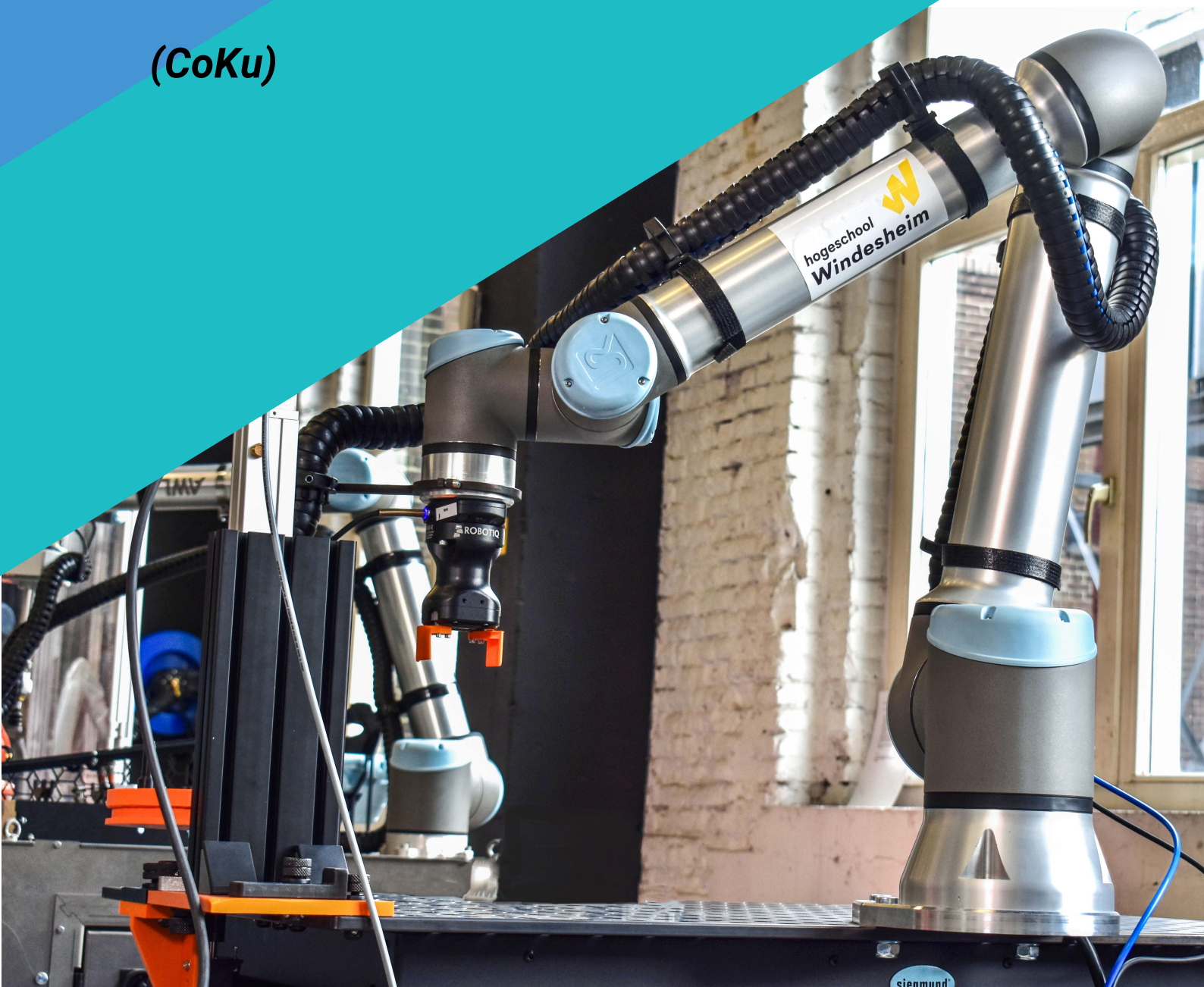


Digital Business & Society
Industriële Automatisering & Robotica

Eindrapportage Cobots in de Kunststofindustrie

(CoKu)



hogeschool **Windesheim**



Colofon

Titel:	Eindrapportage Cobots in de Kunststofindustrie (CoKu)
Publicatie nummer:	DBS-IAR-108636-2022
Datum:	15 december 2022
Auteurs:	Aart Schoonderbeek Mark Naves Bert-Jan Roeterdink
Subsidieverstrekker	Tech For Future - Centre of Expertise HTSM Oost
In samenwerking met:	Alligator Plastics Collins Aerospace (Dutch thermoplastisch Components) Dunlop Protective Footwear Fieldlab Industrial Robotics (FIR) / AWL Moba

Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door de programmalijn Industriële Automatisering & Robotica van het lectoraat Digital Business & Society, een praktijkgerichte onderzoeksgroep van Hogeschool Windesheim.

Voorwoord

Dit rapport bevat de inhoudelijke eindrapportage van de uitgevoerde werkzaamheden binnen het TechForFuture project ‘Cobots in de Kunststofindustrie’, afgekort ‘CoKu’. TechForFuture is een samenwerking tussen hogeschool Saxion en hogeschool Windesheim. Binnen TechForFuture wordt toegepast onderzoek gedaan, kennis ontwikkeld en worden (versnelde) innovaties gerealiseerd door een unieke samenwerking tussen hogescholen, universiteiten en bedrijven op het gebied van Hightech Systemen & Materialen (HTSM).

Dit project is mede mogelijk gemaakt door het lectoraat Kunststoftechnologie; voor de kennis en het netwerk in de kunststofindustrie, Perron038; de locatie waar het grootste deel van de onderzoeksactiviteiten zijn uitgevoerd, het Fieldlab Industrial Robotics; voor de inspirerende gesprekken en het meedenken, en de Federatie Nederlandse Rubber- en Kunststoftechnologie (NRK); voor hun hulp bij de totstandkoming van het project.

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van de onderzoekers van de onderzoeksgroep Industriële Automatisering & Robotica (IA&R) van hogeschool Windesheim. Hierbij zijn ook studenten en het bedrijfsbureau van diverse technische studies betrokken. De resultaten van het project zijn onder de aandacht gebracht van het bedrijfsleven door middel van diverse presentaties en publicaties. De projectdeelnemers zien terug op een leerzaam, inspirerend en succesvol project. Wij wensen u veel leesplezier toe!

