

Jukka Uotila

Kinematiikan ja liikkeenohjauksen demolaitteisto

Kinematiikka PC-pohjaisessa liikkeenohjauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinöörityö
10.1.2012

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jukka Uotila Kinematiikan ja liikkeenohjauksen demolaitteisto Kinematiikka PC-pohjaisessa liikkeenohjauksessa 39 sivua 10.1.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Jari Savolainen Aluemyyntipäällikkö Teppo Lepistö
<p>Työn tavoitteena oli rakentaa demolaitteisto, joka esittelee Beckhoffin PC-pohjaisen liikkeenohjauksen robotiikassa sekä keskeisimmät tuotteet. Demolaitteisto toimii erilaisilla messuilla ja koulutustilaisuuksissa.</p> <p>Työhön sisältyi demolaitteiston suunnittelu, rakentaminen, tarvittavien komponenttien valinta ja tilaus sekä asennus, laitteiston ohjauksen suunnittelu ja toteutus kokonaisuudessaan sekä käyttöönotto ja esittely automaatiomessuilla.</p> <p>Robotti valittiin Codianrobotics-yrityksen tuotevalikoimasta. Alumiinikehikon ja kuljettimen toimitti Easy-Conveyors Oy. Kameranäön toteutti Delta-Enterprise kokonaisuudessaan. Laitteiston ohjaus toteutettiin PC-pohjaisesti käyttämällä Beckhoffin teollisuus-PC:tä, johon on asennettu TwinCAT-automaatio-ohjelmisto. Ohjelmistolla toteutettiin myös käyttöliittymä. Moottorit, vahvistimet sekä I/O valittiin Beckhoffin tuoteperheestä. Kinematiikan ohjaus toteutettiin TwinCAT-automaatio-ohjelmiston moduulilla, Kinematic Transformation.</p> <p>Valmis laite otettiin käyttöön Helsingin automaatiomessuilla 2011. Käyttöönoton yhteydessä varmistettiin, että laite toimii oikealla tavalla ja varmistettiin messuvieraiden turvallisuus laitteen läheisyydessä.</p> <p>Laite oli toiminnassa messujen ajan ja täytti sille asetetut vaatimukset. Valmis demolaite toimii koulutus- ja esittelykäytössä Beckhoff Automation-yrityksen pääkonttorilla Hyvinkäällä.</p>	
Avainsanat	kinematiikka, TwinCAT, robotti, liikkeenohjaus

Author	Jukka Uotila
Title	The demo device of kinematics and motion control Kinematics in PC-based motion control
Number of Pages	39 pages
Date	10 January 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Machine automation
Instructors	Jari Savolainen, Lecturer Teppo Lepistö, Area sales manager
<p>The aim of the thesis was to build a demo system which introduces Beckhoff PC-based motion control in robotics and their most important products. The demo system would be used at various trade shows and training events.</p> <p>The work included the design, construction, selection and ordering of the required components and their installation. Program design and implementation and the introduction in automation fairs.</p> <p>The robot was selected from the product range of Codian Robotics. The aluminum frame and conveyor was delivered by Easy Conveyors Ltd. The vision system was made entirely by Delta-Enterprise. The system control was made using a Beckhoff PC-based industrial PC fitted with TwinCAT automation software. The software was also used for the program user interface. Motors, servo drives and I/O were also chosen from the Beckhoff product family. Kinematics were created using a TwinCAT automation software supplement, Kinematic Transformation.</p> <p>The demo was implemented at Helsinki Automation Fairs in 2011. During the implementation it was ensured that the device was working properly and the visitor's safety was ensured.</p> <p>The demo was in operation during the Fairs and met the requirements set for it. The device is now working for training and demonstration use in head office of Beckhoff Automation company at Hyvinkää.</p>	
Keywords	kinematics, TwinCAT, robot, motion control

Sisälllys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tavoite	1
1.2	Työn tilaaja	1
2	Kinematiikka	2
2.1	Määrittely	2
2.2	Koordinaatisto	3
2.3	Robottiin integrointi TwinCAT-ympäristöön	4
2.4	Kirjasto	5
2.4.1	Kinematiikkakaaviot	5
2.4.2	Laskenta ja määrittely	6
2.4.3	Ohjelmointi	7
2.4.4	Työskentelyalueet	8
3	Komponenttien valinta	9
3.1	Robotti	10
3.2	Moottorit ja vaihteet	10
3.3	Servovahvistimet	11
3.4	I/O	11
3.5	IPC	11
3.6	Alumiinikehikko ja kuljetin	12
4	Konfiguraatio	12
4.1.1	Nollakohdan määrittäminen	12
4.1.2	NC-konfiguraatio	13
4.1.3	Kinematiikkakanava	15
4.1.4	Interpolaatiokanava	18
4.1.5	Ohjelmarajat	18

5	Ohjelmointi	19
5.1	PLC-control	19
5.2	Suunnittelu	19
5.3	Toteutus	19
5.3.1	Kinematiikka	20
5.3.2	G-koodi	22
5.3.3	Kamerakuva	22
5.3.4	Lentävä saha	22
5.3.5	Muut toimintalohkot	23
5.3.6	Simulointi	23
5.3.7	Demot	25
5.3.8	Käyttöliittymät	26
6	Demon toteutus	28
7	Yhteenveto	31
	Lähteet	33

Lyhenteet

ACS	(Axis Coordinate System) Akselikohtainen koordinaatisto
CPU	Prosessori
G-koodi	Stantardin ISO-6983 mukainen ohjelmointikieli numeeriseen ohjaukseen
I/O	(Input/Output) Rajapinta tietokoneen ja fyysisten laitteiden välillä
MCS	(Machine Coordinate System) Konekohtainen koordinaatisto
NC CNC	TwinCAT-moduuli numeeriseen ohjaukseen
NC I	TwinCAT-moduuli interpolointiliikkeiden suorittamista varten
NC PTP	TwinCAT-moduuli akseliin pisteestä pisteeseen paikoitusta varten
PCS	(Piece Coordinate System) Kappalekohtainen koordinaatisto
PLC	Ohjelmoitava logiikka

1 Johdanto

Työn kohteena oli Beckhoff Automation -yrityksen kinematiikkakirjasto, josta on tarkoitus tehdä demolaitteisto messu- ja koulutuskäyttöä varten. Takarajana oli Helsingissä pidettävät 2011 automaatiomessut, joilla laite oli esillä.

1.1 Työn tavoite

Työtä aloitettaessa ei ollut mitään valmista, ainoastaan Beckhoffin tarjoama kinematiikkakirjasto ja dokumentaatio. Työn tavoitteena oli valmistaa teknisesti mielenkiintoinen ja huomiota herättävä demolaitteisto, joka esittelee Beckhoffin tuoteperheen ja liikkeenohjauksen monipuolisuuden. Demon tuli olla helposti liikuteltavissa sekä muunneltavissa koulutuskäyttöön. Myös kuljetinhihna ja kameranäkö tuli integroida toimimaan kinematiikkakirjaston kanssa yhdessä, jotta demosta tulisi toimiva kokonaisuus ja tarpeeksi monipuolinen. Kameranäön integroinnissa kokonaisuuteen suunniteltiin yhteistyötä Delta Enterprise -yrityksen kanssa, mikä kuuluu Beckhoffin partneriverkoston.

1.2 Työn tilaaja

Työn toimeksiantajana on Beckhoff Automation, joka edustaa Beckhoff Automation GmbH:ta Suomessa. Beckhoff toimittaa avoimia PC-pohjaisia ohjauksia automaatioon. Tuotevalikoimaan kuuluu automaatiosovellusten ohjelmistot, kenttäväyläkomponentit, liikkeenohjaustuotteet sekä teollisuus-PC:t ja ohjauspaneelit. Ryhmien tuotteita voidaan käyttää yksittäisinä komponentteina tai ne voidaan integroida kokonaiseksi ohjausjärjestelmäksi. Beckhoffin tuotteita ja ratkaisuja käytetään maailmanlaajuisesti aina robotiikasta rakennusautomaatioon. [1.]

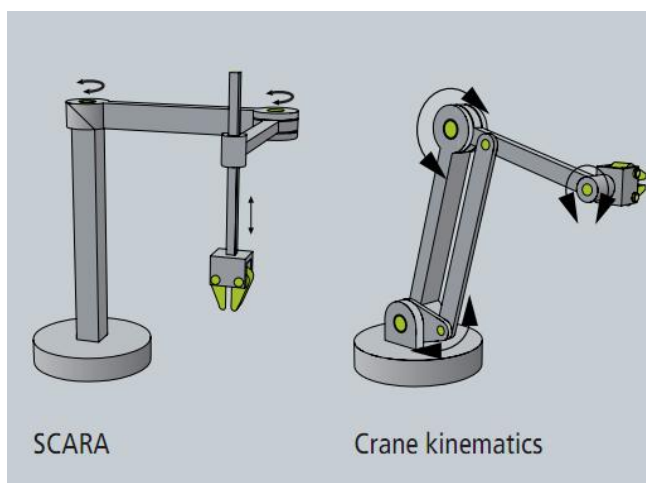
2 Kinematiikka

2.1 Määrittely

Dynamiikka on eräs mekaniikan osa-alue, joka jaetaan kinematiikkaan ja kinetiikkaan. Kinematiikka eli geometrinen liikeoppi tutkii liikkeen geometriaa puuttumatta sen syihin eli voimasysteemiin, joka liikkeen aiheuttaa. [2.] Kinematiikka on perustana kinetiikalle sekä koneiden ja laitteiden suunnittelussa tarvittavalle mekanismiopille. Se on luonteeltaan matematiikkaa, joka tutkii liikkuvan pisteen geometriaa.

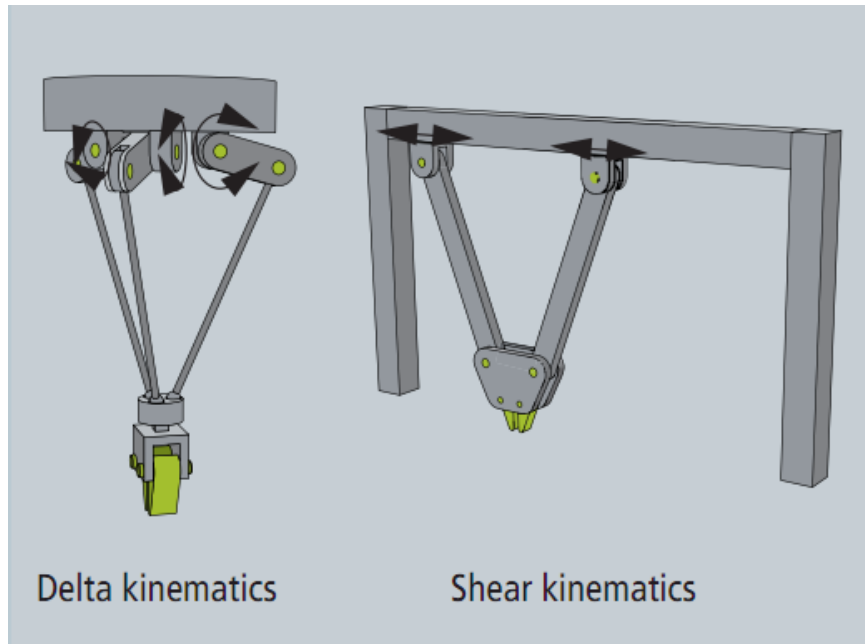
Kinematiikassa käytetään geometrian peruslakeja sekä geometrian käsitteitä. Peruskäsitteinä ovat etäisyys ja aika, johdettuja käsitteitä nopeus ja kiihtyvyys. Kinematiikassa selvitetään esimerkiksi kuinka voidaan ratkaista partikkelin asema, nopeus ja kiihtyvyys sen kulkiessa pitkin ratakäyrää. [3.]

