Tampereen yliopisto

Joonas Pinomäki

MONIAKSELISET VOIMA-MOMENTTIANTURIT ROBOTIIKAN VOIMANSÄÄDÖSSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Tarkastaja: Petri Mäkinen
Elokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Joonas Pinomäki: Moniakseliset voima-momenttianturit robotiikan voimansäädössä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma
Elokuu 2024

Asentosäädetty robotti seuraa ennalta ohjelmoituja liikeratoja, eikä kykene reagoimaan muutoksiin ympäristössä. Asentosäädetty robotti ei kykene luotettavaan kokoonpanoon, sillä osien väliset toleranssit ovat yleensä robotin tarkkuutta pienempiä. Asentosäädetty robotti ei kykene myöskään reagoimaan yksittäisten kappaleiden välisiin eroihin viimeistelytehtävissä, joissa robotin päätelaitteen tulee liikkua kappaleen pintaa pitkin. Työkappaleeseen törmääminen voi aiheuttaa vakavia vaurioita sekä työkappaleelle että robotille. Voimasäädetty robotiikka on kehitetty korjaamaan asentosäädetyn robotiikan puutteita.

Voimansäätö voidaan jakaa karkeasti kahteen osa-alueeseen, jotka ovat passiivinen ja aktiivinen voimansäätö. Passiivisessa voimansäädössä robotin päätelaitteen annetaan joustaa, jolloin robotin ja ympäristön välinen kontaktivoima pysyy vakiona. Passiivinen voimansäätö perustuu avoimen silmukan ohjaukseen. Aktiivinen voimansäätö puolestaan perustuu voima-momenttianturiin, jonka avulla robotin ohjaimeen voidaan muodostaa suljettu voimansäätösilmukka. Tämä työ keskittyy aktiiviseen voimansäätöön, jossa käytetään voima-momenttianturia.

Voima-anturit luokitellaan anturielementtien perusteella seuraavasti: Kapasitiiviset anturit perustuvat levykondensaattoreihin. Optiset anturit perustuvat optisen hilan kykyyn heijastaa valoa. Pietsosähköiset anturit perustuvat pietsosähköiseen ilmiöön. Pietsoresistiiviset anturit perustuvat rasituksen mittaamiseen venymäliuskaelementeillä. Pietsoresistiivinen anturi on yleisin robotiikassa käytetty voima-momenttianturi.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoitus on tarkastella moniakselisten voima-momenttianturien toimintaperiaatteita ja käyttöä robotiikan voimansäädössä. Työ koostuu kolmesta osiosta, joista ensimmäinen kattaa anturitekniikan, toinen esittelee voimansäädön peruskäsitteet ja viimeinen kartoittaa alalla tehtyä uutta tutkimusta.

Tämän työn avulla on mahdollista oppia erityyppisten moniakselisten voima-momenttianturien toimintaperiaatteet ja voimansäädön peruskäsitteet. Lisäksi työ muodostaa kokonaiskuvan voimansäädön käyttökohteista robotiikan alalla. Työn rajauksen takia lääketieteen ja raskaiden manipulaattorien voimansäätösovellukset ovat hyviä jatkotutkimuskohteita.

Avainsanat: Robotiikka, voimansäätö, moniakseliset voima-momenttianturit, hybridiohjaus, impedanssiohjaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kandidaatintyönohjaajaani Petri Mäkistä kärsivällisyydestä ja hyvästä ohjauksesta viimeisten kahden vuoden aikana. Haluan myös kiittää ystäviäni Vu Nguyenia, Tuukka Salmista, Tuomas Valkeajokea, Lassi Virtasta sekä Ville Ylöstä tuesta ja työn viimeistelemiseen kannustamisesta. Ilman teitä olisin tuskin saanut työtä valmiiksi.

Tampereella, 30.8.2024

Joonas Pinomäki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. MONIAKSELISET VOIMA-MOMENTTIANTURIT 3
2.1 Voima-anturin mittauselementtityypit 4
2.1.1 Kapasitiiviset anturit 5
2.1.2 Optiset anturit 6
2.1.3 Pietsosähköiset anturit 7
2.1.4 Venymäliuska-anturit 8
2.2 Kaupallinen tarjonta 10
2.2.1 Althen Sensors & Controls 10
2.2.2 ATI Industrial Automation 11
2.2.3 Bota Systems 12
2.2.4 FANUC 12
2.2.5 Hottinger Brüel & Kjær 13
2.2.6 Kistler Group 14
3. VOIMANSÄÄTÖ TEOLLISUUSROBOTIIKASSA 15
3.1 Voimansäädön perusteet 15
3.1.1 Voimansäätö yksiulotteisessa sovelluksessa 16
3.1.2 Voimansäätö kolmiulotteisessa sovelluksessa 17
3.2 Hybridisäätö 18
3.2.1 Tehtävien jakaminen 19
3.2.2 Rinnakkaishybridisäädin 21
3.2.3 Sarjahybridisäädin 22
4. SÄÄTÖTEKNIIKAN JA SOVELLUSTEN KEHITYS 24
4.1 Säätötekniikan tutkimus 24
4.1.1 Impedanssiohjauksen jatkokehitys 24
4.1.2 Kontaktivoiman anturiton estimointi 25
4.1.3 Systeemin muiden osien mallinnus 25
4.2 Sovelluskohteiden tutkimus 26
4.2.1 Kokoonpanotehtävät 26
4.2.2 Viimeistelytehtävät 27
4.2.3 Raskaat manipulaattorit 28
5. YHTEENVETO 29
LÄHTEET 30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CNC	engl. computer numerical control, tietokoneistettu työstökoneen ohjausjärjestelmä
DOF	engl. degrees of freedom, avaruuskappaleen asennon esittämiseen tarvittavien muuttujien lukumäärä
DOM	engl. degrees of motion, liikkeen vapausasteiden lukumäärä
EKF	engl. extended Kalman filter, laajennettu Kalman-suodin
FBG	engl. fiber Bragg grating, optiseen kuituun muodostettu rasitusta mittaava hila
FEM	engl. finite element method, moniulotteisten differentiaaliyhtälöongelmien ratkaisumenetelmä
IP-luokitus	engl. ingress protection rating, sähkölaitteen kotelointiluokka
MEMS	engl. micro electro-mechanical system, elektroniikan anturikomponentti, jossa on hyvin pieniä liikkuvia osia.
TEDS	engl. transducer electronic data sheet, sähköinen anturin tunnistus- ja tietojärjestelmä

A	pinta-ala
a_f	lämpölaajenemiskerroin
C	kapasitanssi
F_d	kontaktivoiman asetusarvo
F_e	kontaktivoima
F_m	kontaktivoiman mittausarvo
F_x	voima *x*-akselin suhteen
F_{xy}	voima *x*- ja *y*-akselien suhteen
$F_{xy,max}$	maksimikuormitusvoima *x*- ja *y*-akselien suhteen
$F_{xy,min}$	voiman erottelukyky *x*- ja *y*-akselien suhteen
F_{xyz}	voima *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
$F_{xyz,max}$	maksimikuormitusvoima *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
$F_{xyz,min}$	voiman erottelukyky *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
F_y	voima *y*-akselin suhteen
F_z	voima *z*-akselin suhteen
$F_{z,max}$	maksimikuormitusvoima *z*-akselin suhteen
$F_{z,min}$	voiman erottelukyky *z*-akselin suhteen
F_{z-}	voima *z*-akselin negatiivisessa suunnassa
$F_{z-,max}$	maksimikuormitusvoima *z*-akselin negatiivisessa suunnassa
F_{z+}	voima *z*-akselin positiivisessa suunnassa
$F_{z+,max}$	maksimikuormitusvoima *z*-akselin positiivisessa suunnassa
f	voima
K_e	jousivoima
M_x	momentti *x*-akselin suhteen
M_{xy}	momentti *x*- ja *y*-akselien suhteen
$M_{xy,max}$	maksimikuormitusmomentti *x*- ja *y*-akselien suhteen
$M_{xy,min}$	momentin erottelukyky *x*- ja *y*-akselien suhteen
M_{xyz}	momentti *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
$M_{xyz,max}$	maksimikuormitusmomentti *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
$M_{xyz,min}$	momentin erottelukyky *x*-, *y*- ja *z*-akselien suhteen
M_y	momentti *y*-akselin suhteen
M_z	momentti *z*-akselin suhteen
$M_{z,max}$	maksimikuormitusmomentti *z*-akselin suhteen
$M_{z,min}$	momentin erottelukyky *z*-akselin suhteen
m	massa
P_c	päätelaitteen asennon ohjausarvo

P_d	päätelaitteen asennon asetusarvo
P_e	fotoelastinen kerroin, päätelaitteen asento
Q	sähkövaraus
q	sähkövaraus
R	resistanssi
S	kytkinmatriisi
x	etäisyys
ΔF	kontaktivoiman erosuure
ΔP	asennon erosuure
ΔT	lämpötilan muutos
$\Delta \varepsilon$	jännitys
$\Delta \lambda$	aallonpituuden muutos
ε	eristeen permittiivisyys
ε_0	tyhjiön permittiivisyys
λ_1	Braggin aallonpituus
ξ	lämpöoptinen kerroin

1. JOHDANTO

Teknologian jatkuva kehitys asettaa yhä uusia vaatimuksia teollisuuden valmistusprosesseille. Valmistustekniikan alalla käsityö on laajalti korvattu automaatiolla. Nyt massatuotannosta pyritään siirtymään asiakaskeskeiseen joustavaan tuotannon malliin, jossa lukuisia eri tuotteita voidaan valmistaa pienikokoisia eriä. Joustavuus vaatii työkoneilta nopeita asetusaikoja, mikä on haaste massatuotantoon erikoistuneille valmistusprosesseille. Teollisuusrobotit ovat tietokoneohjattuja CNC-työstökoneita (engl. computer numerical control) monipuolisimpia, koska niiden avulla voidaan toteuttaa useampia erilaisia koneistusoperaatioita. [1] [2]

Teollisuuden robottimanipulaattori koostuu yleisesti kuudesta kiertonivelestä. Tällaista robottia kutsutaan 6R-robotiksi. Kuuden nivelen ohjaus mahdollistaa työkappaleen sijainnin ja orientaation vapaan hallinnan 6R-robotin pallomaisen työalueen sisällä. Robotin liikkeen vapausasteiden lukumäärää kutsutaan DOM-luvuksi (eng. degrees of motion). Nivelten asemien ohjaukseen viitataan nimellä asennonsäätö [3] [4].

Työkappaleen viimeistely, siirto työpisteiden välillä ja useammasta osasta koostuvien rakenteiden kokoonpaneminen ovat esimerkkejä teollisuusroboteille sopivista tehtävistä [1, s. 3] [4, s. 1]. Asentosäädetty robotti seuraa tarkkoja, ennalta ohjelmoituja liikeratoja, mikä on ongelmallista muuttuvissa olosuhteissa. Jotta robotti voi tarttua työkappaleeseen, sen tulee tuntea kappaleen asento tarkalleen. Siksi kappaleet tulee sijoittaa tarkkoihin asemiin. Kokoonpanotehtävissä vaaditaan suuria toleransseja, sillä robotti ei pysty kompensoimaan yksittäisten kappaleiden eroja. [4, s. 1–2]

Eräs ratkaisu edellä mainittuihin ongelmiin on voimansäätö, jossa ohjataan robotin asennon lisäksi sen päätelaitteen kokemaa voimaa ja momenttia [3] [4, s. 2]. Kaikissa kolmessa edellä mainituista tehtävistä voidaan hyödyntää voimansäätöä: Voimasäädetty viimeistelyrobotti tunnistaa kosketuksen työstökappaleen kanssa, ja osaa siksi kompensoida yksittäisten kappaleiden eroja. Siirtorobotti osaa tarttua kappaleeseen, jonka asento poikkeaa hieman suunnitellusta asennosta. Kokoonpanorobotti voidaan ohjelmoida paikantamaan osat toisiinsa nähden hyödyntäen voiman takaisinkytkentää.

Jotta manipulaattorin työkappaleeseen kohdistamaa voimaa voidaan ohjata, tarvitaan tietoa voimasta. Voimansäätö voidaan toteuttaa joko voima-momenttianturin kanssa tai

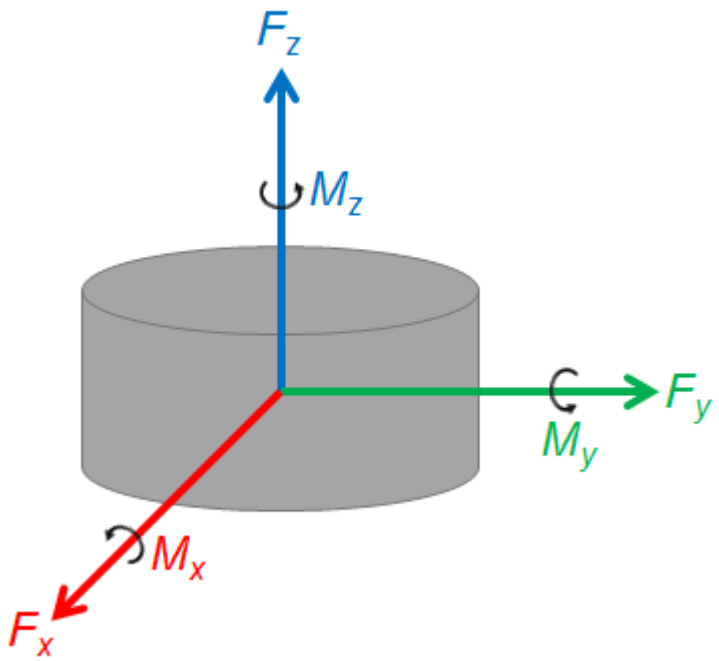
ilman. Ilman anturia toteutettava ohjaus vaatii kuitenkin tarkkaa tietoa robotista ja sen ympäristöstä. Lisäksi anturiton voimansäätö on rajoitettu 1-DOF-sovelluksiin (engl. degrees of freedom), joissa robotti pystyy säätämään kontaktivoimaa vain yhdessä suunnassa [5]. Moniulotteinen voima-momenttianturi mahdollistaa voimansäädön kaikissa kuudessa vapausasteessa [6, s. 2]. Siksi tässä työssä tarkastellaan erityisesti 6-DOF-voima-momenttiantureja.

