

Touko Silpola

# LIIKKEENOHJAIMEN VERTAILU KAUPALLISIIN VAIHTOEHTOIHIN

Kandidaatintyö  
Automaatiotekniikka  
Tarkastaja: Veli-Pekka Pyrhönen  
Huhtikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Touko Silpola: Liikkeenohjaimen vertailu kaupallisiin vaihtoehtoihin  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Automaatiotekniikka  
Huhtikuu 2022

---

Optofidelity Oy valmistaa maailmanlaajuisesti älylaitteiden testausautomaattioratkaisuja. Testauslaitteet sisältävät tyypillisesti robotiikkaa ja automaattiohjausta. Laitteiden sähkömoottorien ohjaukseen Optofidelityllä on käytössä pitkään kehitetty oma liikkeenohjain Optomotion. Tässä työssä selvitettiin Optofidelityn Optomotion 2ch -liikkeenohjaimelle mahdolliset vaihtoehtoiset liikkeenohjaimet täydentämään Optofidelityn tarpeita ja asiakasvaatimuksia. Vertailuun valikoitui alle 50 VDC:n (volts direct current, voltti vaihtovirta) liikkeenohjaimet Beckhoffilta, Omronilta ja Festolta. National Instrumentsilla ei ollut vertailuun sopivaa liikkeenohjainta.

Työn alussa esitellään liikkeenohjaimiin, moottoreihin ja enkoodereihin liittyvää taustateoriaa, sekä vertailuun mukaan otetut toimittajat ja heidän liikkeenohjaimensa. Tämän jälkeen vertailtiin liikkeenohjainten fyysisiä ominaisuuksia, ympäristön vaatimuksia, soveltuvuuksia eri moottori- ja enkooderityyppeihin, ohjelmointiympäristöjä, hyväksyntöjä, sertifikaatteja, kustannuksia, tukea ja takuuta. Vertailu suoritettiin sähköpostikeskustelun välityksellä liikkeenohjaimien toimittajien kanssa sekä tarkastelemalla tuotteiden datalehtiä. Lopuksi vertailun tulokset koottiin taulukkoon ja laadittiin työn johtopäätös.

Vertailun tuloksena kävi ilmi, että Optofidelityn Optomotion 2ch soveltuu pienillä muutoksilla kaikkiin työssä käsiteltyihin moottori- ja enkooderityyppeihin. Beckhoffin EtherCAT Terminals on erittäin modulaarinen. Beckhoffin valikoimista löytyy monta eri terminaalia eri käyttötarkoituksiin. Tällöin saadaan tarvittavista komponenteista vaadittu kokonaisuus. EtherCAT Terminaalista löytyi lähes kaikki työssä läpikäyty moottori- ja enkooderityypit, paitsi vaihtovirtamoottoria tukeva liikkeenohjain. Beckhoffin lisäksi Festolta löytyi kompakti ja varsin hyvillä ominaisuuksilla varustettu liikkeenohjain mallinimeltään CMMT-ST (motor controller - stepper motor). CMMT-ST:llä voidaan ohjata tasavirta-, harjatonta tasavirta- ja askelmoottoria. Se ei sovellu servo-, vaihto- eikä lineaarimoottoreille. Omronilta valikoitui vertailuun mukaan Omron NX102 prosessori. Työn edetessä huomattiin, että NX102 ei sovellu järkevästi liikkeenohjaimeksi, vaan se on ylemmän tason ohjauslogiikka. Omronilla ei ole lainkaan alle 50 voltin täysiveristä liikkeenohjainta. Muiden vertailukohteiden osalta ei paljastunut mittavia eroja.

Avainsanat: liikkeenohjain, servomoottori, Servo Drive, enkooderi, encoder

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Kandidaatintyön aihe valikoitui nopeasti sen jälkeen, kun aloitin työt Optofidelityllä. Työn eteminen jumitti välillä, mutta muiden tsemppauksella sain työn valmiiksi. Optofidelitylle iso kiitos työn mielenkiintoisesta aiheesta ja Aki Ali-Lekkalalle työn alkuun pääsemiseksi. Kiitos Optofidelityn työka-  
vereille, jotka auttoivat ja mahdollistivat opinnäytetyön tekemisen. Lisäksi kiitos työn ohjaajalle yliopiston puolelta Veli-Pekka Pyrhöselle työhön liittyvästä ohjausavusta.

Tampereella, 14.4.2022

Touko Silpola

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. LIIKKEENOHJAIN .....	2
3. TUTKITTAVAT LIIKKEENOHJAIMET .....	4
3.1 Optofidelity optomotion 2ch .....	4
3.2 Beckhoff EtherCAT Terminals .....	5
3.3 Festo CMMT-ST .....	6
3.4 Omron NX102 CPU .....	7
3.5 National Instruments .....	9
4. LIIKKEENOHJAINTEEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU .....	10
4.1 Ohjaimen kiinnitys ja fyysiset mitat .....	10
4.2 Ympäristön vaatimukset .....	11
4.3 Soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin .....	11
4.4 Ohjelmointiympäristöt .....	14
4.5 Hyväksynnät, sertifikaatit .....	14
4.6 Liikkeenohjaimen käyttöönoton kustannukset .....	14
4.7 Tuotteiden tuki ja takuu .....	14
4.8 Vertailun tulokset .....	16
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	17
6. YHTEENVETO .....	19
7. LÄHTEET .....	20
LIITE A: .....	21

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Feston automaatiojärjestelmän topologia [1]</i> .....	2
<b>Kuva 2.</b>	<i>Optofidelity Optomotion 2ch</i> .....	4
<b>Kuva 3.</b>	<i>Beckhoff liikkeenohjainkokoontalo [5]</i> .....	6
<b>Kuva 4.</b>	<i>Festo Servo Drive CMMT-ST [7]</i> .....	7
<b>Kuva 5.</b>	<i>Omron NX102 CPU [8]</i> .....	8
<b>Kuva 6.</b>	<i>Omron R88D-1SN04H-ECT [9]</i> .....	8
<b>Kuva 7.</b>	<i>Festo Servo drive CMMT-AS [7]</i> .....	13