Het projectteam,

Zwolle, december, 2022

Inhoudsopgave

1 Inleiding	5
1.1 Achtergrond	5
1.2 Cobots in de Kunststofindustrie	6
1.2.1 Massaproductie	6
1.2.2 High-mix low-volume productie	6
1.2.3 Inzet van cobots in de kunststofindustrie	6
1.3 Doelstellingen	7
2 De plek van cobots binnen huidige productie processen	8
2.1 Eigenschappen van een Collaboratief robot systeem	8
2.2 Economisch effectieve inzet van cobots	9
2.2.1 Automatisering van high mix - low volume productie processen	9
2.2.2 Transitie naar volautomatische automatisering	10
2.3 Voorbeeldcases: de plek van de cobot binnen huidige productieprocessen	10
2.3.1 Onderzoekscase: plaatsen van blanks in productpers - Projectpartner Collins Aerospace	11
2.3.2 Onderzoekscase: assemblage van afsluiters - Projectpartner Alligator plastics	13
3 Flexibele en multifunctionele tooling	16
3.1 Product handling van producten met vormvariatie of niet vormvaste producten	17
3.2 Smart gripper ontwerp met multifunctionele toepasbaarheid	17
3.3 Voorbeeldcases: Flexibele en multifunctionele tooling	20
3.3.1 Handling van flexibele en niet vormvast materiaal - Projectpartner Collins Aerospace	20
3.3.2 Plaatsen van zolen in laarzen - Projectpartner Dunlop	22
4 Integratie in (bestaande) systemen	26
4.1 Aanvoer van producten	26
4.2 Koppeling met bestaande systemen	33
4.3 Kwaliteitsinspectie	33
4.4 Voorbeeldcases: Integratie in (bestaande) systemen	34
4.4.1 Onderzoekscase: scheiden van aanspuittak en kwaliteitsinspectie - Projectpartner Moba	34
5 Conclusie en samenvatting	39

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

Een cobot (afgeleid van collaborative robot) is een robot die door middel van de ingebouwde veiligheidsmaatregelen samen kan werken met mensen in een werkomgeving. Dit in tegenstelling tot “traditionele” robots die vanwege veiligheidseisen in een afgeschermd omgeving moeten opereren. Wereldwijd wordt verwacht dat over 10 jaar het aandeel cobots in de robotmarkt ongeveer een derde zal bedragen [1]. Ook in de Nederlandse industrie is de cobot bezig met een opmars. Omdat de benodigde ruimte kleiner is dan voor de meeste traditionele robots, is het een compacte oplossing die ook geschikt is op plekken waar weinig ruimte is. Doordat ze laag in gewicht zijn en niet in een afgeschermd kooi geplaatst hoeven te worden, kunnen ze ook verplaatst worden waardoor ze op verschillende plaatsen inzetbaar zijn. Verder zijn cobots in vergelijking met traditionele robots eenvoudiger te programmeren en ligt de prijs van implementatie typisch lager, met name door het ontbreken van de afscherming. Dit maakt de cobot een interessante tool voor automatiserings toepassingen in de industrie.

De cobot is een technologische ontwikkeling die aansluit bij de behoeftes vanuit de Nederlandse industrie. Nederland is een innovatief land, met een unieke traditie van samenwerking tussen bedrijfsleven, kennisinstellingen en overheid. Hierdoor heeft de Nederlandse industrie een sterke exportpositie en loopt zij internationaal voorop bij het ontwikkelen van technologie en nieuwe industrie. Echter, door automatisering en digitalisering veranderen internationale posities, en dat vraagt om actie. De ontwikkeling van nieuwe ICT en productietechnologie verandert de industrie, zowel grootbedrijf als mkb, radicaal. Vaak wordt verondersteld dat automatisering ten koste gaat van de werkgelegenheid, maar het tegendeel is vaak waar. Zo zorgt automatisering voor een betere concurrentie positie en leidt het dan zelfs tot een groei van het aantal banen. Voorlopers in automatisering en digitalisering van de industrie is dus cruciaal voor de werkgelegenheid, toekomstige economische groei en een duurzame industrie [2, 3].

Om ook in de toekomst internationaal concurrerend te blijven, moet het bedrijfsleven, en dat geldt zeker voor het mkb, voluit mee in deze digitaliserings- en automatiseringstrend [4]. Ze moeten blijven innoveren en de kosten onder controle houden. Hiervoor zullen de bedrijven intensief samen moeten werken met diverse partijen. Veel bedrijven hebben namelijk zelf niet de expertise in huis om de nodige stappen te zetten. Wanneer het gaat om het toepassen van bestaande en bewezen technologie, kunnen toeleveranciers zoals machinebouwers hierin voorzien. Vaak gaat het echter om het automatiseren, robotiseren en digitaliseren van specifieke processen, waarvoor gezamenlijk met partners kennis ontwikkeld moet worden om tot het gewenste resultaat te komen.

Als onderdeel van de Nederlandse industrie, heeft ook de kunststofindustrie een sterke behoefte aan flexibele en slimme automatisering om ook in de toekomst rendabel en levensvatbaar te blijven. Enerzijds voorziet de Nederlandse kunststofindustrie in geautomatiseerde massaproductie. Deze massaproductie is in Nederland alleen rendabel door de reeds aanwezige hoge automatiseringsgraad. Echter zijn er daarnaast de nodige bedrijven in de kunststofindustrie die juist sterk zijn in flexibiliteit (custom made producten) of hoogwaardige kunststofproducten, die vaak getypeerd worden door kleine series of enkelstuks fabricage. Voor deze processen wordt tot dusver in beperkte mate automatisering ingezet, en biedt de cobot een mogelijke of gedeeltelijke oplossing voor verdere automatisering.

1.2 Cobots in de Kunststoffindustrie

1.2.1 Massaproductie

Een deel van de kunststofindustrie in Nederland beslaat de massaproductie van kunststof componenten. Om in dit gebied rendabel en concurrerend te zijn is een hoge graad van automatisering noodzakelijk. Een belangrijk aspect bij massa productie zijn de grote productie aantallen, waardoor de cyclustijd van de automatiseringsoplossing één van de belangrijkste speerpunten is. Voor deze toepassingen blijkt de cobot vaak niet het meest geschikte platform omdat de cobot door de ingebouwde veiligheidsmaatregelen beperkt is in de versnellingen en snelheden die behaald kunnen worden. Zo is de maximaal toegestane (veilige) snelheidslimiet voor een cobot typisch $\ll 1$ m/s, afhankelijk van onder meer de effectieve massa van de bewegende delen van de cobot, de end of arm tooling en de locatie op het lichaam waar mogelijk contact kan plaatsvinden [5]. Dit in tegenstelling tot de traditionele robots die snelheden tot wel 20 m/s kunnen behalen voor de grotere robots [6]. Daarnaast is bij massaproductie door de grote productie aantallen van hetzelfde product een volledige automatisering enerzijds doelmatig en effectief in te zetten, en kan anderzijds de hoge investering die dit vergt verdeeld worden over een groot aantal producten. Om deze reden is de automatisering voor massa productie vaak al in een ver gevorderd stadium en is er op deze plek meestal geen of slechts een beperkte behoefte aan automatisering door middel van cobots.