Robotiikassa laitteen rakenne ja akselin lukumäärä määrittelee robotin työskentelyalueen. Alueen koko on riippuvainen robotin varsien pituuksista, kulmien liikkuvuudesta, keskipisteestä sekä suurimmasta sallitusta kuormasta. Varsien ja akselin lukumäärä ja asettelu määrää kinematiikan rakenteen, joka voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: sarjakinematiikka ja rinnakkaiskinematiikka. Sarjakinematiikassa jokaisen akselin asema riippuu sen moottorin asennosta. Esimerkiksi scara -tai nosturikinematiikka kuten kuvassa 1 [4, s. 2].



Kuva 1. Sarjakinematiikka.

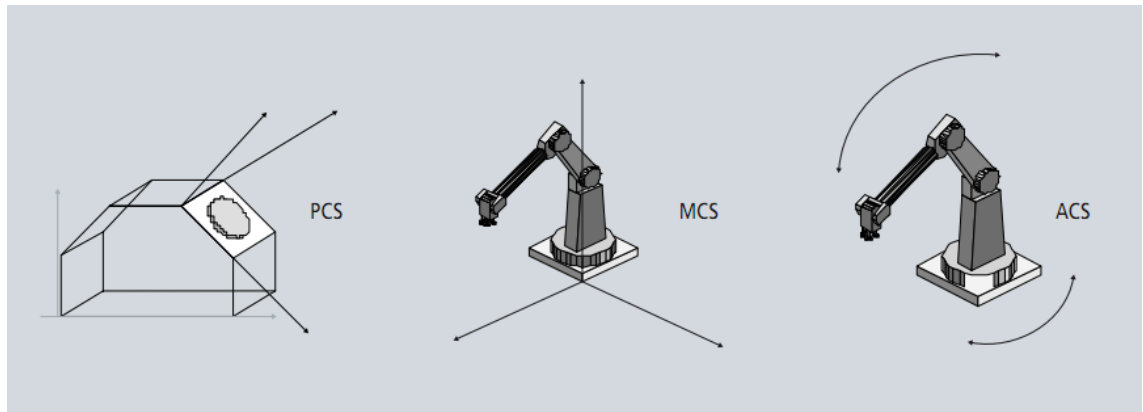
Rinnakkaiskinematiikassa kaikki akselit ovat kiinni työtasossa, jolloin jokaista akselia pitää ajaa yhtä aikaa työkalupisteen liikkeen aikaan saamiseksi, esimerkiksi delta-kinematiikka kuten kuvassa 2.



Kuva 2. Rinnakkaiskinematiikka.

2.2 Koordinaatisto

Koordinaatiojärjestelmä vaaditaan kuvaamaan järjestelmän asemaa. Esimerkiksi voidaan käyttää suorakulmaista koordinaatistoa. Koordinaatisto on oikeakätinen ja pyörimissuunta positiiviseen suuntaan (vastapäivään). Ohjelmointia voidaan suorittaa kolmessa erilaisessa koordinaatistossa kuten kuvassa 3: kappalekohtainen koordinaatisto (PCS), työkonokohtainen koordinaatisto (MCS) ja akselikohtainen koordinaatisto (ACS). [4, s. 4.]



Kuva 3. Erilaiset ohjelmoinnissa käytettävät koordinaatistot.

Yleisesti robotti ohjelmoidaan käyttäen joko PCS- tai MCS-koordinaatistoa niiden selkeyden takia. Myöskään kinematiikan rakenne ei vaikuta koordinaatiston toimintaan, sillä akseleiden liike lasketaan koordinaatiston liikkeiden mukaan. Vastakohtana toimii ACS, jossa pitää huomioida kinematiikan rakenne. Liikekomennot annetaan suoraan akseleille. Kyseistä ohjelmointitapaa käytetään poikkeustapauksissa, kuten kotiasemaan ajossa. [4, s. 4.]

2.3 Robotiikan integrointi TwinCAT-ympäristöön

Usein robotiikalla on oma käyttö sekä CPU. Tästä johtuen muun koneenohjauksen ja robotiikan välille tarvitaan kenttäväylä, jonka avulla tiedonsiirto tapahtuu PLC-ohjelman ja robotiikan välillä. Robotiikkaa ohjaa oma käyttöjärjestelmä, jossa on valmistajan määräämä ohjelmointikieli ja ympäristö. Tällöin käyttäjä sitoutuu valmistajan määrittämiin rajoituksiin. Robotiikan oma käyttöjärjestelmä ei myöskään mahdollista suoraa integrointia liikkeenohjaukseen. [5, s. 12-13.]

TwinCAT-ympäristöön voidaan suoraan integroida robotiikan ohjaus. Näin saadaan aikaiseksi huomattavia säästöjä. Robotiikasta jää pois oma CPU, käyttö sekä kenttäväylä ja johdotus. Käyttäjällä ei ole riippuvainen robottivalmistajan ohjelmiston rajoituksista. Robotiikka voidaan integroida suoraan muuhun koneenohjaukseen, jolloin esimerkiksi liikkeenohjaus tehostuu. Samassa ympäristössä voidaan tehdä konfigurointi, parametointi sekä diagnostiikka. TwinCAT-ympäristöstä löytyy myös kirjastot kuljetinhihnan integroinnille, jolloin robotin työkalupiste saadaan relatiiviseen liikkeeseen kulje-

tinhihnan suhteen. Kinematiikalla voidaan suorittaa myös interpoloituja liikkeitä sekä G-koodia (DIN 66025). [5, s. 12-13.]

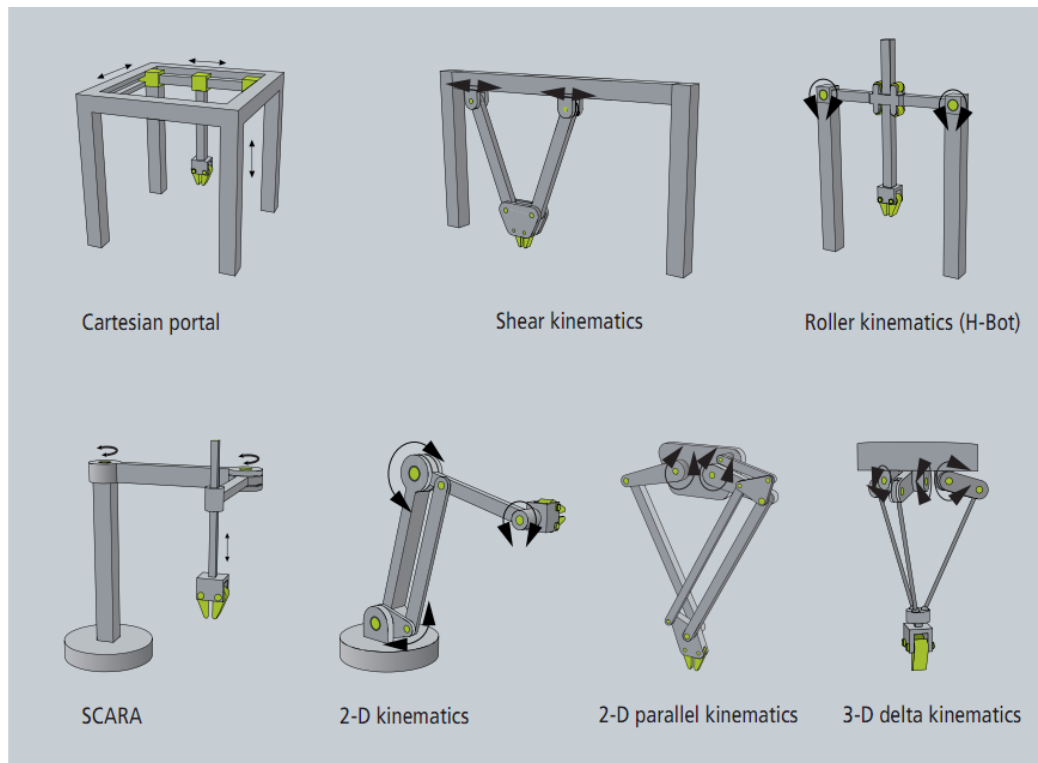
Vaatuksina kinematiikalle on CE tai XPe\WES-käyttöjärjestelmä. TwinCAT-ohjelmointiympäristöstä on tarjolla neljä eri asennettavaa tasoa. Kinematiikan käyttö vaatii vähintään TwinCAT NCI-tason. PC tulee valita liikkeenohjauksen ja muun konfiguraation tarpeen mukaan.

2.4 Kirjasto

Kinematiikan käyttöä varten on oma kirjasto, Kinematic Transformation, joka asennetaan TwinCAT-ohjelmointiympäristöön. Kirjasto sisältää robotiikan ohjaukseen tarvittavan laskennan, laitteen parametroidin sekä valmiita ohjelmointilohkoja.

2.4.1 Kinematiikkakaaviot

Kirjastosta löytyy valmiit mallit tunnetuille kinematiikoille kuten kuvassa 4. Mallit on jaettu kolmeen eri tasoon niiden vaativuuden perusteella. Kirjastoa asentaessa pitää valita haluttu taso. Ylempi taso sisältää aina alemman tason kinematiikan. Taso 1, Katesian portaali sisältää staattisen liikkeen. Taso 2 sisältää kaksiulotteiset kinematiikat, esimerkiksi H-bot- ja 2D-rinnakkaiskinematiikat. Taso 3 sisältää vaativimmat kinematiikat kuten Delta-robotti. [4, s. 5.]



Kuva 4. Valmiit kinematiikkamallit.

2.4.2 Laskenta ja määrittely

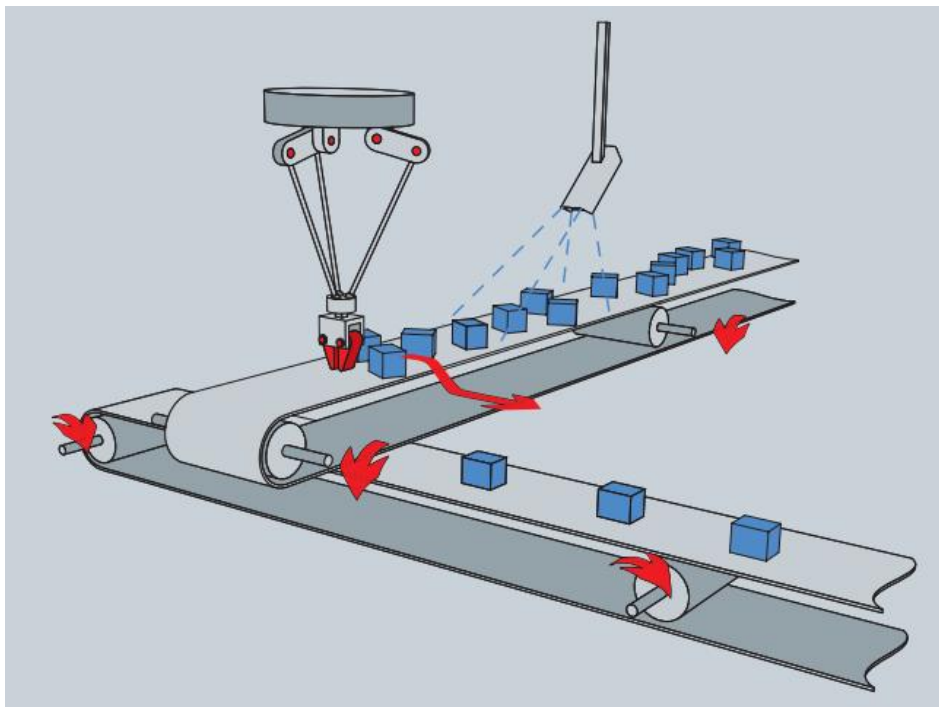
Liikkeiden ohjelmointi tapahtuu suorakulmaisessa koordinaatistossa. Työkalupisteen liike voidaan suorittaa akseleilta työkalupisteelle. Tätä laskentaa käytetään esimerkiksi kinematiikkakirjaston käynnistyessä, kun työkalupiste siirretään kotiasemaan. Tällöin moottoreille annetaan suoraan liikkeenohjauskomento ja työkalupisteen asema määrittyy kinematiikan rakenteen mukaan. Liikkeitä voidaan myös ohjata työkalupisteen aseman mukaan, jolloin työkalupisteeltä lasketaan ohjeet moottoreille. Lähes aina robottia ohjataan sen työkalupisteen mukaan. [4, s. 6.]