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

STO	Safe torque off, sähkömoottorin turvapysäytys
IPC	Industrial computer, teollisuustietokone
VDC	Volt direct current, voltia ja tasavirtaa, esimerkiksi 12 VDC
EtherCAT	Beckhoffin kehittämä ethernetpohjainen kenttäväyläjärjestelmä
TwinSAFE	Beckhoffin kehittämä automaation turvallisuusjärjestelmä
I/O	input/output, työn asiayhteydessä tarkoitetaan tulo- ja lähtöportteja, joihin voidaan kytkeä antureita ja toimilaitteita
PNP	Positive negative positive, anturityyppi, joka antaa positiivisen signaalin
NPN	Negative positive negative, anturityyppi, joka antaa negatiivisen signaalin
SS1	Safe stop 1, nopea turvapysäytysfunktio, joka voi aktivoida STO:n
BiSS C	Avoimen lähdekoodin reaaliaikaisen rajapinnan protokolla
SSI	Synchronous-serial interface, enkooderin rajapintatyyppi
NRTL	Nationally Recognized Testing Laboratory, organisaatio, joka sertioi tuotteita Yhdysvaltain markkinoille
EMI	Electromagnetic interference, sähkömagneettinen häiriö
CPU	Central Processing Unit, suoritin tai prosessori, joka suorittaa tietokoneohjelman sisältämiä konekielisiä käskyjä
PLC	Programmable logic controller, ohjelmitava logiikkaohjain
AC moottori	Alternating current, vaihtovirtamoottori
DC moottori	Direct current, tasavirtamoottori
BLDC moottori	Brushless Direct current, harjaton tasavirtamoottori
IPxx	Ingress Protection, IP-luokitusjärjestelmä kertoo sähkölaitteiden ja koteloiden tiiviiden
DIN-kisko	Deutsches Institut für Normung, standardisoitu DIN-kiinnityskisko
UL	Underwriters Laboratories, Palo- ja turvallisuusstandardi Pohjois-Amerikan markkinoille

# 1. JOHDANTO

Optofidelity Oy valmistaa maailmanlaajuisesti älylaitteiden testausautomaattioratkaisuja. Testauslaitteet sisältävät tyypillisesti robotiikkaa ja automaattiohjausta. Laitteiden sähkömoottorien ohjaukseen Optofidelityllä on käytössä pitkään kehitetty oma liikkeenohjain Optomotion. Optomotion on täyttänyt Optofidelityn tarpeet hyvin.

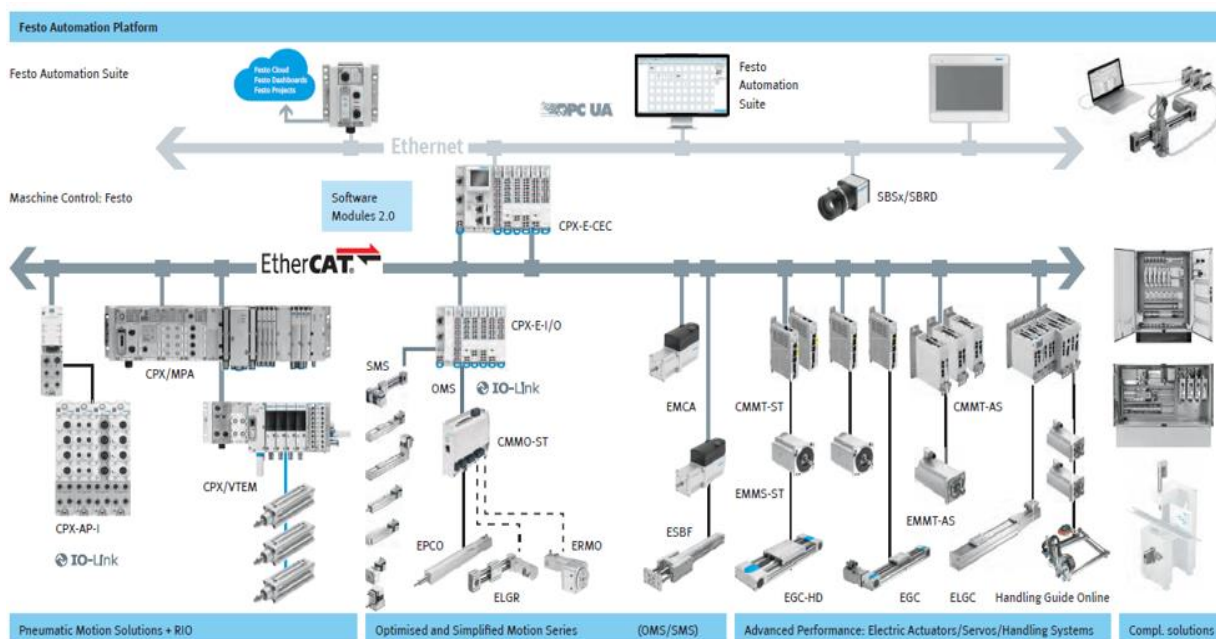
Asiakasvaatimuksien, tuotekehitysresurssien ja hyväksyntäprosessien helpottamiseksi tässä työssä tutkitaan kaupallisia liikkeenohjainvaihtoehtoja Optomotionille. Lisäksi tarkastellaan, kuinka Optomotion vertautuu markkinoilla yleisesti saatavilla oleviin ohjaimiin. Vertailu suoritettiin sähköpostikeskustelun välityksellä liikkeenohjaimien toimittajien kanssa sekä tarkastelemalla tuotteiden datalehtiä.

Vertailussa on mukana Optofidelityn liikkeenohjaimen lisäksi ohjaimet Beckhoffilta, Omronilta, Festolta ja National instrumentsilta. Valmistajat valikoituivat Optofidelityn sähkösuunnittelijoiden suosittelusta. Työn tavoitteena on kartoittaa mahdollista liikkeenohjainvaihtoehtoa Optofidelityn tarpeisiin.

Luvussa 2 käsitellään liikkeenohjaimen toimintaperiaatetta ja ohjaimen sovelluskohteita. Luvussa käydään myös läpi erilaiset moottori- ja enkooderityypit, joita liikkeenohjain voi käyttää. Luvussa 3 esitellään eri valmistajien liikkeenohjainmallit, jotka ovat valikoituneet mukaan vertailuun. Luvussa 4 vertaillaan eri liikkeenohjainten ominaisuuksia keskenään. Vertailun kohteita ovat kustannukset, ohjaimen fyysiset mitat ja kiinnitystavat, ympäristön vaatimukset, soveltavuus eri tarkoituksiin, ohjelmointiympäristöt, hyväksynnät, tuet ja takuu. Lopuksi kootaan taulukko vertailun tuloksista. Luvussa 5 on työn johtopäätökset, jossa vertaillaan eri liikkeenohjainten vahvuuksia ja heikkouksia. Lisäksi perustellaan, miksi tietyn valmistajan liikkeenohjain sopisi Optofidelityn tarpeisiin paremmin kuin toisen valmistajan. Luvussa 6 on työn yhteenveto, jossa selostetaan työn lopputulos.

## 2. LIIKKEENOHJAIN

Liikkeenohjaimet ottavat käskyjä vastaan ylemmältä tasolta, esimerkiksi tietokoneelta, ja ne ohjaavat moottoreiden liikettä. Kuvassa 1 on Feston-järjestelmien esimerkkitopologia, jossa on esimerkiksi matalan jännitteen servo-ohjain mallinimeltään CMMT-ST (Motor controller, Stepper motor). Tätä ylempänä on kontrolleri mallinimeltään CPX-E-CEC, josta on yhteys tietokoneeseen. Liikkeenohjain, kontrolleri ja PC yhteydet on yleisesti toteutettu Ethernet -protokollilla, jolloin saadaan toimiva automaatiojärjestelmä, missä on käskyä antavat laitteet, käskyä siirtävät laitteet ja toimilaitteet.