Työn tarkoituksena on perehtyä voiman ja momentin mittaamiseen, mittaustiedon hyödyntämiseen teollisuusrobotin ohjauksessa sekä voimasäädetyn robotiikan sovelluksiin teollisuudessa. Työn toisen luvun alussa esitetään neljä voima- ja momenttianturin tyyppiä sekä niille ominaiset anturirakenteet. Toisen luvun loppupuolella perehdytään muutaman voima-momenttianturien valmistajan tarjontaan. Kolmannessa luvussa esitetään kaksi tapaa hyödyntää moniakselista voima- ja momenttianturia teollisuusrobotin voimansäädössä. Työn neljännessä luvussa tehdään katsaus robotiikan voimansäädön uusiin tutkimuksiin.

2. MONIAKSELISET VOIMA-MOMENTTIANTURIT

Moniakselisen anturin avulla voidaan mitata useampi komponentti kappaleeseen vaikuttavasta kolmiulotteisesta voimasta ja momentista. Anturin avulla mitattavan voiman komponenttien lukumäärää kutsutaan anturin ulottuvuudeksi, joka ilmoitetaan vapausasteina eli DOF-lukuna. Yleisimmät moniakseliset anturit ovat kuuden vapausasteen antureita, joiden avulla voidaan mitata kolmen ortogonaalisen akselin suhteen vaikuttavat voimat ja momentit. Näin anturiin kytketyn koneen tai laitteen osan kokonaiskuormitus voidaan laskea. [6]

Koordinaatiston valinta on olennaista, koska työssä kuvataan kolmiulotteisia ilmiöitä. Tässä työssä käytetään suorakulmaista eli karteesista koordinaatistoa, jossa *x*-, *y*- ja *z*-akselien suunnat ja momenttien kiertosuunnat on valittu oikean käden säännön mukaisesti. Tällaista koordinaatistoa kutsutaan oikeakätiseksi. Moniakselinen voima-momenttianturi kuvataan alan kirjallisuudessa esiintyvän tavan mukaisesti ympyrälieriönä, jonka keskiakseli on sovitettu koordinaatiston *z*-akselin suuntaiseksi [6, s. 2] [7, s. 7] [8, s. 2]. Tällöin koordinaatiston *x*- ja *y*-komponentit asettuvat lieriön päätypintojen suuntaiseen tasoon kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. *Anturin voima-momenttikoordinaatisto. Perustuu lähteisiin [6] [7] [8].*

Yksinkertaisimmillaan moniakselinen voima-momenttianturi koostuu tarkasti kalibroidusta elastisesta rakenteesta, johon on kiinnitetty useita anturielementtejä. Kun anturin päiden välille kohdistuu ulkoinen voima tai momentti, tämä elastinen rakenne taipuu ulkoiseen voimaan verrannollisesti ennalta odotettavalla tavalla. Kukin mittauselementeistä tuottaa yksiulotteisen lukeman, jotka voidaan analysoida moniakseliseksi voima-momenttiarvoksi, koska anturin geometria on tunnettu. [6]

Moniakselisen voima-momenttianturin rakenteen sekä mittauselementtien tyypin valinnalla on suuri vaikutus anturin ominaisuuksiin, minkä takia erityyppiset anturit soveltuvat erilaisiin tehtäviin. Tässä työssä anturit on luokiteltu elementtityypin perusteella, koska anturielementin tyyppi on selkeämpijakoinen luokitteluperuste kuin anturin rakenne. Lisäksi elementtityypin valinta vaikuttaa anturin rakenteeseen [6]. Erilaisten mittauselementtien ominaisuuksia tarkastellaan luvussa 2.1.

Teollisuuden olosuhteisiin soveltuvia antureita on saatavilla useilta eri valmistajilta. Luvussa 2.2 esitellään muutama 6-DOF-voima-momenttiantureiden valmistaja sekä tuotevalikoima. Tarkastelu keskittyy erityisesti robotiikkaan soveltuvaan venymäliuskatekniikkaan, joka esitellään kappaleessa 2.1.4.

2.1 Voima-anturin mittauselementtityypit

Mittauselementtien tyypillä on suurin vaikutus anturin erottelukykyyn, signaali-kohinasuhteeseen, maksimikuormitukseen sekä mittausarvojen analyysin monimutkaisuuteen. Alan kirjallisuudessa [6, s. 2–3] [9, s. 1] [10, s. 1] voima-anturit jaetaan mittauselementtien perusteella neljään tyyppiin, jotka ovat:

- kapasitiiviset anturit
- optiset anturit
- pietsosähköiset anturit
- venymäliuska-anturit.

Näihin neljään luokkaan kuuluvien anturien ominaisuudet sekä toimintaperiaatteet esitellään aliluvuissa 2.1.1–2.1.4. Lisäksi esitellään kapasitiivisen anturin ja venymäliuska-anturin rakenteet, joihin moniakselinen voiman ja momentin mittaus perustuu. Optisen anturin ja pietsosähköisen anturin rakenteet vaihtelevat lähteiden välillä, joten niistä ei ole yhtenäisiä esimerkkejä.

2.1.1 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiivinen voima-anturi perustuu levykondensaattoriin, jonka kapasitanssi on käänteen verrannollinen sen levyjen väliseen etäisyyteen yhtälön 1 mukaisesti

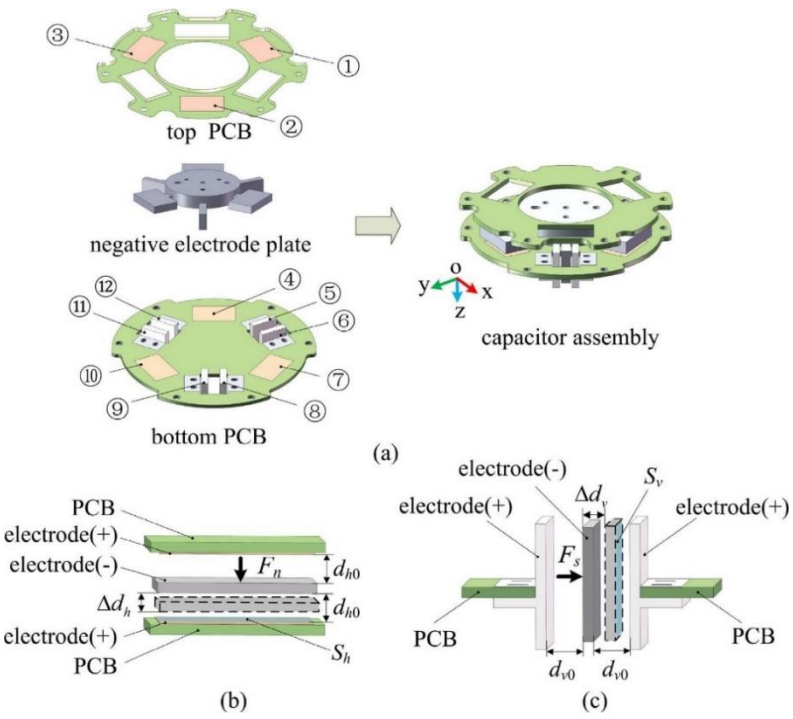
$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{x}, \tag{1}$$

jossa A on kondensaattorin levyn pinta-ala, x on levyjen etäisyys, ε on levyjen välisen eristeen permittiivisyys ja ε_0 on tyhjiön permittiivisyys [7, s. 2]. Yhtälö 1 voidaan ratkaista etäisyyden x suhteen, jolloin päädytään yhtälöön 2

$$x = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{C}. \tag{2}$$

Yksi levykondensaattorin levyistä on kiinteästi asennettu anturin runkoon ja toinen elastiseen rakenteeseen. Elastinen rakenne taipuu anturin päähän kohdistuvan ulkoisen voiman vaikutuksesta, jolloin kondensaattorin levyjen välinen etäisyys muuttuu. Tämä havaitaan kondensaattorin kapasitanssin muutoksena.

Moniakselinen voima- ja momenttianturi koostuu useasta levykondensaattorista. Koska levyparien geometrinen sijainti toisiinsa nähden anturissa tunnetaan, mittausdatasta voidaan muodostaa kolmiulotteinen kuva anturin kuormituksesta. Kuva 2 on esimerkki kapasitiivisen 6-DOF-voima-momenttianturin rakenteesta.



Kuva 3. *Esimerkki kapasitiivisen 6-DOF-anturin rakenteesta [8].*

Moniakselisen anturin rakenne johtaa kytkentävirheisiin, koska anturiin kohdistuva voima aiheuttaa muutoksia kaikkien mittauselementtien lukemissa. Anturiin vaikuttavat leikkausvoimat sekä -momentit, eli *x*- ja *y*- suunnassa vaikuttavat voimat sekä *z*-suunnassa vaikuttava momentti, siirtävät kondensaattorien liikkuvia levyjä toisiinsa nähden sivuttaissuunnassa. Tällä on vaikutusta kondensaattorien kapasitanssiin, mutta ilmiön matemaattinen mallintaminen on vaikeaa [7, s. 2].

Kytkentävirheet korjataan matriisilaskutoimituksella käyttäen kytkentämatriisia, joka mallintaa mittauselementtien kapasitanssien ja anturiin vaikuttavien voimien ja momenttien lineaarista suhdetta [7, s. 3] [8, s. 2, 7]. Kaikkia anturin virhelähteitä ei kuitenkaan voida korjata kytkentämatriisilla. Kytkentämatriisilla kalibroidun kapasitiivisen anturin suurin virhelähde on ympäristön loiskapasitanssi, joka johtaa anturin lukeman satunnaiseen ajelehtimiseen [7, s. 9].

2.1.2 Optiset anturit

Voima tai momentti voidaan mitata optisesti FBG-elementillä (engl. fiber Bragg grating). FBG-elementti koostuu valokuituun muodostettavasta optisesta hilasta, joka heijastaa tiettyjä aallonpituuksia kuitua pitkin kulkevasta valosta. Heijastuneen valon aallonpituus muuttuu FBG:in mekaanisen kuormituksen sekä lämpötilan mukaan yhtälön 3 mukaisesti

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + \left(a_f + \xi\right)\Delta T, \tag{3}$$

jossa $\Delta\lambda$ on heijastuneen valon aallonpituuden muutos, λ_1 on Braggin aallonpituus, P_e on optisen kuidun fotoelastinen kerroin, a_f on kuidun lämpölaajenemiskerroin, ξ on kuidun lämpöoptinen kerroin, $\Delta\varepsilon$ on kuidun pituussuuntainen jännitys ja ΔT on lämpötilan muutos. [11, s. 3] [12, s. 4]

Moniakselinen voima-momenttianturi voidaan muodostaa yhdellä säteilylähde-ilmaisinparilla muodostamalla yhteen optiseen kuituun useita FBG-hiloja [12, s. 2]. Mittauselementeiltä saatavasta aallonpituuden muutosdatasta voidaan laskea kolmiulotteisen voiman ja momentin komponentit, koska hilojen geometrinen sijainti ja anturin rakenne tunnetaan.

Xiong et al. johtavat FBG-hilan kuormituksen ja aallonpituuden muutoksen väliselle yhteydelle lineaarisen riippuvuuden [12, s. 6]. Muunnos aallonpituudesta voimiksi ja momenteiksi tehdään sovelluksesta riippuvalla matriisilaskutoimituksella. Optisen anturin

kytkentämatriisi kalibroidaan minimoimaan mittauselementtien ristikkäisvaikutuksia kuten kappaleen 2.1.1 kapasitiivisen anturin kytkentämatriisi.

FBG-elementin lämpötilaherkkyys on haitallista voima-momenttianturin luotettavuudelle. Lämpötilan muutoksesta aiheutuvaa häiriötä voidaan kompensoida usealla tavalla: Hosseinabadi et al. hyödyntävät anturiin asennettua lämpötila-anturia [13, s. 3]. Xiong et al. käyttävät ylimääräistä liikkumatonta hilaa lämpötilan vaikutuksen kompensoimiseen [12, s. 2]. Long et al. kompensoivat lämpötilariippuvuutta koneoppimismallin avulla [11, s. 5–7].

Muihin vaihtoehtoihin verrattuna optisen signaalin mittaus ja käsittely on kallista, sillä siihen tarvittavat laskutoimitukset ovat raskaita ja anturilukeman kalibrointi on FBG-anturien lämpötilariippuvuuden takia herkkää. Optiset anturit ovat kuitenkin tarkkoja, kevyitä, pienikokoisia sekä lähes immuuneja sähkömagneettisten häiriöiden vaikutukselle [12, s. 2] [14, s. 2], minkä takia ne soveltuvat teolliseen käyttöön.

2.1.3 Pietsosähköiset anturit

Pietsosähköinen voima-anturi perustuu pietsosähköiseen ilmiöön [15, s. 1] [16, s. 2], jossa ulkoinen voima muodostaa kiteeseen sähkövarauksen [17, s. 1]. Sähkövaraus ilmenee pietsosähköisen kiteen päiden välille muodostuvana potentiaalierona, joka voidaan mitata elektronisesti. Tällainen mittausjärjestely soveltuu kuitenkin vain dynaamisen voiman mittaamiseen, sillä staattisen voiman aiheuttama sähkövaraus purkautuu kiteestä eksponentiaalisesti ajan kuluessa [15, s. 1], kuten kondensaattorin varaus RC-piirissä. Staattisen voiman mittaaminen pietsosähköisellä anturilla vaatii lisäkäsittelyä. Staattinen voima voidaan mitata analysoimalla joko anturin resonanssitaajuutta, impedanssia, purkausaikaa tai kapasitanssia [15, s. 2–5].

