



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JORI KANGASMÄKI  
TEOLLISUUSROBOTTIEN TARRAINTYYPIT JA SÄHKÖISEN  
TARRAIMEN RAKENTAMINEN  
MATERIAALIA LISÄÄVÄÄ VALMISTUSTA HYÖDYNTÄEN

Kandidaatintyö

Tarkastaja: yliopistotutkija Jani Jokinen  
2017

## TIIVISTELMÄ

**JORI KANGASMÄKI:** Teollisuusrobottien tarraintyypit ja sähköisen tarraimen rakentaminen materiaalia lisäävää valmistusta hyödyntäen / Industrial Robot Grippers and Building an Electric Robot Gripper Using Additive Manufacturing  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Kandidaatintyö, 43 sivua  
Maaliskuu 2017  
Automaatiotekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Factory Automation  
Tarkastaja: yliopistotutkija Jani Jokinen

Avainsanat: tarrain, tarttuja, robotiikka, materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus

Tässä työssä esitellään teollisuusroboteissa käytettäviä erilaisia tarraintyyppejä. Tarraimet jaotellaan toiminnallisuuden mukaan ja niiden tärkeimpiä ominaisuuksia sekä tyypillisimpiä käyttötarkoituksia käydään läpi. Yleisimpiä tarraintyyppejä ovat mekaaniset tarraimet, joiden voimanlähteenä käytetään pääasiassa pneumatiikkaa ja sähköä. Niiden lisäksi työssä esitellään imu- ja magneettista tartuntaa sekä harvinaisempaa tunkeutuvaa tartuntaa hyödyntävät tarraimet. Myös robottisolujen tahtiaikaa lyhentämään käytettäviä monikäyttöisiä ja monitarraimia sekä tarraintenkin vaihdossa hyödynnettäviä työkalunvaihtajia sivutaan lyhyesti.

Työn tutkimusosa toteutetaan Tampereen teknillisen yliopiston ammattiainekerho Pullonkaulan Drinkkirobotti-sovellusta varten. Tutkimusosa käsittelee sähköisen tarraimen rakentamista materiaalia lisäävää valmistusta eli 3D-tulostamista hyödyntäen. Tarraimen käyttötarkoitus on haastava, sillä tarraimella täytyy voida tarttua useaan erimuotoiseen ja -kokoiseen kappaleeseen. Tästä syystä toteutettavaksi valittiin adaptiivisella eli mukautuvalla sormimekanismilla varustettu tarrain.

Teollisuusrobotin tarrain on yksi robottisolun tärkeimmistä osa-alueista, joten sen valintaan tai suunnitteluun täytyy panostaa riittävästi. Työn tutkimusosassa tarraimen rakentamista alustetaan ensin sen tehtävän ja vaatimusten määrittämisellä. Kun valmistettavan tarraimen malli on valittu, käydään läpi rakennusprosessissa hyödynnettävien materiaalia lisäävien valmistusmenetelmien peruseriaatteet. Tämän jälkeen varsinainen tarraimen rakentaminen ja siihen liittyvät haasteet sekä ratkaisut kohdattuihin ongelmiin on esitelty. Työn lopputuloksena syntyi toimiva tarrain, joten 3D-tulostamisen voidaan ajatella sopivan robotin tarraimen valmistamiseen.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TARRAINTYYPIT JA OHEISLAITTEET.....	3
2.1	Mekaaninen tartunta.....	4
2.2	Imutartunta .....	12
2.3	Magneettinen tartunta.....	14
2.4	Tunkeutuva tartunta.....	18
2.5	Monikäyttöinen tarrain ja monitarrain .....	19
2.6	Työkalunvaihtajat.....	22
3.	DRINKKIROBOTIN TARRAIN .....	25
3.1	Tehtävä ja vaatimukset.....	26
3.2	Valinta .....	28
3.3	Yleistä 3D-tulostamisesta.....	30
3.4	Tarraimen 3D-tulostaminen .....	31
3.5	Mekaniikka.....	33
3.6	Voimanlähde ja ohjauselektronikka.....	35
4.	YHTEENVETO .....	39

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: Tarraintyyppejä luokiteltuna toiminnallisuuden perusteella (mukaillen Schunk et al. 2005, s. 114).</i>	3
<i>Kuva 2: Yleisimpiä tarrainten mekaanisia toimintaperiaatteita (Monkman et al. 2007, s. 95).</i>	5
<i>Kuva 3: Saman valmistajan erityyppisiä pneumaattisia tarraimia. Vasemmalta oikealle: rinnakkainen (parallel) tarrain, kiertyväsorminen (angular) tarrain ja keskittävä (centric) tarrain (mukaillen Schunk et al. 2005).</i>	6
<i>Kuva 4: Sähköinen tarrain, joka on suunniteltu ulkoisesti samankokoiseksi kuin vanhempi, pneumaattinen tarrainmalli (mukaillen Schunk, verkkosivu).</i>	9
<i>Kuva 5: Adaptiivinen eli mukautuva sähköinen tarrain (Robotiq, verkkosivu).</i>	11
<i>Kuva 6: Kaksi erityyppistä alipainetarrainta. Vasemmalla perinteinen imukuppeilla varustettu tarrainkehikko. Oikealla aluetarrain, joka soveltuu erikokoisille ja esimerkiksi karheillekin materiaaleille (mukaillen Schmalz, verkkosivu).</i>	12
<i>Kuva 7: Alipainetarraimissa käytettäviä erimallisia imukuppeja (Schunk et al. 2005, s. 95).</i>	13
<i>Kuva 8: Magneeteilla voidaan tarttua myös pyöreisiin ja epätasaisiin kappaleisiin (mukaillen Ixtur [b], verkkosivu).</i>	14
<i>Kuva 9: Suomalaisen valmistajan kahden kestomagneettisen tarraimen ominaisuuksia (Ixtur [a], verkkosivu).</i>	15
<i>Kuva 10: Kestomagneetin magnetisointisuunnan mekaaninen ohjaaminen (mukaillen Monkman et al. 2007, s. 204).</i>	16
<i>Kuva 11: Nipistävä tarrain (mukaillen Monkman et al. 2007, s. 163).</i>	18
<i>Kuva 12: Lävistävä neulatarrain ja sen rakenne (mukaillen VMECA, verkkosivu; Monkman et al. 2007, s. 166).</i>	19
<i>Kuva 13: Monikäyttöinen mekaaninen tarrain (Monkman et al. 2007, s. 342).</i>	20
<i>Kuva 14: Mukautuva, kolmisorminen tarrain ja sen eri tartuntatyylit (mukaillen Robotiq, verkkosivu).</i>	20
<i>Kuva 15: Monitarraintyyppejä. Vasemmalla tarrainrevolveri ja oikealla kiinteärunkoinen monitarrain (mukaillen Kuivanen 1999, s. 75).</i>	21
<i>Kuva 16: Työkalunvaihto käynnissä (Schunk et al. 2005, s. 203).</i>	22
<i>Kuva 17: Työkalunvaihtajan (sekä kiinnityslaipan että vastakappaleen) läpileikkauskuva (Schunk, verkkosivu).</i>	23
<i>Kuva 18: Kolmen vaihdettavan työkalun työkaluasema, jonka voi ostaa valmiina ratkaisuna (Schunk, verkkosivu).</i>	24
<i>Kuva 19: Tarrain käyttökunnossa.</i>	26
<i>Kuva 20: Erimuotoisia pulloja, joihin Drinkkirobotin tulee kyetä tarttumaan. Oikealla reunalla näkyvä pullo on muovia, joka joustaa, kun siihen kohdistuu puristusvoima.</i>	27

<i>Kuva 21: Yale-yliopiston OpenHand-projektin monikäyttöinen, mukautuva Model T42 - tarrain (mukaillen Yale University, verkkosivu).....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 22: SolidWorksilla renderöity kuva tarraimen 3D-mallista.....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 23: Vasemmalla Prenta Duo -tulostin ja oikealla Formlabs Form 2 (mukaillen Prenta, verkkosivu; Formlabs, verkkosivu). .....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 24: SLA- ja FDM-tekniikoilla tulostettuja tarraimen osia. Ylimmäisinä olevissa sinertävissä SLA-tulosteissa ilmeni epämuodostumia. Punaiset osat ovat ABS-muovia ja mustat PLA:ta.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 25: Arduino, Motor Shield ja tasavirtamoottori (mukaillen Arduino [a], verkkosivu). .....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 26: Tarraimen ohjauselektronikka sisältäen omatekemän virranmittausyksikön.....</i>	<i>37</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	Computer-Aided Design
ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
PLA	Polyaktidi
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografia
DLP	Digital Light Processing
NC	Numerical Control
IDE	Integrated Development Environment
A/D-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin

# 1. JOHDANTO

Teollisuusrobottien määrän kasvu maailmalla on kiihtynyt erityisesti vuosikymmenen alusta teollisuuden jatkuvan automatisoinnin ja robottien teknisen kehityksen seurauksena. International Federation of Roboticsin (IFR) julkaisemien tilastojen mukaan teollisuusrobottien vuosittainen ostomäärä oli vuonna 2014 yli 229 000 kappaletta ja myynnin kasvu oli 29 % edellisvuoteen verrattuna. Kasvua vauhditti erityisesti robotisointi auto- ja elektroniikkateollisuudessa. (International Federation of Robotics 2016, verkkosivu)

Suomessa kuitenkin teollisuusrobottien yhteenlaskettu määrä kääntyi 2010-luvun vaihteessa laskuun ja vähenee nykyisellään muutaman prosentin vuosivauhtia. Uusien investointien määrä, noin 250 kappaletta vuodessa, ei siis ole pitkään aikaan kattanut poistuvaa tuotantokapasiteettia. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2016, s. 12) Esimerkiksi vuonna 2013 ilman Valmet Automotiven poikkeuksellisen suurta investointia Uudenkaupungin autotehtaalle uusien robottien pudotus olisi ollut jopa viidenneksen luokkaa (Viitala 2016, verkkosivu).

Aasiaan siirtyneen valmistavan teollisuuden voisi tuoda robotisoinnin avulla lähes kokonaisuudessaan takaisin kehittyneisiin maihin (Sipola 2016, verkkosivu). Suomen mahdollisuudet hyötyä neljänestä teollisesta vallankumouksesta, jossa robotisaatio on suuressa merkityksessä, on UBS:n tutkimuksen (2016, s. 25) mukaan maailman kärkitasoa. Tämä lasketaan suurelta osin korkean koulutustason ansioksi.

Mahdollisuuksista huolimatta suuri osa ihmisistä suhtautuu edelleen epäilevästi, jopa peläten, teollisuusrobotteihin. Näitä ennakkoluuloja täytyy murtaa ja tuoda robotteja lähemmäs kuluttajaa. Tämä ajatus on ollut taustalla myös Suomen robotiikkayhdistyksen Drinkkiroboti-projektin kehitystyössä (Suomen robotiikkayhdistys, verkkosivu). Tällä hetkellä Tampereen teknillisellä yliopistolla toimiva tuotantotekniikan ammattianeikerho Pullonkaula kehittää Drinkkirobotin neljättä versiota.

Teollisuusrobotin tärkein ulkoinen komponentti on sen työkalu. Tämä opinnäytetyö käsittelee mukautuvan teollisuusrobotin tarraimen rakentamista materiaalia lisäävän valmistuksen avulla. Materiaalia lisäävä valmistus eli 3D-tulostaminen on viime aikoina yleistynyt voimakkaasti sekä teollisuudessa että kuluttajapuolella. Siitä on tullut kustannustehokas tapa valmistaa prototyyppisiä ja jopa valmiita tuotteita.

Työn seuraavassa luvussa käydään läpi, millaisia teollisuusrobottien tarraintyyppejä on olemassa ja millaisiin käyttötarkoituksiin niitä käytetään. Tarraintyypit on luokiteltu alalukuihin toiminnallisuuden mukaan.

Kolmas luku on työn tutkimusosa. Siinä tutkitaan käytännössä, millainen tarraimen mekaniikka ja ohjaustekniikka soveltuvat kyseessä olevalle robottisovellukselle eli Drinkkirobotille. Lisäksi arvioidaan materiaalia lisäävällä valmistuksella tehtyjen osien soveltuvuutta robottitarraimen rakenteiksi. Työ toimii osaltaan myös dokumentaationa tarraimen rakennusprosessille ja laitteen testaukselle.

”Viimeinen sammuttakoon valot, jollei robotiikkaan panosteta.”



## 2. TARRAINTYYPIT JA OHEISLAITTEET

Teollisuusrobotin työkaluksi kutsutaan tavallisesti robotin käden päähän, niin sanottuun työkalulaippaan, asennettavaa komponenttia. Tämän työkalun tyyppi ja tehtävä vaihtelevat robottisolun kokonaistehtävän mukaan. Erilaisia työkaluja ovat esimerkiksi maalausruisku, hitsauspistooli, jyrsin ja katkaisuterä. Myös työkalujen yhdistelmät ovat varsin tavallisia. Yleisin kuitenkin kaikista vaihtoehdoista on tarrain. (Kuivanen 1999, s. 60)

Tarrain ja sen tarkoituksenmukainen toiminta ovat poikkeuksetta robottisolun tärkeimpiä osa-alueita. Huonosti valittu, suunniteltu tai muuten käyttötarkoitukseen soveltumaton tarrain voi aiheuttaa usein virhetilanteita ja sitä kautta käyttökatkoja solun toimintaan. Tällä taas voi olla vaikutusta moneen muuhun tuotannon osaan, ja tuotannon katkoista voi kasautua suuret kustannukset. Myös robottisolun turvallisuus saattaa heikentyä, mikäli esimerkiksi työkappale pääsee irtoamaan nopeita liikkeitä tekevän teollisuusrobotin tarraimesta.

Kappaleeseen tarttuminen on monimuotoinen tehtävä, koska kohdekappaleilla voi olla hyvin erilaisia fyysisiä ominaisuuksia. Tarrainta valittaessa on järkevää aloittaa tarkastelu juuri käsiteltävästä kappaleesta ja sen ominaisuuksista, joista tärkein on geometria eli muoto ja koko. Massa, materiaali ja pinnan kitka ovat luonnollisesti oleellisessa osassa. Suuri vaikutus on myös sillä, miten päin kappale esitetään tarraimelle. Esimerkiksi maassa makaava ohut metallilevy voi olla vaikea saada poimittua tarraimen leukojen väliin, mutta jos se on pystyssä, tilanne muuttuu. (Schunk et al. 2005, s. 74–76) Kun tarrainta valitaan, on myös tärkeää ottaa huomioon käytettävän teollisuusrobotin suurin sallittu hyötykuorma.

mekaaniset tarraimet		alipaine-tarraimet	magneettiset tarraimet	liimautuvat tarraimet	muovautuvat tarraimet	lävistävät tarraimet
saksi	haarukka		sähkömagn.	tartuntakalvo		
						
rinnakkaisleuka	kolmipiste		kestomagn.			
						

**Kuva 1:** Tarraintyyppejä luokiteltuna toiminnallisuuden perusteella (mukaiillen Schunk et al. 2005, s. 114).

Kuvassa 1 on jaoteltu tarraintyypit toiminnallisuuden mukaan. Kaksi yleisintä tartuntatapaa ovat mekaaninen (puristava) tartunta sekä alipaine (Kuivanen 1999, s. 115). Lisäksi teollisuudessa on käytössä magneettisia, liimautuvia, muovautuvia ja lävistäviä tarraimia. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi erityyppisten tarrainten ominaisuuksia ja käyttökohteita.

