

Kai Haapasaari

PORTAALIROBOTIN VÄÄNTYMIEN MITTAAMINEN JA  
KOMPENSOINTI

Automaation koulutusohjelma  
2014

## PORTAALIROBOTIN VÄÄNTYMIEN MITTAAMINEN JA KOMPENSOINTI

Haapasaari, Kai  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Automaation koulutusohjelma  
Toukokuu 2014  
Ohjaaja: Suvela, Timo  
Sivumäärä: 33  
Liitteitä: 0

Asiasanat: Robottitakymetri, portaalirobotti, prisma, Bosch Rexroth, Vääntymät, UDP

---

Opinnäytetyön aiheena on robottitakymetrin käyttö Cimcorp Oy:n portaalirobottijärjestelmien vääntymien mittaamiseen ja näiden kompensoimiseen.

Opinnäytetyössä käydään läpi järjestelmiä, joita Cimcorp Oy valmistaa, mittalaite jota käytimme, mittalaitteen käyttämiä apuvälineitä ja integroimista osaksi automaatiojärjestelmää.

Käytössämme oli GeoMax Zoom 80 -sarjan robottitakymetri, jonka avulla mittasimme vääntymiä.

# DEFORMATION MEASUREMENTS AND COMPENSATIONS FOR GANTRY ROBOT

Haapasaari, Kai

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Automation Engineering

May 2014

Supervisor: Suvela, Timo

Number of pages: 33

Appendices: 0

Keywords: Total station, portal robot, prism, Bosch Rexorth, UDP

---

The purpose of this thesis was the use of a total station device to measure Cimcorp's gantry robot systems distortions and create compensation table for these.

The thesis goes through systems that Cimcorp Oy manufactures, measuring device we used, measuring device tools and integration into the automation system.

We used Geomax Zoom 80 series total station which allowed to measure the deformations.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	MITTALAITE.....	7
2.1	Robottitakymetrin käyttöönotto ja mittaustarkkuus.....	7
2.1.1	Etäisyyden mittaaminen .....	11
2.2	Mittaus prismat ja pinnat .....	11
2.2.1	Pyöröprismat .....	12
2.2.2	360 Prismat .....	13
2.2.3	Tarratähys ja pinnasta mittaus .....	14
2.3	Mittaustapahtuma.....	14
2.3.1	Mittatapahtuman vaikeudet .....	16
3	VÄÄNTYMÄT .....	17
3.1	Mekaanisen rakenteen aiheuttamat vääntymät .....	17
3.1.1	Vääntymien ennaltaehkäisy suunnittelussa .....	17
3.2	Kokoonpanossa aiheutuneet vääntymät.....	18
3.2.1	Kokoonpanon vaikutus vääntymiin.....	18
3.2.2	Valmistusvirheet.....	18
3.3	Fyysisen rasituksen aiheuttamat vääntymät.....	19
3.3.1	Kuorma .....	19
3.3.2	Liike ja värähtely.....	19
3.4	Virhetilanteiden aiheuttamat vääntymät .....	20
3.4.1	Iskut ja törmäykset .....	20
3.5	Kompensointi.....	21
3.5.1	Laskenta .....	21
4	MITTALAITTEEN KYTKEMINEN AUTOMAATIOON .....	22
4.1	Kytkeä lattiakaapin PLC:hen .....	22
4.2	Ohjelmoitavan logiikan ja mittalaitteen välinen kommunikointi .....	24
4.3	UDP- ja TCP- protokollat .....	24
4.4	Mittaustulokset.....	25
5	LOPPUSANAT .....	33
	LÄHTEET .....	34
	LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena oli käyttää Geomax Zoom 80 sarjan robottitakymetriä määrittämään portaalirobotin vääntymiä ja testata sen soveltuvuutta järjestelmään integroitavaksi. Työn tilasi Cimcorp Oy, ja yhteyshenkilönä toimi Sakari Mikkola. Järjestelmän robotteja ohjaavana osana toimi Bosch Rexrothin Indra Drive MLD liikeohjain, joka ohjaa robotin akseleiden ohjaimia. Tarkoitukseni on havainnollistaa, miten robottitakymetri toimii, miten se pystytään kytkemään Cimcorp Oy:n portaalirobottijärjestelmään sekä miten kompensointi järjestelmään toteutetaan.

Cimcorp Oy:n valmistamat portaalirobotit ovat suurimmassa osin varastointilogistisia ratkaisuja erilaisille materiaaleille, kuten renkaille ja laatikkoihin pakattaville tuotteille. Mittaus osana portaalirobotin elinkaarta on tärkeää, koska tällä pyritään minimoimaan mahdollisia törmäyksiä, tuotteiden vaurioitumisia ja pidentämään järjestelmän elinikää. Mittaukset ovat osa varastointijärjestelmän huoltoja ja käyttöönottoa. Näissä järjestelmissä poimitaan ja pinotaan tavaroita varastoon ja siirretään linjastolla eteenpäin eli ovat osa logistista tehtaan toimintaa. Toimenpiteen avulla pyritään pitämään kirjaa robottien käytönaikaisista ja mahdollisista valmistuksen yhteydessä ilmentyneistä vääntymistä. Mittauksesta saatujen tulosten avulla pystytään selvittämään onko jokin komponentti vääntynyt tai taipunut yli ennalta määrätyn sallitun arvon, jolloin se pitää vaihtaa tai säätää lähemmäs oikeaa arvoaan. Edelleen parempaan paikoitustarkkuuteen päästään mittaustulosten perusteella lasketulla korjaustaulukolla ja näin ollen pystytään hyödyntämään varastotilaa huomattavasti paremmin hyödyksi.

Cimcorp Oy on maailman johtavimpiin portaalirobottien valmistajiin lukeutuva yritys, jonka mottona on ”You name it, we pick it.”. Täten erilaisille tuotannossa käsiteltäville tavaroille löytyy jo erinäisiä tartuntasovelluksia. Suurin osa-alue Cimcorp Oy:n toiminnasta kuitenkin kohdistuu rengasteollisuuden alalle, johon Cimcorp Oy valmistaa täysin automatisoituja renkaan käsittelyn ja valmistuksen sovelluksia aina raaka-ainemateriaalin käsittelystä prosessoinnin kautta tavarantoimitukseen. Robottitakymetrillä tehtävillä mittauksilla varmistetaan, että tuote täyttää asiakkaan toiveet paikoitustarkkuudesta. Renkaan käsittelyssä käytettävissä TyrePick sovelluksissa robottitakymetri-mittaukset eivät jokaisen portaalirobotin kohdalla ole tarpeellista, koska tuote ei vaadi

robotilta kovin suurta tarkkuutta. TyrePick sovelluksissa renkaaseen tartutaan sisäkehältä, joten vaikka robotissa ja sillassa saattaisi pieniä vääntymiä esiintyäkin, on tartunta mahdollinen. Kuitenkin renkaan tietyissä käsittelyvaiheissa, kuten GT-Bufferin (Green Tire) pallettivarastossa, pallettien pinoaminen pitää tehdä tarkasti, jotta pino ei pääse kaatumaan. Pahimmassa mahdollisessa tapauksessa yhdessä solussa työskentelee kaksi robottia, jotka jakavat varastopaikat samalla koordinaatistolla. On mahdollista että robotit olisivat useita millejä vääntyneitä eri suuntiin. Tämä tekee tartunnasta erittäin hankalaa ja törmäys pallettiin voi mahdollisesti aiheuttaa pinon kaatumisen, täten myös tuotannon hävikkiä. GT-bufferiin välivarastoidaan renkaita, joita ei vielä ole valmistettu lopulliseen muotoonsa prässillä. Tarttujan tarkkuus korostuu tässä vaiheessa prosessia siten, että aihion pitää olla varastossa vain tietty aika. Jos rengas pääsee olemaan varastossa liian kauan, se kuivuu liikaa. Tällöin rengas saattaa tarttua kiinni pallettiin, mikä taas vaikeuttaa jatkokäsittelyä, jolloin rengas saatetaan joutua jopa hylkäämään. Kun GT alueen koordinaatiston kompensatio on asetettu kummankin robotin kohdalla samaan koordinaatistoon, voidaan hyödyntää täyttä portaalirobotin potentiaalia ja olla näin varmoja tarttumispaikoitusten yhtenäisyydestä. Näin törmäämisen riski pienenee huomattavasti ja mahdolliset materiaalivahingot pystytään välttämään mahdollisimman tehokkaasti.

Toinen Cimcorp Oy:n hallitsema osa-alue on varastointilogistinen laatikoiden käsittelyjärjestelmä. MultiPick ja 3D shuttle-järjestelmissä pinotaan laatikoita, juomalavoja jne. Näiden järjestelmien tilaaja on yleensä ilmoittanut toleranssiarvot joiden tarkkuuden sisällä portaalirobotin tulisi toimia jatkuvasti. Esimerkkinä 2 mm paikoitustarkkuus on erityisen vaikea saada aikaan ilman kunnollisia mittauksia, jotka paljastavat robotin ”elämisen” johteellaan. Nämä paikoitustarkkuuden heitot korreloituvat suoraan laatikoiden paikoitukseen ja sen tarkkuuteen. Laatikkopaikoitusten tarkkuusvääntymä johtuu siitä, että muoviset laatikot pinotaan yleensä hieman sisäkkäin. Vaikka muovinen laatikko kestääkkin hieman vääntöä, niin ne eivät kuitenkaan kestä äkinäisiä voimakkaita iskuja. Joten jos johteilla olevien robottien vääntymät ovat jostain syystä vastakkaisiin suuntiin ja ne käsittelevät samoja laatikoita, ongelmaksi muodostuu toisen robotin jättö tai poimintatehtävä samaan varastopaikkaan.

Kun robotti on jättänyt yksittäisen tuotteen tai pinon tuotteita varastopaikkaan ja toinen robotti tulee tekemään tehtävänsä samaan paikkaan, esimerkiksi pinoamistilanteessa,

laatikot saattavat liikkua eri positioon tai mahdollisesti jopa koko pino kaatuu. Pahimassa tapauksessa pino on siirtynyt, ja kun robotti tulee hakemaan tavaraa, voi tarttujen törmätä ja särkeä laatikoita ja aiheuttaa asiakkaan tuotteiden vaurioitumisen. Toimintakokokset vähentävät tuotantotehoa ja asiakas menettää rahaa, koska tavaraa ei valmistu lähetettäväksi tai tavaran tuotantokapasiteetti on pudonnut vaurioitumisten takia.

