takanostolaite, jossa kytkettynä harjan kiinnityslaite

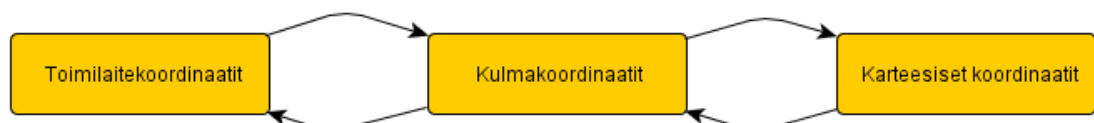
Kehittyneen nostolaitteen ohjaamiseksi traktoriin asennettiin Boschin työkone-joystick, joka toimii SAE J1939-väylällä ja on siten suoraan liitettävissä työkoneväylälle.



Kuva 2-2 Bosch-Rexroth -joystick

## 2.2 Takanostolaitteen mallinnus

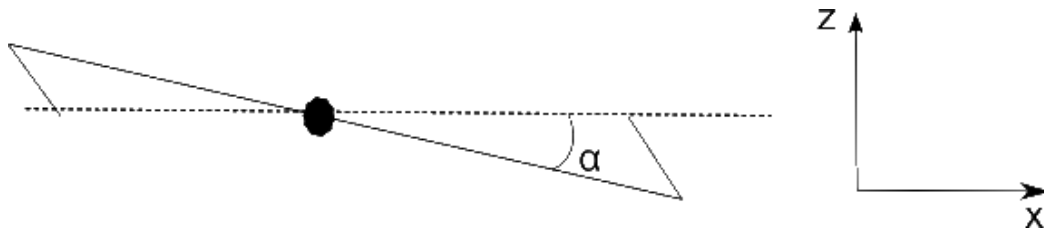
Kun takanostolaitteeseen ei ole kytkettyä työkonetta, on sen rakenne hyvin yksinkertainen. Vetovarret muodostavat yksittäiset rinnakkaiskinemaattiset rakenteet, sillä ne ovat kytkettyinä traktorin runkoon kolmesta pisteestä: juurestaan, sivurajoittimesta ja nostotangon kautta nostovarresta. Vasemman puolen vetovartta ohjataan sivurajoittimen pituutta säätämällä sekä nostotangon ja nostovarren välityksellä nostolaitesylintereillä. Oikea puoli on muuten identtinen, mutta siellä on lisäksi kallistussylinterin pituuden säätö. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi, miten kulmakoordinaateista päästään toimilaittekoordinaatteihin. Tämä välitulos yksinkertaistaa sen jälkeen seuraavaa suoran kinemaattisen ratkaisun käsittelyä sekä tämän jälkeen tulevia käänteisen kinematiikan tutkimuksia. Kuva 2-3 selventää ratkaisun ideaa. Ensin kuitenkin esitellään rakenne ja käytettävät muuttujat.



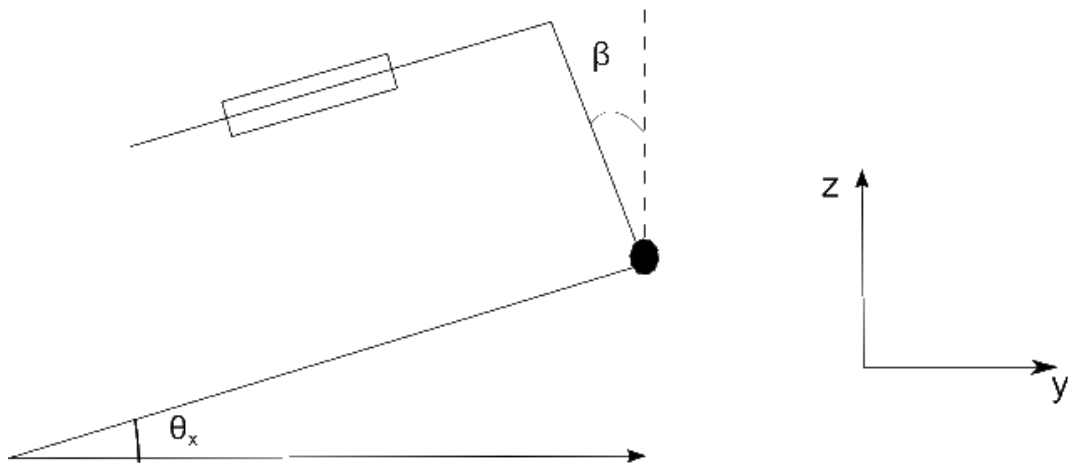
Kuva 2-3 Koordinaatistomuunnosketju

Kuva 2-5 esittää nostolaitteen sivulta katsottuna. Traktori on kuvassa vasemmalla ja työkone oikealla. Kulma  $\beta$  on pitch-kulma, eli nostolaitteen pystysuuntainen kallistus. Työkoneen vaakasuuntainen kallistus eli roll-kulma  $\alpha$ , nähdään työkoneen traktorista taakse katsoen esittävässä kuvassa 2-4. Kulmat on määritetty traktorikoordinaatiston suhteen.

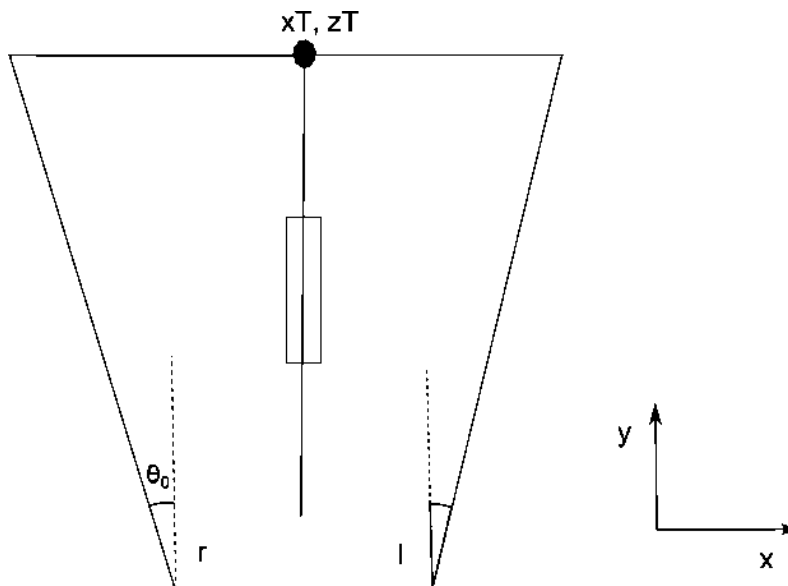
Kuva 2-6 esittää nostolaitteen ylhäältä päin katsottuna. Työkalupisteen koordinaatit  $x_T$  ja  $z_T$ , jotka ovat vetovarsien päiden keskipisteessä, ovat ohjattuja muuttujia,  $\theta_{z_l}$  ja  $\theta_{z_r}$  ovat vetovarsien vaakasuuntaiset kulmat. Traktorin ajatellaan olevan kuvassa alhaalla.



Kuva 2-4 Nostolaite traktorista katsottuna



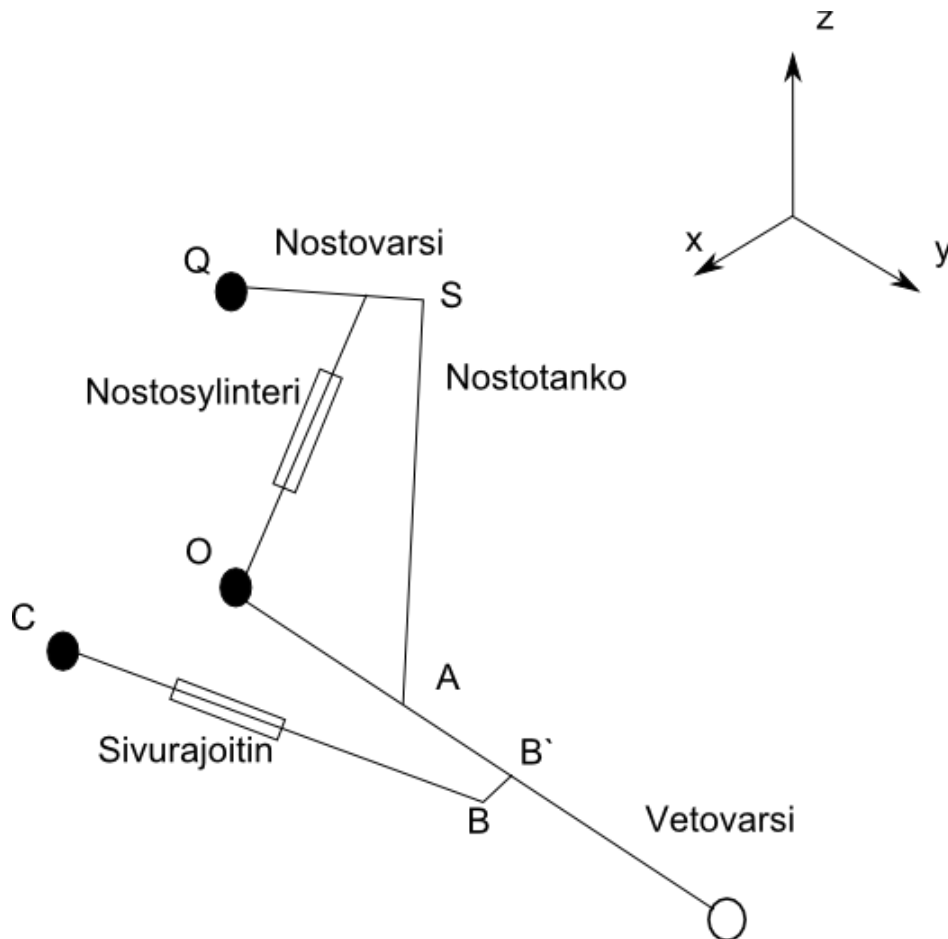
Kuva 2-5 Nostolaite sivulta katsottuna



Kuva 2-6 Nostolaitteen yksinkertaistettu periaatekuva ylhäältä katsoen

### 2.2.1 Muunnos kulmakoordinaateista toimilaittekoordinaatteihin

Myöhempien mallien yksinkertaistamiseksi ajatellaan vetovarsia ohjattavan yksinkertaisesti kahden kulman avulla, joista toinen kääntää vetovartta vaakasuunnassa ja toinen pystysuunnassa. Tämä yksinkertaistus ei hukkaa informaatiota eikä siten aiheuta epätarkkuutta ohjaukseen.



Kuva 2-7 Vetovarren kiinnitys traktoriin

Kuvassa 2-7 on esitettyä yhden vetovarren kiinnitys traktoriin. Nelikulmiot ovat ohjussylintereitä, mustat ympyrät kiinnityspisteitä traktorin päässä ja ympyrä vetovarren päässä työkoneen kiinnityspiste. Isot kirjaimet ilmaisevat mielivaltaisesti nimettyjä karteesisen avaruuden pisteitä. Pisteiden A paikka ohjaukskulmien funktiona saadaan kiinteään XYZ-rotatation (pitch-roll-yaw) avulla yhtälöstä

$$A_l = d_O^A \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{x_l}) \cdot \sin(\theta_{z_l}) \\ \cos(\theta_{z_l}) \cdot \cos(\theta_{x_l}) \\ \sin(\theta_{x_l}) \end{bmatrix} \quad (2.1),$$

jossa  $\theta_{xl}$  on pystysuuntainen ohjauskulma,  $\theta_{zl}$  on vaakasuuntainen ohjauskulma ja  $d_o^a$  pisteiden O ja A välinen etäisyys. Vastaavalla tavalla saadaan oikealle vetovarrelle pisteen A paikka  $A_r$ . Projisoidaan laskennan helpottamiseksi piste A yz-tasoon, joka onnistuu käytännössä asettamalla x-koordinaatti nolllaksi.

Koska halutut vetovarren kulmat ja sitä kautta pisteen A paikka tiedetään, halutaan laskea pisteen S paikka, josta puolestaan saadaan nostosylinterin haluttu asento. Tämä paikka saadaan janojen QS ja  $S\hat{A}$  leikkauksesta, jossa  $\hat{A}$  on zy-tasoon projisoitu A-piste. Jotta yhtälöt pysyisivät sievempinä, pidetään origona pistettä Q. Tällöin pisteen A uudet koordinaatit projisoidussa ja origosiirretyssä koordinaatistossa ovat

$$\tilde{A} = \hat{A} - Q \quad (2.2)$$

Voidaan muodostaa kahden ympyrän yhtälöt, joiden ratkaisuista (liite C) valitaan se, joka on positiivisella y-akselilla:

$$\begin{aligned} (y_s - y_{\tilde{A}})^2 + (z_s - z_{\tilde{A}})^2 &= (d_{\tilde{A}}^S)^2 \\ y_s^2 + z_s^2 &= (d_Q^S)^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

jossa  $y_s$  on pisteen S y-komponentti,  $z_s$  pisteen S z-komponentti,  $z_{\tilde{A}}$  pisteen  $\tilde{A}$  z-komponentti,  $y_{\tilde{A}}$  pisteen  $\tilde{A}$  y-komponentti,  $d_{\tilde{A}}^S$  pisteiden  $\tilde{A}$  ja S välinen etäisyys ja  $d_Q^S$  pisteiden Q ja S välinen etäisyys. Projisoitu etäisyys  $d_{\tilde{A}}^S$  saadaan laskettua Pythagoraan lauseella kun tiedetään nostotangon todellinen pituus sekä x-suuntainen poikkeama pisteiden Q ja A välillä:

$$d_{\tilde{A}}^S = \sqrt{(d_A^S)^2 - d_x^2} \quad (2.4),$$

jossa  $d_x$  on x-suuntainen poikkeama pisteiden Q ja A välillä ja  $d_A^S$  pisteiden A ja S välinen todellinen etäisyys eli nostotangon pituus.

Yhtälöparista 2.3 saadaan Matlabin symbolisella ratkaisijalla suoraan käyttökelpoinen ratkaisu, joka on esitetty liitteessä C. Tästä voidaan laskea nostolaitteen ohjauskulma

$$\theta_E = \sin^{-1}(z_s/d_Q^S) \quad (2.5).$$

Koska vasemman puolen korkeutta voidaan ohjata ainoastaan nostolaitteella, on oikean puolen S-piste samalla korkeudella ja ohjaus tapahtuu täysin kallistussylinterillä. Tämän ohjauksen arvo saadaan suoraan pisteiden  $S_r$  ja  $A_r$  välisestä etäisyydestä,

$$l_{tilt} = \sqrt{(x_{Ar} - x_{Sr})^2 + (y_{Ar} - y_{Sr})^2 + (z_{Ar} - y_{Sr})^2} \quad (2.6),$$

jossa  $x_{Ar}$ ,  $y_{Ar}$  ja  $z_{Ar}$  ovat pisteen  $A_r$  koordinaatit ja  $x_{Sr}$ ,  $y_{Sr}$  ja  $z_{Sr}$  ovat pisteen  $S_r$  koordinaatit.

Vielä on siis laskematta kummankin puolen sivurajoittimien paikat. Lasketaan ensin pisteen  $B'$  paikka, jonka laskenta menee pitkälti samalla tavalla kuin pisteen  $A$  tapauksessa kaavassa 2.1.

$$\mathbf{B}'_l = d_0^{B'} \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{x_l}) \cdot \sin(\theta_{z_l}) \\ \cos(\theta_{z_l}) \cdot \cos(\theta_{x_l}) \\ \sin(\theta_{x_l}) \end{bmatrix} \quad (2.7),$$

jossa  $d_0^{B'}$  on pisteiden  $O$  ja  $B'$  välinen etäisyys.

Piste  $B$  saadaan pisteestä  $B'$  ristitulon avulla seuraavasti:

$$\mathbf{B}_l = \mathbf{B}'_l + d_B^{B'} \frac{\mathbf{B}'_l \times [0 \ 0 \ 1]^T}{|\mathbf{B}'_l \times [0 \ 0 \ 1]^T|} \quad (2.8)$$

Tästä saadaan sivurajoittimen haluttu pituus laskemalla pisteiden  $C$  ja  $B$  välinen etäisyys:

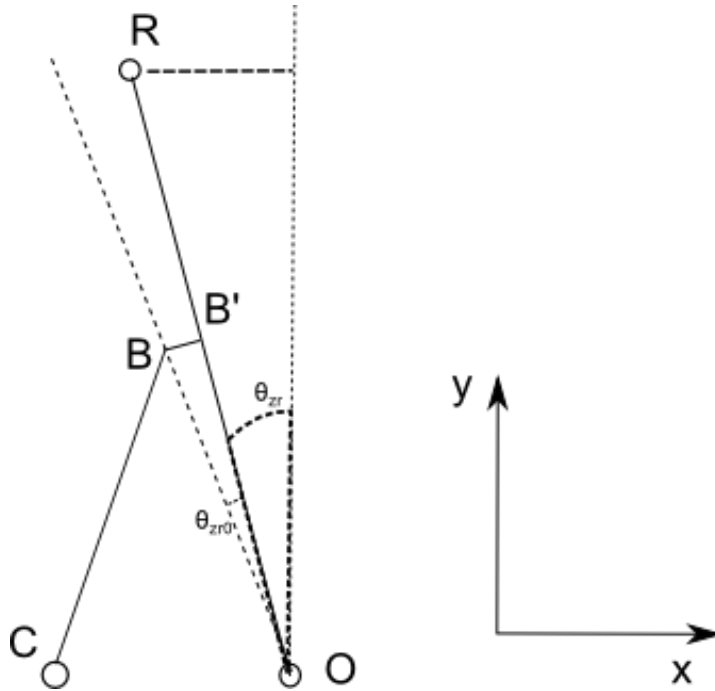
$$l_{vasraj} = \sqrt{(x_{Bl} + x_{Cl})^2 + y_{Bl}^2 + z_{Bl}^2} \quad (2.9)$$

jossa  $x_{Bl}$ ,  $y_{Bl}$  ja  $z_{Bl}$  ovat pisteen  $B_l$  koordinaatit ja  $x_{Cl}$  on pisteiden  $C$  ja  $O$  välinen etäisyys, joka siis approksimoidaan  $x$ -akselin suuntaiseksi. Vastaavalla tavalla saadaan oikealla sivurajoittimelle pituus, tosin  $x_{Cl}$ :n etumerkki vaihtuu. Työntövarren ohjaus pysyy tämän muunnoksen yhteydessä muuttumattomana.

## 2.2.2 Muunnos toimilaittekoordinaateista kulmakoordinaatteihin

Laskettaessa suoraa kinemaattista muunnosta tarvitaan myös muunnos toimilaittekoordinaateista kulmakoordinaatteihin.