**Kuva 1.** Feston automaatiojärjestelmän topologia [1]

Ohjattava moottorityyppi voi olla muun muassa AC moottori (vaihtovirtamoottori), DC moottori (tasavirtamoottori), BLDC moottori (Brushless DC, harjaton tasavirtamoottori), askelmoottori, lineaarimoottori, servomoottori tai voice coil (puhekela), joka on kelalla ja kestopagneetilla varustettu toimilaite. Syöttäessä tasavirtaa voice coilin se synnyttää sähkömagneettikentän ja toteuttaa lyhyen lineaarisen liikkeen, tyypillisin sovelluskohde on äänikaiuttimen värähtelyosa [2]. Liikkeen-



ohjaimissa voi olla myös turvapysäytys STO (Safe Torque Off), joka on turvapysäytyksen yhteydessä annettava elektroninen signaali. Ohjaimen vastaanottaessa STO-signaalin katkeaa moottorin vääntö ja liike. Moottorissa voi myös olla jarru, jota liikkeenohjain voi ohjata.

Moottoreissa on myös usein käytössä enkooderi. Enkooderi on moottorien anturointityyppi, joka pystyy erittäin tarkkaan paikkamääritykseen [2]. Moottorin enkoodereita ovat muun muassa absoluuttianturi (absolute encoder) ja pulssianturi (incremental encoder). Pulssianturi tuottaa tietyn määrän pulssia kierrosta kohden ja välittää tiedon liikkeenohjaimelle. Tästä pulssitiedosta voidaan päätellä akselin sijainti, kulma ja kierrosluku. Kun taas absoluuttianturin akselin jokaiselle sijainnille on kohdennettu yksiselitteinen koodi. Jokaisella tarkalla paikalla on oma koodi. [2] Täten absoluuttianturilla varustettua moottoria ei tarvitse käynnistämisen jälkeen ajaa tunnettuun nollapisteeseen absoluuttisen sijainnin määrittämiseksi. Sen sijaan pulssianturilla varustettu moottori täytyy ajaa nollapisteeseen, jotta voidaan aloittaa sijainnin laskeminen pulssien avulla tietyistä vakiosijainnista.

Absoluuttianturin datan siirtomenetelmiä ovat esimerkiksi SSI (Synchronous Serial Interface) ja BiSS-C (Bidirectional Serial/Synchronous). Absoluuttianturi voi olla joko yksikerroksinen (single-turn) tai monikerroksinen (multi-turn) [3]. Pulssianturin tekniikka voi olla kvadratuurienkooderi (quadrature encoder). Kvadratuurienkooderi tuottaa lähtösignaalit A ja B, joiden pulssit on kvadratuurikoodattu. Tämä tarkoittaa sitä, että pulssianturin mittaaman kohteen liikkuessa vakionopeudella ovat A- ja B-aaltomuodot neliön muotoiset ja niiden välissä on 90 asteen vaihe-ero. [4]

Lineaarianturilla (linear encoder) mitataan nimensä mukaisesti lineaarista liikettä. Anturissa on lukupää, joka lukee koko matkalla olevaa mittatankoa. Lineaarianturin yleisempiä sovelluskohteita ovat nostureita, joissa kuormaa siirretään vaunulla nosturin puomin suuntaisesti. [2]

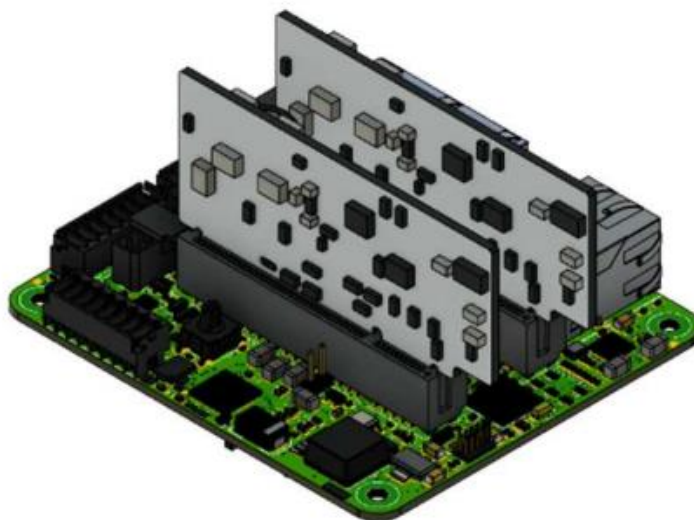
Liikkeenohjain voi fyysisesti kiinnittyä sähkökeskuksen standardisoituun DIN (Deutsches Institut für Normung) -kiskoon tai ruuveilla muualle järjestelmään ja niillä voi olla hieman eri käyttötarkoitukset. Tässä työssä mukaan otettavat ohjaimet ovat käyttöjännitteeltään alle 50 VDC ja teholuokaltaan suurin piirtein samansuuruiset kuin verrokkiohjaimen Optomotionin 2ch:n 6 A per moottori teho.

## 3. TUTKITTAVAT LIIKKEENOHJAIMET

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen kohteena olevat liikkeenohjainmallit, jotka ovat Optofidelity Optomotion 2ch, Beckhoff EtherCAT Terminals, Festo Servo Drive CMMT-ST ja Omron NX102-xxxx CPU. National Instrumentsilla ei ollut vertailuun soveltuvaa liikkeenohjainta.

### 3.1 Optofidelity optomotion 2ch

Optomotion on Optofidelityn suunnittelema ja kehittämä liikkeenohjain. Optomotionia on kahta mallia, toinen on suurikokoinen 7-kanavainen (7ch) ja toinen on uudempi 2-kanavainen (2ch) OFMD2 malli. Optomotion 7ch:aa ei tulla enää käyttämään Optofidelityn uusissa projekteissa. Optomotion 2ch on Optofidelityllä jatkuvassa kehityksessä, käytössä ja kyseistä liikkeenohjainta käsitellään tässä työssä. Optomotionissa on piirilevyn lisäksi pystyssä olevat ohjaus (Drive) -kortit, jotka on kehitetty yhteistyökumppanin kanssa.