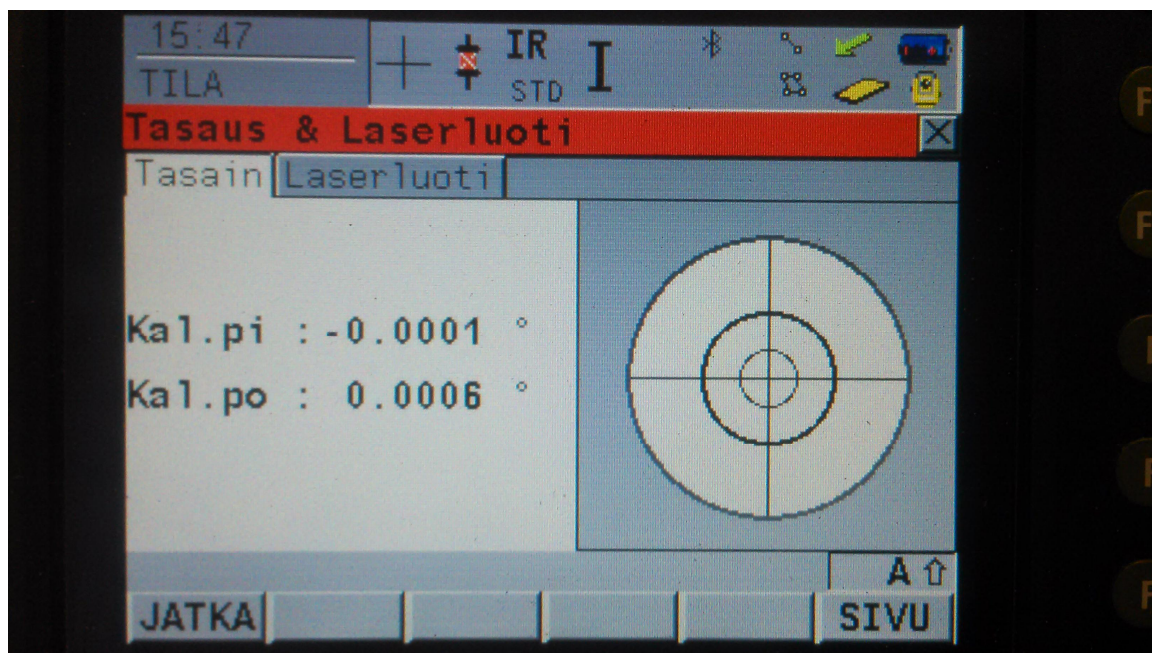
## 2 MITTALAITE

Mittalaitteena portaalirobotin vääntymien mittauksiin on käytetty GeoMaxin valmistama Zoom 80 -sarjan robottitakymetri. Robottitakymetri on kulmien- ja etäisyyksien mittalaite, jonka etäisyysmittauksen, vaaka- ja pystykehän avulla robottitakymetri paikantaa tähystettävän pisteen koordinaatit ja kulmat automaattisesti laserin avulla. Tähystettävänä pisteenä käytetään yleensä siirrettäviä prismoja tai heijastetarroja, mutta myös pinnasta mittaaminen Zoom 80 -sarjan robottitakymetrillä on mahdollista. Laitteen ominaisuuksiin kuuluu prisman automaattinen seuranta, joka helpottaa laitteen kanssa työskentelyä ja mittaustapahtumaa, kun mitattavaa kohdetta (prismaa tai laitetta, johon prisma on kiinnitetty) ja itse laitetta operoi yksi ja sama henkilö. Laite tallentaa mittaustiedot CompactFlash muistikortille tai vaihtoehtoisesti se voidaan kytkeä sarjaliikenneportin kautta eri järjestelmiin ja laitteisiin etäkäyttöä tai datan jälkikäsittelyä, tallennusta ja-/tai tarkastusta varten.

### 2.1 Robottitakymetrin käyttöönotto ja mittaustarkkuus

Laite asetetaan säädettävän kolmijalan päälle. Jalan korkeustasoa voi muuttaa tiettyjen rajojen sisällä haluttuun korkeuteen mittauksen ja mittapaikan mukaan. Robottitakymetri kalibroidaan käyttökuntoon asettamalla laitteen jalusta sekä itse takymetri vaakatasoon. Hienosäätö tasoon tehdään laitteen alustassa sijaitsevilla jalkaruuveilla. Tämän lisäksi laitteessa olevat kompensattorit ja digitaalinen tasovesivaaka hienosäätävät kojeen mittauksista tulevat mittauservot tarkemmin oikeisiin arvoihinsa. Kojeelle riittää, että kuvassa sijaitseva pieni ympyrä on digitaalisen tasovesivaa'an sisemmän

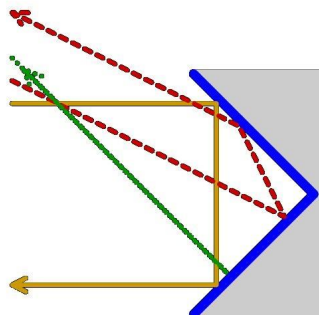
ympyrän sisällä, jotta kojeen kompensattorien tasaustoiminto toimii. (Kuva 1). Halluttaessa mittalaitteen sijainti pystytään merkitsemään lattiaan laitteessa olevan laserluodin avulla.



Kuva 1. GeoMax Zoom 80 -robottitakymetrin elektroninen vesitasaus ja kompensattorin kalibrointi.

Robottitakymetri mittaa etäisyyttä lähettämällä lasersäteen prismalle, joka heijastaa sen takaisin takymetrille. Säteen takaisinheijastuminen tapahtuu prismassa olevien peilien avulla. Peilit ovat tarkasti 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Tämä saa aikaan sen, että prisma heijastaa säteen takaisin takymetrille (Kuva 2.). Kojee mittaa etäisyyden mitattavaan kohteeseen, tässä tapauksessa prismaan, laskemalla ajan, joka lasersäteeltä kuluu prismalle ja takaisin. Osa robottitakymetreistä käyttää tarkemman mittatuloksen aikaansaamiseksi myös eri aallonpituuksia lasersäteissä, joita laite lähettää prismalle. Mikäli mittaus toteutetaan pinnalta mittauksena ilman erillistä heijastusta, niin mittauksissa pitää ottaa huomioon eri materiaalien ja värien mahdollinen heijastavuus, robottitakymetrin mittaustarkkuudet ja matkat ko. pintaan.





Kuva 2. Takaisinheijastavan prisman toimintaperiaate (en.wikipedia.org)

GeoMax Zoom 80 -sarjan robottitakymetrin mittaustarkkuudet on esitetty taulukossa (Taulukko 1). Kulmanmittaustarkkuudet on ilmoitettu milligooneina. Goonit verrattuna astelukuun on puhtaasti 10-järjestelmään perustuva menetelmä, jonka Ranskalaiset kehittivät samaan aikaan metrisen SI-järjestelmän kanssa. Gooneissa täysympyrä on 400 gon vrt.  $360^\circ$ , jolloin suorakulma  $90^\circ$  on 100 gon. 10-järjestelmää astelaskennassa ei tosin ole otettu käyttöön muualla kuin maanmittauksissa, johon käytetty robottitakymetri on yleisesti suunniteltu. Yksi milligooni on siis suoraan 0,9 milliaastetta. Nykypäivänä 10-järjestelmän astelaskennan kulmayksikkö on ilmoitettu graadeina eli GRAD tai GRADS.

### Kulmanmittaus

Tarkkuus	1" (0.3 mgon), 2" (0.6 mgon), 5" (1.5 mgon)
Kulmaresoluutio	0.1" (0.1 mgon)
Menetelmä	Absoluuttianturi, jatkuva
Kompensaattori	Nelisuuntainen

### Etäisyysmittaus

Pyöröprisma	3500m / 1 mm + 1.5 ppm
Useita prismoja	10000m / 5 mm + 2 ppm
Pinnasta mittaus	1000m / 2 mm + 2 ppm

Taulukko 1. GeoMax Zoom 80 mittaustarkkuudet ([www.geolaser.fi](http://www.geolaser.fi))

### 2.1.1 Etäisyyden mittaaminen

Koska tiedossamme on takymetrin toimintatapa elektroniselle etäisyyden mittaukselle (**EDM = Electronic Distance Measurement**) ja käytössämme on tunnettuja vakioita, pystytään etäisyys laskemaan seuraavalla kaavalla 1.

$$D = \frac{ct}{2}$$

(Kaava 1.)

Kaavassa D on etäisyys, c on valonnopeus (299 792 458 m/s tai  $1.08 \cdot 10^9$  km/h) ja t on aika joka säteellä kestää edestakaiseen matkaan takymetrilta prismalle ja takaisin. Lasketaan aika, joka säteellä kestää takymetriltä prismalle ja takaisin lähettämällä pulssi, jonka taajuus vaihtuu kaava 2, jossa  $\varphi$  on vaiheen viive ja  $\omega$  optisen aallon kulmataajuus.

$$t = \frac{\varphi}{\omega}$$

(Kaava 2.)

Täten kun tiedetään pulssin edestakaiseen matkaan kulunut aika, pystytään laskemaan etäisyys kaavalla 1.

## 2.2 Mittaus prismat ja pinnat

Robottitakymetrillä suoritettaviin mittauksiin voidaan käyttää monia erilaisia apuvälineitä. Takaisinheijastimet eli Prismat, ovat yleisimmät apuvälineet mittausten suorittamiselle. Käyttämämme takymetri kykenee mittaamaan prisman position tarkkaan useamman sadan metrin, jopa kilometrien päästä. Mittauksen maksimietäisyyteen vaikuttaa huomattavasti käytössä oleva laite, koska laitteen oma etäisyysmittauksen teho on suoraan verrannollinen siihen, miten pitkältä matkalta etäisyys pystytään mittaamaan. Etäisyyden mittaukseen vaikuttaa myös se, kuinka monella ja millä prismalla mittaus suoritetaan. Mikäli mitattava kohde on erittäin kaukana takymetristä, voi takymetrillä olla vaikeuksia löytää takaisinheijastusta, eikä takymetri välttämättä saa täyhystystä lukittua prismaan. Erilaisilla prismoilla ja pinnoilla on erilaiset prismavakiot,

jotka on määritelty taulukossa (Taulukko 1.). Nämä vakiot on tarkoitettu syötettäväksi takymetrille, mikäli tiedot ovat jostain syystä tiedot nollaantuneet. Vakiot toimivat takymetrillä offsettinä mittapisteen ja prisman heijastinpinnan välillä. Mittaukset pystytään suorittamaan myös heijastavilta tarroilta ja suoraan pinnasta, mutta näillä mittaus-tavoilla etäisyyden mittaus ei ole samassa tarkkuusluokassa kuin prismalla mitattuna.

