

Lukas Walker

3D BIN-PICKING TEOLLISUUSROBOTIIKASSA

Tekniikan ja luonnontieteen tiedekunta
Kandidaatintyö
Lokakuu 2022

TIIVISTELMÄ

Lukas Walker: 3D bin-picking teollisuusrobotiikassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Lokakuu 2022

Robottiikan käyttöä teollisuustuotannossa halutaan lisätä johtuen sen kyvystä parantaa sekä nopeuttaa tuotantoa. Menetelmiä, joilla haluttuja tavoitteita voidaan edistää, on monia mutta kenties monimutkaisin näistä on bin-picking. Bin-picking on robotiikan muoto, jossa kappaleita tunnistetaan konenäöllä, poimitaan sopivalla työkalulla ja lasketaan paikoilleen halutussa orientaatioissa.

Automatisointi tällä menetelmällä on hyvin hankalaa, vaikka se voi aluksi vaikuttaa helpolta. Ihmisille luontaiset tehtävät eivät ole aina robotille helppoja toteuttaa. Kun ihmisen kehitystä tarkastellaan, huomataan, että kappaleiden poiminnan opetteleminen vaatii vuosia syntymästä. Teollisuudessa tapahtuvien jatkuvien muutosten vuoksi ei voida odottaa vuosia, että robotti oppii poimimaan haluttuja kappaleita, vaan tarvitaan nopeasti työhön kykenevä robotti.

Robotin ja kappaleen välillä vuorovaikuttava työkalu on suunniteltava tarkasti. Kappaleen ominaisuudet on huomioitava suunnitteluvaiheessa. Työkalusta riippuen robotti voi tarttua kappaleeseen usealla tavalla. Kappaleiden ollessa satunnaisesti orientoituneena, joutuu robotti usein kokeellisesti määrittämättään parhaimman mahdollisen poimintapaikan kappaleesta.

Poiminnan nopeuteen vaikuttaa merkittävästi poimittavan kappaleen koko, siirrettävän matkan pituus ja kappaleiden asetelma poiminnan alkuvaiheessa. Fyysisten tekijöiden lisäksi käsittelynopeuteen vaikuttavat ohjelmistojen tehokkuus sekä laitteiston laskentatehokkuus. Robotin käsittelynopeuden täytyy pystyä mukautumaan teollisuuteen, jossa tuotannonnopeus voi vaihdella riippuen myynnistä ja materiaalien saatavuudesta.

Tulevaisuudessa voidaan odottaa bin-pickingin yleistyvän johtuen halusta vähentää ihmisten tekemää yksitoikkoista työtä, sekä halusta parantaa työolosuhteita. Teknologian kehitystä voi tapahtua laskentatehokkuudessa, algoritmien tiedonkäsittelyssä ja robotin päätöksentekokyvyssä. Kaikenlaisia kappaleita yksittäinen robotti ei toistaiseksi kykene poimimaan, vaan erilaisia kappaleita varten on kehitetty omat ratkaisunsa, jotka eivät sovellu välttämättä muiden kappaleiden poimimiseen.

Avainsanat: Bin-picking, konenäkö, teollisuusrobotiikka, tarttuja, end-effector.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. BIN-PICKINGIN TOIMINTAPERIAATTEET	3
2.1 Random bin-picking	3
2.1.1 Konenäkö	4
2.1.2 Robotin työkalun suunnittelu	5
2.2 Structured bin-picking	7
3. BIN-PICKING HAASTEET TEOLLISUUDESSA.....	9
4. ERILAISIA KÄYTTÖ- JA RATKAISUMENETELMIÄ.....	11
4.1 ABB:n robottikäsivarret	11
4.2 Pickit3D 3D näköjärjestelmä	12
5. ROBOTIIKAN TULEVAISUUS	14
5.1 Kehitykset konenäössä	14
5.2 Ohjelmistojen tehokkuus	15
6. YHTEENVETO.....	16
LÄHTEET	18

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Kolmiulotteinen (3-Dimensional)
Random	Satunnainen
Structured	Järjestelty
Order bin-picking	Järjestelty poimintatyö
kg	Kilogramma
ms	Millisekunti
CAD	Computer-aided design
FMS	flexible manufacturing

1. JOHDANTO

Teollistumisen alusta asti tuotantoa on pyritty helpottamaan ja tekemään tehokkaammaksi. 3D bin-picking on eräs suhteellisen uusi teknologia modernissa teollisuudessa. L.G Roberts on tutkinut sitä jo 1960-luvulla (Buchholz, 2016). Vaikka sitä on kehitetty jo yli 50 vuotta, tämä materiaalinkäsittelymenetelmä ei ole saanut suurta suosiota.

Yritykset hyötyvät suuresti tehokkaasta automatisoinnista, sillä se merkitsee kykyä ylläpitää toimintaansa pienemmällä henkilöstöllä vähentäen muuttuvia kustannuksia. Yksinkertaisissa tehtävissä robotit myös nopeuttavat kappaleiden käsittelyä ja lajittelua. Monimutkaisimmissa tehtävissä toisaalta robotilla voi kestää tehtävän suorittamisessa pitkään. (Buchholz 2016)

Tapoja saada käsiteltävät kappaleet järjestykseen on monia, mutta riippuen niiden koosta, muodosta, materiaalista ja painosta voidaan valita kullekin mahdollisimman tehokas tapa. Alkeellisin ja mahdollisesti hitain tapa on käsityövoimalla kappaleiden asetelu. Tämä tapa tuottaa monia haasteita, jotka liittyvät ihmisten kykyyn toistaa yksinkertaisia tehtäviä pitkillä aikaväleillä. Ei ole kovin inhimillistä laittaa ihminen toistamaan samaa poimi ja siirrä -tehtävää monta tuntia ilman taukoja tai työn vaihtelua. Vaarallisten tai hankalien työskentelyolosuhteiden vähentäminen on tärkeää, jotta ihmiset eivät joutuisi kärsimään epäinhimillisistä oloista.