Anturirakenteen jäykkyys määrittää anturin jousivakion, joka edelleen määrittää anturin resonanssitaajuuden. Anturiin vaikuttava ulkoinen voima aiheuttaa anturin rakenteen muodonmuutoksen, joka vaikuttaa anturin resonanssitaajuuteen. Resonanssitaajuuden muutoksesta voidaan estimoida anturiin vaikuttava staattinen voima. Muutos voidaan mitata syöttämällä kiteeseen vaihtojännitesignaalia. Samanlainen muutos havaitaan myös kiteen impedanssissa. [15, s. 2]

Kun pietsosähköiseen kiteeseen vaikuttava voima on vakio, kiteeseen muodostunut varaus purkautuu eksponentiaalisesti RC-aikavakion ohjaamana yhtälön 4 mukaisesti

$$q = Qe^{-\frac{t}{RC}}, \tag{4}$$

jossa Q on kiteen sähkövaraus alussa, q on kiteen sähkövaraus ajan t kuluttua, R on mittausvastuksen resistanssi ja C on kiteen kokonaiskapasitanssi [15, s. 1]. Kiteen aikavakio ja sen muutos voidaan laskea mittaamalla sähkövarauksen purkautumiseen kuluvaa aikaa [15, s. 4].

Koska staattisella voimalla kuormitettu pietsosähköinen elementti toimii kuten kondensaattori, voidaan kidettä kuormittava voima laskea myös mittaamalla sen kapasitanssia. Kiteen kapasitanssin muutos on lineaarinen pienillä staattisilla kuormilla, mutta epälineaarinen suurilla kuormilla. Kapasitanssimenetelmällä saavutettiin suurin mittausalue, mutta menetettiin kyky mitata pieniä voimia. [15, s. 5]

Pietsosähköisen voima-anturin etuja ovat nopea dynamiikka, suuri herkkyys, erottelukyky sekä laaja dynaamisten voimien mittausalue [18; katso 16, 19]. Pietsosähköisen anturin haittoja ovat staattisten voimien mittaamisen monimutkaisuus sekä pienet staattiset mittausalueet [15]. Siksi ne soveltuvat parhaiten kosketuksen tai törmäyksen tunnistamiseen, eivätkä jatkuva-aikaiseen kuorman mittaamiseen.

2.1.4 Venymäliuska-anturit

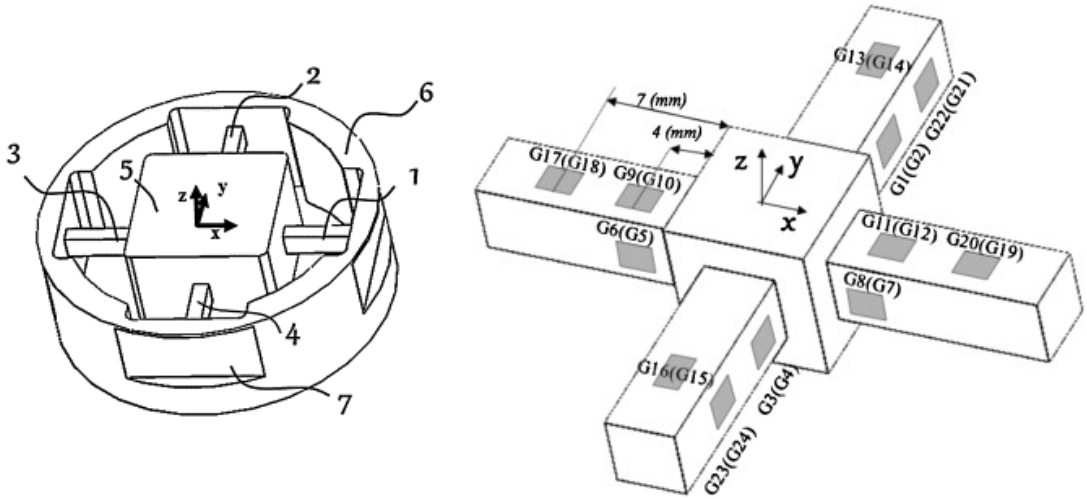
Venymäliuska-anturi perustuu pietsoresistiiviseen ilmiöön, jossa johtimen resistanssi muuttuu johtimen poikkipinta-alan muuttuessa [20, s. 2]. Koska venymäliuskan resistanssi on riippuvainen anturin asennosta eikä asennon muutoksesta, venymäliuska-anturi kykenee mittaamaan dynaamisen voiman lisäksi myös staattisen voiman suuruuden toisin kuin kappaleen 2.1.3 pietsosähköinen anturi.

Venymäliuska-anturi voidaan kiinnittää anturin rungon elastiseen osaan liimaamalla [21, s. 6]. Ulkoisen voiman vaikutuksesta anturin elastinen osa taipuu, jolloin siihen kiinnitetty venymäliuska taipuu. Tällöin venymäliuskan resistanssissa havaitaan ulkoiseen voimaan verrannollinen muutos.

Koska anturin elastisuus on rajallista, venymäliuskan resistanssin muutos on usein hyvin pientä. Venymäliuska-antureissa yksittäisen elementin heikko resistanssisignaali vahvistetaan kytkemällä neljä venymäliuskaa Wheatstonen silta -konfiguraatioon. Koska läm-

pötilan muutos vaikuttaa kaikkiin neljästä venymäliuskasta samalla tavalla, usean elementin yhdistäminen Wheatstonen siltaan kumoaa myös lämpötilan vaikutuksen mittaustietoon. Muita venymäliuska-anturin heikkouksia ovat herkkyys sähkömagneettisille häiriöille sekä kosteusvaurioille. [6, s. 3]

Moniakselinen venymäliuska-anturi muodostetaan yhdistämällä useita neljästä venymäliuskasta muodostettuja elementtejä saman anturin eri osiin. Anturin rakenteella on suuri vaikutus anturin tarkkuuteen ja luotettavuuteen [6, s. 1]. Alan kirjallisuudessa [6] [22] [23] suosituin venymäliuska-anturin rakenne on ristipalkki eli maltalainen risti. Esimerkki ristipalkkianturin rakenteesta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. *Ristipalkkianturin rakenne ja venymäliuskojen sijainti [22].*

Ristipalkkianturin rakenne koostuu kiinteästä ulkoisesta renkaasta ja liikkuvasta keskiöstä, joita yhdistävät neljä ortogonaalista palkkia. Palkit muodostavat anturin elastisen osan, joka taipuu keskiöön kohdistettavan voiman vaikutuksesta. [6, s. 3] Venymäliuskat kiinnitetään palkkeihin geometrisesti siten, että Wheatstonen siltojen lähtönä saadaan yksi anturiin kohdistuvan voiman tai momentin komponenteista.

Ristipalkkianturin heikkouksia ovat mittauselementtien väliset rinnakkaisvaikutukset sekä huono *x*- ja *y*-suuntaisten voimien erottelukyky [22, s. 2]. Anturirakenteen valmistaminen on kallista, sillä elastisia palkkeja valmistaessa materiaaliaihiota tulee työstää useasta suunnasta. Tämän lisäksi venymäliuskat tulee kiinnittää eri puolille anturin rakennetta.

2.2 Kaupallinen tarjonta

Lukuisat tahot kehittävät ja myyvät moniakselisia voima-momenttiantureita teollisuuden voimansäätötehtäviin [24] [25] [26] [27] [28] [29]. Tässä kappaleessa tehdään lyhyt katsaus anturimarkkinoiden tilaan ja esitellään eri valmistajien anturiratkaisuja. Katsauksen laajuuden rajoittamiseksi tässä kappaleessa keskitytään 6-DOF-antureihin, jotka ovat asteisuudeltaan kaikkein yleisimpiä.

6-DOF-anturilla voidaan mitata sekä kaikki kolme voiman että kolme momentin komponenttia. Joissain tapauksissa 6-DOF-anturi voidaan asettaa tilaan, jossa anturi mittaa vain osaa anturin kuudesta vapausasteesta. Tällöin mittausdynamiikka voi parantua sellaisissa tehtävissä, joissa ei tarvitse tuntea kaikkia voiman ja momentin komponentteja.

Tarkasteluun valitaan kuusi esimerkkiyritystä, joista jokaiselle varataan yksi kappale väliltä 2.2.1–2.2.6. Kappaleessa esitetään ensin yrityksen perustiedot, minkä jälkeen tarkastellaan yrityksen anturitarjontaa.

2.2.1 Althen Sensors & Controls

Althen Sensors & Controls on vuonna 1978 perustettu alankomaalainen yritys, joka myy antureja ja mittausjärjestelmiä. Yritys tarjoaa valmiita tuotteita ja yksittäisille asiakkaille räätälöityjä kokonaisratkaisuja. Yrityksellä on toimipisteitä Alankomaiden lisäksi Ranskassa, Ruotsissa, Saksassa sekä Yhdysvalloissa. [30]

Yrityksen tarjontaan kuuluu yksi 6-DOF-anturiperhe, jonka tuotemerkki on FN7325 [28]. FN7325-anturi perustuu Wheatstonen siltaan kytkettyihin venymäliuska-antureihin, joiden teoriaa käsitellään kappaleessa 2.1.4. Althen Sensors & Controls suosittelee anturin käyttämistä mekaanisissa liitännöissä, rakennetesteissä ja teollisissa testiympäritöissä. [31]

Taulukko 1. *FN7325-anturin mittausaluevaihtoehdot. Perustuu lähteeseen [31].*

Anturimalli	F_{xy} **(N)**	F_z **(N)**	M_{xyz} **(Nm)**
FN7325-M6	5 000	15 000	200
FN7325-M8	15 000	30 000	600
FN7325-M10	30 000	50 000	1 200
FN7325-M12	60 000	100 000	2 800
FN7325-M16	100 000	250 000	7 000

FN735-anturin voiman mittausalue on valittavissa välillä 5–250 kilonewtonia. Mittausalueelle on viisi vakioitua vaihtoehtoa, jotka on esitetty taulukossa 1. Valmistajan ilmoittama anturin maksimikuorma on 120 % anturin nimelliskuormasta. Valmistaja ei ilmoita anturin erottelukykyä. [31]

Valittavan mittausalueen lisäksi anturi voidaan yksilöidä asiakkaan tarpeisiin valitsemalla kuudesta vapausasteesta vain ne, jotka tarvitaan tiettyyn sovellukseen. Esimerkkinä annetaan FN7325-M6-ZLM-anturi, joka mittaa vain *z*-suuntaisen voiman sekä *x*- ja *y*-suuntaiset momentit. Anturiin voidaan myös sisällyttää signaalivahvistimet. Kolmas yksilöintivaihtoehto on jakaa anturin kanavat erillisiin kaapeleihin tai liittimiin. [31]

2.2.2 ATI Industrial Automation

ATI Industrial Automation on vuonna 1989 perustettu yhdysvaltalainen yritys, joka valmistaa teollisuusrobottien päätetyökaluja. Yrityksen tarjonta koostuu pääosin työkalunvaihtajista, voima-momenttiantureista, leikkuutyökaluista sekä törmäysantureista. [29]

Yrityksen 6-DOF-voima-momenttianturitarjontaan kuuluu kuusi tuoteperhettä, jotka sisältävät yhteensä 24 eri anturimallia [29]. Anturit perustuvat kappaleen 2.1.4 venymäliuskatekniikkaan [32]. Valmistuotteiden mittausaluevaihtoehdot on esitetty tuoteperheittäin taulukossa 2. Valmistaja ei ilmoita anturimallien maksimikuormitustietoja. [29]

Taulukko 2. *Anturituoteperheet, ATI Industrial Automation. Perustuu lähteeseen [29].*

Tuote-perhe	Nimelliskuorma			Erottelukyky	
	F_{xy} (N)	F_z (N)	M_{xyz} (Nm)	$F_{xyz,min}$ (N)	$M_{xyz,min}$ (Nm)
Nano	32–250	36–1 000	0,2–6	0,0015–0,0208	0,0004–0,0250
Mini	80–2 800	160–6 800	2–120	0,005–0,0804	0,0001–0,0031
Gamma	130	400	10	0,0063	0,0005
Delta	660	1 980	60	0,0313	0,0019
Axia	150–4 000	470–6 000	8–300	0,04–1,6666	0,002–0,0699
Omega	1 900–40 000	3 800–88 000	80–6 000	0,0714–1,6	0,0023–0,2

Valmiiden tuotevaihtoehtojen lisäksi ATI Industrial Automation tarjoaa asiakkaan tarpeisiin yksilöityjä antureita, kuten säteilyä sietäviä, tyhjiökammioon tarkoitettuja, öljyyn upotettavia sekä vaihtoehtoisella kaapeloinnilla varustettuja anturimalleja [33]. ATI Industrial Automation suosittelee voima-momenttiantureitaan teollisuusautomaatio-, valmistustekniikka- tai tutkimustyösovelluksiin [29]. Useimmat anturimallit ovat IP-60-, IP-65- tai IP-68-luokituksen (engl. ingress protection rating) mukaisesti pöly- ja kosteussuojattuja [29] [34].