Nimi laitteessa	Tyyppi	+ Vakio
360 Prism	Prisma	+23.1mm
Circ Prism	Prisma	0.0mm
Mini Prism	Prisma	+17.5mm
ReflTape	Teippi	+34.4mm
Target plate	Levy	+34.4mm
Reflectorless	-	+34.4mm

Taulukko 1. Eri prismojen ja pintojen vakiotaulukko, jossa esitetyt prismat ovat vakiona asetettu käyttämällemme takymetrille. (GeoMax Zoom 80 -sarjan manuaali)

### 2.2.1 Pyöröprismat

Pyöröprismat ovat yleisimmin käytettyjä prismoja. Nämä prismat voidaan asettaa joko itsestään kiinni mitattavan pisteen kohtaan, taikka asettaa prismakehikkoihin. (Kuva 3.). Prismojen lukumäärällä on vaikutus haluttuun mittausetäisyyteen. Esim. yhdellä normaalilla GeoMaxin pyöröprismalla pystytään mittaamaan 3500 metrin etäisyydeltä ja kun kolme prismaa asetetaan prismakehikkoon, niin mittausetäisyys nousee 5300 metriin. Isoon prismakehikkoon (3 \* 3 prismaa) johon on asetettu kaikki yhdeksän prismaa paikalleen, maksimi mittausetäisyys on 10 000 metriä eli 10 km, joka on rajana maapallon horisontaalisen kaarevuuden takia.



Kuva 3. Yksittäinen pyöröprisma tähyskehikolla. (store.geomax-positioning.com)

### 2.2.2 360 Prismat

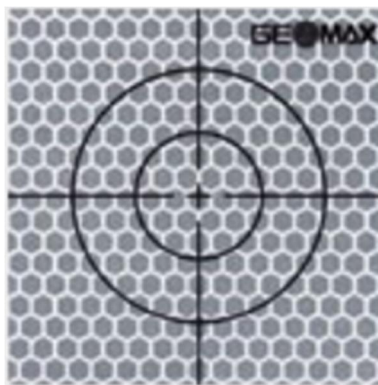
Mittauksissa käytössämme ollut prisma oli Mini 360 prisma (Kuva 4.). Kyseisessä prismassa on takaisinheijastus 360 asteen suuntaan vaakatasossa ja 90 asteen suuntaisesti pystytasossa. 360 asteen prismojen vahvuutena on, että prismaa ei tarvitse kääntää takymetrin suuntaan heijastuksen takaisinsaamiseksi. Käytössämme olleen prisman maksimimittausetäisyydeksi on ilmoitettu 1000 metriä. 360 asteen prismoja on kahta erilaista. Isommalla 360 prismalla saavutetaan parempi etäisyysmittaus, tällöin mittausetäisyys nousee 2000 metriin. Tämä johtuu siitä, että koje pystyy löytämään prisman helpommin, eivätkä mahdolliset pienet tärinät tai heilumiset pääse aiheuttamaan mittaustapahtuman aikana prisman katoamista.



Kuva 4. GeoMax GRZ4 360° Prisma (www.allenprecision.com)

### 2.2.3 Tarratähys ja pinnasta mittaus

Takymetrillä pystytään mittaamaan myös heijastavalta tarratähykseltä, joka on kooltaan 60 \* 60 mm (Kuva 5.). Tarratähkyksen tai pinnasta mittaamisen kanssa menetetään yksi erittäin hyödyllinen laitteen ominaisuus, nimittäin takymetri ei osaa seurata tarratähystä automaattisesti. Tämän vuoksi laite pitää tähystää manuaalisesti kohteeseen, mikä tekee mittauksen työläämmäksi. Tarratähkyksen mittausetäisyys on noin 250 metriä. Takymetri pystyy mittaamaan myös suoraan pinnasta, jolloin automaattinen seuranta ei toimi ja mittauksen etäisyyden maksimiin vaikuttaa materiaalin ja sen pinnan laadun lisäksi pinnan väri. Pinnasta mittauksen maksimietäisyydeksi on ilmoitettu noin 1000m virhearvoineen.



Kuva 5. Geomaxin tarratähys. ([www.geomax-positioning.com](http://www.geomax-positioning.com))

### 2.3 Mittaustapahtuma

Mitattavat kohdat on määritelty layout-kuvan kautta ja läpi käytävät mittauspisteet ovat yleensä tarttujan Z-liikkeen referenssipiste (Kuva 7.) sekä ylin ja alin tartuntakorkeus käsiteltävään kappaleen Y-johteen jokaisen varastopaikan kohdalla. X-johteen paikallaan pitäminen osoittautui hankalaksi, koska sillalla on lasermittalaitteet mittaamassa etäisyyttä heijastinpeilistä ja korjaamassa jatkuvasti X-johteen paikoitusta. X-johteen paikalleen lukitseminen vaatii laserien ja johteen moottorien ohjauksien poiskytkemistä. Tämä toteutetaan mobiilipaneelin (Kuva 8.) avulla. Mittauksia suoritettaessa silta on X-johteen referenssipisteessä. Silta ajetaan X-johteen referenssipisteeseen varmistuaksemme siitä, että sillan molemmat päät ovat kummatkin tarkkaan määritellyssä positiossa ja että silta on suorassa kulmassa X-johteeseen nähden. Kun

takymetrin kanssa aloitetaan mittaus ja robotti on saatu haluttuun positiionsa, pitää takymetrillä tehdä mittauksen aloituspisteen määrittäminen ja mahdollinen X-johteiden korkeuseron määrittäminen. Tämä tapahtuu suorittamalla uudelle työprojektille geodeettinen mittaus pisteestä pisteeseen, joka tapahtuu ajamalla rivin ensimmäisen varastopaikan Y-positioniin ja mittaamalla pisteen koordinaatit, jonka jälkeen tehdään toinen pisteenmittaus rivin viimeiselle varastopaikalle. Mittauksessa on käytetty Z-liikkeen referenssipositiota, joka on tarttujan yläasento. Tällä tavoin pystytään mahdollisimman tarkkaan näkemään X-johteen mahdolliset korkeuserot, jotka ovat säädettävissä jalkojen korkeutta muuttamalla.



Kuva 6. MBR 700 sarjan portaalirobotti. Kuvassa on havainnollistettu teoreettisesti takymetrin sijainti mittaustapahtuman aikana, jossa robotti on referenssipisteessään. Geodeettiset mittaukset tehdään pisteessä 1 ja 2, joiden perusteella takymetri laskee Y-akselin matkan.



Kuva 7. MBR 800+ sarjan robotin Z-liike referenssimerkeillään.



Kuva 8. Bosch Rexrothin mobiilipaneeli

### 2.3.1 Mittatapahtuman vaikeudet

Mittausta on vaikea suorittaa, jos tuotanto on käynnissä. Mittalaitteen mittaustarkkuus kärsii, jos se on sijoitettu liian lähelle prismaa. Siksi suuressa osassa mittaustapahtumia varastoa pitää tyhjentää. Tämä taas tekee mittauksen toteuttamisesta asiakkaan toiveiden mukaisesti yleensä kohtuullisen hankalaa, koska asiakas oletettavasti haluaa tuotannon pysyvän käynnissä. Ja jokaisen tuotannon pysäytyksen kohdalla asiakkaalle tulee niin sanotusti ”rahallista menetystä”.



### 3 VÄÄNTYMÄT

Portaalirobotin vääntymät ovat summa erinäisistä tekijöistä, joita ovat muun muassa sovellus, johon laitetta käytetään, rakenteelliset virheet, fysiikan lait ja näistä aiheutuvat virheet. Automaattisessa kappaleenkäsittelyssä käytetään erilaisia robotteja, joiden sovelluksia on esitelty kappaleessa 1. Niiden rakenne ja rakenteellinen jäykkyys poikkeavat toisistaan huomattavasti.

#### 3.1 Mekaanisen rakenteen aiheuttamat vääntymät

Tarttujan ja Y-liikkeen rakenteesta johtuen, siltaan kohdistuu rakenteellista vääntymää. Tarttujan liikkuaessa Y-akselin suuntaisesti eri positioihin, aiheutuu vääntymiä siltaan, jota käsitellään kappaleessa 3.3 tarkemmin. Sillat ovat rakenteeltaan jäykempiä päistä, joissa on X-akselin moottorit. Siltojen päässä olevat päätylevyt jäykistävät rakennetta aiheuttamalla vastakkaisen voiman taipumalle. Siltojen pituudet voivat vaihdella huomattavasti riippuen kohteesta ja portaalirobotin käyttötarkoituksesta. Lyhyemmillä silloilla toteutettu järjestelmä tulee vääntymään vähemmän, sillan lyhyen jännevälän vuoksi.

##### 3.1.1 Vääntymien ennaltaehkäisy suunnittelussa

Suunnittelun kannalta taipumat ovat ongelmallisia. Huomioon pitää ottaa tarttujan lisäksi myös mahdolliset kappaleet, jota tullaan käsittelemään, sekä ajan mittaan kulumat. Pitkällä jännevälillä olevat sillat tilataan ylöspäin esijännitettynä, tällä osittain kompensoiden mahdollista sillan roikkumista.