*Kuva 2. Optofidelity Optomotion 2ch*

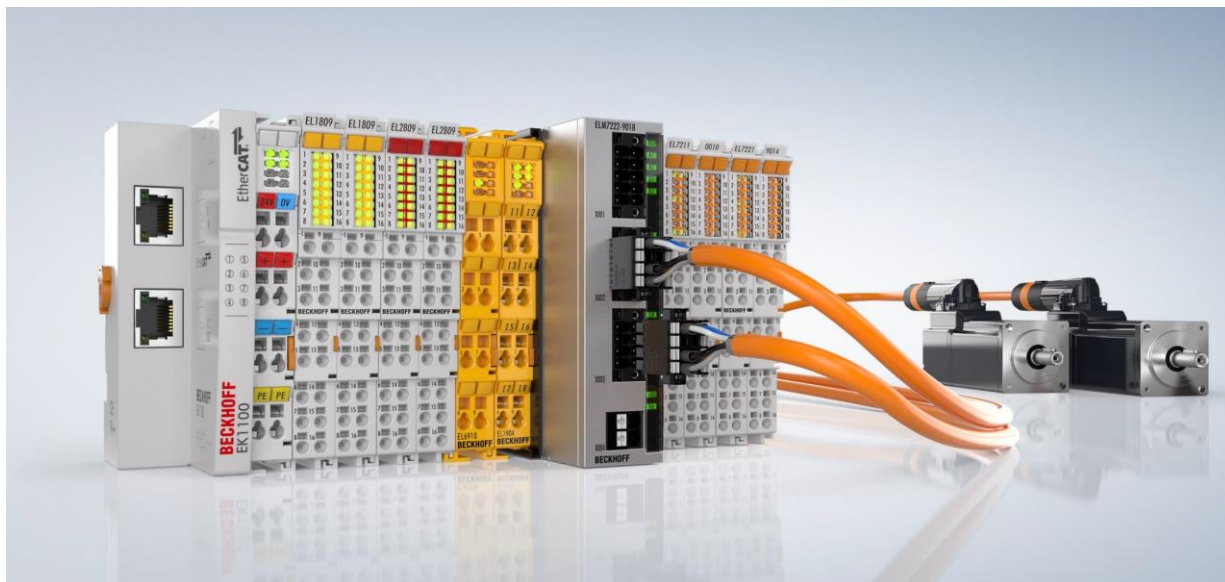
## 3.2 Beckhoff EtherCAT Terminals

Beckhoffilla on erittäin laaja valikoima erilaisia sähkömoottoreita ja ohjaimia. Liikkeenohjaimia ja oheiskomponentteja kutsutaan EtherCAT Terminaaleiksi, joka on Beckhoffin oma tuotenimi. EtherCAT kenttäväylän protokollaa käyttäessä EtherCAT Coupler (EK1xxx ja BK1xx0, x:n kohdalla mahdollinen tarkempi mallinumero) toimii linkkinä Coupleriin liitettäviin EtherCAT Terminaaleihin.

EtherCAT Terminaaleja ovat seuraavat:

- EL1xxx Digital input
- ELX2xxx Digital output
- ELX3xxx Analog input
- ELX4xxx Analog output
- ELX5xxx Position measurement
- ELX6xxx Communication
- EL7xxx/ELM72xx Compact drive technology
- ELX9xxx System
- ELMxxxx Measurement technology
- ELXxxxx Explosion protection
- ELxxxx-0020/-0030 Calibration certificates
- ELxxxx-0090 TwinSAFE SC
- ELx9xx TwinSAFE

Terminaaleista EL7xxx ja uudet voimakkaisiin servomoottoreihin soveltuva ELM72xx voidaan luokitella liikkeenohjaimiksi. Näitä liikkeenohjaimia ohjataan joko teollisuustietokoneen tai tavallisen tietokoneen ethernet-protokollan kautta. Tietokoneessa tulee olla Beckhoffin TwinCAT -ohjelmisto. Lisäksi Beckhoffilla on tarjolla AMI81xx -sarjan kompakti servomoottorin ja liikkeenohjaimen yhdistelmä. Ratkaisussa keskeisintä on tilansäästö, kun liikkeenohjainyksikkö on fyysisesti integroituna moottorin perään. Kyseistä ratkaisua ei tässä työssä käsitellä tämän enempää.



*Kuva 3. Beckhoff EtherCAT Terminals kokoonpano [5]*

Kuvassa 3 terminaalit järjestyksessä vasemmalta oikealle:

- EtherCAT Terminaali EK1100
- 2 kpl EL1809 16-kanavainen digitaalinen sisääntulomoduuli
- 2 kpl EL2809 8-kanavainen digitaalinen ulostulomoduuli
- EL6910 TwinSAFE Logic kommunikointimoduuli
- EL1904 TwinSAFE 4-kanavainen digitaalinen sisääntulomoduuli
- Isoin, hopeinen moduuli on ELM7222-9018 2-kanavainen servomootorin liikkeenohjain
- EL7211-0010 1-kanavainen servomootorin liikkeenohjain
- EL7221-9014 1-kanavainen servomootorin liikkeenohjain STO turvatoiminnolla

### 3.3 Festo CMMT-ST

Festolla on Beckhoffin tavoin laaja teollisuusautomaation tuoteperhe. Feston liikkeenohjaimeksi valittiin kompakti yksikanavainen Servo Drive CMMT-ST (kuva 4), joka on tarkoitettu 24–48 voltin tasajännitteelle.



**Kuva 4.** Festo Servo Drive CMMT-ST [7]

Liikkeenohjainta ohjataan Feston CPX-E Motion Control System -kontrollilla, joka nähdään kuvassa 1. Servo Drivestä on EtherCAT yhteys kontrollille. CPX-E-kontrollista on yhteys esimerkiksi ethernetin kautta PC:ssä olevaan Feston ohjelmistoympäristöön (Festo Automation Suite). CMMT-ST:ää voidaan myös käyttää ilman CPX-E terminaalialueita, käyttäen jotain seuraavista väylärajapintaa hyödyntävää ohjainta: ProfiNet, EtherCat, EthernetIP ja Modbus. Valmiita esimerkkiohjelmia ja ohjelmakirjastoja löytyy ilmaiseksi Feston nettisivuilta esimerkiksi seuraaviin ohjauksiin: Siemens, Rockwell, Beckhoff, Omron, B&R, Python, Visual C++, Mitsubishi, Schneider. [1]

### 3.4 Omron NX102 CPU

Omronilla on runsaasti koneautomaattioratkaisuja. Vertailuun valikoitui NX sarjan NX102-xxxx CPU (kuva 5), jossa on asennettavissa hieman Beckhoffin liikkeenohjaimen tapaan lisäkortteja/moduuleja.



**Kuva 5.** Omron NX102 CPU [8]

Servomootoria käytettäessä NX102 CPU vaatii lisäksi servovahvistimen. Omronilta on saatavilla esimerkiksi 400 W:n (230 V) servovahvistin R88D-1SN04H-ECT (kuva 6).