2.2.3 Bota Systems

Bota Systems on sveitsiläinen yritys, joka erikoistuu moniakselisten voima-momenttianturien suunnittelemiseen ja valmistamiseen. Yritys tarjoaa laajaa 6-DOF-anturien valikoimaa erilaisilla käyttöliitynnöillä ja mittausalueilla. Voiman ja momentin mittausten lisäksi Bota Systems integroi osaan antureistaan muita toimintoja, kuten lämpötilan ja kiihtyvyyden mittauksen. [26]

Yrityksen 6-DOF-voima-momenttianturitarjontaan kuuluu seitsemän tuoteperhettä, jotka sisältävät yhteensä 13 eri anturimallia [26]. Anturit perustuvat kappaleen 2.1.4 venymäliuskatekniikkaan [35]. Anturien mittausaluevaihtoehdot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. *Anturimallien mittausalueet, Bota Systems. Perustuu lähteeseen [26].*

Tuote	Nimelliskuorma				Maksimikuorma				Erottelukyky			
	F_{xy} (N)	F_z (N)	M_{xy} (Nm)	M_z (Nm)	$F_{xy,max}$ (N)	$F_{z,max}$ (N)	$M_{xy,max}$ (Nm)	$M_{z,max}$ (Nm)	$F_{xy,min}$ (N)	$F_{z,min}$ (N)	$M_{xy,min}$ (Nm)	$M_{z,min}$ (Nm)
MiniONE	50	50	1	1	100	100	2	2	0,15	0,1	0,0018	0,0009
MiniONE Pro Serial	50	50	1	1	100	100	2	2	0,08	0,04	0,0007	0,0005
MiniONE Pro EtherCAT	50	50	1	1	100	100	2	2	0,035	0,021	0,0004	0,0003
Medusa Serial	400	500	5	8	1 000	2 000	12	15	0,18	0,07	0,003	0,0012
Medusa EtherCAT	400	500	5	8	1 000	2 000	12	15	0,1	0,05	0,002	0,0006
Rokubi Serial	500	1 200	15	12	2 500	4 000	35	40	0,35	0,25	0,0072	0,003
Rokubi EtherCAT	500	1 200	15	12	2 500	4 000	35	40	0,2	0,15	0,004	0,002
SensONE Serial	500	1 200	15	12	2 500	4 500	35	40	0,35	0,25	0,0072	0,003
SensONE EtherCAT	500	1 200	15	12	2 500	4 500	35	40	0,2	0,15	0,004	0,002
LaxONE Serial	1 800	4 000	60	60	7 200	12 800	160	200	0,72	0,54	0,021	0,007
LaxONE EtherCAT	1 800	4 000	60	60	7 200	12 800	160	200	0,4	0,3	0,012	0,004
MegaONE Serial	4 000	8 000	180	180	20 000	26 000	320	600	1,5	1,1	0,06	0,02
MegaONE EtherCAT	4 000	8 000	180	180	20 000	26 000	320	600	0,75	0,55	0,03	0,01

MiniONE-anturi soveltuu pienen kokonsa ansiosta ahtaisiin tiloihin. MiniONE Pro -anturi on herkemmäksi muunneltu versio MiniONE-anturista. Rokubi-anturi on pienikokoinen ja kevyt. Samalle mittausalueelle ja herkkyydelle suunniteltu SensONE-anturi on tarkoitettu yhteistyörobottikäyttöön. [26]

2.2.4 FANUC

FANUC on vuonna 1956 perustettu japanilainen yritys, joka suunnittelee ja valmistaa CNC-työstökoneiden ohjaimia, servomoottoreja ja -vahvistimia sekä teollisuusrobotteja [36] [37]. FANUC myy myös moniakselisia voima-momenttiantureja, jotka voidaan integroida osaksi yrityksen valmistaman teollisuusrobotin säätöjärjestelmää [25]. Tämä erottaa FANUC:in muista kappaleiden 2.2.1–2.2.6 anturivalmistajista, koska yleensä vain teollisuusrobotin valmistaja tuntee robottia ohjaavat matalan tason algoritmit [38, s. 2].

Taulukko 4. *6-DOF-anturimallien vertailutiedot, FANUC. Perustuu lähteeseen [39].*

Tuote	Nimelliskuorma		Maksimikuorma		Erottelukyky	
	F_{xyz} (N)	M_{xyz} (Nm)	$F_{xyz,max}$ (N)	$M_{xyz,max}$ (Nm)	$F_{xyz,min}$ (N)	$M_{xyz,min}$ (Nm)
FS-15iA	147	11,8	1 570	125	0,39	0,016
FS-40iA	392	39,2	3 920	392	1,0	0,029
FS-100iA	980	156	9 800	1 560	2,0	0,08
FS-250iA	2 500	500	25 000	5 000	4,9	0,25

FANUC valmistaa viittä eri voima-momenttianturin mallia, joista neljä ovat 6-DoF-anturejа [39]. Taulukko 4 on vertailu yrityksen 6-DOF-anturimallien mittausalueista, maksimikuormista sekä erottelukyvyistä. Yritys suosittelee voima-momenttianturejaan kokoonpano- ja jäysteenpoistotehtäviin, hiomiseen, kiillottamiseen, sekä osien tarkastukseen [39].

2.2.5 Hottinger Brüel & Kjær

Hottinger Brüel & Kjær, lyhyesti HBK, on tanskalaishollantilainen yritys, joka myy mittaja testilaitteita, ohjelmistoja sekä palveluja [40]. Yritys on perustettu nykyisessä muodossaan vuonna 2019. Nykyisen yrityksen edeltäjä perustettiin 1940-luvulla [41]. Yrityksen tarjontaan kuuluu yksi moniakselinen voima-momenttianturiperhe, jonka tuotemerkki on MCS10 [27]. MCS10-anturiperheen ominaisuudet on esitetty taulukossa 5. Valmistaja ei ole ilmoittanut anturien erottelukykytietoja [42].

Taulukko 5. *HBK MCS10-anturin ominaisuudet. Perustuu lähteeseen [42].*

Tyyppi	Nimelliskuorma				Maksimikuorma			
	F_{xy} (N)	F_z (N)	M_{xy} (Nm)	M_z (Nm)	$F_{xy,max}$ (N)	$F_{z,max}$ (N)	$M_{xy,max}$ (Nm)	$M_{z,max}$ (Nm)
MCS10-005	1 000	5 000	50	50	2 500	8 500	155	75
MCS10-010	2 000	10 000	150	150	5 400	20 000	465	270
MCS10-025	5 000	25 000	350	250	9 500	35 000	840	450
MCS10-050	10 000	50 000	700	500	15 000	95 000	1 610	900
MCS10-100	20 000	100 000	2 000	1 500	40 000	200 000	4 600	2 850

MCS10-anturi voidaan yksilöidä nimelliskuorman valinnan lisäksi rajaamalla anturin mittaamat kanavat. Anturit voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: 3-komponenttianturit mittaavat vain voimat *Fx*, *Fy* sekä *Fz*, kun taas 6-komponenttianturit mittaavat myös momentit *Mx*, *My* ja *Mz*. Karkean jaon lisäksi jokainen mitattava kanava voidaan valita erikseen. [42]

Viimeinen yksilöintivaihtoehto on mittauslaitteen tunnistusjärjestelmän eli TEDS:in (engl. transducer electronic data sheet) lisääminen anturiin [42]. TEDS on anturiparametrien tallennusjärjestelmä, joka mahdollistaa anturin parametrien automaattisen konfiguroinnin anturiin kytkettyihin järjestelmiin [43; katso 44]. Automaattinen parametrisointi yksinkertaistaa anturien siirtämistä järjestelmien välillä ja vähentää virhealtista anturin parametrisoinnissa tehtävää manuaalista yötä [44].

2.2.6 Kistler Group

Kistler Group on vuonna 1959 perustettu sveitsiläinen yritys, joka kehittää dynaamisen paineen, voiman, momentin ja kiihtyvyyden mittalaiteteknologiaa [45]. Yrityksen voima- ja momenttianturit perustuvat kappaleen 2.1.3 pietsosähköiseen anturitekniikkaan. Yrityksen 9306A-tuoteperheeseen kuuluu kolme 6-DOF-voima-momenttianturia. [46]

9306A-anturiperheeseen kuuluu *z*-suunnassa lyhyt versio 9306A31, keskipituinen versio 9306A41 sekä normaalikokoinen nimikkomalli 9306A [24]. Anturien mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti koon mukaan [47]. 9306A-perheen anturien mittausalueet, maksimiylikuormat sekä erottelukyvyt esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. *Kistler 9306A-perheen anturien ominaisuudet. Perustuu lähteeseen [47].*

Tyyppi	**Nimelliskuorma**				**Maksimikuorma**		
	F_{xy} (N)	F_{z-} (N)	F_{z+} (N)	M_{xyz} (N)	$F_{xy,max}$ (N)	$F_{z-,max}$ (N)	$F_{z+,max}$ (N)
9306A	5 000	5 000	10 000	200	5 500	5 500	11 000
9306A31	1 000	2 000	2 000	100	1 200	2 400	2 400
9306A41	5 000	5 000	10 000	150	5 500	5 500	11 000

Kistler Group suosittelee 6-DOF-antureja jousien ja vaimentimien, proteesien ja muiden tuotteiden voima-momenttitarkasteluihin sekä robotin suorittamiin kokoonpanotehtäviin [47]. Anturien rakenteet ovat jäykkiä ja pienikokoisia. Kistler Groupin käyttämien pietsosähköisten mittauselementtien luonnolliset taajuudet ovat suuria, joten ne soveltuvat dynaamisten ja lähes staattisten prosessien mittaamiseen. [24]

3. VOIMANSÄÄTÖ TEOLLISUUSROBOTIIKASSA

Työn kontekstissa voimansäädöllä tarkoitetaan robotin päätetyökalun ja robotin ympäristön välisten kontaktivoimien hallintaa, minkä avulla robotin ympäristöön kohdistaman kontaktivoiman suuruus ja suunta voidaan valita mielivaltaisesti. Robotin tukivarsien ja ympäristön välisten kontaktivoimien ohjausta puolestaan sovelletaan yhteistyörobotiikassa.

Voimansäätötekniikat voidaan luokitella kahteen pääkategoriaan, jotka ovat aktiivinen ja passiivinen voimansäätö. Passiivinen voimansäätö eli jousto-ohjaus perustuu robotin päätelaitteen jäykkyyteen: työkalu joustaa kontaktivoiman vaikutuksesta [4, s. 2]. Jousto-ohjattu robotti ohjelmoidaan asettamaan päätetyökalu osittain työkappaleen sisälle, jolloin päätelaitteen jousto pitää työkalun kiinni työkappaleessa.

Aktiivinen voimansäätö puolestaan perustuu kontaktivoimien takaisinkytkentään, jossa robotin päätelaitteen ja ympäristön välinen kontaktivoima mitataan ja mitattua tietoa käytetään robotin ohjauksessa. Näin robotin ohjaimeen muodostuu suljettu voimansäätösilmukka. [4, s. 2] Aktiivista voimansäätöä voidaan soveltaa passiivista voimansäätöä helpommin jäykissä ympäristöissä [48, s. 1].

Aktiivinen voimansäätö voidaan jakaa edelleen suoraan ja epäsuoraan voimansäätöön. Suorassa voimansäädössä voimaa säädetään ohjaamalla robotin toimilaitteita suoraan, kun taas epäsuorassa voimansäädössä voimaa säädetään epäsuorasti vaikuttamalla liikesäätimen asetusarvoihin. [4, s. 2]

Koska työn tarkoituksena on tarkastella moniakselisten voima-momenttianturien käyttöä voimansäädössä, tämä luku keskittyy aktiiviseen eli suljetun silmukan voimansäätöön. Aliluvussa 3.1 tutustutaan aktiivisen voimansäädön perusteisiin yksinkertaistettujen sovellusesimerkkien avulla. Aliluvussa 3.2 esitellään hybridisäätö, joka yhdistää robotin asennon- ja voimansäädön käsitteet yhdeksi kokonaisuudeksi.

3.1 Voimansäädön perusteet

Kun robotin päätelaite koskettaa ympäristöä, robotin ja ympäristön välille syntyy vuorovaikutus, joka tunnetaan kontaktivoimana. Kontaktivoima koostuu voima- ja momenttiosista, joista voima pyrkii siirtämään kappaletta voima-akselin suuntaisesti ja momentti pyrkii kiertämään kappaletta momenttiakselin ympäri. Yleisessä tapauksessa voima ja

momentti mallinnetaan kolmiulotteisina vektoreina, jotka yhdistämällä päädytään kuusiulotteiseen kontaktivoimavektoriin.

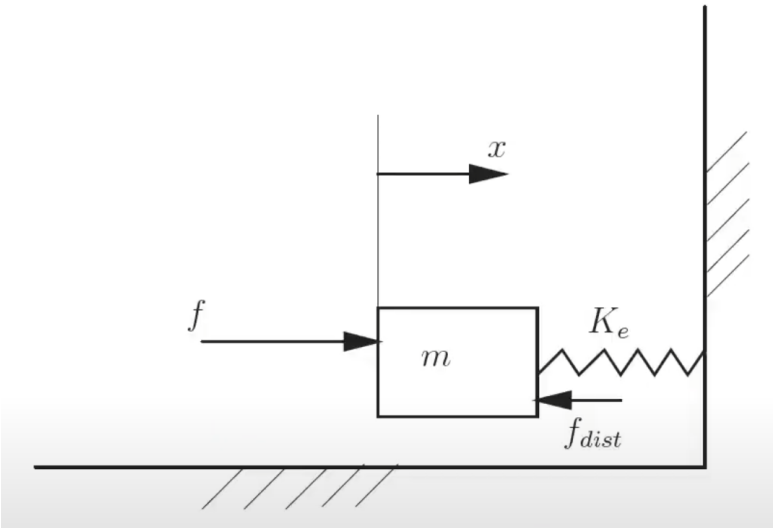
Kontaktivoima voidaan mitata asentamalla robotin ranteen ja päätelaitteen väliin voimamomenttianturi, mikä mahdollistaa kontaktivoiman takaisinkytkennän ja suljetun voimansäätösilmukan [4, s. 2]. Eri tarkoituksiin on kehitetty erilaisia antureja, joiden avulla voidaan mitata yksittäisiä tai useita kontaktivoiman komponentteja. Tämä työ keskittyy näistä yleisimpään eli 6-DOF-anturiin, jolla voidaan mitata voima ja momentti kolmen karteesisen akselin suhteen, kuten esitetään kuvassa 1.

Kontaktivoiman asetus- ja mittausarvoista muodostetaan erosuure, joka pyritään minimoimaan säätösilmukalla, jossa voimansäädin ohjaa robotin niveliä. Robotin nivelten tuottamien momenttien yhteisvaikutus muodostaa robotin päätelaitteen ja ympäristön välisen kontaktivoiman, joka hakeutuu tavoite- eli asetusarvoon.