## 3.2 Kokoonpanossa aiheutuneet vääntymät

Robotteja ja siltoja koottaessa on mahdollista, että osien pienet heitot ja asennusvirheet, kuten kiristysmomenttien eroavaisuudet, aiheuttavat vääntymiä. Hyvänä esimerkkinä on tarttujan telipyörien viallisuus, joka näkyy myöhemmin näytettävässä kuvaajassa, kun tarttuja on alimmassa poimintakorkeudessaan (Kuvaaja 3.). Tässä tapauksessa telipyörästä toisen renkaan laakeri oli asennusvaiheessa asettunut huonosti paikoilleen, mikä aiheutti huomattavan poikkeaman muusta kuvaajasta.

### 3.2.1 Kokoonpanon vaikutus vääntymiin

Kokoonpanon vaikutus vääntymiin on osaltaan erittäin suuressa roolissa, kuten edellisessä alaotsikossa kerroin. Jotta mahdolliset vääntymät saadaan minimoitua, tulee kokoonpanovaiheessa olla tarkkaavainen ja huolehtia esimerkiksi siitä, että osat ovat oikeilla kohdillaan ja kalibroitu oikein, jos mekaanista kalibrointia pystytään osalle tekemään. Oikeat kiristysmomentit ovat olennaisen tärkeä osa mahdollisten vääntymien pienentämistä, koska liian suuri kiristysmomentti aiheuttaa osiin ylimääräistä jännitystä.

### 3.2.2 Valmistusvirheet

Joissain tapauksissa tilattu osa saattaa olla virheellisesti koneistettu, jolloin osaa joudutaan korjaamaan itse omassa koneistamossa tai tilaamaan uusi osa. Osien valmistusvirheet voivat aiheuttaa erittäin suuren vääntymän ja mahdollisesti robotin rikkoontumisen tietyn aikavälin jälkeen. Jos valmistusvirheestä kohdistuu esim. venyttävä voima kappaleeseen, se heikentää kappaleen rakennetta ja altistaa kappaleen vioittumiselle.

### 3.3 Fyysisen rasituksen aiheuttamat vääntymät

Fyysiset rasitukset aiheuttavat poikkeamia robotilla hyvinkin helposti. Näitä pystytään ennaltaehkäisemään kehitystyöllä, joka keskittyy osaltaan kulumien huoltotarpeiden kartoittamiseen ja parannussuunnitteluun. Koska mekaanisten osien kulumista ei pysty poistamaan järjestelmästä, on suunnittelun kehityksellä suuri rooli kehitellä uusia ratkaisuja osien kestävyuden parantamiseksi. Kehityksessä olevat osat testataan huolellisesti ennen itse tilauksiin integroimista. Tällä tavoin pystytään aina tarjoamaan mahdollisimman toimintavarmoja laitteita ja minimoimaan paikoitustarkkuuden muutokset ajan mittaan, kun osat kulumat.

#### 3.3.1 Kuorma

Käsiteltävien kappaleiden massa aiheuttaa tarttujassa muutoksia fysiikan lakien mukaisesti. Esimerkiksi kuvassa 12. näkyy, miten MBR 700+ -robotilla oleva kuorma aiheuttaa fysiikan lakien mukaisesti vääntymää tarttujassa.

MBR 800+ robottien tarttujien mallit ovat kahden siltapalkin takia tukevammat, mutta myös näihin pätee sama ilmiö. Tarttujan pystyliikkeen liukuvan reunan puolella rakenne pyrkii vääntämään tarttujaa samalla tavalla kuin MBR 700+ -robotilla. Kuva 12.

#### 3.3.2 Liike ja värähtely

Robotin liikkeet ja liikkeestä johtuva värähtely aiheuttavat rasitusta mekaanisille osille (kuten telipyörät jne.). Tämä johtaa materiaalin venymisiin ja mitoitusepätkäkköisyyksien ilmenemisiin järjestelmässä. Näitä vääntymiä on erittäin hankala pyrkiä ennaltaehkäisevästi poistamaan, koska jokainen järjestelmä kuluu omalla tavallaan ja on vahvasti yhteydessä nopeuden ja käsiteltävän tuotteen massan kanssa.

### 3.4 Virhetilanteiden aiheuttamat vääntymät

Vääntymiä aiheuttavia virhetilanteita ovat yleensä hätä-seis -toiminnot ja äkilliset turvapysäytykset. Nämä saattavat johtua ulkopuolisten lähteiden antamasta signaalista, rikkoutuneesta laitteesta turvaväylässä tai operaattorien huolimattomuudesta. Hätä-seis -nappia painettaessa, järjestelmä pyrkii pysähtymään mahdollisimman nopeasti. Tämä aiheuttaa suurta mekaanista rasitusta järjestelmälle, jonka tuloksena portaalirobottiin saattaa ilmetä vääntymiä, varsinkin jos portaalirobotilla on maksimipainoinen pino kyydissä.

#### 3.4.1 Iskut ja törmäykset

Myös törmäykset voivat aiheuttaa virhetilanteita. Törmäykset ovat vakava virhe järjestelmälle ja vaikuttavat useasti portaalirobotin toimintaan. Törmäykset voivat pahimmillaan aiheuttaa vakavia vaurioita itse tarttujaan sekä pystyliikkeen kelkkaan. Jos esim. TyrePick-sovelluksissa tarttuja jostain tuntemattomasta syystä pääsee törmäämään kuljettimeen tai lattiaan, voi koko tarttujan pystyliikkeen runko vääntyä ja alkaa toimia väärin – lavat aukeavat väärin ja ovat vääntyneet, mikä aiheuttaa renkaiden puotamista tarttujan kyydistä. Tästä taas seuraa pahimmillaan pinojen kaatumisia. MultiPick-sovellusten törmäykset ovat samalla tavalla vakavia, vaikkakin MultiPick-tarttuja on rakennettu kehikon sisään, mikä suojaa sitä törmäyksiltä. Suuri riski MultiPick-sovelluksella on tarttujan kulmaohjurien törmäminen lattiaan ja lattialla oleviin tuoteisiin. Tarttujan kulmaohjurien toiminta on toteutettu paineilmasylintereillä. Kun tarttujan kulmaohjurit ovat ulkona MultiPick-tarttujasovelluksen kehikosta ja jos ne törmäävät maahan, ne vääntyvät helposti. Tämä virhe voi johtua ohjelmallisesta virheestä tai pneumatiikkajärjestelmän riittämättömästä kapasiteetista. MultiPick-tarttujan vaurioituneet kulmaohjurit saattavat aiheuttaa laatikoiden jumiintumisia tarttujaan ja väärin pinoutumista. Virhetilanteista johtuen on myös mahdollista, että robotit saattavat törmätä toisiinsa. Kahden robotin toisiinsa törmäminen tai pysäyttimiin törmäminen roboteilla on hoidettu puskuvyynyillä, jotka suojaavat suurimmalta mekaaniselta voimalta vaimentaen törmäyksestä syntyvää energiaa.

### 3.5 Kompensointi

Mittausvirheiden kompensointi mittaustulosten perusteella toteutetaan yksinkertaisesti. Robotilta saaduista koordinaatiston arvoista akseleilla X,Y ja Z vähennetään tai lisätään mittatuloksena saadut koordinaatit, ja tulokset pyöristetään lähimpään millin kymmenykseen. Esim. (Taulukot 4, 5, 6, 7, 8 ja 9.). Näistä laskettu absoluuttinen positio eroaa muutamia millijä lasketusta nollapisteestä. Kuten näemme, erotuksella verrattuna absoluuttiseen positioon, joka on kalibroitu samalle koordinaatistolle takymetrin kanssa, tulee paikoitellen suuriakin heittoja.

#### 3.5.1 Laskenta

Paikoituksen korjauksen laskenta suoritetaan erotus tai summa tyyllillä. Mitattujen pisteiden välisen matkan paikoitustarkkuus lasketaan kaavalla;

$$\frac{b - a}{l_2 - l_1} = x/mm$$

jossa b ja a ovat mittatuloksen koordinaatit samalla akselilla eri positiossa. Näiden erotus jaetaan näiden välisellä etäisyydellä. Tulokseksi saadaan täten lineaarinen suora joka osoittaa poikkeamaa per millimetri pisteiden a ja b välillä.

Parempaan mittatarkkuuteen päästään, kun käytetään polynomista yhtälöä. Riittävään tarkkuuteen pääsemiseksi on monenlaisia mielipiteitä, koska mitä suuremman asteen yhtälö, sitä lähempänä tulos on mitattua tulosta. Toisen asteen yhtälö antaa käyräksi paraabelin, kolmannen asteen polynomi käyrän, jossa on kaksi käännepistettä ja niin edelleen. Olen esimerkiksi asettanut (Kuvaaja 1.) näkyviin toisen asteen ja kolmannen asteen polynomisen trendiviivan, sekä lineaarisen viivan kuvaajaan 7.

$$y = ax^2 + bx + c$$

Toisen asteen polynominen funktio

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

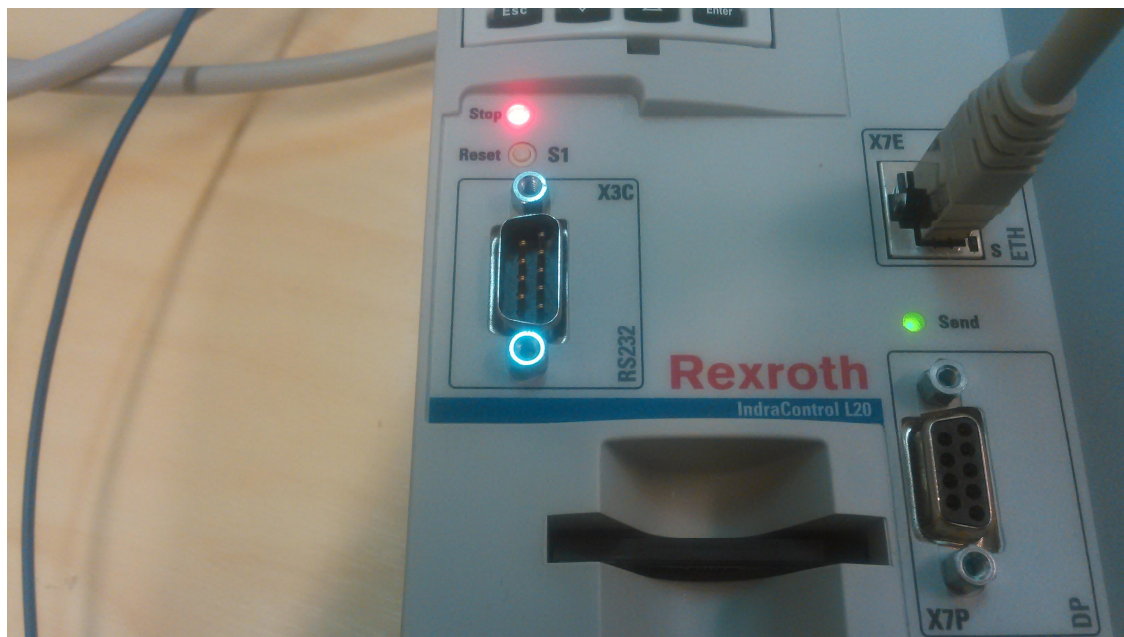
Kolmannen asteen polynominen funktio

## 4 MITTALAITTEEN KYTKEMINEN AUTOMAATIOON

Mittalaite kytketään automaatiojärjestelmään takymetrissä olevan RS-232-liitännän kautta, ohjauksen järjestelyyn käytetään sopivaa muunninta, koska kaikissa tapauksissa ei suora RS-232-liitäntä ole mahdollinen. Mittalaite pystytään kytkemään robotin itsensä mitattavaksi lattiakaapissa sijaitsevan PLC:n kautta soluohjaimelle, mikäli robotille on kirjoitettu oikeat kommunikointikäskyt, tai vaihtoehtoisesti suoraan soluohjaimen ohjattavaksi. Soluohjain tallentaa mittausten perusteella tulevat tiedot suoraan korjaustaulukkoon.