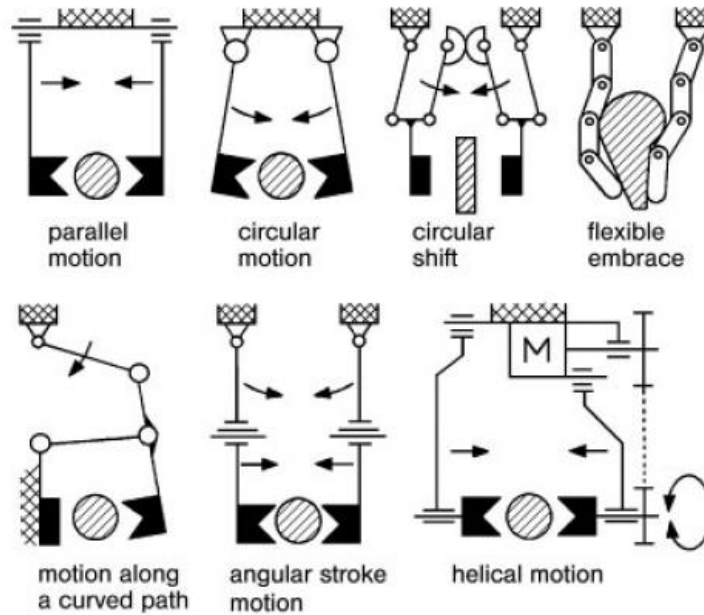
## 2.1 Mekaaninen tartunta

Mekaanisten tarrainten kappaleita pitävä voima perustuu klassisen (Newtonin) mekaniikan teoriaan ja sen kuvaamiin fysikaalisiin ilmiöihin. Ne ovat yleisin tarraintyyppe ja erilaisia variaatioita esiintyy runsaasti. (Monkman et al. 2007, s. 75) Mekaaniset tarraimet koostuvat yleensä jostakin toimilaitteesta, mekanismista, sormista ja mahdollisesti kynsistä. Yksinkertaisissa tapauksissa osia voidaan yhdistää. (Kuivanen 1999, s. 63) Sormilla tarkoitetaan osaa, joka on kontaktissa kappaleen kanssa, ja useimmiten tarraimilla on kahdesta neljään tahdistetusti liikkuvaa sormeä. (Monkman et al. 2007, s. 75)

Mekaanista tarrainta harkittaessa on otettava huomioon tartuntatapa ja -kohta sekä säädettävyyden eri tuotteille. Yleissääntönä on, että käsiteltävien tuotteiden kokovaihtelun kasvaessa kasvaa myös mekaanisen tarraimen monimutkaisuus. Mekanismin ja toimilaitteen valinta vaikuttaa myös tarraimen liikealueeseen ja tartuntavoimaan. (Kuivanen 1999, s. 116) Mekaanisten tarrainten usein monimutkaista rakennetta kuitenkin kompensoi niiden toiminnallinen luotettavuus ja kyky tuottaa sopivan (usein säädettävän) suuruista voimaa (Monkman et al. 2007, s. 75).

Mikäli tarrainta halutaan käyttää erilaisten kappaleiden käsittelyyn, usein toimiva ratkaisu on yhdistää samaan tarraimeseen sekä mekaaninen tartunta että imutartunta, jolloin osa tartunnoista voidaan suorittaa alipaineimua hyödyntäen ja näin vähentää tarraimen monimutkaisuutta (Kuivanen 1999, s. 116).

Mekaaniset tarraimet ovat yleensä joko rinnakkaisia, lineaarisesti liikkuvilla sormilla varustettuja tarraimia tai kiertyväsormisia, niin kutsuttuja saksitarraimia. Kaksisorminen rinnakkainen tarrain on yleisin käytetty robottitarrain. Rinnakkainen tarrain on yleensä yksinkertaisempi rakenteeltaan ja toiminnaltaan, ja sen sormet vievät vähemmän tilaa avautuessaan. Kiertyväsormisen tarraimen kauemmas avautuvat sormet voivat mahdollistaa suuremman tartuttavan kappaleen kokovaihtelun, ja sormet voidaan saada joissakin sovelluksissa paremmin pois tieltä. (Gupta & Arora 2013, s. 356) Yleisimpiä tarrainmekanismeja on esitelty seuraavassa kuvassa:



**Kuva 2:** Yleisimpiä tarrainten mekaanisia toimintaperiaatteita (Monkman et al. 2007, s. 95).

Mekaanisissa tarraimissa voidaan käyttää erityyppisiä voimanlähteitä, voimansiirtoja, jarruttavia tai vaimentavia elementtejä sekä tarvittaessa antureita. Erilaisia voimansiirron rakenteita ovat nivelmekanismit, hammaspyörät ja -tangot, ruuvit, linearijohteet, epäkeskot ja niin edelleen (Gupta & Arora 2013, s. 358). Koska voimansiirrolle on paljon vaihtoehtoja, on olemassa myös hyvin monenlaisia tarrainmekanismeja ja -rakenteita, joissa suoraviivainen liike tai pyörimisliike muutetaan tarraimen sormien liikkeeksi (Monkman et al. 2007, s. 83). Yleisimpiä mekanismeja on esitelty Kuva 2.

Mekaaniset tarraimet on usein suunniteltu keskittäviksi, mistä on hyötyä monissa sovelluksissa. Sormet liikkuvat tällöin symmetrisesti tarraimen keskiakselin suhteen, eikä tartuttavien kappaleiden koon tai sijainnin pienestä vaihtelusta ole välttämättä haittaa kappaleeseen tarttumisen ja sen asemoinnin kannalta. Sen sijaan esimerkiksi alipainetarraimissa tarvitaan yleensä lisälaitteistoa auttamaan kappaleen asemoinnissa. (Monkman et al. 2007, s. 75)

Yleisimmät mekaanisten tarrainten tyypit ovat pneumaattinen ja sähköinen, ja niiden toimintaperiaatteet on esitelty seuraavissa alaluvuissa. Myös hydraulisia tarraimia käytetään, mutta tällaiset sovellukset ovat tänä päivänä harvinaisia. Hydraulinen tarrain on lisäksi toiminnaltaan ja tyypiltään hyvin samanlainen kuin pneumaattinen, joten niitä ei ole esitelty erikseen tässä työssä.

Joidenkin lähteiden mukaan hydraulisia tarraimia käytetään korkeaa puristusvoimaa vaativissa sovelluksissa (Gupta & Arora 2013, s. 356, Schunk et al. 2005, s. 125).

Tällaisia tarraimia ei kuitenkaan ole juuri markkinoilla. Hydraulista tarrainta käytetäänkin robottisovelluksessa yleensä vain, mikäli sovelluksessa on käytössä muita hydraulisia laitteita, mutta paineilmaa ei ole valmiiksi saatavilla. Hydrauliset tarraimet ovat hinnakkaampia kuin pneumaattiset, eivätkä ne sovellu puhdistilasovelluksiin.

### 2.1.1 Pneumaattinen tarrain

Vielä toistaiseksi suosituin voimanlähde tarraimissa on paineilma. Sitä on yleensä jo valmiiksi saatavilla tehtaissa, ja säätämällä painetta tarraimen puristusvoiman suuruutta voidaan muuttaa helposti. Pneumaattiset tarraimet ovat yleensä edullinen vaihtoehto, ja saatavilla on hyvin monenlaisia malleja, joihin voidaan usein vaihtaa leuat tai sormet tartuttavan kappaleen mukaisiksi. Tarraimet ja niihin liittyvät pneumatiikkakomponentit, kuten venttiilit ja letkut, ovat myös kevyitä ja turvallisia, kun suunnittelu on toteutettu oikein. (Kurfess 2005, s. 222) Seuraavassa kuvassa on kolme erityyppistä pneumaattista tarrainta:



**Kuva 3:** Saman valmistajan eri tyyppisiä pneumaattisia tarraimia. Vasemmalta oikealle: rinnakkainen (parallel) tarrain, kiertyväsorminen (angular) tarrain ja keskittävä (centric) tarrain (mukaillen Schunk et al. 2005).

Tarraimen liikkeen saa aikaan pneumaattinen sylinteri (tai sylinterit), joka on integroitu sisäisesti tarraimen koteloon tai kiinnitetty siihen ulkoisesti. Nämä yksinkertaiset toimilaitteet ovat vahvoja ja kestäviä sekä omaavat korkean tehon suhteessa massaansa ja kokoon. Yleensä sylintereiden liikettä ohjataan sähköisillä solenoidiventtiileillä, jotka saavat ohjaussignaalin robotin tai ohjelmoitavien logiikoiden I/O-yksiköltä. Pneumaattiset tarraimet kykenevät liikuttamaan sormiaan hyvin nopeasti ja viivettä, eli välittömästi, kun venttiili on saanut ohjaussignaalin (Micromo, verkkosivu).

Pneumaattista tarrainta ja sen käyttöönottoa suunniteltaessa on varmistettava, ettei kappaleen putoaminen pääse aiheuttamaan vaaratilannetta, mikäli paineensyöttö katkeaa. Tarraimen aukeaminen on mahdollista estää valitsemalla sovellukseen oikeanlaiset paineilmakomponentit, kuten venttiilit (Kurfess 2005, s. 222). Sähkökatkoissa paineilmalaitteet kuitenkin vikaantuvat yleensä sähkölaitteita turvallisemmin paineilmasäiliön ansiosta.

Pneumaattisia tarraimia löytyy sekä yksitoimisilla, jousipalautuksella varustetuilla sylintereillä että kaksitoimisilla sylintereillä (Monkman et al. 2007, s. 84). Ensin mainitut vaativat vain yhden pneumatiikkaletkun kytkemisen sylinteriin ja 3/2-suuntaventtiiliin. Jälkimmäisenä mainitut vaativat pneumatiikkaletkun kytkemisen molempiin sylinterin päihin ja vähintään 4/2-suuntaventtiiliin. Kaksitoimisen sylinterin etuna on, että sillä pystytään tuottamaan pneumaattisesta tehosta voimaa ja liikettä molempiin työliikkeen suuntiin. Suljetun keskiasennon 5/3-suuntaventtiilillä kaksitoimisen sylinterin mäntä on mahdollista lukita mihin asentoon tahansa. Tästä tartuntaliikkeen pysäyttämistä voi olla hyötyä joissakin tartuntasovelluksissa, mutta lähes aina asentoja on vain kaksi: auki ja kiinni.

Nykyään pneumaattiset sylinterit sisältävät usein säädettävät päätyvaimennukset, jotka vaimentavat sylinteriin kohdistuvia rasiuksia männän ääriliikkeissä. Kaikissa tarraimissa niitä ei kuitenkaan ole ja sylintereiden elinikä voi lyhentyä. Vaimennusten lisäksi toinen vaihtoehto on käyttää säädettäviä vastusvastaventtiileitä sylinterin ilman sisään- ja/tai ulostulokanavissa. Tällaiset venttiilit rajoittavat läpi menevän ilman virtausta toiseen suuntaan, joten niiden avulla voidaan säätää männän liikenopeutta ja täten myös vähentää rasiuksia. Kun venttiilit säädetään oikein, tarraimen elinikää voidaan nostaa huomattavasti ilman, että tämä hidastaa sovelluksen toimintaa. (Monkman et al. 2007, s. 85)

Sylinterin iskunpituudesta riippuen pneumaattisella tarraimella voi olla mahdollista tarttua jonkin verran erilevyisiin kappaleisiin. Kun tarraimen leuat asetetaan kiinni-asentoon, leveämmällä kappaleella mäntä kulkee lyhyemmän matkan, mutta paineilman aiheuttama voima on sama kuin kapeammalla kappaleella. Lähes kaikkien pneumaattisten tarrainten leuat ovat vaihdettavissa ja erilaisilla leuoilla voidaan tarttua erimuotoisiin ja -kokoisiin kappaleisiin. Leukojen vaihtaminen tapahtuu kuitenkin yleensä ihmisen toimesta eli manuaalisesti. On myös olemassa erikoistarraimia, joihin sormet voidaan vaihtaa robotilla automaattisesti; samaan tapaan kuin koko työkalu voidaan vaihtaa työkalunvaihtajan avulla. Tällaiset erikoistarraimet ovat kuitenkin hyvin harvinaisia.

Yksi pneumaattisten tarrainten rajoittava tekijä on ilman käyttö tehonsiirrossa, sillä ilma on suuresti kokoonpuristuvaa verrattuna esimerkiksi hydraulineesteeseen. Tarraimen sylinterin liike voi olla epätarkkaa, mikä tekee leukojen voiman ja nopeuden tarkasta kontrolloimisesta vaikeaa. (Kurfess 2005, s. 250)

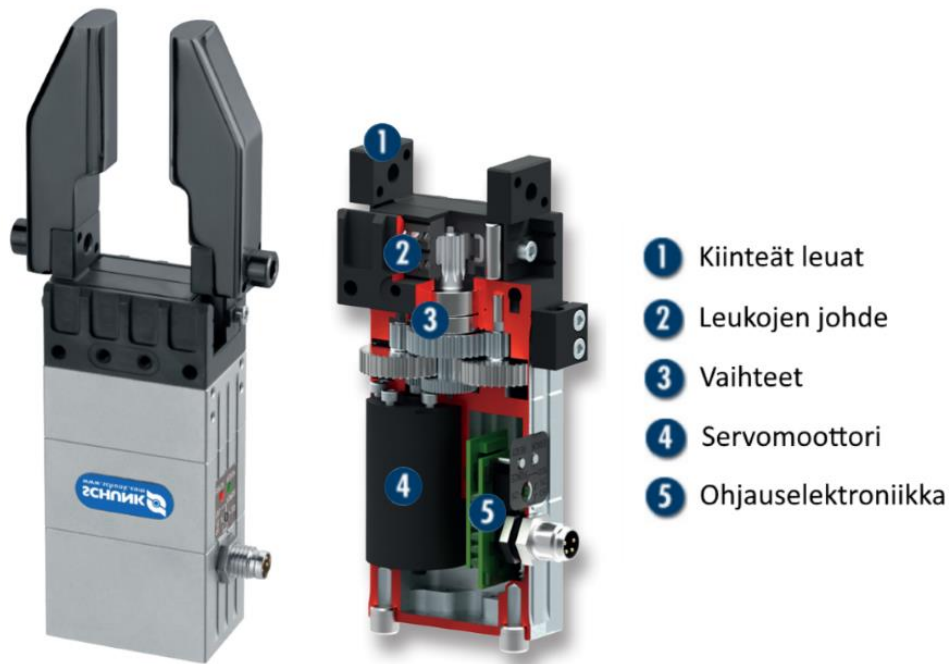
Pneumaattisia tarraimia voidaan käyttää puhdastilasovelluksissa, kun poistoilma viedään puhdastilan ulkopuolelle. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tarrainta, jonka voiteluaine ei kulkeudu poistokanavaan ja johon johdetaan hyvin puhdistettua ja kuivatettua ilmaa. (Kurfess 2005, s. 222) Pneumaattisten tarrainten etuna on myös, että niitä voidaan käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa, sillä niistä ei synny kipinävaaraa (Schunk et al. 2005, s. 125).

### **2.1.2 Sähköinen tarrain**

Markkinoilla ei ole vielä kovin montaa sähkömekaanista tarrainta, mutta niiden käyttö ja kehitys lisääntyy jatkuvasti. Uusissa robottisovelluksissa valitaan yhä useammin esimerkiksi pneumaattisen tarraimen tilalle sähköinen. Koska aihe on suhteellisen uusi, siitä on saatavilla hyvin vähän kirjallisuutta tai tutkimustietoa.

Kompakti tarrain, joka on sekä nopea että voimakas, on vielä joitakin vuosia sitten ollut mahdollista toteuttaa ainoastaan pneumatiikan avulla. Tämä johtuu siitä, että paineilmalla voidaan välittää suuri määrä puristusvoimaa käytännössä viiveettömästi, eikä markkinoilla ole ollut vastaavaan kykeneviä, tarpeeksi pieniä, nopeita, voimakkaita sekä edullisia sähkömoottoreita. (Micromo, verkkosivu)

Tarraimen sähkömekaanisena voimanlähteenä voi toimia pienoiskokoinen servo-, askel- tai lineaarimoottori. (Monkman et al. 2007). Nämä eri moottorityypit on esitelty seuraavissa kappaleissa. Voimakkaat, suuren vääntömomentin tuottavat sähkömoottorit ovat vielä toistaiseksi melko suurikokoisia, joten joissakin suuren puristusvoiman vaativissa sovelluksissa pneumaattinen tai hydraulinen tarrain saattaa olla ainoa vaihtoehto. Sähköisen tarraimen voimansiirto perustuu useimmiten hammaspyörien ja -tankojen yhdistelmiin, mutta myös esimerkiksi matoruuveja käytetään moottorin pyörimisliikkeen muuntamisessa tarraimen sormien liikkeeksi. (Monkman et al. 2007, s. 76) Kuvassa 4 on esitelty servomoottorilla toimivan tarraimen rakennekuva:



**Kuva 4:** Sähköinen tarrain, joka on suunniteltu ulkoisesti saman kokoiseksi kuin vanhempi, pneumaattinen tarrainmalli (mukaillen Schunk, verkkosivu).