Kinematiikkaan liittyvät määrittelyt tehdään System manager-ohjelmassa. NC-kanavalle lisätään oma kanava kinematiikalle, johon määritellään kinematiikan rakenne. Kinematiikalle lisätään tarvittavat virtuaaliakselit sekä laitteen fyysiset akselit. Parametointi ja ohjelmointi tapahtuu virtuaaliakseleilla ja fyysiset akselit linkitetään I/O:lle.

2.4.3 Ohjelmointi

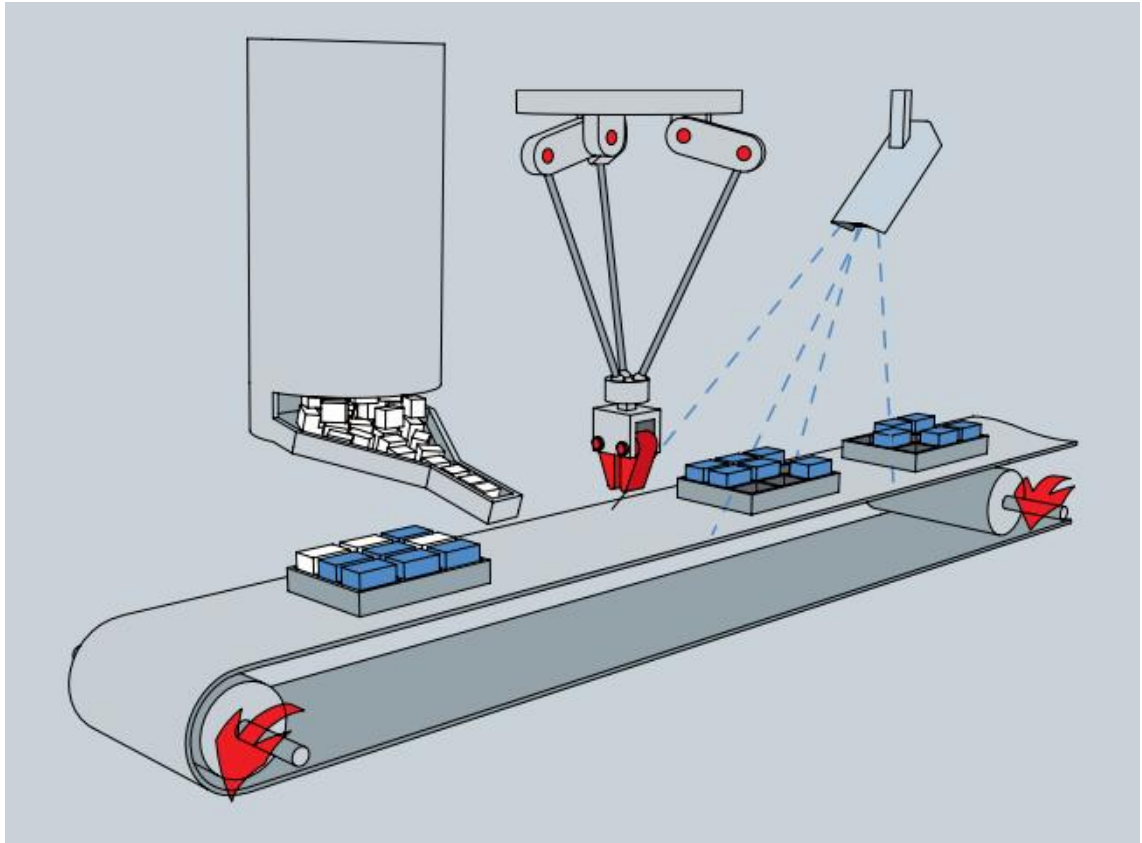
Liikkeiden ohjelmointiin käytetään samoja liikkeenohjaukskomentoja kuin muissakin liikkeenohjaussovelluksissa. TwinCAT-ohjelmointiympäristö tarjoaa kolme tasoa liikkeenohjaukselle: NC PTP, NCI sekä CNC. Kinematiikka kirjasto itsessään vaatii NCI-tason, jolloin voidaan tehdä interpoloituja liikkeitä. Kinematiikalle on omat toimintalohkot, joilla voidaan määrittää kinematiikan koordinaatisto, käsitellä virhetilanteita sekä suorittaa kinematiikan laskentaa.

Robottikäytöissä lähes poikkeuksetta tulee vastaan robotin liikkeiden synkronointi kuljetinhihnaan. Messudemoon lisätään kuljetinhihna, jolloin saadaan lisää näyttävyttä demoon. TwinCAT-kirjastoista löytyy esimerkiksi lentävä saha (Flying saw), jolla robotti voidaan synkronoida suoraan liikkeestä kulkemaan kuljetinhihnan kanssa. Tällöin robotin liike synkronoidaan ensin liukuhihnaan, josta poimitaan kappale esimerkiksi kameranäöltä saatujen koordinaattien mukaan. Kappaleen poiminnan jälkeen lentävä saha puretaan, kappale siirretään seuraavan liukuhihnan päälle ja synkronoidaan sen liikkeeseen lentävän sahan avulla. Kappale lasketaan liikkuvalla hihnalle, minkä jälkeen lentävä saha puretaan jälleen ja siirrytään odottamaan uutta kappaletta kuten kuvassa 5. [4, s. 7.]



Kuva 5. Kappaleiden lajittelu.

Tulevaisuudessa julkaistaan seurantatoiminto, jolloin kappaleiden seurantaan hyödynnetään kameranäköä. Esimerkiksi deltarobottia voidaan käyttää täyttämään paletista puuttuvat kappaleet kameranäön avulla. Kameralta saadun tiedon perusteella robotti ottaa kappaleen varastosta, synkronoi itsensä kuljetinhihnan liikkeeseen ja asettaa kappaleen paletin tyhjään kohtaan kuten kuvassa 6. [4, s. 8.]



Kuva 6. Palettien täyttäminen.

2.4.4 Työskentelyalueet

Robotiikalle voidaan määrittää ohjelmallisesti rajat, joiden sisällä työkalupiste voi liikkua. Tällä hetkellä tarjolla on vain suorakulmaisen muodon omaavat alueet. Tulevaisuudessa tämä laajennetaan monimutkaisempiin muotoihin, jolloin voidaan tehdä esimerkiksi L-kirjaimen muotoisia työskentelyalueita.

3 Komponenttien valinta

Tripodin moottorien ja vaihteiden valinnassa käytettiin hyväksi Codianrobotics-yrityksen suosituksia. Näiden tietojen perusteella valittiin Beckhoffin vastaavat tuotteet, jolloin moottoreiden teho ja vaihteiden suhde saatiin oikeaksi. Tripodi ei vaadi liikkeissä kovin suurta voimaa, joten moottoreiksi voidaan valita kevyet ja kustannustehokkaat moottorit. Tarvittava momentti saadaan vaihteiden suuresta suhdeluvusta. Beckhoffin tuotteet valittiin järjestelmän suorituskyvyn perusteella ja I/O:t pisteluettelon avulla. Servovahvistimet valittiin moottoreiden tehontarpeen ja lukumäärän mukaan. Taulukossa 1 on luettelo demolaitteiston komponenteista.

Taulukko 1. Komponenttilista

Tuote	Kuvaus	Kpl	Toimittaja
AM3023-0C41	Synchronous servomotor	3	Beckhoff
C6925	Fanless control cabinet Industrial PC	1	Beckhoff
CP6902-0001	"Economy" built-in Control Panel with DVI/USB Extended interface	1	Beckhoff
AS1050	Stepper motor	1	Beckhoff
AG1000	Planetary gear unit for stepper motor, 1:7	1	Beckhoff
AX5201	EtherCAT Drive (SoE, 2 Ch.)	2	Beckhoff
ZK4510 5m	Absolute encoder cables AM3xxx	3	Beckhoff
ZK4500 5m	Motor cables 2.5 mm ² for AM3000 at AX5118/AX5125	3	Beckhoff
ZK4000	Motor cables for AS1000 Stepper Motors to EL70x1	1	Beckhoff
ZK1090 5m	Patch cable, Ethernet/EtherCAT	1	Beckhoff
ZK1090 3m	Patch cable, Ethernet/EtherCAT	1	Beckhoff
ZK1090 link	Patch cable, Ethernet/EtherCAT	1	Beckhoff
Ek1100	EtherCAT Coupler (2A E-Bus)	2	Beckhoff
EL1008	8Ch. Dig. Input 24V, 3ms	1	Beckhoff
EL2008	8Ch. Dig. Output 24V, 0.5A	1	Beckhoff
EL7041	1Ch. Stepper motor output stage (50V, 5A)	1	Beckhoff
EL9515	Power supply terminal 15V	1	Beckhoff
EL9011	End Terminal	1	Beckhoff
EL6900	TwinSAFE PLC	1	Beckhoff
EL1904	4 Ch. Safety Input 24V, TwinSAFE	1	Beckhoff
EL2904	4 Ch. Safety Output 24V, 0.5A, TwinSAFE	1	Beckhoff
AD064-031-P1	Apex gearboxes for Beckhoff motors	3	Apex
D4-500 demo	Delta 4 robot	1	Codian
Alumiinikehikko		1	Easy-Conveyors
Kuljetinhihna		1	Easy-Conveyors

3.1 Robotti

Messukäyttöä ajatellen näyttävin kinematiikkamalli on 3D-delta eli tripodirobotti. Robottia ohjaa kolme moottoria, joihin on kiinnitetty vaakatasossa olevat varret, joista jatkuu seuraavat varret alaspäin ja jotka kiinnittyvät työkalupisteeseen. Kaikki nivelet ovat palloniveviä, mikä mahdollistaa varsien liikkeet eri suuntiin. Kyseisellä rakenteella saadaan työkalupiste liikkumaan X,Y,Z-koordinaatistossa. Robotiksi valittiin Codianroboticsin malli D4-500 demo, joka oli mitoiltaan sopiva. Robotin saa myös suoraan tukijaloilla, jolloin sille ei tarvitse rakentaa erikseen alustaa, johon se kiinnitettäisiin. Demoversio tulee ilman moottoreiden suojakupuja, jolloin Beckhoffin moottorit jäävät esille. Robotti otettiin myös kääntyvällä akselilla, jolloin työkalupistettä voidaan kääntää 360 astetta. Kääntöakseli jätetään kuitenkin käyttämättä demossa.