### 4.1 Kytkeä lattiakaapin PLC:hen

Mittalaite voidaan kytkeä lattiakaapissa sijaitsevaan Bosch Rexrothin L40 logiikkaan, joko RS-232-väylän kautta taikka Ethernet-verkonliitynnän kautta. Bosch Rexrothilta tuloillaan olevassa logiikkaversiossa IndraControl L25, RS-232 (Kuva 11.) portti tulee katoamaan, koska RS-232-väylä on vanhentunutta tekniikkaa ja sen käyttö on teollisuudessa vähentynyt. Profibus DP -porttia käytettäessä pitää käyttää väyläadaptereita kommunikointiin, koska robottitakymetrillä on ainoastaan yksi fyysinen liitäntä, joka käyttää RS-232-protokollaa. Uudessa logiikkaversiossa ainoana kytkentäväylinä tulevat olemaan ohjelmointiin tarkoitetun Ethernet-väylän lisäksi kaksi kappaletta MultiEthernet-portteja (Kuva 11.).



Kuva 10. Työpisteelläni käytössä ollut Bosch Rexrothin L20 logiikka, kuvassa näkyvät Ethernet, RS-232 ja Profibus DP -liitännät.



Kuva 11. Bosch Rexrothin päivitetty logiikkaversio L25, kuvassa oikeanpuoleiset RJ45-liittimet ovat MultiEthernet-liittimiä. ([www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com))

## 4.2 Ohjelmoitavan logiikan ja mittalaitteen välinen kommunikointi

Yhteys takymetrille rakennetaan RS-232 Ethernet-muuntimen avulla. Muuntimeksi on valittu Moxa NPort 5110. Laitteelle asetetaan IP-osoite laitteen mukana tulleella ohjelmistolla (NPort Administrator), jotta konfiguraatioon pääsee käsiksi selaimen kautta. Valittu IP-osoite on jokaisen projektin kohdalla yksilöllinen, koska yhteyden toimivuuden kannalta on tärkeää, että käytettävä laite on samassa IP-avaruudessa kuin itse robotti.

RS-232-yhteyden nopeuden, sanomarakenteen ja tarkistusbittien ja stop-bittien määrän pystyy itse määrittelemään takymetrille ja Moxan NPortille. Tämä helpottaa yhteyden luomista näiden laitteiden välillä.

Keskustelu PLC:tä Moxalle tapahtuu Ethernetin yli TCP (Transmission Control Protocol) viestinä. (TCP-viestin sanomarakenne. Taulukko 2.). Viestin Moxan NPort muuttaa RS-232-viestiksi. (RS-232 sanomarakenne esimerkki. Taulukko 3.). Tämän Moxa lähettää edelleen takymetrille. Takymetri vastaa takaisin RS232-viestillä, ja Moxa muuttaa sen edelleen TCP-muotoon ja lähettää sen ethernetin yli logiikalle. Sovelluksessa olisi myös mahdollista käyttää UDP (User Datagram Protocol) protokollan rakennetta (UDP-viestin sanomarakenne, Taulukko 4.), mutta sovelluksen tarkkuusvaatimusten kannalta ja tiedon perille menemisen kannalta on tarkoituksenmukaisempaa käyttää TCP-protokollaa.

TCP-protokollan käyttöä varten logiikan valmistajalta löytyi suoraan kirjasto yhteyden muodostamiseksi Moxan NPortin ja Rexrothin logiikoiden välille.

## 4.3 UDP- ja TCP- protokollat

Kummatkin tutkittavista protokollista käyttävät samankaltaista yhteyttä ja vastaanottavat IP-osoitteen sekä portin numeron. UDP-yhteys ei kuitenkaan muodosta yhteyttä palvelimeen, toisin kuin TCP. Kummatkin protokollat pystyvät lähettämään ja vastaanottamaan dataa merkkijonoina, sekä tietävät portin ja osoitteen, josta viesti on saapunut.



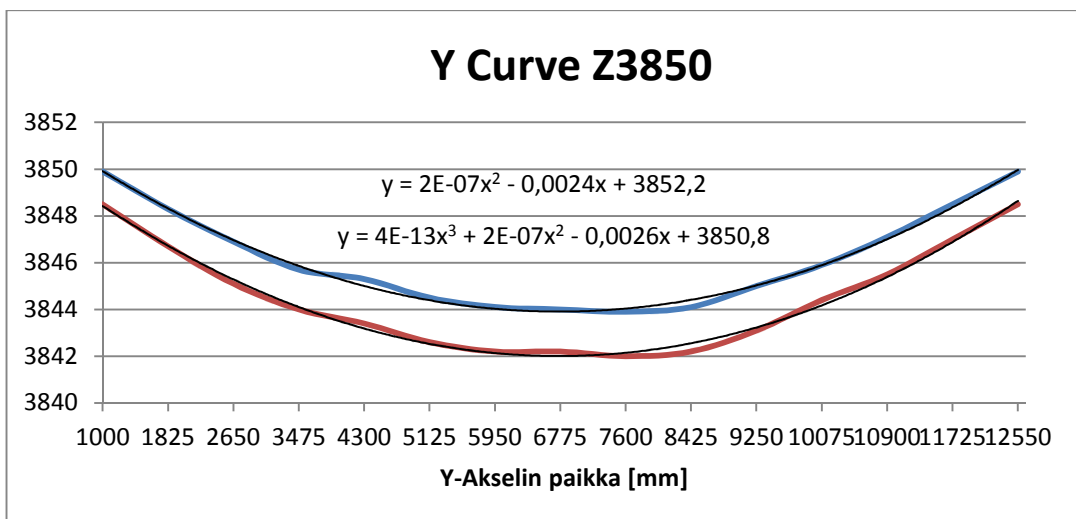
Tiedonsiirroiltaan protokollat eriävät siten, että UDP lähettää datagram viestejä ja niiden saapumista ei valvota erikseen (Datagram viesti sisältää osoitteen ja portin ja lähetettävän datan, Taulukko 4.). Tämän takia UDP-protokolla olisi käytössä nopeampi kuin TCP tiedonsiirrollisessa nopeudessa, mutta tekee protokollasta huomattavasti epäluotettavamman kuin TCP. Tämän lisäksi UDP-protokolla ei tiedosta onko yhteys vielä olemassa, kun taas TCP-protokollalla yhteyden olemassaolon pystyy havaitsemaan vaivattomasti.

Koska UDP-protokolla ei käsitä itsessään yhteyden olemassaolon tarkistusta, pitäisi UDP:lle rakentaa PLC:n koodiin oma tarkistuskoodi, joka tarkistaa yhteyden toimivuuden. Samaiseen ohjelmaan voidaan myös kirjoittaa osio, joka tarkistaa viestien perillepääsyn. TCP-protokollalla on huomattava etu tässä, koska TCP:llä itse havaitsee suoraan, milloin yhteys on muodostettuna ja milloin on katkaistu.

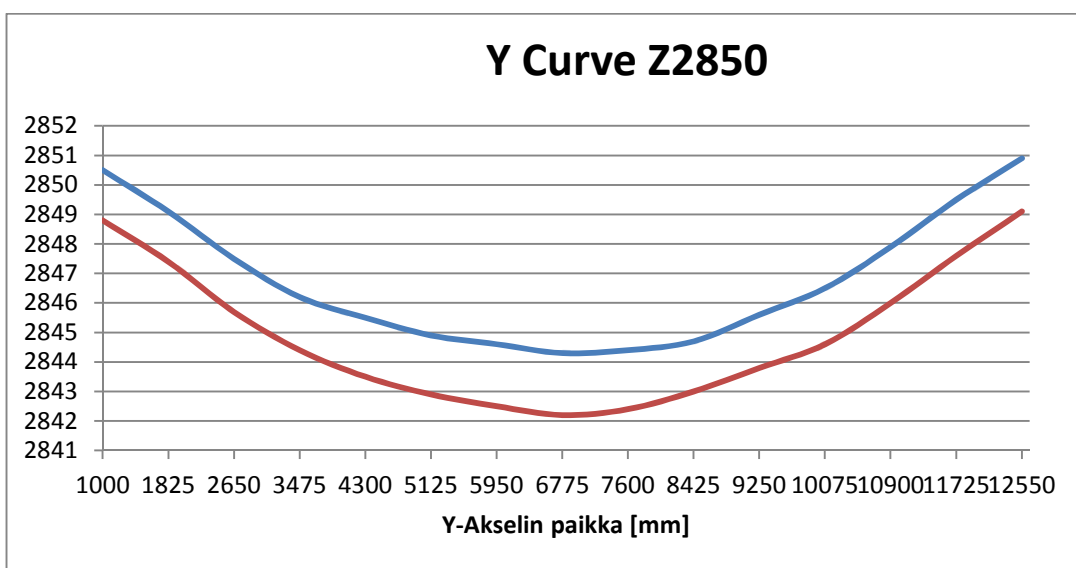
Täten voidaan arvioida, ettei UDP-protokollan käyttö kaikissa sovellustyyeissä ole järkevää, vaikka UDP-protokollana olisi tiedonsiirrollisesti nopeampi kuin TCP-protokolla. UDP-protokolla pystyy lähettämään saman datan paljon nopeammin, mutta yhteyden rakentaminen ja viestin perille menemisen tarkastaminen puuttuvat verrattuna TCP:hen. TCP on taas monimutkaisempi protokollarakenteeltaan kuin UDP. Siksi työssä käytettyjen protokollamuuntimien toimivuus olisi hyvä tarkistaa. UDP:n hyvä puoli verrattuna TCP-protokollaan on, että laite pystyy pysymään odottamaan viestiä pitkän aikaa ja on mahdollista vastaanottaa viestejä useista eri lähteistä.