Askelmoottorit ovat yleisiä ja edullisia sähkömoottoreita, joissa ei ole takaisinkytkentää, eli moottoriohjaimella ei ole tietoa akselin todellisesta positioista. Tässä moottorityypissä roottori on kestopagneetti ja staattori sisältää sähkömagneetteja. Moottoriohjain lähettää staattorille virtapulseja, ja yhdellä pulssilla roottori kääntyy yhden staattorin napavälin eli yhden askeleen verran. Askelmoottoria voidaan käyttää tarkkaa paikoitusta vaativissa kohteissa, ja yksi askel voi moottorista riippuen tarkoittaa jopa alle asteen pyörimisliikettä. (Advanced Micro Systems 2010, s. 5)

Koska askeleen suuruus tiedetään ja se pysyy samana, voidaan moottoria ohjata usein tarpeeksi tarkasti ilman takaisinkytkentää. Jos halutaan varmistua, että tartunta on onnistunut tai että käsiteltävä kappale pysyy kiinni tarraimessa, voidaan tarraimen kiinnittää erilaisia antureita. Toisin kuin usein servomoottoreilla toimivat tarraimet, askelmoottoreilla toimivat vaativat tartuntavoiman mittausta varten tarraimen tartuntapintoihin kiinnitettäviä erillisiä voima-antureita, kuten voiman tunnustavia vastuksia (force-sensing resistors) tai venymäliuska-antureita. Voimatieto voidaan saada joissakin tapauksissa karkealla tasolla selville mittaamalla moottorin virrankulutusta. Aiemmin mainittujen lisäksi moottorityypin etuja ovat luotettavuus, korkea vääntö matalilla nopeuksilla ja yksinkertainen, vahva rakenne, joka toimii lähes minkälaisissa olosuhteissa tahansa (Advanced Micro Systems 2010, s. 2).

Servomoottoreita voidaan käyttää takaisinkytkentänsä ansiosta vaativissa sovelluksissa, joissa tarvitaan herkkää paikan tai voiman mittausta tai säätöä. Takaisinkytkentä on

toteutettu moottorin koteloon integroidulla enkooderilla, joka on yleensä optinen tai magneettinen inkrementti- tai absoluuttipulssianturi. Pienissä, rajoitetun liikealueen servoissa voidaan käyttää myös esimerkiksi potentiometrejä. Anturitieto kulkeutuu elektroniselle servo-ohjaimelle, joka vertaa todellista asematietoa haluttuun asematietoon ja säätää moottorille syötettävää sähköä, jotta haluttu asema saavutetaan. (Sandin 2003, s. 44-48)

Käytännössä servon sisältämä sähkömoottori voi olla usealla eri periaatteella toimiva, kuten harjallinen tai harjaton tasavirtamoottori. Servomoottorit sopivat askelmoottoreita paremmin suuren kierrosluvun, kiihtyvyyden, väännön tai vaihtelevan kuorman sovelluksiin. Servomoottorit myös kuluttavat vähemmän virtaa ja tuottavat vähemmän lämpöä kuin askelmoottorit. (CNC Router Source, verkkosivu) Tämä on merkittävä seikka tarrainten kannalta, sillä niiden koteloitinta on usein suljettu ja hyvin tiivis.

Lineaarimoottoreiden etuna on, että ne kykenevät erittäin nopeaan lineaariseen liikkeeseen. Niillä voi siis olla mahdollista liikuttaa tarraimen leukoja nopeammin kuin pyörivällä moottorilla. Lineaarimoottorin rakenne on yksinkertainen ja siinä on vähän liikkuvia osia; se on käytännössä sähkömoottori, jonka staattori ja roottori ovat kierrettyinä auki tasoksi. Koska moottori liikkuu lineaarisesti, trapetsiruuvia tai vastaavaa voimansiirtoa ei tarvita muuttamaan pyörimisliikettä lineaariliikkeeksi. Lineaarimoottorit sopivat yleensä vain pienille kuormille ja useimpiin sovelluksiin lineaarimoottoreilla onkin enemmän rajoituksia kuin hyötyjä. (Anaheim Automation, verkkosivu)

Useimpien pyörivien voimanlähteiden, kuten sähkömoottoreiden, vääntömomentin voidaan olettaa olevan vakio koko tartuntavälillä. Kuitenkin kun tarraimen leuat sulkeutuvat, moottori pysähtyy. Mikäli tasavirtamoottorin liikettä vastustetaan liikaa, voi se aiheuttaa suuren virrankulutuksen nousun, ylikuumenemisen ja lopulta moottorin kärkehtämisen. Tämä täytyy ottaa huomioon, jotta käsiteltävään kappaleeseen säilyy tarpeeksi suuri tartuntavoima, eikä ote pääse heikentymään. Usein tasavirtamoottorin syöttövirtaa ei voida täysin katkaista, sillä muuten käsiteltävään kappaleeseen ei kohdistu tarpeeksi suurta puristusvoimaa. Moottorinohjauselektronikan avulla on kuitenkin mahdollista rajoittaa virran syöttöä pysähtyneelle moottorille. Leukojen puristusotteen heikentyminen on mahdollista estää myös mekaanisesti voimavälityksellä, joka estää leukojen liikkumisen toiseen suuntaan, kun virransyöttö moottorille on katkaistu. Tämän haittapuolena voi olla leukojen tahtiajan pidentyminen. (Monkman et al. 2007, s. 79) Muita keinoja säilyttää puristusote on sähkömagneetin tai jousen avulla (Monkman et al. 2007, s. 83).





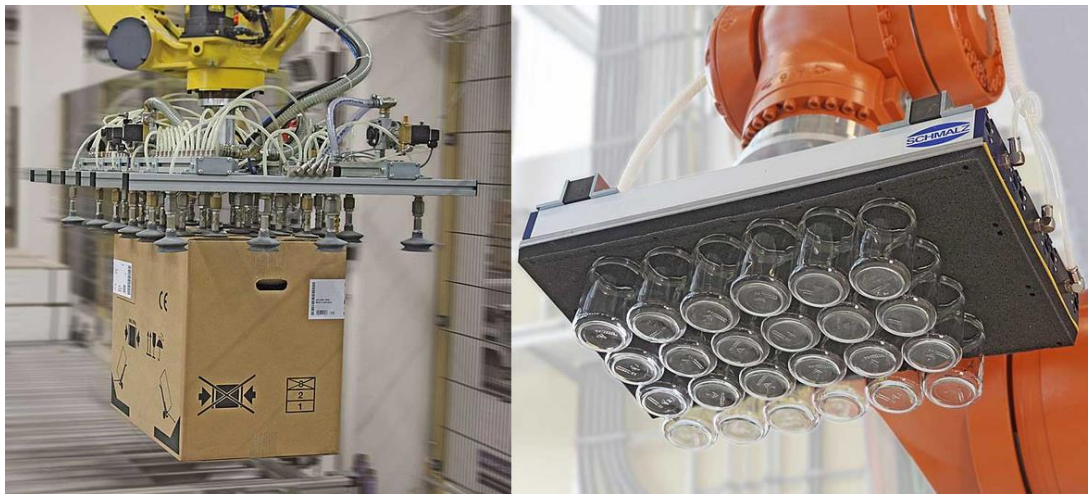
*Kuva 5: Adaptiivinen eli mukautuva sähköinen tarrain (Robotiq, verkkosivu).*

Sähköisten tarrainten suurimpia etuja on niiden ohjattavuus. Esimerkiksi pneumaattisilla tarraimilla on yleensä vain kaksi asentoa: auki ja kiinni. Tarraimen leuat aukeavat tällöin ääriasentoonsa. Sähköisellä tarraimella on helppoa käskä moottori avaamaan leukoja vain tietyn matkan, joten ne ovat hyvin joustavia, ja samaa tarrainta voidaan tarvittaessa käyttää monen erilaisen kappaleen käsittelyyn. (Gupta & Arora 2013, s. 356) Kuvassa 5 näkyy mukautuva tarrain, jonka puristusvoima on säädettävissä. Voiman mittaukseen voidaan käyttää apuna sähkömoottoreiden virrankulutuksen mittausta.

Sähköisten tarrainten haittapuolena on, että niitä ei voida käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa moottorin kipinöinnin vuoksi. Ne ovat myös moottorin vuoksi yleensä hieman isompia ja puristusvoimaltaan heikompia kuin pneumaattiset tarraimet. Viimeksi mainitut asiat tulevat muuttumaan lähitulevaisuudessa, sillä moottoritekniikka kehittyy jatkuvasti. (Gupta & Arora 2013, s. 356)

## 2.2 Imutartunta

Imu- eli alipainetarrainta voidaan käyttää monenlaisissa sovelluksissa sellaisten kappaleiden nostamiseen, joiden käsittely mekaanisella tarraimella olisi vaikeaa tai hidasta. Imukuppien käyttö vaatii yleensä laajan, puhtaan, tiiviin ja sileän pinnan. Lisäksi tarraimen tai tartuttavaan kappaleeseen ei saa syntyä suuria sivuttaisvoimia, sillä tarraimen ja kappaleen välinen kitka ei ole yleensä kovin suuri ja kappale voi päästä irtoamaan. Tartuntavoimaa voidaan kasvattaa lisäämällä imukuppien määrää. (Kuivanen 1999, s. 63) Kuvassa 6 näkyy kaksi yleistä alipainetarraimen tyyppiä:



**Kuva 6:** Kaksi erityyppistä alipainetarrainta. Vasemmalla perinteinen imukuppeilla varustettu tarrainkehikko. Oikealla aluetarrain, joka soveltuu eri kokoisille ja esimerkiksi karheillekin materiaaleille (mukaillen Schmalz, verkkosivu).

Alipainetta muodostetaan yleensä alipaine-ejektorilla (alipainekehitin), jonka toiminta perustuu Venturi-ilmiöön. Ejektorin läpi virtautetaan paineistettua ilmaa, jolloin sivukanavaan muodostuu alipaine. Ejektorit ovat yksinkertaisia ja edullisia komponentteja. Toinen vaihtoehto alipaineen muodostamiseen on alipainepumppu, jolla voidaan saada aikaan korkeampi alipainetaso ja massavirta. (Kurfess 2005, s. 222) Pumpulla voidaan saavuttaa myös parempi hyötysuhde ja se voi sopia paremmin puhdastilasovelluksiin.

Kuten pneumaattisen tarraimen tapauksessa, alipainetarraimen käyttöä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että mikäli alipaineen saanti lakkaa esimerkiksi sähkökatkon vuoksi, kappale voi irrota tarraimesta. Näin ollen robottisolun tulee olla sellainen, ettei kappale irrotessaan pääse aiheuttamaan henkilö- tai muita vakavia vahinkoja. Mikäli alipainetarraimessa ei käytetä varolaitteita, jo yhden imukupin irtoaminen voi aiheuttaa alipaineen merkittävän heikkenemisen ja kappaleen irtoamisen. Tämä voidaan estää käyttämällä imukuppeja tai -elementtejä jotka sisältävät imukanavat sulkevia kuulia.

Alipaine-ejektoriä käytettäessä kompressorin ja alipainetarraimen väliin voidaan asentaa varapaineilmasäiliö, jonka kautta paineilma kulkeutuu ejektorille. Säiliön tuloliitäntään on kytketty vastaventtiili, joka päästää paineilman virtaamaan vain säiliön sisään. Mikäli esimerkiksi sähkökatkon vuoksi kompressorin ilmantuotto keskeytyy, varapaineilman avulla alipainetarraimella voidaan vähintäänkin suorittaa kappaleen irrottaminen turvallisesti. Imukuppien ja käsiteltävän kappaleen väliseen tilaan voi myös jäädä jäännösälipaine, jonka avulla kappale voi pysyä tarraimessa pitkäänkin. Seuraavassa kuvassa näkyy erikokoisille ja -mallisille kappaleille suunniteltuja tarrainten imukuppeja:



*Kuva 7: Alipainetarraimissa käytettäviä erimallisia imukuppeja (Schunk et al. 2005, s. 95).*

Alipainetarraimen käyttö mahdollistaa useimmissa tilanteissa mekaanista tarrainta suuremman tartuttavien tuotteiden kokovaihtelun. Tarrain voi olla myös suunniteltu siten, että sen imukuppien paikkaa voidaan tarvittaessa muuttaa joko manuaalisesti tai automaattisesti esimerkiksi paineilmasylintereiden avulla. Kuten muita pneumaattisia tarraimia, alipainetarrainta voidaan käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa, sillä se ei aiheuta kipinävaaraa.

Alipainetarraimen käyttöä mietittäessä on ensin syytä kartoittaa, löytyykö käsiteltävästä kappaleesta alipainetarrainta mahdollistavaa riittävän tasaista pintaa. Lisäksi täytyy miettiä, voidaanko kappaleen orientaatio säilyttää ja kohdistuuko siihen sivuttaissuuntaisia voimia.

## 2.3 Magneettinen tartunta

Magneettien käyttö on melko rajattua, sillä niillä voidaan tarttua ainoastaan rautapitoisiin materiaaleihin. Niiden kanssa magneettinen tarrain on kuitenkin hyvin monikäyttöinen ja kätevä vaihtoehto. Magneettisia tarraimia on kahta tyyppiä: kestromagneettisia ja sähkömagneettisia. Toisin kuin imutarrain, magneettinen tarrain kykenee tarttumaan myös reikäisiin kappaleisiin, kuten teräsritilään. Magneettisella tarraimella on mahdollista tarttua melko painaviinkin kappaleisiin. Lisäksi ne ovat pienikokoisia, kestäviä ja usein huoltovapaita. (Ixtur [a], verkkosivu) Kuvassa 8 näkyy kompakti magneettinen tarrain, joka voidaan yhdistää myös teollisuusrobottiin:



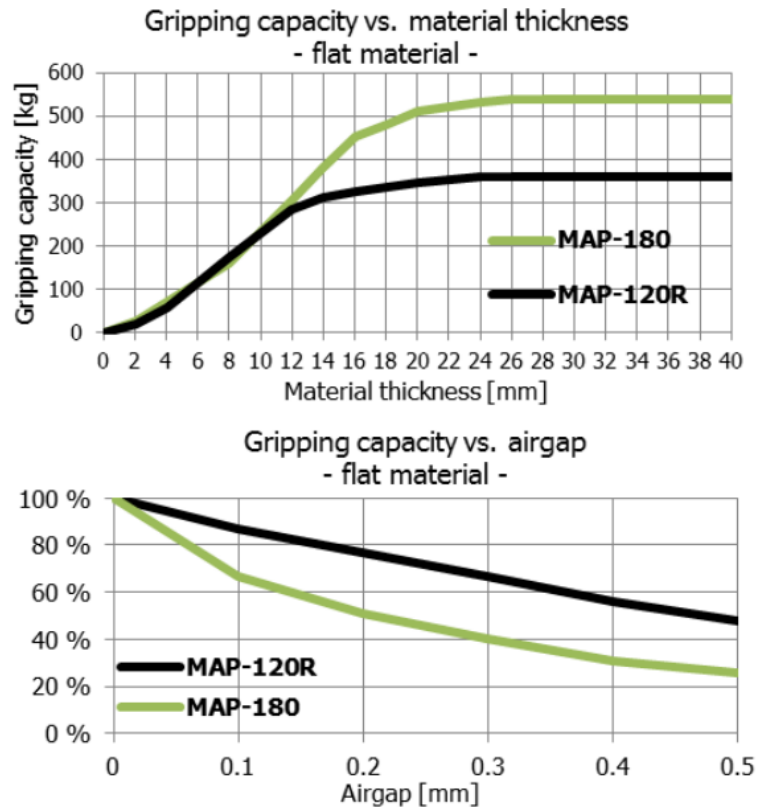
*Kuva 8: Magneeteilla voidaan tarttua myös pyöreisiin ja epätasaisiin kappaleisiin (mukaillen Ixtur [b], verkkosivu).*

Magneettisten tarrainten muita etuja on niiden yksinkertainen ja kompakti rakenne, joka ei sisällä montaa liikkuvaa osaa eikä tarvitse välttämättä ollenkaan energiansyöttöä. Ne ovat suhteellisen riippumattomia tartuttavan kappaleen koosta, muodosta, pinnan kitkasta ja massakeskipisteestä. Magneettisen tarraimen voi myös suunnitella tarttumaan useaan erilaiseen kappaleeseen kerralla. Pneumaattisesti ohjattujen kestromagneettisten tarrainten etuna on, että niitä voidaan käyttää muiden pneumaattisten tarrainten tavoin räjähdysvaarallisissa tiloissa.

Magneettisten tarrainten haittoja ovat niiden käytön rajoittuminen ainoastaan rautapitoisiin materiaaleihin, kuten rautaan, nikkeliin ja kobolttiin. Käsiteltävän kappaleen irrotus ei välttämättä tapahdu välittömästi remanenssin eli jäännösmagnetismin vuoksi. Magneettisia partikkeleita, kuten metallipölyä, voi myös keräytyä tarraimen tai käsiteltävään kappaleeseen.