**Kuva 6.** Omron R88D-1SN04H-ECT [9]

Omronin CPU vaatii lisäksi myös muihin moottorityyppeihin niihin soveltuvat liikkeenohjaimet. Omronin valikoimissa ei ole alle 50 VDC käyttävää liikkeenohjain ja moottoriyhdistelmää. Omronin liikkeenohjaimet eivät myöskään sovellu kolmannen osapuolen moottorin kanssa käytettäviksi. Lähtökohtaisesti Omronin liikkeenohjaimet toimivat ainoastaan saman sarjan Omronin moottoreiden kanssa. [10]

### **3.5 National Instruments**

National Instruments on aikaisemmin valmistanut liikkeenohjainmoduuleja, jotka olivat osa CompactRIO tuoteperhettä. CompactRIO tuoteperhe on teollisuusautomaatioon keskittyvä ohjaus- ja seurantajärjestelmä. National Instruments lopetti vuonna 2020 liikkeenohjaimensa valmistuksen niiden jäädessä hieman vanhanaikaisiksi ja moottoreihin integroitujen liikkeenohjaimien yleistyessä markkinoilla. Näin ollen National Instrumentsilta ei löytynyt vertailuun sopivaa liikkeenohjainta. Kolmannen osapuolen liikkeenohjainta voi kuitenkin käyttää osana CompactRIO tuoteperhettä. [11]

## 4. LIIKKEENOHJAINTEEN OMINAISUUKSIEN VERTAILU

Tässä luvussa esitellään liikkeenohjaimien ominaisuuksia. Kussakin alaluvussa esitetään eri ominaisuus. Alaluvussa 4.1 käsitellään kiinnitysratkaisuja, liikkeenohjaimien fyysistä kokoeroa ja tietoliikennetarkaisuja. Alaluvussa 4.2 käsitellään liikkeenohjaimille asetettuja ympäristön vaatimuksia, joita ovat esimerkiksi lämpötilat ja värinä, jotka ovat Optofidelityn testausroboteissa tärkeimmät ympäristön tekijät. Pääsääntöisesti testausroboteja kuitenkin toimitetaan siisteihin sisäolosuhteisiin kuten laboratorioihin. Alaluvussa 4.3 käsitellään liikkeenohjaimien soveltuvuutta erilaisiin moottorien ja enkooderien tyyppisiin, sekä monipuolisuutta muihin tarpeisiin, joita ovat esimerkiksi I/O signaalien lähdöt ja tulot. Alaluvussa 4.4 käsitellään lyhyesti liikkeenohjainvalmistajien ohjelmointiympäristöjä. Alaluvussa 4.5 tarkastellaan liikkeenohjaimien viranomaishyväksyntöjä. Esimerkiksi toimitettaessa sähköisiä testausjärjestelmiä Yhdysvaltoihin tulee niiden läpäistä maan oma NRTL (OSHA's Nationally Recognized Testing Laboratory) -testausohjelma. Ohjelma edellyttää tuotteilta tietynlaisia hyväksyntöjä. Alaluvussa 4.6 käsitellään kiinteät aloituskustannukset, esimerkiksi liikkeenohjaimen ohjelmiston lisenssin ostaminen. Kappaleessa arvioidaan myös mahdollinen työtuntimäärä, joka tarvitaan liikkeenohjaimen käyttöönottoon ja esimerkiksi uuden liikkeenohjaimen ympärillä olevien mekaanisten osien uudelleensuunnitteluun kuluva aika. Lisäksi alaluvussa tarkastellaan liikkeenohjainten hankintahintaa. Lisäksi otetaan tarkasteluun mukaan muita juoksevia kuluja. Alaluvussa 4.7 tarkastellaan liikkeenohjaimien valmistajien tarjoamaa tukea ja takuuta. Valmistajien kanssa käyty sähköpostikeskustelun taso on yksi tuen mittari. Alaluvussa 4.8. vertailun tulokset on koottu yhteen taulukoon. Taulukolla liikkeenohjaimen ominaisuuksia voidaan verrata keskenään.

### 4.1 Ohjaimen kiinnitys ja fyysiset mitat

Optofidelityn Optomotionin 2ch kiinnittyy neljällä ruuvilla kiinnityskohteeseen. Kehitteillä on parannettu 3D tulostettu kotelo, joka sallisi monipuolisemman ja turvallisemman kiinnityksen. Liikkeenohjaimen mitat ovat 75 mm x 45 mm x 85 mm (L x K x S).

Beckhoffin EL/ELM72xx sarjan liikkeenohjaimet kiinnittyvät fyysisesti väylän liittimen (EtherCAT Coupler) kylkeen. Liikkeenohjaimien ja saman tuoteperheen terminaalien korkeus on 100 mm. Esimerkiksi EL7041 askelmoottorin liikkeenohjaimen mitat ovat 24 mm x 100 mm x 68 mm (L x K x S). Uudet ELM72xx ohjaimet ovat hieman kookkaampia syvyyden puolesta ja ne ovat varustettu



metallikuorilla. EL7041 ja BK1150 väyläliittimen yhteisleveys on 68 mm. Kaikki EtherCAT Terminaalit kiinnittyvät toistensa lisäksi 35 mm DIN kiskoon.

Feston CMMT-ST kiinnittyy kahdella ruuvilla ohjaimen ylä- ja alapuolelta. Lisäksi ohjaimessa on H-kiskokiinnitys. Kompaktin ohjaimen mitat ovat n. 27 mm x 174 mm x 112 mm. Omron NX102 malli kiinnittyy DIN kiskoon. Kuvan 5 NX102 CPU:n mitat ovat 66 mm x 100 mm x 90 mm. Esimerkiksi kylkeen kiinnittyvä I/O lisämoduuli on 12 mm leveä. Lisäksi moduulikokoonpanossa on oltava 6 mm leveä päätepallo.

## 4.2 Ympäristön vaatimukset

Optofidelityn Optomotion 2ch on passiivijäähdytteinen, ohjaimen koteloluokitus on IP00 (IP-tiivisyysluokitus, ei suojausta kosketusta ja kosteutta vastaan) ja ylimääräisillä kotelointiratkaisuilla päästään parhaimmillaan IP41 tasolle (suojaus erittäin pieniä kappaleita vastaan, halkaisija 1 mm tai suurempi ja pystysuoraan tippuvalta vedeltä). Ympäristön käyttölämpötila on 5—55 °C. Täten Optomotion soveltuu hyvin siistin ja kuivan ympäristön laboratoriokäyttöön. Beckhoffin EtherCAT Coupler EK1xxx:n koteloluokitus on IP 20 ja käyttölämpötila on -25–60 °C. Sitä jäähdytetään passiivisesti, mutta lisäosana saatavilla on erillinen tuuletin. Feston CMMT-ST koteloluokitus on IP20, suojausluokka III ja ympäristön käyttölämpötila on 0–50 °C ja jäähdytys on passiivista. Omronin NX102 mallin ympäristön käyttölämpötila on 0–55 ° ja mallin liikkeenohjaimet ovat passiivijäähdytteisiä.

## 4.3 Soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin

Soveltuvuudessa eri käyttötarkoituksiin tutkitaan kyseisen liikkeenohjaimen ohjattavia moottorintyyppisiä, joita on esimerkiksi AC-, DC-, BLDC-, servo- ja askelmoottori. Lisäksi tutkitaan, mitä enkooderin tyyppisiä liikkeenohjain kykenee tulkitsemaan.

### Optofidelityn Optomotion 2ch

Optofidelityn Optomotion 2ch on kaksikanavainen, joka kykenee ohjaamaan maksimissaan kahta moottoria. Ohjain tukee servomoottoria, AC, DC, BLDC, lineaari- ja askelmoottoreita. Pienillä muutoksilla ohjain tukee yksipäätteistä (Single ended quadrature), Biss/SSI enkoodereita ja lisäksi SPI voimasensoria. Ohjaimessa on STO turvapysäytysominaisuus. Lisäksi Optomotion 2ch:ssa on 8 kpl digitaalista I/O liitäntää. Monen muun ohjaimen tapaan ohjaimessa on väylä,

jolla voidaan liittää liikkeenohjaimet toisiinsa. Kaksikanavaisia Optomotioneja saa liitettyä maksimissaan 7 kappaletta sarjaan.