1.2.2 High-mix low-volume productie

Naast massaproductie zijn in Nederland veel bedrijven die juist sterk zijn in flexibiliteit (custom made) en de productie van kleinere series. Vanwege de van oorsprong kleinere noodzaak en grote complexiteit van automatisering voor dit soort processen is de graad van automatisering hier vaak nog gering. Echter, om in de toekomst concurrerend en rendabel te blijven, wordt het automatiseringsvraagstuk voor dit soort processen steeds relevanter.

Juist voor deze categorie van productieprocessen, met relatief kleine series, lange cyclustijd en grotere productvariatie, biedt de cobot nieuwe mogelijkheden met betrekking tot automatisering. Ten eerste bieden de relatief lage maximale snelheden van de cobot door de lange cyclus-tijd geen belemmering in het productieproces. Ten tweede is de cobot flexibeler en eenvoudiger in te zetten in de productielijn doordat deze naast, en samen met, medewerkers kan opereren en doordat er geen afgeschermd omgeving noodzakelijk is. Ook vanuit een economisch perspectief geeft dit vaak lagere investeringen en een kortere terugverdientijd. Daarnaast heeft een cobot in verband met de geïntegreerde veiligheidssystemen kracht-terugkoppeling op de tool die gebruikt wordt om de uitgeoefende krachten te begrenzen. Deze kracht-terugkoppeling kan tevens gebruikt worden om het automatiseringsproces te sturen, wat nieuwe mogelijkheden biedt voor complexe automatiseringstaken.

1.2.3 Inzet van cobots in de kunststofindustrie

De kunststofindustrie heeft haar eigen uitdagingen wanneer het om automatisering gaat. Bestaande automatiseringsoplossingen, voor metalen producten, voldoen niet altijd. In vergelijking met staal, zijn kunststof producten over het algemeen relatief licht en complex van vorm. Belangrijker is nog dat diverse kunststof producten makkelijk vervormen en minder stijf zijn dan

producten van metalen. Daarnaast speelt de makkelijke vervormbaarheid ook bij de stijvere kunststoffen voor diverse productieprocessen een rol. Denk bijvoorbeeld aan een veel toegepast maakproces zoals spuitgieten, waarbij de producten nog warm uit de spuitgietmatrijs komen en gelijk verder verwerkt moeten worden. Te grote krachten uitoefenen op deze warme en nog zachte producten, levert blijvende en ongewenste vervormingen op.

Door al deze eigenschappen zijn cobots geschikt voor de productie van kleinere en middelgrote series in de kunststofindustrie. Vies, saai, repetitief en gevaarlijk werk kan door de cobot uitgevoerd worden. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het verwijderen van aanspuittakken na het spuitgieten of het plaatsen van plaatmateriaal in een persmachine voor het 3D vormen van thermoplastische composieten. Personele bezetting wordt daardoor vrijgespeeld om de flexibele productie te faciliteren, terwijl de cobot het routinewerk doet. Het is daarnaast van belang dat automatisering snel aangepast kan worden aan nieuwe productieomstandigheden en producten met lage opstartkosten. Het gebruik van een cobot voorziet hierin. Een cobot kan relatief eenvoudig verplaatst worden en bijvoorbeeld de ene dag producten inpakken terwijl hij de volgende dag ingezet wordt voor kwaliteitscontrole.

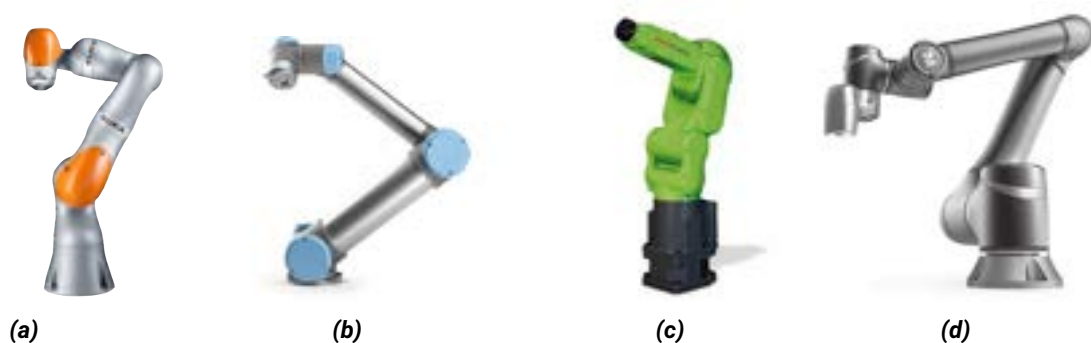
1.3 Doelstellingen

Het doel van dit project is om voor de fabricage van middelgrote en kleine series kennis te ontwikkelen rondom de inzet van cobots, door voor een aantal toepassingen generieke methoden en handreikingen te ontwikkelen die door een breed scala aan bedrijven in de kunststofindustrie ingezet kunnen worden. In dit project is de te onderzoeken vraag: **hoe kunnen cobots in de kunststofindustrie ingezet worden om tot een hogere efficiency-graad van high-mix low-volume productieprocessen te komen door verdere automatisering.**

In hoofdstuk 2 wordt verder ingegaan op dit vraagstuk en wordt de mogelijke plek van cobots binnen huidige productieprocessen geanalyseerd. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de uitdaging met betrekking tot (het ontwerp van) tooling voor cobots behandeld. Tot slot wordt in hoofdstuk 4 de integratie van cobots in (bestaande) productielijnen besproken.

2. De plek van cobots binnen huidige productie processen

De traditionele robot is al tientallen jaren een bekend begrip in de industrie, met de afgelopen jaren circa 400.000 verkochte exemplaren per jaar [7]. Dit in tegenstelling tot de relatief nieuwe ontwikkeling van de cobot die is ontstaan in de 21^e eeuw, en welke technologie nog steeds volop in ontwikkeling is. Ondanks de grote overeenkomsten tussen een “traditionele” robot en een cobot, is de plek van de cobot binnen productieprocessen vaak anders dan die van de robot. Om dit in kaart te brengen, wordt eerst ingegaan op de typische kenmerken en eigenschappen van de cobot. Een overzicht van een aantal veel voorkomende cobot systemen is weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: De (a) KUKA LBR iiwa, (b) UR5e, (c) FANUC CR-4iA en de (d) TM-14 cobot systeem

2.1 Eigenschappen van een Collaboratief robot systeem

Een belangrijk kenmerk van een collaboratief robot systeem is dat operators kunnen werken in dichte nabijheid van het systeem terwijl de actuators van de robot actief zijn. Daarnaast kan (en mag) fysiek contact tussen de operator en robot voorkomen. Om de veiligheid van de operator ten allen tijde te kunnen garanderen, moet dit systeem aan specifieke eisen voldoen. Deze eisen zijn opgesteld in de ISO/TS15066 technische specificatie [5]. Opgemerkt moet worden dat deze vereisten niet alleen betrekking hebben op de robot zelf, maar ook op de aangesloten end of arm tooling, randapparatuur en alle overige componenten die interactie hebben met het systeem.