Voimasäädin luodaan analyyttisesti mallintamalla robotin päätelaitteen ja ympäristön välinen vuorovaikutus jousi-massasysteeminä. Tällöin ympäristö mallinnetaan jousena, jonka jousivakiota kutsutaan ympäristön jäykkyydeksi. Useimmissa voimansäätötehtävissä ympäristö on hyvin jäykkä, jolloin säätimen yhtälöitä voidaan yksinkertaistaa olettamalla ympäristö täysin joustamattomaksi. [49] Yksiulotteista jousi-massasysteemiä tarkastellaan luvussa 3.1.1. Yksiulotteisen mallin avulla muodostetaan kolmiulotteinen malli luvussa 3.1.2.

3.1.1 Voimansäätö yksiulotteisessa sovelluksessa

Yksiulotteinen jousi-massasysteemi koostuu jouseen kytketystä massasta, johon vaikuttaa ulkoinen voima. Yksinkertaisuuden vuoksi systeemin liike on rajattu yksiulotteiseksi, eli massa voi liikkua vain yhden akselin suuntaisesti. Ulkonen voima liikuttaa massaa akselia pitkin ja jousi vastustaa liikettä pyrkiessään palauttamaan massan takaisin tasapainoasemaan.



Kuva 5. *Yksiulotteinen jousi-massasysteemi [49].*

Yksiulotteista jousi-massasysteemiä havainnollistaa kuva 5. Ulkoista voimaa *f* vastaa robotin tuottama voima. Jousen jousivoima K_e vastaa ympäristön jäykkyyttä. Näiden yhteisvaikutus on kontaktivoima. Systeemin massa *m* vastaa robotin päätelaitteen massaa, joka puolestaan johtaa systeemin dynamiikkaan. [49] Mallin avulla voidaan muodostaa massan liikeyhtälöt, joista päädytään yksiulotteisen voimansäätimen yhtälöön [50, s. 3].

3.1.2 Voimansäätö kolmiulotteisessa sovelluksessa

Yksiulotteiset voiman ja momentin säätöyhtälöt voidaan yhdistää moniulotteiseksi vektoriyhtälöksi. Tällöin muuttujat korvataan luvun 3.1 alussa esitellyllä kuuden komponentin voima-momenttivektorilla ja vakiot korvataan vastaavilla diagonaalisilla neliömatriiseilla. Näin voiman ja momentin säätö eri akseleiden suhteen pysyy lineaarisesti riippumattomana muista akseleista. Ratkaisuna saatu malli mahdollistaa kontaktivoiman kuuden komponentin itsenäisen säädön.

Yksiulotteisten voima-momenttisäätimien yhdistämisen lisäksi kolmiulotteiseen voimansäädin voi kompensoida robotin päätetyökalun painoa. Robotin päätetyökaluun kohdistuva painovoima vaikuttaa päätetyökaluun vakiovoimalla, joka vaikuttaa ennustettavasti robotin ranteen ja päätetyökalun välissä olevan voima-anturin lukemaan. Koska päätetyökalun massa ja orientaatio robotin maailmankoordinaatistossa tunnetaan, painovoiman vaikutus voidaan kumota sopivalla kompensaattorilla [13, s. 3] tai anturin kalibroinnilla [51].

Robotti pystyy sijoittamaan päätetyökalun haluttuun asentoon usealla eri tavalla. Täten robotin tukivarsia voidaan liikuttaa ilman että työkalu liikkuu. Tätä liikeulottuvuutta kutsutaan robotin nolla-avaruudeksi. Kolmiulotteinen voimansäätö hyödyntää robotin nolla-avaruutta kontaktivoiman säädössä. Voiman säätäminen nolla-avaruuden avulla voi johtaa robotille vaarallisen nopeisiin liikkeisiin [52].

Kontaktivoiman säätöä voidaan parantaa valitsemalla robotti, joka koostuu useammasta kuin kuudesta nivelestä. Esimerkiksi seitsennivelisen robotin nolla-avaruus on kuusinivelisen robotin nolla-avaruutta laajempi, sillä kolmiulotteisessa avaruudessa robotin päätetyökalu voidaan sijoittaa vapaasti jo kuuden nivelen avulla. Tällaista robottia kutsutaan redundantiksi manipulaattoriksi. [52]

3.2 Hybridisäätö

Kappaleen 3.1.2 moniulotteinen voimansäätöstrategia on havainnollistava, mutta perustuu oletukseen, jossa robotin päätelaite on mallinnettu jousi-massasysteeminä kaikkien voiman ja momentin komponenttien suhteen. Tämä on mahdollista vain tilanteessa, jossa robotin päätelaite on kytketty ympäristöön. Todellisuudessa tästä on harvoin kyse, sillä robotin päätelaite on yleensä vapaa liikkumaan useaan suuntaan.

Duaalisuusperiaatteen mukaan kontaktivoimaa voi säätää vain niissä suunnissa, joissa robotin päätelaite on kosketuksessa ympäristön kanssa [53, s. 494; katso 54]. Lisäksi robotin päätelaitetta halutaan usein liikuttaa vapaissa suunnissa. Ympäristön systeemille asettamia ehtoja kutsutaan luonnollisiksi rajoitteiksi ja vapaasti valittuja ehtoja kutsutaan keinotekoisiksi rajoitteiksi [53, s. 437–439].

Hybridisäätö tarjoaa ratkaisun molempiin ongelmiin mahdollistamalla samanaikaisen voiman- ja asemansäädön. Yhtäaikainen ja samansuuntainen voiman- ja liikkeensäätö ei kuitenkaan ole mahdollista, joten työtehtävä tulee jakaa voima- ja liikekomponentteihin, joita voidaan ohjata erillisillä voima- ja liikesäätimillä [53, s. 437–439]. Yhden työsyklin aikana voima- ja liikekomponentit voivat vaihtua useita kertoja, joten komponenttijako tulee tehdä erikseen joka tehtävälle. Tehtävien jakamisesta kerrotaan lisää luvussa 3.2.1.

Hybridisäätimessä voiman ja liikkeen komponentteja ohjataan kytkinmatriisilla. Kytkinmatriisi on diagonaalinen neliömatriisi, jonka avulla kuudesta liikeulottuvuudesta valitaan liikkeensäätimen ohjaamat komponentit. Voimansäätimen ohjaamat komponentit saadaan puolestaan laskemalla yksikkömatriisin ja kytkinmatriisin erotus. [53, s. 440]

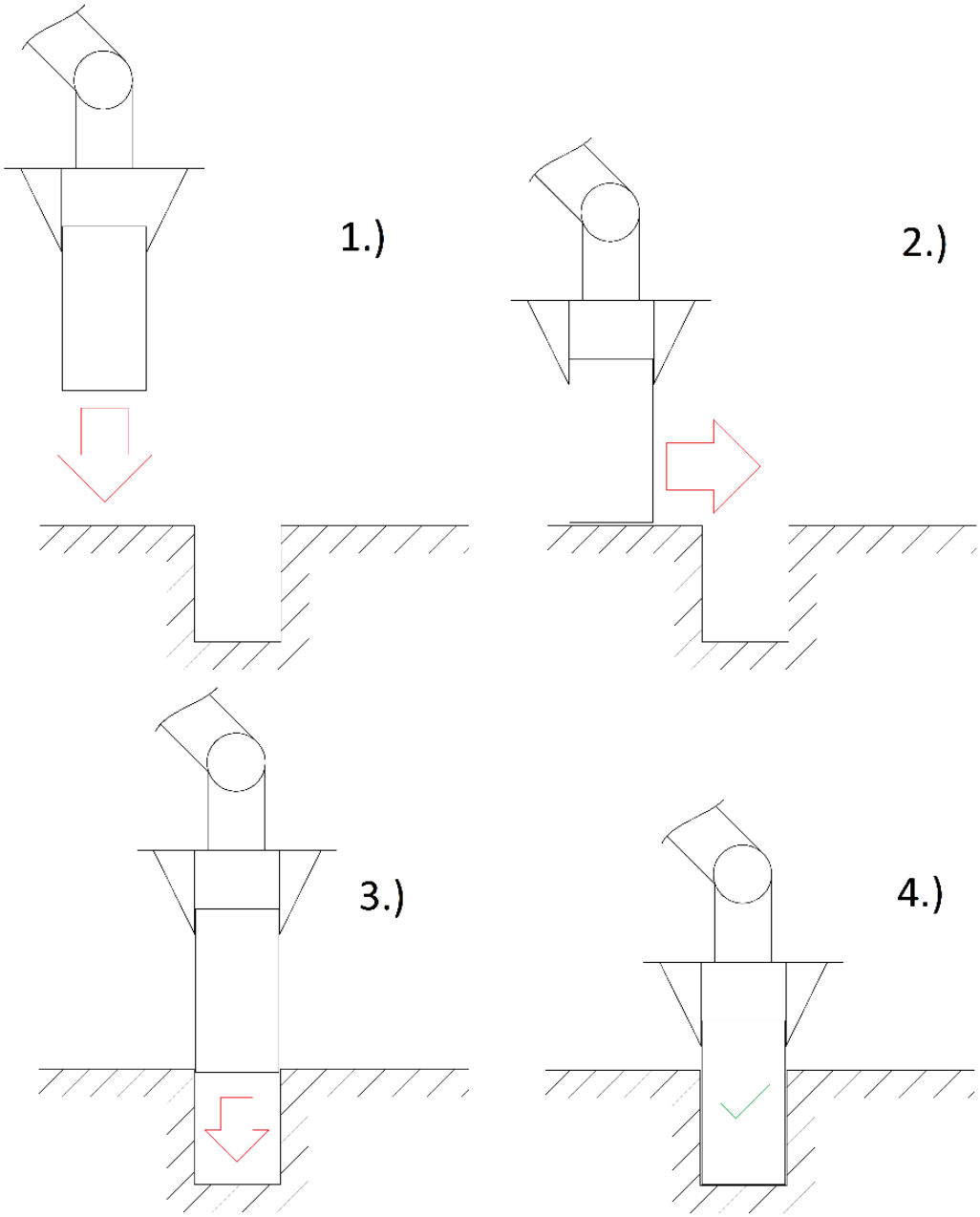
Hybridisäätimen rakenteella on kaksi päätyyppiä, jotka ovat rinnakkais- ja sarjasäädin. Rinnakkaishybridisäädin eli eksplisiittinen hybridisäädin koostuu rinnakkain kytketystä voiman- ja liikkeensäätimestä, jotka ohjaavat robotin niveliä. Tällöin voimalle muodostuu liikkeestä erillinen säätösilmukka, eli kyseessä on suora voimansäätö. Sarjahybridisäädin eli implisiittinen hybridisäädin puolestaan koostuu sarjaan kytketystä voiman- ja liikkeensäätimestä muodostaen kaskadisäätimen, jossa voimansäätimen lähtö ohjaa liikkeensäätimen asetusarvoa ja asemansäädin ohjaa robotin niveliä. Tällöin kyseessä on epäsuora voimansäätö.

Rinnakkaissäätimen rakenne esitetään tarkemmin aliluvussa 3.2.2 ja sarjasäätimen rakenne esitetään vastaavasti aliluvussa 3.2.3. Aliluvuissa esitettävien säätimien lohkokaaviokuvissa on yksinkertaistettu muutamia yksityiskohtia: Säätimet toimivat robotin päätelaitteen paikkakoordinaatistossa eikä muunnoksia karteesisen koordinaatiston ja robotin nivelkoordinaatiston välillä ole esitetty. Nämä muunnokset on sisällytetty robottimalliin. Lisäksi robotin nivelten enkoodereja ei ole mallinnettu antureina, vaan ne on oletettu osaksi robotin mallia. Voima-momenttianturi puolestaan on erillinen kokonaisuus, joten sille on erotettu oma malli. Ympäristön malli kuuluu lohkokaavioihin vain, jotta voima-momenttianturi voidaan kytkeä voimansäätösilmukan osaksi. Todellisuudessa ympäristöstä ei ole tarkkaa mallia, minkä takia voimansäätöä tarvitaan [4, s. 1–2].

3.2.1 Tehtävien jakaminen

Hybridisäädön keskeinen toimiperiaate on tehtävien jakaminen alkeistehtäviin. Alkeistehtävät ovat yksinkertaistettuja työvaiheita, joissa työavaruuden jako voima- ja liikekomponentteihin pysyy vakiona: tietyissä suunnissa vaaditaan voimansäätöä ja muissa suunnissa liikettä. Tehtävän jakaminen alkeistehtäviin auttaa tunnistamaan nämä voima- ja liikekomponentit.

Hyvä esimerkki tehtävän jakamisesta on tappi-reikä-sovitus, jossa robotti asentaa tapin työkappaleessa olevaan reikään. Tappi-reikä-sovitus koostuu neljästä alkeistehtävästä, joita kuva 6 havainnollistaa: Ensin tappi lähestyy työkappaleen pintaa kohtisuorasti. Kun tappi koskettaa työkappaletta, siirrytään toiseen työvaiheeseen, jossa tappi liukuu pintaa pitkin reikää kohti. Kun tappi on reiän kohdalla, siirrytään kolmanteen työvaiheeseen, jossa tappi syötetään reikään. Neljännessä vaiheessa tappi ei enää liiku, koska se koskettaa reiän pohjaa, ja täten kokoonpano on valmis. [49] Kun työtehtävä on jaettu useaan alkeistehtävään, jokaiselle alkeistehtävälle voidaan määritellä luonnolliset ja keinotekoiset rajoitteet.



Kuva 6. *Tappi-reikä-sovitustehtävän työvaiheet (alitehtävät) [49].*

Ensimmäisessä vaiheessa tappi on vapaassa liikkeessä, joten luonnolliset rajoitteet vaativat liikkeensäätöä kaikkien kuuden komponentin suhteen. Tapin halutaan liikkuvan kohtisuorasti pinnan suhteen, joten keinotekoiset rajoitteet mahdollistavat vain lineaarisen liikkeen yhden akselin suhteen.