Kuva 2-8 Vetovarsi

Kummallekin puolelle voidaan laskea vetovarren pään x-koordinaatti suhteessa pisteeseen O. Koska vetovarsien päiden etäisyys traktorin päässä tiedetään, ei laskuja tarvitse suorittaa traktorikoordinaatistossa. Korvake BB' aiheuttaa kokonaiskulmaan kiinteän muutoksen

$$\theta_{zr0} = \tan^{-1} \left( \frac{d_B^{B'}}{d_O^B} \right) \quad (2.10).$$

Kulma  $\theta_{zr}$  saadaan ratkaistua janojen CB ja OB leikkauksesta.

$$y_B^2 + x_B^2 = d_O^{B^2} \quad (2.11),$$

$$y_B^2 + (x_B - x_C)^2 = d_B^{C^2}$$

josta saadaan ratkaistua

$$x_B = \frac{-d_B^{C^2} + d_O^{B^2} + x_C^2}{2x_C} \quad (2.12).$$

Kun tiedetään  $x_B$  ja  $d_O^B$ , on kulman  $\theta_{zr}$  laskeminen suoraviivaista:

$$\theta_{zr} = \theta_{zr0} - \sin^{-1} \frac{x_B}{d_O^B} \quad (2.13).$$

Vasemman vetovarren vaakasuuntainen kulma saadaan muuten vastaavasti, mutta  $\theta_{z0}$ :n etumerkki vaihtuu samoin kuin sinitermin etumerkki  $x_B$ :n merkinvaihdon seurauksena. Kuva 2-7 on apuna pystysuuntaisia kulmia laskettaessa. Nostolaitesylinterien asennosta lasketaan ensin nostovarsien päidet paikat.

$$\begin{aligned} z_s &= z_Q + d_s^Q \sin \theta_E \\ y_s &= y_Q + d_s^Q \cos \theta_E \end{aligned} \quad (2.14)$$

Sivurajoittimien ohjauksesta seuraavat vaakasuuntaiset siirtymät ovat

$$\begin{aligned} x_{l0} &= d_O^A \cdot \frac{x_{B,L}}{d_O^B} \\ x_{r0} &= d_O^A \cdot \frac{x_{B,R}}{d_O^B} \end{aligned} \quad (2.15),$$

jossa  $x_{B,R}$  ja  $x_{B,L}$  ovat oikean ja vasemman puolen  $x_B$ :t, jotka on saatu kaavasta 2.12. Siirtymien avulla saadaan nostotangon ja kallistussylinterin yz-tasoon projisoitu pituus,

$$d_A^S = \sqrt{(d_A^S)^2 + x_{l0}^2} \quad (2.16).$$

Nostotangon ja vetovarren leikkauspiste saadaan laskettua kahden ympyrän leikkauspisteestä:

$$\begin{aligned} (d_A^S)^2 &= (z_A - z_S)^2 + (y_A - y_S)^2 \\ (d_O^A)^2 &= z_A^2 + y_A^2 \end{aligned} \quad (2.17).$$

Saaduista ratkaisusta (liite C) valitaan pienempi, josta lasketaan pystysuuntainen ohjauskulma

$$\theta_{xl} = \sin^{-1} \frac{y_A}{d_O^A} \quad (2.18).$$

Oikean puolen ohjauskulma saadaan vastaavalla tavalla, mutta kiinteän etäisyyden  $d_A^S$  sijasta käytetään laskennassa kallistussylinterin ohjausarvoa.

### 2.2.3 Suora kinemaattinen ratkaisu

Suorassa kinemaattisessa ratkaisussa x- ja z-suuntaiset paikat sekä roll-kulma ovat helppoja ratkaista seuraavista yhtälöistä, jossa  $\mathbf{L}$  määrää vasemman ja  $\mathbf{R}$  oikean vetovarren pään sijainnin traktorikoordinaatistossa:

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_0 + l_{vv} \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{x_l}) \cdot \sin(\theta_{z_l}) \\ \cos(\theta_{z_l}) \cdot \cos(\theta_{x_l}) \\ \sin(\theta_{x_l}) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + l_{vv} \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{x_r}) \cdot \sin(\theta_{z_r}) \\ \cos(\theta_{z_r}) \cdot \cos(\theta_{x_r}) \\ \sin(\theta_{x_r}) \end{bmatrix} \quad (2.20),$$

jossa  $l_{vv}$  on vetovarren pituus ja  $\theta$ :t ovat kiertymiä akseleiden ympäri. Rotaatiot ovat kiinteitä XYZ-rotaatioita. Kun tiedetään kummankin vetovarren päiden paikat, saadaan työkalupiste T laskettua suoraan keskiarvona

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{R} + \mathbf{L}}{2} \quad (2.21)$$

Roll-kulma  $\alpha$  traktorikoordinaatiston suhteen saadaan vetovarsien päistä

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{z_r - z_l}{x_r - x_l} \quad (2.22),$$

jossa  $z_r$  ja  $x_r$  ovat oikean vetovarren pään z- ja x -koordinaatit ja  $z_l$  ja  $x_l$  vastaavasti vasemman.

Lasketaan seuraavaksi työntövarren vaikutus pitch-kulmaan. Koska kyseessä on työkonen yläkiinnityspisteen rajaaman ympyrän ja työntövarren muodostaman pallon leikkauspisteen laskeminen, tulee yhtälöistä sellaisenaan monimutkaisia. Projisoidaan siis työntövarren traktorin puolen kiinnityspiste H työntövarren työkonepuolen kiinnityspisteen U ja vasemman vetovarren päästä oikean vetovarren päähän piirretyn vektorin  $\mathbf{v}$  virittämälle tasolle. Kuva 2-9 selventää ideaa.

Tason normaali saadaan kaavasta 2.23

$$\mathbf{v} = \mathbf{L} - \mathbf{R} \quad (2.23),$$

josta vastaavasti yksikkönormaali on

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} = [x_n \ y_n \ z_n]^T \quad (2.24)$$

Valitaan valistuneesti tason toiseksi kantavektoriksi

$$\mathbf{i} = [y_n \ x_n \ 0]^T \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-z_n)^2}} \quad (2.25)$$

sillä tämä on X-Y –tasolla kohtisuorassa normaalia vasten. Toiseksi kannaksi lasketaan ristitulolla

$$\mathbf{j} = [-x_n z_n \ -y_n z_n \ x_n^2 + y_n^2]^T \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-z_n)^2}} \quad (2.26)$$

Kantavektoreiden avulla saadaan pisteen H projektio H' tasolla P maailmankoordinaateissa ilmaistuna seuraavien yhtälöiden mukaan:

$$Z = [\mathbf{i} \ \mathbf{j}] \quad (2.27)$$

$$H' = ZZ^T H \quad (2.28)$$

(AI access, 2012).

Pisteen H' koordinaatit tasossa,  $z_{hp}$  ja  $y_{hp}$ , saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöparista:

$$y_{hp} \cdot i_y + z_{hp} \cdot j_y = y_H \quad (2.29)$$

$$y_{hp} \cdot i_z + z_{hp} \cdot j_z = z_H$$

Samoin saadaan pisteen T koordinaatit tasossa P:

$$y_{tp} \cdot i_y + z_{tp} \cdot j_y = y_T \quad (2.30)$$

$$y_{tp} \cdot i_z + z_{tp} \cdot j_z = z_T$$

Pisteiden U ja H' välimatka saadaan Pythagoraan lauseella:

$$|UH'|^2 = |UH|^2 - |HH'|^2 \quad (2.31)$$

Siirretään vielä työkalupiste  $\mathbf{T}$   $\mathbf{H}'$ :n origoksi.

$$\mathbf{H}'' = \mathbf{H}_p - \mathbf{T}_p \quad (2.32)$$

Tasossa ilmaistujen pisteiden avulla voidaan pisteen  $U$  tasoon projisoitu paikka  $U_P$  paikka ratkaista tasoon projisoidun työntövarren ja kiinnityskolmion korkeuden muodostamien ympyröiden leikkauksesta:

$$\begin{aligned}d_U^T &= |U_P| \\d_U^{H''} &= |U_P - H''|\end{aligned}\tag{2.33},$$

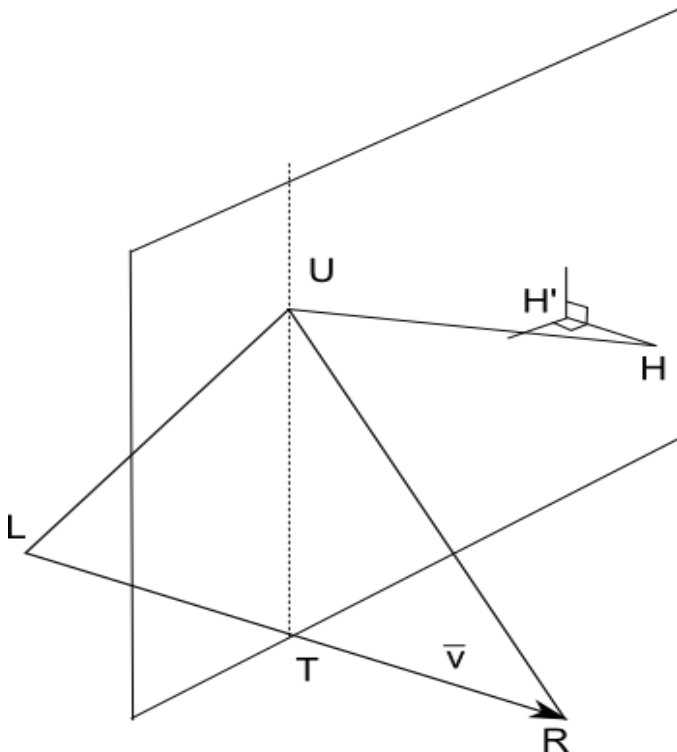
joista ensimmäinen on työntövarren kiinnityskolmion korkeus ja toinen työntövarren kiinnityspisteen tasoon projisoitu paikka työntövarren traktorin pään kiinnityksen suhteen.

Saaduista tasokoordinaateista, joiden tarkka ratkaisu on liitteessä C, päästään takaisin origosiirrettyyn traktorikoordinaatistoon kertomalla tason P kantavektoreilla  $\mathbf{i}$  ja  $\mathbf{j}$ :

$$\mathbf{U}_K = x_U \mathbf{i} + y_U \mathbf{j}\tag{2.34},$$

josta puolestaan voidaan laskea pitch-kulma eli kiertymä traktorikoordinaatiston x-akselin ympäri:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{y_{UK}}{z_{UK}}\tag{2.35}.$$



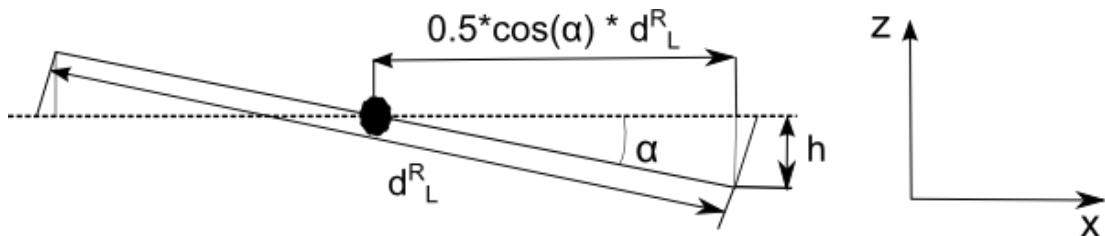
Kuva 2-9 Työntövarsi tasoon projisoituna

### 2.2.4 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 1: geometrinen

Kaikille käänteisille kinemaattisille malleille yhteisesti haluttiin annetuista karteesisista muuttujista  $x_T$ ,  $z_T$ ,  $\alpha$  ja  $\beta$  ratkaista vetovarsien kulmat pysty akselin ympäri,  $\theta_{zr,o}$  ja  $\theta_{zl,o}$ , sekä x-akselin ympäri,  $\theta_{xl,o}$  ja  $\theta_{xr,o}$ , sekä työntövarren pituus  $d_U^H$ . Geometrisessa ratkaisussa aloitettiin analyysi staattisesta tilasta ja oletettiin muutokset pieniksi. Ratkaisu on approksimatiivinen, sillä alkutilassa tehdyt oletukset eivät päde muissa pisteissä. Uusia ohjauksia laskettaessa hyödynnettiin tietoja edellisistä ohjauksista. Lasketaan ensin sivurajoittimien ohjaukset:

$$\begin{aligned}\theta_{zr,o} &= -\sin^{-1}\frac{x_T}{l_{vv}} + \sin^{-1}\left(d_L^R \frac{1 - \cos \alpha}{2l_{vv}}\right) + \theta_{z0} \\ \theta_{zl,o} &= -\sin^{-1}\frac{x_T}{l_{vv}} - \sin^{-1}\left(d_L^R \frac{1 - \cos \alpha}{2l_{vv}}\right) - \theta_{z0}\end{aligned}\quad (2.36),$$

jossa  $l_{vv}$  on vetovarren pituus,  $x_T$  haluttu sivusuuntainen paikkareferenssi,  $d_L^R$  nostolaitteen kiinnityksen leveys,  $\alpha$  roll-kulma ja  $\theta_{z0}$  vetovarren pitkittäissuuntaisen kulman poikkeama nolasta, kun ollaan alkutilanteessa. Ensimmäisellä sinitermillä lasketaan sivusuuntaisen siirtymän vaikutus ja toisella roll-kulman vaikutus (Kuva 2-10).



**Kuva 2-10 Roll-kulman vaikutus sivurajoittimien ohjaukseen**

Lasketaan seuraavaksi kiertymä pysty akselin ympäri eli yaw-kulma, jota varten lasketaan vetovarsien päiden x- ja y-komponenttien erotus. Yaw-kulmaa tarvitaan väliarvojen laskennassa, vaikkei se itsessään olekaan ohjattavissa.

$$\begin{aligned}\Delta y &= l_{vv} (\cos(\theta_{zl} + \theta_{z0}) \cos(\theta_{xl}) - \cos(\theta_{zr} - \theta_{z0}) \cos(\theta_{xr})) \\ \Delta x &= l_{vv} (\sin(\theta_{zl} + \theta_{z0}) \cos(\theta_{xl}) - \sin(\theta_{zr} - \theta_{z0}) \cos(\theta_{xr}))\end{aligned}\quad (2.37),$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

jossa  $\Delta y$  on vetovarsien päiden  $y$ -suuntainen etäisyys,  $\Delta x$  vetovarsien päiden  $x$ -suuntainen etäisyys,  $\gamma$  yaw-kulma,  $\theta_{zr}$ ,  $\theta_{zl}$ ,  $\theta_{xr}$  ja  $\theta_{xl}$  ohjauskulmien edellisen laskentakierroksen arvot.

Lasketaan seuraavaksi yaw-kompensoitu korkeusero  $h$ , jonka verran vetovarren päät poikkeavat referenssikorkeudesta roll-kulman vaikutuksesta.

$$h = \frac{d_L^R \cos(\gamma) \sin(\alpha)}{2} \quad (2.38)$$

Nyt voidaan laskea vetovarsien pystysuuntaiset ohjauskulmat

$$\theta_{xl,o} = \sin^{-1} \frac{z_T - h}{l_{vv}} \quad (2.39)$$

$$\theta_{xr,o} = \sin^{-1} \frac{z_T + h}{l_{vv}}$$

Tarvitaan vielä työntövarren ohjaus. Koska yaw-kulma on laskettu ja halutut roll- ja pitch-kulmat tiedetään, voidaan työkoneen yläkiinnityspisteen paikka laskea rotaatiomatriisilla. Käytetään tässäkin kiinteää XYZ-rotaatiota.

$$R_{XYZ} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha s\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

jossa  $c$  tarkoittaa lyhyesti kosinia ja  $s$  siniä. Tällä rotaatiomatriisilla kertomalla saadaan selville työkoneen yläkiinnityspisteen paikka

$$\mathbf{U} = R_{XYZ} [0 \ 0 \ d_T^U]^T + \mathbf{T} \quad (2.41)$$

jossa  $d_T^U$  on pisteiden  $T$  ja  $U$  välinen etäisyys eli nostolaitteen kiinnityskolmion korkeus. Tästä saadaan työntövarren ohjaukselle arvo, kun tiedetään työntövarren kiinnityksen sijainti  $\mathbf{H}$  traktorissa.

$$d_H^U = |\mathbf{U} - \mathbf{H}| \quad (2.42)$$

## 2.2.5 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 2: algebrallinen

Algebrallisessa menetelmässä yritetään laskemalla selvittää nostolaitteen mekaniikkaa kuvaavista yhtälöistä halutut suureet, tässä tapauksessa vetovarsien päiden koordinaatit.

Työntövarren pituuden laskennassa voidaan käyttää samaa ratkaisua kuin geometrisessa ratkaisussa.

Ratkaistiin ensin vetovarsien päiden  $z$ -koordinaatit, jotka saatiin kun tiedettiin haluttu työkoneen korkeus sekä roll-kulma.

$$\begin{aligned} z_r &= z_T + \tan \alpha \cdot d_L^R \\ z_l &= z_T - \tan \alpha \cdot d_L^R \end{aligned} \quad (2.43),$$

jossa  $z_T$  on työkoneen haluttu korkeus,  $\alpha$  haluttu roll-kulma nostolaittekoordinaatistossa ja  $d_L^R$  pisteiden vetovarsien päiden  $\mathbf{L}$  ja  $\mathbf{R}$  välinen etäisyys. Näiden jälkeen laaditaan neljän yhtälön ja neljän tuntemattoman ryhmä

$$\begin{aligned} (x_l - d_O^L)^2 + y_l^2 + z_l^2 &= l_{vv}^2 \\ (x_r + d_O^R)^2 + y_r^2 + z_r^2 &= l_{vv}^2 \\ \frac{x_l + x_r}{2} &= x_T \end{aligned} \quad (2.44),$$

$$(x_l - x_r)^2 + (y_l - y_r)^2 + (z_l - z_r)^2 = d_L^{R2}$$

jossa ensimmäinen yhtälö on vasemman vetovarren pään paikka, toinen yhtälö oikean vetovarren, kolmas yhtälö työkalupisteen sivusuuntainen paikka ja neljäs yhtälö työkoneen alakiinnityspisteiden välisen etäisyyden aiheuttama rajoitus.

Näistä saadaan Matlabin solverilla ratkaistua  $x_l$ ,  $x_r$ ,  $y_l$  ja  $y_r$ , joista edelleen saadaan ohjauskulmat vetovarsille traktorikoordinaatiston mukaan. Ratkaisut olivat kuitenkin monimutkaisia neljännen asteen yhtälöiden ratkaisuja (liite C) ja koska keinoa oikean ratkaisun valintaan ei tunnettu, jätettiin tämä ratkaisu pois sovelluksesta.