3.2 Moottorit ja vaihteet

Moottoreiden ja vaihteiden valinnassa käytettiin hyväksi Codianrobotics -yrityksen suosituksia sopivista moottoreista ja vaihteista. Yritykseltä sai dokumentaation, josta selvisi heidän aikaisemmin käyttämiensä moottoreiden tekniset tiedot. Myös vaihteiston osalta samat tiedot olivat saatavilla.

Moottoreiden valinnassa päädyttiin alhaisella momentilla oleviin moottoreihin. Beckhoffin tuotteista robottiin valittiin AM 3023-0C41. Moottorit tilattiin sileällä akselilla, monikerrosabsoluuttianturilla sekä 24 V pitojarruilla. Moottoreissa on kestromagneetti roottoreissa ja kolmivaiheinen käämitys staattorissa. Kommutointi on toteutettu sähköisesti ja siitä huolehtii servovahvistin. [6, s. 16.] Näillä ominaisuuksilla moottorit tietävät välittömästi oman sijaintinsa, ja esimerkiksi sähkökaton sattuessa moottoreissa menevät pitojarrut päälle eikä robotti pääse lyömään mekaniikan asettamia rajoja vasten.

Moottoreiden alhaisen vääntömomentin johdosta vaihteet valittiin suurella välityssuhteella (1:31). Tällöin myös robotin paikoituksesta saadaan huomattavasti tarkempaa. Beckhoffin vaihteista ei kuitenkaan löytynyt suoraan sopivaa vaihdetta halutulla välityssuhteella ja robotin vaatimalla kiinnityksellä, joten vaihteet tilattiin Codian-roboticsin kautta sovittelevyillä. Vaihteiksi tuli APEX AD064-031-P1.

Moottorit lähetettiin suoraan Codianroboticsille ja ne asennettiin suoraan robottiin valmistusvaiheessa. Valmis robotti saapui moottorit ja vaihteet valmiiksi asennettuna.

3.3 Servovahvistimet

Servovahvistimet valittiin moottoreiden tehontarpeen ja lukumäärän mukaan. Vahvistimiksi valittiin 1,5 A kaksikanavainen AX5201. Virransäätimen integrointiaika on vain 62,5 µs. Servovahvistimen ominaisuuksiin kuuluu myös tulojännitteiden suodatus, integroitu jarruvastus, 8 kpl ohjelmoitavia digitaalituloja ja lähtöjä sekä diagnostiikkänäyttö [8, s. 21, 27; 1]. Vahvistimeen voidaan kytkeä myös ulkoinen jarruvastus.

3.4 I/O

Demolaitteessa I/O:hon kuuluu kuljetinhinnan päätyrajat, TwinSAFE sekä askelmoottorin ohjainkortti. Beckhoffin I/O terminaalit päätettiin hajauttaa sähkökaappiin kahdelle eri riville, millä tuodaan esille I/O:n hajauttamista.

3.5 IPC

Kameranäkö vaati toimiakseen 1 Gbit Ethernet-verkkoportin. Kinematiikka toimii sekä CE- että WES- tai XPe-käyttöjärjestelmässä. Kamera kuitenkin vaatii toimiakseen WES- tai XPe-järjestelmän, joten teollisuus-PC:ksi valittiin C6925, lisävarusteenä 1 Gbit Ethernet verkkoportilla ja WES-käyttöjärjestelmällä. C6925 teollisuus-PC:ssä on Intel® Celeron ® ULV 1.2 GHz prosessori ja 3½ tuuman emolevy. Käyttöjärjestelmäksi valittiin uusin Windows Embedded Standard, WES.

Käyttöliittymää varten valittiin 15-tuumainen CP6902. Paneeli on varustettu kosketusnäytöllä, DVI-liitännällä, Ethernet-portilla sekä kahdella USB-portilla.

3.6 Alumiinikehikko ja kuljetin

Alumiinikehikon vaatimuksina on tarjota tarpeeksi tukeva alusta robotin toiminnalle. Kehikon pitää myös suojata käyttäjiä robotin liikkeiltä. Myös ulkonäkö tulee olla edustava messukäyttöä varten. Kuljetinhihnan tulee mahtua toimimaan robotin työskentely-alueelle. Kuljettimeen pitää myös pystyä integroimaan Beckhoffin ohjaus.

Alumiinikehikon ja kuljetinhihnan toimitti Easy Conveyors Tampereelta. Kehikko suunniteltiin siten, että se voidaan purkaa pienempiin osiin, mikäli esimerkiksi kuljetinhihna halutaan jättää pois ja käyttää pelkästään Tripodi-robottia. Kehikko varustettiin myös ovella, jonka kautta päästään huoltamaan robottia sekä kuljetinhihnaa. Beckhoffin askelmoottori vaihteineen lähetettiin Easy-Conveyorsille ja kuljetinhihna tuli moottori valmiiksi asennettuna.

4 Konfiguraatio

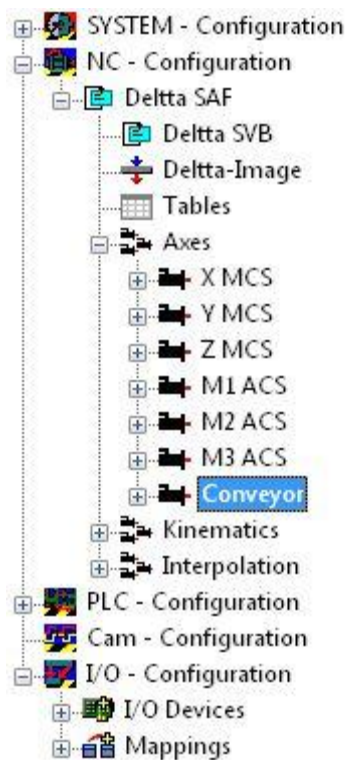
Kinematikan parametointi tapahtuu System Manager -ohjelmalla, jonne lisätään tarvittavat akselit, kinematiikkaryhmä, interpolaatioryhmä, PLC-ohjelma sekä I/O. Itse ohjelmointityö tehdään PLC Control -ohjelmalla käyttäen Beckhoffin kinematiikka- ja liikkeenohjauskirjastoja.

4.1.1 Nollakohdan määrittäminen

Robotin nollakohta määritellään kääntämällä ylemmät varret vaakatasoon. Helpoin tapa on vapauttaa System Managerista moottoreiden lukot ja asettaa robotti haluttuun asentoon. Enkooderin asetuksista löytyy Position bias -muuttuja, jolla voidaan määrittää uusi nollakohta. Ohjelmassa kinematikan käynnistyessä robotti ajetaan tähän asemaan antamalla ohje suoraan moottoreille. Nollakohta voidaan myös määrittää eri asemaan kinematiikkakanavan muuttujilla.

4.1.2 NC-konfiguraatio

TwinCAT System Manageriin luodaan NC Configuration -välilehden alle tarvittavat akselit sekä kanavat interpolointia ja kinematiikkaa varten. Kuvassa 7 näkyy kinematiikan vaatimat kuusi kappaletta akseleita, joista kolme on virtuaaliakseleita (X MCS, Y MCS, Z MCS) ja loput kolme moottoreiden akseleita (M1 MCS, M2 MCS, M3 MCS). Virtuaaliakseleilla ohjataan delta-robotin työkalupistettä. PLC-ohjelmassa käytetään ainoastaan virtuaaliakseleita. Kinematiikkakirjasto laskee käänteiskinematiikalla ohjeen moottoriakseleille työkalupisteen liikkeiden mukaan. Moottoreiden akselit linkitetään I/O:hon kiinni, tässä tapauksessa AX5201-servovahvistimille. Myös kuljetinhihnalle lisätään oma akseli, joka on muista akseleista eroten askelmoottori ilman takaisinkytkentää.



Kuva 7. Kinematiikan vaatimat akselit.

Akseleiden yleisimmät parametrit voidaan antaa TwinCAT-System Managerissa. Fyysisten akselien parametointi aloitettiin vaihtamalla yksiköt asteiksi. Tämän jälkeen annettiin sopivat maksiminopeudet, kiihtyvyydet, hidastuvuudet ja jerkit eli kiihtyvyyden muutosnopeudet akselien päätason parametreilla. Sekä fyysisille että virtuaaliakseleille asetettiin ohjelmalliset asemarajat kohdassa Limit Switches.

Enkooderin parametreista voidaan asettaa oikea takaisinkytkentätyyppi ja pyörimissuunta sekä valita haluttu nollakohta. Virtuaaliakseleille ei tarvitse tehdä mitään valintoja enkooderin parametreista sillä akselit toimivat ainoastaan simuloitusti. Fyysisten akselien yksiköksi valittiin asteet. Akselien pyörimissuunta vaihdettiin parametrien Invert Encoder Counting Direction ja Invert Motor Polarity avulla.

Enkooderin parametreista määriteltiin myös kerroin, jolla voidaan muuttaa enkooderin inkrementit fyysiseksi mitaksi Scaling factor-parametrilla. Laskemista varten pitää tietää vaihteiston välityssuhde, jotta voidaan laskea yhden kierroksen etenemä. Absoluuttiantureilla varustetuista servomooottoreista saadaan 2048 siniaaltoa yhtä kierrosta kohden, josta vahvistin digitoi 2^{20} inkrementtiä yhdelle kierrokselle. Vaihteiden välityssuhde oli jokaisessa moottorissa 1:31, jolloin Scaling Factor -kertoimeksi saadaan:

$$k_{ACS} = \frac{360^\circ}{31 \cdot 2^{20} inc} = 0.0000110749275^\circ / inc$$

Askelmoottorissa askeleiden väli on $1,8^\circ$, joka on askeleina 200 kpl yhtä kierrosta kohden [7]. Moottoreiden tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä mikro-askeleita, jolloin askeleiden väli kerrotaan mikroaskeleilla. Moottorin vaihteen välityssuhde on 1:7 jolloin Scaling Factor-kertoimeksi saadaan:

$$k_{conveyor} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 24,5 mm}{7 \cdot 64 \cdot 200 step} = 0.001718058 mm / step$$

Virtuaaliakseleita käytetään ohjaamaan pelkästään työkalupistettä eikä niillä ole fyysistä I/O:ta, jolloin akselleille ei aseteta parametreja encoderille. Tarvittavat rajoitukset tehdään fyysisille akselleille.

4.1.3 Kinematiikkakanava

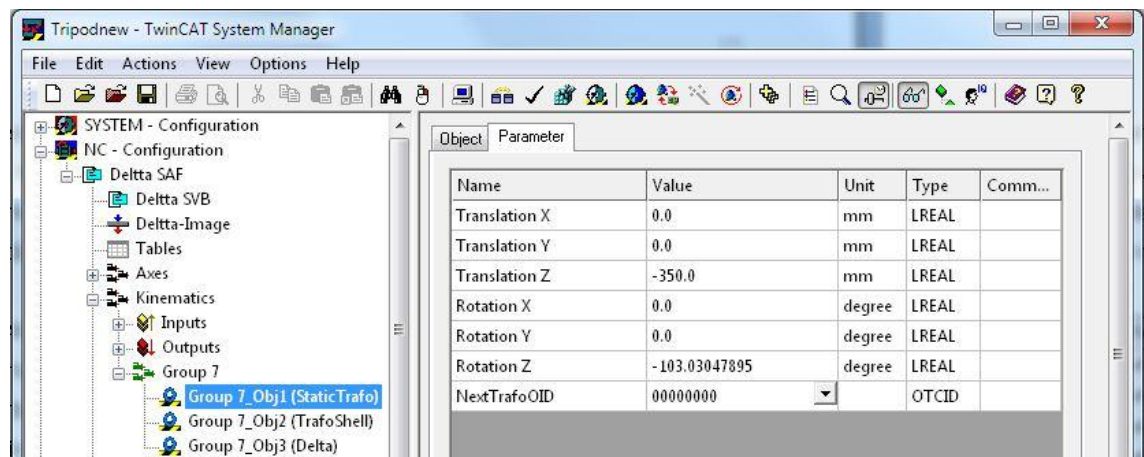
Kinematiikkaryhmälle lisätään oma kanava, jossa määritellään kinematiikan tyyppi sekä tehdään robotin parametointi. Kuvassa 8 näkyvät kinematiikalle lisätyt kolme objektiä, Static Trafo, Trafo shell ja Delta.