Toisessa vaiheessa tappi on kosketuksissa pinnan kanssa, mikä asettaa luonnollisen rajoitteen liikkeelle: tappia ei voida liikuttaa pinnan sisälle. Muissa suunnissa tapin liike on vapaa. Keinotekoisena rajoitteena halutaan asettaa jokin suuruus kontaktivoimalle, jotta tappi ei vaurioita kappaleen pintaa ja pystyy liukumaan sitä pitkin sivuttaissuunnassa.

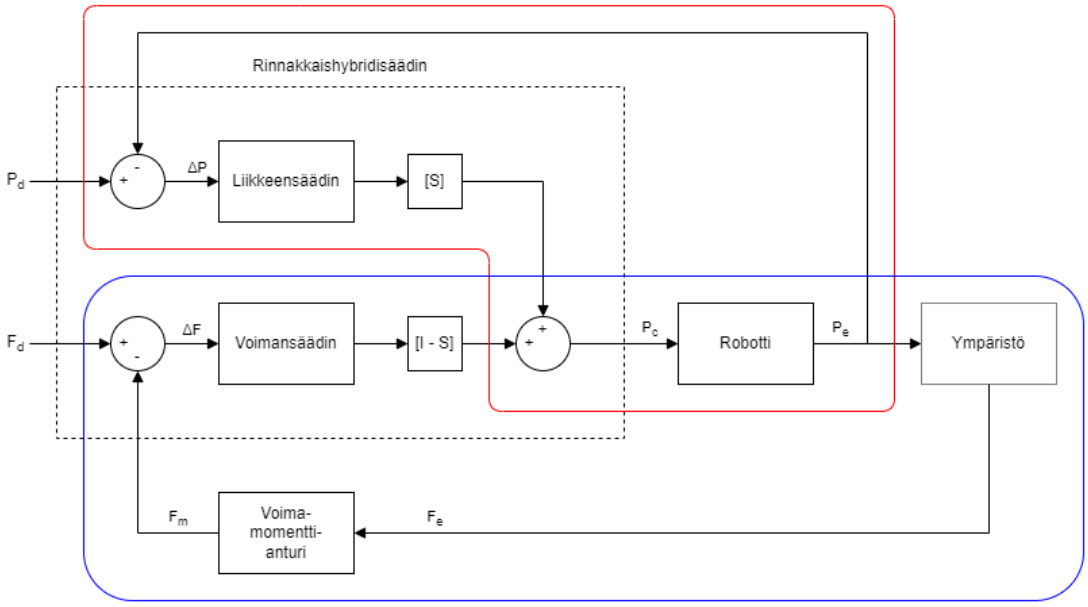
Kolmannessa vaiheessa tappia syötetään reikään, jolloin luonnolliset rajoitteet estävät tapin liikuttamisen tai kiertämisen sivuttaissuunnassa. Keinotekoisilla rajoitteilla voidaan estää tapin kiertäminen liikeakselin suhteen sekä asettaa haluttu syöttönopeus. Voima-anturia käytetään myös tunnistamaan vaiheen loppu.

Neljännessä vaiheessa tappi on asennettu lopulliseen syvyyteen reiässä. Luonnolliset rajoitteet estävät liikkeen syvemmälle reikään sekä sivuttaissuuntaisen liikkeen ja kierron. Keinotekoisena rajoitteena estetään tapin kiertäminen reiän akselin suhteen sekä tapin vetäminen ulos reiästä. Robotin tarttuja irrottaa otteensa tapista ja robotti palaa kotiasentoon odottamaan seuraavaa tehtävää.

3.2.2 Rinnakkaishybridisäädin

Rinnakkaishybridisäätimessä liikkeen- ja voimansäätimet toimivat rinnakkain ja kytkinmatriisi ohjaa niiden lähdöistä halutut ohjausarvot robotin toimilaitteille. Rinnakkaishybridisäädintä kutsutaan eksplisiittiseksi hybridisäätimeksi, sillä kytkinmatriisin vaikutuksen huomioiden robotin liikkeelle (tai paikalle) ja kontaktivoimalle on täysin erilliset säätösilmukat.

Rinnakkaishybridisäätimen lohkokaavio on esitetty kuvassa 7. Liikkeensäätösilmukka on korostettu punaisella ja voimansäätösilmukka on korostettu sinisellä. Kytkinmatriisia on merkitty kirjallisuudessa käytetyllä symbolilla S. Signaalit vastaavat seuraavia vektorisuureita: P_c on robotin toimilaitteille lähetettävä päätelaitteen asennon ohjausarvo, P_d on päätelaitteen asennon asetusarvo, P_e on päätelaitteen todellinen asento, ΔP on päätelaitteen todellisen asennon ja asetusarvon erosuure, F_d on kontaktivoiman asetusarvo, F_e on todellinen kontaktivoima, F_m on kontaktivoiman mittausarvo ja ΔF on todellisen ja mitatun kontaktivoiman erosuure.



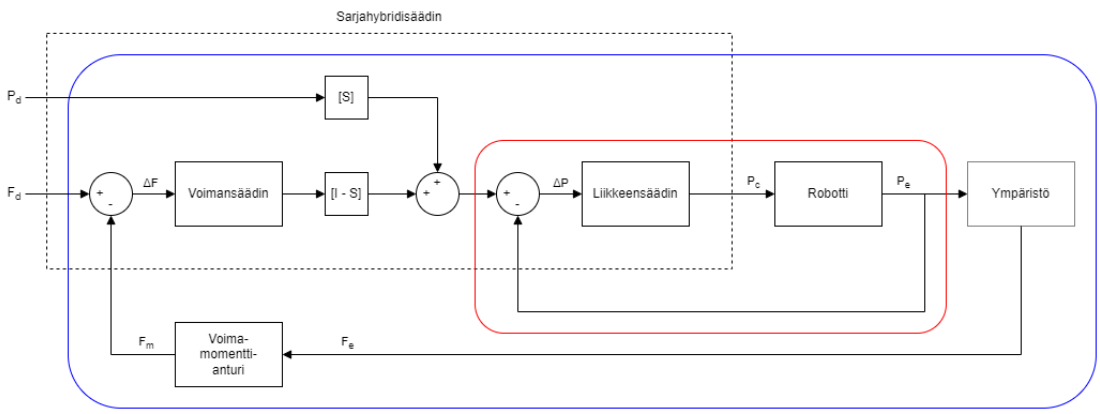
Kuva 7. *Rinnakkaishybridisäätimen rakenne. Perustuu lähteeseen [49].*

Rinnakkaissäätimen etu on sen yksinkertainen rakenne, joka mahdollistaa liikkeen- ja voimansäätimien mallintamisen erillisinä toisistaan. Korkean tason rakenteen lisäksi voimansäätimen sisäinen rakenne on yksinkertaisempi kuin sarjahybridisäätimessä, sillä sisemmän liikkeensäätösilmukan vaikutusta ei tarvitse huomioida voimansäädintä suunniteltaessa. Yksinkertaisen rakenteen ansiosta rinnakkaishybridisäätimen toteuttaminen on siis helpompaa kuin sarjahybridisäätimen, jos robotin liikkeensäätösilmukka on muokattavissa.

3.2.3 Sarjahybridisäädin

Sarjahybridisäädin on kaskadisäädin, jossa voimansäätimen lähtö ohjaa liikkeensäätimen asetusarvoa ja asemansäädin ohjaa robotin toimilaitteita. Kaskadisäätimessä on sisäkkäisiä säätösilmukoita, joista ulompi ohjaa sisemmän asetusarvoa. Sarjamuotoinen säädin eroaa rinnakkaismuotoisesta säätimestä juuri tämän ohjauslain takia: voimansäätimen on ohjattava liikesäätimen asetusarvoa, eli voimansäädin muokkaa robotin liikeratata hieman työkappaleen sisälle tuottaakseen halutun kontaktivoiman.

Sarjahybridisäätimen lohkokaavio on esitetty kuvassa 8. Tässä kaskadisäädön sisempi eli liikkeensäätösilmukka on korostettu punaisella ja ulompi eli voimansäätösilmukka on korostettu sinisellä. Kuvan symbolit ovat samat kuin rinnakkaishybridisäätimestä kertovan kappaleen 3.2.2 vastaavassa kuvassa 7, jotta säätimien rakenteita voi vertailla helposti.



Kuva 8. *Sarjahybridisäätimen rakenne. Perustuu lähteeseen [49].*

Sarjamuotoisen säätimen voimansäätösilmukka voidaan rakentaa olemassa olevan liikkeensäätösilmukan ympärille muuttamatta sen rakennetta. Tämä on sarjahybridisäätimen etu, sillä robotin valmistajan toimittaman säädin on yleensä musta laatikko, eli sen sisäinen rakenne on käyttäjälle tuntematon. Täten valmista liikkeensäätösilmukkaa ei voida muokata eli rinnakkaissäätimen rakentamiseksi tulisi mallintaa myös uusi asemansäädin. Alan kirjallisuuden mukaan sisempi liikkeensäätösilmukka kuitenkin rajoittaa systeemin kaistanleveyttä, joten rinnakkaishybridisäätö johtaa parempaan lopputulokseen.

4. SÄÄTÖTEKNIIKAN JA SOVELLUSTEN KEHITYS

Edellisessä luvussa tarkastellaan voimansäädön perusteita. Luku ei kuitenkaan kuvaa voimansäädön alan nykytilaa, vaan pyrkii esittämään voimansäädön peruskäsitteet yksinkertaisessa muodossa. Alalla on tehty runsaasti uusia tutkimuksia, jotka pyrkivät parantamaan voimaohjatun robotiikan säätötekniikkaa sekä sovelluksia.

Tässä luvussa esitellään robotiikan voimansäädön uusia tutkimuksia viimeisen viiden vuoden ajalta. Tutkimukset on jaettu kahteen luokkaan tutkimuskohteen perusteella: Aliluvussa 4.1 tarkastellaan viimeaikaista voimansäätötekniikan kehitystä. Aliluvussa 4.2 tarkastellaan voimansäädön sovelluksiin liittyvää kehitystä.

4.1 Säätötekniikan tutkimus

Voimansäädön perusteet on esitetty tutkimuksissa jo 80-luvulla, jonka jälkeen kehitys on jatkunut. Luvussa 3 esitetään voimansäädön perusteet sekä kaksi perinteistä hybridisäädintä. Tässä aliluvussa tarkastellaan viimeisten viiden vuoden aikana voimansäädön alalla tehtyä kehitystä teollisuusrobotiikan näkökulmasta.

Aliluvussa 4.1.1 esitetään impedanssiohjauksen keskeinen ongelma sekä sen parantamiseen kohdistettuja tutkimuksia. Aliluvussa 4.1.2 esitellään syitä ulkoisen voima-momenttianturin käyttöä vastaan sekä vaihtoehtoisia kontaktivoimaestimaattoreita koskevia tutkimuksia. Aliluvussa 4.1.3 esitetään systeemimallissa tehtyjen oletusten korjaamiseen tähtääviä tutkimuksia.

4.1.1 Impedanssiohjauksen jatkokehitys

Hogan esitti impedanssiohjauksen vuonna 1984 julkaistussa artikkelissa [55]. Impedanssiohjauksessa robotin päätelaitteen asennon ja kontaktivoiman välille luodaan yhteys mallintamalla kosketusvuorovaikutus jousi-massa-vaimenninsysteeminä [56, s. 1]. Koska klassinen impedanssiohjaus vaatii tarkan mallin robotin ympäristöstä, mallin epävarmuus johtaa huonoon normaalivoiman säätötulokseen [57, s. 2].

Impedanssiohjauksen jatkokehitystä on tehty viime aikoina runsaasti. Li et al. lisäsivät Kalman-suotimen voima-momenttianturin ja säätimen väliin suodattamaan mittauskohinaa. Artikkelissa esitetty säädin kompensoi myös painovoiman vaikutusta. [58] Dawei et al. lisäsivät algoritmiin muuttuvan vaimennuksen estimoinnin [57]. An et al. tutkivat neuroverkon yhdistämistä impedanssiohjaukseen [56].

Lisäksi Tang et al. tutkivat liike- ja voima-avaruuksien osittaista erotusta. Tämä järjestelmä sietää mallinnusvirheitä, epävarmuuksia ja häiriöitä perinteistä täysin erotettua järjestelmää paremmin. [59]

4.1.2 Kontaktivoiman anturiton estimointi

Vaikka voima-anturillisten yhteistyörobottien käyttö teollisuudessa on yleistymässä, suurin osa teollisuusroboteista ei sisällä voima-antureita [60, s. 1]. Ulkoisen moniakselisen voima-momenttianturin lisääminen robottiin on kallista ja työlästä [61, s. 1–2]. Lisäksi voima-anturit ovat häiriöalttiita ja törmäysherkkiä [62, s. 1]. Näiden seikkojen takia huomattava osa alan uudesta tutkimuksesta on keskittynyt fyysisen voima-anturin korvaamiseen mallipohjaisilla estimaattoreilla.

Roveda et al. kehittivät laajennettuun Kalman-suotimeen perustuvan kontaktivoiman estimointimenetelmän [61]. Myöhemmin Roveda et al. kehittivät säätölain, joka hyödyntää EKF-suotimeen (engl. extended Kalman filter) perustuvaa ympäristön jäykkyyden estimaattoria [63]. Shan et al. kehittivät robotin nivelten asennon ja sähkövirran perusteella kontaktivoiman estimoivan neuroverkon [62].

4.1.3 Systeemin muiden osien mallinnus

Aiempi tutkimus on keskittynyt juuri manipulaattorin ja ympäristön välisen kontaktivoiman mallintamiseen ja tehnyt muista systeemin osista yksinkertaisia oletuksia. Uuden tutkimuksen mukaan muiden vuorovaikutusten mallintaminen kuitenkin parantaa säätötulosta.