Seuraavan kuvan ylempi kaavio kuvaa erään valmistajan kahden kestromagneettisen tarraimen tartuntakapasiteetin suhdetta tartuttavan kappaleen paksuuteen. Alempi kaavio

puolestaan kuvaa tartuntakapasiteetin suhdetta tarraimen ja kappaleen väliseen ilmarakoon. Koska kaaviot koskevat kestmagneettisia tarraimia, ilmiöt eivät ole todennäköisesti täysin vastaavia sähkömagneettisilla tarraimilla, mutta kuvaajat ovat niillekin suuntaa antavia.



**Kuva 9:** Suomalaisen valmistajan kahden kestmagneettisen tarraimen ominaisuuksia (Ixtur [a], verkkosivu).

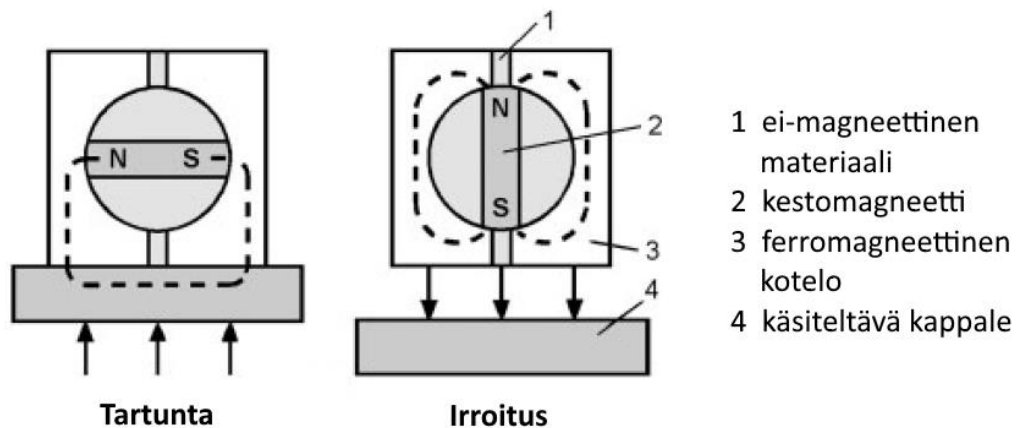
Ylemmästä kaaviosta voidaan nähdä, että kestmagneettisen tarraimen tartuntakapasiteetti kasvaa tartuttavan kappaleen paksuuden kasvaessa tiettyyn pisteeseen asti lähes lineaarisesti, jonka jälkeen tartuntakapasiteetti pysyy lähes samana. Alemmasta kaaviosta voidaan nähdä, että kestmagneettisen tarraimen tartuntakapasiteetti laskee hyvin voimakkaasti, kun tarraimen ja tartuttavan kappaleen välillä on pienikin ilmarako. Jo 0,5 millimetrin ilmarako laskee toisella kaavion tarraimista tartuntakapasiteettia 100 prosentista noin 25 prosenttiin.

Magneettisille tarraimille ominaista on, että tartuttavan kappaleen paikoitustarkkuus ei välttämättä ole täysin tarkka, eikä magneettisella tarraimella voida keskittää kappaleita, kuten mekaanisilla tarraimilla. Kuten imutartunnassa, magneettinen tartunta voi olla passiivinen tai aktiivinen. Passiivinen tartunta voidaan toteuttaa yksinkertaisella kestmagneetilla. (Monkman et al. 2007, s. 204)

### 2.3.1 Kestomagneettinen tarrain

Kestomagneettinen tarrain on yksinkertaisimmillaan pysyvästi magneettinen teräskappale. Koska kestomagneetin magneettista voimaa ei voida sammuttaa kuten elektromagneeteissa, käsiteltävä kappaleen irrotus täytyy tehdä mekaanisesti. (Monkman et al. 2007, s. 204) Tässä on etunsa, sillä kestomagneettiset tarraimet ovat yleensä tartunnan säilyttäviä, eli vaikka mahdollisesti käytettävän paineilman tulo katkeaisi, kappale ei irtoa tarraimesta.

Yksi tapa irrottaa kappale on työntää sitä pois päin tarraimesta esimerkiksi pneumaattisen sylinterin avulla liikkuvalla vipumekanismilla tai vain sylinterin tapilla. Tarraimen sisäisen kestomagneetin asentoa tai paikkaa voidaan myös vaihtaa mekaanisesti, jolloin magneettivuon suunta vaihtuu tai magneettinen voima heikkenee niin, että tartuttava kappale irtoaa. Asennon tai paikan ohjaus tapahtuu yleensä paineilman avulla, mutta myös sähköistä ohjausta käytetään. (Monkman et al. 2007, s. 204) Kuvassa 10 on esiteltyä magneettisen tarraimen mekaanisen magnetisoinnin periaate:



**Kuva 10:** Kestomagneetin magnetisointisuunnan mekaaninen ohjaaminen (mukaillen Monkman et al. 2007, s. 204).

Tarrainmagneetit säilyttävät magneettisen voimansa lähes ikuisesti. Sen heikentymistä voi kuitenkin tapahtua korkeissa lämpötiloissa, kun lämpötila nousee käytössä olevan magneettisen materiaalin Curie-pisteen yläpuolelle (Curie-piste on ainekohtainen lämpötila, jossa ferromagneettinen aine muuttuu paramagneettiseksi, eli sen kestomagneettiset ominaisuudet häviävät). Keraamisia magneetteja voidaan käyttää maksimissaan noin 100 °C lämpötiloissa. Lisäksi tarraimen magneettiseen voimaan voivat vaikuttaa ulkoiset magneettiset voimat. (Monkman et al. 2007, s. 205)

### 2.3.2 Sähkömagneettinen tarrain

Kestomagneettien lisäksi magneettikenttä voidaan luoda sähköön avulla. Sähkömagneettisia tarraimia käytetään kuitenkin robottisovelluksissa melko harvoin lähinnä turvallisuuskysymysten vuoksi. Niiden käyttöä mietittäessä tulee ottaa huomioon, että mikäli virransyöttö tarraimelle katkeaa, johtaa se lähes välittömään käsiteltävän kappaleen pudottamiseen

Sähkömagneetit koostuvat tavallisesti yhdestä tai useammasta kelasta, joka on kierretty korkean magneettisen permiabiliteetin omaavan yhden tai useamman ytimen ympärille. Sähkömagneettisten tarrainten rakenne on yksinkertainen, mutta sen paino voi kasvaa korkeaksi. Tästä syystä niitä ei usein käytetä pienen hyötykuorman roboteilla. (Monkman et al. 2007, s. 207)

Sähkömagneettisia tarraimia voidaan käyttää sekä tasa- että vaihtovirralla. Tasavirtaa käytettäessä, mikäli ytimet eivät ole laminoituja, käsitellyssä kappaleessa voi esiintyä hieman jäännösmagnetismia tartunnan irrottamisen jälkeenkin. Mikäli kappale täytyy demagnetisoida jälkikäteen, lisää se tuotantolinjan kustannuksia. Kun käytetään vaihtovirtaa, jäännösmagnetismia ei juuri esiinny. Tartuntavoima voidaan yksinkertaistettuna laskea tavanomaisella sähkömagneetiikan kaavalla:

$$F = B * I * l ,$$

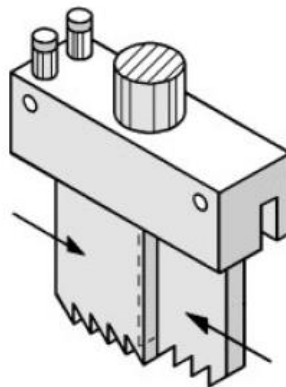
jossa  $F$  on voima,  $B$  on magneettivuon tiheys [T],  $I$  on johtimen läpi kulkeva virta [A] ja  $l$  on johtimen pituus [m]. (Monkman et al. 2007, s. 207–211)

Sähkömagneettiset tarraimet ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja kestäviä, eikä niissä ole liikkuvia osia. Etuna on myös, että sähköenergiaa on helposti saatavilla ja tarraimet toimivat useimmiten teollisuudessa yleisesti käytetyllä 24 voltin sähkövirralla. Toisaalta, kuten aiemmin mainittu, katkos energiansyötössä johtaa yleensä lähes välittömään käsiteltävän kappaleen irtoamiseen. (Monkman et al. 2007, s. 212)

## 2.4 Tunkeutuva tartunta

Erikoisempia tarrainten toiminnallisuuksia ovat esimerkiksi muovautuva ja liimautuva tarrain. Tässä osiossa esitellään kuitenkin näitä hieman yleisempi tunkeutuva tarrain. Joidenkin kappaleiden materiaalit, kuten tekstiilit, hiilikuitu ja lasikuitu, eivät ole täysin kiinteitä vaan huokoisia. Tällaisten kappaleiden automatisoitu tartunta, ja varsinkin pinosta erottaminen, voi olla vaikeaa niiden fyysisten ominaisuuksien vuoksi. Yksi ratkaisu on käyttää tunkeutuvia tarraimia, jotka voidaan jaotella nipistäviin ja lävistäviin tarraimiin.

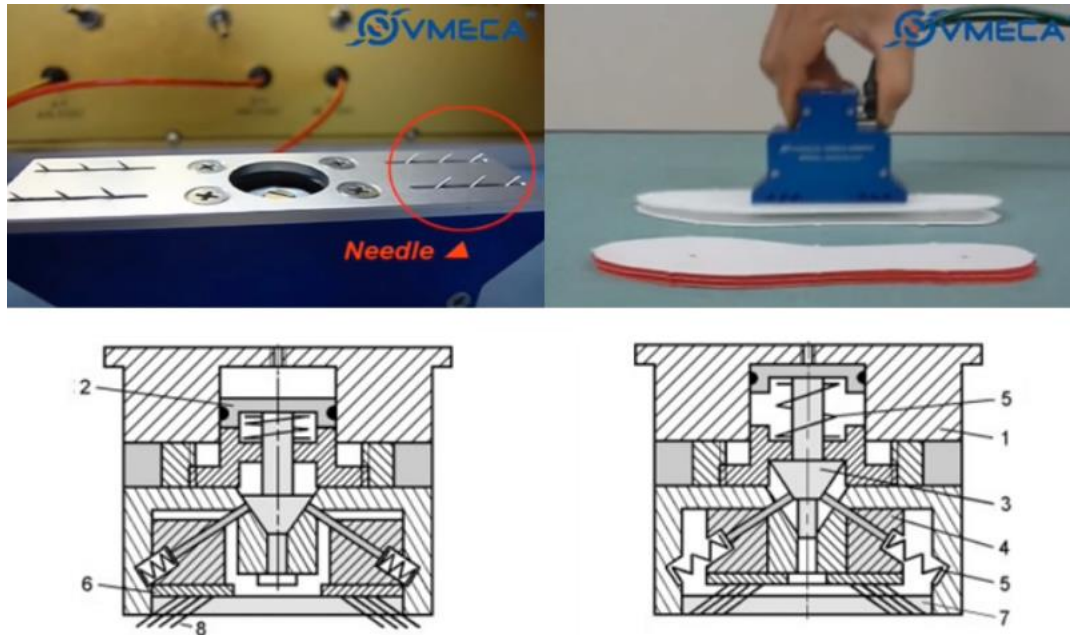
Tunkeutuvat tarraimet eroavat mekaanisista tarraimista siten, että mekaaniset saavuttavat ja säilyttävät tartunnan kohdistamalla voimia käsiteltävässä kappaleessa vähintään kahteen pintaan. Tunkeutuvat tarraimet puolestaan saavuttavat normaalisti tartunnan kohdistamalla voimia käsiteltävässä kappaleessa vain yhteen pintaan, eikä tartunnan säilyttäminen vaadi kohdistettujen voimien säilyttämistä. (Monkman et al. 2007, s. 161)



**Kuva 11:** Nipistävä tarrain (mukaillen Monkman et al. 2007, s. 163).

Esimerkiksi pinottujen kangasarkkien erottamiseen on usein käytetty harjaa, hiekkapaperia ja niin edelleen. Nämä keinot ovat kuitenkin olleet epäsopivia esimerkiksi materiaaliin aiheutuvien vahinkojen ja pienhiukkasten irtoamisen vuoksi. Paljon sopivampi tekniikka on ollut mekaaninen nipistävä tarrain. (Monkman et al. 2007, s. 162) Kuvassa 11 näkyy esimerkki nipistävästä tarraimesta, jossa kaksi sahalaitaista terää liikkuvat samansuuntaisesti toistensa ohi ja saavat aikaan kankaan tarrautumisen terien väliin.





*Kuva 12: Lävistävä neulatarrain ja sen rakenne (mukaillen VMECA, verkkosivu; Monkman et al. 2007, s. 166).*

Lävistävien tarrainten voimanlähde on yleensä paineilma. Niiden mekanismin voi olla suunniteltu lävistävän käsiteltävä kappale koko paksuudelta tai vain osittain. Myös useampaan kappaleeseen tarttuminen lävistämällä ne kerralla on hyödyllistä joissain sovelluksissa. Lävistävä tarrain koostuu usein terävistä neuloista tai piikeistä, jotka työntyvät kiinteän, tasaisen alustan läpi. Kuvan 12 yläosassa näkyy demonstraatio pneumaattisen neulatarraimen käytöstä, missä tartutaan kengän pohjallisiin. Kuvan alaosassa on vastaavasti esiteltynä tällaisen tarraimen rakenne.

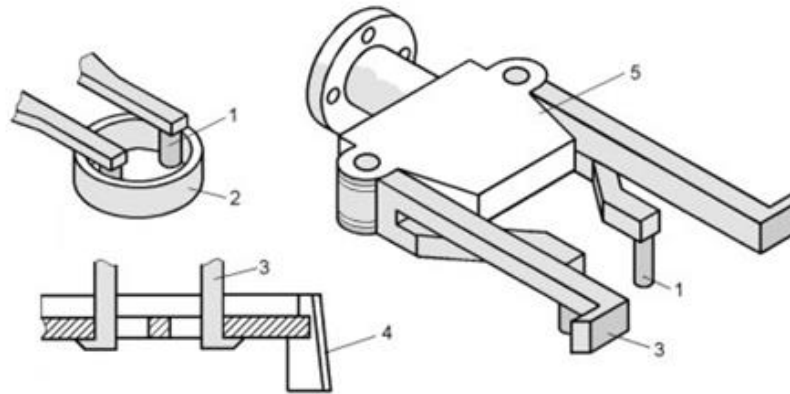
## 2.5 Monikäyttöinen tarrain ja monitarrain

Erilaisia tuotteita, kuten autoja, valmistetaan nykyään yhä pienemmissä erissä ja yksittäisten tilausten mukaisesti muokattuina. Pienemmät eräkoot vaativat tuotantolinjoilta ja kappaleenkäsittelyltä joustavuutta. (Schunk et al. 2005, s. 123) Jos sovellus on sellainen, että robotin on tartuttava useampaan erilaiseen kappaleeseen, voi kappaleista riippuen olla mahdollista tarttua niihin samalla, niin sanotulla monikäyttöisellä tarraimella tai useamman tarraimen yhdistelmällä eli monitarraimella.

Monitarraimella voidaan nopeuttaa sovelluksen tahtiaikaa tarttumalla useaan samanlaiseen tai erilaiseen kappaleeseen samanaikaisesti. Monikäyttöinen tarrain puolestaan nopeuttaa sovellusta, kun aikaa vievää työkalun vaihtoa ei tarvitse suorittaa.

## 2.5.1 Monikäyttöinen tarrain

Monikäyttöisessä tarraimessa useampi tartuntamekanismi on yhdistetty yhteen tarraimen. Mekaanisen tarraimen tapauksessa sen sormissa voi olla erilaisia muotoja ja kontaktipintoja erimallisia kappaleita varten. Seuraavan kuvan tarraimessa on yhteen liitettynä kaksi sormiparia, joilla voidaan tarttua erilaisiin kappaleisiin niiden sisäpuolelta ajamalla tarraimen leuat auki. (Monkman et al. 2007, s. 342)



*Kuva 13: Monikäyttöinen mekaaninen tarrain (Monkman et al. 2007, s. 342).*

Toinen vaihtoehto on, että samalla tarraimella on erilainen käyttötarkoitus eri asennoissa, eli esimerkiksi ajamalla leuat kiinni ensimmäisen mallinen tartuttava kappale jää leukojen väliin. Samoilla leuoilla voidaan tarttua toiseen, onttoon kappaleeseen ajamalla leuat auki kappaleen sisäpuolella.

