

Juuso Korhonen

# UUDELLEENKONFIGUROITAVAT TEOL- LISUUDEN ROBOTTIJÄRJESTELMÄT

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Helmikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Juuso Korhonen: Uudelleenkonfiguroitavat Teollisuuden Robottijärjestelmät  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2023

---

Teollisissa robottisoluissa seuraavana kehitysaskelena on toimintojen lisääminen aina kehittyvien tuotantovaatimuksien kohtaamiseksi. Kuitenkin uusien laitteiden lisääminen teolliseen robottisoluun ei ole aina mahdollista, tai edes kannattavaa. Tähän ongelmaan on esitetty monia eri ratkaisuita, jotka hyödyntävät uudelleenkonfiguroitavuutta robottisolun eri tasoilla. Näitä ratkaisuita ja niiden uudelleenkonfiguroitavuuden toimivuutta on kartoitettu tässä työssä. Tämä työ on suoritettu kirjallisuustutkimuksena, jonka keskeisinä tutkimuskysymyksinä olivat: Miten uudelleenkonfiguroitavuutta hyödynnetään robottisoluissa, miten uudelleenkonfiguroitavia robottisoluja hyödynnetään käytännössä ja mitä etuja ja haittoja uudelleenkonfiguroitavissa robottisoluissa esiintyy verrattuna perinteiseen robotiikkaan. Työssä keskityttiin robottisolujen osissa ja kokonaisuuksissa esiintyvän uudelleenkonfiguroitavuuden mekaanisiin toteutuksiin.

Ensimmäisenä työssä yhdistetään uudelleenkonfiguroitavien tuotantojärjestelmien toimintaperiaatteet robottisolujen rakenteeseen ja toimintaan. Uudelleenkonfiguroitavuus jakautuu kahden kriittiseen kategoriaan, modulaarisuus ja integroitavuus, sekä neljään tukevaan kategoriaan, jotka ovat: kustomoitavuus, skaalautuvuus, muunneltavuus ja diagnosoitavuus. Tätä jakoa hyödyntäen analysoitiin robottisolujen ja niiden osien prototyypeistä niissä esiintyvän uudelleenkonfiguroitavuuden tasoa ja ratkaisuiden toimivuutta. Lisäksi jokaisessa prototyypissä otettiin huomioon myös sen käyttö teollisuudessa.

Tutkimuksessa huomattiin, että uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen järjestelmiin on kehitetty monia ratkaisuita, joilla saadaan merkittävää hyötyä irti robottisolun toiminnan muokkaamisella. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että vain pientä osaa näistä eri ratkaisuista oli kokeiltu teollisessa ympäristössä, joka todennäköisesti aiheutuu uudelleenkonfiguroitavien järjestelmien teknisen monimutkaisuuden aiheuttamasta suuremmasta hinnasta.

Avainsanat: Uudelleenkonfiguroitava, teollinen robottisolu, robotiikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. UUELLEENKONFIGUROITAVUUS.....	3
3. TEOLLISUUSROBOTTISOLUT .....	5
3.1 Teollisuusrobottien rakenteet .....	5
3.2 Robottisolu .....	6
4. UUELLEENKONFIGUROITAVUUS TEOLLISUUSROBOTIIKASSA .....	7
4.1 Uudelleenkonfiguroitavat päätelaitteet .....	7
4.2 Uudelleenkonfiguroitavat robottirakenteet .....	8
4.3 Uudelleenkonfiguroitavat osat solussa .....	9
5. TEOLLISUUSROBOTTIEN UUELLEENKONFIGUROITAVUUS .....	10
5.1 Tarttijat ja työkalut.....	10
5.2 Robotit tyypeittäin .....	13
5.2.1 Nivelvarsirobotit .....	14
5.2.2 Scara -Robotit.....	16
5.2.3 Karteesiset Robotit.....	17
5.2.4 Rinnakkaisrakenteiset Robotit.....	17
5.3 Solun muut osat.....	19
5.4 Kokonaiset solut.....	20
5.5 Yhteenveto uudelleenkonfiguroitavuudesta robottisoluissa .....	22
6. UUELLEENKONFIGUROITAVUUDEN HYÖDYT JA HAITAT .....	24
7. YHTEENVETO.....	25
LÄHTEET .....	26

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CNC -kone            Computer Numerical Control jyrsinkone

FMS                 Flexible Manufacturing System, joustava valmistusjärjestelmä

# 1. JOHDANTO

Valmistavassa teollisuudessa variaatiot tuotevalikoimissa voivat kasvaa erittäin suuriksi. Näiden variaatioiden valmistamiseen tarvittavien ominaisuuksien lisääminen koneeseen voi käydä hyvinkin kalliiksi. Toisaalta myös hyvin suurille tuotevariaatioille sopivan joustavan työkonteen läpimenoajat saattavat olla kilpailukyvyttömiä. Tähän väliin sopivat uudelleenkonfiguroitavat koneet, joiden toiminnallisuuksia voidaan muuttaa tuoteperheen sisällä. Tällaisia tuotteissa vaihtuvia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi osageometria, materiaaliominaisuudet, tuotevolyymi ja vaaditut toimenpiteet. (Koren, 2010, s. 208)

Eräänä tällaisena työkonena teollisuudessa käytetään robottisoluja, joiden toimintaan voidaan hyödyntää uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksia. Uudelleenkonfigurointia hyödyntämällä jo valmiiksi joustavassa teollisuusrobotiikassa voidaan saada aikaan hyvinkin muuntautumiskykyisiä robottisoluja, joilla valmistettavia tuotevariaatioita voidaan lisätä entisestään.

Robotin uudelleenkonfiguroitavuudella tarkoitetaan robotin mahdollisuutta muuntaa rakennettaan siten että toimintaparametrit ja ominaisuudet muuttuvat. Tämän jälkeen uudelleenkonfiguroitunut robotti voidaan määritellä uudeksi, edellisestä poikkeavaksi robotiksi. (Palkon 2008). Käytännössä siis uudelleenkonfiguroitavilla rakenteilla voidaan korvata tarve useammalle robotille solussa. Tämä puolestaan kuulostaa tuotantojärjestelmien kustannuksien kannalta todella edukkaalta vaihtoehdolta, jonka vuoksi jo kehitetyt robottisolujen uudelleenkonfiguroitavia rakenteita on hyvä selvittää. Työn tavoitteena on selvittää mitä erilaisia rakenteita teollisissa robottisoluissa on jo kehitetty, sekä arvioida niiden ominaisuuksia myös verraten perinteisiin robottisoluihin.

Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on kartoittaa uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen toimintaperiaatteita sekä rakenteita. Näiden pohjalta puolestaan analysoidaan näiden järjestelmien mahdollisuuksia ja uudelleenkonfiguroitavuuden astetta verrattuna teoriaan. Tämä tutkimus on tehty integroivana kirjallisuuskatsauksena (Salminen 2011) koostamaan mahdollisimman laajalta alueelta erilaisia teknisiä ratkaisuita ja teoriapohjaa uudelleenkonfiguroitavuudesta teollisuusrobotiikassa. Aineistona on käytetty usean eri tietokannan, kuten Andor, Sciencedirect ja MDPI, artikkeleita sekä lisäksi Espacenet patenttietokannan patenteja.

Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

Miten uudelleenkonfiguroitavuutta hyödynnetään robottisoluissa?

Miten uudelleenkonfiguroitavia robottisoluja hyödynnetään käytännössä?

Mitä etuja ja haittoja uudelleenkonfiguroitavissa robottisoluissa esiintyy verrattuna perinteiseen robotiikkaan?

Työn painotus on uudelleenkonfiguroitavien järjestelmien ilmenemiseen ja käyttökohteisiin teollisissa ratkaisuisa. Erilaisten järjestelmien analysointi perustetaan rakenteelliseen analyysiin robottisolun toiminnasta ilman, että perehdytään ohjelmointi- tai ohjaustason ratkaisuihin, ellei näillä ole kriittistä merkitystä järjestelmän kannalta.

Luvussa 2 käydään läpi uudelleenkonfiguroitavuuden perusteita ja teoriaa valmistusjärjestelmissä, jota seuraa luvussa 3 perinteisten teollisten robottijärjestelmien rakenteen ja toimintaperiaatteiden kartoitus. Luvussa 4 puolestaan yhdistetään uudelleenkonfiguroitavuuden idea teollisuusrobotiikkaan ja esitellään uudelleenkonfiguroitavien robottijärjestelmien teoreettisia ratkaisuita. Luvussa 5 taas käydään erikseen toimintaperiaatteita analysoiden käyttötapauksien avulla uudelleenkonfiguroitavien robottijärjestelmien sovelluksia. Luvussa 6 verrataan edellisen luvun analyysien perusteella uudelleenkonfiguroitavien robottijärjestelmien hyötyjä ja haittoja verraten perinteisempään teollisuusrobotiikkaan. Viimeiseksi luvussa 7 kootaan tutkimuksen tuloksista pääpointit ja esitellään aiheita jatkotutkimukselle.

## 2. UDELLENKONFIGUROITAVUUS

Tuotantojärjestelmien kannalta määriteltynä uudelleenkonfiguroitavuudella tarkoitetaan koneen muuttamis- tai muuntautumiskykyä vaihtoehtoisiin toiminnallisuuksiin tai tuotantoasteen muuttumiseen. Tämä muutos koneessa ei kuitenkaan ole pysyvä, vaan koneen toimintaa voidaan muovata yhtä helposti suurempia tuotantomääriä ja monimutkaisempia toiminnallisuuksia suorittamaan, kuin pienempiä ja yksinkertaisempia toimenpiteitäkin. (Koren 2010)

Uudelleenkonfiguroitavat järjestelmät eivät ole joustavia valmistusjärjestelmiä (engl. Flexible Manufacturing Systems, FMS), joissa voidaan valmistaa lähes mitä tahansa osageometrioita, mutta varsin hitaasti. Uudelleenkonfiguroitavat järjestelmät eivät myöskään ole kohdennettuja tuotantojärjestelmiä kuten tuotantolinjat, sillä osavariaatioiden valmistaminen onnistuu pienemmällä rakenteenmuutoksella. Uudelleenkonfiguroitavat järjestelmät siis ovat välimalli kohdennetuista- ja joustavista tuotantojärjestelmistä, joissa osa tuotantoasteesta uhrataan helpomman osavariaatioiden valmistuksen aikaansaamiseksi. Näissä järjestelmissä kuitenkin mahdollisten variaatioiden määrä on rajoitettu tiettyyn osaperheeseen siten että tuotantoaste pysyy huomattavasti kilpailukykyisempänä verrattuna joustaviin järjestelmiin. (Koren 2010)

Uudelleenkonfiguroitavuutta voidaan määritellä kuuden perusominaisuuden mukaan. Nämä ominaisuudet ovat kustomointi, skaalattavuus, muunneltavuus, modulaarisuus, integroitavuus ja diagnosoitavuus. (Koren 2010)

Kustomoinnilla tarkoitetaan tuotantojärjestelmän toiminnallisuuteen muunneltavan joustavuuden lisäämistä siten että tuoteperheen muuttuviin vaatimuksiin voidaan vastata. Kustomoinnista esimerkkinä tuotantolaitteella voidaan helposti valmistaa tuoteperheeseen aikaisemmin kuulumattomia, mutta geometrialtaan samankaltaisia kappaleita. Kustomoinnin edut korostuvat siinä, että järjestelmän tuotantokykyä voidaan parantaa kohtuullisen pienillä investoinneilla. Tämä aiheutuu mahdollisuudesta valmistaa tuoteperheen kappaleita tai niiden pääpiirteitä samalla laitteella. (Koren 2010).