### 2.2.6 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 3: DLS

Merkitään työkoneen haluttua posea vektorilla  $\mathbf{t}$  ja työkoneen nykyistä posea vektorilla  $\mathbf{s}$ . Eroa suurelta halutun ja mitatun posen välillä merkitään  $\mathbf{e}$ :llä. Käänteisen kinematiikan ongelma näillä suureilla on löytää ohjausvektorille  $\boldsymbol{\theta}$  sellaiset arvot, että

$$t_i = s_i(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.45),$$

kaikilla  $i$ :n arvoilla. Jakobiaani  $\mathbf{J}$  määritellään



$$J(\boldsymbol{\theta}) = \left( \frac{\partial s_i}{\partial \theta_j} \right)_{i,j} \quad (2.46).$$

Muutosta työkoneen paikassa tietyillä ohjausarvoilla voidaan estimoida yhtälöllä

$$\Delta \mathbf{s} \approx \mathbf{J} \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (2.47).$$

Vastaavasti muutosta ohjausarvoissa tietyllä posen muutoksella voidaan estimoida käänteisellä jakobiaanilla. Käänteinen jakobiaani on laskettavissa vain jos jakobiaanimatriisi on neliöllinen ja sen rangi on täysi. Tässä tapauksessa jakobiaani on 4x4 – matriisi ja parametrit ovat toisistaan lineaarisesti riippumattomia. Tietyissä pisteissä matriisi muuttuu siten, että sen kääntäminen muuttuu numeerisesti epästabiiliksi johtuen matriisin ominaisarvojen suuresta kokoerosta. Näitä pisteitä kutsutaan singulariteettipisteiksi. Jotta jakobiaani ei olisi singulaarinen ja siten ei-kääntyvä, käytetään vaimennuskerrointa  $\lambda$ . Saadaan ohjauksen muutoksen arvoksi

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{e} \quad (2.48).$$

(Buss 2009)

Kohdeposevektorin  $\mathbf{s}$  arvoina käytettiin suoran kinematiikan antamia ratkaisuja muuttujille  $x_T$ ,  $z_T$  ja  $\alpha$ . Lisäksi tulee työkoneen ollessa kytkettynä huomioida työkoneen joustamattomuus, eli vetovarsien päiden välisen etäisyyden tulee pysyä vakiona. Tämä huomioidaan yhtälöllä 2.49, joka augmentoidaan jakobiaaniin.

$$(x_r - x_l)^2 + (y_r - y_l)^2 + (z_r - z_l)^2 = (d_L^R)^2 \quad (2.49)$$

Osittaisderivaatat laskettiin kummankin vetovarren molempien ohjauskulmien suhteen. Kohdeposevektori  $\mathbf{s}$  ja ohjausvektori  $\boldsymbol{\theta}$  on esitetty yhtälössä 2.50.

$$\mathbf{s} = [x_T \ z_T \ \alpha \ d_L^R]^T \quad (2.50)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_{xl} \ \theta_{xr} \ \theta_{zl} \ \theta_{zr}]^T$$

Pitch-kulman laskennan ollessa mukana ilmeni jakobiaanin laskennassa numeerisia ongelmia. Niinpä päädyttiin ratkaisuun, jossa käännetyn jakobiaanin viimeiseksi riviksi lisättiin käänteisestä kinemaattisesta mallista laskettu työntövarren pituuden osittaisderivaatta ohjausreferenssien suhteen, kaava 2.51.

$$J_U = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_U^H}{\partial x_T} & \frac{\partial d_U^H}{\partial z_T} & \frac{\partial d_U^H}{\partial \alpha} & \frac{\partial d_U^H}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Lopullinen matriisi on esitetty kaavassa 2.52.

$$J_K = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & 0 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & 0 \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & 0 \\ (1-\lambda)J_{U1} & (1-\lambda)J_{U2} & (1-\lambda)J_{U3} & 0 & -J_{U4} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Vaimennuskertoimen  $\lambda$  arvo laskettiin jakobianimatriisin suurimman ja pienimmän ominaisarvon suhteesta eli 2-normilla kaavan 2.53 mukaan: kun ollaan lähellä singulariteettia, vaimennuskerroin on suuri ja vastaavasti kaukana singulariteetista nolla.

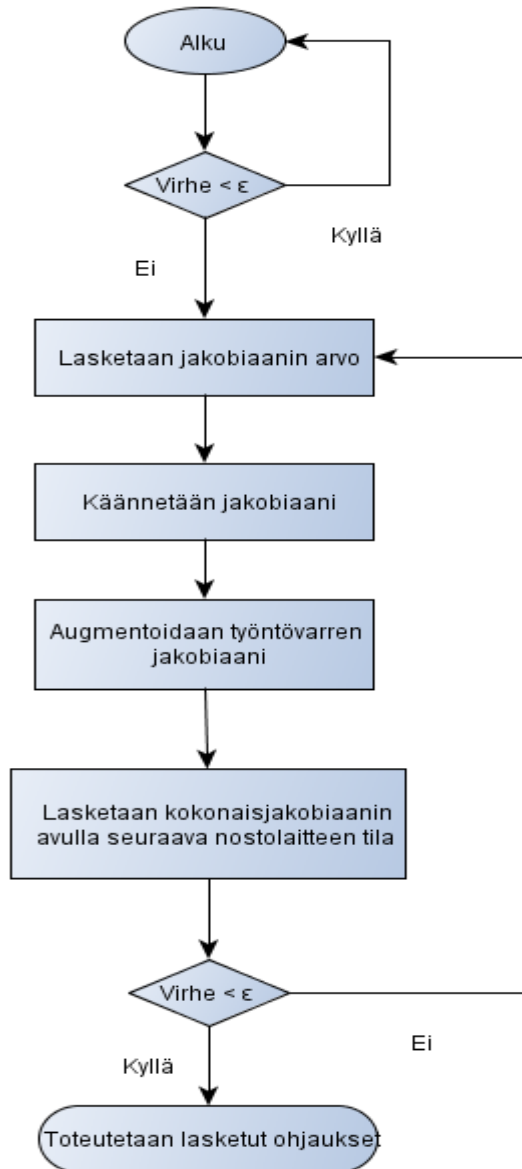
$$\lambda = 1 - \frac{1}{\|J\|_2} \quad (2.53)$$

Olennainen osa DLS-ratkaisua on iteraatio: laskettuihin ohjauksiin lisätään kokonaisjakobianilla ja askelpituudella kerrottu virhetermi. Tämän jälkeen uusilla ohjauksen arvoilla lasketaan uudelleen jakobianin arvo.

$$\boldsymbol{\theta}_{k+1} = \boldsymbol{\theta}_k + \mu * J_K \mathbf{e}_k \quad (2.54),$$

jossa  $\boldsymbol{\theta}_{k+1}$  on ohjaus iteraatiolla  $k+1$ ,  $\boldsymbol{\theta}_k$  ohjaus iteraatiolla  $k$ ,  $\mu$  askelpituus,  $J_K$  kokonaisjakobiaani ja  $\mathbf{e}_k$  halutun ja lasketun paikan erotus iteraatiolla  $k$ .

Laskentaa jatketaan, kunnes lasketun posen ja halutun posen erotus on ennalta annettua marginaalia pienempi, jolloin iteraatio lopetetaan ja lasketut ohjaukset toteutetaan todellisessa laitteistossa. Kuva 2-11 havainnollistaa prosessin toimintaa.



Kuva 2-11 Kaavio DLS-menetelmän toiminnasta

### 2.2.7 Käänteinen kinemaattinen ratkaisu 4: hybridiratkaisu

Koska halutuista pitch- ja roll- kulmista sekä tunnetusta yaw-kulmasta saadaan suoraan työntövarren haluttu ohjaus, laadittiin myös malli jossa vetovarsien ohjaukset laskettiin DLS-menetelmällä ja työntövarren ohjaus samalla tavalla kuin geometrisessa mallissa, yhtälöiden 2.40-2.42 avulla. Näin ratkaisu yhdistää piirteitä tarkasta ja iteratiivisesta ratkaisusta ja on siten nimetty hybridiratkaisuksi.

### **2.2.8 Kinemaattiset rajoitukset**

Jotta välttyttäisiin vahingoilta traktorin rakenteille, tulee työavaruutta rajoittaa vastaavasti myös ohjauksen puolesta. Käytännössä suurimman rajoitteen luo työntövarsi, jonka kiinnitys sallii vain jonkin verran sivusuuntaista liikettä. Lisäksi työntövarren ollessa lyhyenä ja nostettaessa työkonetta, osuu työntövarsi ulkoisen hydrauliiikan liittimiin, mikä on potentiaalisesti hyvinkin vaarallista.

Rajoitukset toteutettiin laskemalla kulmaa, jonka työntövarsi muodostaa vaaka- ja pystysuunnassa suhteessa kiinnityksiinsä. Turvalliselle rajalle tullessa ohjaukset kulmaa kasvattaviin suuntiin rajoitetaan. Vetovarsien maakosketusta ei estetty ohjelmallisesti sillä se ei ole suoraan traktorin rakenteelle vaaraksi.

## **2.3 Sylinterien yksikkösäätö**

Jotta työkonetta olisi hyvin karteesisesti ohjattavissa, täytyy yksittäisten sylinterien liikkeiden olla hyvin hallittuja. Yleisesti hydrauliiikan säädössä on käytetty PD-säädintä, joka oli tässäkin työssä ensimmäinen vaihtoehto. Seuraavassa kappaleessa on kuvattu sylinterien dynamiikan identifioinnissa käytetyt menettelyt jonka jälkeen esitellään käytetty viritysmenetelmä.

### **2.3.1 Sylinterien parametrien identifiointi**

Aivan ensimmäiseksi kaikille sylintereille määritettiin käsiajolla ääriarvot, jotta välttyttäisiin törmäyksiltä traktorin rakenteisiin. Käytännössä ainoastaan sivurajoittimilla oli vaarana rikkoa jotakin. Alimman tason ohjaukseen asetettiin reletyyppiset rajoitukset, joilla oltaessa sallitaan ohjaukset ainoastaan turvalliseen suuntaan.

Tämän jälkeen sylintereille tehtiin yksitellen ramppitestit, jotka on käsitelty tarkemmin luvussa tulokset.

Parametrien identifioimiseksi testidatasta käytettiin sekä silmämääräistä arviointia että Matlabin System Identification Toolboxia. Viive arvioitiin piirretystä datasta ja sylinterin mittaus differentioitiin, jonka jälkeen data vielä pilkottiin positiivisen ja negatiivisen vasteen sisältäviin osiin. Tällä datasta identifioitiin Matlabin System Identification Toolboxilla viiveetön ensimmäisen kertaluvun malli, kaava 2.55, koska viive ja prosessin integroivuus oli esikäsitelty.

$$tf(s) = \frac{K}{1 + T_F s} \quad (2.55)$$

### 2.3.2 Säätimien viritys

Viiveellisille, integroiville ensimmäisen kertaluvun prosesseille on olemassa joitakin viritysääntöjä. Kun säädin on muotoa

$$C(s) = k + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (2.56),$$

ovat säätimen parametrit yleensä muotoa

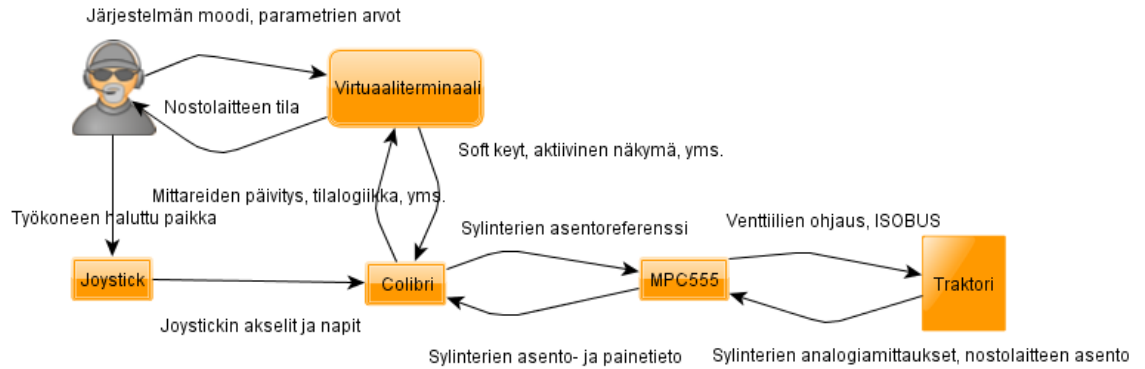
$$k = \frac{a}{K_v L}, \quad k_i = 0, \quad k_d = \frac{a T_F}{K_v L} \quad (2.57),$$

jossa  $k$ ,  $k_i$  ja  $k_d$  ovat PID-säätimen termien kertoimet,  $K_v$  on järjestelmän vahvistus,  $L$  putkiviive ja  $T_F$  dynaaminen viive. Parametrin  $a$  virittämiseen on useita menetelmiä. (Eriksson, 2007)

## 2.4 Elektroniikka

Tässä luvussa esitellään käytetyt elektroniikan ja tiedonsiirron ratkaisut. Ensin esitetään järjestelmän yleinen rakenne, jonka jälkeen tarkastellaan yksittäisiä tietokonemoduuleita ja itse toteutettuja ratkaisuja.

Nostolaitteen venttiilien ja joystickin väliin laadittiin kaksiportainen järjestelmä. Sylinterien analogisten mittausten lukuun sekä venttiilien ohjaukseen käytettiin PhyCORE-MPC555-ohjainta, jonka esittely tarkemmin seuraavassa. VT-käyttöliittymän hallinta ja käänteisen kinematiikan laskenta suoritettiin Toradex Colibri PXA320 sulautetulla tietokoneella. MPC:n ja Colibrin väliseen tiedonsiirtoon käytettiin ISO 11783-standardin kanssa harmonisoituja, itse määriteltyjä viestejä. Kuva 2-12 esittää tiedonsiirron rakenteen. Omien viestien sisältö on esitetty liitteessä A.



Kuva 2-12 Nostolaiteohjaimen kommunikaatiokaavio

### 2.4.1 PhyCORE-MPC555

PhyCORE-MPC555 on yhdellä kortilla oleva tietokone (Single Board Computer, SBC), jossa on Motorolan MPC555-mikrokontrolleri, SRAM- ja FLASH-muistia sekä lähetin-vastaanottimet CAN- ja sarjaporttiliikenteelle. MPC555 tarjoaa kaksi CAN-väylää, 16-kanavaisen 10-bittisen AD-muuntimen sekä GPIO:ta. Suorittimena on 40Mhz PowerPC ja suoritin tukee 64-bittisiä liukulukuja.

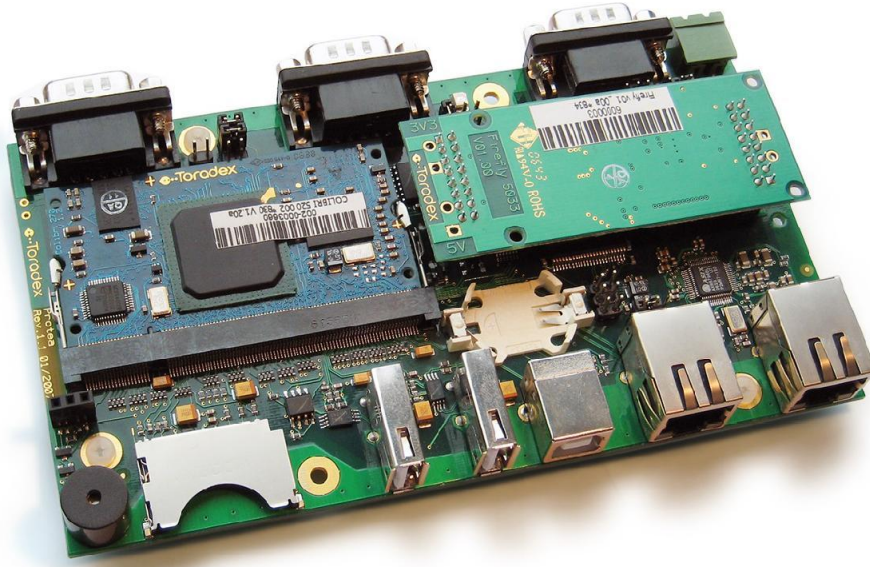
SBC on kytketty kahdella 160-pinnisellä Molex-liittimellä PCM-995 –kehitysalustaan, jota tässä työssä käytettiin kehityksen lisäksi myös varsinaisena emolevynä. PCM-995 tarjoaa D9-liittimet CAN-väylille ja sarjaportteille, D25-liittimen debug-käyttöön sekä VG-96 –liittimen IO:n liittämiseen. Liitäntävaihtoehtona on myös piikkirima.



Kuva 2-13 PhyCORE MPC555 -Single board computer(Phytec, 2012)

## 2.4.2 Toradex Colibri PXA320 ja Toradex Protea

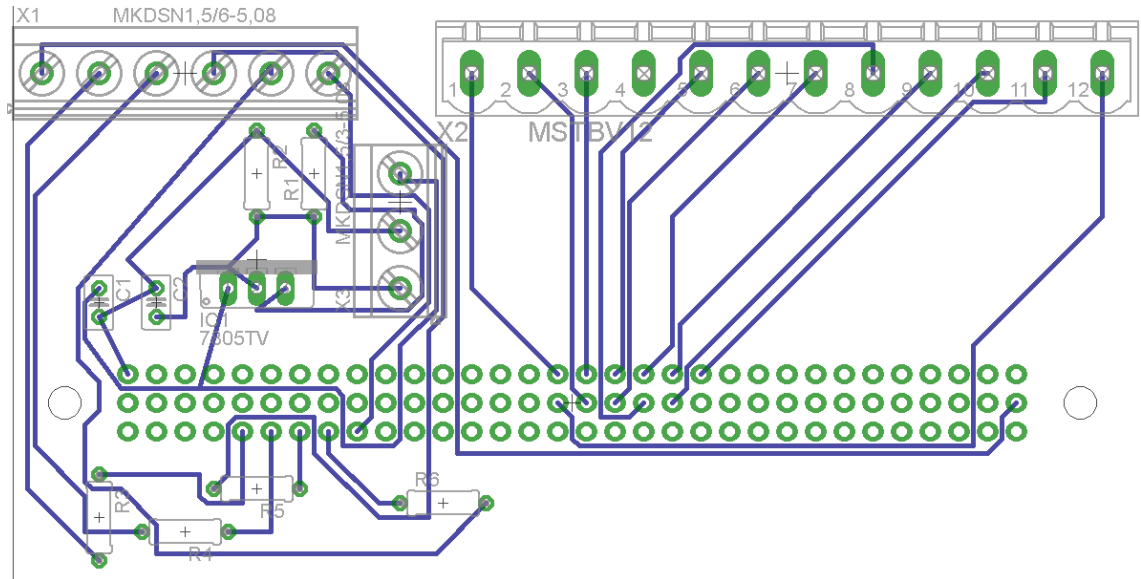
Toradex Colibri PXA320 on SODIMM-kokoinen tietokonemoduuli. Prosessorina siinä on Marvellin Xscale 806Mhz, muistia on 128Mb DDR-SDRAMia sekä 1Gb Flash-muisti. Moduulia käytettiin Toradexin Protea-emolevyllä, jolloin kokonaisuus toimi itsenäisenä sulautettuna tietokoneena. Tämän työn kannalta olennaisimmat liitännät levyllä ovat CAN-väylä, kaksi usb-paikkaa, ethernet-liitäntä sekä SD-muistikorttipaikka. Käyttöjärjestelmänä laitteessa on Windows Embedded CE 6.0. Protea, jossa Colibri-moduuli on kytkettynä paikalleen, kuvassa alla (Kuva 2-14).



Kuva 2-14 Toradex Protea-emolevy, jossa Colibri PXA320-moduuli asennettuna

## 2.4.3 Liitäntälevy

Ulkoisten mittausten liittämiseksi suunniteltiin ja rakennettiin 100x40mm piirilevy (Kuva 2-15), jossa mittausten lisäksi oli toteutettuna myös syöttöjännitteen regulointi tietokoneille sopivammaksi. Levyllä oli kolme ruuviterminaalia, yksi analogiamittauksille, yksi led-merkkivaloille ja painonapille sekä yksi tulo- ja lähtöjännitteelle. Ledien etuvastukset olivat myös levyllä samoin kuin analogiamittausten 100nF suodatuskondensaattorit. Regulaattori oli National Semiconductorin säädettävä LM1085, jonka lähtöjännite oli asetettu jännitteenjakovastuksilla.