Kuva 8. Kinematiikka kanavaan lisättävät objektit.

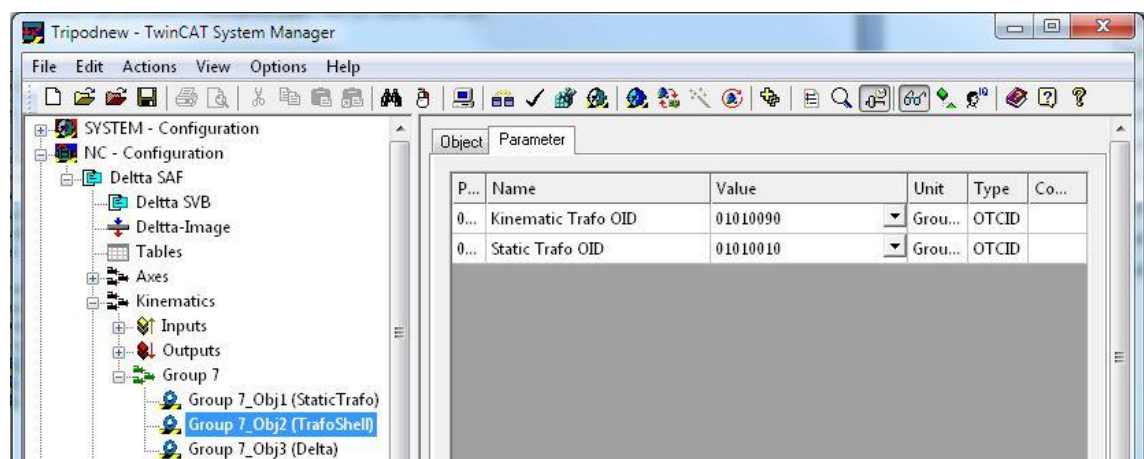
Ensimmäisessä objektissa (StaticTrafo) määritellään nollapisteen asema sekä akseliston kääntö. Kun kinematiikkaryhmä luodaan ohjelmassa, ajaa robotti kotiasemaan näiden parametrien suhteen. Nollapiste voidaan määrittää vapaasti X,Y,Z-suunnassa. Akselisto voidaan vapaasti kiertää jokaisen akselin suhteen.

Demolaitteessa nollapiste halutaan keskelle piirustusalueeseen ja X-akseli kulkemaan kulkijajonon suuntaisesti. Nollakohta mitattiin piirtoalustasta ylöspäin, jolloin Z-akselin suuntaa korjataan 350 mm. Akseliston kierto määriteltiin piirtämällä tripodilla referenssiviiva piirtoalustalle. Tämän jälkeen laskettiin kulma viivan ja piirtoalustan reunan välillä. Jotta X- ja Y-akseli saadaan siirrettyä, pitää akselistoa kiertää Z-akselin ympäri. Akseliston kierrossa voidaan käyttää oikean käden sääntöä. Peukalo asetetaan Z-akselin positiiviseen suuntaan. Kun käsi painetaan nyrkkiin, osoittavat sormet positiivisen kierto-suunnan. Z-akselin kiertoarvoksi saatiin -103,0305 astetta. Kuvassa 9 näkyy demolaitteen robotin akseliston nollakohdan siirto sekä kierto.



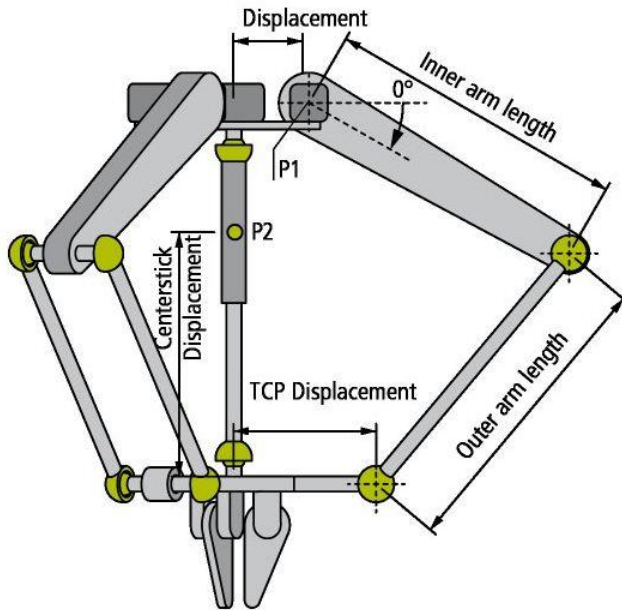
Kuva 9. Kinematiikkakanava: akseliston nollakohdan ja kierron määrittäminen.

Seuraavassa objektissa (TrafoShell) määritetään kuvan 10 mukaisesti kinematiikan riippuvuudet. Kinematic trafo-kohtaan kerrotaan kinematiikan tyyppi, joka on demolaitteessa Delta. Static Trafo-kohtaan kerrotaan robotin nollapisteen asema sekä akseliston kierto.



Kuva 10. Kinematiikkakanava: kinematiikan riippuvuudet.

Kolmannessa objektissa (Delta) määritellään kinematiikkamallin dynaamiset ominaisuudet kuten varsien pituudet, massat ja nivelten etäisyydet keskilinjasta. Kirjasto laskee moottoreille arvot työkalupisteen liikkeistä näiden parametrien mukaan. Beckhoffin infromation systemistä löytyvät kuvat kinematiikkamalleista, joihin on merkitty, mihin osaan robottia nimillä viitataan, kuten kuvassa 11.



Kuva 11. Kinematiikkamallin osien nimet ja sijainti.

Codianilta pyydettiin robotin datalehdet joista selviävät kaikki tarvittavat pituudet ja massat varsille sekä nivelten etäisyydet keskilinjasta. Kuvassa 12 näkyvät kinematiikka kanavalle syötetyt tiedot.

The screenshot shows the TwinCAT System Manager interface. The left pane displays a tree view of the system configuration, with 'Group 7_Obj3 (Delta)' selected. The right pane shows a table of parameters for the selected object.

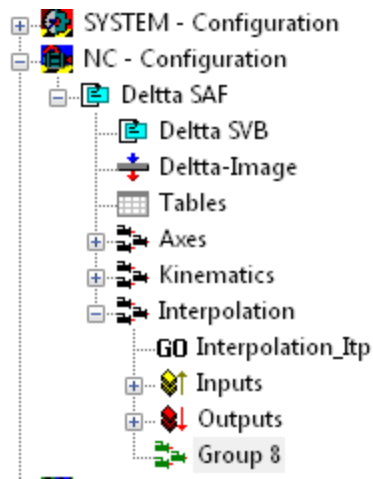
Object	Parameter	Value	Unit	Type	Co...
P...	Name				
0...	InnerArmLength	150.0	mm	LREAL	
0...	OuterArmLength	400.0	mm	LREAL	
0...	Displacement	100.0	mm	LREAL	
0...	InnerArmMass	0.23	kg	LREAL	
0...	InnerArmMomentOfInertia	0.0	kg m...	LREAL	
0...	OuterArmMass	0.26	kg	LREAL	
0...	FirstLinkMass	0.0	kg	LREAL	
0...	TcpMass	0.3	kg	LREAL	
0...	TcpDisplacement	42.5	mm	LREAL	
0...	CenterStickMass	0.0	kg	LREAL	
0...	CenterStickMomentOfInertia	0.0	kg m...	LREAL	
0...	CenterStickCenterOfMassDi...	0.0	mm	LREAL	
0...	FirstDriveTorqueOID	00000000		OTCID	
0...	SecondDriveTorqueOID	00000000		OTCID	
0...	ThirdDriveTorqueOID	00000000		OTCID	
0...	GravityOrientationTrafoOID	00000000		OTCID	

Kuva 12. Kinematiikkakanava: dynaamiset ominaisuudet.

4.1.4 Interpolaatiokanava

Kun työkalupistettä halutaan siirtää suoraviivaista tai käyräviivaista rataa eikä liike ole robotin akselin suuntainen, joudutaan kahden tai kolmen virtuaaliakselin liikettä ohjaamaan yhdenaikaisesti. Jotta haluttu liikerata saavutetaan, pitää akseleiden liikeno-
peus sovittaa yhteen [2].

TwinCAT System Manageriin voidaan, kuten kuvassa 13, lisätä interpolaatiokanava, joka pystyy ohjamaan haluttuja akseleita samanaikaisesti. Interpolaatioryhmä muodostetaan PLC-ohjelmassa kinematiikkaryhmän muodostamisen jälkeen. Ryhmään liitetään vain virtuaaliakselit. Interpolaatiokanavalla voidaan suorittaa G-koodia.



Kuva 13. Interpolaatiokanava.

4.1.5 Ohjelmarajat

Robotin liikkeitä voidaan rajoittaa System Managerista käsin. Ohjelmarajoitteet voidaan antaa sekä virtuaaliakseleille että moottoreille. Codianin mekaniikalle löytyy dokumenteista kuvat, joista selviää mekaniikan rajoitteet. Myös virtuaali-akseleille voidaan määrittää System Managerissa työskentelyalue, jonka ulkopuolelle työkalupiste ei voi liikkua. Softarajojen määrittäminen on tehtävä ennen robotin liikkeiden testausta. Tällä voidaan välttää mahdolliset vaaratilanteet. Vähimmäisvaatimus on moottoreiden rajojen määrittäminen, jolloin eliminoidaan mahdollisuus ylittää mekaniikan asettamat rajat.

5 Ohjelmointi

5.1 PLC-control

Robotin logiikkaohjelma tehtiin TwinCAT PLC control -sovelluksella. Ohjelmointi voidaan toteuttaa IEC 61131-3 -standardin mukaisilla ohjelmointikielillä: IL (Instruction List), LD (Ladder), FBD (Function Block Diagram), SFC (Sequential Flow Chart), ST (Structured Text), CFC (Continious Function Chart). Lisäksi TwinCAT-ympäristössä on ADSL-rajapinta, mikä on täysin avoin ympäristö ja tarjoaa liityntärajapinnan kolmannen osapuolen laitteille. TwinCAT PLC Control ohjelma sisältää myös ohjelmointiin tarvittavat online-monitorointi ja debuggaus toiminnot.

5.2 Suunnittelu

Robotti tulee toimimaan messuilla demonna, jolloin laitteella pitää olla sekvenssi, jota ajetaan itsenäisesti läpi. Ohjelman suunnittelu aloitettiin määrittämällä tämä sekvenssi. Lisäksi laitetta pitää huoltotilanteissa pystyä ajamaan manuaalijolla, jolloin laitteen toimintatiloiksi määriteltiin kaksi vaihtoehtoa: automaatti ja manuaali. Lisäksi listattiin liikkeiden vaatimat kirjastot sekä eri laitteilta tarvittavat diagnostiikka- ja tilatiedot. Sekvenssin perusteella määriteltiin tarvittavat toimintalohkot sekä ehdot toiminnolle.