Om de veiligheid van de operator te kunnen garanderen voor robot systemen (zowel cobots als traditionele robots) waarbij de workspace van de robot en operator elkaar kunnen overlappen, kunnen er verschillende methodes toegepast worden. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat de maximale krachten (effectieve contact druk) die uitgeoefend kunnen worden op de operator begrensd zijn tot een veilig niveau. Deze methodes kunnen bestaan uit (een combinatie van) een veilige bewaakte stop, handbediende besturing, het monitoren en behouden van een minimale afstand tussen robot en operator, en het limiteren van vermogen, kracht en snelheid.

Voor de traditionele niet collaboratieve robot systemen wordt veelal gebruik gemaakt van de veilige bewaakte stop, waarbij de robot uitgeschakeld wordt indien de werkruimte van de operator en de robot potentieel met elkaar in contact kunnen komen. Een praktische uitvoering hiervan is een afgesloten robot cel die het systeem uitschakelt indien de operator de ruimte betreedt. Voor programmeringsdoeleinden wordt hier vaak een handbediening aan toegevoegd om in nabijheid van de operator (met verlaagde snelheid) handmatig en gecontroleerd de robot aan te kunnen sturen.

Omdat deze maatregelen niet voldoende zijn voor een robot systeem om op een veilige manier collaboratief met een operator te opereren, zijn cobots veelal uitgerust met een extra limiet op het vermogen, de uitgeoefende kracht en snelheid. Om deze waarden te kunnen monitoren, hebben cobots daarom extra krachtsensoren om de krachten en opgenomen vermogens in de gewrichten en de tooling te kunnen meten. Als extra toevoeging kan het systeem uitgerust worden met een systeem dat de afstand tussen operator en cobot meet, waarbij de snelheid van de cobot aan de hand van deze afstand aangepast kan worden. De snelheid van de cobot zal dan verlaagd worden zodra een operator dichterbij komt om bijvoorbeeld een buffer met onderdelen te vullen.

Als gevolg van deze randvoorwaarden voor collaboratieve systemen zijn cobots typisch beperkt in de maximaal haalbare snelheden, versnellingen en krachten. Daar tegenover staat wel dat de workspace van de cobot en operator mag overlappen, en dat extra krachtterugkoppeling beschikbaar is bij de aansturing. Dit geeft bijvoorbeeld mogelijkheden om met een cobot kracht gestuurde processen uit te voeren die met een robot niet zonder meer mogelijk zijn. Deze verschillen maken dat collaboratieve systemen effectief in te zetten zijn op andere plekken in productie processen ten opzichte van niet collaboratieve systemen. De cobot zal dus niet snel de traditionele robot vervangen, maar juist op andere plekken effectief ingezet kunnen worden waar processen nu nog handmatig uitgevoerd worden.

2.2 Economisch effectieve inzet van cobots

De voordelen van automatisering zijn onder andere: hogere productiecapaciteit, lagere kosten en een consistentere kwaliteit. Echter zijn er met volautomatische productieprocessen ook grote investeringen vereist voor de ontwikkeling en/of aanschaf van de productielijn. Bij productie processen met grote aantallen van één en dezelfde producten kunnen de kosten hiervan verdeeld worden over een groot aantal producten, waardoor de investering hiervoor rendabel is. De uitdaging van het automatiseren van high mix - low volume productieprocessen is hierbij echter tweeledig. Aan de ene kant is het automatiserings vraagstuk vaak erg complex en kostbaar door de grote variatie aan producten. Aan de andere kant kan de investering slechts verdeeld worden over een relatief klein aantal producten. Volledige automatisering blijkt dan vaak niet rendabel, waardoor men de processen handmatig blijft uitvoeren en daarmee kansen laat liggen.

2.2.1 Automatisering van high mix - low volume productie processen

Juist voor dit soort high mix - low volume productie processen met relatief lage seriegroottes, waar de cyclustijd niet bepalend is voor de haalbaarheid van de automatisering en relatief lage cyclustijden acceptabel zijn, zijn hoge bewegingssnelheden niet noodzakelijk en kan een cobot uitkomst bieden. Met name bij de automatisering in bestaande productie omgevingen zorgt dit voor relatief lage investeringskosten en een beperkte impact op het vaak schaarse beschikbare vloeroppervlak. Daarnaast wordt de cyclustijd van een productie proces in veel gevallen gedicteerd door het traagste proces in de keten. Een goed voorbeeld hiervan in de kunststofindustrie is het spuitgieten, sorteren, en het scheiden van de aanspuittak van kunststof spuitgegoten

onderdelen. Door de relatief lange tijd die benodigd is voor het afkoelen in de matrijs van het kunststof tijdens het spuitgietproces, met name voor technische producten, is de toegestane cyclustijd voor elk geproduceerd onderdeel relatief lang (bijvoorbeeld één tot enkele producten per minuut).

Een bijkomend voordeel van het ontbreken van de afscherming voor de cobot is het ontbreken van de kosten ervan, wat veelal een significante kostenpost is op het totaalplaatje. De kosten die hiermee gemoeid zijn kunnen vergelijkbaar zijn met, tot zelfs meer zijn dan de kosten voor het robot systeem. Daarnaast vraagt een afgeschermd robot systeem ook extra aandacht voor de infrastructuur met betrekking tot de aan- en afvoer van producten, aangezien het proces zich in een afgeschermd omgeving bevindt en een operator deze taak veelal niet op zich kan nemen zonder het robot systeem stil te zetten.

2.2.2 Transitie naar volautomatische automatisering

Een andere plek waar de cobot uitkomst kan bieden, is bij de transitie van handmatige naar volautomatische processen. De Nederlandse industrie heeft een sterke exportpositie en loopt voorop bij het ontwikkelen van nieuwe technologie en producten. Bij de ontwikkeling en het in de markt zetten van nieuwe producten begint de vraag vaak klein, en bestaat het productie en assemblage proces veelal uit voornamelijk handmatige handelingen. Hierdoor is enerzijds de benodigde investering minimaal en is er veel flexibiliteit in het productieproces, maar is de productiecapaciteit beperkt en zijn de verwerkingskosten per product relatief hoog (soms zelfs te hoog om voldoende concurrerend te zijn).