Moderni tapa tehostaa ja automatisoida on 3D bin-picking. Teknologiaa käytettäessä ei vaadita ihmisiä tekemään yksinkertaisia poimintatöitä. Kyseisessä teknologiassa robotin tarrain asetetaan soluun, jonka luokse syötetään työstettäviä ja kuljetettavia kappaleita. Robotin tehtäväksi siis jää tunnistaa eteensä tuodut kappaleet, poimia ja siirtää niitä toiseen sijaintiin. Robotit eivät väsy, eikä työn teon tehokkuus heikkene ajan kuluessa. Tämän avulla voidaan varmistaa tasaisen tuotannon jatkuvuuden. Tämä tehtävä, vaikka yksinkertainen onkin ihmiselle, sisältää paljon haasteita, joihin ei ole saatu tehokasta ratkaisua. (Buchholz 2016)

Kappaleilla voi olla monta erilaista orientaatiota. Kappaleen eri orientaatiosta riippuen tarraimen voi olla helpompaa tai vaikeampaa ottaa siitä kiinni. Kun kappale on asetettu eri materiaalinkäsittelyjen vaiheessa sopivaan asentoon, on tyypillistä, että tämä orientaatio halutaan säilyttää. Tästä huolimatta kappaleiden liikkeessä eri materiaalikäsittelyjen vaiheiden läpi mm. liukuhihnojen välillä voi kappaleen orientaatio muuttua aiheuttaen lisää vaivaa uudelleen asettelussa. (Wolf et al. 2005)

3D bin-picking hyödyntää kameroita, jotka luovat kolmiulotteisen kuvan työpinnasta. Skannatusta työpinnasta voidaan tunnistaa kappaleet ja verrata niitä CAD-ohjelmissa oleviin mallinnettuihin kappaleihin. CAD-ohjelmien avulla voidaan tunnistaa helposti kappaleiden eri orientaatiot työpinnalla. (Schyja & Kuhlenkötter 2015)

Tässä yleiskatsauksessa keskitytään pääsääntöisesti random bin-pickingiin, jossa robotisoluun tuodut kappaleet ovat satunnaisessa järjestyksessä ja orientaatioissa. Tavoitteena on selvittää, mitä tarvitaan, jotta voidaan onnistuneesti suorittaa bin-pickingiä. Selvitetään myös minkälaisia vahvuuksia ja heikkouksia teknologialla on teollisuudessa. Structured bin-picking on random bin-picking:n vastakohta, jossa kappaleet tuodaan käsiteltäväksi ennalta määrättyssä järjestyksessä ja orientaatioissa. Jotkut bin-pickingin haasteista liittyvät konenäköön, sekä tarraimen ja reitin valitsemiseen. (Buchholz 2016)

Työssä käsitellään 3D bin-pickingiin liittyviä peruskäsitteitä, sekä teknologioiden perustoimintaperiaatteita. Käsitellään seuraavia käsitteitä: random bin-picking, konenäkö, tarrain, sensori ja structured bin-picking. Näiden käsitteiden selityksissä avataan myös niiden tärkeys ja toimintaperiaatteet systeemin toiminnan kannalta. Kolmannessa luvussa käsitellään, miten teknologia on vaikuttanut teollisuuteen sekä minkälainen vaikutus sillä on ollut työolosuhteisiin. Katsotaan myös, miten teknologiaa on pyritty hyödyntämään sekä, miten se vaikuttaa yritysten tuotannon tuottavuuteen ja tehokkuuteen. Neljännessä luvussa esitetään kahden yrityksen ongelmat ja miten 3D bin-picking on tuonut ratkaisun niihin. Lopuksi käsitellään, mihin teknologia on suuntautumassa, mitkä ovat seuraavat haasteet, johon on löydettävä ratkaisuja sen yleistyäkseen. Katsotaan miten konenäkö tulee kehittymään lähitulevaisuudessa sekä miten se tulee vaikuttamaan bin-picking haasteisiin. Tämän lisäksi katsotaan myös ohjelmistojen sekä algoritmien kehitykseen ja niiden tarjoamiin ratkaisuihin tulevaisuudessa.

2. BIN-PICKINGIN TOIMINTAPERIAATTEET

Bin-pickingin toimintaperiaatteet riippuvat tehtävän lähtötilanteesta. Ovatko kappaleet järjestyksessä ja ennalta tiedetyssä sijainnissa? Kappaleen muodon monimutkaisuudella sekä materiaalipinnalla on kaikilla merkitystä varsinkin konenäön kannalta (Buchholz, 2016, s. 20). Nämä haasteet ovat suurimpia tekijöitä siinä, miksi teknologia ei ole yleisemmässä käytössä yrityksissä. Tämän teknologian käyttöönotto vaatii paljon aikaa, sillä yrityskohtaiset työtehtävät ovat hyvin yksilöllisiä. Vaihtelevat työtehtävät ja kappalemuodot vaativat erilaisia lähestymistapoja poiminnan suorittamiseksi. (Lee et al. 2014; Schyja & Kuhlenkötter 2015)

Yleisesti bin-pickingissä tavoitteena on saada siirrettyä kappaleita paikasta A paikkaan B. Kun pyritään liikuttamaan kappaletta paikasta toiseen, aloitetaan kappaleen orientaation ja sijainnin määrittelemisestä. Tästä voidaan jatkaa käsivarren asianmukaiseen ohjelmointiin, jossa kappaleen siirtotyö suoritetaan. Näitä kahta prosessia toistetaan, kunnes työ on suoritettu loppuun. (Moosmann et al. 2020)

Bin-picking voidaan jaotella muutamiin eri luokkiin, joissa lähtökohdat ja lopputavoitteet eroavat hiukan toisistaan. Random bin-picking käsittelee kappaleiden poimintaa, jossa kappaleet ovat satunnaisessa järjestyksessä ja orientaatioissa. Structured bin-pickingissä kappaleet on asetettu tunnettuun järjestykseen ja orientaatioon. Näiden lisäksi voidaan ajatella olevan kaksi eri poimintatyötä, machine tending ja order picking. Machine tendingissä kappaleiden orientaatio ja asento siirtotyön jälkeen pyritään saamaan mahdollisimman samanlaisiksi jokaisen kappaleen kohdalla. Order pickingissä kappaleen asento siirtotyön jälkeen ei ole merkittävä eikä siihen pyritä vaikuttamaan. (Jong-Kyu et al. 2009)

2.1 Random bin-picking

Satunnaisessa järjestyksessä olevien kappaleiden poiminta on hankalaa ja vaatii monien teknologioiden yhteistyötä. Robotin tulee tunnistaa, missä kappale sijaitsee poimintalueella, määrittää sen syvyyden sekä parhaimman mahdollisen poimintapisteen kappaleessa. Joskus on tärkeä, että pystytään tunnistamaan työalueella olevia erilaisia kappaleita toisistaan, jotta voidaan poimia juuri haluttu kappale. Robotin työkalu pitää tarkoin kriteerein valita, jotta poiminnan onnistumisen todennäköisyys olisi mahdollisimman hyvä ja luotettava. Tämän kaiken saavuttamiseen olisi suotavaa käyttää useampaa kuin yhtä tapaa kappaleen tunnistamiseen. (Siciliano & Khatib 2016, s.820)

Random bin-pickingissä soluun tuodaan kappaleita, minkä jälkeen joko liikkuvalla kameralla tai useammalla kameralla kuvataan työaluetta. Tässä pyritään muodostamaan kolmiulotteinen kuva tasosta määrittäen kappaleen ulkoreunoja ja syvyyttä. Työtason analysoinnin jälkeen robotin ohjelmisto ratkaisee, miten tarttuja saadaan kappaleen luokse. Koneoppimisen avulla robotti oppii löytämään sopivan reitin ja kohdan, josta ottaa kappaleesta kiinni. Tämän jälkeen robotin on tunnistettava, missä orientaatiossa kappale on, kun se on tarraimessa kiinni. Poiminnan jälkeen robotti voi aloittaa kappaleen siirtotyön. (Pochyly et al. 2017)