5.3 Toteutus

Automaattitilassa robotti suorittaa sekvenssiä, joka piirtää kahdeksaa erilaista kuviota G-koodilla valmiista tiedostoista. Sekvenssi voidaan keskeyttää tuomalla uusi kuva kameralta. Kamerakuvan piirtämisen jälkeen ohjelma palaa takasin normaalsekvenssiin. Manuaalitilassa robottia ja kuljetinhihnaa voidaan ajaa halutulla tavalla käyttöliittymästä. Myös kinematiikka- ja interpolaatioryhmät voidaan purkaa ja muodostaa uudestaan manuaalitilassa. Mikäli ohjelmassa syntyy jokin virhetila, vaihdetaan robotin tila välittömästi manuaalitilaan. Tällöin ohjelma, joka suorittaa demon sekvenssiä, pysähtyy. Jos yksikin virhetila on päällä, ei ohjelma käynnisty automaattitilaan. Demon sekvenssi voidaan pysäyttää erillisellä käskyllä, jolloin sekvenssi suoritetaan loppuun ja demo pysähtyy kotiasemaan automaattitilaan.

Suunnitteluvaiheessa listatut toiminnot ryhmiteltiin sopiviksi toimintalohkoiksi, joita käytetään automaattitilan sekvenssissä sekä osittain manuaaltilassa. Ohjelmointikieleksi valittiin FBD sen selkeyden vuoksi sekä ST sen monipuolisuuden ansiosta. Seuraavassa on käyty läpi tärkeimmät toimintalohkot ja niiden sisältö.

5.3.1 Kinematiikka

Ohjelma aloitettiin rakentamalla päälohko. Lohko aloitettiin tekemällä kinematiikka- ja interpolaatioryhmän konfiguraatio. Ennen kinematiikkaryhmän luontia pitää kuitenkin olla konfiguraatio akseleille ja osoittautui helpommaksi yhdistää myös kaikkien akselien konfiguraatio samaan lohkoon. Tällä tavalla ehdot ryhmien luonnille voidaan tehdä lohkon sisään, sillä ne eivät tule muuttumaan sekvenssin aikana. Kinematiikka-mallissa kaikki kuusi akselia myös toimivat yhdessä, jolloin on helpompaa hallita kaikkia kuutta akselia yhdessä ja samassa lohkossa. Mikäli yhteen akseliin tulee virheilmoitus, pysähtyvät samalla loput viisi akselia. Myös kuljetinhihnan konfigurointi ja ohjaus tuotiin samaan lohkoon, jolloin kaikkien akselien hallinta on samassa lohkossa. Kuvassa 14 näkyy ohjelman päälohko.

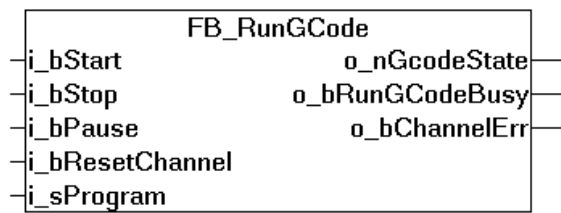
FB_KinematicGroup	
-i_bUserEnableAxes	o_bAllAxesReady
-i_bOutLimit	o_bConfigKinGroupDone
-i_bInLimit	o_b3DGroupActive
-i_bUserConfigKinGroup	o_eKinStatus
-i_bResetKinGroup	o_bClearKinGroupDone
-i_bClearKinGroup	o_bResetAllAxesBusy
-i_bBuild3DGroup	o_bSoEResetBusy
-i_bReset3DGroup	o_stXStatus
-i_bClear3DGroup	o_stYStatus
-i_bResetAllAxes	o_stZStatus
-i_bSoEReset	o_stM1Status
-i_bReadSoeMessage	o_stM2Status
-i_bPositionFeedStop	o_stM3Status
-i_fOverride	o_stCStatus
-i_fJogVelocity	o_stM1DiagMessage
-i_bJogXPlus	o_stM2DiagMessage
-i_bJogXminus	o_stM3DiagMessage
-i_bJogYPlus	o_bResetCBusy
-i_bJogYMinus	o_bCAtHome
-i_bJogZPlus	o_bCMoveDone
-i_bJogZMinus	o_bDeltaHome
-i_fJogVelocityConveyor	o_bCCalibrationDone
-i_bJogCPlus	
-i_bJogCMinus	
-i_bStartPositioningC	
-i_fPositioningCSetpoint	
-i_fPositioningCVelocity	
-i_bResetC	
-i_bStopC	
-i_bStartVelocityC	
-i_fVelocityC	
-i_bStartCHome	
-i_bCCalibrationCam	
-i_bSetCPosition	
-i_bCNegativeLimit	
-i_bCPositiveLimit	

Kuva 14. Kinematiikka- ja liikkeenohjauslohko.

Lohkon sisälle rakennettiin vain ehdot ryhmien muodostamisen välille. Esimerkiksi interpolatioryhmää ei voi luoda ennen kinematiikkaryhmää. Virhetilanteiden ilmoitukset tehtiin myös lohkon sisälle. Kuitenkin erilaiset ehdot kuljetinhihnan ja tripodin liikkeille jätettiin lohkon ulkopuolelle. Lohko sisältää myös tripodin ja kuljetinhihnan manuaalijat sekä kuljetinhihnan paikoittamisen. Triopdin automaattiliikkeet ajetaan erillisellä loholla g-koodin avulla.

5.3.2 G-koodi

G-koodin ajamista varten muodostettiin kuvan 15 mukainen toimintalohko. Lohkon sisään rakennettiin koodin suorittamiseen tarvittava sekvenssi. G-koodia suorittaessa lohko lataa suoritettavan ohjelman, minkä jälkeen se käynnistetään. Ohjelman voi pysäyttää kesken ajon ja jatkaa samasta kohdasta tai pysäyttää kokonaan ja nollata kanavan ohjelmasta. Lohko antaa tiedon ulos, mikäli ohjelman suoritus on kesken tai jos syntyy virhetilanne.



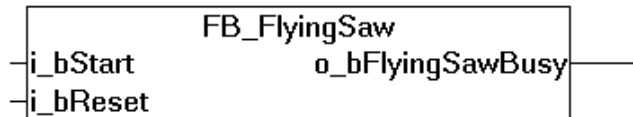
Kuva 15. G-koodin toimintalohko.

5.3.3 Kamerakuva

Messudemossa voidaan tuoda G-koodi myös kameralta. Kameran oma ohjelma tekee kuvasta vain tekstitiedoston, joka pitää kääntää NC-tiedostoksi. Tämä suoritetaan yksinkertaisella loholla, joka käynnistää Windwos ohjelman. Tällä ohjelmalla kameran tekstitiedoston päätte muutetaan ainoastaan .nc-muotoon, jolloin TwinCAT:n G-koodia suorittavat lohkot voivat ajaa tekstitiedoston sisältämän G-koodin. Lohko ilmoittaa kun käänös on valmis.

5.3.4 Lentävä saha

Yhdeksi demoksi rakennettiin lentävä saha, jolla voidaan integroida Tripodin työkalupiste liikkumaan kuljetinhihnan kanssa samanaikaisesti niin, että kuljetinhihna toimii ohjaavana. Kuvan 16 mukaisesta lohokosta rakennettiin täysin itsenäinen, jolloin se käynnistyessään suorittaa koko toimintonsa läpi. Lohkon sisällä käytetään lentävän sahan kirjastoja ja suoritetaan synkronointi Tripodin ja kuljetinhihnan välillä. Synkronoinnin jälkeen lohko suorittaa yksinkertaisen PTP-ajon niin, että tripodi seuraa kuljetinhihnaa. Tämän jälkeen lentävä saha puretaan pois ja lohkon tilatieto menee pois päältä.



Kuva 16. Lentävän sahan toimintalohko.

5.3.5 Muut toimintalohkot

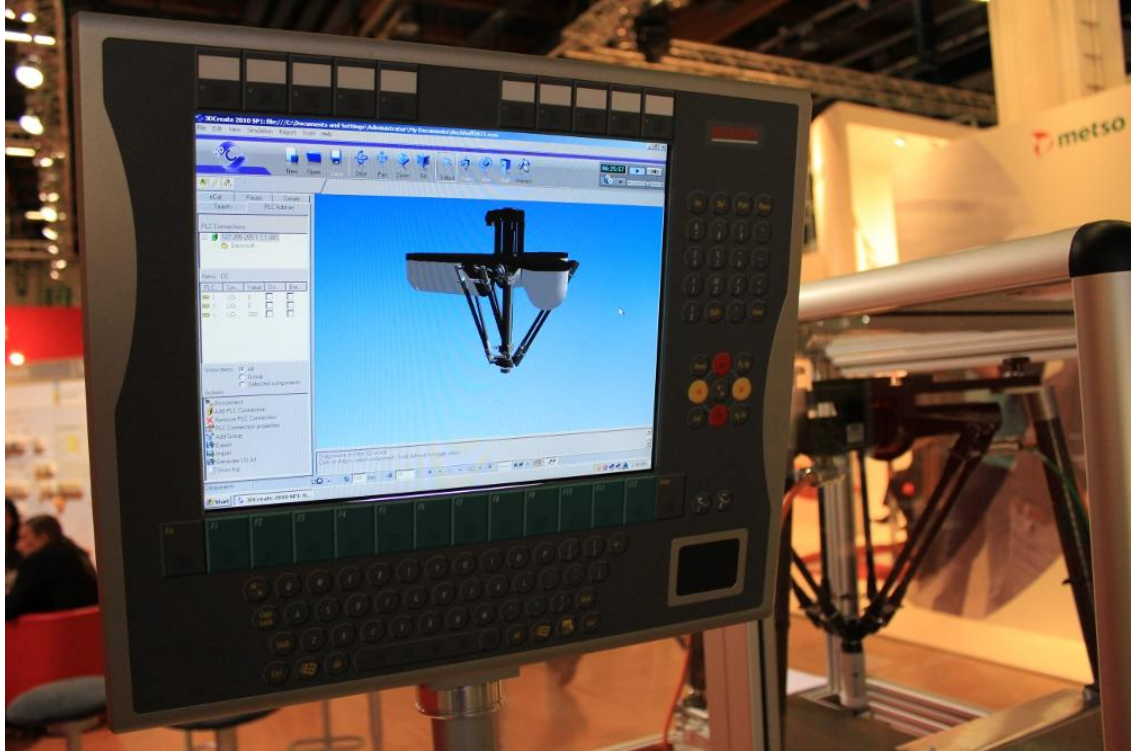
Muita toimintalohkoja ovat automaatti ja manuaalitilan hallinta, G-koodin lukeminen käyttöliittymään reaaliajassa, ajan tuominen ohjelmaan sekä hälytyslista. Näitä ohjelmia kutsutaan suoraan pääohjelmasta ja ne toimivat itsenäisesti "taustalla". Jos akseli esimerkiksi antaa virheilmoituksen, aktivoituu hälytyslista ja virheestä tuodaan tieto käyttäjälle. Samalla automaattitila vaihtuu manuaalitilaan ja ohjelman automaattinen sekvenssi pysähtyy. Virhekuittausten jälkeen ohjelma palaa takasin automaattikierrolle.

5.3.6 Simulointi

Ohjelman kehittämissivaiheessa ei ollut saatavilla mekaniikkaa, jolla olisi voinut testata liikkeitä. Yksi tapa ohjelman simulointiin on käyttää TwinCAT Scope View-ohjelmaa, jolla voidaan lukea arvoja graafisesti. Robotin liikkeitä on kuitenkin vaikea hahmottaa kolmesta käyrästä. Liikkeitä voidaan simuloida 3-ulotteisena Visual Componentsin tarjoamalla ohjelmistolla.