Aliluvussa 3.1.2 mainitaan painovoiman vaikutuksen kumoaminen, joka on yksi esimerkki muusta vuorovaikutuksesta. Yu et al. tutkivat moniakselisen voima-momenttianturin painovoiman kompensointia [64]. Myös Li et al. käsittelivät artikkelissaan painovoiman kompensointia [58].

Aliluvussa 3.1 on esitetty oletus siitä, että robotin ympäristö on täysin jäykkä. Oletus ei kuitenkaan päde esimerkiksi tilanteessa, jossa työkappaleet ovat ohuita ja levymäisiä. Dometios et al. huomioivat ympäristön muodonmuutosten vaikutukset voimansäätötehtävään estimaattorilla [65]. Artikkelin estimaattori perustuu konenäköön ja kappaleen FEM-analyysiin (engl. finite element method) [65, s. 2].

4.2 Sovelluskohteiden tutkimus

Voimansäädön tutkimuksessa on keskitytty erityisesti kahteen teollisuuden sovelluskategoriaan, jotka ovat kokoonpano- ja viimeistelytehtävät. Useita eri työtehtäviä voidaan luokitella näihin kahteen kategoriaan samankaltaisen säätötilanteen perusteella. Kokoonpanotehtävissä manipulaattori yhdistää tuotteen osia suuremmaksi kokonaisuudeksi. Koska osien väliset toleranssit ovat teollisuusrobotin toistettavuutta pienempiä, kokoonpanotehtävien robotisointi on ollut vaikeaa. Voimasäädetty robotti aistii muutoksia työkappaleiden välisessä kontaktivoimassa, minkä avulla kappaleiden asento voidaan tunnistaa tarkemmin. [66, s. 1] Kokoonpanotehtäviin liittyvää tutkimusta tarkastellaan aliluvussa 4.2.1.

Viimeistelytehtävissä robotin päätelaite seuraa työkappaleen pintaa pitkin ja vaikuttaa pintaan sen normaalin suuntaisella voimalla. Robotin päätetyökalun tulee seurata työkappaleen pintaa, jossa saattaa olla yksittäisiä eroja työkappaleiden välillä. Laadukkaan työnjäljen saavuttamiseen vaaditaan aseteltavaa ja tasaista normaalivoimaa sekä nopeaa värähtelyjen vaimennusta [67, s. 2]. Viimeistelytehtäviin liittyvää tutkimusta tarkastellaan aliluvussa 4.2.2.

Servo-ohjatun teollisuusrobotin hyötykuorma on usein rajallinen [68]. Suurien kuormien siirtämiseen soveltuvat parhaiten raskaat manipulaattorit, jotka perustuvat hydrauliikkaan. Raskaiden manipulaattorien voimansäädön uutta tutkimusta tarkastellaan lyhyesti aliluvussa 4.2.3.

4.2.1 Kokoonpanotehtävät

Aliluvussa 3.2.1 esimerkkinä käytetty tappi-reikä-sovitus on yleisin alalla käytetty esimerkki kokoonpanotehtävästä [69, s. 2]. Tappi-reikä-sovituksessa robotti asentaa tapin muotoisen työkappaleen toisessa työkappaleessa olevaan reikään. Esimerkki tappi-reikä-sovituksesta on hydraulisylinterin mäntä-akseli-kokoonpanon asentaminen sylinteriputkeen.

Toinen yleinen kokoonpanotehtävä on reikä-tappi-sovitus, jossa robotti asentaa reiällisen kappaleen toisessa työkappaleessa olevaan tappiin [70, s. 1]. Esimerkki reikä-tappi-sovituksesta on laakerin asentaminen akselille. Näiden kahden esimerkin ekvivalenssi voi vaikuttaa ilmiselvältä, mutta robotin päätelaitteen voimien ja momenttien mallinnuksen näkökulmasta kyseessä on kaksi selkeästi erilaista tilannetta [70, s. 1–2]. Molemmat esimerkit kuitenkin kattavat samankaltaiset työvaiheet.

Salem et al. tutkivat kierteellisten ja kierteettömien pyöreiden osien kokoonpanoa voima-momenttianturin avulla [70]. Watson et al. tutkivat tappi-reikä- ja reikä-tappi-sovitustehtäviä moniakselisen voima-momenttianturin sekä konenäön avulla. Tutkimus mahdollistaa myös kierteisten osien kokoonpanemisen. [71]

Työkappaleiden liikuttamiseen ja työstämiseen on perinteisesti käytetty jokaiselle kappaleelle erikseen suunniteltuja kiinnikkeitä. Uuden kiinnikkeen suunnitteleminen erikseen jokaiselle työkappaleelle ei ole kannattavaa, jos tuotanto on joustavaa ja kappaleita on useita erilaisia. Kaksikätinen robotti voi pidellä yhdessä kädessä kappaletta, jota se työstää toisella kädellä. Ortega-Aranda et al. tutkivat kaksikätisen voimasäädetyn robotin käyttöä tappi-reikä-sovitukseen. [69]

Toinen alan uudesta tutkimuksesta ilmenevä trendi on usean erilaisen anturin hyödyntäminen kokoonpanotehtävissä. Yleisimmin voima-momenttianturia käytetään yhdessä konenäön sekä tekoälyn kanssa. Song et al. tutkimuksen mukaan konenäkö on epäluotettavaa, kun kokoonpanotehtävän työkappaleet ovat kosketuksessa [72, s. 2]. Jin et al. tutkimuksen mukaan voima-momenttianturin lisääminen konenäkösovellukseen parantaa kokoonpanon onnistumisen todennäköisyyttä merkittävästi [73, s. 9].

Työkappaleen reiät voidaan paikantaa konenäön ja tekoälyn avulla. Lopullinen kokoonpano tehdään klassisesti vain voimansäädön avulla, eli konenäkötietoa ei hyödynnetä kontaktivaiheessa. Song et al. sekä Jin et al. integroivat tutkimuksissaan konenäön myös kontaktivaiheeseen. [72] [73]

4.2.2 Viimeistelytehtävät

Viimeistelytehtävien kategoria kattaa useita työtehtäviä. Kaikki viimeistelytehtävät noudattavat samaa periaatetta, jossa robotin päätelaitetta halutaan liikuttaa työkappaleen pintaa pitkin. Samanaikaisesti manipulaattori vaikuttaa kappaleen pintaan asetettavalla normaalivoimalla.

Yleisin alan tutkimuksessa käytetty esimerkki on hionta, jossa robotin päätelaite on pyörivä hiomalaikka. Tasaisen pintalaadun saavuttamiseksi hiomalaikka tulee painaa hiottavan kappaleen pintaa vasten tasaisella voimalla [67, s. 2]. Hiomalaikkaa liikutetaan pintaa pitkin, kunnes koko pinta saadaan hiottua.

Gadringer et al. vertailivat passiivisen ja aktiivisen voimansäädön suorituskykyä hiontatehtävässä [67]. Passiivinen voimansäätö saavutti asetetut tavoitteet, kun taas aktiivinen

voimansäätö epäonnistui normaalivoiman säädössä sekä reaktionopeudessa. On kuitenkin huomattava, että tutkimuksessa käytettiin yhteistyörobottia, jota ei ole suunniteltu hiontatehtävään, eikä esimerkiksi ulkoista voima-momenttianturia. [67, s. 8]

Seo et al. kehittivät säätölain hiontarobotille, jonka jalusta voi liikkua. Tutkimus mahdollistaa robotin työaluetta suurempien pinta-alojen hiomisen. [74] Erkol et al. tutkivat työkappaleen pinnankarheuden estimointia voima-momenttianturin ja tekoälyn avulla. Tutkimus mahdollistaa hiontatehtävän automaattisen lopettamisen, kun kappaleen pinnankarheus on saavuttanut halutun arvon. [75]

4.2.3 Raskaat manipulaattorit

Raskaat manipulaattorit perustuvat teollisuusrobotin servomoottorien sijaan lineaarisiin hydraulisylintereihin. Raskaat manipulaattorit tunnetaan hydrauliikan mahdollistamasta suuresta ja räjähtävästä voimantuotosta. [76, s. 1] Suurin osa kaupallisista voima-momenttiantureista ei sovellu käytettäväksi raskaiden manipulaattorien sovelluksissa, sillä niiden kokemat voimat ovat hyvin suuria [76, s. 2].

Kružić et al. kehittivät menetelmän, jossa manipulaattorin jalustan alle asennetaan neljä erillistä venymäliuskaa. Näiden venymäliuskojen mittausdata analysoidaan neuroverkolla, joka estimoi kontaktivoimaa. Tutkimuksessa kehitetyn järjestelmän suorituskyky oli verrattavissa moniulotteisen voima-momenttianturin suorituskykyyn. [77] Tutkimuksessa esitetty ratkaisu voisi toimia pohjana raskaan manipulaattorin voimansäätöön, sillä anturielementtien koko ei ole rajoittava tekijä toisin kuin robotin ranteeseen asennettavissa moniakselisessa voima-momenttianturissa.

Shen et al. kehittivät raskaalle manipulaattorille uudenlaisen hierarkkisen voima-liikeohjaimen, jossa hydraulisylinterien dynamiikka erotettiin manipulaattorin mekaniikasta. Tutkimuksessa manipulaattori mallinnettiin erikseen kiertonivelisenä robottina ja hydraulisylinterien dynamiikalle löydettiin oma projektio kiertonivelten avaruuteen. [76]

5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia moniakselisten voima-momenttianturien toimintaa sekä käyttöä robotiikan voimansäätösovelluksissa. Työssä esiteltiin neljä alan kirjallisuudelle tyypillistä voima-anturielementtiä ja selvitettiin niiden toimintaperiaatteet. Myös voima-momenttianturien kaupallista tarjontaa selvitettiin lyhyesti. Anturin yhdistäminen osaksi suljettua voimansäätösilmukkaa loi pohjan työn 3. luvulle, jossa edettiin vaiheittain voimansäädön perusteista kahteen säädinrakenteeseen. Lopussa tarkasteltiin alalla viimeisen viiden vuoden aikana tehtyä tutkimusta.

Teollisuudessa on suosittu venymäliuska-anturia sen robustiuden ja yksinkertaisuuden takia, mutta edullisemman kapasitiivisen anturin kehitys vaikuttaa lupaavalta. Optisia voima-momenttiantureita on käytetty lääketieteessä niiden pienen koon vuoksi. MEMS-teknologian (engl. micro electro-mechanical system) kehitys on mahdollistanut pienikokoisten venymäliuska-anturien integroinnin robotin tarttujaan, mistä on hyötyä myös lääketieteen sovelluksissa. Pietsosähköiset anturit vaikuttavat soveltuvan parhaiten törmäysten tunnistamiseen, sillä ne eivät kykene mittaamaan staattisia voimia.

Hybridi voima-asento-ohjaus oli ensimmäinen esimerkki robotin samanaikaisesta voiman- ja liikkeenohjauksesta. Alan tutkimuksessa impedanssiohjaus ja sen jatkokehitetyt muodot vaikuttivat enemmän nykykehityksen kohteilta. Myös konenäkö- ja tekoälyelementtejä on alettu lisäämään voimansäätösovelluksiin. Voima-momenttianturi antaa robotille kosketusaistin ja konenäkö silmät. Näin teollisuusrobotti pystyy toimimaan paremmin ihmisen kaltaisesti teollisuuden kokoonpano- ja viimeistelytehtävissä.

Työ keskittyy pääosin teollisuusrobotiikkaan, mutta voimansäädölle on tarvetta myös muissa sovelluskohteissa kuten lääketieteessä, jossa voimansäätöä käytetään muun muassa tähystysleikkausroboteissa. Raskaiden manipulaattorien voimansäätö on toinen aihe, jota voisi tutkia enemmän.

LÄHTEET

[1] M.R. Pedersen, L. Nalpantidis, R.S. Andersen, C. Schou, S. Bøgh, V. Krüger, O. Madsen, Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.37, 2015, pp.282–291.

[2] J. Wei, W. Lihui, Industrial robotic machining: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.103, No.1–4, 2019, pp.1239–1255.

[3] A. Owen-Hill, How to Use Force Control With Robot Machining, RoboDK blog, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 12.8.2023):
https://robodk.com/blog/force-control-robot-machining/

[4] B. Siciliano, L. Villani, Robot force control, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1999, 146 p.

[5] N. Lauzier, Robotic Force Control: An Introduction, Robotiq, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 21.8.2023):
https://blog.robotiq.com/bid/53553/Robot-Force-Control-An-Introduction

[6] J.O. Templeman, B.B. Sheil, T. Sun, Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.304, 2020, p.111772.

[7] L. Dong-Hyuk, K. Uikyum, J. Hosang, R.C. Hyouk, A Capacitive-Type Novel Six-Axis Force/Torque Sensor for Robotic Applications, IEEE sensors journal, Vol.16, No.8, 2015, pp.2290–2299.

[8] M. Pu, Q. Liang, Q. Luo, J. Zhang, R. Zhao, Z. Ai, F. Su, Design and optimization of a novel capacitive six-axis force/torque sensor based on sensitivity isotropy, Measurement: journal of the International Measurement Confederation, Vol.203, 2022, pp.111868–111873.

[9] Q.-K. Liang, D. Zhang, G. Coppola, W.-N. Wu, K.-L. Zou, Y.-N. Wang, W. Sun, Y.-J. Ge, Y. Ge, Modular design and development methodology for robotic multi-axis F/M sensors, Scientific reports, Vol.6, No.1, 2016, pp.24689–24689.

[10] Y.-J. Wang, L.-C. Wu, J.-D. Ke, T.-F. Tien, Planar Six-Axis Force and Torque Sensors, IEEE sensors journal, Vol.21, No.23, 2021, pp.26631–26641.

[11] J. Long, Q. Liang, W. Sun, Y. Wang, D. Zhang, Ultrathin Three-Axis FBG Wrist Force Sensor for Collaborative Robots, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.70, 2021, pp.1–15.