2.1.1 Konenäkö

Konenäön toteuttaminen tehokkaasti on hankalaa. Kolmiulotteiseen kuvan luomiseen ja tunnistamiseen voidaan käyttää konenäköä. Konenäön haasteisiin on saatu monia ratkaisuja, mutta tehtävän suorittamiseen kuluva aika on ongelmallinen. Monimutkaisten kappaleiden tunnistaminen kolmiulotteisesti vaatii paljon laskennallista suoritustehoa. 3D kartoitus on hyvin raskas toimenpide prosessoreille. On olemassa konenäköä, joka tutkii työpintaa vain kaksiulotteisesti, ja on siten laskennallisesti paljon kevyempi suorittaa. Tämä ei ole aina riittävä ominaisuus kappaleen monimutkaisuudesta johtuen. Keskitetään tässä kuitenkin kolmiulotteiseen konenäköön. (Vijayalakshmi 2020, s.59–61)

Konenäön sensoreita voi toteuttaa muutamalla eri tavalla. Yksi tapa on kappaleen tai työpinnan profiilin luominen laserilla. Tässä metodissa laserviiva ylittää kappaleen ja vieressä oleva kamera seuraa miten lasersäteet muuttuvat tapahtuman aikana. Lopputuloksena saadaan hyvin tarkkoja mittauksia. Toinen metodi on stereonäkö, jossa kahdella kameralla otetaan kaksi kaksiulotteista kuvaa ja näiden pohjalta voidaan luoda kolmiulotteinen kuva. Robottikäsivarren poimintatyötä varten tämä metodi on ollut hyvin onnistunut. Viimeinen menetelmä, jota käsitellään tässä luvussa, on osittain samanlainen kuin ensimmäinen, siten, että laserilla skannataan halutun alueen pintaa. (Buchholz 2016; Vijayalakshmi 2020, s.59–61)

Laserilla skannatessa sensorin paikka on valittava tarkasti. On kaksi päävaihtoehtoa, johon voi sensorin asettaa. Voidaan valita paikaksi robottikäsivarren työkalu eli tarrain tai jokin paikka robottisolun sisällä. Jälkimmäistä vaihtoehtoa valitessa täytyy myös varoa mahdollista törmäystä käsivarren liikkuessa solussa. Paras vaihtoehto näistä kahdesta on usein ulkopuolinen sensori. Sensorin ollessa tarttujan ulkopuolella voidaan tarttujan koko pitää pienempänä ja yksinkertaisempaan poimintavaiheessa. Toinen hyöty on, että voidaan jatkuvasti skannata työpintaa poimintatyön aikana parantaen systeemin

suorituskykyä. Tämän heikkoudet ovat puolestaan lukittu kuvakulma ja mahdollisen lisälaitteiston tarve. (Buchholz 2016 s.13–14)

2.1.2 Robotin työkalun suunnittelu

Tässä luvussa käsitellään erilaisia tarraimia, niiden vahvuudet ja heikkoudet. Katsotaan tarkemmin niiden vaikutuksen poimintatapahtuman onnistumiseen ja luotettavuuteen. Katsotaan myös lyhyesti, miten tarraimen valinta vaikuttaa poimintanopeuteen ja tuotantokustannukseen.

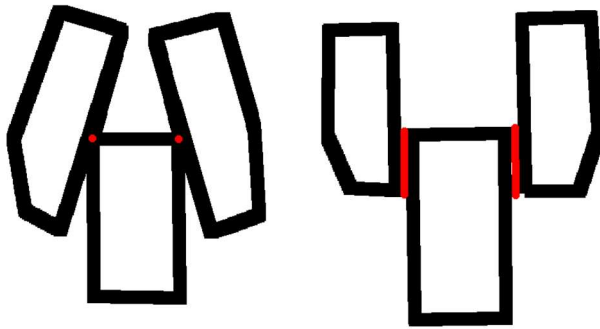
Robotin työkalu tarkemmin (engl. *end-effector*), joka tässä tapauksessa on tarrain, on robotin käsi. Sitä käytetään kappaleen tarttumista, liikuttamista, siirtämistä ja asentamista varten. Tarrainta valittaessa on tiedettävä, mitä kappaleita robotti tulee poimimaan, sillä ei toistaiseksi ole olemassa tarrainta, joka pystyisi luotettavasti poimimaan kaikkia mahdollisia kappaleita tehokkaasti. Poimintatyön suorittamiseen voidaan käyttää monenlaisia menetelmiä. Menetelmiä ovat esimerkiksi mekaaninen kiinnitys, magneettinen tarttuminen, sekä alipaine. Erilaisia ratkaisuja näille menetelmille on monenlaisia ja niiden käyttö perustuu mm. poimittavan kappaleen haurauteen, muotoon, painoon, kokoon ja sen materiaalien ominaisuuksiin. Näitä ominaisuuksia mielessä pitäen, on pyrittävä pitämään tarraimen koko pienenä, sillä koon ollessa liian suuri törmäysten todennäköisyys muiden kappaleiden sekä ympäristön kanssa kasvaa. (Musgrave et al. 2009, s.303; Buchholz 2016, s.20)

Tarrainta on valittava mahdollisimman hyvin, jotta voidaan välttyä mahdollisilta poiminnan aikaisilta epätarkkuuksilta. Mikäli epätarkkuuksia on paljon, todennäköisyys sille, että työn aikana tapahtuu virhe kasvaa. Tämä puolestaan vaikuttaa negatiivisesti tuotantokustannuksiin (Sukhan et al. 2010). Epätarkkuuksia on saatu vähennettyä tarrainten kehityksen myötä. Jos poimittava kappale on puristettavissa sen ollessa monessa eri orientaatioissa, voidaan välttyä ongelmatapauksilta, jossa ideaalista kiinnityskohtaa ei ole.

Tarraimen puristusvoiman suhde sen massa on kehittynyt paljon vuosien varrella. 1980-luvulla tarraimet painoivat noin yhden kilogramman verran, eivät kyenneet tuottamaan paljoa puristusvoimaa, eivätkä olleet energiatehokkaita. Tarraimen kiinnitys ja irti päästäminen kappaleesta pitää pyrkiä ajoittamaan kappaleen muodon mukaan mahdollisimman hyvin, jotta kappale saadaan varmasti kiinnitettyä tarraimen ja poimintavaihetta ei pitkitetä. Kiinnittämistä vaikeuttavat myös ympäristön tuomat ongelmat mm. vuorokauden läpi toimivat teollisuustuotannon työt, sekä jaksoittaiset puhdistustyöt hygie-

nian ohjesääntöjen takia. Näissä tapauksissa tarraimia joudutaan huoltamaan useammin, kuin tapauksissa, joissa työtä ei suoriteta tauotta. Huoltotöitä suoritetaan useammin laitteen kulumisen ja öljyn vaihtumisen takia. Kappaleen irrottamista täytyy mieltiä erillisenä tapahtumana kiinnittymisestä, sillä sijainti, johon kappale jätetään ei välttämättä mahdollista kappaleen irrotusta tarraimesta tilanpuutteen takia. (Wolf et al. 2005)