### **Bechhoff terminals**

Beckhoffilla on monta eri liikkeenohjainta ja oheiskomponentteja (terminaalia). Terminaaleja voidaan valita tarpeen mukaan ja liittää EtherCAT Coupler:in jatkeeksi. Beckhoffin 48 VDC liikkeenohjaimet jakautuvat kanavien määrien, virrankeston ja moottorityypin mukaan.

Uudet ELM72xx -sarjan tehokkaat ja kompaktit servomoottorin liikkeenohjaimet käyttävät yhden kaapelin teknologiaa, jossa servomoottoriin liitettäessä yhden kaapelin ja liittimen kautta kulkee moottorin liitännät, paikkatieto ja jarru (kuva 2). Beckhoffin mukaan tässä mallissa suorituskyky (korkeampi syöttövirta moottorille) ja toiminnallisuudet (yhden kaapelin tekniikka ja yhden liitännän etupaneeli) ovat lisääntyneet, kun verrataan EL7xxx versioihin.

EL7xxx sarjan liikkeenohjaimia on servomoottoreille, askelmoottoreille, BLDC moottoreille ja DC moottoreille. Servomoottorien EL72xx ohjain tukee absoluuttienkooderia. Askelmoottorien liikkeenohjainta on myös saatavilla pulssianturointia tukeva mallia. BLDC-liikkeenohjain soveltuu Beckhoffin edustajan mukaan myös Beckhoffin lineaarimoottorille. Ohjain omaa yhden kanavan ja tukee pulssianturointia. DC-moottorin liikkeenohjain on kaksikanavainen, jonka sisääntuloina ovat päätepiste (end position) ja enkooderi. EL37xx terminaalin analogitulot voisi soveltua voiman mittaukseen.

STO on valittavissa EL7xxx sarjan liikkeenohjaimiin, lisäksi osassa liikkeenohjaimissa on muutama input kotirajoja varten. Kuitenkin Beckhoffilla on tarjolla 2–8 paikan sisään- tai ulostulo (I/O) terminaaleja. Lisäksi valikoimissa on erilaisia paikkatiedon käsitteleviä EL5xxx Terminaaleja (position measurement), joista löytyy myös terminaali, joka tukee sekä absoluuttianturin BiSS C:tä, että SSI-protokollaa käyttävää enkooderia.

ELM72xx servomoottorin liikkeenohjaimissa on integroituna TwinSAFE ominaisuus, joka toteuttaa STO/SS1 turvatoiminnallisuuksia. Kyseistä terminaalia voidaan siis käyttää turva ohjaimena. ELM72xx-9018 malli tukee myös muita kattavia Safe Motion -turvatoimintoja. [12]

### **Festo CMMST-ST**

Feston CMMST-ST yksikanavaisen liikkeenohjaimen optimaalisin moottorivaihtoehto on Feston oma askelmoottori, mutta datalehti ja toimittaja lupaa yhteensopivuuden muiden valmistajien

moottorien kanssa. Lisäksi ohjaimella voi ohjata DC-, BLDC- ja askelmoottoria. Sähköpostikeskustelun perusteella voimaa voidaan myös mitata ohjelmallisesti vasteen tullessa vastaan, jolloin tämä nostaa virtaa. CMMT-ST:n isovelji CMMT-AS (Motor controller AC synchronous) (kuva 7) on tarkoitettu AC-servomootoreille. CMMT-AS:aa suositellaan käytettäväksi myös lineaarimootoreille. CMMT-AS:n käyttöjännite on 230 VAC.



*Kuva 7. Festo Servo drive CMMT-AS [13]*

Enkoodereista CMMST-ST liikkeenohjain kykenee tulkitsemaan pulssianturia (single turn), BiSS-C:tä ja SS1:ttä. Sähköpostikeskustelun perusteella CMMST-ST voidaan myös soveltaa käytettäväksi absoluuttianturinkin (multi turn) kanssa. Feston liikkeenohjaimessa on toiminnallisuudet ja liitännät kotirajoille (PNP ja NPN anturityypeille) ja STO:lle. Muut I/O:t ja liikkeenohjaimen ohjauksen lisäksi kytkeytyvät CPX-E terminaaliin.

### **OMRON NX102 CPU**

Kolmannen osapuolen servomoottorien ollessa käytössä NX-sarjaan on saatavilla pulssianturi (Line driver, NPN ja PNP) ja SSI enkooderi tuloyksiköt. Mallista löytyy myös tuki absoluuttianturinnille. Kolmannen osapuolen askelmoottorin ja voice coil -toimilaitteiden ohjaus on mahdollista, mikäli rajapinnat täsmäävät. Lisäksi NX102:lle on tarjolla niin analogisia kuin digitaalisia I/O moduuleja. Kylkeen saadaan myös suoraan liitettyä Safety CPU.

Voiman mittaukseen soveltuu inputmoduuli High Speed Analog Inputs tuotekoodiltaan NX-HAD402. Lisäksi NPN malliin soveltuu NX-HAD401 moduuli. Näillä moduuleilla saadaan aikaiseksi erittäin nopeata tuloanalogiaa, joilla voidaan mitata voimaa.

#### **4.4 Ohjelmointiympäristöt**

Optomotionin käyttää ohjelmointikielinä C, C++ ja Pythonia. Beckhoff Terminals tuotteita ohjelmoidaan PC:hen ladatulla Beckhoffin Twincat ohjelmistolla. Feston CMMT-ST:aa voidaan ohjata CPX-E Feston Codesys -logiikalla ja ohjelmoida Festo Automation Suite -ohjelmistolla. Muita ohjelmointivaihtoehtoja on, jos hyödynnetään CMMT-ST:n väylärajapintaa ja muun valmistajan logiikkaa (luku 1.3). Omronin ohjelmointiympäristönä toimii Sysmac Studio.

#### **4.5 Hyväksynät, sertifikaatit**

Optomotionin 2ch:ssa ei ole hyväksyntöjä, mutta liikkeenohjain noudattaa kuitenkin EC 61800-5-2 STO ja IEC 60204-1 pysäytys -sertifikaatteja. Beckhoffin uusissa ELM7xx ohjaimissa on CE merkintä ja UL (Underwriters Laboratories, Palo- ja turvallisuusstandardi Pohjois-Amerikan markkinoille) hyväksyntä on valmisteilla. EL7xxx sarjan liikkeenohjaimissa on myös CE ja UL merkintä. Feston CMMT-ST on listattu c UL us hyväksytyksi. Lisäksi liikkeenohjain noudattaa EU:n EMC, kone ja RoHS -direktiivejä. [6] Omronin NX102 malli noudattaa EU:n EN 61131-2 direktiiviä, sekä mallissa on UL ja ANSI/ISA hyväksynät.