Skaalautuvuus ilmenee uudelleenkonfiguroitavassa järjestelmässä kykyä muuttaa sen suorituskykyä muuttamalla sen komponentteja. Tämä muutos pitää olla myös nopea, kun verrataan järjestelmän kokonaan uudelleenrakentamiseen tai uuden järjestelmän hankintaan. Käytännössä tämä tarkoittaa järjestelmän kykyä kasvattaa ja pienentää maksimituotantoasetta lyhyellä varoitusajalla ja kohtuullisen nopeasti sekä helposti.

Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi CNC-jyrsimien (Computer Numerically Control jyrsinkone) tapauksessa mahdollisuutena lisätä toiminnallisten jyrsinterien määrää, ilman että koneen rakennetta pitää muuttaa. (Koren, 2010)

Muunneltavuus on tuotantojärjestelmän kyky uudelleensuunnata tehokkaasti toiminnallisuuksiaan kohtaamaan uusia tuotantovaatimuksia. Käytännössä tämä tarkoittaa, että laitteen toiminnallisuuksia voidaan muuttaa nopeasti nykyisten ja tulevien tuotteiden välillä. Järjestelmän muunneltavuus ilmenee parhaiten mahdollisuutena muuttaa vaikuttavimpia työstöparametreja hyvinkin radikaalisti siten, että muutokseen kuluva aika on pieni ja muutos voidaan suorittaa helposti. Esimerkkinä CNC -koneelle mahdollisuus muuttaa toimintamoodia materiaalien välillä, missä jotkut materiaalit vaativat matalat terän kierrosluvut, mutta korkean vääntömomentin, kun taas toisille materiaaleille päinvastoin. (Koren 2010)

Modulaarisuus on eri toiminnallisuuksia suorittavien osakokonaisuuksien jaottelu sellaisiin osakokonaisuuksiin, että niitä voidaan helposti käsitellä eri tuotantojärjestelmän konfiguroitavuutta muunneltaessa. Modulaarisuus toimii myös edellytyksenä järjestelmän muunneltavuudelle ja kustomoitavuudelle, sillä helposti käsiteltävät osakokonaisuudet toimivat edellytyksenä järjestelmän rakenteen nopealle muuntamiselle. Modulaariset osat ovat myös helposti korvattavissa, mikäli syntyy tarve tai mahdollisuus paremmalle osalle. (Koren 2010)

Integroitavuus on osamoduulien kyky tulla liitetyksi kokonaisuuteen nopeasti ja tarkasti, siten että huomioon otetaan niiden mekaniikkaan, tietoliikenteeseen, ja ohjaukseen liittyvät rajapinnat. Tämä ilmenee siten että järjestelmän liikeratojen ja pakkojen toiminoilla voidaan yhdistämällä saada aikaan ikään kuin uusi kone. (Koren 2010)

Diagnosoitavuus on tuotantojärjestelmän toiminnan seuraukseen liittyvä mahdollisuus seurata järjestelmän toimintaa ja ohjauksia, joilla voidaan huomata ja diagnosoida virheet laitteen toiminnassa. Diagnosoitavuus on hyvin kriittinen ominaisuus uudelleenkonfiguroitavien järjestelmien kannalta. Tämä siksi, että järjestelmän toimintaan tehtyjen muutoksien aiheuttamat ominaisuudet ja mahdolliset virhetilanteet ovat tärkeitä pystyä diagnosoimaan ja jäljittämään tiettyyn osaan tai toiminnallisuuden muutokseen. (Koren 2010)

Näistä ominaisuuksista modulaarisuus ja integroitavuus ovat pohjana koneen uudelleenkonfiguroitavuudelle. Kustomointi, skaalautuvuus ja muunneltavuus ovat puolestaan tarpeellisia ominaisuuksia laitteen tehokkaan konfiguroitavuuden ja käytännöllisyyden kannalta. Lopuksi diagnosoitavuus antaa tehokkaat työkalut uudelleenkonfiguroitavuuden onnistuneisuuden tutkimiseen. (Koren 2010)



## 3. TEOLLISUUSROBOTTISOLUT

Teollisuusrobotiikalla tarkoitetaan standardin ISO 8373 2021 s. x mukaan ”*automaattisesti ohjattua, uudelleenohjaittavaa monikäyttöistä manipulaattoria, jonka voi ohjelmoida yli kolmella eri liikeakselilla.*” Käytännössä teollisuusrobotiikan sovellukset lajitellaan kuitenkin kuuteen tyyppiin, joista neljä olennaisinta ovat: karteesiset, SCARA, rinnakkaisrakenteiset ja nivelvartiset robotit. (Lamb 2013). Näiden lisäksi on olemassa edellisistä tehtyjä yhdistelmiä, kuten sylinteri ja napakoordinaatistorobotit, joissa joitain liikeakseleita on lisätty tai poistettu liikealueen muokkaamiseksi. (Process Solutions 2018). Tämän työn piirissä myös robotin päässä olevasta laitteesta, joka voi olla joko työkalu tai tarttuja, käytetään termiä päätelaite.

### 3.1 Teollisuusrobottien rakenteet

Karteesiset robotit ovat kolmella lineaarisella liikeakselilla toimivia robotteja. Rakenteeltaan ne toimivat siten että liikkuva Y-akseli on ripustettu kahdelle X-akselin suuntaisen liikkeen mahdollistavalle kiskolle. Liikkuvaan Y-akseliin puolestaan on kiinnitetty Z-akseli, johon on mahdollista lisätä erilaisten päätelaitteiden lisäksi myös tarpeen vaatiessa pyörimisakseleita kappaleenkäsittelyä varten. Työalue on tällöin laatikon muotoinen. (Lamb 2013)

SCARA robottien rakenne koostuu yleensä kahdesta tai useammasta samalla tasolla pyörivistä rotaationivelistä, joilla saavutetaan X-Y tason pisteet, ja lisäksi ainakin yhdestä Z-akselilla lineaarisesti liikkuvasta varresta. Tähän varteen kiinnitetään robotin päätelaitteet tai mahdolliset lisärotaatioakselit. (Lamb 2013)

Rinnakkaisrakenteiset robotit rakentuvat neljästä tai useammasta rotaatio- ja lineaarisesta liikettä hyödyntävistä nivelistä ja varsista, jotka muodostavat toistensa kanssa kinemaattisia ketjuja. Nämä kinemaattiset ketjut ovat suljettuja, sillä jokainen linkitys rajoittaa muiden liikettä. Rinnakkaisrakenteisten robottien rajoituksena on suhteellisen pieni työalueen koko verrattuna robotin omaan kokoon. (Lamb 2013)

Nivelvartiset robotit koostuvat yleensä kolmesta kuuteen rotaatioakselista, joilla robottikäsi saavuttaa työalueensa eri pisteet. Nivelet ovat ketjutettu siten, että yksi nivel on aina varren päässä, jota liikuttaa toinen nivel, jolloin eri pyörimisliikkeiden summana robottikädellä saavutetaan erilaiset pisteet työalueelta. (Lamb 2013)

Sylinteri- ja napakoordinaatorobotit rakentuvat yleensä yhdestä lineaarista liikettä suorittavasta varresta, jonka päässä päätelaite sijaitsee, ja tätä akselia erilaisissa rotaatioliikkeillä siirtävistä akseleista ja nivelistä. Kummankin robottityypin toimintaa kuvaa miten sen tarttujan paikka voidaan määritellä helposti rakenteen mukaan joko napa- tai sylinterikoordinaatistossa. (Process Solutions 2018)

## 3.2 Robottisolu

Robottisolun voidaan ajatella olevan tuotantosolu, jossa ihminen on korvattu teollisuusrobotilla. Robottisolut ovat laitekokonaisuuksia, joiden komponentit voivat vaihdella käyttökohteesta toiseen hyvinkin mittaavasti. Robottisolun komponentteja varsinaisen robotin lisäksi ovat esimerkiksi orientaatiolaitteet, anturit, kamerat, kuljettimet, seuranta- ja paikoitusjärjestelmät, työkalut ja mahdolliset liitännät muihin työsoluihin (Richard et al., 1987). Näistä tärkeimmät toiminnan kannalta ovat kuitenkin työkalut ja sensorit, sekä niiden lisäksi turvajärjestelmät ja ohjausohjelmistot (Smock, 2018).

Tämän työn tarkoituksissa päätelaitteella tarkoitetaan laitetta, joka sijaitsee laitteen robotin liikuteltavan varren päässä, jolla robotti vaikuttaa ympäristöönsä. Päätelaitteet voidaan vielä kategorisoida tarttujiin ja työkaluihin. Tarttujat voidaan vielä jakaa alakategoriioihin sen mukaan, kuinka ne vaikuttavat poimittavaan kappaleeseen. (Chen, W. et al. 2014)

Tarttujen päätyypit jakautuvat mekaanisiin, imukupipohjaisiin ja magneettisiin tarttujiin. Näistä mekaaniset puristavat kappaleen yleensä mekaanisten leukojen tai sormien väliin käyttäen kontaktipintojen liikuttamiseen joko sähköllä tai paineilmalla toimivia moottoreita. Imukupipohjaiset tarraimet puolestaan ottavat kontaktin vain kappaleen yhteen pintaan imukupilla, johon luodaan alipaine ejektorilla. Magneettiset tarraimet puolestaan hyödyntävät sähkö- tai kestromagneetteja ferromagneettisten kappaleiden liikuttamiseen. (Chen, W. et al. 2014)

Päätelaitteen muodossa käytettäviä työkaluja on puolestaan hyvinkin suuri määrä. Päätelaitteeksi voidaan käytännössä valmistaa mitä tahansa valmistavan teollisuuden työkaluja, kuten esimerkiksi hitsauspillejä, leikkuutyökaluja ja poria. Lisäksi vielä päätelaitteeksi voidaan luoda erilaisia sensoreita ja kameroita, joilla robotilla voidaan suorittaa myös laadunvalvonnallisia toimenpiteitä. (Schneider Company, 2022)

## 4. UDELLEENKONFIGUROITAVUUS TEOLLISUUSROBOTIIKASSA

Uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksia käytetään rajoitetusti teollisuusrobotiikassa. Tämän tarkoittaa, että monet teollisuuden ratkaisut perustuvat tarkkoihin käyttötapauksiin, mikä ilmenee yleisten teorianmallien painotuksena vain tiettyyn toimintatarkoitukseen. Käytännössä voidaan kuitenkin määritellä uudelleenkonfiguroitava teollisuusrobotti Palkonin (2008) mukaan robotiksi, joka voi muuttaa omaa kinemaattista ja toimintorakennettaan toiminto-ominaisuuksien ja teknisten parametrien muokkaamiseksi. Näin muuntautunut robotti voidaan laskea tällöin kokonaan uudeksi koneeksi.