Tarraimelta vaadittu puristusvoima riippuu kappaleen massasta, tarraimen ja kappaleen yhteisestä pinta-alasta, sekä kappaleen ja tarraimen pintojen materiaaleista. Nämä asiat vaikuttavat kitkavoimaan, joka vuorovaikuttaa kappaleen ja tarraimen välillä pitäen kappaletta paikoillaan siirron aikana. Kappaleen muoto puristuskohdassa on tärkeä, siten että valitun kohdan ollessa hauras täytyy puristusvoiman olla pieni, jottei kappale vaurioitu noston aikana. Suuria puristusvoimia voidaan välttää varmistamalla, että tarrain ja kappale jakavat suuren yhteisen pinnan kosketuksessa, sekä valitsemalla tarraimen pinnalle sopiva materiaalityyppi. Näin ollen on varmistettava, että vältetään pistemäiseltä kosketukselta ja sen sijasta saadaan suuren alueen kosketus kappaleen pintaan, mikä on esitetty kuvassa 1. Yksi syy puristusvoiman pienenä pitämiseksi voi olla mm. kappaleen mahdollinen epämuodostuminen. Jos kappaleeseen kohdistuva voima puristuksessa on pidettävä mahdollisimman pienenä, ratkaisuna voidaan mahdollisesti käyttää kappaleen muodon mukaista tarrainta. Tällainen tarrain ei kohdistu voimaa kappaleeseen, vaan antaa kappaleen olla levossa tuetussa ympäristössä. (Wolf et al. 2005)



Kuva 1. Havainnollistus kosketuspinnan alueen valitsemisesta

Kappaleen mittojen toleranssit eli sallitut vaihteluvälit täytyy myös huomioida. Luonnollisten kappaleiden toleranssit täytyy määrittää etukäteen. Esimerkiksi omenat esiintyvät vaihtelevin parametrein, joita täytyisi tutkia ennen poiminnan aloittamista. Puristusvoiman täytyy mukautua näiden luonnollisten kappaleiden parametrien vaihtelevuuksien mukaan. Koneäöllä voidaan ennen poimintavaihetta määrittää poimittavan kappaleen koko. Tästä huolimatta tarrain on suunniteltava, siten että kaikki mahdolliset variaatiot kappaleesta saadaan poimittua. (Wolf et al. 2005)

On tiedettävä ennen kappaleen käsittelyä mitkä sen vapausasteet ovat, jotta poiminta-tehtävä voidaan ratkaista. Vapausaste kuvaa kappaleen kykyä liikkua kolmiulotteisessa maailmassa. Vapausasteiksi lasketaan rotaatiot ja translaatiot. Rotaatio on kappaleen pyörimistä ja translaatio on kappaleen lineaarista liikkumista ilman rotaatiota. Esimerkiksi kolmiulotteisessa avaruudessa lentokone voi liikkua eteenpäin/taaksepäin, ylös/alas, vasemmalle/oikealle, sekä pyörimällä siten, että nokka nousee ylös/alas, siivet kääntyvät sivuille, sekä siten, että nokka siirtyy vasemmalle/oikealle. Kappaleiden eri variaatioiden ansiosta tarvitaan tarraimelta paljon joustavuutta. Kun puristetaan kappaletta, on kolme päävaihtoehtoa, miten puristaa sitä käyttäen pihkien omaista puristusta.

- Ulkoinen puristus (Pihdit asetetaan kappaleen ulkoreunoille)
- Sisäinen puristus (Pihdit asetetaan kappaleen sisäreunoille mm. porakaivon tai reiän sisälle)
- Välimallin puristus (Pihdin yksi osa on kappaleen ulkoreunalla ja toinen sisäreunalla)

Ulkoista puristusta on käytettävä, jos kappale on umpinainen tai siitä ei löydy sopivaa aukkoa tarraimelle. Sisäinen, sekä välimallin puristus ovat hyviä valintoja, kun kappaleet ovat tiiviisti poiminta-alueella. Tästä huolimatta sisäinen, sekä välimallin puristus ovat usein huonoja vaihtoehtoja, kun kappaleet ovat satunnaisessa orientaatioissa, sillä tarvittava aukko ei ole aina ulotettavissa. Magneetteja voidaan myös käyttää kappaleiden tarttumisen välineenä. Jos kappaleet ovat sekalaisesti järjestäytyneet magneettien käyttö voi olla hankalaa. Tällöin nostettaessa on mahdollista, että poimittavan kappaleen lisäksi tarttuu muitakin kappaleita, kuin vain haluttu kappale.

2.2 Structured bin-picking

Structured bin-picking -tehtäviä on paljon helpompi ratkaista ja tehokkaasti automatisoida kuin random bin-picking. Voidaan olla lähes kokonaan huomioimatta luvun 2.1 ja sen alalukujen esille tuomia haasteita ja ongelmakohtia. Kappaleiden ollessa ennalta määrätyissä paikoissa vähentää tarvetta konenäölle. Tällöin toleranssi kappaleen tunnetulle sijainnille on pyrittävä pitämään mahdollisimman hyvänä, sillä robotti luottaa sokeasti siihen, että kappale on määrätyssä paikassa. Voi olla, että tällainen järjestelmä käyttää konenäköä, mutta siihen riittää usein 2D-näkö ja analyysi.

Structured bin-picking on harvemmin käytössä oleva materiaalinkäsittelyn menetelmä. Robottikäden käyttö yksittäisten järjestäytyneiden kappaleiden siirtämiseen ja uudelleenlajitteluun on hidasta ja usein löytyy ratkaisuja, jolla saadaan työ tehtyä nopeammin. Tämän seurauksena esimerkkejä structured bin-pickingistä ei ole helposti löydettävissä.

Ajatuksen tasolla voitaisiin lavoja käsitellä automaattisella katonosturilla, jolla on työhön sopiva työkalu.

Kappaleita voidaan käsitellä nopeasti, jos niiden nosto- ja pudotuspaikat ovat lähekkäin, sekä silloin, kun kappaleita ei tarvitse uudelleen orientoida. Jos tämän lisäksi kappaleet ovat aina ennalta määrättyssä sijainnissa voidaan nopeuttaa merkittävästi poimintatyötä. Keskitytään kuitenkin tilanteisiin, jossa vaaditaan jonkinlaista konenäköä poiminnan suorittamiseksi.

Järjestellyissä tilanteissa voidaan hyödyntää 2D-näköä ja vähentää tarvittavaa laskenta-työtä nopeuttaen päätöksentekoa. Kappaleen siirrettävä matka, koko ja asettamistarkkuus vaikuttavat siihen, kuinka paljon aikaa kuluu poimintatyöhön. Jos kappale on pieni ja kuljetettava matka on lyhyt, voidaan saada aikaiseksi monta sataa poimintaa minuutissa. Bastions Solutions on yritys, joka on kehittänyt laitteiston, jolla kuljetushihnalla liikkuvat kappaleet saadaan siirrettyä hihnalta pois. Yrityksen mukaan laite kykenee tekemään 300 poimi ja siirrä -tehtävää minuutissa. Tämä on merkittävästi nopeampaa, kuin minkään vastaavanlaisen laitteen kyky suorittaa satunnaisesti orientoitujen kappaleiden poimintatyötä.