[12] L. Xiong, Y. Guo, G. Jiang, X. Zhou, L. Jiang, H. Liu, Six-Dimensional Force/Torque Sensor Based on Fiber Bragg Gratings With Low Coupling, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.68, No.5, 2021, pp.4079–4089.

[13] A.H.H. Hosseinabadi, D.G. Black, S.E. Salcudean, Ultra Low-Noise FPGA-Based Six-Axis Optical Force–Torque Sensor: Hardware and Software, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No.10, 2021, pp.10207–10217.

[14] O. Al-Mai, M. Ahmadi, J. Albert, Design, Development and Calibration of a Lightweight, Compliant Six-Axis Optical Force/Torque Sensor, IEEE sensors journal, Vol.18. No.17, 2018, pp.7005–7014.

[15] K. Kyungrim, K. Jinwook, J. Xiaoning, K. Taeyang, Static Force Measurement Using Piezoelectric Sensors, Journal of sensors, Vol.2021, pp.1–8.

[16] Y.-J. Li, J. Zhang, Z.-Y. Jia, M. Qian, A novel piezoelectric 6-component heavy force/moment sensor for huge heavy-load manipulator's gripper, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.23, 2009, pp.1644–1651.

[17] W.-Q. Liao, Y.-Y. Tang, P.-F. Li, Y.-M. You, R.-G. Xiong, Large Piezoelectric Effect in a Lead-Free Molecular Ferroelectric Thin Film, Journal of the American Chemical Society, Vol.139, No.49, 2017, pp.18071–18077.

[18] B.Y. Sun, Y.G. Zhang, Piezoelectric Force Sensor and Dynamical Cutting Dynamometer, China Metrology Publishing House, 1985.

[19] Y.-J. Li, G.-C. Wang, J. Zhang, Z.-Y. Jia, Dynamic characteristics of piezoelectric six-dimensional heavy force/moment sensor for large-load robotic manipulator, Journal of the International Measurement Confederation, Vol.45, 2012, pp.1114–1125.

[20] A.S. Fiorillo, C.D. Critello, S.A. Pullano, Theory, technology and applications of piezoresistive sensors: A review, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.281, 2018, pp.156–175.

[21] Y. Qin, Y. Zhao, Y. Li, Y. Zhao, P. Wang, A High Performance Torque Sensor for Milling Based on a Piezoresistive MEMS Strain Gauge, Sensors, Vol.16, No.4, 2016, p.513.

[22] M.-K. Kang, S. Lee, J.-H. Kim, Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.209, 2014, pp.41–51.

[23] G.A. Kebede, A.R. Ahmad, S.-C. Lee, C.-Y. Lin, Decoupled Six-Axis Force–Moment Sensor with a Novel Strain Gauge Arrangement and Error Reduction Techniques, Sensors, Vol.19, No.13, 2019, pp.3012.

[24] 6-axis force-torque sensors, multi-component piezoelectric sensors (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz) / 9306A, Kistler Group, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 31.5.2023):
https://www.kistler.com/INT/en/cp/6-axis-force-torque-sensors-9306a/P0000699

[25] Force Sensors for automated assembly, contouring and measuring, FANUC, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 30.5.2023):
https://www.fanuc.eu/se/en/robots/accessories/robot-vision/force-sensor

[26] Force Torque Sensors, Bota Systems, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 30.5.2023):
https://www.botasys.com/force-torque-sensors

[27] Multi Component Sensors, Hottinger Brüel & Kjær, verkkosivu
Saatavissa (viitattu 31.5.2023):
https://www.hbkworld.com/en/products/transducers/multi-component

[28] Multi-axis Force Sensors, Althen Sensors & Controls, verkkosivu Saatavissa (viitattu 28.5.2023): https://www.althensensors.com/sensors/force-sensors/multi-axis-force-sensors/

[29] Overview Catalog, ATI Industrial Automation, Literature Number: 9205-00-1025-04, 2022, 40 p. Saatavissa: https://www.ati-ia.com/Library/documents/ATI_Overview_Catalog.pdf

[30] About Althen Sensors, Althen Sensors & Controls, verkkosivu Saatavissa (viitattu 28.5.2023): https://www.althensensors.com/about-althen/

[31] FN7325 Multiaxial Load Cell, Althen Sensors & Controls, 2017, 4 p. Saatavissa: https://www.althensensors.com/media/25656/fn7325-multi-axis-force-sensor-en.pdf

[32] F/T Product Description and Features, ATI Industrial Automation, verkkosivu Saatavissa (viitattu 29.5.2023): https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_productDesc.aspx

[33] Customized F/T Transducers, ATI Industrial Automation, verkkosivu Saatavissa (viitattu 29.5.2023): https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_CustomApps.aspx

[34] Sähkölaitteiden kotelointiluokat (IP-koodi) = Degrees of protection provided by enclosures (IP code), Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 60529+A1, Helsinki, 2000, 91 s.

[35] Frequently Asked Questions, Bota Systems, verkkosivu Saatavissa (viitattu 29.5.2023): https://www.botasys.com/faq

[36] FANUC History, FANUC, verkkosivu Saatavissa (viitattu 30.5.2023): https://www.fanuc.eu/fi/en/who-we-are/fanuc-history

[37] Who we are, FANUC, verkkosivu Saatavissa (viitattu 30.5.2023): https://www.fanuc.eu/fi/en/who-we-are

[38] P. Bilancia, J. Schmidt, R. Raffaeli, M. Peruzzini, M. Pellicciari, An Overview of Industrial Robots Control and Programming Approaches, Applied sciences, Vol.13, No.4, 2023, pp.2582.

[39] Force Sensor, FANUC, 2019, 7 p. Saatavissa: https://www.fanuc.eu/~/media/files/pdf/products/robots/brochures/mbr-02195-ro%20force%20sensor-v2/brochure_force_sensor_en.pdf?la=en

[40] The Product Physics Experts, Hottinger Brüel & Kjær, verkkosivu Saatavissa (viitattu 31.5.2023): https://www.hbkworld.com/en/about

[41] Our History, Hottinger Brüel & Kjær, verkkosivu Saatavissa (viitattu 31.5.2023): https://www.hbkworld.com/en/about/our-history

[42] Hottinger Brüel & Kjær GmbH, MCS10 Multicomponent sensor, Literature Number: B04439-11-E00-00, 2023, 16 p. Saatavissa: https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B04439.pdf

[43] IEEE Standard for A Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators--Mixed-Mode Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE, IEEE Std 1451.4-2004, 2004, 439 p.

[44] Improving Test & Measurement with TEDS, Hottinger Brüel & Kjær, verkkosivu Saatavissa (viitattu 31.5.2023): https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/2023/improving-test-measurement-with-teds

[45] Your strong innovation partner, Kistler Group, verkkosivu Saatavissa (viitattu 31.5.2023): https://www.kistler.com/INT/en/about-us/C00000001

[46] Force sensors, Kistler Group, verkkosivu Saatavissa (viitattu 31.5.2023): https://www.kistler.com/INT/en/c/force-sensors/CG21-force-sensors

[47] Kistler Group, 6-Axis Force/Torque Sensor, Literature Number: 9306_003-290e-04.23, 2023, 5 p. Saatavissa: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-290e.pdf

[48] A. Gutiérrez-Giles, M. Arteaga-Pérez, Output Feedback Hybrid Force/Motion Control for Robotic Manipulators Interacting with Unknown Rigid Surfaces, Robotica, Vol.38, 2020, pp.136–158.

[49] lec36 Force control of manipulators, Hybrid position/force control of manipulators, NPTEL - Indian Institute of Science, Bengaluru, verkkosivu Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://www.youtube.com/watch?v=TyzTkIbWPyQ

[50] H. Cao, X. Chen, Y. He, X. Zhao, Dynamic Adaptive Hybrid Impedance Control for Dynamic Contact Force Tracking in Uncertain Environments, IEEE access, Vol.7, 2019, pp.83162–83174.

[51] H. Roozbahani, A. Fakhrizadeh, H. Haario, H. Handroos, Novel Online Re-Calibration Method for Multi-Axis Force/Torque Sensor of ITER Welding/Machining Robot, IEEE sensors journal, Vol.13, No.11, 2013, pp.4432–4443.

[52] R.V. Patel, H.A. Talebi, J. Jayender, F. Shadpey, A Robust Position and Force Control Strategy for 7-DOF Redundant Manipulators, IEEE/ASME transactions on mechatronics, Vol.14, No.5, 2009, pp.575–589.

[53] K.M. Lynch, F.C. Park, Modern robotics: mechanics, planning, and control, Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 2017, 624 p.

[54] Modern Robotics, Chapter 12.2.4: Duality of Force and Motion Freedoms, Northwestern Robotics, verkkosivu Saatavissa (viitattu 19.5.2024): https://www.youtube.com/watch?v=PPl0yuFJCVM

[55] N. Hogan, Impedance control of industrial robots. Robotics and computer-integrated manufacturing. Vol.1, No.1, 1984, pp.97–113.

[56] H. An, C. Ye, Z. Yin, W. Lin, Neural Adaptive Impedance Control for Force Tracking in Uncertain Environment, Electronics (Basel), Vol.12, No.3, 2023, p.640.

[57] D. Gong, Y. Song, M. Zhu, Y. Teng, J. Jiang, S. Zhang, Adaptive Variable-Damping Impedance Control for Unknown Interaction Environment. Mathematics (Basel). Vol.11, No.24, 2023, p.4961.

[58] L. Li, Z. Wang, G. Zhu, J. Zhao, Position-based force tracking adaptive impedance control strategy for robot grinding complex surfaces system, Journal of field robotics, Vol.40, No.5, 2023, pp.1097–1114.

[59] W. Tang, W. Wang, S. Wang, Partially Decoupled Impedance Motion Force Control Using Prioritized Inertia Shaping, IEEE robotics and automation letters, Vol.9, No.9, 2024, pp.7621–7628.

[60] L. Roveda, D. Piga, Sensorless environment stiffness and interaction force estimation for impedance control tuning in robotized interaction tasks, Autonomous robots, Vol.45, No.3, 2020, pp.371–388.

[61] L. Roveda, A. Bussolan, F. Braghin, D. Piga, 6D Virtual Sensor for Wrench Estimation in Robotized Interaction Tasks Exploiting Extended Kalman Filter, Machines, Vol.8, No.4, 2020, p.67.

[62] S. Shan, Q.-C. Pham, Fine Robotic Manipulation Without Force/Torque Sensor, IEEE robotics and automation letters, Vol.9, No.2, 2024, pp. 1206–1213.

[63] L. Roveda, A.A. Shahid, N. Iannacci, D. Piga, Sensorless Optimal Interaction Control Exploiting Environment Stiffness Estimation, IEEE transactions on control systems technology, Vol.30, No.1, 2022, pp.218–233.

[64] Y. Yu, R. Shi, Y. Lou, Bias Estimation and Gravity Compensation for Wrist-Mounted Force-Torque Sensor, IEEE sensors journal, Vol.22, No.18, 2022, pp.17625–17634.

[65] A.C. Dometios, C.S. Tzafestas, Interaction Control of a Robotic Manipulator With the Surface of Deformable Object, IEEE transactions on robotics, Vol.39, No.2, 2023, pp.1321–1340.

[66] H. Cheng, T. Liu, W. Zhang, L. Hao, Robotic assembly for tight tolerant cascaded peg-in-hole process with incomplete constraints, Assembly automation, Vol.40, No.5, 2020 pp.769–778.

[67] S. Gadringer, H. Gattringer, A. Mueller, Assessment of force control for surface finishing – an experimental comparison between Universal Robots UR10e and FerRobotics active contact flange, Mechanical sciences, Vol.13, No.1, 2022, pp.361–370.

[68] Industrial Robots made for higher productivity, FANUC, verkkosivu Saatavissa (viitattu 27.8.2024): https://www.fanuc.eu/fi/en/robots/robot-range-page

[69] D. Ortega-Aranda, J.F. Jimenez-Vielma, B. Nath Saha, I. Lopez-Juarez, Dual-Arm Peg-in-Hole Assembly Using DNN with Double Force/Torque Sensor, Applied sciences, Vol.11, No.15, 2021 p.6970.

[70] A. Salem, Y. Karayiannidis, Robotic Assembly of Rounded Parts With and Without Threads, IEEE robotics and automation letters, Vol.5, No.2, 2020, pp.2466–2473.

[71] J. Watson, A. Miller, N. Correll, Autonomous industrial assembly using force, torque, and RGB-D sensing, Advanced robotics, Vol.34, No.7–8, 2020, pp.546–559.

[72] R. Song, F. Li, W. Quan, X. Yang, J. Zhao, Skill learning for robotic assembly based on visual perspectives and force sensing, Robotics and autonomous systems, Vol.135, 2021, p.103651.

[73] P. Jin, Y. Lin, Y. Song, T. Li, W. Yang, Vision-force-fused curriculum learning for robotic contact-rich assembly tasks, Frontiers in neurorobotics, Vol.17, 2023 p.1280773.

[74] C. Seo, H. Kim, H. Jin, T. Kim, T. Seo, Force Control of a Grinding Robotic Manipulator With Floating Base Via Model Prediction Optimization Control, IEEE/ASME transactions on mechatronics, Vol.28, No.4, 2023, pp.1–9.

[75] H.O. Erkol, M. Bailey, G. Palardy, C. Barbalata, Predicting composite laminates roughness: data-driven modeling approaches using force sensor data from robotic manipulators, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.128, 2023, pp.1801–1813.

[76] J. Shen, J. Zhang, H. Zong, M. Cheng, B. Xu, Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control, IEEE/ASME transactions on mechatronics, Vol.28, No.2, 2023, pp.1081–1092.

[77] S. Kružić, J. Musić, V. Papić, R. Kamnik, Strain Gauge Neural Network-Based Estimation as an Alternative for Force and Torque Sensor Measurements in Robot Manipulators, Applied sciences, Vol.13, No.18, 2023, p.10217.