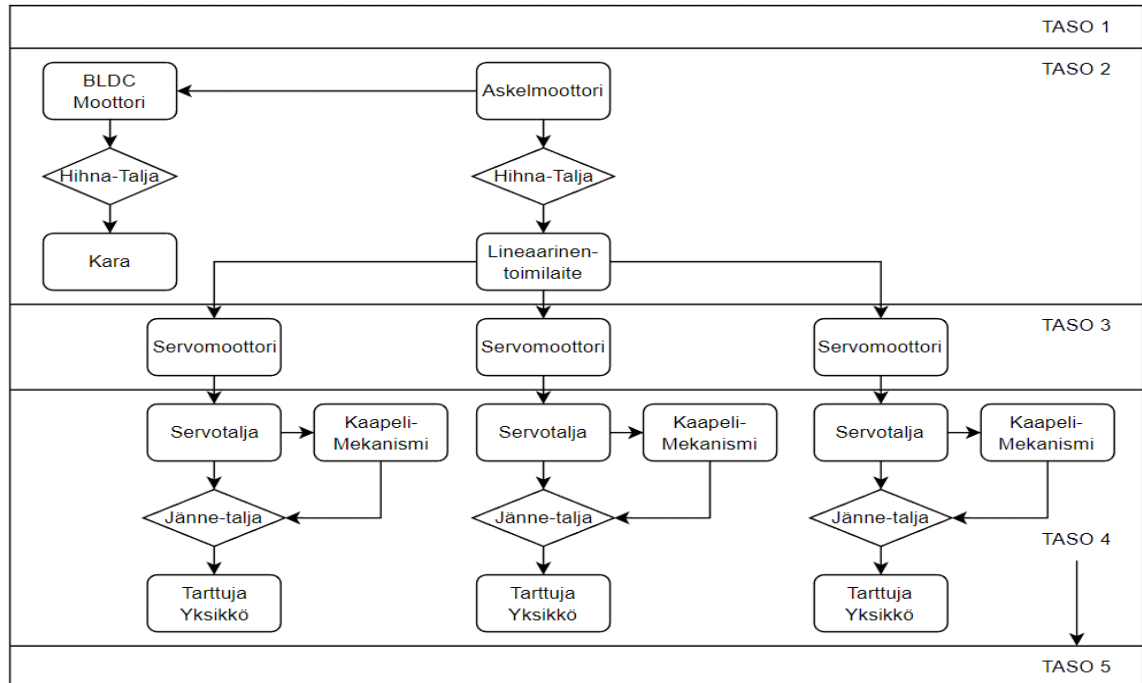
Teollisen robottisolun uudelleenkonfiguroitavuuden pohjana toimii osien modulaarisuus, joista ero pelkästään modulaarisiin robottisoluihin syntyy kustomoinnin ja osien integroitavuuden puolesta. Toinen erottava tekijä modulaarisen ja uudelleenkonfiguroitavan robottisolun välillä on mahdollisuus itsestään uudelleenkonfiguroitavuudelle, jossa ei tarvita käyttäjää muokkaamaan solun rakennetta. (Chen I, 2001) Kuitenkin raja uudelleenkonfiguroitavien ja modulaaristen robottien välillä ei ole tarkka, sillä uudelleenkonfiguroitavuuden piiriin kuuluvia ominaisuuksia voidaan hyödyntää robotiikan ratkaisuisissa.

### 4.1 Uudelleenkonfiguroitavat päätelaitteet

Reddy et al. (2021) ovat suunnitelleet uudelleenkonfiguroitavan päätelaitteen, jossa yhdistetään kolmisorminen mekaaninen tarrain metallin poistamiseen tarkoitettuun jyrsinkaraan. He ovat tunnistaneet suunnitelmastaan järjestelmästä viisi eri toimintakokonaisuuksien tasoa, jotka vaikuttavat järjestelmän toimintaan, mitkä on esitetty kuvassa 1. Ensimmäisenä tasona on kiinnityspinta robottiin. Toisella tasolla on järjestelmä, johon jyrsinkara ja uudelleenkonfiguroinnin mahdollistava järjestelmä ovat kiinnitetty. Kolmannella tasolla on tarttujan liikutteluun tarkoitettu taso. Neljännellä tasolla on tarttujan sormien mekanismit. Viidennellä tasolla on varsinainen tarttujan kämmen, joka toimii kontaktipintana kappaleen käsittelyyn, mutta samalla myös uudelleenkonfigurointimekanismin osana. (Reddy et al. 2021)

Näiden tasojen perusteella voidaan esittää, että päätelaitteiden tapauksessa uudelleenkonfiguroitavuus saadaan aikaan kahdesta kokonaisuudesta. Päätelaitteeseen kytke-tyistä komponenteista, tässä tapauksessa jyrsinkara ja tarrainsormet, sekä mekanis- mista, jotka mahdollistavat toimintatavan muutoksen karan ja tarraimen välillä. Tätä kar-

keaa kahtiajakoa voidaan hyödyntää päätelaitteiden uudelleenkonfiguroitavuuden analysoinnissa, kuin myös Reddy et al (2021) esittämän toimintakokonaisuuksien tasoja. Näitä analysointitasoja hyödynnetään myös Koren (2010) uudelleenkonfiguroitavuuden perusominaisuuksien ohella.



**Kuva 1.** Tasoitus uudelleenkonfiguroitavan päätelaitteen komponenteista muokattu lähteestä Reddy et al (2021)

## 4.2 Uudelleenkonfiguroitavat robottirakenteet

Teollisuusrobottien rakenne perustuu pääosin erilaisiin varsiin ja niitä liikuttaviin niveliin, sekä moottoreihin. (Wilson et. al. 2015, s.19–38). Tässä tutkimuksessa myöhemmin esitettävien ratkaisuiden perusteella varsien uudelleenkonfiguroitavuus voidaan jakaa kahteen kategoriaan, jotka ovat varren pituuden muuttaminen ja varren vaihdettavuus. Varsien pituuksien muuttamisilla voidaan muokata robotin työalueen kokoa ja tarvittaessa myös lyhentää kinemaattisten ketjujen pituuksia. Varsien pituuden lyhentämisellä voidaan pienentää robotin nivelille kohdistuvaa vääntömomenttia ja parantaa työliikkeistä aiheutuvien voimien sietokykyä.

Robotin varsien käytännöllisen vaihdettavuuden edellytyksenä on niiden liitännän helppous, joka saadaan aikaan uudelleenkonfiguroitavilla liitänämekanismilla. Tällaisten liitänämekanismien täytyy kestää suuriakin runkoon välittyviä voimia, mutta niiden täytyy silti olla helposti kiinnitettävissä ja irrotettavissa. (Xu et. al. 2020).

Robotin nivelien tuoma uudelleenkonfiguroitavuus voidaan suorittaa liittämällä robottiin passiivisia niveliä, joissa ei ole sensoreita tai moottoreita, vaan pelkät mekanismit nivelen lukittautumiselle. Passiivisen nivelen käyttö kuitenkin vaatii siihen kiinnitettyjen varsien päissä olevan moottoroidut nivelet, jotta lukituskulmaa voidaan muuttaa. Toinen tarpeellinen osa tällaisen nivelen kulman muutokseen nivelvartisen robotin tapauksessa, on jonkintapainen staattinen kiinnityspinta, johon robotin työpää voi kiinnittyä, jolloin robottikäden kumpikin pää ovat liikkumattomia. Tämä muodostaa suljetun kinemaattisen ketjun, jonka sisällä on liikkuvia niveliä, jolloin moottoroitujen nivelten avulla voidaan passiivisen nivelen kulmaa muuttaa. Kinemaattisen ketjun sulkevana kiinnityspintana voidaan käyttää myös toista robottia. Hyödyt passiivisesta nivelestä ilmenevät näiden keveytenä verrattuna moottoroituihin niveliin, kuitenkin mahdollistaen työalueen muuttamisen. (Aghili et al. 2011)

### 4.3 Uudelleenkonfiguroitavat osat solussa

Muita uudelleenkonfiguroitavuutta hyödyntäviä oleellisia osia robottisolussa voivat olla työkalun vaihtojärjestelmät, työkappaleen kiinnittimet ja runkorakenteet. Työkalun vaihtojärjestelmien käyttö korostuu niissä tapauksissa, joissa robotilla valmistettavissa tuotteissa variaation määrä on niin suuri, että toimenpiteille tarvittava uudelleenkonfiguroitava päätelaite olisi liian epäkäytännöllinen.

Uudelleenkonfiguroitavien kiinnittimien toiminta voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen, jotka ovat varsinaisten kappaleen kiinnitys elementtien paikoitus alustalla, ja alustan orientaation muutos. Kiinnittimien paikoitus alustalle yleensä suunnitellaan sopimaan tietyn osaperheen osille, mikä mahdollistuu käyttämällä alustaa, joka koostuu useista kiinnitinpinnoista erilaisille kiinnitinosille. Alustan paikoituksen muutos perustuu sen kiinnityksellä jalkoihin, jonka paikoitusta ja kallistuskulmaa voidaan ohjata joko suoraan moottoroiduilla jaloilla tai liikejarruilla varustetuilla teleskooppijaloilla ja saranoilla, joita solun robotti voi siirtää, kuten Gaspar et al. (2017) ovat esittäneet työsolun prototyypissään.

Lopuksi koko robottisolun komponentit voidaan paikoittaa liikkuville lineaariakseleille, jolloin osien välisiä suhteellisia paikkoja voidaan muuttaa. Esimerkiksi robottikäden paikoittaminen liikkuvalla alustalle lisää yhden liikevapauden robotin toimintaan ja täten lisää helposti sen työalueen kokoa. Tällaiset liikuteltavat alustat tuovat robottisolun toimintaan kustomoinnin mahdollisuutta, joka normaalisti olisi hankalasti saavutettavissa perinteisessä robottisolussa, jossa pitäisi robottien ja alustojen pohjat purkaa ja uudelleen koota samanlaisen kustomoinnin saavuttamiseksi. (Gaspar et al. 2017)

## 5. TEOLLISUUSROBOTTIEN UUELLEENKONFIGUROITAVUUS

Tässä kappaleessa esitellään erilaisia uudelleenkonfiguroitavuutta hyödyntäviä ratkaisuita robottisoluissa. Ensin ratkaisusta esitellään ratkaisuiden tekniset toimintaperiaatteet, jonka jälkeen niistä analysoidaan uudelleenkonfiguroitavuuden toteutuneisuus sen ominaisuuksien avulla. Lopuksi vielä esitellään ratkaisuille mahdolliset käytännön sovellukset, joissa ratkaisua käytetään teollisuudessa.

### 5.1 Tarttujat ja työkalut

Tässä tutkimuksessa löydettyjen lähteiden perusteella suuri osa uudelleenkonfiguroitavista mekaanisista tarttujista robottisolujen kontekstissa perustuu kappaleen käsittelyyn mekaanisten sormien avulla. Tämänäyttöisissä ratkaisuissa uudelleenkonfiguroitavuus on pääasiallisesti toteutettu mahdollisuutena liikuttaa sormien paikkaa suhteessa toisiinsa, ja sormielementtien modulaarisuutena. Tästä ensimmäisenä esimerkkinä Jitariu et al. (2015), ovat suunnitelleet edellä mainitun kaltaisen tarttujan.

Tarttujasta voidaan todeta, että se toteuttaa juuri ja juuri uudelleenkonfiguroitavuuden perusominaisuudet, eli modulaarisuuden ja integroitavuuden, kaikkien kolmen sormen ollessa samanlaisia moduuleja. Nämä moduulit voidaan taas helposti liittää juuri niille tarkoitettuun pohjaan. Tämä pohja kuitenkin rajoittaa uudelleenkonfiguroitavuutta rajamalla kahden liikuteltavan sormen mahdolliset kulmanmuutokset 60 asteeseen, joka rajoittaa tarttujan kustomointia.

Spiliotopoulos et al. 2018 puolestaan ovat kehittäneet edellisestä version, jossa uudelleenkonfiguroitavuuden aste on huomattavasti parempi. Tässä kahdella reunimmaisilla sormilla on mahdollisuus kääntyä 180 astetta, sekä sormissa itsessään on myös 180 astetta kääntyvät nivelet, joka mahdollistaa monimutkaisempiin kappaleisiin tarttumisen. (Spiliotopoulos et al. 2018) Tämän seurauksena tarttujan kustomointi on edelliseen verrattuna erittäin hyvä. Sormet myös itsessään ovat edellisen tapaan modulaariset ja yksinkertaisen liitännärajapinnan perusteella myös integroitavat, jotka toteuttavat uudelleenkonfiguroitavuuden.