Kappaleiden ollessa paljon suurempia, kestää poiminnassa merkittävästi pidempään. Esimerkiksi autojen komponenttien siirtämisessä voi kestää monta kymmentä sekuntia, varsinkin, jos kappaleen paikoilleen asettamisen täytyy olla hyvin tarkkaa. Pickit3D on kehittänyt juuri tähän tarkoitukseen konenäköä yhteistyössä mm. ABB robottien kanssa ja se kykenee käsittelemään viidestä viiteentoista kappaletta minuutissa.

3. BIN-PICKING HAASTEET TEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa tarkastellaan, miten teollisuusyrittäminen on hyödyntänyt bin-picking teknologiaa ja pohditaan, miten sitä haluttaisiin jatkossa käyttää. Bin-pickingin on moderni ratkaisu yksinkertaisten poimintatöiden vähentämiseen ihmisiltä. Vaikkakin poimintatöihin liittyviin ongelmiin on alettu saamaan ratkaisuja, nämä ratkaisut ovat vielä hyvin kalliita ja vaativat usein niiden käyttöä ja asennusta varten oman ammattihenkilökuntansa. Esimerkki hinnasta ja käyttöönotosta löytyy mm. Scape Technologies Ltd:stä. He myyvät sensori-, tarttija- ja ohjelmistoyhdistelmiä, jotka toimivat mm. ABB robottien kanssa. Paketeista pienimmät maksavat noin 10 000 euroa tämän työn kirjoittamisen aikaan. Tämä yhdistettynä ABB halvempiin robotteihin osoittaa, että yksittäisen robotin käyttöönotto ei ole pieni sijoitus. Ei ole siis yllättävää, että nämä materiaalikäsitteilyn työkalut eivät ole toistaiseksi näkyvämmässä roolissa teollisuudessa.

Bin-picking teknologian yleistäminen vaatii aikaa, sillä ratkaisut tämänhetkisiin ongelmiin vaativat hyvin ammattitaitoista osaamista. Teknologian käyttöönotto ei ole massatuotettavissa vaihtelevien tarpeiden ansiosta. Jokainen käyttäjä kohtaa erilaisia ongelmia, joita ei toistaiseksi pystytä ratkaisemaan yhdellä kokonaan kattavalla systeemillä. Tarraimen tai konenäön valinnassa voi olla vaihtelevuuksia sovelluksista riippuen.

Poimintatöitä automatisoidessa päätavoitteet ovat ihmistyövoiman tarpeen ja tuotantokustannusten vähentäminen, sekä materiaalien käsittelynopeuden parantaminen. Materiaalikäsitteily automatisointi on tärkeä osa tuotantoa, sillä se hyödyntää tuotteiden elinkaarta ja parantaa tuottavuutta. Materiaalikäsitteilyn automatisointi auttaa myös tekemään tuotannosta joustavampaa (Choe et al. 2015). FMS eli flexible manufacturing system on systeemi, jossa tuotantotarpeita voidaan muuttaa tarpeen mukaan nopeasti. Monet yritykset pyrkivät parantamaan ajatteluaan tämän suhteen. Tämä johtuu osittain siitä, että markkinoissa ja tuotteen eräkoossa tapahtuu paljon muutoksia, joihin pitää pystyä mukautumaan (Schüppstuhl et al. 2022, s.275–279). Tämänkaltaisen systeemin rakentaminen on hyvin toteutettavissa, kun rakennetaan järjestelmä alusta asti sen mukaiseksi. Valmiin järjestelmän muuttaminen vaatii paljon aikaa ja resursseja, sekä pysäyttää tuotantoa aiheuttaen suuria kustannuksia.

Teollisuuden automatisointi on sijoitus, jonka tehtävänä on tehdä prosessista parempi, nopeampi ja laadukkaampi. Kehityksestä vastuussa oleva päällikkö voi pitää itsestään selvänä kehityksen tuomia hyötyjä ja, että se on varmasti tuottava sijoitus. Tästä huolimatta on tärkeä pystyä osoittamaan laskentatoimen avulla, miten tuottavuus kasvaisi hankkeen myötä. Hankkeen käyttöönoton tuomia hyötyjä on vaikea ennakoida tarkasti

ennen käyttöönottoa. Tuotannon tuottavuuden tutkiminen täytyy tutkia perustavanlaatuisesti käyttäen empiiristä tutkimusta.

Vanhentuneet laitteistot ovat usein rajoittavia tekijöitä yrityksen kyvyssä vastata liike- maailmassa tapahtuviin muutoksiin. Nämä laitteet eivät usein ole tarpeeksi joustavia tai tuottavia, ja siten eivät kykene sopeutumaan uusiin haasteisiin. Tähän tarpeeseen robotiikka on ollut hyvä vastaus. Bin-picking on robotiikan osa-alue, joka pystyy helposti mu- kautumaan uusiin haasteisiin. Uusien kappaleiden käsittelyä varten voidaan välttää lait- teistojen kokonaista vaihtamista ja voidaan mahdollisesti tarrain ja sensorit muuttaa so- piviksi. Tämä pienentää häiriöaikaa tuotannossa ja mahdollistaa paremman joustavuu- den tuotannolle. Operaation tehokkuuden kehitys auttaa laskemaan kustannuksia ja pa- rantamaan tuottoa. Tämän seurauksena yritykset ovat alkaneet kiinnittämään huomiota systeemeihinsä etsien tapoja, jolla parantaa luotettavuutta.

Bin-picking on erityisen hyvä tuotantolinjojen eri vaiheissa materiaalinkäsittelyssä. Esi- merkkejä sen käytöstä yrityksissä ovat mm. GKN:n vetoakseleiden purku laatikosta lin- jastolle, sekä peltilevyjen siirtäminen työstökoneille. Tässä tapauksessa robotti on omis- tettu yhteen tarkoitukseen ja poistanut tarpeen työntekijöille vuoronsa päätteeksi lajitella peltilevyjä.

4. ERILAISIA KÄYTTÖ- JA RATKAISU-MENETELMIÄ

Tarkastellaan kahta yritystä ja niiden tapoja ratkaista poimintatöihin liittyviä haasteita. Luvussa käsiteltävät yritykset pääsääntöisesti myyvät valmiita järjestelmiä asiakkaitensa tarpeiden mukaan, joten tuotteet, joita tässä luvussa esitellään ovat vain yksittäisiä ratkaisuja spesifiin ongelmaan.