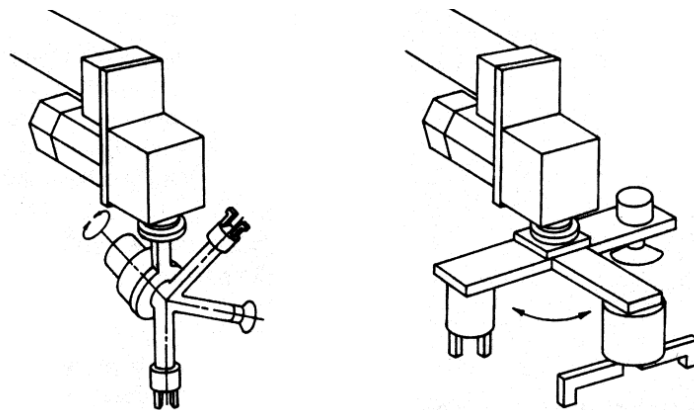


*Kuva 14: Mukautuva, kolmisorminen tarrain ja sen eri tartuntatyylit (mukaillen Robotiq, verkkosivu).*

Monikäyttöinen tarrain voi olla myös adaptiivinen eli mukautuva tarrain. Yksi esimerkki tällaisesta on kolmella sormella varustettu mekaaninen tarrain, jonka sormien mekanismi on toteutettu siten, että ne mukautuvat erimuotoisiin ja -kokoisiin kappaleisiin (Kuva 14). Tarrainta voidaan siis käyttää samassa sovelluksessa monenlaisten kappaleiden käsittelyyn ja näin voidaan poistaa tarve työkalunvaihtajalle tai lisäroboteille. Robotti voi tällaisen tarraimen avulla esimerkiksi tehdä kappaleenvaihtoa NC-koneelle laajalla tuoteskaalalla. Mukautuvat tarraimet ovat vielä melko kokeellisella asteella: valmistajia löytyy vain muutama ja hinnat ovat korkeita. Tulevaisuudessa tällaiset tarraimet tulevat kuitenkin yleistymään, kun tuotannollisen joustavuuden tarve robottisovelluksissa lisääntyy.

## 2.5.2 Monitarrain

Monitarrain sisältää rungon, johon voidaan kiinnittää monta samanlaista tai erilaista tarrainta. Monitarrain voi sisältää esimerkiksi mekaanisen tarraimen ja imutarraimen tai samanlaisen mekaanisen tarraimen varustettuna erilaisilla sormilla. Monitarrain voi olla tyypiltään sellainen, että vain yhtä sen tarrainta käytetään kerrallaan. Yksi tämän tyyppinen monitarrain on tarrainrevolveri, jossa on moottori, jonka avulla monitarraimelta pyöritetään haluttu työkalu käyttöasentoon. Monitarraimessa voi myös olla kiinteä runko, jota voidaan pyörittää robotin työkalulaipan avulla. (Kuivanen 1999, s. 75) Periaatekuvat näistä molemmista tyypeistä näkyvät kuvassa 15. Toisaalta monitarrain voi olla myös tarkoitettu usean samanlaisen tai erilaisen kappaleen tartuntaan samanaikaisesti, eli se voi sisältää esimerkiksi monta vierekkäistä, yhteen runkoon liitettyä tarrainta (Monkman et al. 2007, s. 334-335).



**Kuva 15:** Monitarraintyyppejä. Vasemmalla tarrainrevolveri ja oikealla kiinteärunkoinen monitarrain (mukaillen Kuivanen 1999, s. 75).

Käytettävän tarraimen vaihtaminen ei vie monitarraimen avulla robotilta välttämättä lainkaan ylimääräistä aikaa, sillä robotti voi kääntää tarraimen käsiteltävää kappaletta kohden samaan aikaan kuin se tekee jonkin muun välttämättömän liikkeen. Kuten edellä on mainittu, tarraimen kääntäminen voidaan tehdä robotin omien nivelten pyörittämisen sijaan myös erillisellä monitarraimen kiinnitetyllä moottorilla. Monitarraimen haittapuolena on, että sen rakenne vaatii yleensä paljon tilaa, eikä siten mahdu ahtaisiin paikkoihin. (Monkman et al. 2007, s. 339-340) Sen runko on myös usein suunniteltava ja teetettävä, sillä valmiita kaupallisia ratkaisuja ei juuri löydy.

## 2.6 Työkalunvaihtajat

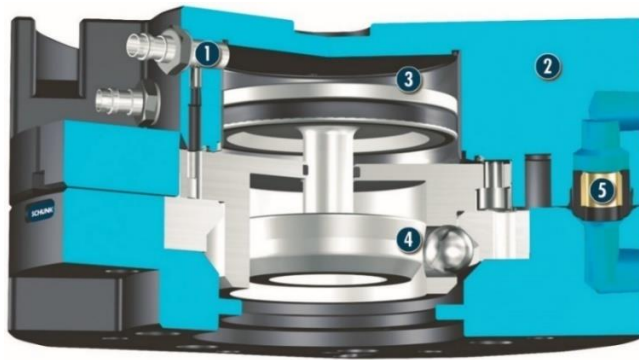
Monissa kappaleenkäsittelyä sisältävissä sovelluksissa ei ole mahdollista tai järkevää tarttua yhdellä tarraimella kaikkiin käsiteltäviin kappaleisiin. Monikäyttöisen tarraimen tai monitarraimen käyttäminen ei myöskään ole aina paras vaihtoehto. Työkalunvaihtajan avulla robotin käsivarteen voidaan vaihtaa yksittäinen tarrain tai jopa monitarrain kesken työkierron tai esimerkiksi erilaiseen kappale-erää vaihdettaessa. Tämä usein tehostaa sovellusta, mutta voi myös lisätä rajoitteita sovelluksen suunnitteluun. (Kurfess 2005, s. 230) Seuraavassa kuvassa näkyy teollisuusroboteissa yleinen SCHUNKin työkalunvaihtaja:



**Kuva 16:** Työkalunvaihto käynnissä (Schunk et al. 2005, s. 203).

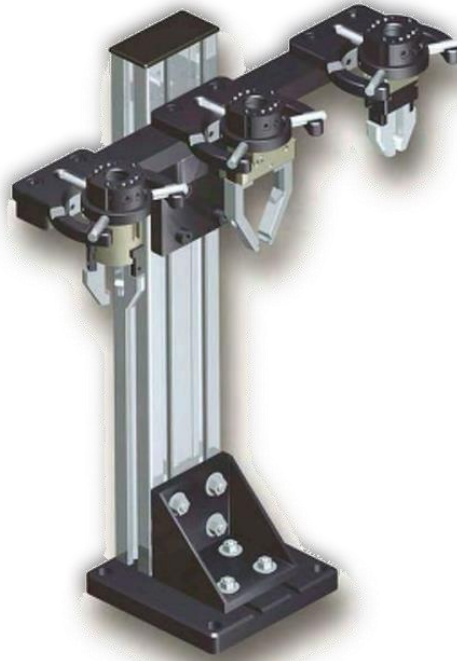
Robottien työkalunvaihtajat perustuvat lähes poikkeuksetta kytkentämekanismiin, joka koostuu robotin työkalulaippaan asennettavasta kiinnityslaipasta sekä tarraimen tai työkaluun kiinnitettävästä vastakappaleesta. Työkalunvaihtajia on sekä manuaalisia että automaattisia. Manuaalisen työkalunvaihtajan kiinnityslaipassa voi olla esimerkiksi vipu, jonka asentoa vaihtamalla työkalu irtoaa laipasta ja uuden voi vaihtaa käsin tilalle. Tämän tyyppinen työkalunvaihtaja vaatii siis ihmisen vuorovaikutusta.

Automaattisten työkalunvaihtajien käyttäminen robottisovelluksissa on huomattavasti yleisempää, sillä niillä ei ole manuaaliseen verrattuna juurikaan muita haittapuolia kuin hieman korkeampi hinta – joskin hintaerokaan ei ole merkittävä. Automaattiset työkalunvaihtajat ovat yleensä paineilmatoimisia. Kiinnityslaipassa on tavallisesti sisäänrakennettuna paineilmasyylinteri, joka työntää lukituskynsiä tai -kuulia vastakappaleen uriin ja lukitsee näin kiinnityksen.



*Kuva 17: Työkalunvaihtajan (sekä kiinnityslaipan että vastakappaleen) läpileikkauskuva (Schunk, verkkosivu).*

On tärkeää, että työkalunvaihtajien kytkentämekanismien suunnittelussa on otettu huomioon varma ja vikaturvallinen kiinnitys, eli esimerkiksi paineilman saannin katketessa vastakappale ei saa irrota kytkentälaipasta. Tämä on usein toteutettu siten, että kytkentälaipan lukituskyynet tai -kuulat pysyvät kiinnitysasennossa tarkoitukseen suunnitellun mekaanisen rakenteen tai jousipalautteisen paineilmasyylinterin avulla. (Kurfess 2005, s. 230) Sen lisäksi, että työkalu täytyy erottaa mekaanisesti robotista työkalua vaihdettaessa, myös energian ja signaalien läpiviennit on järjestettävä. Kuvassa 17 näkyy työkalunvaihtajan rakenne läpivienteineen. Tarraimen toimilaitteille on usein tarvetta viedä paineilmaa ja antureille sekä toimilaitteiden ohjaukseen sähköisiä signaaleja. (Kuivanen 1999, s. 75)



**Kuva 18:** Kolmen vaihdettavan työkalun työkaluasema, jonka voi ostaa valmiina ratkaisuna (Schunk, verkkosivu).

Työkalunvaihtajaa käytettäessä robotin päähän tulevan kiinnityslaipan ja tarraimiin kiinnitettävien vastakappaleiden lisäksi sovellus vaatii työkaluaseman (Kuva 18), jolle täytyy varata tilaa robottisolun. Lisäkulujen lisäksi vaihdettavien työkalujen käyttäminen huonontaa hieman robotin toistotarkkuutta, pienentää käytettävissä olevaa hyötykuormaa ja saattaa kasvattaa robottisolun suunnittelu- ja ohjelmointikustannuksia. Tämä vaihtoehto on kuitenkin huomattavasti edullisempi ratkaisu kuin lisärobotin hankinta. (Kurfess 2005, s. 230)

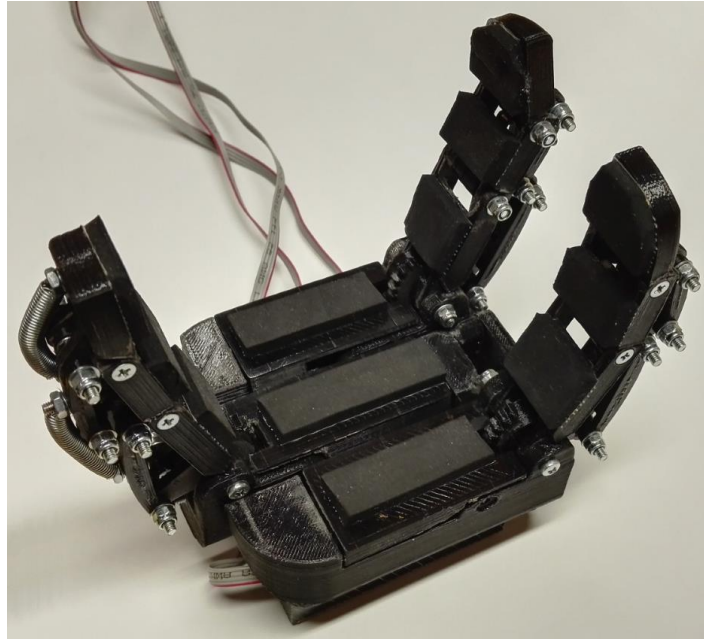
### 3. DRINKKIROBOTIN TARRAIN

Drinkkirobotin ensimmäinen versio syntyi vuonna 2002 yhteistyössä TTY:n entisen ammattiainekerhon Roboteamin ja Tuotantotekniikan laitoksen yhteistyönä. Päivitetty versio rakennettiin hieman myöhemmin osana Suomen robotiikkayhdistyksen ”Teollisuusroboti kohtaa kuluttajan” -hanketta, jossa pyrittiin helpottamaan normaalia elämää automatisoiduilla palveluilla (Niemi, verkkosivu). Tämä robottibaarimikko on toteutettu tavallisen teollisuusrobotin avulla, jonka ympärille on rakennettu baaritiski ja pullohylly.

Robottisolua on kehitetty TTY:n opiskelijoiden voimin ja se on käynyt tarjoilemassa lukemattomilla messuilla sekä muissa erilaisissa tilaisuuksissa. Drinkkirobotin kehittäminen siirtyi joitakin vuosia sitten kokonaisuudessaan ammattiainekerho Pullonkaulalle, joka päätti aloittaa täysin uudenlaisen version suunnittelun ja rakentamisen vuonna 2015. Tämä historian neljäs versio valmistui vuoden 2016 vappuna, jonka jälkeen sillä on keikkailtu tiiviisti.

Edellisen Drinkkiroboti-version tarraimella kyettiin tarttumaan ainoastaan tietyn mallisiin pulloihin, minkä vuoksi pulloja jouduttiin keikkojen yhteydessä täyttämään ja pesemään. Kun robotin uutta versiota alettiin suunnitella, nousi ensimmäisten toiminnallisten vaatimusten joukossa esiin se, että tästä manuaalisesta työstä haluttiin eroon. Tätä varten robotille oli hankittava tarrain, joka kykenee tarttumaan useaan erimalliseen pulloon. Käytännössä tällaisen tarraimen täytyi olla mukautuva, eli sen sormien täytyi kyetä taipumaan erimuotoisten ja kokoisten pullojen ympärille saaden pullosta pitävän otteen.

Muiden teollisuuskomponenttien tavoin yksinkertaisetkin robottitarraimet ovat hinnakkaita. Drinkkirobottiin oli tarve hankkia tavallista leukatarrainta huomattavasti monimutkaisempi mukautuva tarrain, joita oli markkinoilla ainoastaan muutamalla eri valmistajalla. Esimerkiksi Robotiq-nimisen yrityksen valmistaman 3-Finger Gripperin listahinta on noin 18 000 dollaria, kun taas Barrett Technologyn valmistaman BarretHandin hinta on jopa 80 000 dollaria (RobotShop, verkkosivu). Toisin kuin teollisuudessa, Drinkkirobotin tarraimen ei tarvinnut olla täysin varmatoiminen, joten oli kannattavaa yrittää valmistaa se itse. Materiaalia lisäävä valmistus eli 3D-tulostaminen vaikutti tähän tarkoitukseen soveltuvalta menetelmältä, sillä sen avulla on edullista ja nopeaa valmistaa myös monimutkaisia kappaleita.



*Kuva 19: Tarrain käyttökunnossa.*

Seuraavat osuudet käsittelevät tarraimen vaatimuksia, valintaa, valmistusta ja käyttöönottoa. Niissä käydään myös läpi, kuinka hyvin 3D-tulostaminen soveltuu robottitarraimen valmistukseen. Projektin tuloksena syntynyt tarrain näkyy valmiina kuvassa 19.

### **3.1 Tehtävä ja vaatimukset**

Tarraimen suunnittelu tai valinta on vain pieni, mutta erittäin tärkeä osa koko robottijärjestelmän suunnittelua. Tarrainta valitessa on katsottava automatisointitehtävää kokonaisuutena ja mietittävä esimerkiksi, kannattaako tehdä prosessimuutoksia tai jopa suunnitella käsiteltävä kappale uudestaan. Yleisiä toivomuksia tarraimelle ovat yksinkertainen rakenne, pieni koko ja paino, luotettava tartunta ja tartuttavien kappaleiden keskitys. Tarrainta valitessa on myös muistettava, että painava tarrain pienentää käsiteltävälle kappaleelle jäävää robotin hyötykuormaa. (Kuivanen 1999, s. 65-66)

Valitessa robotille tarrainta on tärkeää paneutua tehtävän määrittelyyn ja toiminnan suunnitteluun. Mikäli robotilla halutaan tarttua useaan erilaiseen kappaleeseen eikä kappaleiden tartuntapintoja voida suunnitella samanlaisiksi, voidaan käyttää monikäyttöistä tarrainta, monitarrainta tai työkalunvaihtajaa.