Tämänäyttöisen tarttujan uudelleenkonfiguroitavuutta voidaan entisestäänkin parantaa käyttämällä pehmeitä sormia tarttujassa. Tällaiset sormet poistavat tarpeen manuaalisesti ohjelmoida erikseen tarttujan sormille jokaista kappaletta varten omat tartuntaliikkeet, sillä pehmeät sormet mukautuvat kappaleen pintoihin itsestään. (Mathew et al.

2021; Low et. al. 2021). Periaatteessa siis laitteen kustomointi on tällöin parempi, koska samalla tarttujalla voidaan käsitellä suurempaa variaatiota tuotegeometrioita. Sormissa edelleen toteutuu modulaarisuus ja integroitavuus hyvin.

Canali et. al. (2014) puolestaan ovat suunnitelleet jäykkäsormisen tarttujan, joka on mahdollista uudelleenkonfiguroida hyvinkin laajalle tuotegeometrioiden ja materiaalien skaalalle. Tarttujan rakenne eroaa aikaisemmista sillä, että sen sormien väliset etäisyydet ja kulmat eivät ole suoraan muunneltavissa, mutta sormien määrää voidaan lisätä helposti. Prototyypissään, Canali et. al. ovat toteuttaneet kolmisormisen mallin, ja suunnitelleet kaksi- ja nelisormiset konfiguraatiot, ja on kohtuullista myös päätellä, että suurempia määriä sormia voitaisiin integroida osaksi järjestelmää tarpeen tullen. Tämä lisää tarttujan uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksista skaalautuvuuden. Myös tarttujan muunneltavuus on erittäin hyvä, sillä modulaarisien sormiosien päätkin ovat erikseen modulaariset, ja ne voidaan korvata esimerkiksi magneettisilla päillä ferromagneettisten aineiden käsittelyä varten. (Canali et. al. 2014) Tässä tapauksessa täytyy myös huomata, että sormielementtien integroitavuus runkoon vaikuttaa hieman haastavalta, sillä se näyttäisi vaativan osien purkamista.

Imukuppipohjaisten tarttujen tapauksessa uudelleenkonfiguroitavuuden voi toteuttaa ainakin kahdella eri tavalla. Näistä ensimmäisenä on yksittäisten imukuppielementtien modularisointi, integroitavuus robotin päätelaitteeseen ja sen kustomointi kuten Saliba et. al. (2010) ovat tutkimuksessaan esittäneet. Heidän suunnitelmansa imukuppipohjaisesta tarttujasta perustuu mahdollisuuteen paikoittaa helposti skaalattaville päätelaitteeseen kiinnitetyille kiskoille yksittäisiä imukuppi-moduuleita. Näiden moduulien paikoitusta sekä kiskojen määrää voidaan helposti muokata vaihtuvien tuotegeometrioiden käsittelemiseksi. Yksittäiset moduulit ovat riittävän yksinkertaisia helpon integroitavuuden mahdollistamiseksi, sillä ne koostuvat jousella varustetusta kiskokiinnityksestä, imukupista ja ilmaletkukiinnityksestä. Tämä on hyvin yksinkertainen, mutta uudelleenkonfiguroitavuuden parametrien täyttävä ratkaisu. Tarttujan prototyyppiin on myös mahdollistettu mekaanisen tarttujen yhdistäminen sellaisia kappaleita varten, joissa imukuppeja ei voida, tai ei ole käytännöllistä hyödyntää. Tämä puolestaan lisää tarttujan muunneltavuutta. Tästä tarttujasta on myös syytä huomata, että se on suunniteltu muovivalulla pakkausmateriaaleja valmistavan yrityksen tarkoitukseen korvatakseen jokaiselle erilaiselle tuotteelle omat tarttumat. (Saliba et. al. 2010)

Toisena uudelleenkonfiguroitavien imukuppipohjaisten tarttujen tyyppinä on itse imukupin kustomointi erilaisiin tuotegeometrioihin. Zhakypov et. al. (2018) ovat suunnitelleet imukuppi-tyyppisen tarttujan, jossa itse imukupin muotoa voidaan muuttaa etäohjauksella. Kyseinen imukuppi koostuu neljästä keskeltä taittuvasta kumisesta kolmiosta, jotka

on kiinnitetty toisiinsa pyramidin muotoon siten että sen päässä on imuletku. Varsinaiset muodonmuutokset saadaan aikaan pyramidin sisällä olevilla muistimetallijousilla, joiden pituutta muokkaamalla voidaan imukupin muotoa muunnella. Aikaansaavat muodonmuutokset mahdollistavat tarttumisen leveisiin ja tasaisiin pintoihin, kuin myös pitkiin kulmapintoihin kohtuullisen samantasoisella voimalla. (Zhakypov et. al. 2018) Yhdistämällä tämäntyyppiset imukupit aikaisemmin mainittuun rakenteeseen, saataisiin aikaan hyvinkin paljolti kustomoitavissa oleva päätelaite, sillä silloin mahdollisia tarttumispintoja olisi enemmän, kuin pelkät tasaiset pinnat.

Lisäksi vielä tarttujien kategoriaan voidaan laskea muuten kuin yksin imuvoimalla tai mekaanisella tarttumisella kappaleen liikutteluun tarkoitettua päätelaitteita. Näistä eräänä esimerkkinä on G. Fontanelli et. al. (2020) kehittänyt laatikkopalettien purkuun käytettävä päätelaite. Päätelaite koostuu modulaarisista ja helposti vaihdettavista imukuppi-moduuleista ja niiden alla olevista rullahaarukoista. Päätelaite toimii siten että se kiinnittää imukupit laatikon sivuun ja nostaa sen reunaa sen verran että rullahaarukat voidaan ajaa laatikon alle, jolloin laatikko voidaan nostaa trukiinomaaisesti paikasta toiseen. Päätelaitteen uudelleenkonfiguroitavuus ilmenee mahdollisuutena vaihtaa imukuppimoduuleja sekä lisätä ja säätää rullahaarukoiden väliä riippuen käsiteltävän laatikon koosta. Tämä välinsäätö saadaan aikaan vielä automaattisesti anturien avulla. (Fontanelli et. al. 2020).

Rullahaarukoiden lisääminen ja välinsäätö ilmentävät vastaavasti hyvin päätelaitteen skaalautuvuutta ja kustomointia. Laitteen modulaarisuus ja integroitavuus toteuttavat muutenkin uudelleenkonfiguroitavuuden reunaehdot sillä imukuppi-haarukka kokoonpano on itsessään oma moduulinsa joka voidaan kohtuullisen yksinkertaisesti kiinnittää pääkiskolle.

Kun robotin päätelaitteena on työkalu usein sille myös tarvitsee tuoda voima jollain tavalla. Tähän Dogra et. al. (2022) ovat kehittäneet uudelleenkonfiguroitavan mekaanisen linkityksen, jolla pyörimisliikettä voidaan välittää työkalulle. Linkitys koostuu yksittäisistä moduuleista, joissa on kaksi pyörimisliikettä vastaanottavaa rajapintaa ja yksi rajapinta jolla pyörimisliikettä siirretään seuraavalle komponentille. Nämä rajapinnat ovat sara-noitu koteloon, jolloin niiden kulmaa ulkokoteloon verrattuna voidaan säätää yksinkertaisella tappi-reikä menetelmällä. Kun näitä moduuleja kiinitetään vähintään kaksi toisiinsa, voidaan niillä saavuttaa hyvin nopealla muutosajalla suuriakin työalueen muutoksia. (Dogra et. al. 2022).

Tässä esimerkissä modulaarisuus ja integroitavuus toteutuu hyvin, sillä osat ovat keskenään samanlaisia ja niiden väliset rajapinnat ovat helppokäyttöisiä. Tämä puolestaan luo



erinomaisen skaalautuvuuden, jolla päätelaitteen kokoa voidaan tarvittaessa kasvattaa lisäämällä moduuleja toistensa perään.

## 5.2 Robotit tyypeittäin

Ennen kokonaisten robottien käsittelemistä on hyvä huomioida erikseen vielä näiden osiin kehitettyjä ratkaisuita uudelleenkonfiguroitavuuden luomiseksi. Näiden jälkeen käsitellään robottityypeittäin erilaisia ratkaisuita.

Robottien työalueiden muunneltavuuteen ja toiminnan uudelleenkonfiguroitavuuteen on kehitetty muunneltavan jäykkyyden omaava varsi, jonka muotoa voidaan muuntaa lähes täysin vapaasti. Tällä muunneltavuudella voidaan muokata robotin toimintatapaa esimerkiksi nivelvartisen ja scara- tyyppisen robotin välillä, jolloin sen liikeradat saadaan optimoitua. Tämä varsi koostuu sisäisestä rakennerangasta, jonka päällä on ontto haitarinmallinen huputus, joka kovetetaan haluttuun muotoon. Rakennerangassa on reikiä, jotka yhdistyvät tyhjiöpumppuun, jolla huputuksen läpät kovetetaan, että varsi saadaan jäykäksi haluttuun muotoon. (Clark et. al., 2022)

Varsinaista modulaarisuutta tai integroitavuutta ei erikseen tutkimuksessa demonstroitu, mutta nämä voidaan saavuttaa oikeanlaisilla integraatorajapinnoilla varren kummassakin päässä, sillä varren sisällä on riittävästi tilaa informaation kulkuun tarvittaville yhteyksille. Tällä varrella saavutettava muunneltavuus robotille puolestaan on hyvin suuri sillä, varinkin useampaa vartta käytettäessä, robotin työalueita ja kinemaattisten ketjujen pituutta voidaan muuntaa hyvinkin nopeasti ilman että ainuttakaan osaa irrotetaan robotista.

Robottien nivelissä puolestaan uudelleenkonfiguroitavuutta on hyödynnetty kehittämällä modulaarinen ja muokattava nivel, johon on helposti vaihdettavissa sisäiset komponentit. Nivel koostuu viidestä eri kokonaisuudesta, jotka ovat runko, jarru, moottori, tulo- ja lähtölaipat. Näistä osista kaikki muut paitsi runko ovat omia moduuleitaan, joita voidaan tarvittaessa vaihtaa, sikäli kun tarvetta toiminnan muokkaamiselle ilmenee. Tärkeimpänä ominaisuutena nivelen moottorin kokoa voidaan vaihtaa, sillä sen kiinnitys runkoon on muokattu normaalista. Tavallisesti roboteissa moottori on tuettu paikalleen moottorin sivuilta, tietylle moottorille tarkoin sovitetulla paikalla. Tässä prototyypissä puolestaan moottori tuetaan akselinpuolisilta päädyiltä ja moottorin paikalle on jätetty ylimääräistä tilaa mahdollista isompaa moottoria varten. (Deng et al., 2015)

Tässä prototyypissä ei suoraan edellä mainituilla ominaisuuksilla saavuteta muuta uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksia kuin modulaarisuus, ja kohtuullisen hyvä integroitavuus, mutta varsinaista uudelleenkonfiguroitavuutta haittaa, että nivel, ja koko

robottikäsi pitää ihmisen purkaa toiminnan muokkausta varten. Uudelleenkonfiguroitavuutta kuitenkin parantaa tutkimuksessa esitetyn teknisen piirustuksen perusteella, että ulkolaippa on kohtuullisen yksinkertainen vaihtaa. Tällöin voidaan käyttää erilaisia varsia kun integrointirajapinnan vaihtaminen on helppoa. Niveleen on myös paikoitettu kuusi eri voima-anturia joilla voidaan helposti seurata nivelen kokemia voimia, joka puolestaan auttaa nivelen toiminnan diagnosoitavuutta.