Yritykset, joita tässä esitellään ovat ABB ja Pickit 3D. Nämä yritykset keskittyvät hiukan eri robotiikan osa-alueisiin. ABB:n robotiikka pääsääntöisesti keskittyy robotin käsivarren tuotantoon ja siihen liittyvien ohjausohjelmistojen myyntiin ja kehittämiseen. Pickit3D keskittyy puolestaan konenäköön ja tekoälyyn liittyvien ratkaisujen kehittämiseen. Yhdessä esiteltävät tuotteet muodostavat poimintajärjestelmän.

On myös monia muita yrityksiä, joilla on ratkaisuja robottien poimintatöihin liittyviin ongelmiin mm. Fanuc ja Scape Technologies. Moni näistä yrityksistä käyttää hyvin samantlaisia menetelmiä ongelmien ratkaisemiseksi. Konenäköön, poimintapisteen ja reitin välittämiseen liittyvien ohjelmien algoritmit saattavat vaihdella reilusti yrityksestä toiseen ja siten tuottavat erilaisia tuloksia. Kukin algoritmin voi toimia tiettyjen asiakkaiden tuotteelle ja käyttökohteelle paremmin kuin toinen aikarajoitteiden tai tuotteen muodon vaikeuden takia.

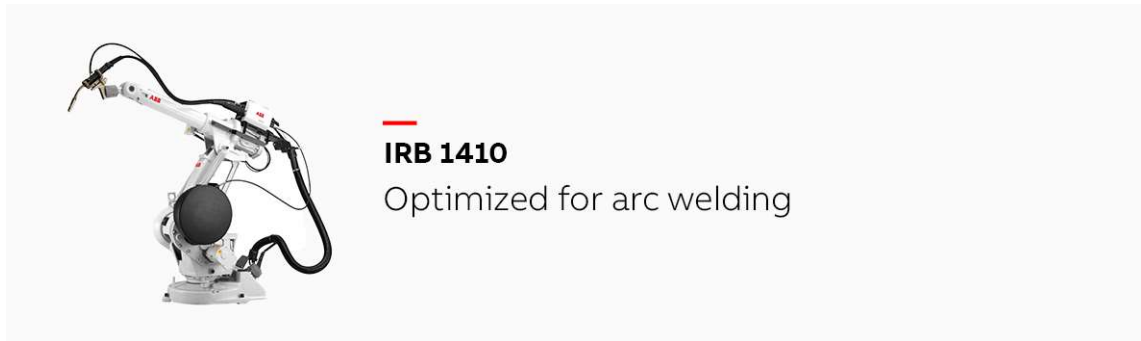
4.1 ABB:n robottikäsivarret

Tarkastellaan kahta ABB:n robottikättä IRB 1410, sekä IRB 6700. Nämä robotit ovat tarkoitettuja erilaisiin tehtäviin fyysisten rajoitteiden takia. IRB 1410:n kantokyky on 5 kg ja sen poimintaetäisyys on 1.44 metriä. IRB 6700 kantokyky on tarkoitettu 150–300 kg kuormien kantamiseen ja sen poimintaetäisyys on 2.60–3.20 metriä.

IRB 1410 on selkeästi pienen kokonsa ja kantokykynsä takia tarkoitettu poimintatöiden suorittamiseen, jossa kappaleet ovat kooltansa pieniä. Tuote-esittelyssä tämän myyntipisteet ovat sen kyky hitsata tarkasti ja tehdä tarkkoja liikkeitä. Sen pieni koko ja pitkä poimintaetäisyys helpottavat työskentelyä. Voidaan kuvitella tämän tuotteen olevan käytössä mm. pienten metalli- tai muoviosien poimimista varten.

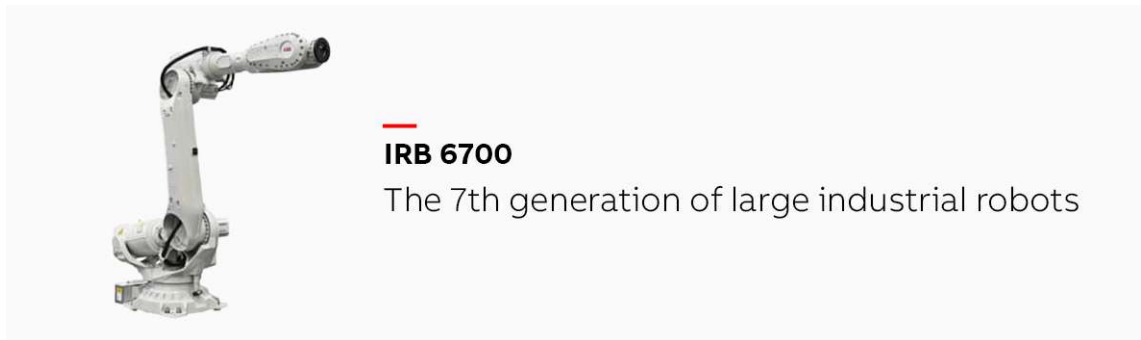
IRB 1410 on otettu käyttöön CIMC rahtialusten säiliöiden hitsaamisen automatisoinnissa. Tarkat liikkeet ja helposti määriteltävät liikeradat tekevät tuotteesta loistavan va-

linnan työn suorittamiselle. Voidaan havaita laitteen ketteryydestä, että siihen yhdistämällä hyvä konenäkö- ja tarttumaratkaisun saataisiin hyvin todennäköisesti hyvä ratkaisu pienten kappaleiden poimintatyölle.



Kuva 2. IRB 1410 robotti (ABB 2022)

IRB 6700 on hyvin suuri ja laite itsessään painaa versiosta riippuen noin 1300 kg. Painon ja poimintaetäisyyden takia laite vaatii turvallisuussyistä reilusti tilaa ja varotoimia, jotta sen ympäristössä ei tapahdu muutoksia laitteen ollessa käynnissä. Tätä laitetta puolestaan yritys mainostaa sen kyvystä suorittaa pistehitsausta ja käsitellä työstettäviä kappaleita.



Kuva 3. IRB 6700 robotti (ABB 2022a)

Kummallakin tuotteella on kuusi vapausastetta ja niiden vapausasteiden mahdollistajat ovat toteutettu luotettavasti antaen laitteelle kyvyn liikkua hyvin tarkasti. ABB:n robotteja käyttävät monia suuria yrityksiä mm. General Electric ja Blue Origin.

4.2 Pickit3D 3D näköjärjestelmä

Pickit3D:n tuotteet tuovat ratkaisun kappaleiden havainnointiin ja poimimiseen liittyviin tehtäviin. Tuotteissa on vaihtelevia kameran laatuja ja kuvausaluekokoja. Tarkasteltavien kappaleiden koon perusteella täytyy kuvausalue muuttua aina sopivammaksi. Mitä laajempi kuvausalue sen heikompi kuvanlaatu saadaan aikaiseksi.