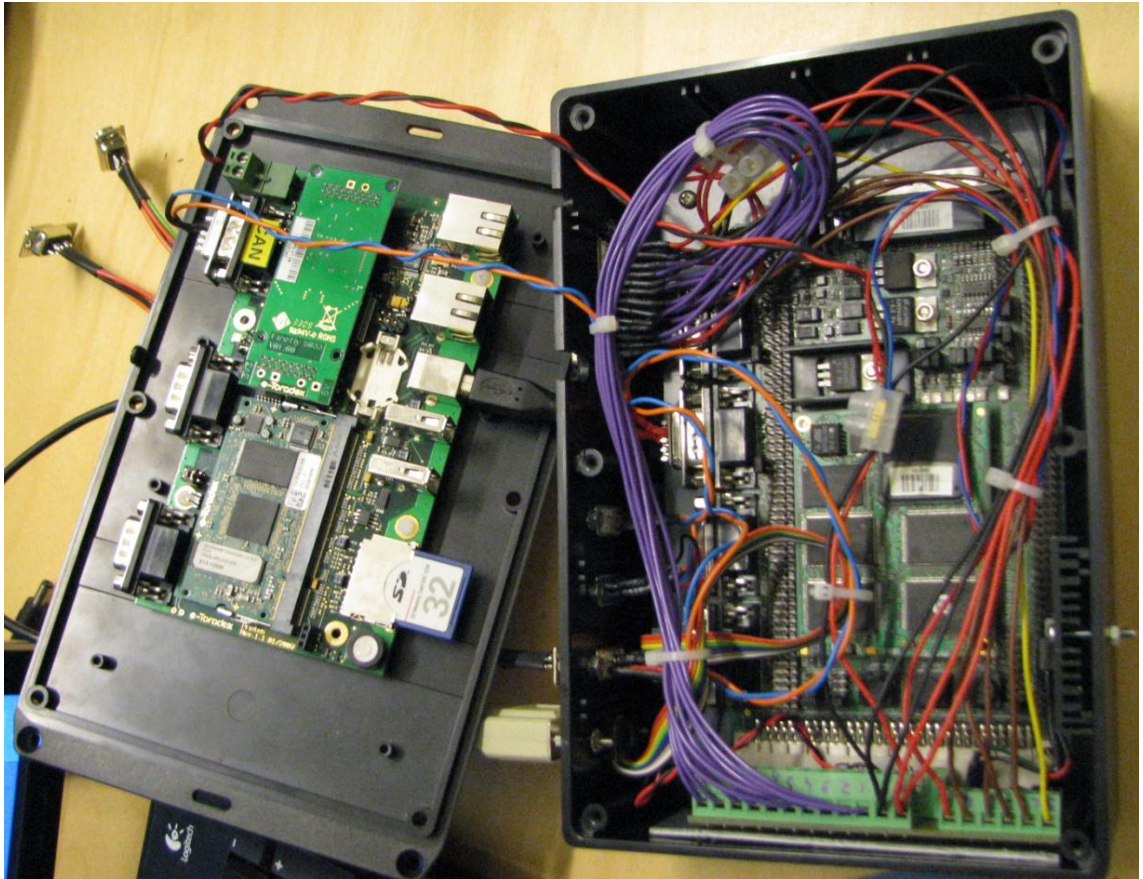


Kuva 2-15 Elektronikan kytkentälevy

#### 2.4.4 BlackBox

BlackBoxiksi nimetty musta laatikko toimii elektronisten komponenttien suojakotelona. Laatikon (Kuva 2-16) kannessa, kuvassa vasemmalla, on Toradex Protea. Laatikon sisällä, liitintälevyn VG-96 –liittimeen kiinni työnnettynä on PhyCORE-MPC555, johon on liitetty myös molemmat CAN-liittimet sekä sarjaportti ohjaimen ohjelmointia varten. Laatikon kyljessä oikealla on regulaattori jäähdytysille. Laatikon vasempaan reunaan on jyrity paikat neljälle D9-liittimelle sekä yhdelle D25:lle. D9-liittimistä yksi on sisään tulevalle väyläliittimelle, joka toimii samalla jännitteensyöttönä tietokoneille. Toinen D9 on joystickin kytkemistä varten, jossa on myös virransyöttö. Kolmas D9 on kytketty MPC:n toiseen CAN-väylään, joka on lähinnä varattuna tulevaa käyttöä varten. Neljäs D9 on MPC:n ohjelmointiliitin. D25-liittimeen on kytketty analogiamittaukset jännitereferensseineen, neljä lediä ja yksi painonappi. Vasempaan laitaan on jyrity myös reiät Colibrin usb-liitintä ja ethernet-kaapelia varten.





Kuva 2-16 BlackBox avattuna

## 2.5 Ohjelmisto

Nostolaiteohjaimen ohjelmistoa suunniteltaessa yleisenä ajatuksena oli hyödyntää Simulinkin koodigenerointimahdollisuuksia ja pyrkiä pitämään ohjelma modulaarisena, siten että alijärjestelmät muodostavat loogisia kokonaisuuksia. Alijärjestelmät toteutettiin pääasiassa kirjastolohkoina, jotta mahdollinen uudelleenkäyttö olisi helpompaa. Seuraavissa kappaleissa on esitelty sekä MPC:n että Colibrin ohjelmistot samoin kuin lyhyesti muutamia apuohjelmia.

### 2.5.1 AgroMassi-alusta ja työkaluketju

Agromassi-projektissa on kehitetty simulinkin koodigenerointia hyödyntävä alusta Windows CE:lle ja tarkemmin Colibrille. Alunperin mukana oli myös tuki Windows 7 ja XP –alustoille debug-käyttöön, mutta tukea ei ole ylläpidetty. Alusta poistaa tarpeen perinteiselle, tekstipohjaiselle ohjelmoinnille samoin kuin tarpeen ISO 11783-standardin yksityiskohtien tuntemukselle esimerkiksi osoitteenvarauksen ja virtuaali-terminaalin kanssa kommunikoinnin osalta. (Oksanen 2011) Selvyyden vuoksi tässä

työssä laadittiin yksi viestinlähetysohjelma lisää, koska haluttiin lähettää viisi 10-bittistä muuttujaa.

Agromassi-alusta tarjoaa valmiin pohjan uuden sovellusohjelman kehittämiseksi, jossa on valmiina moodinvalintatoiminnallisuus, TECU:lta tulevien muuttujien luku väylältä sekä muutamia yleisimmin tarvittavat tilat automaatti, manuaali, konfigurointi ja kuljetus ja moodin valinta. (Oksanen 2011) Alustaan kuuluu myös Matlab-skriptit uuden projektin luomiseen, projektin editointiin, VT-näkymän muokkaamiseen, projektin kääntämiseen ja lataamiseen Colibrille sekä projektin ajamiseen Colibrilla. Koko sovellusohjelma voidaan luoda alusta pitäen Matlabin, Simulinkin ja PoolEditin avulla.

### **2.5.2 PoolEdit ja johdannaiset**

PoolEdit on Farmix-projektissa laadittu, avoimen lähdekoodin ohjelma VT-käyttöliittymien suunnitteluun (Öhman 2008). Ohjelma tallentaa käyttöliittymät ISO 11783 –standardin määrittelemässä XML-formaatissa, josta generoidaan kuvat ja objektien ID:t sisältävä embedded XML –tiedosto. Tästä tiedostosta puolestaan saadaan PoolEditParserilla ISO-11783 –standardin mukainen binääri, joka voidaan ladataan VT:lle Agromassi-alustassa toteutetulla ETP-protokollalla. Agromassi-projektissa kehitetty xml2simulink-konvertteri puolestaan luo käyttöliittymästä oman Simulink-kirjastonsa, josta eri lohkoja on edelleen helppo käyttää varsinaisen sovellusohjelman puolella. Kirjaston lohkot hoitavat VT:n kanssa kommunikoinnin käyttäjältä piilotettuna.

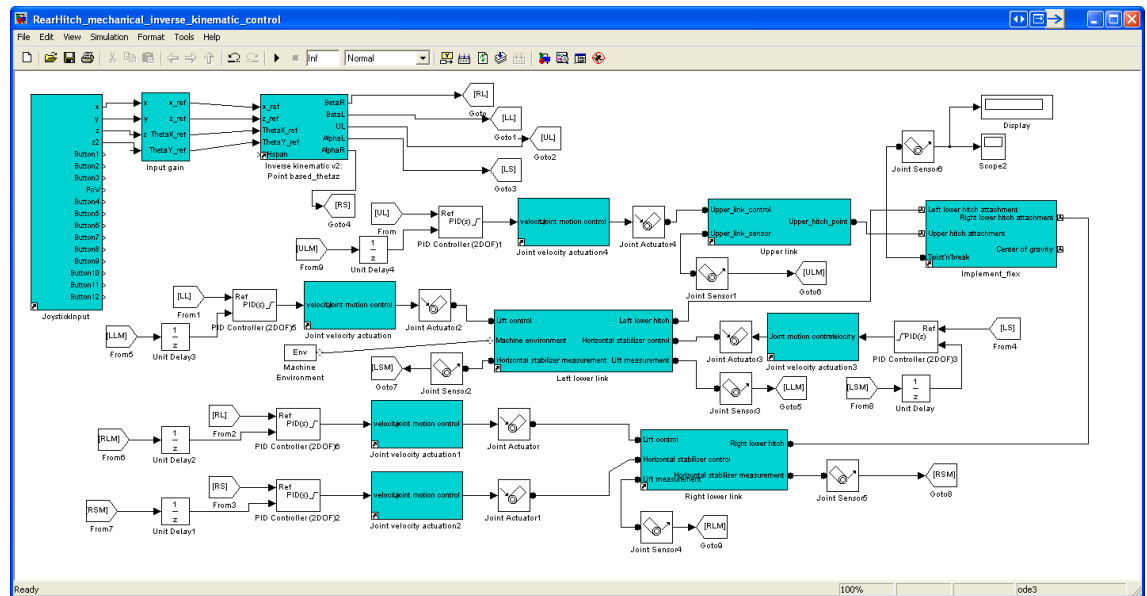
### **2.5.3 MPC555 ja työkaluketju**

MPC555:llä on Simulinkin Embedded Coder –toolboxissa oma sulautettu kohdealustansa, jolloin alkukonfiguroinnin jälkeen sovelluksia voidaan tehdä Simulinkissä kuten Agromassi-alustallakin. CAN-viestien lähetykseen ja vastaanottoon, analogiamittausten lukuun sekä IO:n käsittelyyn on omat lohkonsa. CodeWarrior-kääntäjällä käännetty binääritiedosto ladataan kääntämisen jälkeen MPC:n flash-muistiin sarjaportin välityksellä.

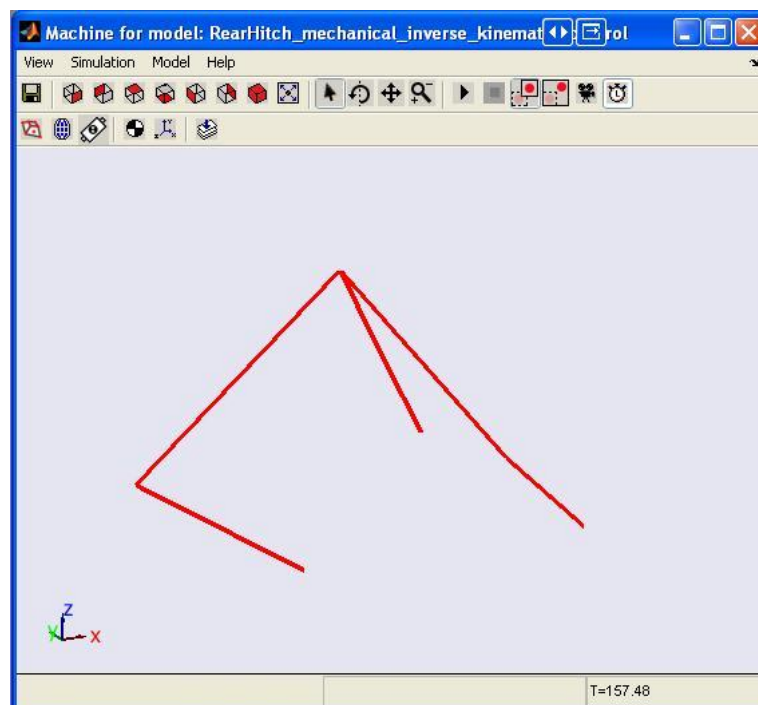
### **2.5.4 Nostolaitesimulaattori**

Nostolaitteen rakenteen hahmottamiseksi ja erilaisten kinemaattisten mallien testaamiseksi tehtiin Matlabin SimMechanics-toolboxilla (MathWorks 2012) nostolaitteesta yksinkertainen simulointimalli. SimMechanicsilla on mahdollista mallintaa erilaisia mekaanisia koneita hyvinkin tarkasti ja visualisoida niiden toimintaa kolmessa ulottu-

vuudessa. Tässä työssä tehdyssä simulaattorissa ei panostettu juurikaan näyttävyyteen vaan selkeyteen. Simulink-malli on esitetty alla (Kuva 2-17) samoin kuin esimerkkinäkymä visualisoinnista (Kuva 2-18).



Kuva 2-17 Nostolaitesimulaattorin Simulink-malli



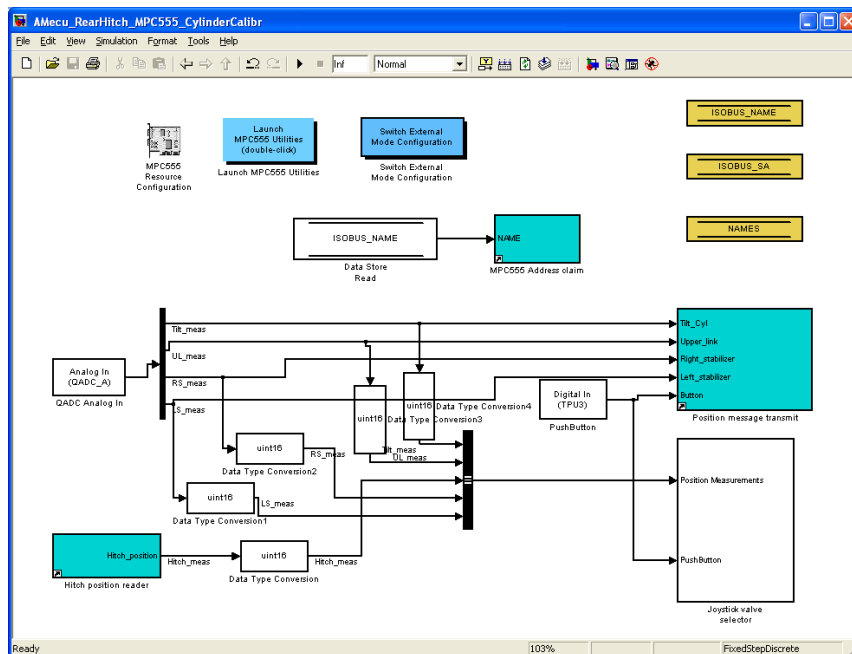
Kuva 2-18 Nostolaitteen visualisointi taaksepäin katsottuna

## 2.5.5 SAE J1939-joystickemulaattori

Koska oikea joystick asennettiin traktoriin, tarvittiin ohjelmien testaamiseen toimistoympäristössä apuväline. Tämän vuoksi ohjelmoitiin C#:lla sovellus, joka muuntaa usb-väylälle kytketyn joystickin viestit traktoriin asennettua SAE J1939-joystickia vastaaviksi ja lähettää viestit väylälle PC:n CAN-adapterin kautta.

## 2.5.6 MPC555-ohjelmat

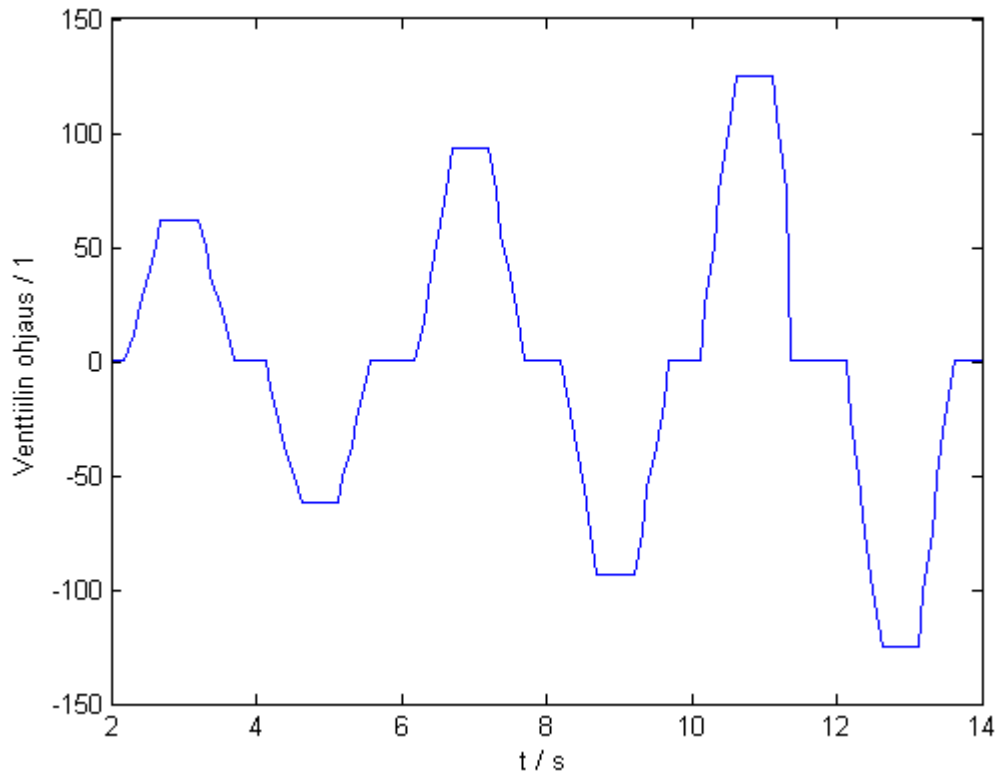
MPC:lle tehtiin sylinterien rajojen ja mittojen kalibrointiin sekä dynamiikan identifiointiin ohjelma, jolla yksittäisien sylinterien virtauksia pystyttiin suoraan ohjaamaan joystickilla. Erillisellä kytkinnapilla oli mahdollista valita testimoodi, jossa ohjaukseksi syötettiin tulososioissa tarkemmin kuvattua ramppimaista herätettä. Moodin indikoimiseen ja MPC:n tilan tarkkailuun käytettiin led-valoja, ohjattu sylinteri tuli lukea IsobusKing-väylämonitorilla: aktiivisen venttiiliviestin numerosta voitiin päätellä, mitä sylinteriä tultiin ohjaamaan. Matlabissa toimivalla parserilla väylälokista saatiin ohjaukset ja mitaukset tuotua Matlabin työtilaan. Sylintereille oli asetettu yksilökohtaiset rajoitukset, joiden yli mentäessä ohjaus kyseiseen suuntaan katkaisitiin reletyypisesti. Kuva 2-19 esittää ohjelman Simulink-mallin.



Kuva 2-19 MPC:n kalibrointiohjelma

Säätimien testaamiseen tehtiin kalibrointiohjelman kaltainen ohjelma, jossa joystick ohjasi suoraan venttiilien virtauksia, mutta testimoodissa venttiilejä ohjattiin säätimillä,

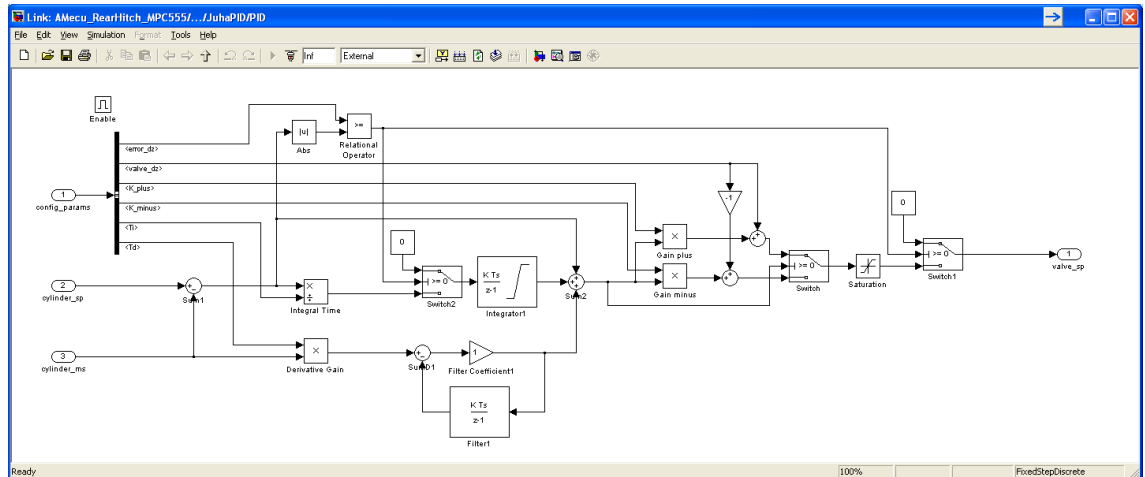
joille pystyttiin joystickin napin painalluksella antamaan rampinomainen ohjaussekvenssi (Kuva 2-20).