### 5.2.1 Nivelvarsirobotit

Ensimmäisenä esimerkkinä nivelvartisten robottien uudelleenkonfiguroitavuudesta toimii aurinkopaneelien valmistuksessa toiminnan näytteenä kokeiltu modulaarinen robotti, jonka kaikki osat ovat täysin modulaarisia. Tällä robotilla pyrittiin korvaamaan ihmisen rooli vaihtelevien tuotekokojen tuotannossa, siten että modulaarisia osia käyttämällä voidaan laskentaohjelmistoa hyväksi käyttäen optimaalinen rakenne robotille siten että työradat ja tarkkuus saadaan parhaimmaksi mahdolliseksi. Robotin rakenne perustuu helposti vaihdettaviin eri pituisiin, ja erilaisia kuormia kestäviin modulaarisiin niveliin ja varsiosiin. Nivelet ja varret kiinnittyvät toisiinsa kuudella ruuvilla ja näiden läpi kulkee tiedon- ja virransiirrolle tarkoitettu kanava, joiden kautta tarvittavat johtimet voidaan vetää. (Valente, 2016).

Tämä robotin prototyyppi täyttää uudelleenkonfiguroitavuuden pääominaisuuksista täydellisesti vain modulaarisuuden. Integroitavuus ei ole tutkimuksessa selkeästi esitetty, ja se vaikuttaisi olevan hankala sillä tiedon- ja virransiirtoon tarkoitettut kaapelit näyttäisivät pitävän erikseen vetää koko robotin rakenteen läpi. Tämä puolestaan hankaloittaa uudelleenkonfiguroitavuutta, sillä koko robotti pitäisi käytännössä purkaa, jos vain esimerkiksi pohjimmainen varsi haluttaisiin muuttaa. Kustomoinnin ja muunneltavuuden tasot ovat toisaalta erinomaiset, sillä täysin modulaarisen rakenteessa vuoksi robotista voidaan esimerkiksi poistaa tarpeettomat linkit kokonaan tai tarpeen mukaan lisätä ylimääräisiä paremman liikealueen luomiseksi.

Hyvin samantapaisessa esimerkissä robotin rakenne perustuu edelleen erillisistä niveliin ja varsiin moduuleista, missä robotin käyttöä arvioitiin laser-koneistuskeskuksessa. Varret ja nivelet kiinnittyvät toisiinsa ilmeisesti magneettisesti tai mekaanisesti, ja kaikkiin moduuleihin on erikseen vielä lisätty optiset kanavat lasersäteiden kuljettamista varten päätelaitteelle. (Pritschow et al., 2009).

Tässäkin prototyypissä ilmenee samanlaiset ongelmat integroitavuuden suhteen kuin edellisessä, vaikka osien kiinnittäminen vaikuttaakin helpommalta ja laserin sekä optisen tiedon siirto kulkee ilman suuria vaikeuksia. Osien vaihtaminen vaatii silti vielä kaapelien

vetämisen osien läpi, jolloin yksittäistä vartta tai niveltä varten pitää irrottaa kaikki sen jälkeen tulevat komponentit.

Edellisten prototyypin ongelmia on yritetty korjata prototyypissä, jossa osien välinen linkitys on muokattu erilaiseksi. Tämä robotti kostuu yksittäisistä yhdistetyistä varsi-nivel moduuleista joissa nivel on varren lyhyiden varsien keskellä, sekä suorista varsimoduuleista. Näitä yleisiä komponentteja voidaan kasata haluttu määrä peräkkäin halutun toiminta-alueen ja liikevapauksien aikaansaamiseksi. Lisäksi näitä robotteja voidaan kiinnittää yksittäiseen keskusmoduuliin maksimissaan viisi, jolloin roboteilla voidaan käsitellä hyvinkin monimutkaisilla metodeilla kappaleita. Tärkeimpänä eroavaisuutena kuitenkin kahteen edelliseen prototyyppiin on eri moduulien välinen rajapinta, johon on tehty kytkennät tiedon ja virran siirrolle eri moduulien välillä. Moduulit kiinnitetään toisiinsa integraatorajapinnassa olevien laippojen avulla, jotka kiristetään ruuveilla. (Romiti et al., 2022).

Tässä prototyypissä täytyvät uudelleenkonfiguroitavuuden tärkeimmät ominaisuudet modulaarisuus ja integroitavuus. Siinä missä edellisten prototyypin osien vaihtaminen vaati mittavaa osien irti kytkemistä johtimien uudelleenkytkemiseksi, tässä ongelma on ratkaistu kattavalla integraatorajapinnalla, jonka avulla osien vaihtaminen on nopeaa ja helppoa. Yksinkertaisista moduuleista koostuvaa rakennetta voidaan skaalata lähes rajattomasti toistotarkkuuden rajoissa ja työalueen kokoa voisi helposti kasvattaa suorilla varsimoduuleilla.

Vielä eräänä esimerkkinä uudelleenkonfiguroitavuudesta on prototyyppi, jossa robotin varsi on teleskooppinen ja sen pituutta voidaan muuttaa 40 cm pituudesta aina kolmeen metriin asti käyttäen apuna sähkömoottoreita kuin muistimetalleja voiman siirrossa. Tämä prototyyppi on tehty ratkaisuna käyttötapaukseen, jossa lentokoneen siiven sisään pitää saada robotti kohtuullisen pienestä reiästä. Robotin uudelleenkonfiguroitava rakenne perustuu useampaan sisäkkäiseen varteeseen, jotka taivutetaan pyörönivelillä esiin, kun varsi on siipikotelon sisällä. Liukumalla liikkuvat varsiosat olisivat myös mahdollisia, mutta kyseisessä prototyypissä käytettiin pyöröniveleitä mekaanisen yksinkertaisuuden vuoksi. (Roy et al., 2005).

Tässä esimerkissä varsinaista modulaarisuutta tai integroitavuutta ei juurikaan esiinny, mutta tämä toimii silti esimerkkinä mahdollisesta robotin itsemuunneltavuudesta, jossa käytännössä työalueen maksimikokoa voidaan muokata ilman robotin rakenteen muuttamista.

## 5.2.2 Scara -Robotit

Ensimmäisenä esimerkkinä Scara -roboteissa hyödynnettävästä uudelleenkonfiguroitavuudessa toimii prototyyppi, jossa runkonivelen ja ensimmäisen liikkuvan nivelen välistä vartta voidaan pidentää modulaarisilla pidennyspaloilla. Moduulit kiinnitetään toisiinsa yksinkertaisesti pulteilla, ja niiden rakenne on ontto, joka helpottaa osien kiinnittämistä huomattavasti. (Wang et al., 2022).

Tämä esimerkki on hyvin yksinkertainen, sillä varren moduulien tarvitsee vain kantaa niiden jälkeisten osien painoa, kun virta muille komponenteille kulkee rungon ulkopuolella. Kuitenkin näissä osissa modulaarisuus ja integroitavuus toteutuu hyvin, sekä samantapaista rakennetta hyödyntämällä muissa robotin varsissa voidaan saavuttaa erittäin hyvää skaalautuvuutta työalueen koolle.

Huomattavasti kattavampana esimerkkinä toimii prototyyppi, jossa jokainen osa ensimmäisestä kiinnikkeestä päätelaitteeseen asti on modulaarinen. Laitteen saranamoduuleja on kahta erilaista, joissa liikkeen pyörimisakseli on joko komponentin kiinnityspinnan suuntainen tai siitä 90 asteen kulmassa. Näitä moduuleja on suunniteltu kaksi eri koosta, riippuen siitä kuinka paljon voimaa kyseisen saranan täytyy tuottaa. Näiden saranoiden väliin voidaan asentaa erikseen vielä suorita tai kulmallisia varsimoduuleja, joilla robotin ulottuvuutta voidaan muokata. Robotissa on viimeisenä moduulina päätelaitteen Z-akselin suuntaisen liikkeen mahdollistava päätymoduuli. Lisäksi vielä robotin käyttöön on suunniteltu erillinen adapterimoduuli, jolla erikokoisia moduuleja voidaan yhdistää. (Chen, 2020).

Robotin moduulit toteuttavat erinomaisesti uudelleenkonfiguroitavuuden pääpiirteet, sillä yksittäiset moduulit ovat täysin itsenäisiä komponentteja, jotka ovat ilmeisesti hyvin yksinkertaisesti kiinnitettävissä muihin komponentteihin. Tutkimuksessa ei varsinaista integraatorajapintaa esitelty, mutta oletettavasti osat pystyvät siirtämään virtaa ja informaatiota lävitseen ilman, että osan vaihdossa tarvitsee purkaa osiin koko robottia. Tätä myös tukee, että päätymoduulille tuleva imuteho kulkee robotin ulkopuolelta. Robotin rakenne on myös erinomainen skaalautuvuuden ja kustomoitavuuden kannalta.

### 5.2.3 Karteesiset Robotit

Esimerkkinä karteesisen robotin uudelleenkonfiguroitavuudesta on käyttötapaus, jossa lentokoneiden runkovalmistuksessa käytettäviä suuria siltanostureita on käsitelty karteesisena robottina, jolle puolestaan on kehitelty vaijerien uudelleenkonfigurointiin ohjausjärjestelmä. Tutkimuksessa kahden nosturin ja niihin kiinnitetyn rungon järjestelmää on käsitelty karteesisena vaijeri -robottina. Robotin tavoitteena on mahdollistaa raskaiden kappaleiden tarpeellinen kääntely muuntelemalla kaapelien paikoitusta. Robottiin kehitettiin ratkaisu, jolla nämä tarpeet saatiin tyydytettyä, käyttäen reunaehtona raskasta kappaletta kannattelevien vaijereiden kestävyyttä. Tärkeää on kuitenkin huomata, että suunniteltu robotti on käytännössä ohjausjärjestelmä, joka käyttää kustomoituja nostureita karteesisen robotin tapaan. (Nguyen et al. 2014).

Käytännössä tämä suunniteltu järjestelmä ei toteuta uudelleenkonfiguroitavuuden pääpiirteitä, vaikka silti skaalautuvuus ja muunneltavuus toteutuukin laitteessa hyvin. Robotissa ei ole modulaarisia osia, joten integroitavuuttakaan ei silloin eri osien välillä ole.

### 5.2.4 Rinnakkaisrakenteiset Robotit

Ensimmäisenä esimerkkinä rinnakkaisrakenteisten robottien uudelleenkonfiguroitavuudessa on prototyyppi, joka rinnakkaisrakenne koostuu modulaarisista varsista ja nivelkomponenteista, jotka kiinnitetään modulaarisiin lineaarisiin moottoreihin. Moottorimoduulit kiinnittyvät taas kiinteään pohjaan, johon voidaan erilaisten liikeratojen tarpeen mukaan lisätä moottoreita, joilla taas robottiin voidaan luoda uusia kinemaattisia ketjuja. Robottiin on myös integraatiopinta erilaisille päätelaite -moduuleille. Tämän prototyypin tapauksessa nivelet eivät ole moottoroituja eikä varsien lävitse kulje virtaa tai informaatiota. Lisäksi vielä niveliä on suunniteltu tähän robottiin kolmea erilaista, joiden avulla voidaan edelleen mahdollisia liikeratoja muokata. (Yang. et al. 2001).