#### **4.6 Liikkeenohjaimen käyttöönnoton kustannukset**

Beckhoffin ohjelmisto testaus- ja kehitystarkoitukseen on ilmainen, mutta niin sanotut jatkuvassa käytössä olevat lisenssit ovat maksullisia. Festo Automation Suite -ohjelmisto on ilmainen. Omron ohjelmointiympäristö Sysmac Studion Lite Edition on maksullinen.

Valmistajien tekemät tarjoukset liikkeenohjaimista ovat asiakaskohtaiset. Tästä syystä tuotteiden kustannukset ovat kirjattuna tämän työn liitetiedostoon, joka on Optofidelityn hallussa.

#### **4.7 Tuotteiden tuki ja takuu**

Yhteydenpito työn aikana Beckhoffin kanssa on sujunut hyvin. Yhteydenpidossa ei ole ilmennyt mitään vaikeutta Beckhoffin kanssa. Beckhoff on iso valmistaja, yrityksellä on suuret resurssit, laaja tuotevalikoima ja se tarjoaakin normaalisti 12 kuukauden takuun. Beckhoff järjestää myös

koulutuksia kaikilla konttoreilla. Beckhoff tarjoaa myös yleisiä kursseja sekä asiakaskohtaisia räätälöityjä kursseja. [12]

Feston kaikilla standardituotteilla on yhden vuoden takuu. Festolta on saatavilla teknistä tukea vianetsintään, sekä muihin yleisiin asioihin heidän tuotteisiinsa liittyen. Ohjelmointitukea Festo ei tarjoa. Lisäksi asiakkaille, jotka tilaavat ensimmäistä kertaa servokäyttöjä, Festo tarjoaa maksullista käyttöönottotukea sovittuna aikana joko paikan päällä tai etänä. [1] Festolla oli työn aikana pieniä organisaatiomuutoksia ja yhteyshenkilö muuttui kertalleen, mikä johti siihen, että sähköpostivastauksen saaminen kesti hieman. Muuten yhteydenpito oli sujuvaa.

Omron tarjoaa tuotteilleen 12kk:n takuun ja tekninen tuki auttaa ongelmatilanteissa sähköpostin ja puhelimen välityksellä. Teknisestä tuesta Omron ei veloita suorilta asiakkailta, joihin Optofidelity lukeutuu. Yhteydenpito työn aikana Omronin edustajan kanssa on sujunut hyvin.

## 4.8 Vertailun tulokset

Taulukko 1. Vertailun tulokset kasattuna

	Optofidelity Optomotion 2ch	Beckhoff EtherCAT Termi- nals	Festo CMMT-ST	Omron NX102-xxxx CPU
Ohjattavien akselien lukumäärä	2	1-2/Terminaali	1	4
Ohjaus	PC	PC	CPX-E-CEC-ohjain/ muu	PC
Servomoottori	Kyllä	Kyllä (vain DC)	Ei	Kyllä***
DC moottori	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä****
Askelmoottori	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä****
AC moottori	Kyllä	Ei	Ei	-
Lineaarimoottori	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
BLDC moottori	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-
Voice coil	Kyllä	Kyllä (I/O lähdöllä?)	Selvityksessä	Kyllä****
Pulssianturi	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Absoluuttianturi, single-turn	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-
Absoluuttianturi, multi-turn	Kyllä	Kyllä	Kyllä	-
Absoluuttianturi, SSI/BiSS-C	Kyllä*/Kyllä*	Kyllä/Kyllä	Kyllä/Kyllä	Kyllä/Ei
Voiman mittaus	Kyllä*	Kyllä Analogiatulo	Kyllä	Kyllä Analogiatulo
STO	kyllä	Kyllä**	Kyllä	-
I/O (digitaalinen)	8 kpl	2–8/Terminaali	6 input, 2 output	-
UL hyväksyntä	Ei	Kyllä (uusissa Ter- minaaleissa valmis- teilla)	kyllä	kyllä
Jäähdytys	Passiivinen	Passiivinen	Passiivinen	Passiivinen

\* Mahdollista pienin muokkauksin

\*\* Tietyissä malleissa

\*\*\* Vaatii väliin servovahvistimen esim. Omron 400 w:n servovahvistin R88D-1SN04H-ECT

\*\*\*\* Mikäli rajapinta tasmää

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Liikkeenohjainten kiinnityksissä ja fyysisissä mitoissa oli hieman eroja. Optofidelityn 2ch ja Feston CMMT-ST ovat liikkeenohjaimia, jotka voi asentaa vaivatta sähkökeskuksen ulkopuolelle. Nämä eivät vaadi tietynlaista DIN kiskokiinnitystä, vaan ovat kiinnitettävissä ruuveilla. Beckhoff EtherCAT Terminals ja Omronin NX102 CPU kiinnitetään DIN kiskolle, joka yleensä tarkoittaa asentamista sähkökeskukseen. Kokoerot eivät olleet muuten merkittävät, mutta Omronin CPU logiikkayksikkö on hieman kookkaampi kuin muut liikkeenohjaimet.

Lähtökohtaisesti kaikki liikkeenohjaimet ovat passiivijäähdytteisiä. Ainoastaan Optomotionissa ei ole vakiona kotelointia, kaikissa muissa on kevyt kotelointi. Jokaisen valmistajan liikkeenohjain sopii hyvin siistiin sisälaboratoriokäyttöön.

Liikkeenohjaimista Optofidelityn 2ch on sovellettavissa kaikkiin työssä mainittuun moottori- ja enkooderityyppeihin. Beckhoffin EtherCAT Terminals tarjoaa huomattavan monipuolisen valikoidun, josta saa rakennettua tarpeita vastaavan kokonaisuuden, poissulkien vaihtovirtamoottorit. Kolmannen osapuolen moottorit ja enkooderit tuovat haasteita Beckhoffille, koska kommunikointikulma täytyy asettaa aina erikseen, eikä se välttämättä onnistu siten, että paikkatieto säilyy [12].

Feston CMMT-ST ei sovellu kaikkiin moottorityyppeihin ja kykenee ohjaamaan vain yhtä moottoria kerrallaan. Kompaktin kokonsa puolesta varsin monipuolinen liikkeenohjain soveltuu kaikkiin työssä mainittuihin enkooderityyppeihin. Omronin NX102 CPU:ta on haastava verrata edellä mainittuihin liikkeenohjaimiin, kun NX102 ei ole liikkeenohjain itsessään. NX102 on ylemmän tason koneohjain tai logiikkayksikkö. Eikä Omronilta ole saatavilla alle 50 VDC:n liikkeenohjaimia. Kuitenkin NX102:aan on saatavilla hyvin ominaisuuksia, kuten paikkatiedon käsitteleviä moduuleita. Kaupallisista tuotteista kannattaa suosia liikkeenohjain ja moottoriyhdistelmää samalta valmistajalta, näin taataan näiden yhteensopivuus ja toimintavarmuus.