Visual Components on 3D-mallintamiseen erikoistunut yritys. Heidän tarjoamaansa 3DCreate-ohjelmaan on tarjolla PLC-lisäosa, jolla voidaan lukea TwinCAT:n ohjelman muuttujia 3D-malliin.

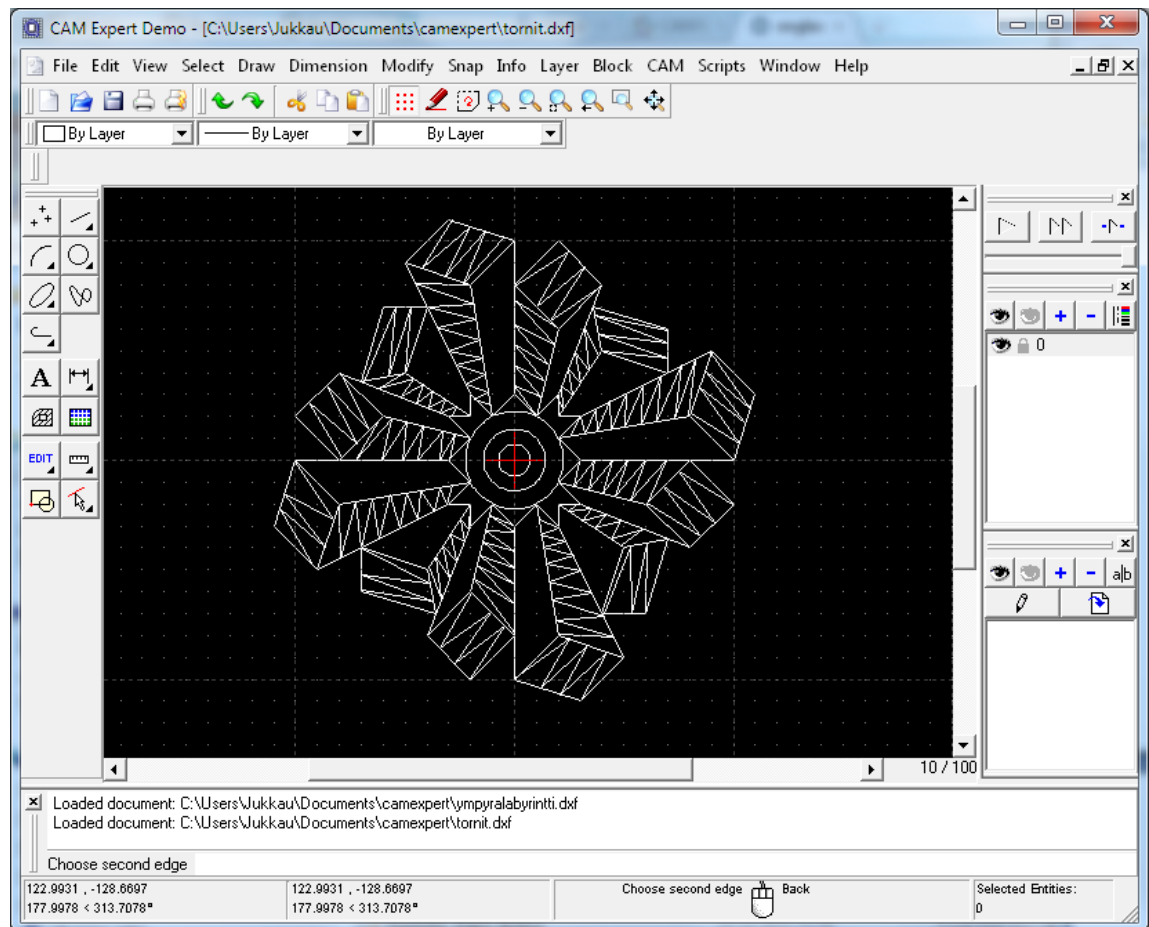
Tripodin 3D-mallista luotiin robotti 3DCreate-ohjelmaan, mitä voidaan ohjata työkalupisteen avulla. Tämän jälkeen ohjelmaan lisättiin työkalupisteen kolme virtuaaliakselia ja ohjelmaa voitiin tämän jälkeen testata 3D mallilla. Malli tuli myös esille messuille kuten kuvassa 17 näkyy.



Kuva 17. Robottimallin simulointi kolmiulotteisesti.

5.3.7 Demot

Automaattisekvenssin aikana robotti piirtää erilaisia kuvia G-koodilla. Muistista piirrettäviä kuvia tehtiin yhteensä kahdeksan kappaletta. Kuvien G-koodin tekemiseen käytettiin apuna CAM Expert-ohjelmaa. Sillä voidaan piirtää tasolle erilaisia kuvioita dxf-muotoon viivoilla, ympyränkaarilla sekä kaariviivoilla. Valmiista kuvasta voidaan generoida valmis G-koodi. Suoraan G-kooditiedostoa ei voinut käyttää kuvan piirtämiseen, vaan tiedostoon piti vaihtaa kiihtyvyydet sekä ylös- alas-komentojen rajat. Kuvassa 18 on esimerkki yhdestä messudemon piirtämistä kuvista.



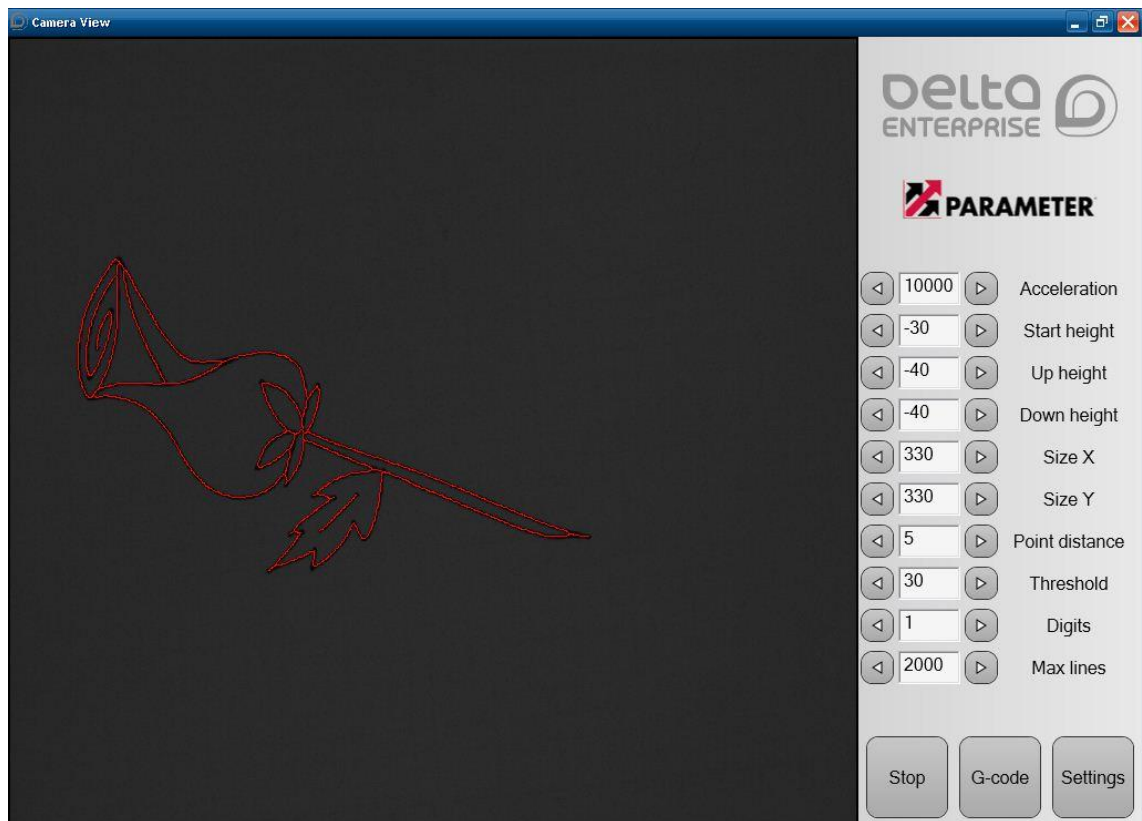
Kuva 18. Cam Expert-ohjelma.

Toinen vaihtoehto oli tuoda kuva suoraan kameranäöltä. Kuva piirretään käsin valkoiselle paperille mustalla kynällä. Kameraohjelma erottelee kuvasta yhtenäiset viivat ja antaa ne pistepareina 5 mm tarkkuudella. Pisteluettelosta generoidaan G-koodia, joka ajaa pisteiden läpi pienellä pyöristyksellä. Yhtenäisen viivan loputtua nostetaan kynä irti piirustuslajustasta ja siirrytään seuraavan viivan alkuun. Seuraavaksi kynä lasketaan

piirtoalustaan ja piirretään yhtenäinen viiva loppuun. Siirtymät viivojen välillä ajetaan pikaliikkeenä.

5.3.8 Käyttöliittymät

Messudemolle tehtiin kaksi erillistä käyttöliittymää. Toisesta käyttöliittymästä voidaan käyttää robottia sekä kuljetinhihnaa ja toisesta kameranäköä. Kameranäön ohjelma tuli kokonaisuudessaan Delta-Enterprise-yritykseltä. Tavoitteena oli tehdä yksinkertainen käyttöliittymä, josta voidaan vaihtaa piirrettävän kuvan parametreja. Käyttöliittymässä näkyy myös reaaliaikainen kuva piirustuksesta sekä löydetyt viivat oranssilla merkittynä (kuva 19).



Kuva 19. Delta Enterprise-käyttöliittymä

Robotin käyttöliittymän tekemiseen käytettiin TwinCAT PLC HMI-lisäosaa, jolla voidaan käynnistää visualisointi kokoruututilaan XPE- ja WES-käyttöjärjestelmissä. Käyttöliittymästä tehtiin selkeä ja pääpaino kinematiikan esittelyssä. Tuloksena syntyi kuvan 20 mukainen käyttöliittymä. Aloitussivun Demo-osiosta voidaan käynnistää automaattise-

kvenssi, ottaa uusi kuva kameralta sekä pysäyttää demo ennen kuvan pyyhintää. Keskosassa näytetään kaikkien seitsemän akselin asema. Keskosalla pyritään havainnollistamaan kinematiikkakirjaston laskentaa, mikä tapahtuu virtuaaliakseleiden ja moottoriakseleiden välillä. G-Code-osiossa näkyy suoritettava G-koodi. Yläpalkin oikeassa yläkulmassa näkyy demon tila, joko automaatti tai manuaali. Alapalkissa on navigointipainikkeet eri käyttöliittymien välillä. Vasemmalta oikealle: pääikkuna, scope, hälytystaulukko sekä asetukset. Alapalkin oikeaan alakulmaan ilmestyy hälytysruutu, jos jokin virhe ilmenee ohjelmassa.