Op het moment dat de vraag naar het product toe begint te nemen is er noodzaak om het productie proces op te schalen. Bij grote productie aantallen kan hierbij gekozen worden voor een volledig geautomatiseerde productielijn. Echter is de groei in de vraag vanuit de markt vaak een geleidelijk proces, waardoor de productie aantallen bij aanvang vaak onvoldoende zijn om de grote investering van een volledig automatische productielijn te verantwoorden, terwijl de productie aantallen wel te groot zijn voor een handmatig ingericht proces. Bovendien is er onzekerheid wat betreft het tempo waarin de productie aantallen groeien en het moment waarop een volledig geautomatiseerde productielijn rendabel is. Een oplossing voor deze overgangperiode met groeiende vraag kan bestaan uit meerdere handmatige parallelle productiestromen die gelijktijdig plaatsvinden. Echter beslaat deze productie methode vaak veel vloeroppervlak, blijven de kosten per product relatief hoog en moeten meerdere productiemedewerkers ingezet worden die toch al lastig te vinden zijn.

Omdat de productie aantallen nog beperkt zijn in deze opstart- en groeifase zijn voor dit soort processen niet altijd "snelle" traditionele robots de beste oplossing. Voor dit soort processen kan de cobot ingezet worden, die hierbij voldoende snelheid biedt voor de vereiste productiecapaciteit, terwijl de benodigde investeringskosten beperkt blijven. Daarnaast kan een cobot ingezet worden in samenwerking met een werknemer om gezamenlijk een verhoging van de productiviteit te realiseren. Hierbij kan de cobot de saaie en repeterende handelingen verrichten, terwijl de werknemer de complexere en uitdagende taken op zich neemt.

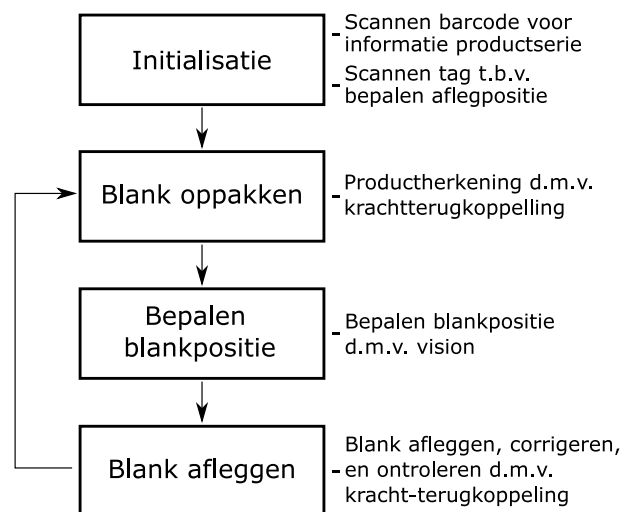
2.3 Voorbeeldcases: de plek van de cobot binnen huidige productieprocessen

Om de plek van de cobot in kaart te brengen binnen huidige productieprocessen in de kunststofindustrie, worden in deze sectie twee productieprocessen van de project partners geanalyseerd die illustreren hoe, en waar een cobot ingezet kan worden.

2.3.1 Onderzoekscase: plaatsen van blanks in productpers - Projectpartner Collins Aerospace

Collins Aerospace (voormalig Dutch Thermoplastic Components, DTC) is producent van composiet onderdelen voor onder andere de vliegtuigindustrie. Deze producten worden gevormd uit thermoplastisch composiet plaatmateriaal dat in kleinere stukken gesneden wordt (blanks) en vervolgens wordt verwarmd en geperst tot de gewenste vorm. Doordat er veel verschillende producten met verschillende afmetingen gemaakt worden, is de handling van het plaatmateriaal tot dusver niet geautomatiseerd en worden de blanks handmatig bij de pers ingelegd en uitgenomen. Uitdagingen zijn hierbij de kleine series en veel variatie bij de producten wat vorm en maat betreft. Daarnaast is er veel variatie in de vlakheid van de platen door de lage buigstijfheid in combinatie met interne spanningen in het ingekochte of het zelf geproduceerde plaatmateriaal. Grotere platen worden gesneden tot kleinere afmetingen zoals nodig voor een product. Hierdoor komen spanningen vrij en kunnen de blanks krom trekken wat extra uitdaging geeft tijdens het beladen. Daarnaast is een eis dat de operator voor de kleine seriegroottes minimale of nog beter, geen omsteltijd nodig heeft.

Om de benodigde flexibiliteit te kunnen realiseren is de ingebouwde kracht-terugkoppeling van de gebruikte UR10e cobot [8] benut in combinatie met een vision systeem van de Robotiq wrist camera [9]. Dit met als doel om ook krom getrokken blanks betrouwbaar op te kunnen pakken. Daarnaast geeft dit mogelijkheden om meerdere producten te kunnen verwerken zonder specifieke hardware of softwarematige aanpassingen en kan er makkelijk geschakeld worden tussen verschillende product series. Een schematisch overzicht van het ontworpen automatiseringsproces is weergegeven in figuur 2.2.



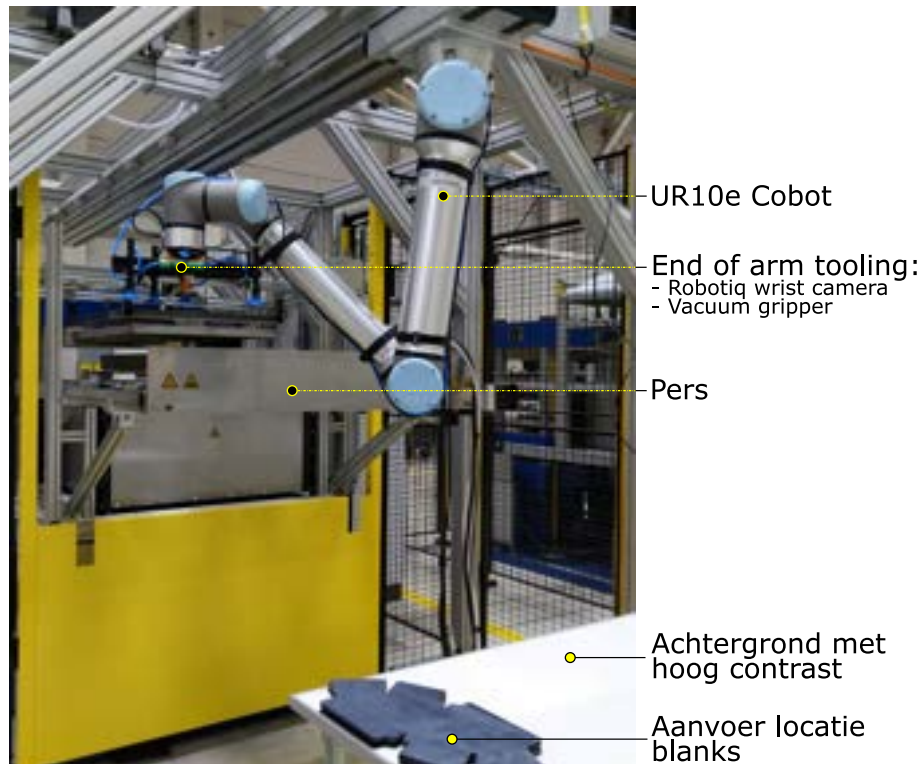
Figuur 2.2: Schematisch overzicht van automatiseringsproces