Tarkastellaan Pickit3D:n tuotetta M-HD. Tuotteeseen sisältyy kamera, prosessointiyksikkö ja kalibroituväkalut. Tärkeimmät spesifikaatiot laitteessa ovat sen kuvausaika, joka on noin 200-1000ms, resoluutio 1920x1080, 3D-kameran tarkkuus 0.15–0.8 mm ja kameran paino 2 kg. Kyseistä sensoria on tarkoitettu asennettavaksi työpinnan yläpuolelle irrallaan robotin käsivarresta. Tuote tunnistaa kappaleen orientaation ennen poimintavaihetta. Orientaation uudelleen konfigurointi voidaan suorittaa välitasolla, ennen kappaleen lopulliseen sijaintiin siirtämistä. M-HD:tä on sovellettu mm. Stantraek yrityksen metallilevyjen tuotannossa. Stantraek on kehunut tuotetta sen helposta asennuttavuudesta, sekä ystävällisestä käyttöliittymästä. Pickit3D:n M-HD poisti tarpeen lajitella metallilevyt spesifiin orientaatioon ennen jatkokäsittelyä.



Kuva 4. M-HD sensori, prosessointiyksikkö ja kalibroituväkalut (Pickit3D 2022)

Pickit3D:n tuotteet ovat hyvin helppoja asentaa, ja käyttöönoton keston ollessa hyvin pieni voi yritys säästyä turhilta tuotannon pysähtymisen aiheuttamilta kuluilta. Stantraek ilmoitti asennus-, ja käyttöönottovaiheen kestäneen vain noin puolitoista tuntia. Tämä on hyvä esimerkki siitä, että tämänkaltaisten ratkaisujen ilmentyminen tuotannossa voi olla hyvin pikaista sen hyödyllisyyden ollessa riittävän suuri.

5. ROBOTIIKAN TULEVAISUUS

Robottiikan läsnäolo teollisuustuotannossa on yleistymässä kiihtyvään tahtiin. Uusien kehitysten ansiosta robotiikan hyödyt ovat selkeämpiä. Robottien käyttöönotto on helpottunut ja sovelluskohteiden määrä on kasvanut merkittävästi. Jatkossa robotit tulevat suorittamaan kaikki yksinkertaiset materiaalinkäsittelytehtävät.

Bin-pickingin kaikki osa-alueet ovat vielä kehitettävissä. Tarraimia voidaan yhä kehittää, parantaen mm. puristusliikkeen mahdollisia puristuskombinaatioita. Jos otetaan esimerkiksi ihmisen käsi, voidaan sopeuttaa käden muoto nostettavan kappaleen muodon mukaan. Tietenkin robotiikassa haasteena on näin monimutkaisen liikkeen mahdollistaminen, sekä poimintapisteen ja asennon valitseminen. Konenäössä voidaan kuvaustarkkuutta parantaa, sekä parantaa kappaleen kokonaisvaltaisen kuvan luomisen tarkastelemista. Algoritmeja, sekä laskentatehokkuutta voidaan parantaa nopeuttaen tiedonkäsittelyä ja siten robotin päätöksentekokykyä.

Robottiikkaa hyödyntävien yritysten määrä on kasvanut siten, että tarve niiden jatkuvalle kehitykselle on myös kasvanut. Näin ollen robotiikkaan kehitykselle on kiihtyvän kasvun trendi. Käsitellään muutamia kehityksen kohteita robotiikassa.

5.1 Kehitykset konenäössä

Konenäön kehitys vaatii laskennallisen tehon paranemisen. Paremman laskentatehokkuuden mukana voidaan myös parantaa optiikkaa. MOSFET eli metal-oxide-semiconductor field-effect transistor on transistori, jonka koko on pienentynyt tasaisesti teknologian kehityksen myötä. Mitä pienemmäksi transistori saadaan, voidaan laskentatehokkuutta parantaa. Tulevaisuudelta ei voida odottaa näiden transistoreiden pienentyvän äärettömiin, joten voidaan todeta, että fyysisen laskentatoimen lisäksi on tapahduttava joitain muutoksia kehityksen jatkamiseksi.

Kvanttilaskenta on yksi uudistus, joka saattaisi mahdollistaa konenäön edistyksiä. Sen avulla voidaan parantaa laskentatehokkuutta sekä avata ovia uusille sovelluksille. Tämä teknologia on hyvin varhaisessa vaiheessa ja sen käyttöönottoon voi kestää useita vuosikymmeniä.

Optiikkaan voidaan asentaa erinäisiä filttäreitä parantaen kuvaustarkkuutta, sekä vähentäen ulkopuolisia häiriötä. Oikeiden filttäreiden, sekä linssien valitseminen parantaisi merkittävästi tapauskohtaisten kappaleiden tunnistustöitä. Jatkossa voidaan kehittää yhä parempia linsejä, sekä filttäreitä, jotka toimivat yhä useammassa käyttökohteessa.

5.2 Ohjelmistojen tehokkuus

Ohjelmistojen toiminta riippuu fyysisestä laitteistosta, jossa niiden operaatiot voidaan suorittaa. Nämä laitteet ovat erilaisia prosessointiyksiköitä. Prosessointiyksikölle on määrättävissä teoreettinen maksimisuorituskyky perustuen fysiikan lakeihin. Tästä seuraa, että pitkällä tähtäimellä ohjelmistossa on tapahduttava paljon muutoksia, jotta voidaan parantaa systeemiä.

Ohjelmistoista puhuttaen tarkoitetaan immateriaalista toimintakykyä tietokoneen sisällä. Esimerkiksi käyttöjärjestelmää ja muita sen päälle rakennettuja sovelluksia sanotaan ohjelmistoksi. Windows, Linux, Android ja IOS ovat esimerkkejä käyttöjärjestelmistä. Muita ohjelmistoja ovat mm. Microsoft Word ja Zoom. Näitä ohjelmistoja parannetaan ja päivitetään useasti lisäten sekä parantaen toiminnallisuuksia. Samaa voidaan tehdä robotiikkaan liittyville ohjelmistoille.

Ohjelmiston kyky käsitellä informaatiota on aina parannettavissa. Kehitysvaiheessa voidaan paremmilla ohjelmointimenetelmillä aikaansaada suuria muutoksia ohjelmiston ajoaikaan. Jos ohjelmisto on kirjoitettu täydellisellä tavalla, voidaan myös pohtia kirjoituskielen kykyä hyödyntää tietokoneen tarjoamia laskentaresursseja. Jälkimmäistä tilannetta on hyvin työlästä lähteä korjaamaan. Käyttöjärjestelmien, sekä ohjelmointikielten uudelleenkehittäminen vaatii paljon aikaa ja on hyvin haastavaa suorittaa hyvin.

Jatkossa voidaan odottaa kehitysten tapahtuvan fyysisen laitteiston laskentakyvyssä tai uusien algoritmien luomisessa. Kummassakin vaihtoehdossa on vielä paljon, mitä voidaan kehittää. Työn kirjoittamisen aikaan sähköisten laitteistojen prosessointiyksiköiden tuotanto on vaikeutunut puolijohteiden puutteen vuoksi. Tämä voi hidastaa fyysisten laitteiden kehitystä lyhyellä tähtäimellä.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää, mitä tarvitaan, jotta voidaan suorittaa bin-pickingiä. Voidaan todeta, että bin-pickingin onnistumiseen vaaditaan monien teknisten osa-alueiden yhteistyötä. Konenäön, arraimen, sekä robotin itsensä suunnittelussa täytyy monien ehtojen täytyä, jotta poimittavaa kappaletta saadaan nostettua, siirrettyä, sekä asetettua haluttuun paikkaan.