#### 4.4 Mittaustulokset

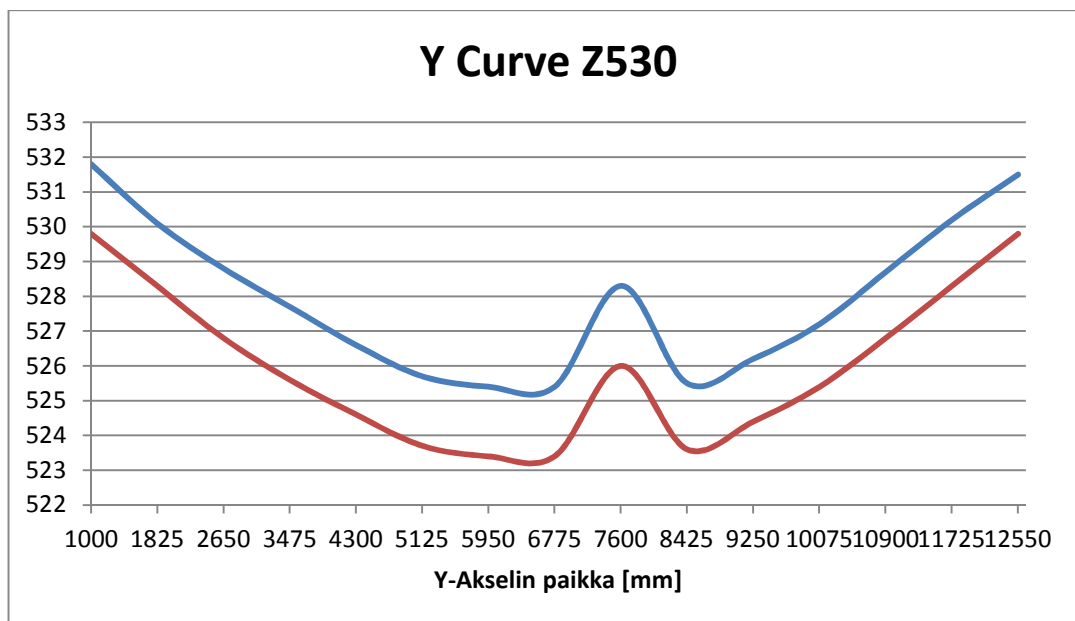
Seuraavat mittaukset ovat suoritettu Ulvilassa Cimcorpin tiloissa robotin ollessa testi-alueellaan. Kyseessä on GT-buffer alueella toimiva robotti. Kuvaajat ovat robottitaky-metrin tallentamasta datasta. (Kuvaajia erään GT-Robotin sillan vääntymistä eri Z-akselin korkeuksilla).



Kuvaaja 1. Robotin vääntymä Z-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 3850 mm. Kuvaajaan on lisätty toisen (ylempi) ja kolmannen asteen (alempi) polynomiset trendikäyrät.

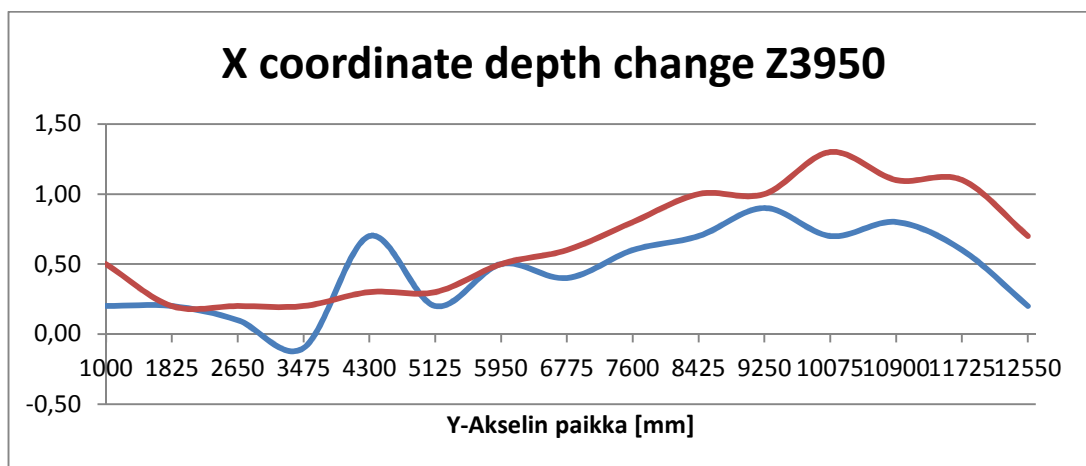


Kuvaaja 2. Robotin vääntymä Z-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 2850 mm.

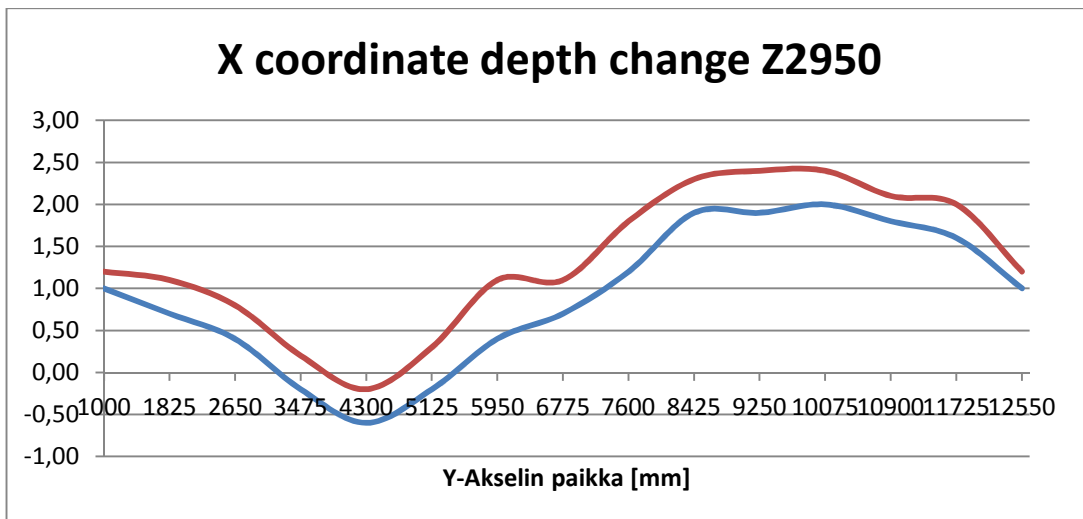


Kuvaaja 3. Robotin vääntymä Z-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 530 mm.

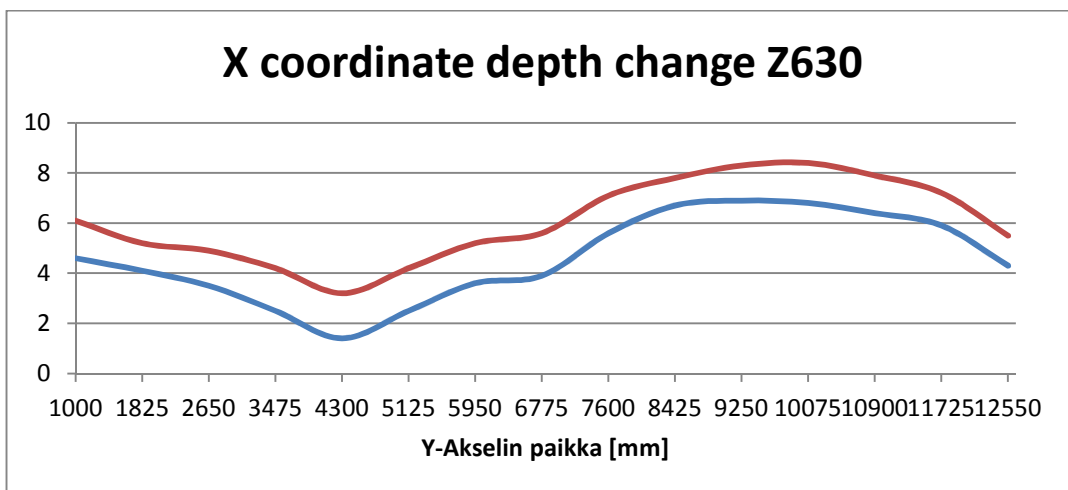
Kuvaajissa sininen graafi on toteutettu ilman kuormaa ja punaruskea järjestelmälle määritellyn maksimikuorman kanssa. Koska kyseessä on paikoitustarkkuuden parantamiseen pyrkivä mittaustapahtuma, pitää ottaa myös muut akselit ja liikkeet huomioon. (Kuvaajia erään GT-Robotin vääntymistä eri Z-akselin korkeuksilla – X-akselin suuntainen syvyyden muutos.)



Kuvaaja 4. Robotin vääntymä X-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 3950 mm.