**Kuva 2-20** Sylintereille lähetetty heräte

MPC:n varsinaisessa sovellusohjelmassa laite lähettää väylälle sekä paikka- että painemittaukset. Lisäksi vastaanotetaan Colibrilta referenssiviestiä, jonka perusteella yksittäisiä säätimiä ohjataan. Kytännäpilla saadaan valittua ovatko säätimet päällä vai poissa. Ohjelmassa on myös turvatoiminto, jolla ohjaukset pidetään nollassa ellei Colibrilta saada ohjausviestiä. Lähdeosoitteen MPC varaa kiinteästi käynnistyksen yhteydessä.

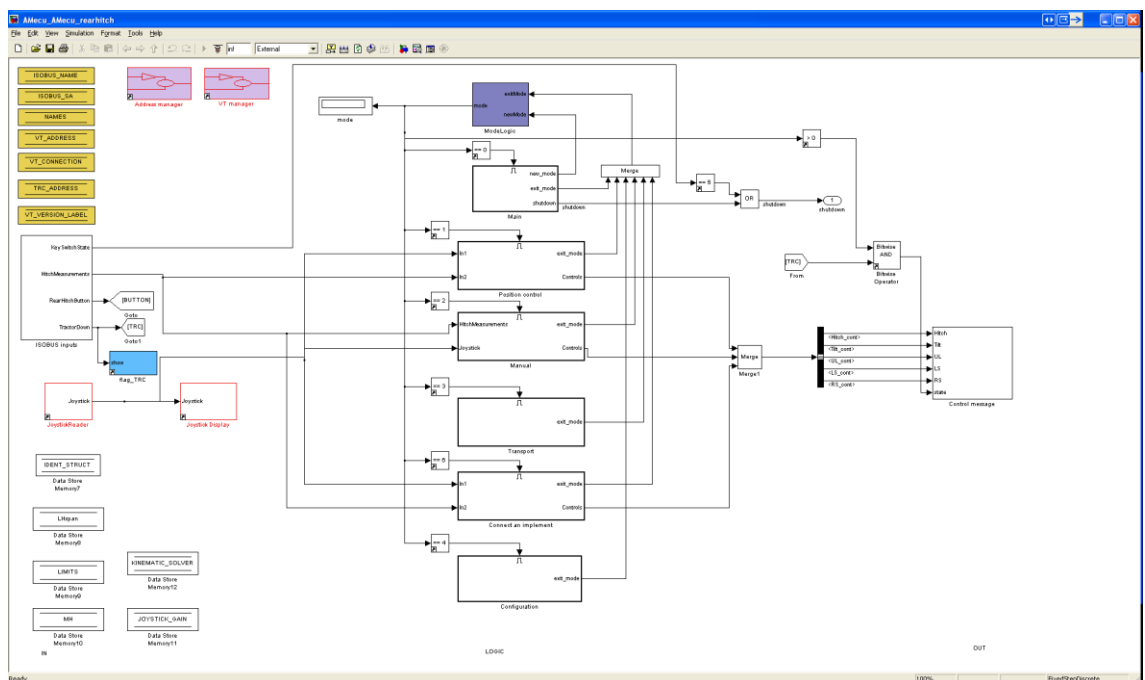
Yksikkösäätimenä käytettiin PID-säädintä, jonka ohessa oli muunnoslohko joka mahdollisti sylinterien identifioitujen parametrien käytön suoraan säädössä. Muita modifikaatioita tavalliseen PID-säätimeen ovat mittauksen derivointi erosuureen sijaan, erisuuret P-termit positiiviselle ja negatiiviselle ohjaukselle, sylinterin kuolleen alueen huomioiminen sekä ohjauksen katkaisu, kun ollaan tietyllä etäisyydellä referenssiarvosta. Säätimen Simulink-toteutus on esitetty kuvassa 2-21.



Kuva 2-21 Käytetty implementaatio PID-säätimestä

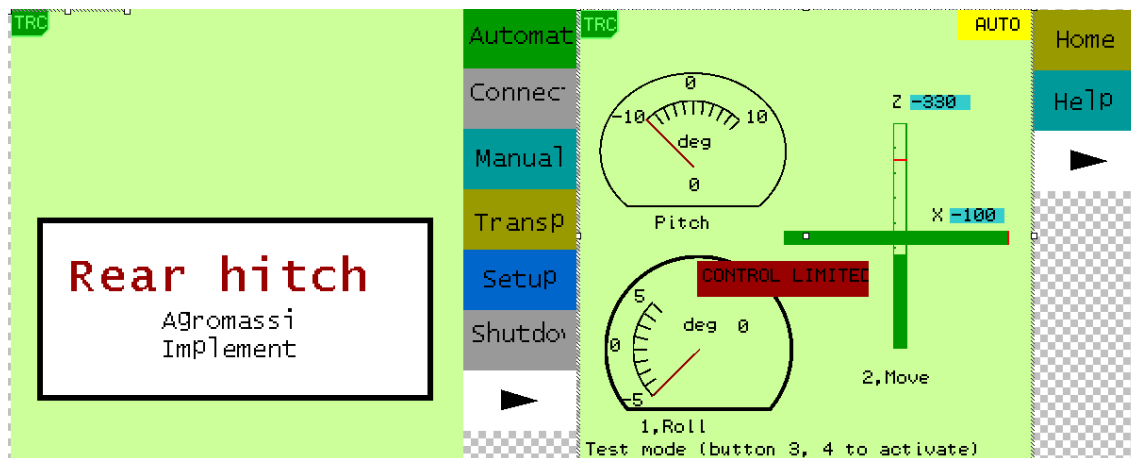
## 2.5.7 Amecu\_rearhitch –pääohjelma

Colibrille AgroMassi-alustalla tehty pääohjelma noudatti pitkälti alustan määrittelemää rinnakkaisten moodien rakennetta, joka on havainnollisestuu kuvassa 2-22. Mittaukset tulevat kaikille olennaisille lohkoille Simulink-väylinä (Simulink bus) ja vastaavasti ohjaukset yhdistetään lohkojen jälkeen. Ohjelma hoitaa myös virtuaaliterminaalin kanssa kommunikoinnin. Valittavana olevat tilat ovat päätäila, automaattitila, työkonen kiinnitystila, manuaalitila, konfigurointitila ja kuljetustila. VT:llä kaikissa tiloissa päätäilaa lukuunottamatta on help-nappi, joka näyttää lyhyen ohjeen tilan käytöstä. Ohje näkyy hetken aikaa myös tilaan ensimmäistä kertaa tultaessa.



Kuva 2-22 Nostolaite-ECU ylimmän tason simulink-malli

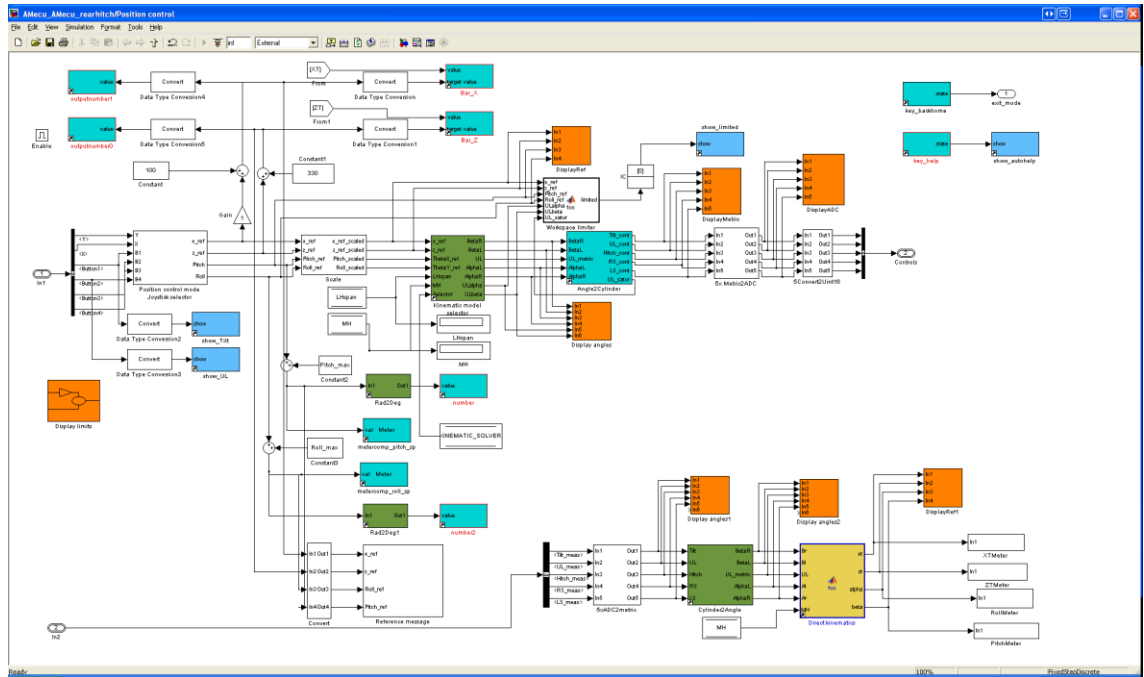
**Päätilassa** ei itsessään ole toteutettuna muuta toiminnallisuutta kuin mahdollisuus lopettaa ohjelman suoritus tai navigoida muihin tiloihin (Kuva 2-23).



**Kuva 2-23 VT: n päätila ja automaattitila**

**Automaattitilassa** VT:n näytöllä ovat pysty- ja sivusuuntaisten siirtymien indikoinnit pysty- ja vaakasuuntaisilla palkkimittareilla sekä pitkittäis- ja poikittaissuuntaisten kallistusten, roll ja pitch, indikoinnit tavallisilla neulamittareilla. Joystickin napilla voidaan valita ohjataanko siirtymiä vai kallistuksia. Punainen ”Control limited” –teksti ilmaisee, jos nostolaitteen ohjaus on turvallisen työavaruuden rajalla ja siten liike kyseiseen suuntaan estynyt. Automaattitilan VT-näkymä on esitetty kuvassa 2-23.

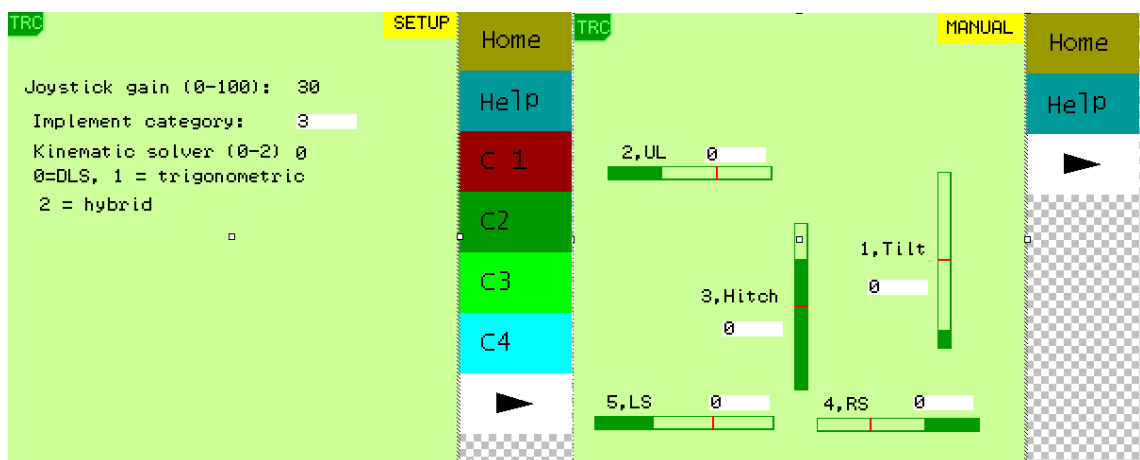
Automaattitilan simulink-mallissa luetaan ensin joystickilta haluttu muutos ohjauksessa ja integroidaan tämä referenssiin. Tämän jälkeen referenssiarvot tuodaan sekä VT:n näytölle että eteenpäin skaalauslohkoon, jossa milliradiaanit skaalataan radiaaneiksi. Referenssiarvojen perusteella lasketaan myös mahdolliset työavaruuden rajoitukset Workspace limiter –lohkossa. Kun käänteisellä kinematiikalla on saatu ratkaistua halutut ohjaukskulmat, muunnetaan nämä kulmakoordinaateista toimilaittekoordinaatistoon. Toimilaittekoordinaatit skaalataan vielä metrisistä lukemista analogimittausten lukemia vastaaviksi, jonka jälkeen ne muutetaan väylälle lähetettäväksi 16-bittisiksi etumerkitömiksi kokonaisluvuiksi. Mallissa olevat oranssit lohkot ovat display-ryhmiä, jotka ovat external mode –debuggausta varten.



Kuva 2-24 Automaattitilan simulink-kaavio

**Manuaalitulassa** (Kuva 2-25) jokaista sylinteriä on mahdollisuus käskyttää erikseen ja myös yhtäaikaaisesti. Tällöin on tärkeää ettei nostolaitteeseen ole kytkettynä työkonetta, koska muita kuin sylinterikohtaisia rajoituksia ei tässä tilassa huomioida. Työkoneen kytkentätilan näkymä on olennaisesti sama kuin manuaalitila, mutta joystickin nappien määrittys on erilainen sivurajoittimien osalta: näitä on mahdollista lähentää tai loitontaa samanaikaisesti, kuin myös siirtää yhtäaikaan sivusuunnassa.

**Konfigurointitulassa** (Kuva 2-25) käyttäjän kannalta olennaisimmat toiminnallisuudet ovat työkoneen kategorian valinta, joka tehdään soft key –napeilla, sekä joystickin herkkyyden valinta. Lisäksi on mahdollista valita käytettävä kinemaattinen ratkaisija.



Kuva 2-25 VT:n konfigurointitila ja manuaalitila



### 3 Tulokset

Tässä luvussa esitellään saadut testitulokset sekä käytettyjen parametrien arvot. Ensin esitellään sylinterien yksikkösäätimien virityksen tulokset, jonka jälkeen esitetään suoritettujen paikoitustarkkuustestien tulokset.

#### 3.1 Sylinterien parametrien identifioinnit

Määritettiin sylinterien lineaarisilta potentiometreiltä saatujen AD-mittausten vastavuus sylinterien fyysiseen pituuteen. Lasketut arvot on esitetty taulukossa 3-1.

**Taulukko 3-1 Sylinterien pituuksien vastavuus AD-mittauksiin**

Sylinteri	l_min	l_max	AD_min	AD_max
Kallistus	580	730	26	917
Työntövarsi	655	905	26	255
Oikea rajoitin	500	575	26	503
Vasen rajoitin	500	580	30	510

Koska nostolaitteen mittaus luettiin väylältä nostolaitteen omasta asento-anturista, oli sen lineaarinen määrittäminen hieman erilainen ja se on esitetty taulukossa 3-2.

**Taulukko 3-2 Nostovarsien kulman vastavuus nostolaitesensorin arvoon**

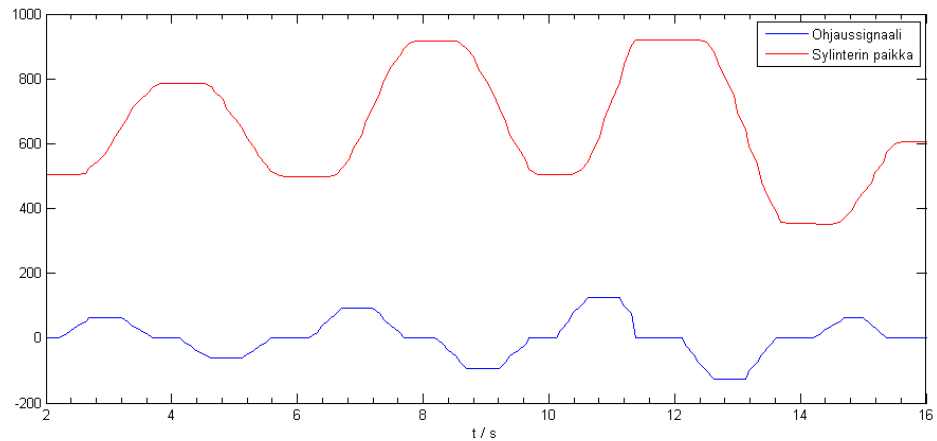
$\Theta_{E,min}$	$\Theta_{E,max}$	H_val,min	H_val,max
-0.223	0.663	26	255

Venttiilien ohjaus oli testeissä asetettu traktorista täydelle virtaukselle. Ohjelmallisesti asetettiin taulukon 3-3 mukaiset kertoimet venttiilien ohjauksille. Kertoimien suuruudet valittiin kokeilemalla ja arvioimalla sopiva liikkeen nopeus.

**Taulukko 3-3 Sylinterien ohjauksen kertoimet**

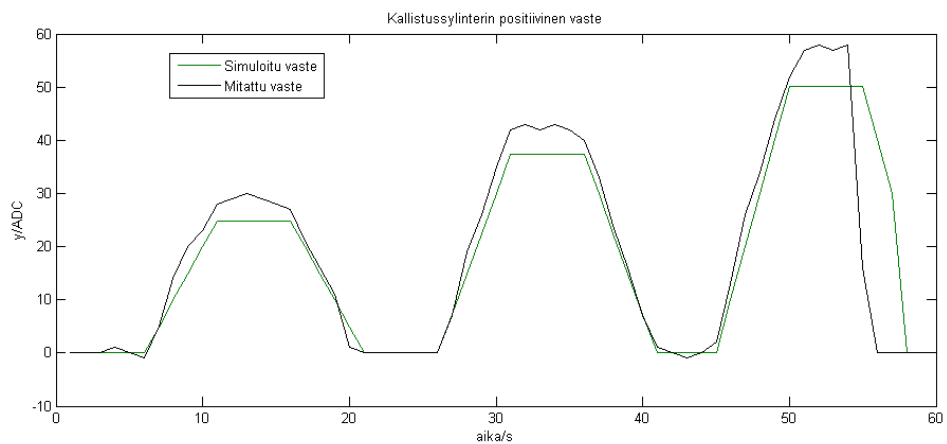
Sylinteri	Kallistus	Työntövarsi	Nosto	Oikea rajoitin	Vasen rajoitin
Kerroin	0.5	0.5	1	0.2	0.2

Sylinterien dynamiikan identifioimiseksi niille syötettiin kuvan 2-20 kaltaista herätettä. Kyseistä ohjausta vastaavat mittaukset ohjauksen kanssa on esitetty kuvassa 3-1. Ohjaus on väliltä -254...254 ja mittaus analogiamittauksen raaka-arvo, jonka väli on 0-1024.