Optomotion on ollut käytössä Optofidelityllä pitkän ajan ja on jatkuvan kehityksen kohteena, joten liikkeenohjainta on siis pitkään ohjelmoitu Optofidelityllä. Beckhoffin Twincat on varmasti monelle Optofidelityn suunnittelijalla tuttu ohjelmointiympäristö, joten Beckhoffien Terminaalien ohjelmointi voi olla hyvin sujuvaa. Feston CMMT-ST voi liittää muun valmistajan logiikkaan, täten sen ohjelmointi voi olla ohjelmoijalle sujuvaa ennestään tutun ohjelmointiympäristön kautta.

Kaikissa kaupallisissa liikkeenohjaimissa on UL hyväksyntä. Liikkeenohjaimien kustannuksissa on hieman eroa, tämän voi tarkastella liitetiedostosta (liite A). Jokaisen ulkopuolisen valmistajan

käyttöönotto ja järjestelmään tutustuminen vie todennäköisesti saman verran aikaa. Optofidelityllä on ollut käytössä Beckhoffia, joten ainakin tämä valmistajan ohjelmisto on ennalta monelle tuttu. Toisilla valmistajilla voi olla tehokkaampi ja/tai fiksumpi ohjelmisto, joka edesauttaa nopeampaan käyttöönottoon. Kaikkien valmistajien takuut ovat kestoiltaan vuoden mittaiset, yhteydenpito ja kommunikointi valmistajien edustajien on sujunut pääsääntöisesti hyvin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että markkinoilla ei ole valmista komponenttia, jolla olisi niin montaa ominaisuutta kuin Optomotionilla. Moottorin ja enkooderin tarpeen mukaan täytyy valita sopiva liikkeenohjain.



## 6. YHTEENVETO

Optofidelityn kaksikanavaisen Optomotionin vahvuuksina ovat pienillä piirilevyn ja asetuksien muutoksilla monipuolisuus moottorien ja enkooderien suhteen. Lisäksi liikkeenohjain omaa fyysisesti pienen koon ja ohjain ei vaadi erillistä ylemmän tason CPU:ta, vaan Optomotion yhdistetään suoraan tietokoneeseen Ethernet-kaapelilla.

Beckhoffin modulaarisuus on loistava, joten on vaivatonta toteuttaa oikean kokoonpanon valinta vaadittujen ominaisuuksien pohjalta. Beckhoffin moottorien kanssa toimiessa voi käyttää yksikaapeli tekniikka, jossa yhtä kaapelia pitkin kulkee paikkatieto ja virransyöttö. Tämä vähentäisi lisäkorttien tarvetta.

Vertailu Omronin osalta jäi hieman suppeaksi, kun varsinaista vertailukelpoista (alle 50 VDC) liikkeenohjainta ei löytynyt Omronin valikoimista. National Instruments lopetti liikkeenohjainmoduulien valmistuksen vuonna 2020. Näin ollen valmistajalta ei löytynyt liikkeenohjainta vertailuun.

Optomotionin kehityksessä ja käytössä on otettu huomioon moottorin ja enkooderin kaapelien mahdollisimman lyhyt pituus EMI:n (electromagnetic interference), sähkömagneettisen häiriön, varalta. Optomotionin lisäksi vain Feston CMMT-ST on mahdollista asentaa kompaktisti sähkökeskuksen ulkopuolelle moottorien lähettyville, mikäli ei asenneta DIN kiskoa ja Beckhoffin liikkeenohjaimia keskuksen ulkopuolelle. CMMT-ST vaatii lisäksi erillisen, ylemmän tason ohjauslogiikan, joka on sijoitettava sähkökeskukseen. Muiden valmistajien liikkeenohjaimissa on suora yhteys tietokoneeseen.

Feston liikkeenohjaimen vahvuuksina ovat kompaktiuden lisäksi valmistajan mukaan moottorin ja kinematiikan välinen vahvuus, jonkalaista muilla valmistajilla ei ole tarjota. Tämän lisäksi liikkeenohjaimen ja yläpään järjestelmän kommunikointi on avoimempaa kuin muilla. Kytkeytyminen käyttävään logiikkaan on siis vaivatonta.

Optomotion 2ch on varta vasten kehitetty Optofidelityn tarpeisiin, joten se soveltuu hyvinkin pienillä modifikaatioilla monenlaiseen moottori- ja enkooderitarpeisiin. Yhdeltäkään tässä työssä käsitellyltä valmistajalta ei löydy kaiken kattavaa liikkeenohjainta. Beckhoffin EtherCAT Terminaalien valikoima ja modulaarisuus vastaa hyvin Optofidelityn tarpeita. Toinen vaihtoehto voisi olla Feston CMMT-ST, joka hoitaisi DC-, BLDC ja askelmoottoreita. Lisäksi Feston CMMT-AS ajaisi servomoottoria, sekä lineaarimoottoreita. Nämä kaksi liikkeenohjainta Festolta voisi myös olla toimiva yhdistelmä Optofidelityn tarpeisiin.

## 7. LÄHTEET

- [1] T. Tervonen, myyntipäällikkö Festo, sähköpostikeskustelu 21.6.2021
- [2] MachineDesign, What is a Voice Coil Actuator, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.2.2022): <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836669/what-is-a-voice-coil-actuator>
- [3] SICK, SICK AG enkooderit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.7.2021): <https://www.sick.com/fi/fi/enkooderien-ja-kaltevuusantureiden-yleiskatsaus-ja-sovellukset/w/encoders-definition/>
- [4] Variohm, Variohm Eurosensor Ltd encoders, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.7.2021): <https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/difference-between-an-absolute-and-incremental-encoder->
- [5] Wikipedia, Incremental encoder, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.8.2021): [https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental\\_encoder](https://en.wikipedia.org/wiki/Incremental_encoder)
- [6] Beckhoff, Beckhoff Automation, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.10.2021): <https://www.beckhoff.com/fi-fi/>
- [7] Festo, Festo CMMT-ST Servo drive, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.10.2021): [https://www.festo.com/cat/fi\\_fi/products\\_CMMT\\_ST](https://www.festo.com/cat/fi_fi/products_CMMT_ST)
- [8] Omron, Omron NX1, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.10.2021): <https://industrial.omron.fi/fi/products/nx1>
- [9] Omron, Omron R88D-1SN04H-ECT, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.4.2022): <https://industrial.omron.fi/fi/products/R88D-1SN04H-ECT>
- [10] I. Kyyrönen, aluemyynti-insinööri Omron, sähköpostikeskustelu 1.4.2022
- [11] T. Myllys, yhteyspäällikkö National Instruments, sähköpostikeskustelu 21.6.2021
- [12] E. Kiuru, myyntipäällikkö Beckhoff, sähköpostikeskustelu 1.11.2021
- [13] Festo, Festo CMMT-AS Servo drive, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.2.2022): [https://www.festo.com/fi/en/p/servo-drive-id\\_CMMT\\_AS](https://www.festo.com/fi/en/p/servo-drive-id_CMMT_AS)

## **LIITE A:**

Valmistajien liikkeenohjaimien ja ohjelmistojen hinnat ovat erillisessä liitetiedostossa, joka on Optofidelity Oy:n hallussa.