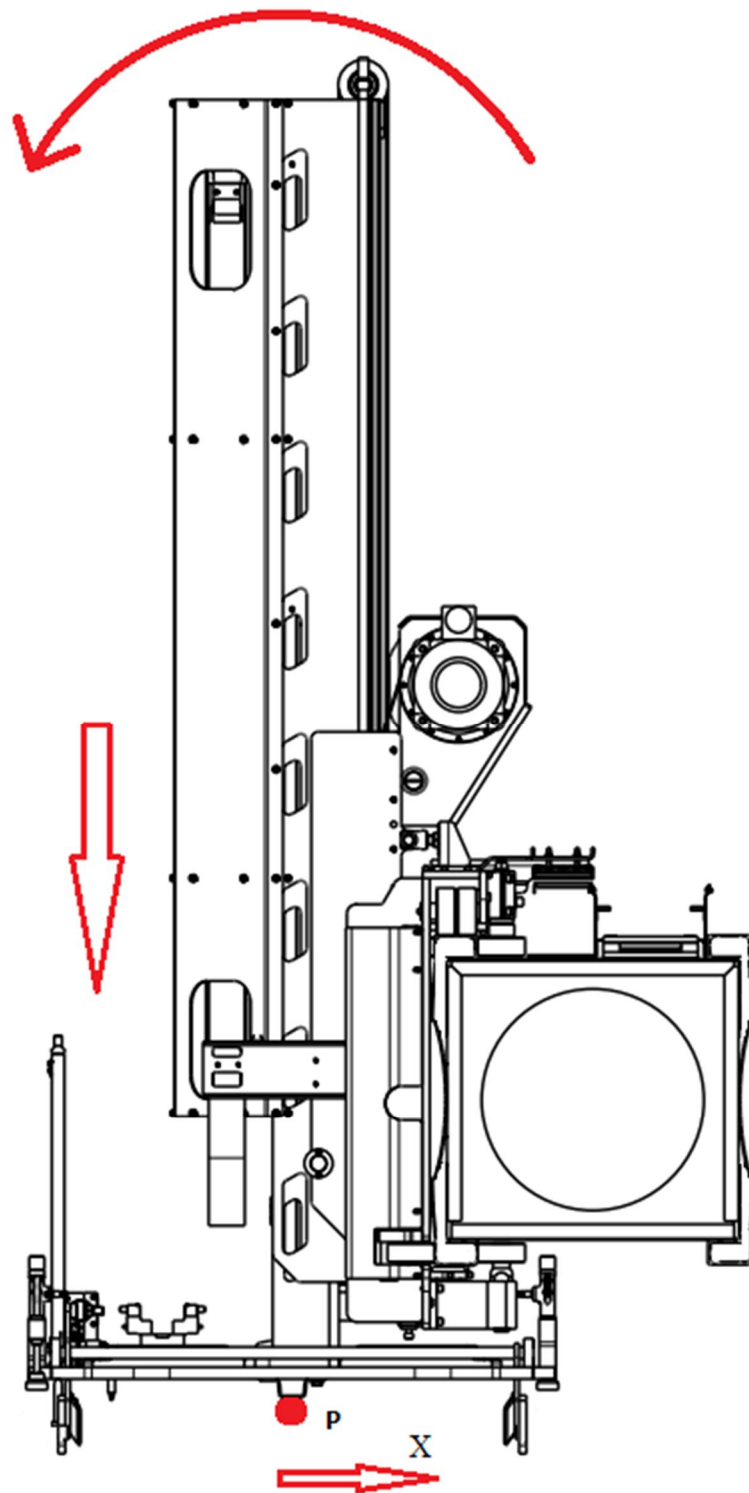


Kuvaaja 5. Robotin vääntymä X-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 2950 mm.



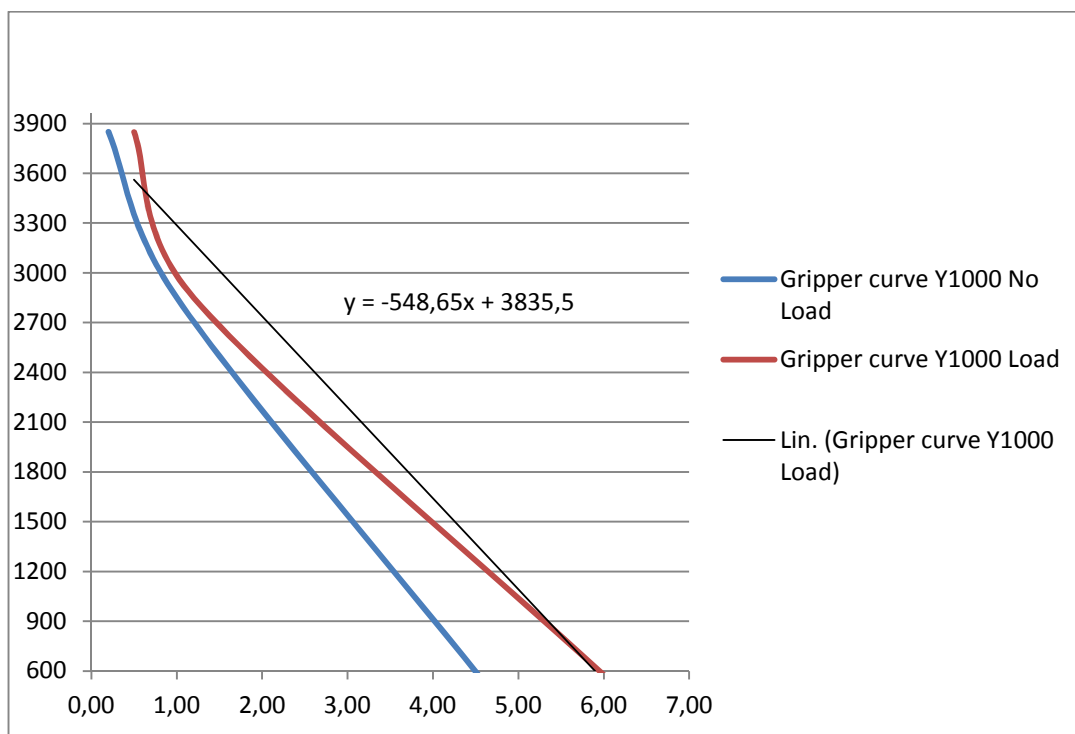
Kuvaaja 6. Robotin vääntymä X-akselin suuntaisesti Y-akselin matkalla, kun Z-akseli on korkeudella 630 mm.

Ja viimeisimpänä tarttujan vääntymä pystyliikkeessä. Tämän vääntymän aiheuttaa portaalirobotin rakenne, jossa fysiikan lakien mukaisesti: kun painopiste P siirtyy alas-päin, siltaan kohdistuu pystyliikkeen kautta voima, joka vääntää tarttujaa X-akselin suuntaisesti kohti sillan keskilinjaa. (Kuva. 12.)

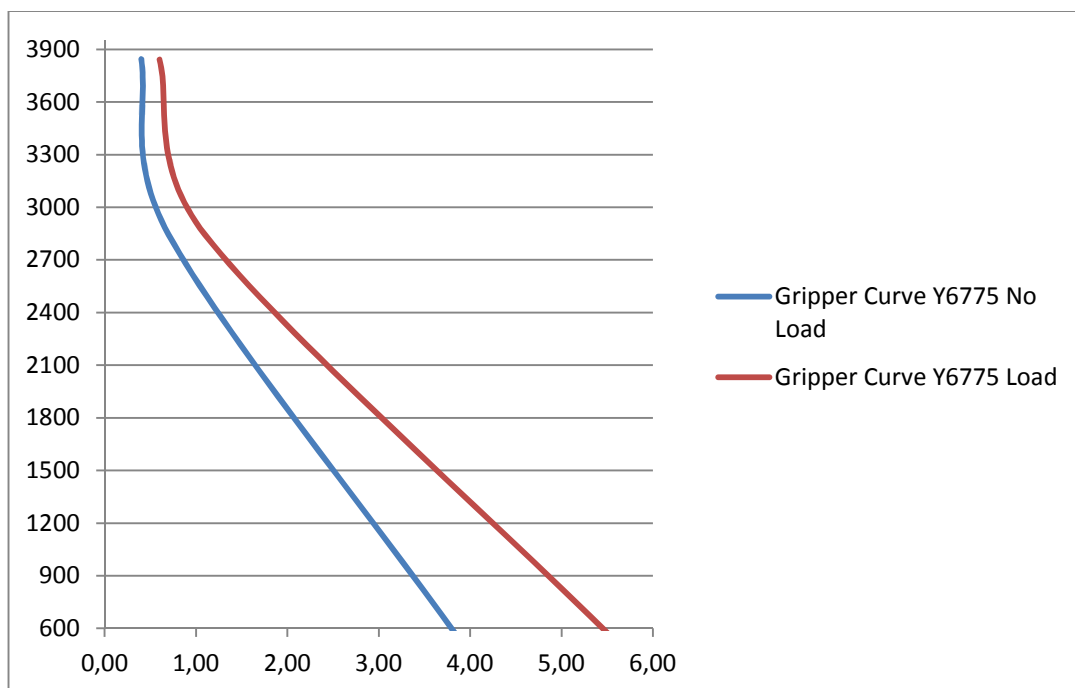


Kuva 12. Pystymoduulin päätykuva, joka havainnollistaa pystyliikkeen vääntymää painopisteen P laskiessa alaspäin.