**Kuva 3-1 Kallistussylinterin ohjaus ja vastaava mittaus**

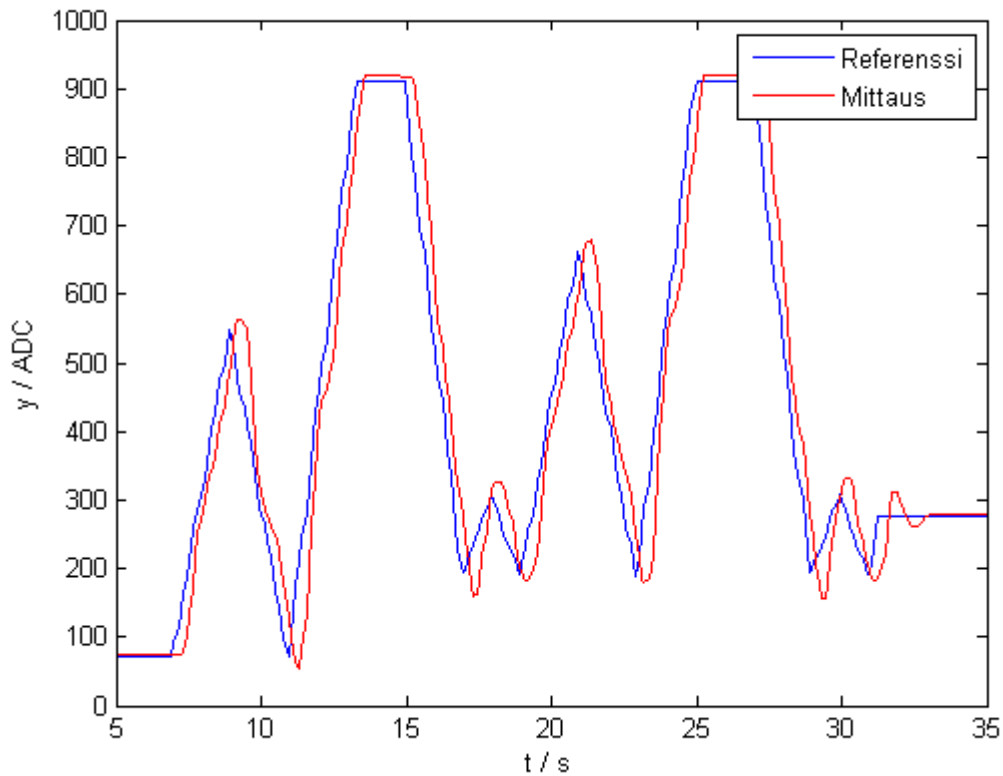
Kuvaajia tarkastelemalla arvioitiin sylinterien putkiviiveeksi 100ms, joka kompensoitiin mittauksiin. Prosessin integroiva luonne huomioitiin derivoimalla mittaus. Koska sylinterin rakenteesta johtuen vahvistus on erisuuri riippuen lineaariliikkeen suunnasta, jaettiin derivoitu mittausdata positiiviseen ja negatiiviseen osaan. Tämän jälkeen ohjaus- ja mittausdata tuotiin Matlabin System Identification Toolboxiin, jolla identifioitiin viiveetön, ensimmäisen kertaluvun prosessi. Identifioitua mallia vasten simuloitu vaste ja mitattu vaste on esitetty kuvassa 3-2. Identifioitu vahvistus oli 0.38 ja dynaaminen viive 0.01.



**Kuva 3-2 Kallistussylinterin identifioitu vaste ja todellinen vaste**

Sylinterien kuolleen alueen määrittämiseksi syötettiin niille yksikkö kerrallaan kasvavaa ohjausta ja katsottiin, millä ajan hetkellä mittauksen arvo muuttuu.

Identifioituilla parametreilla saadun säätimen vaste on esitetty kuvassa 3-3.



**Kuva 3-3 Kallistussynterinin säätimen vaste identifioiduilla parametreilla**

Kaikkien sylinterien identifioidut parametrit ovat raakadatan taulukossa 3-4. Säätimessä käytettiin kappaleessa 2.3.2 annettuja parametreja  $a$ -kertoimen arvolla 0.581.

**Taulukko 3-4 Sylinterien identifioidut parametrit**

Sylinteri	$Kv_{pos}$	$Kv_{neg}$	$L$	$Tf$	$dy_{min}$	$dz$
Kallistus	0,401	0,452	0,1	0,01	2	5
Työntövarsi	0,219	0,257	0,1	0,01	2	5
Nostolaite	0,120	0,140	0,1	0,01	2	6
Oikea rajoitin	1,119	1,117	0,1	0,01	2	3
Vasen rajoitin	1,1085	1,246	0,1	0,01	2	3

### 3.2 Nostolaitteen paikoitus

Nostolaitteen paikoitusta varten määritettiin nostolaitteen mekaniikasta kinemaattisen ratkaisun kannalta olennaiset parametrit. Koska CAD-mallia ei ollut käytettävissä, mitattiin halutut parametrit rullamitalla. Parametrit on esitetty taulukossa 3-5.

**Taulukko 3-5 Nostolaitteen mekaniikan parametrit**

Parametri	Arvo / mm
Vetovarsien kiinnityksen etäisyys traktorissa, $d_{R0}^{L0}$	600
Vetovarren pituus, $l_{vv}$	960
Työntövarren traktorin pään kiinnityksen x-koordinaatti, $x_H$	0
Työntövarren traktorin pään kiinnityksen y-koordinaatti, $y_H$	230
Työntövarren traktorin pään kiinnityksen z-koordinaatti, $z_H$	520
Nostotangon kiinnityksen etäisyys vetovarren juuresta, $d_O^A$	300
Sivurajoittimen kiinnityskorvakkeen etäisyys vetovarren juuresta, $d_O^B$	540
Kiinteän nostotangon pituus, $d_{AS,real}$	630
Nostovarren traktorin pään kiinnityksen x-koordinaatti, $x_{nv}$	0
Nostovarren traktorin pään kiinnityksen y-koordinaatti, $y_{nv}$	-150
Nostovarren traktorin pään kiinnityksen z-koordinaatti, $z_{nv}$	580
Nostovarren pituus, $d_S^Q$	300
Sivurajoittimen kiinnityskorvakkeen etäisyys vetovarresta, $d_B^{B'}$	290
Vetovarsien kiinnityksen leveys, $d_L^R$	*
Työntövarren kiinnityksen korkeus työkoneen päässä, $d_T^U$	*

Taulukossa tähdellä merkityt työkoneen kiinnityspisteiden dimensiot riippuvat luonnollisesti käytetystä työkoneesta. Mitat voivat periaatteessa olla mielivaltaisetkin, mutta ISO 730 –standardi (ISO, 2006) määrittää myös taulukon 3-6 mukaiset nostolaitteekategoriat.

**Taulukko 3-6 Työkoneen kiinnityksen mitat kategorian mukaan**

Kategoria	1N	1	2	3N	3	4N	4
$d_L^R$	400	683	825	825	965	952	1166,5
$d_T^U$	360	460	610	685	685	685	1100

Koska standardin ilmoittama kiinnityksen leveys on sisäpinnasta sisäpintaan mutta kinematiikan laskennassa lasketaan vetovarsien keskipisteiden paikkoja, lisättiin standardin antamiin leveyksiin kiinteästi 40mm.

Nostolaitteen työavaruus määritettiin kokeellisesti riittävät varmuusvarat huomioiden. Työavaruus vapausastekohtaisesti on esitettyä taulukossa 3-7. Rajoituskulmat työntövarrelle olivat 0.15 radiaania vaakatasossa kumpaankin suuntaan ja 0.35 radiaania pystysuunnassa ylöspäin.

**Taulukko 3-7 Nostolaitteen työavaruus vapausasteittain**

Vapausaste	Minimi	Maksimi
x / mm	-100	100
Z / mm	-330	330
Roll / mrad	-100	100
Pitch / mrad	-100	100

Nostolaitteen paikan ja asennon määrittämistä varten kytkettiin nostolaitteeseen kategorian kaksi mukainen testityökone (Kuva 3-4), jonka nelikulmaisen rungon ääripisteet olivat helposti mitattavissa. Koneen leveydeksi mitattiin 230cm ja pituudeksi 130cm, nostolaitteen kiinnityspisteiden etäisyydeksi koneen rungosta mitattiin 29cm. Mittaväli-  
neenä käytettiin tavallista rullamittaa, jolla myös mitattiin työkoneen nurkkien korkeudet (Kuva 3-5). Mittaukset suoritettiin karkeaa betonilattiaa vasten. Sivusuuntaisen siirtymän mittaamiseksi ripustettiin työkoneen etupalkin keskelle narulla punnus, josta paikka katsottiin maahan asetetusta mittatikusta (Kuva 3-6).

**Kuva 3-4 Mittauksen apuna käytetty testityökone**

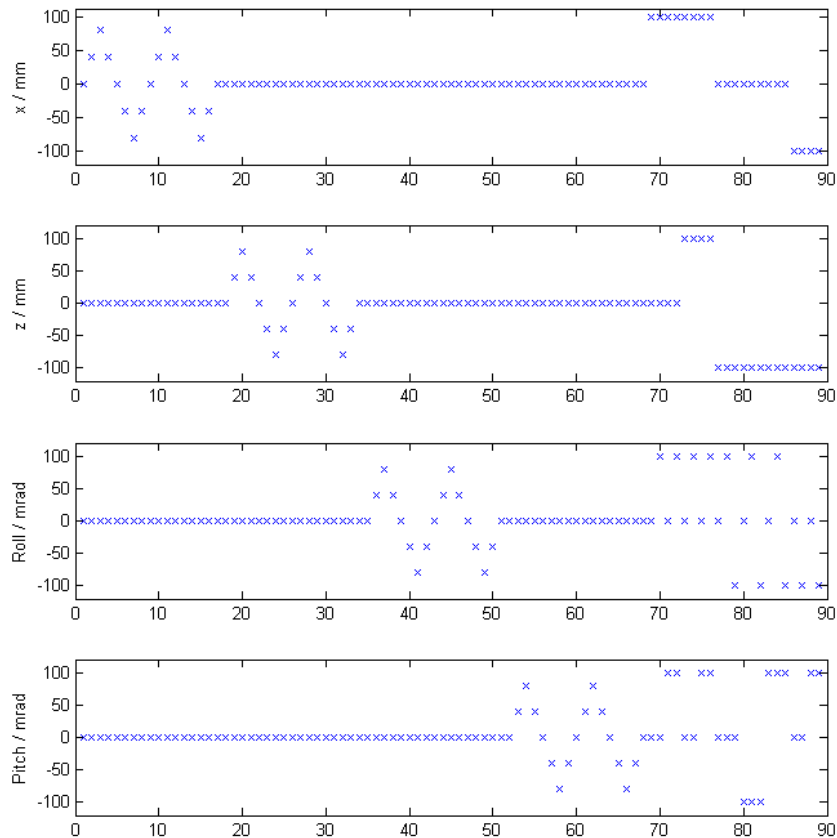


**Kuva 3-5 Työkoneen nurkkien korkeuden mittaus**



**Kuva 3-6 Työkoneen sivusuuntaisen paikan mittaus**

Paikannustarkkuuden määrittystä varten poikkeutettiin kutakin vapausastetta kaksi kertaa ensin positiiviseen ja sitten negatiiviseen suuntaan. Tämän jälkeen mitattiin pisteitä, joissa eri vapausasteet olivat samaan aikaan poikkeutettuina. Kuva 3-7 esittää testisekvenssin. Kussakin pisteessä mitattiin työkoneen rungon neljän ääripisteen korkeudet sekä sivusuuntainen siirtymä.



**Kuva 3-7 Paikoitustesteissä käytetty ohjausekvenssi**

Absoluuttinen paikoitustarkkuus laskettiin koko testiaineistosta. Lisäksi laskettiin paikoitusvirheen keskiarvo, jotta nähtiin onko virhe biasoitunutta vai nolakeskiarvoista. Toistotarkkuuden tunnuslukuna käytettiin samasta pisteestä tehtyjen erillisten mittausten keskihajontaa. Laskennassa käytettiin ainoastaan testiaineiston ensimmäistä osaa, jossa oli toistettu samoja mittauksia.

Jotta eri kinematiikkamalleja voitaisiin vertailla selkeillä tunnusluvuilla, laskettiin vielä sekä absoluuttisen tarkkuuden että toistotarkkuuden vapausasteikohtaisista luvuista painotetut keskiarvot. Hybridimallin arvot on esitetty taulukossa 3-8, jossa  $E$  on virheiden keskiarvo,  $|E|$  on keskiarvo virheiden absoluuttiarvoista,  $|E|_{MAX}$  suurin virheen absoluuttiarvo ja  $TT$  toistotarkkuus.

**Taulukko 3-8 Hybridimallin testitulokset**

Vapausaste	<b>E</b>	<b> E </b>	<b> E <sub>MAX</sub></b>	<b>TT</b>
X	3.81mm	8.9mm	30mm	17.9mm
Z	-2mm	8,36mm	40mm	2.23mm
Roll	-0.00018rad	0.0044rad	0.017rad	0.0033rad
Pitch	-0.039rad	0.039rad	0.062rad	0.0023rad
Painotettu keskiarvo	-	0.054	0.195	0.051

Mittaustulokset graafisessa muodossa on esitetty liitteessä A. Mittauksien virhetermit laskettiin kokonaisdifferentiaalilin avulla, kun yksittäisen lineaarimittauksen tarkkuudeksi arvioitiin 1cm. Taulukko 3-9 esittää DLS-mallin testeistä vastaavat arvot ja taulukko 3-10 geometrisen mallin arvot.

**Taulukko 3-9 DLS-mallin tunnusluvut**

Vapausaste	<b>E</b>	<b> E </b>	<b> E <sub>MAX</sub></b>	<b>TT</b>
X	3.45mm	8.9mm	30mm	13.4mm
Z	-5.01mm	9.8mm	35mm	5.7mm
Roll	-0.00016rad	0.0145rad	0.047rad	0.0112rad
Pitch	-0.017rad	0.0176rad	0.033rad	0.0047rad
Painotettu keskiarvo	-	0.055	0.182	0.052

**Taulukko 3-10 Geometrisen mallin tunnusluvut**

Vapausaste	<b>E</b>	<b> E </b>	<b> E <sub>MAX</sub></b>	<b>TT</b>
X	3.8mm	6.36mm	30mm	11mm
Z	-2.8mm	9.5mm	55mm	5mm
Roll	0.001rad	0.009rad	0.06rad	0.003rad
Pitch	-0.028rad	0.028rad	0.1rad	0.00rad
Painotettu keskiarvo	-	0.0489	0.255	0.04



## 4 Tulosten arviointi

Tässä luvussa pohditaan varsinaisten tulosten lisäksi myös käytettyjä menetelmiä sekä ohjelmien ja elektroniikan kehityksessä tehtyjä ratkaisuja. Lisäksi esitetään mielipide kehitetyn ohjauksen käytettävyydestä ja mietitään mahdollisia sovelluskohteita.

### 4.1 Yleisesti nostolaitteesta

Mekaniikaltaan takanostolaite on ohjauksen suunnittelun kannalta haastava. Rakenteellisesti nostolaitteella on sekä sarja- että rinnakkaiskinemaattisen rakenteen piirteitä: vetovarret ovat kulmaohjattuina kaksi kahden vapausasteen sarjakinemaattista laitetta ja työntövarsi on yhden vapausasteen lineaarilaite. Kuitenkin yhdistettäessä nämä kolmesta pisteestä työkoneseen, on rakenne rinnakkaiskinemaattinen.

Testikäytössä olleella traktorilla ja työkonella liikeradat sivusuuntaisessa lineaariliikkeessä ja kallistuksessa jäivät melko pieniksi. Mekaniikan sallimia absoluuttisia ääriasioita ei määritetty, koska tämä olisi ollut tavoitteiden kannalta turhaa ja riskialtista. Liikettä rajoittivat sylinterien liikeradat, vetokoukun nostotangot ja eri kiinnitysten sallimat liikeradat. Lisäksi roll-kulman säätövara oli epäsymmetrinen, koska alkutilassa kallistussylinteri ei ollut keskitetty. Tätä ilmiötä on jonkin verran mahdollista korjata vasemman nostotangon mekaanisella pituudensäädöllä, mutta tämän säädön mahdollisuutta roll-kulman säädön täydelliseen symmetrisointiin ei tutkittu.

Koska kaikki nostolaitteen mekaniikkaan liittyvät mitat on mitattu rullamitalalla ja paikoitellen hyvinkin silmämääräisesti, auttaisi mallin tarkkuuden lisäämiseen luultavasti eniten CAD-malli traktorin takanostolaitteesta, josta käytetyt mitat saataisiin. Mittojen epätarkkuuksien lisäksi varsinkin sivurajoittimissa on välyksiä, jotka joka tapauksessa estävät tarkan ohjauksen. Yksikkösäätimet eivät saavuttaneet haluttua ohjausta täysin, mutta tästä aiheutuva virhe on muutamien millimetrin luokkaa sylinteriä kohden. Laskennan runsaudesta johtuen myös pyöristysvirheet tuovat osansa kokonaisvirheeseen, tosin tämän merkittävyydestä ei ole tuloksia. Koska riittävä tarkkuus nostolaitteen paikoitukseen on hyvin sovelluskohtaista, annettiin tässä työssä yksinkertaisesti eri mallien mitatut virheet.

### 4.2 Elektroniikka

Hyvää elektroniikassa ja sulautetuissa ohjaimissa oli yhtenevä CAN-protokolla, jolloin vältyttiin useamman kommunikointiratkaisun käytöstä mahdollisesti seuraavista ongelmista. Myös joystickin painonappien takaisinkytkentä joystickille CAN-väylälle

lähetettäväksi oli siinäkin mielessä hyvä ratkaisu, että joystickia käytettiin myös toisessa Agromassi-työpaketissa.

Varsinaisen itse tehdyn elektroniikan kanssa ei ollut ongelmia. Pienenä haasteena elektroniikkalevyn suunnittelussa oli laatikon koko, johon levy sekä tietokoneet oli tarkoitus sijoittaa. Syytä ei myöskään ole unohtaa analogiamittausten alipäästösuodatusta ennen näytteistystä.

### **4.3 Ohjelmisto**

Molemmat laitealustat tukivat Simulink-koodigenerointia ja olivat sikäli alkukonfiguroinnin ja tutustumisen jälkeen helposti ohjelmoitavissa. Rakenteellisesti molempien ohjaiminen ohjelmistot pysyivät koko kehityksen ajan hyvin hallittavissa, vaikka ajoittain mallien lohkohierarkia oli turhankin syvä kun pienetkin funktionaaliset kokonaisuudet oli paketoitu omiksi alijärjestelmikseen. Toisaalta tämä auttoi ylläpitämään mallien selkeyttä.

VT-käyttöliittymässä olisi hyvä olla mahdollisuus asetuspisteiden tallennukseen ja palautukseen, sillä monissa työtehtävissä laitteen halutaan olevan juuri tietyssä asennossa. VT:n manuaali- ja kytkentätilat ovat myös melko riskialttiit, sillä näillä on mahdollista rikkoa laitteita työkoneen ollessa kytkettynä.

### **4.4 Nostolaitteen mallit**

Kaikki kolme testattua nostolaitteen kinemaattista mallia tarjosivat loogisesti oikein toimivan ohjauksen. Sekä DLS:n että hybridimallin laskentaan liittyviä parametreja olisi luultavasti mahdollisuus säätää paremmiksi, sillä näitä ei erityisemmin optimoitu vaan valittiin arvot, joilla saatiin ohjaus toimimaan. Liikeratojen rajoittuneisuudesta johtuen approksimatiivinen geometrinen malli ei hävinnyt olennaisesti tarkemmille, iteratiivisille malleille. Geometrisessa mallissa on kuitenkin huomioitava, että yaw-kulman laskennassa käytetyistä edellisen laskentakierroksen arvoista johtuen tehtäessä suuria siirymiä, tulee poseen virhettä.

DLS- ja hybridimalleissa muunnos kulmakoordinaateista toimilaittekoordinaateiksi ei olisi välttämätön, vaan laskenta voitaisiin tehdä suoraan vektoreilla. Tämä keventäisi ja tarkentaisi laskentaa, parantaen siten myös paikoitustarkkuutta. DLS-mallissa jakobiaanin laskenta suoraan differentioimalla on robotiikan mielessä hieman arveluttavaa, vaikkakin matemaattisesti oikein.