BECKHOFF
MODE: AUTOMATIC

New Automation Technology
2011-11-29-01.08.38

DEMO

New Picture

Hold picture

Demo Active

VIRTUAL AXES (mm)		MOTOR AXES (°)		CONVEYOR AXEL (mm)	
X	-37.314405	M1	4.137122	C	0.000000
Y	75.563943	M2	25.526087		
Z	-40.000000	M3	30.748527		

G-CODE

N125 G01 Z-40
 N130 G03 X6.021 Y-24.219 I-50.161 J0.000

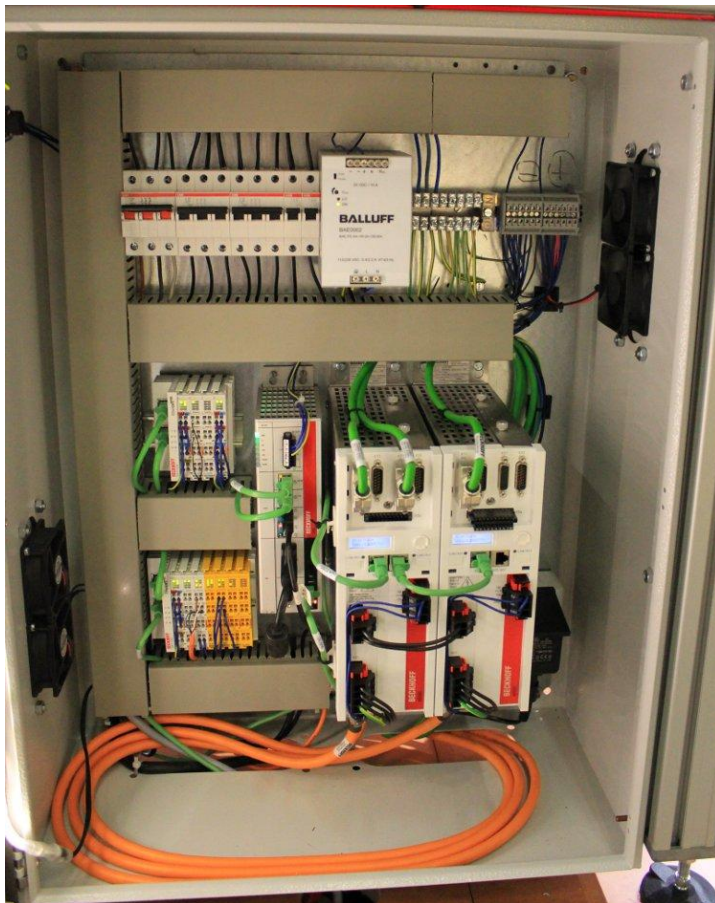
Kuva 20. Messudemon käyttöliittymä.

Scope-ikkunassa voidaan seurata akselien asemaa ja kiihtyvyyksiä graafisessa muodossa. Hälytystaulukkoon tulee näkyviin kaikki aktiiviset virhetilat. Asetusvälilehdeltä voidaan siirtyä salasanan kautta käyttöliittymään jossa voidaan hallinnoida robottia ja kuljetinhihnaa sekä ajaa molempia manuaali ajolla.

6 Demon toteutus

Laitteisto koottiin Beckhoffin Hyvinkään konttorin tiloissa. Kaikki tarvittavat komponentit saatiin noin kolme viikkoa ennen messuja. Tässä ajassa tehtiin laitteiston koonti, parametointi ja testaus.

Kokoaminen aloitettiin sähkökaapista. Kaappi oli tilattu 450x650 mm kokoisella laiteikkunalla. Beckhoffin komponentit tuli sijoittaa kaappiin hyvin näkyville, jolloin yhdellä silmäyksellä näkee koko tuoteperheen ja sen monipuolisuuden. 24 VDC virtalähde, johdonsuojajytkimet ja riviliittimet sijoitettiin sähkökaappiin ylös, jolloin ne jäivät pois laiteikkunasta. Sähkökaappiin asennettiin myös neljä kappaletta 24 VDC tuulettimia, joilla varmistettiin kaapin jäähdytys. Kuvan 21 mukaiseen valmiiseen sähkökaappiin asennettiin myös led-valot, jolloin tuotteet tulevat selkeästi esille.



Kuva 21. Valmis sähkökaappi ovi avattuna.

Sähkökaapin jälkeen koottiin tripodi-robotti. Robotti nostettiin tukijaloille ja moottorit kytkettiin servovahvistimiin. Tässä vaiheessa ei koottu vielä robotin varsia vaan ensin tehtiin nollakohdan määrittäminen robotille kuten kuvassa 22. Tämän jälkeen asennettiin robotin varret, minkä jälkeen tehtiin testiajot työkalupisteen liikkeille ja määriteltiin ohjelmarajat. Parametointi ja viritys tehdään myöhemmin, kun robotti on asennettu paikoilleen alumiinikehikkoon.



Kuva 22. Tripodi-robotin testiajot sekä nollakohdan määrittäminen.

Seuraavaksi robotti nostettiin kokonaisuudessaan alumiinikehikon sisään, minkä jälkeen voidaan tehdä lopullinen parametointi robotille. System Managerista määriteltiin työkalupisteen dynaamiset ominaisuudet, kuten kiihtyvyys, hidastuvuus sekä kiihtyvyyden muutosnopeus. Myös kuljetinhihnalle haettiin ohjelmarajat sekä dynaamiset ominaisuudet.

Kuljetinhihnaa ajettaessa huomattiin muutos paikkatiedossa. Asema muuttui noin 10 mm ajettaessa 30 min edestakaista liikettä. Tämän seurauksena jouduttiin asentamaan fyysiset päätyrajat. Toinen raja asetettiin asemaan, jossa piirtotaso on suoraan robotin

työkalupisteen alla. Kuljetinhihna kalibroidaan tähän rajaan aina ajettaessa piirtoasemaan. Toisesta rajasta tehtiin fyysinen turvaraja, jolloin kuljetinhihna ei voi ajaa liian pitkälle. Rajat asetettiin toimimaan normaalisti kiinnitilassa, jolloin tieto menee pois päältä, kun saavutaan rajalle. Mikäli anturi rikkoutuu, menee tieto pois päältä ja robotti pysähtyy. Näin vältetään vaaralliset tilanteet.

Kun robotin ja kuljetinhihnan parametrit ja ohjelmarajat oli haettu sopiviksi, päästiin aloittamaan piirtoajäljen testaus. Kynäteline suunniteltiin jousella, jolloin kynänkärkeä painetaan piirtoalustaan jousivoimalla. Ensimmäisessä testissä kynän muste kuivui jo 30 min käytön jälkeen. Kynäksi valittiinkin tuote, joka kestää ilman korkkia 48 h. Musteen kuivumisesta päästiin eroon, mutta kynän muste loppui noin 2,5 h yhtäjaksoisen käytön jälkeen.

Viimeisessä vaiheessa asennettiin Delta Enterpricen ohjelma sekä kameranäkö. Kamera kiinnitettiin erillisellä telineellä, joka voidaan asentaa helposti erilaisiin muotoihin ja asentoihin. Yritys oli aikaisemmin lähettänyt G-kooditiedostot, jotka oli testattu simuloimalla. Asennuksen jälkeen kuvan piirto onnistui oletusten mukaisesti. Ainoa muutos tehtiin pisteiden välillä ajettavan kaarevuuden suuruuteen. Lisäksi kameraohjelmaan tehtiin erillinen välilehti, jolta voidaan muuttaa piirtoon liittyviä parametreja.

Käyttöönotto- ja virhetilanteiden testaus suoritettiin Hyvinkäällä, jolloin valmis laite voitiin kuljettaa suoraan messuosastolle. Myös messuvieraiden turvallisuus tarkastettiin demolaitteen toimiessa.

Valmis demolaite kuljettiin Helsingin messuhalliin kolme päivää ennen messuja. Paikanpäällä asennettiin vielä erillinen näyttö, jossa ajettiin Visual Components:n tekemää simulaatiomallia reaaliajassa robotin liikkeiden kanssa. Käyttöönotto ja testiajot suoritettiin vielä kertaalleen paikanpäällä.

7 Yhteenveto

Työssä valmistettiin kuvan 23 mukainen demolaitteisto, joka oli esillä Helsingissä Automaatio 2011 messuilla Beckhoffin osastolla. Laitteisto soveltuu myös erilaisiin koulutustilaisuuksiin sekä testauksiin. Demossa on esillä Beckhoffin tuoteperheen kaikki osa-alueet. Yhteistyötä tehtiin Visual Components ja Delta Enterprise -yritysten kanssa.



Kuva 23. Valmis demolaitteisto Helsingin messukeskuksessa Automaatiomessuilla 2011.

Laitteiston ohjaus toteutettiin kokonaisuudessaan PC-pohjaisella ohjauksella käyttäen Beckhoffin tarjoamia komponentteja sekä TwinCAT-automaatio-ohjelmistoa. Erityisenä tavoitteena oli kinematiikkakirjaston käyttäminen liikkeenohjauksessa. Kameranäkö toteutettiin Delta Enterprisesin tekemällä ohjelmistolla. Kinematiikan testauksessa ja ohjelmiston kehittämisessä käytettiin Visual Componentsin tarjoamaa rajapintaa ja 3D-robottimallia, joka oli myös esillä messuilla erillisellä näytöllä. Robotin käyttöliittymä toteutettiin kosketusnäytöllä varustetulla ohjauspaneelilla. Turvakomponenttien kytkentään käytettiin PC-pohjaista TwinSAFE-turvajärjestelmää.

Työlle asetetut tavoitteet tulivat täytettyä. Demolaite toimi messuilla kolme päivää. Laitteisto oli sijoitettu messuosaston kulmaan. Kolmen päivän aikana demo keräsi paljon huomiota ja pysäytti ohikulkijat tutustumaan tarkemmin laitteeseen sekä Beckhoffin tarjoamiin tuotteisiin. Laitteistosta tehtiin myös lyhyt artikkeli messulehteen. Laitteisto oli huomiota herättävä, teknisesti kiinnostava sekä toi Beckhoffin tuotteet näyttävästi esille. Erityistä huomiota herätti messuvieraiden mahdollisuus piirtää omakuva, jonka robotti kopioi kameranäön kautta piirtoalustalle. Messuvieraat jäivät myös usein seuraamaan, minkä kuvan robotti piirtää seuraavaksi.

Parannettavia kohtia laitteistossa olisi käyttöliittymän parantaminen. Delta Enterpricen käyttöliittymän voisi yhdistää osaksi robotin käyttöliittymää. Myös laitteiston ääri- ja paino ylittivät asetetut rajat. Laitteiston liikuteltavuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi asentamalla erilliset pyörät.

Projektin aikana opittiin paljon projektinhallinnasta. Erityisesti tarkkojen suunnitelmien ja laskelmien tärkeys korostui loppua kohden. Myös tiedon määrä kinematiikkakirjastosta kasvoi, mistä on hyötyä niin myyntimiehille kuin teknisessä tuessa työskenteleville.

Messujen jälkeen robotti siirrettiin takaisin Hyvinkään konttorille. Laitteisto on aktiivisessa käytössä esittely- ja koulutustilaisuuksissa sekä testeissä. Demolaite voidaan myös kuljettaa tuleviin tapahtumiin esille.

Lähteet

- 1 Beckhoff Automation www-dokumentti.www.beckhoff.fi Luettu 5.6.2011.
- 2 Vesämäki, Hannu. 2007. Lastuavan työstön NC-ohjelmointi. 3. uudistettu painos. Helsinki:Teknologiainfo Teknova Oy.
- 3 Salmi, Tapio & Virtanen, Simo. Dynamiikka 1. Tampere: Pressus Oy 2002.
- 4 Beckhoff Automation. 2009. Application note, Kinematic Transformation, s. 1-10.
- 5 Beckhoff Automation. 2011. TwinCAT-The PC-based Control for the packaging Industry. Lehdistöiedote, s. 12-13.
- 6 Beckhoff Automation. 2011. AM3000 user manual.
- 7 Beckhoff Automation. 2011. AS1050 user manual.
- 8 Beckhoff Automation. 2011. AX5000 user manual.