Drinkkirobotin tarraimen tehtävänä on tarttua erimuotoisiin ja -kokoisiin pulloihin, joista esimerkkejä näkyy kuvassa 20. Haastavampiin kappaleisiin, kuten mehutölkkeihin ja jääpalakauhaan, tarttumisen on hyvä olla mahdollista, mutta ei välttämätöntä. Sen sijaan pullojen materiaali voi olla kovaa lasia tai puristusvoimasta joustavaa muovia, ja tätä varten tarraimen täytyy olla varustettu jonkinlaisella voimatakasinkytkennällä. Kappaleiden koko, muoto ja materiaaliominaisuudet vaihtelevat siis huomattavasti keskimääräistä robotin tartuntasovellusta enemmän.



*Kuva 20: Erimuotoisia pulloja, joihin Drinkkirobotin tulee kyetä tarttumaan. Oikealla reunalla näkyvä pullo on muovia, joka joustaa, kun siihen kohdistuu puristusvoima.*

Tarraimen tulisi olla helppokäyttöinen ja lähes huoltovapaa sekä sen tulisi olla helppo irrottaa kuljetusten ajaksi. Tämän tyyppisessä viihdesovelluksessa myös estetiikka ja meluhaitat tulee ottaa huomioon. Edellisessä Drinkkirobotissa on pneumaattinen tarrain, jonka vaatiman paineilmakompressorin aiheuttama melu vaikuttaa osaltaan sovelluksen käyttökokemukseen. Kompressorin on myös aikanaan hajonnut kesken keikan, ja kyseiseen tarraimen on jouduttu vaihtamaan tiivistesarja vuodon vuoksi.

Drinkkirobotin solussa käytössä oleva teollisuusrobotti on ABB:n uusimpia malleja, IRB 1200, ja siitä viiden kilogramman hyötykuormalla varustettu versio. Voidaan arvioida, että painavin robotilla käsiteltävä kappale olisi litran lasipullo, joka painaa noin kaksi kilogrammaa. Jotta hyötykuorma ei ylity, tarrain saa siis painaa noin kolme kilogrammaa. Robotin liikkeet ovat usein hyvin äkkinäisiä ja kiihtyvyyden aiheuttamat voimat yllättävän suuria, joten tarraimen rakenne täytyy olla tarpeeksi kestävä.

Edellä mainittujen vaatimusten lisäksi tarraimen tulee olla edullinen ammattiainekerhomme rajallisesta budjetista johtuen. Jos 3D-tulostamiselle lasketaan hinta ainoastaan käytetyn filamentin eli muovin hinnan perusteella, kohoaa se tämän tyyppisessä kappaleessa todennäköisesti suurimmillaankin kymmeneen euroon.

## 3.2 Valinta

Tässä sovelluksessa ei ole käytännön ja estetiikan kannalta järkevää käyttää työkalunvaihtajaa tai monitarrainta. Koska vaatimuksena on kuitenkin käsitellä useita erimuotoisia ja -kokoisia kappaleita, tarraimen täytyy olla tyypiltään monikäyttöinen. Niitä on käytännössä sähköisenä tai pneumaattisena, joten muun tyyppiset tarraimet, kuten alipaine- tai neulatarrain, eivät ole soveltuvia tähän käyttötarkoitukseen. Lisäksi koska tarraimessa täytyy olla voimatakaisinkytkentä ja pneumaattisella tarraimella puristusvoimaa on hyvin hankala tarkkailla ja säätää puristuksen aikana, ainoaksi vaihtoehdoksi jää sähköinen tarrain. Tarvittavilla toiminnallisuuksilla varustettu sähköinen tarrain on myös mahdollista rakentaa itse, toisin kuin pneumaattinen vastaava tarrain.

Vaatimusten mukainen mukautuva tarrain on väistämättä mekaanisesti melko monimutkainen laite. Tällaisen mekaniikan valmistaminen itse esimerkiksi koneistamalla olisi vaikeaa, aikaa vievää ja kallista. Muovin 3D-tulostaminen on valmistusmuoto, jolla monimutkaisiakin rakenteita voidaan toteuttaa suhteellisen helposti ja lähes ilmaiseksi. Yhtenä motiivina tämän valmistusmuodon valitsemiseen oli halu oppia lisää 3D-tulostamisesta ja sen soveltamisesta käytännössä. Tampereen teknillinen yliopisto hankki juuri ennen tämän työn aloittamista oppilaiden yleiseen käyttöön kaksi uutta 3D-tulostinta, joten ajattelin niiden soveltuvan hyvin tarraimen valmistukseen.



**Kuva 21:** Yale-yliopiston OpenHand-projektin monikäyttöinen, mukautuva Model T42 -tarrain (mukaillen Yale University, verkkosivu).

Vaihtoehtona olisi ollut itse suunnitella ja mallintaa tarraimen CAD-mallit (Computer-Aided Design), joiden avulla 3D-tulostaminen tapahtuu. Toimivan mekaanisen tarrainrakenteen mallintaminen olisi kuitenkin aiheuttanut paljon lisätoita ja joitakin tarrainmalleja oli jo vapaasti saatavilla internetissä. Ensimmäinen 3D-tulostetun tarraimen malli, jota harkitsin, oli Yalen yliopiston tutkijaryhmän OpenHand-projektissa kehittämä Model T42, joka näkyy kuvassa 21. Kyseessä on mukautuvasorminen tarrain,

jolla on mahdollista tarttua myös erimuotoisiin pulloihin. Tämän ”avoimen lähdekoodin” tarraimen CAD-mallit ja valmistusohjeet ovat vapaasti saatavilla. Tarraimen voimanlähteenä toimii kaksi harrastuskäyttöön tarkoitettua kevyttä servomoottoria, ja voima välitetään sormille siiman avulla. Tällä mekaanisella toteutuksella tarraimen ilmoitettu maksimipuristusvoima on kuitenkin vain 10 Newtonia, joka ei ole riittävästi, joten tarrain ei ollut sopiva tähän käyttötarkoitukseen. (Yale University, verkkosivu)



*Kuva 22: SolidWorksilla renderöity kuva tarraimen 3D-mallista.*

Parempi vaihtoehto löytyi kuitenkin Thingiverse-nimisestä verkkopalvelusta, joka on itse tehtyjen, erityisesti 3D-tulostukseen suunniteltujen CAD-mallien jakamiseen tarkoitettu ilmainen verkkosivu. Saksalainen Andreas Hölldorfer on ladannut sivustolle suunnittelemansa Three Finger Gripper -nimisen tarraimen mallit. Tämä tarrain on suunniteltu Robotiqin 3-Finger Gripper -tarraimen pohjalta ja yhdennäköisyys on huomattava. Hölldorfer esittelee verkkosivulla tarraimen toimintaa videolla, jossa hän esimerkiksi tarttuu vaivatta täyteen 1,5 litran virvoitusjuomapulloon. (Thingiverse, verkkosivu) Tarraimen 3D-mallien (Kuva 22) lisäksi sivustolla on annettu tietoa ainoastaan moottoreiden tyypistä. Muista tarvittavista osa-alueista, kuten ohjauselektronikasta, ei ole saatavilla ohjeita, joten ne oli suunniteltava ja toteutettava itse. Tästä huolimatta tarrain vaikutti täyttävän vaatimukset Drinkkirobotti-sovellusta ajatellen, joten päätin yrittää sen valmistamista.

### 3.3 Yleistä 3D-tulostamisesta

3D-tulostamisessa on kyse kolmiulotteisen CAD-mallin valmistamisesta materiaalia lisäävien menetelmien avulla. Tällaisia valmistusmenetelmiä on käytetty jo 1980-luvun alusta saakka etenkin erilaisten prototyyppien valmistukseen. (Cooper 2001, s. 3) Viime vuosina 3D-tulostamisen suosio on kasvanut suuresti myös kuluttajien keskuudessa, kun edullisia, alle tuhannen euron hintaisia tulostimia on tullut markkinoille. Tulostamalla voidaan valmistaa vaivattomasti monimutkaisiakin kappaleita – tosin valmistustekniikalla on omat rajoitteensa, esimerkiksi nopeudessa ja kappaleiden kestävydessä.

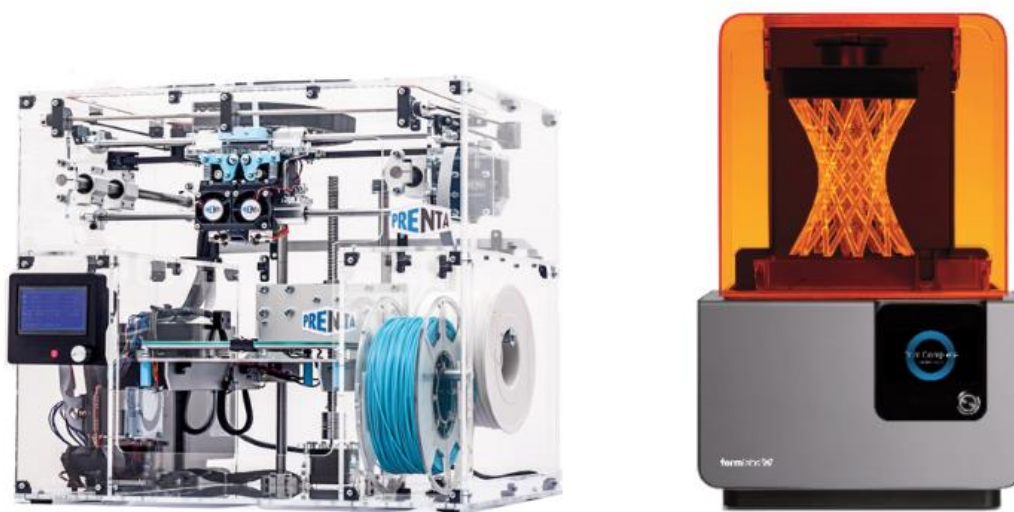
Ennen kuin kappale voidaan tulostaa sen CAD-malli muutetaan STL-tiedostomuotoon, joka viipaloidaan tietokoneohjelmalla tulostettavan kappaleen koosta riippuen jopa satoihin kerroksiin (Cooper 2001, s. 6). Tämän jälkeen samalla tietokoneohjelmalla luodaan valitulle tulostustekniikalle sopiva ohjelmatiedosto, joka sisältää usein NC-työstökoneista tuttua G-koodia. Tämän tiedoston avulla 3D-tulostimen ohjainpiiri käskyttää esimerkiksi askelmoottoreita ja saadaan aikaan halutunlainen tuloste. Erilaisia tulostustekniikoita on useita, kuten pursotustekniikka, stereolitografia, lasersintraus ja niin edelleen (Cooper 2001). Näistä kahta ensin mainittua käytettiin Drinkkirobotin tarraimen rakentamisessa, joten niiden toimintaperiaatteet on esitelty lyhyesti seuraavissa kappaleissa.

FDM- (Fused Deposition Modeling) eli pursotustekniikassa tulostuspäähän ohjataan lämpömuovautuvaa materiaalia, joka lämmitetään siinä sulamispisteeseen. Materiaalia pursotetaan alustalle kerros kerrokselta ja sen kovettuminen perustuu jäähtymiseen. Käytettävä materiaali vaikuttaakin tulostuspäälle ja -alustalle säädettävään lämpötilaan. Yleisimmät materiaalit ovat rullalta tulostettava ABS- (akrylinitriilibutadieenistyreeni) ja PLA-muovilanka (polyaktidi) eli filamentti, joista jälkimmäisenä mainittu on tietyissä olosuhteissa biohajoavaa. (Bhatia 2015, s. 328–329) Pursotustekniikka on edullisuutensa ja yksinkertaisuutensa vuoksi laajimmalle levinnyt ja kotitalouksissa käytettävien tulostimien selvästi yleisin 3D-tulostustekniikka. FDM-tekniikalla kerrosvahvuus on yleensä minimissään 0,05 millimetrin luokkaa, joten se on parhaimmillaan suurissa kappaleissa, joissa pinnan laadulla ei ole suurta merkitystä.

SLA-tekniikassa eli stereolitografiassa nestemäinen fotopolymeeri kovetetaan ultravioletivalolla kerroksittain. Tämä voidaan tehdä liikuteltavalla lasersäteellä, jota suunnataan tulostusalustaan yleensä kahdella moottoreiden avulla ohjattavalla peilillä. Toinen vaihtoehto on käyttää DLP-mikropeililaitetta (Digital Light Processing), jolla tulostusalalle projektoidaan tulostettava kerros kokonaisuudessaan. (Bhatia 2015, s. 327–328) SLA-tekniikalla kerrosvahvuus voi olla 0,02 millimetrin luokkaa, ja se onkin parhaimmillaan pienissä ja tarkoissa muovikappaleissa. Tämän tekniikan avulla tulostettavat kappaleet täytyy jälkikäsitellä, johon kuuluu kappaleen pesu sekä jälkikövetus UV-kaapissa tai auringonvalossa (Cooper 2001, s. 112).

### 3.4 Tarraimen 3D-tulostaminen

Drinkkirobotin tarraimen rakentaminen alkoi osien tulostamisella, jota testasin ensin TTY:n hankkimalla, pursotustekniikalla toimivalla Prenta Duo -tulostimella. Kyseinen tulostin näkyy vasemmalla kuvassa 24. Laitteen tulostusala on 200 x 200 x 200 millimetriä, ja sillä voi tulostaa kahden pursottimen ansiosta kaksivärisiä kappaleita tai vaihtoehtoisesti toisella pursottimella heikompaa tukimateriaalia vaikeisiin tulosteisiin. (Prenta, verkkosivu) Tarraimen osia tulostettaessa filamenttina oli 1,75 millimetriä paksua punaista ABS-muovia ja pursottimessa kiinni 0,4 millimetrin halkaisijalla varustettu suutin. Kerrosvahvuutena käytin 0,2 millimetriä, joka osoittautui hyväksi kompromissiksi tulostuslaadun ja -nopeuden välillä.



**Kuva 23:** Vasemmalla Prenta Duo -tulostin ja oikealla Formlabs Form 2 (mukailien Prenta, verkkosivu; Formlabs, verkkosivu).

Tulostaminen tapahtuu STL-tiedostojen avulla, jotka tarraimen suunnittelija oli ladannut Thingiverse-palveluun avoimeen käyttöön. Tämän tiedostotyyppin 3D-malleja ei voi muokata kovinkaan kätevästi, joten mikäli malleissa olisi ollut jotain pielessä, se olisi voinut olla hankalaa korjata. Olin tästä huolimatta luottavaisin mielin, sillä suunnittelija oli ladannut verkkopalveluun videoita valmiista, toimivasta tarraimesta.

Tulostusprosessissa tuli kuitenkin ongelmia, kun tulosteen ensimmäiset kerrokset eivät tarttuneet tulostusalustaan. Tämän vuoksi jokainen tulostus piti aloittaa vähintään kerran alusta. Aloituskorkeuden ja muiden lukuisten tulostusparametrien säätö ei auttanut, joten ongelmat johtuivat todennäköisesti tulostusalustasta. Ratkaisuna olisi voinut toimia yleisesti ABS:n tulostuksessa alustan päälle kiinnitettävä polyimideiteppi (kauppanimeltään Kapton). Kuitenkin kun tulostusohjelman sai aika ajoin ajettua tällä

tulostimella onnistuneesti läpi, jälki oli todella hyvää. Kuvassa 23 näkyvät punaiset osat on tulostettu ABS-muovista.

Tarraimen isoimpien osien tulostaminen olisi ollut tällä tulostimella melko epävarmaa ja siten hidasta. Jotkin osat olivat muutenkin yli kymmenen tunnin tulosteita, ja TTY:n tulostimen ylläpitäjät olivat päättäneet, ettei öisin tulostaminen ole sallittua esimerkiksi paloturvallisuusriskin vuoksi. Tästä syystä käännyin harrastekerho Castorin puheenjohtajan Juha Koljoson puoleen, joka oli rakentanut tiiminsä kanssa MegaPrinter-nimisen suurikokoisen 3D-tulostimen. Kyseisen laitteen tulostusala on 500 x 500 x 1000 millimetriä, ja tarraimen osat tulostuivat muutamassa illassa jäljen ollessa vastaavaa kuin Prentan tulostimella. (Castor, verkkosivu) Tällä kertaa osat tulostettiin mustasta PLA-muovista.