Varsinkin traktorin omasta pitch-kulmasta riippuvaliset arvot eli nostolaitteen korkeus ja lasketun nostolaitteen pitch-kulman arvo riippuvat paljon ulkoisista muuttujista kuten rengaspaineista, takanostolaitteeseen kytketyn työkoneneen massasta ja siitä, onko traktorin eteen kytketty työkonetta tai kuormainta. Niinpä tarkkojen mittausten saamiseksi tulisikin hyödyntää traktorin IMUn mittauksia.

#### **4.5 Yksikkösäätimet**

Yksikkösäätiminä päädyttiin käyttämään PID-säätimiä, joiden I-termi oli viritetty niin suureksi ettei integrointia käytännössä ollut. Viritysparametreja säädettiin jonkin verran käsin paremmiksi, sillä varsinkin työntövarressa ja kallistussylinterissä oli jonkin verran ylitystä. Sivurajoittimien vaste puolestaan oli liian hidas.

#### **4.6 Painesäätö**

Testitraktorissa nostolaitesylinterit, työntövarsi ja kallistussylinteri oli instrumentoitu paineanturein. Näitä olisi potentiaalisesti mahdollista hyödyntää esimerkiksi nostolaitteeseen kytketyn työkoneneen massan ja painopisteen sijainnin arvioinnissa, joiden perusteella voitaisiin virittää yksikkösäätimien parametrit. Haasteena kuitenkin oli sylinterissä olevat lukkoventtiilit, joiden vuoksi staattisessa tilassa lisätty sylinterien kuormitus ei näkynyt paineantureilla asti. Vastaavasti liikuttaessa sylintereitä mittauksissa näkyy kuorman lisäksi myös pumpun tuottama paine, jolloin niistä ei voida päätellä kuormaa. Niinpä painemittauksia ei tässä tutkimuksessa hyödynnetty.

#### **4.7 Käytettävyys**

Kun työkonene on kytkettynä nostolaitteeseen, on sen käyttö automaattitilassa helppoa ja turvallista: jos mitään näppäintä ei paineta, joystickin liike ei aiheuta mitään liikettä. Lisäksi traktorin ulkoisen hydrauliiikan päällekytkennän lisäksi pitää myös erillisellä napilla kytkeä alemman tason säätimet päälle, jotta nostolaite liikkuisi. Joystickin napilla valitaan, halutaanko muuttaa nostolaitteen rotaatioita vai translaatioita. Jos halutaan ajaa nostolaite suoraan haluttuun asentoon, voidaan alemman tason säätimet kytkeä pois päältä, säätää ohjaukset halutuiksi VT:n näytön mukaan ja tämän jälkeen laittaa säätimet päälle, jolloin nostolaite menee suoraan haluttuun asentoon. Koska varsinaista trajektorin laskentaa ei oltu toteutettu, esiintyi liikkeissä hieman sekventiaalisuutta.

Työkoneneen kytkentä nostolaitteeseen ei huonon näkyvyyden vuoksi ollut helppo tehtävä, varsinkaan työntövarren kiinnityksen osalta, sillä pituutta ei pystynyt säätämään

oltaessa tekemässä varsinaista kytkentää. Työkoneen kiinnitys kehittyneeseen nostolaitteeseen vaatisikin oman automaatiosovelluksensa.

#### **4.8 Sovelluskohteet**

Farmix-projektissa nostolaite suunniteltiin tien lanausta silmällä pitäen ja niinpä se on ensimmäinen sovellusesimerkki myös tälle nostolaitteelle. Tien lanauksessa on tärkeää saada roll-kulma säädettyä tarkkaan, jotta tien kaltevuus on sopiva. Toinen sovellus on vetoaisalla hinattavan työkoneen kaarreajo, jossa nostolaitteen sivusuuntaisella siirrolla pystytään vaikuttamaan työkoneen kulkeman kaaren säteeseen. Juontokouran, kuva 4-1, käytössä lisävapausasteista on myös hyötyä, mikäli joudutaan operoimaan ahtaissa oloissa. Myös niittomurskaimella voitaisiin kehittyneen nostolaitteen avulla paremmin seurata maaston muotoja.



**Kuva 4-1 Juontokoura**

## 5 Päätelmät

Suhteellisen pienillä rakenteellisilla muutoksilla saadaan traktorin takanostolaitteen vapausasteiden määrä kasvatettua yhdestä neljään. Farmix-projektissa kehitettyyn nostolaitteeseen verrattuna käytetyt menetelmät olivat uusia ja samoin uuden ohjausjärjestelmän rakenne mahdollisti tehokkaamman laskennan. VT-käyttöliittymä on myös hyödyllinen lisä etenkin silloin, kun nostolaite halutaan tarkasti tiettyyn asetusarvoon.

Kehitetty ohjauslaitteisto mahdollistaa kolmipistekiinnitteisten työkoneiden uudenlaisen ohjaamisen. Olennaisimpana parannuskohteena olisi sulavan trajektoriohjauksen kehitys, jolloin pisteestä toiseen voitaisiin siirtyä sulavasti. Ohjauksen tarkentamiseksi ensimmäinen askel olisi nostolaitteen mittojen tarkentaminen. Lisäksi DLS- ja hybridimallin parametrit tulisi määrittää älykkäämmällä menetelmällä. Yksikkösäätimien parametrien virityksellä saataisiin sylintereiden vasteita parannettua nopeamman toiminnan ja pienemmän ylityksen muodossa.

Kehitetyistä malleista ei testien perusteella löytynyt yksiselitteistä voittajaa. Geometrisen malli tarjosi parhaan toistotarkkuuden ja pienimmän virheen keskiarvon, mutta toisaalta maksimivirhe oli suurin testatuista malleista. DLS- ja hybridimallien tuloksissa ei ollut merkittävää eroa.

Se, miten paljon lisähyötyä on John Deeren heksapodinostolaitteesta ja sillä saavutettavista kaikista kuudesta vapausasteesta, on luultavasti hyvin sovelluskohtaista. Joka tapauksessa tämä järjestelmä vaatii huomattavasti mittavimmat muutokset olemassaolevaan nostolaitteeseen kuin tässä tutkimuksessa käytetty laitteisto.

## Lähdeluettelo

- Agri-Kymi, 2012. *Tempo juontokoura*. [online] Saatavilla:  
<http://www.agrikymi.fi/fi/tyokoneet/traktorintyolaitteet/juontokourat/tempojuontokoura> [Viitattu: 4.5.2012]
- AI Access, 2012. *Projection matrix*. [online] Saatavilla:  
[http://www.aiaccess.net/English/Glossaries/GlosMod/e\\_gm\\_projection\\_matrix.htm](http://www.aiaccess.net/English/Glossaries/GlosMod/e_gm_projection_matrix.htm) [Viitattu 20.4.2012]
- Aracil, R., Saltaren, R.J., Reinoso, O., 2006. *A Climbing Parallel Robot*. IEEE Robotics & Automation Magazine, 3/2006.
- Briot, S. ja Boney, I.A., 2007. *Are parallel robots more accurate than serial robots?* CSME Transactions 31, 4, s. 445-456.
- Bruzzone, L, Molfino, R.M., 2003. *Special-purpose Parallel Robot For Active Suspension of Ambulance Stretchers*. International Journal of Robotics and Automation, vol. 18, N 3, s. 121-130.
- Buss, S.R., 2009. *Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods*. [online] Saatavilla:  
[math.ucsd.edu/~sbuss/ResearchWeb/.../iksurvey.pdf](http://math.ucsd.edu/~sbuss/ResearchWeb/.../iksurvey.pdf) . [Viitattu 9.2.2012]
- Craig, J.J., 2005. *Introduction to robotics – Mechanics and Control*. Kolmas painos. New Jersey:Pearson.
- Eriksson, L., Oksanen, T., 2007. *PID Controller Tuning for Integrating Processes: Analysis and New Design Approach*. ISMA 2007, Sharjah.
- Ferguson Family Museum. *Three-point linkage*. [online] Saatavilla:  
[http://www.ferguson-museum.co.uk/3\\_point.htm](http://www.ferguson-museum.co.uk/3_point.htm) [Viitattu 24.11.2011]
- Hunt K.H., 1983. *Structural kinematics of in parallel actuated robot arms*. Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, 105(4): 705–712, Maaliskuu 1983.
- IKH, 2012. *Hydrauliset työntövarret*. [online] Saatavilla:  
[http://www.ikh.fi/documents/key20120429130715/Paivityssivut/pdf/T03\\_fi.pdf](http://www.ikh.fi/documents/key20120429130715/Paivityssivut/pdf/T03_fi.pdf) [Viitattu 29.4.2012]
- International Organization for Standardization, 2006. *ISO/DIS 730 – Agricultural wheeled tractors – Rear mounted three-point linkage – Categories 1N, 1, 2, 3N, 3, 4N and 4*. ? :ISO.
- ISO, 1998. *ISO 11783 Part 3: Data link layer*.
- ISO, 2001a. *ISO 11783 Part 4: Network layer*.
- ISO, 2001b. *ISO 11783 Part 5: Network management*.
- ISO, 2002a. *ISO 11783 Part 2: Physical layer*.
- ISO, 2002b. *ISO 11783 Part 7: Implement messages application layer*.
- ISO, 2002c. *ISO 11783 Part 9: Tractor ECU*.
- ISO, 2004. *ISO 11783 Part 6: Virtual terminal*.

- ISO, 2005a. *ISO 11783 Part 1: General standard for mobile data communication.*
- ISO, 2005b. *ISO 11783 Part 8: Power train messages.*
- ISO, 2005c. *ISO 11783 Part 10: Task controller and management system data interchange.*
- ISO, 2005d. *ISO 11783 Part 11: Mobile Data Element Dictionary.*
- ISO, 2005e. *ISO 11783 Part 12: Diagnostics.*
- ISO, 2005f. *ISO 11783 Part 13: File Server.*
- Lhlift 2011, *Lhlink esite*. [online] Saatavilla: <http://www.lhlift.com/media/lhlink-esite-fin.pdf>. [Viitattu 30.1.2012]
- Mathworks, 2012. *SimMechanics*. [online] Saatavilla: <http://www.mathworks.se/products/simmechanics/> [Viitattu 19.4.2012]
- Merlet, J.P., 2006. *Parallel Robots*. Toinen painos. Dordrecht:Springer.
- Morling, R.W., 1979. *Agricultural Tractor Hitches Analysis of Design Requirements*. ASAE Distinguished Lecture Series, Tractor Design, No. 5.
- National University of Singapore, 2011. *Stewart Platform Development*. [online] Saatavilla: <http://serve.me.nus.edu.sg/ongsk/SP2007/SP2003.JPG> [Viitattu 24.11.2011]
- Oksanen, T., 2010. *Closed loop control over ISO 11783 network – challenges of plug-and-play*. AgriControl 2010.
- Oksanen, T, Kunnas, A., Visala, A., 2011. *Development and Runtime Environment for Embedded Controller supporting ISO 11783 Standard*. 18. IFAC:in maailmankongressi, IFAC 2011, Milano, S. 2895-2900.
- Parallemic, 2001. *Delta Parallel Robot – the Story of Success*. [online] Saatavilla: <http://www.parallemic.org/Material//DeltaSIG.gif> [Viitattu 24.11.2011]
- Pat. US 2003/0217852 A1. *Hitch for a work vehicle*. Deere & Company, a Delaware corporation. (Bernhardt, G.; Fedotov, S.; Rudik, R.) Hak. 10/426,767, 30.4.2003. Julk. 27.10.2003. 10s.
- Pat. US 6,581,695 B2. *Vehicle/Implement coupling system*. Deere & Company, Moline, IL. (Bernhardt, G.;Fedotov,S.;Rudik, R.;Weiss, H.) Hak. 10/058,937, 29.1.2002. Julk. 24.6.2003. 11s.
- Pat. US 6,688,403 B2. *Control system for a vehicle/impelement hitch*. Deere & Company, Moline, IL. (Bernhardt, G.;Fedotov,S.;Rudik, R.;Weiss, H.) Hak. 10/096,700, 12.3.2002. Julk. 10.2.2004.
- Pat. US 6,698,524 B2. *Implement Hitch and control system*. Deere & Company, Moline, IL. (Bernhardt, G.;Fedotov,S.;Rudik, R.;Weiss, H.) Hak. 10/128,319, 23.4.2002. Julk. 2.3.2004.
- Phytec, 2012. *Phytec image bank*. [online] [http://www.phytec.com/\\_images/products/rapid-development-kits/PowerPC/MPC555onCB.jpg](http://www.phytec.com/_images/products/rapid-development-kits/PowerPC/MPC555onCB.jpg) [Viitattu 15.2.2012]
- PRlog, 2012. [online] Saatavilla: <http://www.prlog.org/10616169-the-parker-vansco-isobus-vt.jpg> [Viitattu 25.4.2012]

SpringerImages 2011, [online]

[http://img.springerimages.com/Images/SpringerBooks/BSE=7481/BOK=978-90-481-2346-9/CHP=4\\_10.1007-978-90-481-2346-9\\_4/MediaObjects/WATER\\_978-90-481-2346-9\\_4\\_Fig3\\_HTML.jpg](http://img.springerimages.com/Images/SpringerBooks/BSE=7481/BOK=978-90-481-2346-9/CHP=4_10.1007-978-90-481-2346-9_4/MediaObjects/WATER_978-90-481-2346-9_4_Fig3_HTML.jpg) [Viitattu 3.2.2012]

Valtra, 2012. *Valtra Kuvapankki*. [online] Saatavilla:

[http://www.valtra.fi/images/press\\_06112005\\_isobus3.jpg](http://www.valtra.fi/images/press_06112005_isobus3.jpg) [Viitattu 26.4.2012]

Wikipedia, 2011. *Nostolaitteet*. [online] Saatavilla:

<http://fi.wikipedia.org/wiki/Nostolaitteet> [Viitattu 24.11.2011]

Wikipedia, 2012. *OSI-malli*. [online] Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/OSI-malli> [Viitattu 24.4.2012]

Öhman, M., Kalmari, J., Visala, A., 2008. *XML Based Graphical User Interface Editor and Runtime Parser for ISO 11783 Machine Automation Systems*. IFAC maailmankongressi 2008, Etelä-Korea.



## LIITE A: Määritetyt valmistajakohtaiset viestit

**Taulukko 5-1 Käytetyt standardin ulkopuoliset viestit**

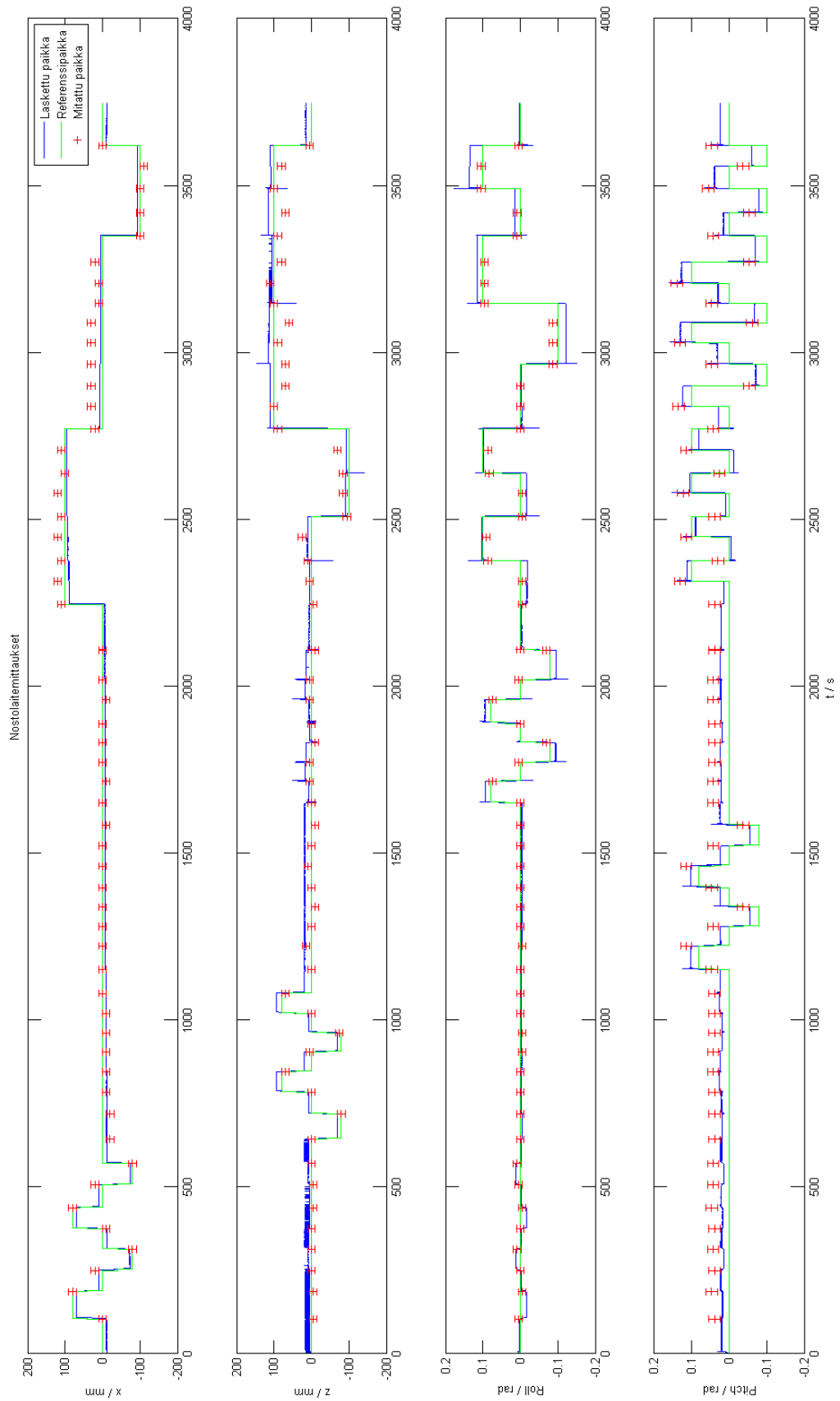
Viesti	ID	PGN	Lähetäjä	Vastaanottaja
Joystick basic 1	CFDD605		Joystick	Colibri/MPC
Paineviesti		FF20	MPC	Colibri
Paikkareferenssi		FF21	Colibri	MPC
Paikan mittaus		FF22	MPC	Colibri
Parametriversti		FF23	Colibri	MPC
Mitattu karteellinen paikka		FF25	Colibri	PC