De ontwikkelde oplossing begint met een “initialisatie” stap. Hierbij wordt een barcode door de camera van de cobot gescand om product en serie specifieke informatie op te halen (bijvoorbeeld de serie-grootte en het product-type). Deze barcode is aangebracht op de mal die door een operator in de machine wordt geplaatst. Door deze barcode als input te nemen voor het laden van de cobot software voor een specifiek product, hoeft de operator geen aanpassingen aan de software van de cobot te doen. Vervolgens bepaalt de cobot door middel van de camera de afleg positie in de pers met behulp van een tag die zich op de mal bevindt. De locatie van de tag is hierbij bepalend voor de aflegpositie in de mal (bijvoorbeeld op een vaste offset ten opzichte van de tag). Daarna wordt bij het beladen van de pers de blank opgepakt vanaf een globale, niet exact gedefinieerde positie. Anders gezegd, de operator legt een stapel blanks op ongeveer de juiste plaats op een tafel. Hierdoor zijn geen kostbare product specifieke houders

nodig die een exacte positie van de producten garanderen en wordt een grote variatie aan vormen en maten verwerkt zonder omsteltijd. Het oppakken van de blanks is hierbij gerealiseerd door gebruik te maken van de kracht-terugkoppeling van de cobot in de hoogte-richting zodat er geen afhankelijkheid is van de hoogte van de stapel en de dikte en vlakheid van de producten. De gerealiseerde cobot software meet namelijk de kracht (weerstand) bij het naar beneden bewegen boven de stapel blanks en detecteert aan de hand van de gemeten kracht wanneer de bovenste blank van de stapel bereikt is.

Vervolgens wordt met behulp van het vision systeem de positie van de opgepakte blank bepaald. Aangezien niet gegarandeerd is dat de blanks op een exacte positie liggen, en in de stapel ten opzichte van elkaar verschoven kunnen zijn, wordt de bovenste blank opgepakt en naast de stapel neergelegd op een ondergrond met hoog contrast. Vervolgens wordt door middel van de camera de positie van deze enkele blank met de benodigde nauwkeurigheid bepaald (<1 mm), zodat deze vervolgens op de juiste plek in de pers geplaatst kan worden. Voor het positioneren en fixeren van de blanks in de mal wordt de blank gefixeerd met behulp van meerdere positioneringspennen. De benodigde nauwkeurigheid om de blank ten opzichte van deze pennen te kunnen positioneren bedraagt circa ± 0.1 mm. Omdat de gebruikte vision oplossing, en de maatvoering van de platen, deze nauwkeurigheid niet in alle situaties betrouwbaar kan realiseren, wordt met behulp van kracht-terugkoppeling gedetecteerd of de blank correct over de pennen is geschoven. Dit is gerealiseerd door een kracht-gestuurde beweging richting de pennen, waarbij in geval van correcte plaatsing het onderdeel over de pennen schuift en de behaalde positie bij "contact" een indicatie geeft voor correcte plaatsing. Voor de gevallen dat de positie niet correct blijkt, wordt de afleg positie gecorrigeerd door middel van een spiraalvormige zoek-beweging om de juiste positie ten opzichte van de pennen alsnog te kunnen bepalen. Met andere woorden, zodra de blank nog niet op de juiste hoogte in de mal ligt, maar er wel 'weerstand' gemeten wordt, wordt de blank heen en weer bewogen, totdat de 'weerstand' wegvalt en de blank niet meer op de pennen rust maar over de pennen valt en op zijn plek ligt.

Het resultaat van deze strategie heeft geleid tot een automatiseringsoplossing die veel flexibiliteit biedt om verschillende producten te kunnen verwerken, waarbij er eenvoudig en snel geschakeld kan worden tussen verschillende producten. Aangezien bij deze oplossing geen product specifieke handelingen of bewegingen nodig zijn, is het zelfs mogelijk om met een enkel universeel programma in combinatie met productparameters een breed scala aan producten te kunnen beladen. Daarnaast geven de kracht-gestuurde acties van de cobot op een relatief eenvoudige manier veel robuustheid tegen vormvariaties van de kromgetrokken blanks, wat bij een traditionele robot mogelijk lastig te realiseren is. Een impressie van de cobot oplossing, zoals deze uiteindelijk gerealiseerd is, voor het beladen van een pers bij DTC is weergegeven in figuur 2.3.



Figuur 2.3: Implementatie van cobot-oplossing bij DTC

2.3.2 Onderzoekscase: assemblage van afsluiters - Projectpartner Alligator plastics

Alligator Plastics is een innovatief spuitgietbedrijf en levert onder andere sub-assemblages met door hen geproduceerde onderdelen. De montage gebeurt in belangrijke mate met de hand. De doelstelling van Alligator Plastics is om te onderzoeken waar het mogelijk is de assemblage door middel van een cobot, al dan niet in combinatie met een montage medewerker, uit te voeren.

Eén van de producten die Alligator Plastics produceert en assembleert is een afsluiter voor bierfusten. Momenteel wordt dit assemblageproces manueel uitgevoerd, maar de verwachting is dat dit product in een groeiemarkt zit. Op lange termijn is het rendabel om te kijken naar een volledig geautomatiseerde oplossing, zoals een klassieke industriële robot, maar in de huidige situatie is dit nog niet rendabel. Echter komt er een moment dat de seriegrootte waarbij een medewerker de montage niet meer alleen aankan. Als tussenstap tussen het manuele en het volledig geautomatiseerde proces, is een (tussen) oplossing met een cobot onderzocht.