***Kuva 24:** SLA- ja FDM-tekniikoilla tulostettuja tarraimen osia. Ylimmäisinä olevissa sinertävissä SLA-tulosteissa ilmeni epämuodostumia. Punaiset osat ovat ABS-muovia ja mustat PLA:ta.*

Hyvin monimutkaisten ja yksityiskohtaisten kappaleiden tulostamisessa on omat rajoitteensa, kun tulostetaan FDM-tekniikalla. Tämä tuli vastaan tarraimen matoruuveja ja hammasrattaita tulostettaessa, kun erityisesti terävien reunojen jäljessä olisi ollut parantamisen varaa. TTY:n Kone- ja tuotantotekniikan laitokselle oli hankittu tarraimenprojektin aikaan Formlabsin valmistama Form 2 -tulostin, ja laitoksen tutkimuspäällikkö Jorma Vihinen tarjoutui tulostamaan sillä haastavimpia osia tarraimiani varten. Tämän SLA-tekniikkaa hyödyntävän, hinnakkaan 3D-tulostimen tulostusala on 145 x 145 x 175 millimetriä. Form 2:lla voidaan valmistaa erittäin tarkkoja tulosteita jopa

0,025 millimetrin kerrosvahvuudella, joten oli mielenkiintoista kokeilla sen toimivuutta. (Formlabs, verkkosivu) Valmiiden osien tarkkuus olikin yhdeltä puolelta lähes täydellistä, mutta osissa ilmeni haittaavia epämuodostumia. Tämän olisi voinut todennäköisesti korjata muokkaamalla tukirakenteita ja kappaleiden orientaatioita, mutta aika ei riittänyt tähän. Tutkiessani valmiita tulosteita niiden rakenne oli myös melko pehmeää. Tämä osoittautui kuitenkin olevan hartsipohjaisen tulostusmateriaalin ominaisuus, ja kappaleet voidaan kovettaa ultraviolettilampun tai auringon valossa. Päädyin lopulta käyttämään ainoastaan Castorin FDM-tulostimella tulostettuja osia, sillä ne tuntuivat toimivan kohtuullisen hyvin.

Kun kaikki osat oli tulostettu, niitä täytyi työstää jonkin verran. Jokainen ruuvin reikä oli tulostimelta tullessa liian ahdas ja täytyi porata käsiporakoneella ja 3 millimetrin terällä. Myös muita kohtia täytyi muokata hiomalla, jotta osat sai sovitettua kiinni toisiinsa. Tämä johtui mahdollisesti siitä, että CAD-mallien suunnittelija oli optimoinut ne omalle tulostimelleen, materiaalilleen ja parametreilleen. PLA:a on melko vaikeaa työstää johtuen sen matalasta sulamislämpötilasta. Tämä aiheuttaa esimerkiksi sen, että hiominen on vaikeaa ja hiomapaperi menee nopeasti ”tukkoon”. ABS olisi ollut paremmin työstettävää, ja siitä tulostettavia kappaleita on myös helppo jälkikäsitellä asetonihöyryn avulla sileäksi. Lopputulos oli kaikesta huolimatta hyvin onnistunut.

### 3.5 Mekaniikka

Tarrain ohjauselektronikkaa lukuun ottamatta koostuu 3D-tulostetuista osista, sähkömoottoreista, vetojousista, osien kiinnityksessä ja akseleina toimivista M3-kokoisista ruuveista, prikoista ja muttereista sekä tartuntapinnoissa käytettävästä liimapinnalla varustetusta solukumista. Sormet ovat kolminivelisiä ja niiden erityislaatuisten tartuttavaan kappaleeseen mukautuvan liikkeen saa aikaan sormien selkäpuolella oleva vipumekanismi. Matoruuvit ovat kiinni suoraan sähkömoottoreiden akseleissa, ja ne pyörittävät eräänlaista hammasratasta, joka puolestaan liikuttaa vipumekanismeja. Tarrain mekaniikka on melko nerokas ja se onkin suunnittelijansa mukaan tehty hintavan Robotiqin 3-Finger Gripperin toiminnallisuuden pohjalta.

Käytin nivelten akselina ensin halkaisijaltaan kolmen millimetrin hiilikuitutankoa, joka on edullista ja kevyttä. Haittapuolena tässä materiaalissa on, että tangosta irtoaa todella pieniä kuituja, jotka ärsyttävät ihoa ja ovat haitallisia hengitettynä. Jouduin purkamaan tarrainta niin usein, että oli kätevempää käyttää akseleina M3-koneruuveja ja lukkomuttereita. Jokaisen sormen selkäpuolella olevassa vipumekanismissa on myös kiinni kaksi 5 x 20 millimetrin vetojousia, jotka vetävät sormia auki-asentoon ja poistavat vipumekanismien toiminnalle välttämättömän pienen välyksen.

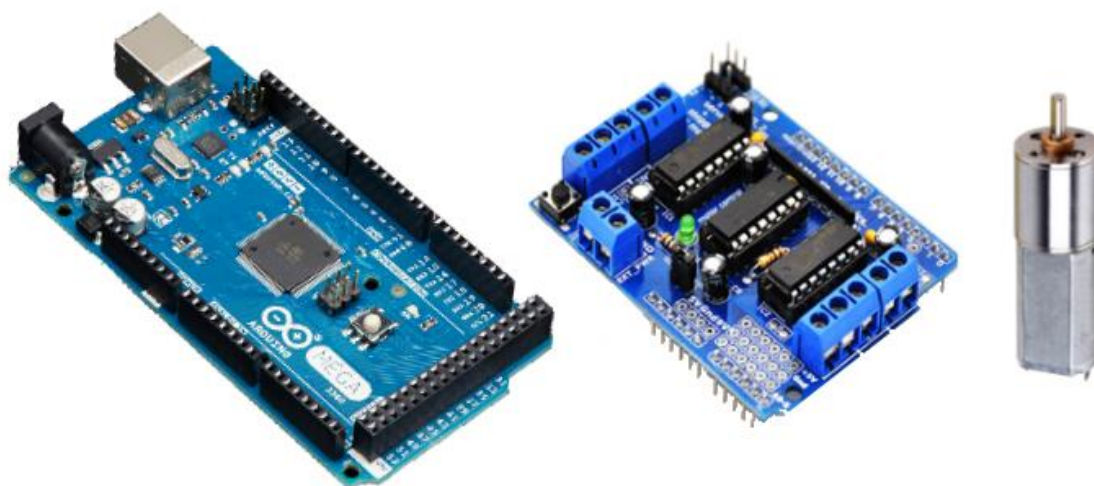
Tarraimen CAD-malli on suunniteltu siten, että yhden sormen moottorikotelon päätyyn olisi voinut laittaa pienoiskokoisen servomoottorin, joka olisi mahdollistanut tarraimen reunimmaisten sormien liikuttelun sivusuunnassa. Tämä toiminnallisuus mahdollistaisi saksiotteen ja pieniin kappaleisiin tarttumisen. Päätin, ettei ominaisuudelle ollut tarvetta, mikä yksinkertaisti rakennetta hieman, kun servomoottoria ja muutamaa ratasta ei tarvittu. Sormet eivät tämän vuoksi olleet kiinni toisissaan, vaan erillisiä alikokoonpanoja. Ruuvasin ne kiinteästi muovinpalaan, jonka puolestaan voi ruuvata esimerkiksi robotin työkalulaippaan kiinni.

Sormien matoruuvien ja hammasrattaiden kanssa oli ongelmia tulostusjäljen lisäksi materiaalin mekaanisessa kestävyudessa. Kyseiset osat muuttavat moottorin pyörimisliikkeen nivelten liikkeeksi siten, että pieni alue, kuten rattaan yksi hammas, ottaa vastaan suuren voiman. Hampaat ja matoruuvien kierteet kuuluivatkin niin pieniksi, että aika ajoin rattaat hyppivät, eivätkä pyörineet ja välittäneet voimaa eteenpäin. Tämä saattoi johtua ainakin PLA:lle liian suuresta kitkasta, joka puolestaan oli seurausta tulosteiden epätarkkuudesta ja siitä, etteivät kyseiset voimaa välittävät osat olleet ainakaan aluksi täydellisesti kohdakkain. Myös tarkempien ja pienemmän kitkakertoimen omaavia osia koitettiin tulostaa SLA-tekniikalla, mutta sen kanssa oli muita ongelmia, kuten edellisessä alaluvussa on kuvattu. Jouduin vaihtamaan sekä matoruuveja että rattaita muutamaa otteeseen, mutta toistaiseksi uudet komponentit ovat kestäneet. Niiden kulumista täytyy kuitenkin tarkkailla, ja aion lisätä kuluviin osiin kitkaa pienentävää voiteluainetta, kuten litiumrasvaa.



### 3.6 Voimanlähde ja ohjauselektronikka

Tarraimen voimanlähteenä toimivat generiset alennusvaihteilla varustetut 12 voltin tasavirtamoottorit, joiden kierrosnopeus vaihteiden jälkeen on 120 kierrosta minuutissa. Moottoreiden koko on 58 x 16 x 16 millimetriä ja akselin halkaisija kolme millimetriä. Valmistaja ilmoittaa moottorin vääntömomentiksi 0.3 newtonmetriä, minkä arvion olevan riittävä tähän sovellukseen. (DealeXtreme, verkkosivu) Juuri kyseisen moottorin virrankulutusta ei oltu ilmoitettu, mutta vastaavanlaisilla moottoreilla virtapiikki oli maksimissaan yhden ampeerin.



*Kuva 25: Arduino, Motor Shield ja tasavirtamoottori (mukaihen Arduino [a], verkkosivu).*

Moottorit on kytketty tekemääni virranmittausyksikköön, joka puolestaan on kytketty Arduino-kehitysalustaan sekä moottorinohjausyksikköön. Näistä muut paitsi virranmittausyksikkö näkyvät kuvassa 25. Arduino on avoimen laitteiston ja lähdekoodin kehitysalusta, jonka eri mallit perustuvat Atmelin AVR-mikrokontrollereihin. Kehitysalustan avulla mikrokontrollerin tulo- ja lähtöpinneihin on helppo kytkeä esimerkiksi erilaisia antureita, LED-valoja ja moottoreita. Arduinoa ohjelmoidaan Arduino-kielellä, joka perustuu C- ja C++-ohjelmointikieliin. Ohjelmointiympäristönä toimii helppokäyttöinen Arduino IDE (Integrated Development Environment), ja moniin sovelluksiin on saatavilla valmiita mallikoodeja sekä ohjelmakirjastoja. (Arduino [b], verkkosivu)

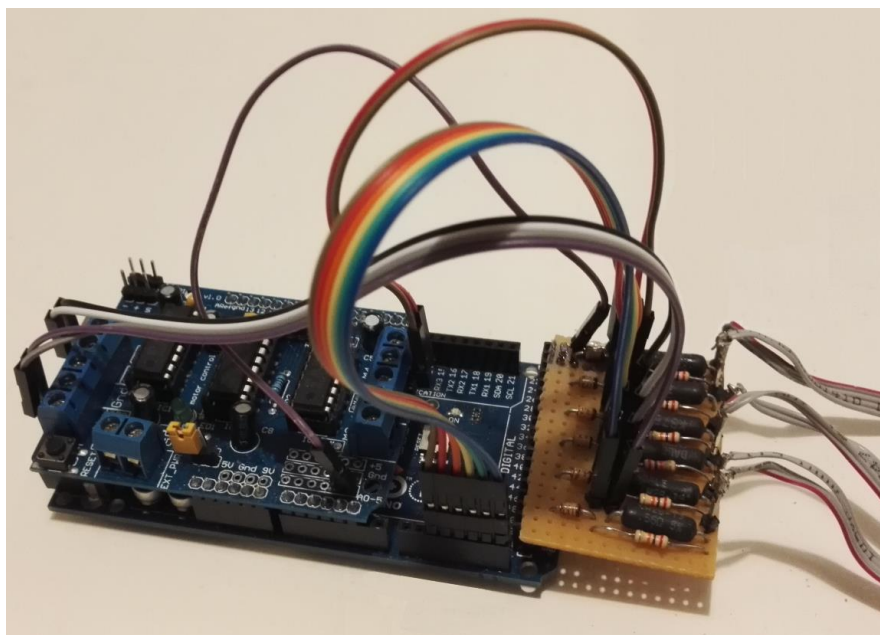
Käytössäni oli Arduinon MEGA 2560 -malli, joka perustuu Atmelin ATmega2560-mikrokontrolleriin. Tämä kehitysalustan malli sisältää 54 digitaalista tulo-lähtöä, 16 analogista tuloa, neljä sarjaporttia, ICSP-ohjelmointiliitännän, USB-liittimen ja reset-napin. (Arduino [a], verkkosivu) Tämän mallin suorituskyky on melko järeä näin yksinkertaiseen sovellukseen, mutta sen suuri määrä liitäntöjä tulivat tarpeeseen.

Arduinoilla ei voi suoraan ohjata kuin matalan virrankulutuksen ja jännitteen moottoreita, kuten harrastetyyppisiä servomoottoreita, sillä sen komponentit eivät ole suunniteltu kestävänsä tätä. Arduinoihin on kuitenkin saatavilla hyvin monenlaisia lisälaitteita (engl. shield), jotka voidaan asettaa kehitysalustan päälle ikään kuin kiinteäksi osaksi laitetta. Hankin moottoreita varten Adafruitin valmistamaan Motor Shieldiin (v1.2) perustuvan lisälaitteen, joka sisältää kaksi L293D-moottorinohjauspiiriä. Tämän lisälaitteen avulla voidaan ajaa neljää 4.5–25 voltin tasavirtamoottoria maksimissaan 0.6 ampeerin virralla, sallitun lyhytaikaisen virtapiikin ollessa riittävät 1,2 ampeeria. L293D-piirit ovat suunniteltu induktiivisten kuormien ajamiseen ja ne sisältävät kaksi H-siltaa piiriä kohden. (Adafruit, verkkosivu) H-siltojen avulla voidaan vaihtaa moottorien pyörimissuuntaa, joten ne ovat välttämättömiä tässä sovelluksessa.

Sähkömoottorit eivät kestä pitkään jumitilannetta eli sitä, että kuorma kasvaa moottorin vääntöä suuremmaksi ja roottori lakkaa pyörimästä. Tässä tilanteessa moottori ottaa maksimivirran ja voi palaa käyttökelvottomaksi. Tarraimen toiminta perustuu siihen, että sormien moottoreita ohjataan pyörimään toiseen suuntaan kappaleeseen tartuttaessa, ja kun tarpeeksi voimakas ote on saavutettu, moottoreiden liike pysähtyy. Vastaavasti kun ote halutaan avata, moottoreita ohjataan pyörimään vastakkaiseen suuntaan niin kauan, kunnes sormet ovat täysin auki ja moottoreiden liike pysähtyy. Moottoreita kyetään kyllä pyörittämään ja ohjaamaan eri suuntiin Arduinon ja lisälaitteen avulla. Ongelmaksi muodostuu, kuinka saada tieto, että sormet ovat saavuttaneet halutun asennon ja moottoreiden virransyöttö voidaan katkaista niiden hajoamisen estämiseksi.

Käytännössä tämän toteuttamiselle oli kaksi järkevää vaihtoehtoa. Ensimmäinen olisi ollut paikkatakaisinkytkentä, eli esimerkiksi monikierrospotentiometrin tai optisen enkooderin integroiminen moottorin akselille. Moottorin akselin pyörimisestä olisi voitu laskea sormien paikkatieto. Tämä ei olisi kuitenkaan välttämättä ollut luotettava keino, sillä esimerkiksi rattaiden hyppiminen olisi aiheuttanut sormien paikkatietoon virhettä. Päädyin toiseen vaihtoehtoon, eli moottoreiden kuluttaman virran mittaamiseen.

Sähkömoottorit kuluttavat sitä enemmän virtaa, mitä isompi niiden kuorma on. Täten kun tarraimen sormet törmäävät sulkeutuessaan tartuttavaan kappaleeseen, sormien moottoreiden virrankulutus kasvaa selvästi. Vastaavasti, kun tarraimen sormet ajetaan täysin auki-asentoon eikä moottori pääse enää pyörimään, tulee virrankulutukseen selkeästi havaittava kasvu. Yritin etsiä sopivaa lisälaitetta, jossa olisi valmiiksi toteutettuna moottoreiden virran mittaus. Löytämässäni lisälaitteissa oli kuitenkin rajoituksena, että niillä pystyi ajamaan ainoastaan kahta moottoria tai moottorikohtainen sallittu virtapiikki oli liian pieni. Täten päätin kokeilla rakentaa virran mittauksen itse – tosin sain apua ammattiainekerho Telokin aktiiveilta. Valmis virranmittausyksikkö näkyy kuvassa 26 oikealla, muuhun ohjauselektroniikkaan liitettynä.