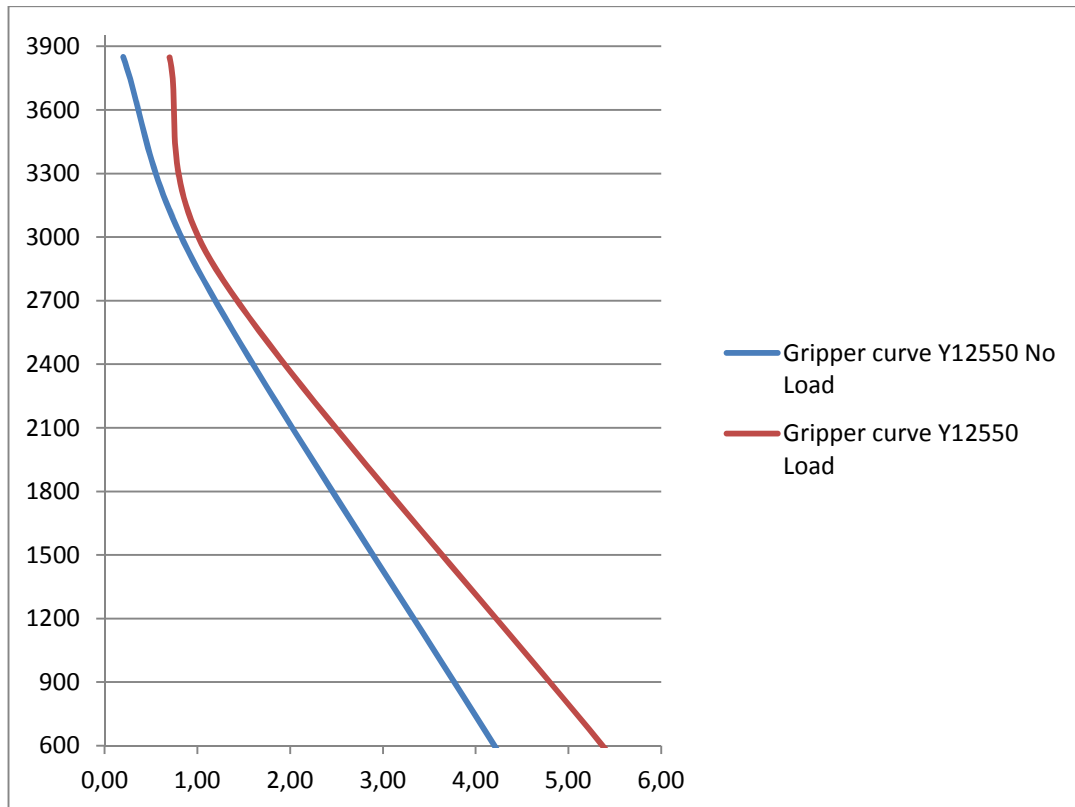
(Kuvaaja eräästä GT-Robotin pystyliikkeen vääntymistä eri Y-akselin positioidissa)



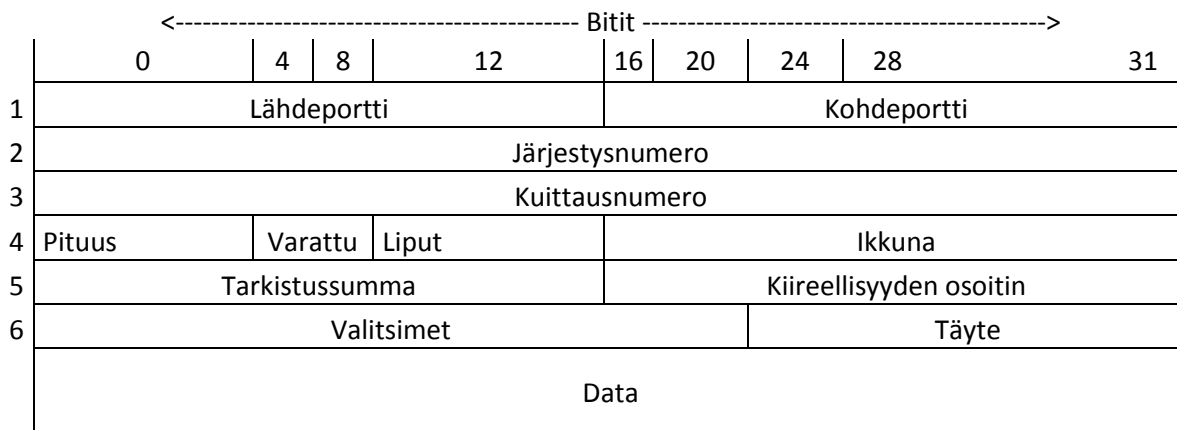
Kuvaaja 7. Z-akselin vääntymä X-akselin suuntaan eri Y-akselin kohdissa. Kohdassa Y 1000 mm. Kuvaajaan on lisätty lineaarinen trendiviiva.



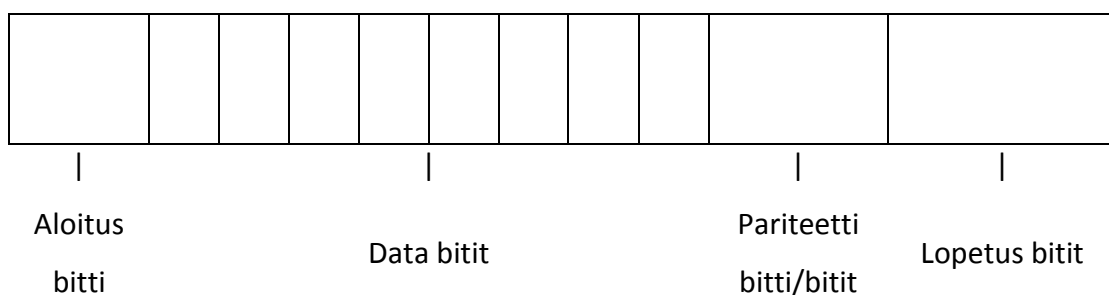
Kuvaaja 8. Z-akselin vääntymä X-akselin suuntaan eri Y-akselin kohdissa. Kohdassa Y 6775 mm.



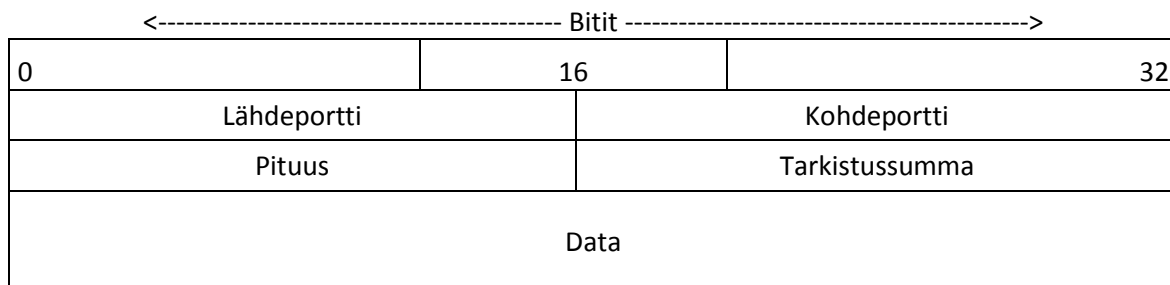
Kuvaaja 9. Z-akselin vääntymä X-akselin suuntaan eri Y-akselin kohdissa. Kohdassa Y 12550 mm.



TCP viestin sanomarakenne (Taulukko 2.).



RS-232 viestin sanomarakenne (Taulukko 3.).



UDP viestin sanomarakenne (Taulukko 4.).



## 5 LOPPUSANAT

Järjestelmän toteuttamiseksi pitää tehdä hankintoja. Näihin kuuluvat itse takymetri ja liitännälliset osat, Moxa NPort 5110 ja liitäntäkaapelit. Lopulliseen ratkaisuun eri mittausapojen välillä ei ollut vielä päästy vuoden 2014 loppuun mennessä, mikä aiheutti ongelmia lopullisen testauksen kanssa. Koska käytössä on myös useampia toimivia tapoja mitata vääntymiä, takymetrin käyttö tähän tarkoitukseen on kallista. Käytön perusteella mittauksille nähtiin osittaisia ongelmia suorittaa mittauksia asiakkaan tiloissa. Mittaustapahtuman ongelmat pyrittiin poistamaan asiakassuhteiden sekä laadun ylläpitämiseksi projekteissa. Mikäli mittauksia suoritetaan, ne tehdään käyttöönoton tai huoltojen yhteydessä.

Mittaustapahtuman ja kompensoinnin integraation venyessä pitkäksi, suureksi ongelmaksi tuli robottitakymetrin testaus kiinni itse järjestelmässä. Ongelman ratkaisemiseksi tehtiin testejä simuloimalla tietokoneella takymetrin lähettämiä viestejä Moxan NPort 5110:lle ja tarkastelemalla viestien perille menemistä PLC:lle sekä viestien rakennetta. Koska takymetriä ei pysyvästi hankittu osaksi järjestelmän testausta, jäi suurin osa ohjelmallisuudesta testaamatta virallisilla kokoonpanoilla.

Ulvilassa tehdyissä mittauksissa pystyimme osoittamaan sen, että kuormalla ei ole suurta merkitystä GT-Bufferin tarttujan vääntymille.

Projekti oli alusta lähtien erittäin mielenkiintoinen käytössä olleiden laitteiden ansiosta. Laitteisto asetti vaatimukset korkealle ja pakotti harkitsemaan monia asioita eri näkökannoilta. Esimerkkinä mm. TCP-protokollan käyttäminen viestien välitykseen UDP protokollan sijaan.

## LÄHTEET

GeoMax Zoom 80 sarjan manuaali. 2014. Viitattu 9.5.2014  
<http://www.geomax-positioning.com/>

Geolaserin verkkosivut. 2014. Viitattu 20.5.2014.  
<http://www.geolaser.fi/>

GeoMax GRZ4 360 mini – prisma. 2014. Viitattu 24.5.2014  
<http://store.geomax-positioning.com/media/catalog/product/>

GeoMax RS-232 Serial Data Cable. 2014. Viitattu 24.7.2014  
[http://www.tigersupplies.com/Products/RS232-Serial-Data-Cable-Geomax-Zoom-total-stations\\_GEO-760681.aspx](http://www.tigersupplies.com/Products/RS232-Serial-Data-Cable-Geomax-Zoom-total-stations_GEO-760681.aspx)

Anttila, A. 2000. TCP/IP-tekniikka. Helsinki: Helsinki Media. Viitattu 19.8.2014

Valtanen, E. 2012. Tekniikan Taulukkokirja. Genesis-kirjat Oy. Viitattu 20.10.2014

TCP ja UDP protokollat. 2014. Viitattu 5.11.2014  
<http://www.protocols.com/pbook/tcpip2.htm>

RS232 viesti ja rakenne. 2014. Viitattu 10.11.2014  
<http://www.arcelect.com/rs232.htm>

Moxa NPort 5110 manual. 2014. Viitattu 12.11.2014  
[http://www.moxa.com/doc/manual/nport/5100/V1.0/NPort\\_5100\\_Series\\_Users\\_Manual\\_v1.pdf](http://www.moxa.com/doc/manual/nport/5100/V1.0/NPort_5100_Series_Users_Manual_v1.pdf)

Bosch Rexroth IndraControl L40 PLC. 2014. Viitattu 20.12.2014  
<http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=EN&VHist=g97568%2Cg244070&PageID=p150095>

Etäisyyden mittauksen kaavat. 2014. Viitattu 20.12.2014  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_rangefinder](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_rangefinder)