Robotissa esiintyy erittäin hyvä modulaarisuus ja runko-osien integroituvuus, sillä varsi ja nivelosien läpi ei kulje virtaa tai informaatiota. Runkoon kiinnittyvien moottorien ja päätelaitteen paikan kohdalla voidaan olettaa kohtuullisen hyvä integroituvuus, sillä johtimet virralle ja informaatiolle kulkevat robotin osien ulkopuolelta. Myös skaalautuvuus ja kustomointi ovat hyviä robotissa, sillä osien määrä on hyvin monipuolinen ja kuten tutkimuksessa (Yang. et al. 2001) esitettiin, on siihen mahdollista yhdistää jopa kuusi moottorointua jalkaa erilaisiin orientaatioihin. Hyvin samanlaista prototyyppiä ovat myös käsitelleet C. Brisian ja C. Csiszar tutkimuksessaan 2011, eli prototyypin rakenne on edelleen kurrantti.

Seuraavana esimerkkinä on robotti, jossa moduulit ovat kokoonpanoja moottorista, nivelistä ja varsista, eroten edellisen kohdan prototyypistä, jossa jokainen varsi, nivel ja moottori ovat omia moduulejaan. Moduuleissa on kaksi lineaarista moottoria, jotka kontrolloivat varsien ja nivelen liikettä, ja moduulien yhteistoimintaa voidaan muokata mm. yhdistämällä vierekkäisten moduulien varret toisiinsa, jolloin ne eivät voi enää liikkua toistensa suhteen. Erilaisia liikeratoja puolestaan robotilla saavutetaan muokkaamalla moduulien paikkaa liikutettavaan alustaan nähden. (Pisla et. al., 2009).

Robotin modulaarisuus on hieman haasteellisempi kuin edellisen kohdan prototyypin, mutta silti esitetyillä kohtuullisen yksinkertaisilla moduuleilla voidaan saada hyvä skaala erilaisia liikeratakombinaatioita luotua. Integroitavuus puolestaan prototyypin moduuleilla on hyvä, kun ulkoisten rajapintojen kautta ei tarvitse siirtää virtaa tai informaatiota, eli rajapinta on puhtaasti mekaaninen ja staattinen.

Viimeisenä esimerkkinä on prototyyppi, joka on suunniteltu testattavaksi koneistuksessa. Robotin osat ovat kaikki erikseen modulaarisia, eli yksittäiset moduulit robotissa ovat kiskot, joilla robotin varsia kontrolloivat itseään liikuttavat moottorimoduulit liikkuvat, varsikomponentit ja päätelaitteeseen kiinnittyvä levy. Tärkeä ero ensimmäiseen kappaleessa esitettyyn prototyyppiin on, että tässä prototyypissä ei esitely mahdollisia niveliä yksittäisten varsien väliin, vaan varret kulkevat suoraan moottorimoduulilta robotin päähän. Robotti on suunniteltu siten että varret ovat helposti vaihdettavissa erilaisten liikkuvuuksien saavuttamiseksi, sekä robotin kiskot voidaan kasata halutussa järjestyksessä riippuen asiakkaan toiveista. Tällöin ei robottia valmistavan yrityksen tarvitse valmistaa montaa eri robottia eri tarkoituksiin. (Haage et. al., 2009)

Tässä prototyypissä esiintyy hyvin teollisuusnäkökulmassa käytännöllinen modulaarisuus ja integroitavuus. Moottorimoduulit kiinnittyvät kiskoille siten että yksittäisen moduulin vaihtaminen ei ole vaikea prosessi, sillä voimaa siirtävä kontaktipinta on yksinkertainen ratastus. Myös varsien vaihtaminen on suunniteltu nopeaksi ja helpoksi. Hieman hankaluutta integroinnin puolesta luo virran siirto moottorimoduuleille, sillä niiden liike on useita metrejä ja vaikuttaisi että kiskoelementeissä ei ole tähän vaadittavia komponentteja. Myös päätelaitteelle tuotava virta ja voima ei näytä kulkevan robotin lävitse vaan tulee ulkopuolelta suoraan käytettävälle työkalulle. Kustomointi laitteella robotissa on hyvä siihen on helppo vaihtaa erilaisia varsia ja moottorimoduuleja, mutta koko laitteen skaalautuvuus on hieman hankalaa, sillä jos robotin työalueen kokoa halutaan muuttaa isommaksi kuin mitä kiskot sallivat, täytyy silloin kiskot irrottaa maasta, joka saattaa olla

hankalaa. Tosin tämäkin on todennäköisesti nopeampaa ja halvempaa kuin vastaavan CNC -koneen päivittäminen isompaan.

### 5.3 Solun muut osat

Muiden solun osien tapauksessa hyvänä esimerkkinä missä uudelleenkonfiguroitavuutta voidaan tarvita, on työkappaleen kiinnitys. Tästä hyvänä esimerkkinä on prototyyppi, jossa kiinnittimen pohja koostuu tasaisesti paikoitetusta ruudukosta kiinnityspintoja, joihin varsinaiset työkappaleen kiinnittimet tukeutuvat. Prototyyppi on suunniteltu käytettäväksi metallisten kappaleiden koneistuksessa. Työkappaleiden kiinnittimiä on kahdenlaisia, joista ensimmäiset ovat yksinkertaisia ihmisen paikoittamia tukipylväitä, jotka kiinnittyvät yhteen kiinnityspintaan ja tukevat työkappaletta pystysuunnassa. Toinen kiinnitystyyppi on robottinen tuki, jonka pohja kiinnittyy kerrallaan kolmeen eri kiinnityspintaan paremman jäykkyyden aikaansaamiseksi. Robottisen pohjan päällä on pieni nivelvartinen robotti, jonka päässä olevan imukuppi kiinnittyy työkappaleeseen. Tällä tavalla saadaan moninaisia työkappaleita tuettua läheltä koneistuspintoja, jolloin koneistuksen tarkkuus paranee. Nämä robottisen tuet puolestaan liikkuvat pohjassa käyttäen hyväksi pohjan kiinnityspintoja siten, että yksi robottisen tuen pohjan kiinnityselementeistä on vain kontaktissa koko kiinnittimen pohjan kiinnityspintaan. Tällöin robottisen tuen pohjan kiinnityselementissä olevalla sähkömoottorilla voidaan kääntää koko tukea tämän kiinnityselementin ympäri. Robottinen tuki voi tällöin liikkua täysin itsenäisesti kiinnityspintojen avulla. (Leonardo et. al. 2013).

Tässä kiinnittimessä toteutuu kaikki uudelleenkonfiguroitavuuden piirteet erinomaisesti. Kaikki prototyypin osat ovat täysin modulaarisia aina kiinnittimen pohjan yksittäisistä kiinnityspinoista, robottisen kiinnittimeen ja tukipilareihin. Osien välinen integraatio onnistuu helposti, sillä integraatiopinta osien välillä on yksinkertainen ja puhtaasti mekaaninen. Virta ja informaatio tulevat robottiselle tuelle erillistä johdinta pitkin (Leonardo et. al. 2013). Kiinnitin on myös täysin skaalautuva, sillä pohja on myös oma kokonainen moduulinsa, jolloin niitä voidaan lisätä rinnakkain isompien työkappaleiden käsittelemiseksi. Kiinnittimen toimintoja voidaan myös helposti kustomoida lisäämällä liikkuvia robottisia tukia systeemiin, eikä kokonaisen kiinnitystavan muunneltavuuskaan vaikuta olevan kovin hankalaa, sillä uusia kiinnitinmoduuleja on helppo lisätä järjestelmään.

Toinen esimerkkiprototyyppi uudelleenkonfiguroitavasta solun osasta on kartongin taittelulaite, jolla voidaan valmistaa erilaisia laatikoita. Tämä prototyyppi on suunniteltu ma-keisteollisuuden rasioiden taitteluun. Taittelulaite voidaan rinnastaa omaksi robotikseen,

mutta tässä prototyypissä sitä käytetään kuitenkin työkappaleen kiinnittimenä, eikä se sovi mihinkään aikaisemmin määritellyistä teollisuusrobottien kategorioista. Taittelulaitteen rakenne koostuu useasta kolmen vapausasteen robottisesta sormimoduulista ja useammasta taittelumoduulista, jotka kiinnittyvät työkappaleen ympärille sekundäärisille kiskoille. Sekundääriset kiskot puolestaan kiinnittyvät pääkiskoille, joka mahdollistaa kiskojen välisten etäisyyden muuttamisen. Sormimoduulien funktio on painaa pahvilaatikoon kulmat, jotka sitten leveäpintaiset taivuttimet taivuttavat sivut oikeille kohdilleen. (Yao et al. 2010).

Tämän prototyypin uudelleenkonfiguroitavuus on myös hyvä, sillä koko rakenne on modulaarinen ja osat integroituvat toisiinsa vain mekaanisesti siten että niille tuodaan tieto ja virta erillisiä johtimia pitkin. Skaalautuvuus toteutuu jokseenkin hyvin, sillä laitteen kiskot on helppo vaihtaa pidempiin suurempien laatikoiden valmistamiseksi, mutta laatikon paksuuden kasvattamista varten täytyy valmistaa suuremmat taittelumoduulit. Muunneltavuus laitteessa on myös erittäin hyvä kuten Yao et. al. 2011 ovat demonstroineet seuraavassa tutkimuksessaan, jossa laite uudelleenkonfiguroitiin tuottamaan erilaisia laatikoita, joihin tarvittiin neljän sijasta vain kolmea sormimoduulia.

## 5.4 Kokonaiset solut

Ensimmäisenä esimerkkinä robottisolusta jossa on hyödynnetty suurissa määrin uudelleenkonfiguroitavuutta useassa eri osassa on edellisellä luvussa käsitelty Gaspar et. al. (2017) suunnittelema solun prototyyppi. Prototyypin perusrakenne koostuu kahdesta nivelvartisesta robotista, päätelaitepidikkeestä sekä kolmesta työkappaleen kiinnittimestä, jotka ovat kaikki omia moduuleitaan. Laitteessa osat integroituvat yhteen helposti muunneltavaan pohjarakenteeseen, jonka kautta osa virrasta ja informaatiosta kuljetetaan, kun taas osa laitteen johtimista kulkee sen rakenteen ulkopuolella. Laitteen toiminta on helposti kustomoitavissa, kun robotit ovat paikoitettu liikkuville kiskoille, jolloin niiden paikka voidaan nopeasti ja helposti vaihtaa. Prototyypissä myös kiinnikkeiden orientaatiota voidaan muokata kääntämällä niiden rinnakkaisrakenteista robottia muistuttavaa rakennetta roboteilla. Robotit voidaan valjastaa tekemään monia erilaisia toimenpiteitä vaihtamalla niiden päätelaitetta, joille on erillinen modulaarinen pidike. (Gaspar et. al. 2017). Vaikuttaisi siltä että prototyypin rakenne on myös hyvin skaalattavissa mekaanisesti sillä uusia pidikkeitä ja robotteja voidaan kohtuullisen yksinkertaisesti lisätä järjestelmään suurempien kappaleiden käsittelemiseksi.

Samantapaista solun rakennetta on käytetty myös stenttien ompeluun suunnitellussa solussa, jossa uudelleenkonfiguroitavuutta hyödynnetään yksilöityjen stenttien rakenteiden



valmistuksessa. Robottisolu koostuu kahdesta nivelvartisesta robotista, työkappaletta pitävästä karasta ja konenäkömoduulista, jonka avulla solu voidaan visuaalisesti ohjelmoida. (B. Huang et. al. 2021).