Bin-picking järjestelmien kehitys on suuntautunut toistaiseksi hyvin spesifien materiaalien poimintatöitä varten. Käyttökohteena ovat pienten metallikappaleiden poimintatyöt teollisuudessa. Markkinointi on siten tehty herättämään tiettyjen yritysten huomiota. Menestystarinat näiden ratkaisujen tekijöillä keskittyvät tuomaan esille teknologian käyttöönoton yhteensopivuutta olemassa olevien teknologioiden kanssa.

Teknologian käyttöönotto vaatii merkittävää kehitystä. Toistaiseksi bin-picking hankkeet ovat yrityksille merkittävä sijoitus. Näiden ratkaisujen taloudelliset vaikutukset teollisuuden ovat liiketoiminnalle kuitenkin myönteisiä, vähentäen henkilöstön tarvetta, sekä parantaen tuotannon jatkuvuutta. Voidaan odottaa tulevaisuudesta teknologian käyttöönoton lisääntyvän laitteiston hinnan alenemisen tai sovelluskohteiden lisääntymisen myötä.

Yleisimpiä kiinnitysmenetelmiä ovat imuvoimaa hyödyntävä kiinnitys sekä ulkoinen kiinnitys. Mikään yksittäinen ratkaisu ei sovi kaikkiin poimintatöihin vaihtelevien kappaleiden materiaalien ominaisuuksien takia. Paino, pinnankarheus ja laatu sekä muoto vaikuttavat siihen, miten kappaletta voidaan onnistuneesti kuljettaa. Tarrainten suunnittelu on tehtävä aina tapauskohtaisesti ja yleisiä ratkaisuja on vaikea luoda.

Se miten kone osaa tulkita ympäristöään, sekä työstettävää pintaa suoritetaan konenäöllä. Tätä prosessia on vaikea toteuttaa hyvin. Prosessointiteho vaikuttaa poimintatyön kestoon. Työn kestoon vaikuttaa myös algoritmin tehokkuus. Kummatkin näistä tekijöistä ovat kehitystyön kohteita ja tulevat paranemaan tulevaisuudessa. Konenäkö useasti vaatii ideaaleja olosuhteita toimiakseen kunnolla. Valaistuksen valon intensiteetillä, sekä sen aallonpituudella on merkitystä siihen, kuinka hyvin konenäkö pystyy näkemään tarkasteltavaa kappaletta. Kappaleen materiaalilla on paljon vaikutusta siihen, miten valo heijastuu optikkaan. Voi syntyä varjostettuja kohtia kappaleesta, minkä seurauksena laitteisto voi väärin tulkita kappaleen muodon.

Työssä on paljon omaa pohdintaa ja analyysiä kerätyn tiedon pohjalta. Omien päätelmien, sekä ajatusten oikeellisuudesta voidaan varmasti olla montaa mieltä. Ei ole kuitenkaan selvää aina, mikä tuottaa parhaita tuloksia, kun käsitellään näin laajaa aihetta. Työssä ei syvennytty tekniseen puoleen eli poimintatyöhön liittyvien osa-alueiden toteutukseen, vaan tarkasteltiin pintapuoleisesti, mikä niiden funktio on koko systeemin toiminnassa.

LÄHTEET

- [1] Roberts L.G. (1963). Machine Perception of Three-Dimensional Solids. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology
- [2] Kim, K., Kim, Jo., Kang, S., Kim, Ja. & Lee, J. (2012). Vision-Based Bin Picking System for Industrial Robotics Applications, 2012 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)
<https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=6463057>
- [3] Buchholz, D. (2016). Bin-Picking New Approaches for a Classical Problem, Springer International Publishing
<https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-319-26500-1>
- [4] Moosmann, M., Spenrath, F., Kleeberger, K., Khalid, U. K., Mönnig, M., Rosport, J. & Bormann, R. (2020). Increasing the Robustness of Random Bin Picking by Avoiding Grasps of Entangled Workpieces, 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020
<https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S2212827120307125>
- [5] Schyja, A. & Kuhlenkötter, B. (2015). Realistic Simulation of Industrial Bin-Picking Systems, Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications
<https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=7081137>
- [6] Oh, JK., Baek, K., Kim, D. & Lee, S. (2009). Development of Structured Light Based Bin-Picking System Using Primitive Models, Springer Berlin Heidelberg
https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/chapter/10.1007/978-3-642-14116-4_12#citeas
- [7] Lee, J., Kim, TW., Kang, S., Kim, K., Kim, J. & Kim, J. B. (2014). Bin picking for the objects of non-Lambertian reflectance without using an explicit object model, The 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2014)
<https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7057466>
- [8] Pochyly, A., Kubela, T., Singule, V. & Čihák, P. (2017) Robotic bin-picking system based on a revolving vision system, 2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)
<https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8123228>
- [9] Vijayalakshmi S. R. & Muruganand, S. (2020) Embedded vision an introduction, David Pallai
https://app-knovel-com.libproxy.tuni.fi/kn/resources/kpEVAI0002/toc?b-q=Machine%20vision&include_synonyms=no&q=Machine%20vision&sort_on=default
- [10] Siciliano, B. (2016). Springer handbook of robotics, Springer International Publishing
<https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-319-32552-1>

- [11] LU, Q. & LI, Z. (2017). Design of Loading and Unloading Manipulator End Effector for Shaft Parts, 2017 International Conference on Industrial Informatics
<https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8328612>
- [12] Musgrave, Larsen, Sgobba, Tomasso. (2009). *Safety Design for Space Systems*, Elsevier
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSDSS0005/safety-design-space-systems/safety-design-space-systems>
- [13] Lee, S., Suárez, R., & Choi, B. W. *Frontiers of Assembly and Manufacturing*, Berlin Heidelberg
<https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-642-14116-4>
- [14] <https://www.scapetechnologies.com/>
- [15] Choe, P., Tew, J. D. & Tong, S. (2015) Effect of cognitive automation in a material handling system on manufacturing flexibility, International Journal of Production Economics
<https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0925527315000304>
- [16] Schuppstuhl, T., Tracht, K. & Raatz, A. (2022) *Annal of Scientific Society for Assembly*, Springer
<https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007/978-3-030-74032-0>
- [17] Wolf, A., Steinmann, R. & Schunk, H (2005). *Grippers in motion*, Springer
- [18] ABB (2022). ABB verkkosivu. URL: <https://global.abb/> (viitattu 26.10.2022)
- [19] ABB (2022a). ABB verkkosivu. URL: <https://global.abb/> (viitattu 26.10.2022)
- [20] Pick-it (2022). Pick-it verkkosivu. URL: <https://www.pickit3d.com/> (viitattu 28.10.2022)