Eén van de aspecten van het assemblage proces bestaat uit het in elkaar persen van drie kunststof spuitgietdelen en een metalen veer door middel van een klik-verbinding. Voor deze persactie is een kracht benodigd van circa 200 N, wat buiten de kracht-limieten van de gebruikte cobot valt. Deze cobot is groot genoeg voor de handling van de onderdelen. Een grotere en sterkere cobot die de benodigde kracht kan leveren is een mogelijkheid, maar fors duurder dan de gekozen oplossing. Om deze assemblage stap toch mogelijk te maken, is er voor de automatiseringsoplossing gekozen om een cobot te combineren met een elektrische pers/actuator waarbij de "niet geperste" assemblage via een bewegend platform onder de pers bewogen wordt. De cobot wordt hierbij gebruikt om de individuele onderdelen op te pakken en in de juiste volgorde in elkaar te zetten, waarna de laatste assemblagestap plaats vindt en de onderdelen met behulp van de pers in elkaar geklikt worden. Door gebruik te maken van een pers die de uitgeoefende perskracht kan registreren, wordt daarnaast ook geverifieerd of de assemblage juist is samen gesteld. Bij het ontbreken van een onderdeel of het niet juist in elkaar persen van de delen valt

de perskracht namelijk buiten de normale grenzen, waarmee de kwaliteit (van de assemblage) geborgd kan worden. Na het persen wordt de assemblage weggezet in de daarvoor bedoelde tray. Een overzicht van een gerealiseerde demonstrator opstelling is weergegeven in figuur 2.4.



Figuur 2.4: Demonstrator van de automatiseringsoplossing door middel van een cobot

Bij de demonstrator oplossing worden de aanvoer van de individuele producten en de afvoer van de gevulde tray's handmatig uitgevoerd door de operator. Dit heeft als voordeel dat de benodigde investeringskosten en infrastructuur relatief laag zijn. Naarmate de productie aantallen toenemen kunnen deze aspecten alsnog meegenomen worden in de automatiseringsoplossing om de graad van automatisering te verhogen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van trilvullers en een buffersysteem voor de tray's. Bij een volautomatisch productieproces moet er echter wel rekening gehouden worden met de kwaliteitsinspectie van de individuele onderdelen (bijvoorbeeld de controle of de rubber afdichting volledig is spuitgegoten). Het controleren van de kwaliteit kan door een operator namelijk relatief eenvoudig optisch uitgevoerd worden. Echter, bij een volledig geautomatiseerd proces, is dit een complex vraagstuk wat een geavanceerd vision systeem vraagt. Wanneer het inspectie vraagstuk is opgelost en een groter deel van het productieproces geautomatiseerd is, kan zodra voldoende grote series gemaakt moeten worden om de investeringskosten te rechtvaardigen, overgestapt worden op een traditionele robot om de cyclustijd verder te kunnen verkorten.

Om in kaart te brengen welk scenario voor welke productie aantallen rendabel zijn, zijn de effectieve kosten per product in kaart gebracht. Een overzicht van de mogelijke scenario's samen met de geschatte gemiddelde cyclustijd voor het assembleren van 25 bierfustafsluiters (één tray) is weergegeven in tabel 2.1. Een schatting van de kostenposten is weergegeven in tabel 2.2. De weergegeven getallen zijn illustratief en kunnen per toepassing sterk verschillen. Verder wordt aangenomen dat de vrij gespeelde tijd voor de operator elders effectief ingezet kan worden en deze tijd dus effectief "bespaard" wordt.

Scenario	Cyclustijd (min)	Operator actief (min)
Handmatige assemblage	7.5	7.5
Assemblage met cobot en handmatige productaanvoer	7	1.5
Assemblage met robot en automatische productaanvoer	2	0
Volautomatische productspecifieke assemblagemachine	0.5	0

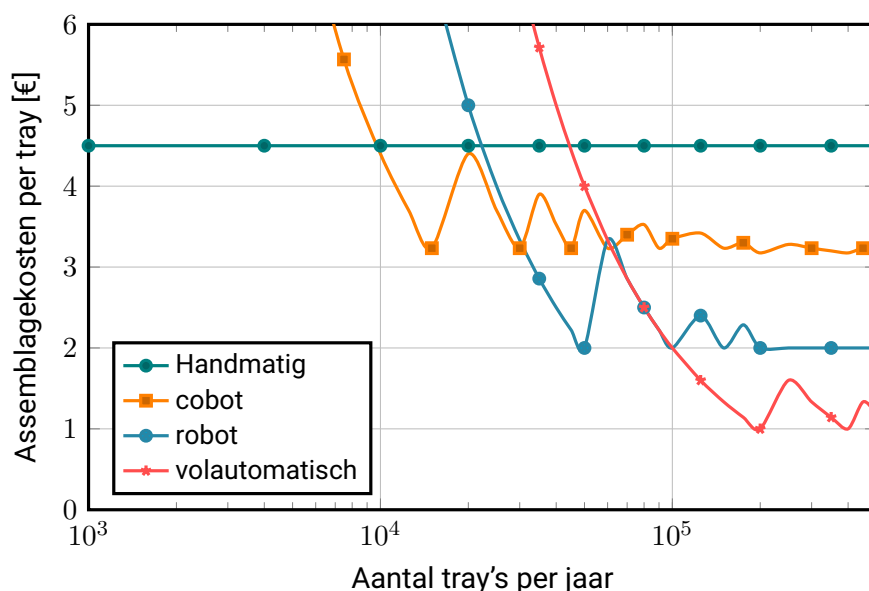
Tabel 2.1: Cyclustijden voor het assembleren van 25 bierfustafsluiters (één tray) voor verschillende scenario's

In figuur 2.5 zijn de geschatte kosten voor de verschillende productie processen en variërende

Kostenpost	Kosten	Interval
Operator	€0.60	per minuut
Cobot incl. randapparatuur	€35.000	eenmalig
Robot incl. automatisch productaanvoer	€100.000	eenmalig
Volautomatische product specifieke assemblagemachine	€200.000	eenmalig

Tabel 2.2: Overzicht kostenposten

productie aantallen weergegeven. In deze figuur is zichtbaar dat een handmatig proces effectief is voor relatief lage productie aantallen (hoge assemblage kosten, maar relatief lage investering). Naarmate de aantallen toenemen wordt een steeds verdergaande graad van automatisering interessant waarbij de hoge investeringskosten gespreid kunnen worden over een groot aantal producten. Hierbij neemt de oplossing met cobot een plek in tussen een handmatig assemblage proces met lage aantallen, en een volautomatisch proces bij zeer grote aantallen. De zichtbare zaagtand karakteristiek ontstaat door een overschrijding van de productiecapaciteit van het productieproces, waardoor er een extra cobot/robot en overige apparatuur voor de productielijn noodzakelijk wordt met de bijbehorende investeringskosten.