Solussa modulaarisuus on jaettu selkeästi edellä mainittuihin kolmeen osaan, joita voidaan oletettavasti lisätä tarpeen vaatiessa. Karan ja konenäkömoduulin integroiminen järjestelmään vaikuttaa yksinkertaiselta, kun taas robottien integraatiossa saattaa olla kiinnityspintojen ulkomuodon perusteella haasteita. Kuitenkin tässä yhteydessä uusien robottien tai useamman karan lisääminen laitteeseen ei välttämättä ole tarpeellista, sillä laite on suunniteltu tekemään vain kohtuullisen pieniä kappaleita ulkomitoiltaan. Robottisolu siis täyttää uudelleenkonfiguroitavuuden tarpeellisesti, sillä sen komponenttien modulaarisuus ja integroitavuus ovat tarpeellisia suunniteltuun käyttötarkoitukseen, jossa sillä valmistetaan yksittäiskappaleita, joiden sisäinen muodon ja monimutkaisuu-den variaatio on suuri. Robottisolussa ei tässä tilanteessa vaadita saman mittakaavan skaalautuvuutta kuin koneistukseen käytettävässä solussa.

A. Edsinger et. al., 2014 esittelee patentissaan pohjan uudelleenkonfiguroitavalle robotisolulle, jonka rakenne perustuu pohjamoduuliin, joka sisältää kuusi integrointipintaa erilaisille robotti- ja lisälaitemoduuleille. Integraatiopinnat ovat kaikki samanlaisia keskenään, joten niihin liitettävien moduulien pitää vastata kooltaan integraatiopintaa. Integraatiopinnan läpi kulkee siihen liitettävän moduulin tarvitsema virta ja informaatio. (A. Edsinger et. al.2014).

Tämän patentin modulaarisuus ja integroituvuus ovat ilmeisiä sen rakenteen perusteella, mutta pohjan skaalautuvuus on vaikuttaa heikolta, sillä integraatiopintoja on hankala lisätä. Pohjan kuusi samanlaista integrointipintaa mahdollistavat erittäin hyvän kustomoitavuuden solulle.

Skaalautuvuuden ongelmaan ovat D. J. Middleton et al. 2021 kehittäneen patentissaan version, jossa työsolun lattia on yhtä isoa integraatiopintaa, joka koostuu ruudukosta pienempiä integrointikohtia. Näihin integrointikohtiin haluttu moduuli puolestaan liittyy käyttäen hyväksi neljään integrointikohdan muodostamaa neliötä. (James et al. 2021). Tämä rakenne toimii käytännössä täysin samalla tavalla kuin edellisen patentin malli, mutta mahdollisten konfiguraatioiden määrä työalueen skaalautuvuus ovat huomattavasti paremmat. Tämä myös mahdollistaa pienempien moduulien liittämisen laitteeseen, kun integraatiopinnat ovat jaettu neljään osaan.

Viimeisenä esimerkkinä solun uudelleenkonfiguroitavuudesta on prototyyppi, jossa yhdistetään uudelleenkonfiguroitava robotti osaksi robottisolua, joka itsessään on moduuli

isommassa tuotantojärjestelmässä. Prototyyppi käyttää hyväkseen aikaisemmin esiteltyjä Yang et. al. 200 kehittämää rinnakkaisrakenteisia robotteja tai samoista moduuleista koostuvia nivelvartisia robotteja, joita voidaan konfiguroida robottisoluun tarvittavalla tavalla. Näitä robottisolu -moduuleja voidaan puolestaan taas kasata isommaksi robottisoluksi tai tuotantolinjaksi. (Chen, 2001)

Tässä prototyypissä uudelleenkonfiguroitavuuden integroitavuus ja modulaarisuus on luotu jokaiselle mekaaniselle osakokonaisuudelle laitteessa aina yksittäisestä robotista useamman solun kokonaisuudelle. Skaalautuvuus tällä prototyypin rakenteella on hyvin suuri sillä rajoittavia tekijöitä sille montako moduulia mihinkäkin osamoduuliin voidaan liittää ei ole. Toimintaa voidaan kustomoida lähes, kuinka tahansa ja muunneltavuus laitteessa on erinomaista, sillä yksinkertaisten robottien vaihdolla voidaan vaihtaa koko järjestelmän valmistamaa tuotetta.

## **5.5 Yhteenveto uudelleenkonfiguroitavuudesta robottisoluissa**

Uudelleenkonfiguroitavien tarttujien ja työkalujen tapauksessa uudelleenkonfiguroitavuutta hyödynnetään yleensä erittelemällä pääosin tarttujien rakenne erillisiin moduuleihin ja luomalla integraatorajapinnat niiden välille. Nämä muodostavat helpottavat tarttujien muokattavuutta huomattavasti, jolloin kohtuullisen pienellä vaivalla voidaan vaihtaa tai lisätä moduuleja tarttujan kokoonpanoon, sekä konfiguroida ne tarttujan toimintaan. Työkalujen tapauksessa puolestaan uudelleenkonfiguroitavuus esiintyy modulaarisuuden ja integroitavuuden lisäksi muunneltavuutena, jossa tarttujan toimintatapa voidaan muuntaa päätelaitetta vaihtamatta työkaluksi.

Uudelleenkonfiguroitavuus teollisuusroboteissa esiintyy parhaiten robotin eri osien modularisointina ja niihin selkeiden integrointipintojen luomisena. Paras esimerkki tästä on erityyppisten robottien varsien ja moottorien suunnittelu omiksi komponenteikseen, joissa on rajapinnat, joihin voidaan yhdistää uusia ja erilaisia moduuleja helposti. Tällöin robotin muunneltavuus paranee huomattavasti ja mm. robotin työalueen kokoa ja toimintatapaa voidaan muuntaa helposti. Tässä kohtaa on kuitenkin huomattava, että suoraan teollisuudessa kokeiltuja prototyyppisiä on vain hyvin vähän, eikä lähteissä ollut perusteita siitä, että mikään esitetyistä prototyypeistä olisi aktiivisesti nykyään käytössä teollisuudessa. Suurin painotus teollisuuden ratkaisuihin esiintyi rinnakkaisrakenteisten robottien prototyypeissä.

Robottisoluissa puolestaan uudelleenkonfiguroitavuus esiintyy hyvinkin samaan tapaan kuin tarttujissa sekä roboteissa, eli toiminnallisten osien erottaminen omiksi moduuleik-

seen ja niiden välisten integrointirajapintojen muodostamiseen. Solujen uudelleenkonfiguroinnissa yleensä teollisuusrobotit itsessään mielletään omiksi moduuleikseen, ja niiden tukena on useampia uudelleenkonfiguroitavia tukia ja laitteita joita tarvitaan solun toiminnassa. Näitä oheislaitteita voidaan puolestaan konfiguroida käsin tai esimerkiksi robotilla voidaan itse muokata pidikkeiden orientaatiota erilaisten kappaleiden käsittelyn mahdollistamiseksi.

Uudelleenkonfiguroitavia robottisoluja tai niiden osia hyödynnetään kuitenkin vain hyvin vähän teollisuudessa, sillä vain hyvin pienessä osaa esitellyistä prototyypeissä oli selkeää linkitystä teollisuuteen. Osa prototyypeistä oli suunniteltu tiettyä teollisuuden toimintoa varten, mutta suurimmassa osassa niistä ei ollut ilmeistä oliko niitä otettu käyttöön teollisuudessa tai edes kokeiltu teollisessa ympäristössä. Nämä seikat aiheutuvat todennäköisesti uudelleenkonfiguroitavien laitteiden suuremmasta hinnasta ja käyttöön-oton hankaluuksista, joista tarkemmin seuraavassa luvussa.

## 6. UDELLENKONFIGUROITAVUUDEN HYÖDYT JA HAITAT

Uudelleenkonfiguroitavista robottisoluista saavutettava hyöty keskittyy pääasiassa niiden mahdollisuuteen valmistaa ja käsitellä suurta määrää erilaisia kappalevariaatioita. Soluun voidaan syöttää erilaisempia kappaleita kuin normaaliin robottisoluun ilman että solun rakennetta täytyy muokata, ja jos solua täytyy muokata, on se huomattavasti yksinkertaisempaa kuin perinteisen solun rakenteellinen muokkaus. Uudelleenkonfiguroitavilla robottisoluilla voidaan helpommin vaihtaa koko teollista valmistusprosessia, koska mahdollisten toimintamallien määrä on huomattavasti suurempi kuin yhden tuotteen tai tuoteperheen valmistukseen suunnitellun perinteisen robottisolun

Hankaluuksia uudelleenkonfiguroitavissa robottisoluissa esiintyy lähinnä niiden lisääntyneen teknisen monimutkaisuuden vuoksi. Uudelleenkonfiguroitavissa robottisoluissa on enemmän mekaanisia liitoksia modulaaristen komponenttien välillä, joten niiden rakenteen kestävyys voi olla heikompi, sekä työliikkeistä aiheutuvan värähtelyn vaikutukset esimerkiksi koneistuksessa ovat isompia kuin perinteisissä soluissa. Wang, et. al. 2021 ovat esittäneet uudelleenkonfiguroitavaa Scara -robottia käsittelevässä tutkimuksessaan värähtelyn vaikutuksia.

Uudelleenkonfiguroitavan robottisolun toiminnan parametroitamien, liikeratojen ohjelmointi ja säätäminen ovat myös hankalampia, mikä johtuu taas osien monista mahdollisista kombinaatioista. Tämä vaatisi hienostuneemman ohjausohjelmiston toimiakseen helpommin. (Pritschow et al. 2009). Robottisolun ohjelmitavuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi B. Huang et. al. (2021) prototyypissään käytettävän konenäkömoduulin avulla, jossa robottien liikkeitä voitaisiin ohjelmoida visuaalisesti.

Uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen voisi kuvitella olevan myös kalliimpia kuin perinteiset robottisolut. Yleensä tämä todennäköisesti pitää paikkaansa, sillä uudelleenkonfiguroitavissa robottisoluissa on enemmän osia kuin perinteisissä, joka luontevasti kasvattaa solun kokonaiskustannuksia. A. Valente (2016), on kuitenkin osoittanut tutkimuksessaan että prototyypinsä hinta oli hyvin samassa kategoriassa vastaavia kuormia käsittelevien kaupallisten robottien kanssa. Ainoa selkeästi huonompi ominaisuus robotin prototyypissään oli huonompi liikkeiden toistotarkkuus.

## 7. YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksia ja niiden käyttöä teollisissa robottisoluissa kirjallisuusselvityksen avulla. Työssä ensin selvitettiin uudelleenkonfiguroitavuudelle olennaiset ominaisuudet ja lisäominaisuudet, joita uudelleenkonfiguroitavissa järjestelmissä ilmenee. Nämä ominaisuudet yhdistettiin teollisten robottisolujen toimintaan, jonka perusteella arvioitiin erilaisten robottisolujen, ja solujen komponenttien uudelleenkonfiguroitavuutta käytännössä. Tästä puolestaan voitiin huomata mitä käytännön toiminnan eroja uudelleenkonfiguroitavilla robottisoluilla on perinteisiin robottisoluihin verrattuna. Työ keskittyi robottisolujen mekaniikkaan jättäen ulkopuolelle ohjaustekniset asiat.

Uudelleenkonfiguroitavuus jakautuu kahteen kriittiseen ominaisuuteen, jotka ovat modulaarisuus ja modulaaristen osien integroitavuus järjestelmään. Muita uudelleenkonfiguroitavuuden ominaisuuksia on järjestelmän kustomoitavuus, muunneltavuus, skaalautuvuus ja diagnosoitavuus. Uudelleenkonfiguroitavuutta hyödynnetään robottisoluissa modulaarisina komponentteina ja niiden integrointipintoina, joilla solun toimintorakennetta voidaan muokata.

Käytännössä uudelleenkonfiguroitavia robottisoluja hyödynnetään vain vähän. Suurin osa kehitetyistä uudelleenkonfigurointia hyödyntävistä robottisoluista ovat vain prototyyppisiä, joista vain hyvin pientä määrää on edes kokeiltu teollisessa ympäristössä.