	Colibri
MPC SA	SA
169	166

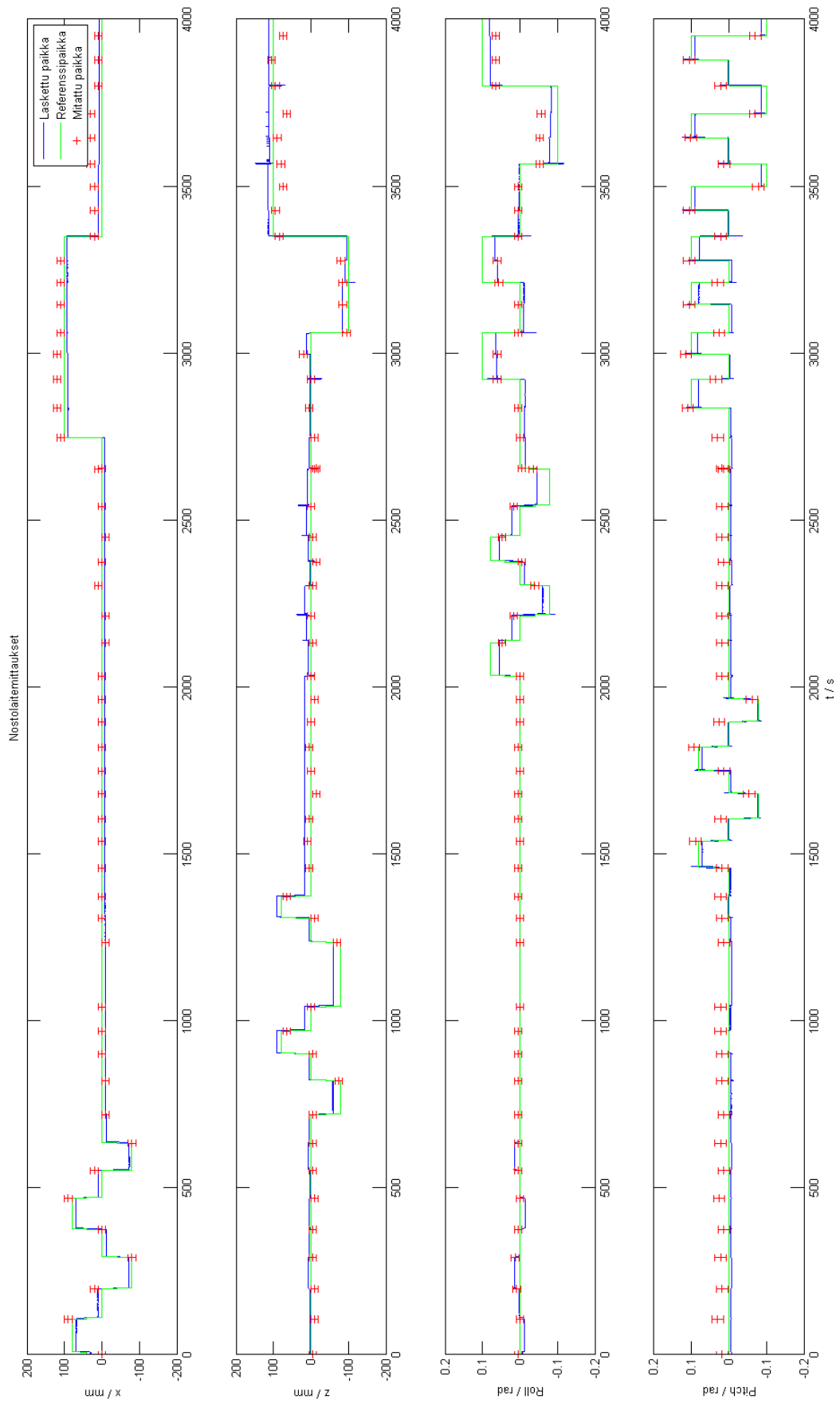
**Taulukko 5-2 MPC:n Colibrille lähettämän mittausviestin(FF22) dataosa**

Bitti	8	7	6	5	4	3	2	1
Tavu 1	MSB Kallistussylinterin mittaus							
Tavu 2	LSB		MSB		Työntövarren mittaus			
Tavu 3	LSB				MSB			
Tavu 4	Oikean rajoittimen mittaus				LSB		MSB	
Tavu 5	Vasemman rajoittimen mittaus							LSB
Tavu 6	Ei käytössä							
Tavu 7	Ei käytössä							
Tavu 8	Järjestelmän tila							

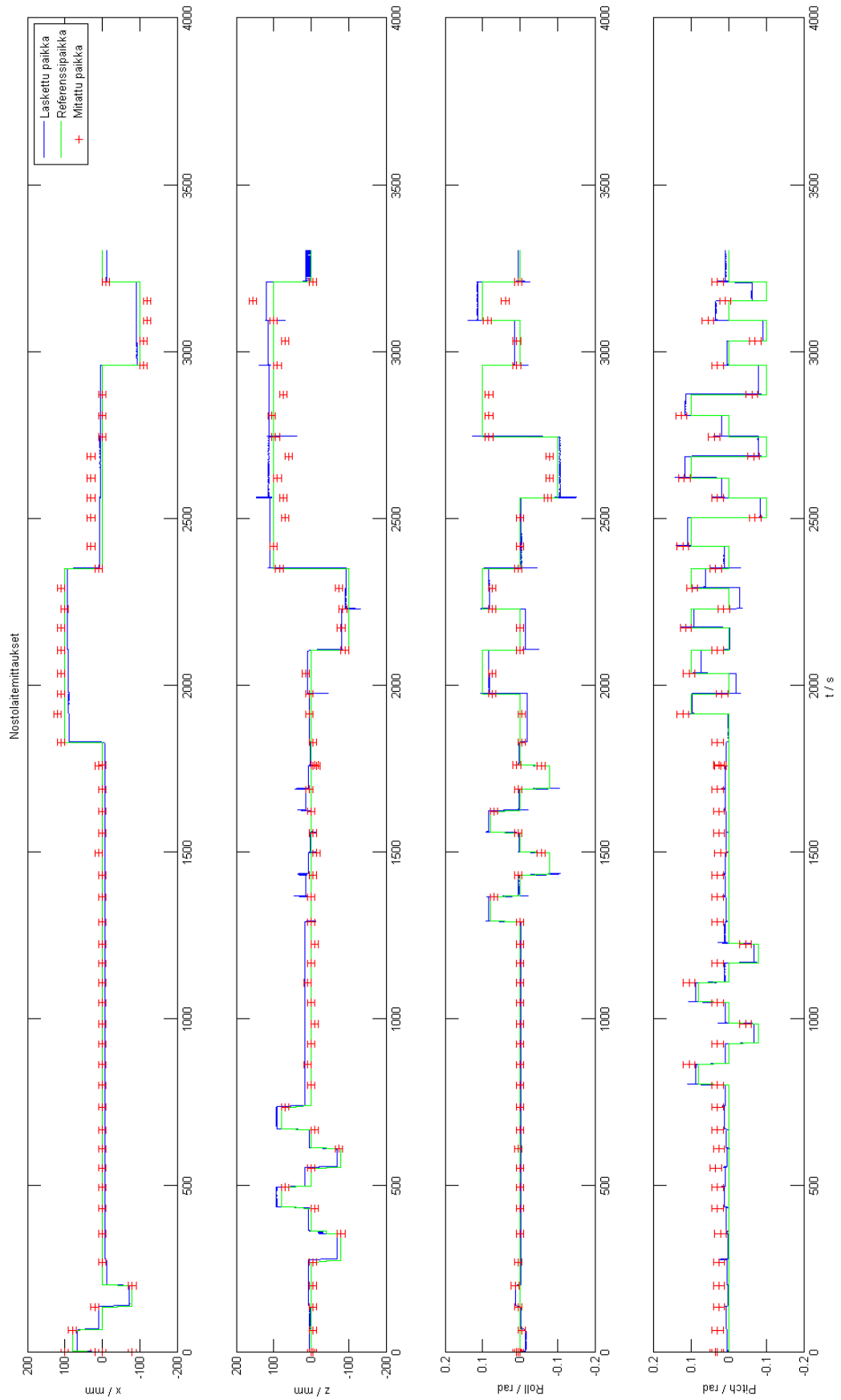
## LIITE B: Paikoituskokeiden mittaustulokset



Kuva 5-1 Hybridimallin vaste



Kuva 5-2 DLS-mallin vaste



Kuva 5-3 Geometrisen mallin vaste

## LIITE C: yhtälöiden ratkaisuja

Vetovarsien jakobiaani:

```
J_numerical = [
  (LL*sin(Al)*sin(Bl))/2,
  (LL*sin(Ar)*sin(Br))/2,
  -(LL*cos(Al)*cos(Bl))/2,
  -(LL*cos(Ar)*cos(Br))/2; ...

  (LL*cos(Bl))/2,
  (LL*cos(Br))/2,
  0,
  0; ...

  ((LL*cos(Bl))/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar)) -
  (LL*sin(Al)*sin(Bl)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)))/(Lspan -
  LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2)/((LL*sin(Bl) -
  LL*sin(Br))^2/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 +
  1),
  -((LL*cos(Br))/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar)) -
  (LL*sin(Ar)*sin(Br)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)))/(Lspan -
  LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2)/((LL*sin(Bl) -
  LL*sin(Br))^2/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 +
  1),
  (LL*cos(Al)*cos(Bl)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)))/(((LL*sin(Bl) -
  LL*sin(Br))^2/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 +
  1)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2),
  -(LL*cos(Ar)*cos(Br)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)))/(((LL*sin(Bl) -
  LL*sin(Br))^2/(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 +
  1)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) + LL*cos(Br)*sin(Ar))^2); ...

  (2*LL*cos(Bl)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)) -
  2*LL*cos(Al)*sin(Bl)*(LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br)) +
  2*LL*sin(Al)*sin(Bl)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar)))/(2*((Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 + (LL*sin(Bl) - LL*sin(Br))^2 +
  (LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br))^2)^(1/2)), -
  (2*LL*cos(Br)*(LL*sin(Bl) - LL*sin(Br)) -
  2*LL*cos(Ar)*sin(Br)*(LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br)) +
  2*LL*sin(Ar)*sin(Br)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar)))/(2*((Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 + (LL*sin(Bl) - LL*sin(Br))^2 +
  (LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br))^2)^(1/2)), -
  (2*LL*cos(Bl)*sin(Al)*(LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br)) +
  2*LL*cos(Al)*cos(Bl)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar)))/(2*((Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 + (LL*sin(Bl) - LL*sin(Br))^2 +
  (LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br))^2)^(1/2)),
  (2*LL*cos(Br)*sin(Ar)*(LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br)) +
  2*LL*cos(Ar)*cos(Br)*(Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar)))/(2*((Lspan - LL*cos(Bl)*sin(Al) +
  LL*cos(Br)*sin(Ar))^2 + (LL*sin(Bl) - LL*sin(Br))^2 +
  (LL*cos(Al)*cos(Bl) - LL*cos(Ar)*cos(Br))^2)^(1/2))];
```

Työntövarren jakobiaani:

```
Jux = [ (2*xt + 2*MH*(sin(ThetaZ)*sin(ThetaX_ref) +
  cos(ThetaZ)*cos(ThetaX_ref)*sin(ThetaY_ref)))/(2*((MH*cos(ThetaZ)*sin
  (ThetaX_ref) - cos(ThetaX_ref)*sin(ThetaZ)*sin(ThetaY_ref)) - yt +
  230)^2 + (zt + MH*cos(ThetaX_ref)*cos(ThetaY_ref) - 520)^2 + (xt +
  MH*(sin(ThetaZ)*sin(ThetaX_ref) +
```

$$\begin{aligned} & \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref}))^2)^{(1/2)}, (2 * zt + \\ & 2 * \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - \\ & 1040) / (2 * ((\text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) - \\ & \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - yt + 230)^2 + (zt + \\ & \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - 520)^2 + (xt + \\ & \text{MH} * (\sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) + \\ & \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})))^2)^{(1/2)), - \\ & (2 * \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref}) * (zt + \\ & \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - 520) - \\ & 2 * \text{MH} * \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) * (xt + \\ & \text{MH} * (\sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) + \\ & \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref}))) + \\ & 2 * \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * (\text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) - \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - yt + 230)) / (2 * ((\text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) - \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - yt + 230)^2 + (zt + \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - 520)^2 + (xt + \text{MH} * (\sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) + \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})))^2)^{(1/2))), \\ & (2 * \text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) + \\ & \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) * (\text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) - \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - yt + 230) + \\ & 2 * \text{MH} * (xt + \text{MH} * (\sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) + \\ & \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref}))) * (\cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) - \cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - \\ & 2 * \text{MH} * \cos(\text{ThetaY\_ref}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) * (zt + \\ & \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - \\ & 520)) / (2 * ((\text{MH} * (\cos(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) - \\ & \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})) - yt + 230)^2 + (zt + \\ & \text{MH} * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \cos(\text{ThetaY\_ref}) - 520)^2 + (xt + \\ & \text{MH} * (\sin(\text{ThetaZ}) * \sin(\text{ThetaX\_ref}) + \\ & \cos(\text{ThetaZ}) * \cos(\text{ThetaX\_ref}) * \sin(\text{ThetaY\_ref})))^2)^{(1/2))]; \end{aligned}$$

### Työntövarren pää, tasoprojisoitu

$$\begin{aligned} \text{xh1} &= (\text{U3}(1)^2 + \text{U3}(2)^2 + \text{s.uh\_true\_height}^2 - \text{ul\_plane}^2 - \\ & (2 * \text{U3}(2) * (\text{U3}(1) * (2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(1)^2 - \text{U3}(2)^4 - \\ & \text{s.uh\_true\_height}^4 - 2 * \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2)^2 - \text{ul\_plane}^4 - \text{U3}(1)^4 + \\ & 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{ul\_plane}^2)^{(1/2)} + \\ & \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2) + \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2) - \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2) + \\ & \text{U3}(2)^3)) / (2 * \text{U3}(1)^2 + 2 * \text{U3}(2)^2)) / (2 * \text{U3}(1)); \\ \text{xh2} &= (\text{U3}(1)^2 + \text{U3}(2)^2 + \text{s.uh\_true\_height}^2 - \text{ul\_plane}^2 - \\ & (2 * \text{U3}(2) * (\text{U3}(1) * (2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(1)^2 - \\ & \text{U3}(2)^4 - \text{s.uh\_true\_height}^4 - 2 * \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2)^2 - \text{ul\_plane}^4 - \\ & \text{U3}(1)^4 + 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{ul\_plane}^2)^{(1/2)} + \\ & \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2) - \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2) + \text{U3}(2)^3)) / (2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{U3}(2)^2)) / (2 * \text{U3}(1)); \\ \text{yh1} &= (\text{U3}(1) * (2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(1)^2 - \text{U3}(2)^4 - \\ & \text{s.uh\_true\_height}^4 - 2 * \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2)^2 - \text{ul\_plane}^4 - \text{U3}(1)^4 + \\ & 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{ul\_plane}^2)^{(1/2)} + \\ & \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2) + \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2) - \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2) + \\ & \text{U3}(2)^3) / (2 * \text{U3}(1)^2 + 2 * \text{U3}(2)^2); \\ \text{yh2} &= (\text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2) - \text{U3}(1) * (2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(1)^2 - \text{U3}(2)^4 - \\ & \text{s.uh\_true\_height}^4 - 2 * \text{U3}(1)^2 * \text{U3}(2)^2 - \text{ul\_plane}^4 - \text{U3}(1)^4 + \\ & 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2)^2 + 2 * \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{ul\_plane}^2)^{(1/2)} + \\ & \text{s.uh\_true\_height}^2 * \text{U3}(2) - \text{ul\_plane}^2 * \text{U3}(2) + \text{U3}(2)^3) / (2 * \text{U3}(1)^2 + \\ & 2 * \text{U3}(2)^2); \end{aligned}$$

Kulmakoordinaateista toimilaitekoordinaatteihin, nostovarsien yläpäiden laskenta:

```

ys = [(s.d_st^2 - d_as^2 + ya^2 + za^2 - (2*za*(ya*(- d_as^4 +
2*d_as^2*s.d_st^2 + 2*d_as^2*ya^2 + 2*d_as^2*za^2 - s.d_st^4 +
2*s.d_st^2*ya^2 + 2*s.d_st^2*za^2 - ya^4 - 2*ya^2*za^2 - za^4)^(1/2) -
d_as^2*za + s.d_st^2*za + ya^2*za + za^3))/(2*ya^2 +
2*za^2))/(2*ya); ...
      (s.d_st^2 - d_as^2 + ya^2 + za^2 - (2*za*(s.d_st^2*za -
d_as^2*za - ya*(- d_as^4 + 2*d_as^2*s.d_st^2 + 2*d_as^2*ya^2 +
2*d_as^2*za^2 - s.d_st^4 + 2*s.d_st^2*ya^2 + 2*s.d_st^2*za^2 - ya^4 -
2*ya^2*za^2 - za^4)^(1/2) + ya^2*za + za^3))/(2*ya^2 +
2*za^2))/(2*ya)];
zs = [(ya*(- d_as^4 + 2*d_as^2*s.d_st^2 + 2*d_as^2*ya^2 +
2*d_as^2*za^2 - s.d_st^4 + 2*s.d_st^2*ya^2 + 2*s.d_st^2*za^2 - ya^4 -
2*ya^2*za^2 - za^4)^(1/2) - d_as^2*za + s.d_st^2*za + ya^2*za +
za^3)/(2*ya^2 + 2*za^2); ...
      (s.d_st^2*za - d_as^2*za - ya*(- d_as^4 + 2*d_as^2*s.d_st^2 +
2*d_as^2*ya^2 + 2*d_as^2*za^2 - s.d_st^4 + 2*s.d_st^2*ya^2 +
2*s.d_st^2*za^2 - ya^4 - 2*ya^2*za^2 - za^4)^(1/2) + ya^2*za +
za^3)/(2*ya^2 + 2*za^2)];

```

Toimilaitekoordinaateista kulmakoordinaatteihin, nostovarsien alapäiden laskenta

```

zal = [(d_oa^2 - d_as^2 + ys^2 + zs^2 - (2*zs*(ys*(- d_as^4 +
2*d_as^2*d_oa^2 + 2*d_as^2*ys^2 + 2*d_as^2*zs^2 - d_oa^4 +
2*d_oa^2*ys^2 + 2*d_oa^2*zs^2 - ys^4 - 2*ys^2*zs^2 - zs^4)^(1/2) -
d_as^2*zs + d_oa^2*zs + ys^2*zs + zs^3))/(2*ys^2 + 2*zs^2))/(2*ys); ...
      (d_oa^2 - d_as^2 + ys^2 + zs^2 - (2*zs*(d_oa^2*zs - d_as^2*zs - ys*(-
d_as^4 + 2*d_as^2*d_oa^2 + 2*d_as^2*ys^2 + 2*d_as^2*zs^2 - d_oa^4 +
2*d_oa^2*ys^2 + 2*d_oa^2*zs^2 - ys^4 - 2*ys^2*zs^2 - zs^4)^(1/2) +
ys^2*zs + zs^3))/(2*ys^2 + 2*zs^2))/(2*ys)];
yal = [(ys*(- d_as^4 + 2*d_as^2*d_oa^2 + 2*d_as^2*ys^2 + 2*d_as^2*zs^2
- d_oa^4 + 2*d_oa^2*ys^2 + 2*d_oa^2*zs^2 - ys^4 - 2*ys^2*zs^2 -
zs^4)^(1/2) - d_as^2*zs + d_oa^2*zs + ys^2*zs + zs^3)/(2*ys^2 +
2*zs^2); ...
      (d_oa^2*zs - d_as^2*zs - ys*(- d_as^4 + 2*d_as^2*d_oa^2 +
2*d_as^2*ys^2 + 2*d_as^2*zs^2 - d_oa^4 + 2*d_oa^2*ys^2 + 2*d_oa^2*zs^2
- ys^4 - 2*ys^2*zs^2 - zs^4)^(1/2) + ys^2*zs + zs^3)/(2*ys^2 +
2*zs^2)];

```

Algebrallisen ratkaisun väliyhtälö:

$$\begin{aligned}
& \left( (d_L^R)^2 - 4x_T^2 + 8x_T x_R - 4x_R^2 - l_{vv}^2 + (z_T - d_L^L \tan \alpha)^2 + (2x_T - x_R - d_0^L)^2 \right. \\
& \quad \left. - l_{vv}^2 + (z_T + d_L^R \tan \alpha)^2 + (x_R - d_0^L)^2 + 4(d_L^R)^2 \tan^2 \alpha \right)^2 \\
& = 4(l_{vv}^2 - (z_T - d_L^R \tan \alpha)^2 - (2x_T - x_R - d_0^L)^2 (l_{vv}^2 \\
& \quad - (z_T + d_L^R \tan \alpha)^2 - (x_R - d_0^L)^2)
\end{aligned} \tag{5.1}$$