**Kuva 26:** Tarrainen ohjauselektronikka sisältäen omatekemän virranmittausyksikön.

Sähkövirtaa voidaan mitata melko yksinkertaisesti johtamalla virta shunttivastuksen läpi ja mittaamalla vastuksen yli olevaa jännitettä, josta saadaan tarvittaessa laskettua virran arvo Ohmin lain avulla. Shuntti on pieniohminen ja yleensä melko suuren tehonkeston omaava vastus, jota voidaan käyttää esimerkiksi juurikin virtamittareissa. Shuntin yli olevaa jännitettä voidaan mitata Arduinin analogisilla tulopinneillä, mutta käyttämälläni 0,56 ohmin vastuksella kytkentää ei voida tehdä suoraan, sillä Arduinin tulojen suurin suositeltu sähkövirta on 40 milliampeeria, mikä ylittyisi tässä varmasti. Virtaa rajoittamaan kytkin sarjaan ennen tuloa toisen, suurella arvolla varustetun vastuksen.

Muita komponentteja ei välttämättä tarvita toimivaan virran mittaukseen, mutta tässä sovelluksessa omat haasteensa asetti se, että moottorien kulkusuunta vaihdetaan H-siltojen avulla kääntämällä jännitteen napaisuus. Tällöin Arduinin analogiseen tuloon vaikuttaisi suoraan moottorin 12 voltia, joka voi rikkoa koko kehitysalustan, sillä tulojen suurin sallittu jännite on viisi voltia. Tätä varten juotin reikälevylle shunttivastukset molempien moottorin johtimien kanssa sarjaan, edellä mainitut suuremman arvon vastukset analogisten tulojen kanssa sarjaan sekä 4,7 voltin kynnysjännitteen omaavat zeneriodit virtalähteen kanssa rinnan. Zeneriodi on diodityyppi, joka estää virran kulkemisen estosuuntaansa siihen asti, kunnes diodin kynnysjännite eli niin kutsuttu zener-jännite saavutetaan. Kytkin diodit suojaamaan analogisia tuloja niin, että mikäli tuloille syntyy yli 4,7 voltin jännite, diodi johtaa sähkövirran maahan tulojen sijaan.

Testasin, että käyttämälläni komponenteilla ja moottoreiden virrankulutuksen ollessa suurimmillaan Arduinin analogisiin tuloihin vaikutti maksimissaan noin yhden voltin jännite. Arduinin tulojen referenssijännite, eli mitattavan jännitealueen ylin arvo, on

normaalisti viisi volttia, mutta sen voi muuttaa ohjelmallisesti 1,1 tai 2,56 volttiin. Arduinon mikrokontrollerin sisältämä A/D-muunnin muuttaa jännitteen arvon referenssijännitteen perusteella 10-bittisellä resoluutiolla int-tyyppiseksi arvoksi (0-1023), jota voidaan lukea ohjelmakoodissa. (Arduino [a], verkkosivu) Pystyin parantamaan virran mittaukseni resoluutiota muuttamalla referenssijännite 1,1 volttiin. Tämän lisäksi paransin mittaustulosta juottamalla jokaisen käyttämäni analogiatulon kanssa rinnan pintaliitoskondensaattorin hieman tasaamaan jännitevaihtelua.

Testasin virranmittauksen toimivuuden kirjoittamalla yksinkertaisen ohjelmakoodin, joka lähetti Arduino IDE:n sarjaliikenteen monitorointi-ikkunaan jatkuvasti valitun sormen analogiatulon mitattua lukemaa. Ajoin samalla sormea edestakaisin välillä vastustaen sen liikettä ja katsoin, muuttuuko analogiatulon mitta-arvo järkevällä tavalla. Tein saman kaikille sormille, ja virtamittaus toimi onnistuneesti sekä riittävällä tarkkuudella. Tätä työtä kirjoittaessa tarraimen ohjauselektroniiikan ohjelmakoodi toimii siten, että moottoreille on asetettu testaamalla haetut virran kynnysarvot, jotka ovat sekä moottorikohtaiset että erilliset sulkevalle ja avaavalle sormen liikkeelle. Kynnysarvon ylittyessä sormen liike pysähtyy ja tarraimen voidaan olettaa saavuttaneen tartunta tai avaamaan sormet onnistuneesti. Sulkeutuvan liikkeen kynnysarvoa muuttamalla voidaan säätää tarraimen puristusvoimaa.

## 4. YHTEENVETO

Teollisuusrobotin tarrain on robottisolun tärkeimpiä osa-alueita, joten robotisointiprojektissa on hyvin tärkeää tuntea erilaisten tarrainten toimintaperiaatteet, hyödyt ja haitat sekä mahdolliset sovelluskohteet. Tämän työn teoriaosan tarkoituksena on tarjota katsaus näihin asioihin. Teollisuusrobottien tarraintyypeistä ei ole tarjolla kovinkaan kattavaa lähdekirjallisuutta, mutta yksi suositeltava kirja on Monkman et al. kirjoittama *Robot Grippers* (2007). Tässä työssä käytettiin myös työn kirjoittajan omaa alan kokemusta ja eri lähteistä saatua oppia tarrainten toiminnallisuuksia esitellessä.

Yleisimmät teollisuusrobottien tarraimissa käytetyt toiminnallisuudet ovat mekaaninen, imu- sekä magneettinen tartunta. Nykyään mekaanisten tarrainten voimanlähteinä toimii lähinnä pneumatiikka ja sähkö, jotka esiteltiin tässä työssä. Pneumatiikassa voimanlähteenä on ollut aiemmin monia etuja sähköön verrattuna, kuten tarrainten suuri tartuntavoima ja kompakti koko, ja sen avulla toimivat tarraimet ovatkin teollisuudessa vielä selkeästi käytetyimpiä. Sähköiset tarraimet ovat kuitenkin kehittyneet kovaa vauhtia viime vuosina ja isot tarrainvalmistajat ovat alkaneet julkaista omia mallejaan. Tämän lisäksi muutamat pienemmät yritykset ovat iskeneet markkinarakoon ja tuoneet innovatiivisia ratkaisuja markkinoille.

Sähköiset tarraimet tulevat todennäköisesti yleistymään teollisuudessa nopealla tahdilla ja niiden avulla voidaan toteuttaa entistä edistyksellisempiä robotisointiprojekteja. Sähköisten tarrainten etuna on esimerkiksi vaivaton energiansyöttö, kun paineilmalinjaa tai kompressoria ei enää tarvita. Edistyksellisintä niissä on kuitenkin mahdollisuus säätää tarkasti käytettävää tartuntavoimaa, kontrolloida leukojen tai sormien liikettä halutusti, hyödyntää kappaleeseen mukautuvia tartuntamekanismeja sekä saada takaisinkytkentätietoa, kuten tartunnan voimakkuutta, ilman ylimääräisiä antureita.

Työn toinen osa on tutkimusosa, jossa käytiin läpi sähköisen tarraimen rakentamista teollisuusrobotille hyödyntäen materiaalia lisäävää valmistusta eli 3D-tulostamista. Tarrain valmistettiin viihdesovellukseen juomia tarjoilevan Drinkkirobotin uutta versiota varten, mutta ei ole poissuljettua, että tällä menetelmällä valmistettaisiin tarraimia tulevaisuudessa myös teollisuuskäyttöön. Nykyään ainakin yksi iso tarrainvalmistaja tarjoaa jo palvelua, jonka kautta voi tilata valmiiksi 3D-tulostettuja, kustomoituja tarrainten leukoja. Tämä voi olla ensiaskel 3D-tulostettuja tarraimia kohti.

Työn aikana tarraimen osien 3D-tulostamisessa oli sekä tulostinlaitteistosta että käyttäjistä johtuvia ongelmia. Erilaiset ongelmat ovat yleisiä kaupallisissakin 3D-tulostimissa, sillä ne ovat vielä melko kokeellisella asteella ja niiden käyttö vaatiikin tietynlaista harrastuneisuutta. Lopulta osien tulostusjälki ja kestävyys olivat pääosin erittäin hyvää ja 3D-tulostusta voidaan suositella tämän tyyppiseen käyttötarkoitukseen.

Projektin tarraimen voimansiirron komponentteina toimineet matoruuvit ja hammasrattaat olivat ainoita osia, joiden kestävyys on epävarmaa, ja ne vaativatkin lisää testaamista jatkossa, kun tarrain otetaan varsinaiseen käyttöön.

Tarraimen ohjauselektronikan aivoina toimii Arduino-kehitysalusta, jonka käyttäminen osoittautui helpoksi ja luotettavaksi tällaisessakin sovelluksessa. Kehitysalustan hyvät liitännät ja kätevä ohjelmointi tekevät siitä ideaalin ohjausalustan monenlaisiin projekteihin. Itse tekemäni virranmittausyksikkö toimi sille asetettujen tavoitteiden mukaisesti ja sain sitä rakentaessani paljon lisäoppia elektronikasta. Tarraimen kokonaiskustannukset ohjauselektronikka mukaan lukien olivat noin 100 euroa.

Rakentamani tarraimen ollessa lähes valmis Drinkkirobotti-projekti sai käyttöönsä tarraimen esikuvan, erittäin arvokkaan Robotiqin 3-Finger Gripper -tarraimen Posicraft-yrityksen Timo Kirmasen sekä TTY:n avustuksella. Tämä sähköinen ja mukautuva tarrain on osoittautunut soveltuvan täydellisesti kyseiseen käyttötarkoitukseen. Tästä syystä rakentamaani tarranta ei keretty testaamaan varsinaisessa sovelluksessaan, mutta voidaan sanoa, että tarraimen rakennusprojekti on onnistunut. Tarranta pyritään hyödyntämään ammattinekerho Pullonkaulan tulevissa robottiprojektissa, jotka tehdään kerhon toiselle teollisuusrobotille.

Lopuksi todettakoon, että teollisuusrobotin tarraimesta puhuttaessa käytetään yleisemmin sanaa ”tarttuja” kuin ”tarrain”. Tätä sanaa ei kuitenkaan löydy Kotimaisten kielten keskuksen julkaisemasta Kielitoimiston sanakirjasta. Otin yhteyttä kandidaatintyötä tehdessäni Kielitoimistoon ja keskustelin asiasta heidän kanssaan. He sanoivat, että seuraava päivitys sanakirjaan julkaistaan vasta kahden vuoden päästä, mutta asiaa tutkitaan ja on todennäköistä, että ”tarttuja”-sana lisätään sanakirjaan. Päätin käyttää työssäni kuitenkin toistaiseksi virallisempaa ”tarrain”-sanaa.

## LÄHTEET

Adafruit, Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield for Arduino kit - v1.2, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2017): <https://www.adafruit.com/product/81>

Advanced Micro Systems, (2010). Stepper Motor System Basics. 13 p. Saatavissa: <http://www.ams2000.com/pdf/step101.pdf>

Anaheim Automation, Linear Actuator Guide, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.10.2016): <http://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-actuator-guide.php>

Arduino [a], Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017): <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>

Arduino [b], What is Arduino?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017): <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Bhatia, U., (2015). 3D Printing Technology. International Journal of Engineering and Technical Research, Vol.3(2). 327–330 pp. Saatavissa: [https://www.erppublication.org/published\\_paper/IJETR031424.pdf](https://www.erppublication.org/published_paper/IJETR031424.pdf)

Castor, MegaPrinter, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2017): <http://castor.cc.tut.fi/megaprinter>

CNC Router Source, Stepper vs Servo Motors, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.10.2016): <http://www.cncroutersource.com/stepper-vs-servo.html>

Cooper, K.G., (2001). Rapid Prototyping Technology. Marcel Dekker, USA, 226 p.

DealeXtreme, ZnDiy-BRY 16GA-120 DC 12V 120RPM Geared Motor - Silver, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2017): <http://www.dx.com/p/zndiy-bry-16ga-120-dc-12v-120rpm-geared-motor-silver-323576>

Dollar, A., Ma, R. & Odhner, L., (2013). A Modular, Open-Source 3D Printed Underactuated Hand. IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 2722-2728

Formlabs, Form 2, The most advanced desktop 3D printer ever created, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2017): <https://formlabs.com/3d-printers/form-2>

Gupta, A. K., Arora, S. K., (2013). Industrial Automation and Robotics. Laxmi Publications, India, 405 p.

International Federation of Robotics (IFR), World Robotics – Industrial Robots 2015, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.4.2016): <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics>

Ixtur [a], MAP-120R & MAP-180, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2016): <http://www.ixtur.com/index.php/tech-support/brochures/93-ixtur-map-120r-a-map-180-eng>

Ixtur [b], Magnetic Gripper for Round and Flat Parts – Ixtur MRP-46, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2016): <https://www.youtube.com/watch?v=TIu4ejfTO7U>

Kuivanen, R. (toim.) & SRY (Suomen robotiikkayhdistys), (1999). Robotiikka. Talentum Oyj/MetalliTekniikka, Vantaa, 188 s.

Kurfess, T. (ed.), (2005). Robotics and Automation Handbook. CRC Press, USA, 579 p.

Liikenne- ja viestintäministeriö, (2016). Robotiikan taustaselvityksiä. 90 s. Saatavissa: <http://www.lvm.fi/-/robotiikan-taustaselvityksia>

Micromo, Precision Gripper System for Small Parts, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.10.2016): <http://www.micromo.com/applications/robotics-factory-automation/precision-gripper-system-small-parts>

Monkman, G.J., Hesse, S., Steinmann, R. & Schunk, H., (2007). Robot Grippers. WILEY-WCH, Germany, 463 p.

Niemi, K., Drinkkirobotti ei kärsi savusta, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017): <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/ict/2004-10-07/Drinkkirobotti-ei-k%C3%A4rsi-savusta-3268297.html>

Prenta, Prenta Duo 3D-tulostin, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.2.2017): <http://www.prenta.fi/index.php/laitteet-palvelut/3d-tulostimet/prenta-duo>

Pullonkaula, Drinkkirobotti 4.0, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017): <http://www.pullonkaula.net/projektit/drinkkirobotti-4-0>

Robotiq, Robotiq 3-Finger Adaptive Gripper Instruction Manual, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.10.2016): <http://support.robotiq.com/display/IMB>

RobotShop, (2011). Robotiq Price Drops, Becomes The Most Affordable Adaptive Gripper?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.5.2016): <http://www.robotshop.com/blog/en/robotiq-price-drops-becomes-the-most-affordable-adaptive-gripper-1452>

Sandin, P. E., (2003). Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated. McGraw-Hill, USA, 300 p.



Schmalz, Alipainetarraimet tehostamaan automatisoituja prosesseja, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017):  
<http://www.schmalz.fi/tuotteet/alipainetarrainsysteemit.html>

Schunk, EGP Small Components Gripper, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.10.2016):  
<https://fi.schunk.com/fileadmin/pim/docs/IM0020071.PDF>

Schunk, H., Steinmann, R. & Wolf, A. (2005). Grippers in Motion – The Fascination of Automated Handling Tasks. Springer, Italy, 248 p.

Sipola, T., Professori: Viimeinen sammuttakoon valot, jollei robotiikkaan panosteta, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2016):  
[http://yle.fi/uutiset/viimeinen\\_sammuttakoon\\_valot\\_jollei\\_robotiikkaan\\_panosteta/8811395](http://yle.fi/uutiset/viimeinen_sammuttakoon_valot_jollei_robotiikkaan_panosteta/8811395)

Suomen robotiikkayhdistys, Suomen robotiikkayhdistyksen drinkkirobotti, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2016):  
[http://roboyhd.fi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49&Itemid=71](http://roboyhd.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=71)

Thingiverse, Three Finger Gripper by 4ndreas, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017): <http://www.thingiverse.com/thing:661286>

Union Bank of Switzerland, (2016). Extreme automation and connectivity: The global, regional, and investment implications of the Fourth Industrial Revolution, 36 p. Saatavissa: [https://www.ubs.com/global/en/about\\_ubs/follow\\_ubs/highlights/davos-2016.html](https://www.ubs.com/global/en/about_ubs/follow_ubs/highlights/davos-2016.html)

Viitala, S., Robotisaatio = rutto?, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.3.2016):  
[http://kide.metropolia.fi/?page\\_id=85](http://kide.metropolia.fi/?page_id=85)

VMECA, VMECA Needle Gripper for Handling Porous Insoles for Footwear, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 16.11.2016):  
<https://www.youtube.com/watch?v=tR8j9jNzB2Q>

Yale University, About Model T42, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.2.2017):  
[https://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/model\\_t42.html](https://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/model_t42.html)