Uudelleenkonfiguroitavilla robottisolujen hyödyt tulevat mahdollisuutena vastaanottaa erilaisia ja erikokoisia kappaleita ja tekemään vaihtelevia toimenpiteitä näille kappaleille paremmin kuin perinteisillä robottisoluilla. Uudelleenkonfiguroitaviin robottisoluihin tarpeiden vaatimat muutokset ovat yleensä suoritettavissa ilman rakenteellisia muutoksia, sekä lisäkapasiteetin ja toimintojen lisääminen on huomattavasti helpompaa kuin perinteisessä robotiikassa. Haittoina puolestaan esiintyy lisääntyneen teknisen monimukaisuuden tuoma kasvu robottisolun hinnassa ja toimintojen luomisen hankaloituneisuus.

Tässä tutkimuksessa selkenee hyvin millä tasolla uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen tekniikka on nykypäivänä ja antaa hyvän katsauksen näiden robottisolujen toimintatapoihin ja rakenteeseen. Tutkimuksessa ei selvennetty uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen ohjausta, tiedonsiirtoa tai kinematiikkaa, joten paremman kokonaiskuvan aikaansaamiseksi jatkotutkimusta ohjauksesta ja kinematiikasta olisi otollista tehdä. Myös tapoja joilla uudelleenkonfiguroitavien robottisolujen haittoja voitaisiin minimoida olisi hyvä selvittää.

# LÄHTEET

F. Aghili, K Parsa. (2009). A Reconfigurable Robot With Lockable Cylindrical Joints. IEEE Transactions in Robotics, Vol. 25 No. 4. Saatavilla (viitattu 23.3.2022): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4814585>

C. Brisian, A. Csiszar. (2011). Computation and analysis of the workspace of a reconfigurable parallel robotic system. Mechanism and Machine Theory Vol. 46 no. 11. Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X1100125X>

A. Clark, N. Rojas. (2022). Malleable Robots: Reconfigurable Robotic Arms With Continuum Links of Variable Stiffness. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 38 No. 6. Saatavilla (viitattu 10.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9823314&tag=1>

C. Canali, F. Cannella, F. Chen, T. Hauptman, G. Sofia, D. Caldwell. (2014). High Reconfigurable Robotic Gripper for Flexible Assembly. Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Saatavilla viitattu (25.3.2022): [https://www.researchgate.net/publication/264129633\\_High\\_Reconfigurable\\_Robotic\\_Gripper\\_for\\_Flexible\\_Assembly](https://www.researchgate.net/publication/264129633_High_Reconfigurable_Robotic_Gripper_for_Flexible_Assembly)

D. Chen, Z. Zeng, Y. Guan, H. Zhu. (2020). T. Zhang, (2020) Scara Robots Developed with Modular Method. 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Saatavilla (viitattu 16.1.2023); <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9233716>

I.Chen. (2001), Rapid response manufacturing through a rapidly reconfigurable robotic workcell. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.17, No. 3. Saatavilla (viitattu 13.3.2022): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584500000284>

W.Chen, Su Zhao, S. Chow. (2014). Grippers and End-Effectors. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Springer, London. Saatavilla viitattu (13.3.2022): [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4471-4670-4\\_96](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4471-4670-4_96)

J. Deng, P. Wang, Q. Meng, H. Shen, J. Chen, M. Luo. (2015). Design and Development on a Reconfigurable Join of the Robot Arm. Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II. Mechanism and Machine Science, Vol 36. Saatavilla (viitattu 10.1.2023): [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-23327-7\\_60](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-23327-7_60)

A. Edsinger, A. Jules, S. Nusser A: Jain, J. N. Vines, (2014), Modular Reconfigurable Workcell for Quick Connection of Peripherals. Pat. Eu. Hakunumero EP 3 357 647 A1.

G. Fontanelli, G. Paduano, R. Caccavale, P. Arpentì, V. Lippiello, L. Villiani, B. Siciliano. (2020). A Reconfigurable Gripper for Robotic Autonomous Depalletizing in Supermarket Logistics. IEEE Robotics and Automation Letters. Vol.5 No 3 Saatavilla (viitattu 27.3.2020): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9120328>

T. Gaspar, B. Ridge, R. Bevec, M. Bem, I. Kovac, A. Ude, Z. Gosar. (2017). Rapid hardware and software reconfiguration in a robotic workcell. 2017 18<sup>th</sup> International Conference on Advanced Robotics (ICAR). Saatavilla (viitattu 22.3.2022): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8023523/authors#authors>

M. Haage, I. Dressler, A. Robertsson, K. Nilsson, T. Brogårdh, R. Johansson. (2009). Reconfigurable Parallel Kinematic Manipulator for Flexible Manufacturing. IFAC Proceedings Volumes Vol. 42 No. 4. Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701633782X>

B. Huang, Y. Yang, Y.Y. Tsai, G.Z. Yang. (2021). A Reconfigurable Multirobot Cooperation Workcell for Personalized Manufacturing. IEEE Transaction on Automation Science and Engineering, Vol. 19 No. 3, Saatavilla (viitattu 18.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9507292>

Robotics — Vocabulary, ISO 8373:2021

S. Jitariu, I. Staretu. (2015). Gripper with Average Continuous Reconfigurability for Industrial Robots. Applied Mechanics and Materials, Vol. 811, Saatavilla (viitattu 25.3.2022): <https://www.proquest.com/docview/1901764773>

Y. Koren. (2010). The global manufacturing revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable systems. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavilla (viitattu 11.2.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=533965>

F. Lamb. (2013). Industrial Automation: Hands-On. New York: McGraw-Hill Education. Saatavilla (viitattu 7.3.2022) <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071816458/chapter/chapter4>

L. Leonardo, M. Zoppi, L. Xiong, D. Zlatanov, R. M. Molfino (2013). SwarmItFIX: a multi-robot-based reconfigurable fixture. Industrial Robot, Vol.40 No. 4 saatavilla (viitattu 17.1.2023): <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01439911311320822/full/html>

J. Low, P. Khin, Q. Han, H. Yao, Y. Teoh, Y. Zeng, S. Liu, Z. Liu, P. Alvarado, I. Chen, C. Tee, R. Yeow. (2021) Sensorized Reconfigurable Soft Robotic Gripper System for Automated Food Handling, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Saatavilla viitattu (25.3.2022): <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9550783>

A. Mathew, I. Hussain, C. Stefanini, I. Hmida, F. Renda. (2021) ReSoft Gripper: A reconfigurable soft gripper with monolithic fingers and differential mechanism for versatile and delicate grasping, 2021 IEEE 4<sup>th</sup> International Conference on Soft Robotics, Saatavilla (viitattu 25.3.2022): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9479341>

D. J Middleton, M. Knott, S. Cheetham, (2022), Robotic Cells, Pat. In. Hakunumero WO 2022/219345 A1

D. Nguyen, M. Gouttefarde, O. Company, F. Pierrot, (2014). On the analysis of large-dimension reconfigurable suspended cable-driven parallel robots. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6907701>

A. Palkon. (2008). MODULAR RECONFIGURABLE INDUSTRIAL ROBOTS. Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 22, 1-6. Saatavilla rajoitetusti (viitattu 11.2.2022).

D. Pisla, N. Plitea, A. Vidrean, B. Prodan, B. Gherman. D, Lese. (2009). Kinematics and design of two variants of a reconfigurable parallel robot. 2009 ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanism and Robots. Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5173893>

G. Pritschow, K-H. Wurst, C. Kircher, M. Seyfarth. (2009). Control of Reconfigurable Machine Tools, Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, Springer Series in Advanced Manufacturing, Saatavilla viitattu (10.1.2023): <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-84882-067-8.pdf?pdf=button%20sticky>

Process Solutions, Inc. (2018). What are the Different Types of Industrial Robots and their Applications?. Saatavilla (viitattu 8.3.2022): <https://processsolutions.com/what-are-the-different-types-of-industrial-robots-and-their-applications/>

C. Reddy, J. Padayachee, G. Bright (2021) Development and analysis of reconfigurable robotic end-effector for machining and part handling. SciELO. Saatavilla (viitattu 13.3.2022): [http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-78902021000100007](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902021000100007)

E, Romiti, J. Malzahn, N, Kashiri, F. Iacobelli, M. Ruzzon, A. Laurenzi, E.M. Hoffman, L. Muratore, A. Margan, L. Baccelliere, S. Cordasco, N. Tsagarakis. (2022) Toward a Plug-and-Work Reconfigurable Cobot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol 27, No. 5. Saatavilla (viitattu 11.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9550549>

B. Roy, H.H. Asada, (2005), Design of a Reconfigurable Robot Arm for Assembly Operation Inside an Aircraft Wing-Box, Proceeding of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saatavilla (11.1.2023): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1570182>

A. Salminen (2011), Mikä on kirjallisuuskatsaus? Vaasan yliopiston julkaisuja, Opetusjulkaisuja 64, Julkisohtaminen 4. Saatavilla (viitattu 13.2.2023): [https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-349-3.pdf](https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf)

M. Saliba, A. Zarb, J. Borg. (2010). A modular, reconfigurable end effector for the plastics industry. Assembly Automation, Vol. 30 No. 2, Saatavilla (viitattu 27.3.2022): <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01445151011029781/full/html>

K.Smock. (2018). 5 Essential Robotic Cell Components, Robotiq. Saatavilla (viitattu 9.3.2022): <https://blog.robotiq.com/5-essential-robotic-cell-components>

J. Spiliotopoulos, G. Michalos, S. Makris. (2018) A Reconfigurable Gripper for Dexterous Manipulation in Flexible Assembly, Inventions Vol. 3, No. 1. Saatavilla (viitattu 25.3.2022): <https://www.proquest.com/publiccontent/docview/2124470178>

Schneider Company. Types of end effectors. Saatavilla (viitattu 13.3.2022): <https://www.schneider-company.com/types-of-end-effectors/>



- G. Yang, I. Chen, W. K. Lim, S. H. Yeo. (2001). Kinematic Design of Modular Reconfigurable In-Parallel Robots. *Autonomous Robots* vol. 10 Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1026500704076>
- W. Yao, J. S. Dai, T. Medland, G. Mulleneux, (2010), A reconfigurable robotic folding system for confectionery industry. *Industrial Robot*, Vol. 37 No.6. Saatavilla (viitattu 17.1.2023): <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01439911011081696/full/html>
- A. Valente, Reconfigurable industrial robots: A Stochastic programming approach for designing and assembling robotic arms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 41. Saatavilla viitattu (10.1.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516300928>
- Y. Wang, C. Zhao, D. Mei, G. Tang, L. Zhang, D. Zhu (2022). Structural Design and Position Tracking of the Reconfigurable Scara Robot by the Pre-Filter AFE PID Controller. *Applied Sciences* vol 12, no.3 Saatavilla (viitattu 16.1.2023): <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1626>
- M. Wilson (2015), Chapter 2 – Industrial Robots. Implementation of Robot systems Saatavilla (viitattu 13.2.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124047334000023>
- W. Xu, L. Han, X. Wang, H. Yuan. (2020). Intelligent Modularized Reconfigurable Mechanism for Robots: Development and Experiment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 33 No. 74. Saatavilla (viitattu 22.3.2022): <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-020-00497-5>
- Z. Zhakypov, F. Heremans, A. Billard, J. Paik. (2018). An Origami-Inspired Reconfigurable Suction Gripper for Picking Objects With Variable Shape and Size. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3 No. 4. Saatavilla (viitattu 27.3.2022): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8385192>