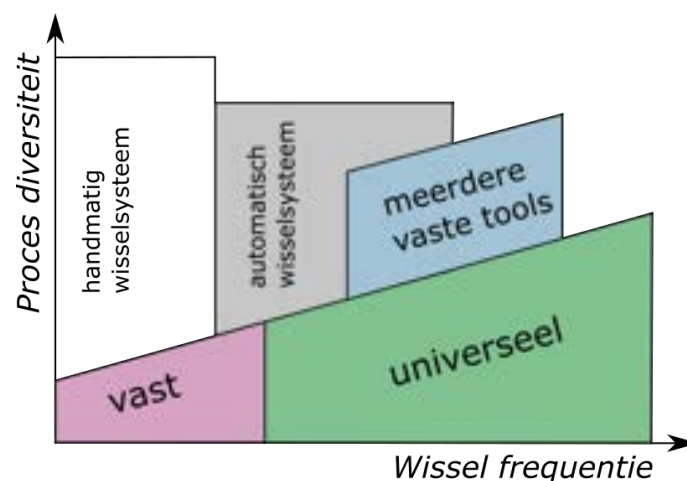


Figuur 2.5: Overzicht van de geschatte kosten per 25 afsluiters (één tray) voor verschillende productie aantallen

3. Flexibele en multifunctionele tooling

Zoals bij elke industriële automatisering is product handling een essentieel onderdeel. Mensen zijn in staat fragile of slappe producten adequaat te verwerken, denk hierbij aan zolen, vezelmatten of mechanische veren. Daarnaast zijn mensen in staat om gemakkelijk te schakelen tussen onderdelen met verschillende vormen, afmetingen of gewichten en kunnen ze kwaliteit en mogelijke afwijkingen van onderdelen tijdens het uitvoeren van andere handelingen gelijktijdig controleren.

Bij de inzet van traditionele robots in de automatisering met grote productie aantallen is er vaak weinig product variatie. Hierdoor wordt er vaak gebruik gemaakt van een gripper ontwerp dat specifiek toegespitst is op de uit te voeren taak. Echter, bij de inzet van cobots, die vaak tot hun recht komen bij high mix - low volume productie processen, is een dedicated gripperontwerp vaak niet effectief in te zetten zonder wisseling van de tool. Hierdoor vormt het ontwerp van de end of arm tooling (bijvoorbeeld een gripper) die effectief ingezet kan worden op een sterk variërend proces een extra uitdaging. Voor processen met weinig variatie en een lage wissel frequentie (het aantal maal per tijdseenheid dat er gewisseld dient te worden) kan vaak gewerkt worden met een vaste of handmatig te wisselen tool. Naarmate de diversiteit van het proces toeneemt biedt een automatisch toolwissel systeem, of een systeem waarbij meerdere tools gelijktijdig aan de robot bevestigd zijn, een uitkomst. Als er zowel veel diversiteit in het proces is, als ook een hoge frequentie waarbij de tool gewisseld moet worden, zoals het geval is bij high mix - low volume processen, is er vaak behoefte aan een universele gripper die breed ingezet kan worden. Een schematisch overzicht van de inzet van verschillende type grippers is gegeven in figuur 3.1 [10]. Daarbij komt ook dat voor een cobot de beschikbare payload vaak beperkt is, waardoor een lichtgewicht ontwerp van de end of arm tooling cruciaal is en een relatief zwaar systeem met meerdere tools veelal geen optie is.



Figuur 3.1: Schematisch overzicht van verschillende gripper types voor variërende wissel frequentie en diversiteit van het proces [10]

3.1 Product handling van producten met vormvariatie of niet vorm-vaste producten

Kunststoffen worden op veel plekken toegepast vanwege de vaak lage kosten, laag gewicht en de mogelijkheid tot het maken van complexe vormen. Daarnaast kan er, afhankelijk van het type kunststof, een breed scala aan mechanische en chemische eigenschappen verkregen worden. Typisch voor kunststoffen zijn hierbij de lage elasticiteitsmodulus (ten opzichte van metalen) en de grote rek tot breuk (bijvoorbeeld rubbers). Door deze eigenschappen kunnen kunststof producten minder vormvast zijn dan metalen. Deze verminderde vormvastheid kan komen uit variatie ontstaan in het productieproces (bijvoorbeeld het kromtrekken van kunststof platen ten gevolge van interne spanningen), of door de geringe stijfheid van het object (bijvoorbeeld rubber laarzen).

Bij het robotiseren van productieprocessen geeft deze vormvariatie een extra uitdaging. Bij het manipuleren of verplaatsen van objecten wordt er bij het programmeren normaal gesproken uitgegaan van vaste keypoints die gebaseerd zijn op een vaste en exacte locatie en vorm van het object. Vervolgens voert de robot zijn beweging uit en beweegt een tool of gripper (end effector) naar de gedefinieerde locatie waar het object wordt bewerkt, opgepakt of weggelegd. Vormvariatie in het product kan er dan voor zorgen dat de end effector niet op de juiste plek van het product terecht komt en bewerkingen verkeerd worden uitgevoerd, of dat het product niet juist wordt opgepakt. Een oplossingsrichting is om gebruik te maken van extra sensoriek of vision. Hierbij wordt de juiste plek op het product “gezocht” in plaats van de cobot naar een gedefinieerde positie te brengen in een x-y-z coördinatensysteem, waarbij het maar de vraag is of de tool of gripper op de juiste plaats in contact komt met het product. Een andere oplossing is om te zorgen dat het object zo georiënteerd wordt, dat de met de end-effector te benaderen locatie zich altijd op dezelfde plek bevindt. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door een product op een mal te leggen die doormiddel van zwaartekracht het object centreert. Nadeel van deze oplossingen is dat er extra complexiteit, kosten en/of cyclustijd aan het proces worden toegevoegd, en dat ingeleverd wordt op variatie en flexibiliteit.

Een cobot biedt echter standaard al een extra oplossingsrichting, namelijk de aanwezige kracht-terugkoppeling op de toolflens en de motoren. In verband met de benodigde veiligheidssystemen is deze functionaliteit aanwezig bij een cobot. Deze krachtterugkoppeling kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor een aanraakdetectie, die het mogelijk maakt om geleidelijk naar een object toe te bewegen totdat er contact is tussen de tool en het object. Dit kan dan ingezet worden om de locatie van een object te bepalen als deze niet exact bekend of variërend is. Deze functionaliteit is ook gebruikt voor de case beschreven in sectie 2.3.1.

Naast het detecteren van contact met de omgeving, kan de kracht terugkoppeling ook gebruikt worden om de uitgeoefende kracht te meten en te controleren. Deze kan dan gebruikt worden om een voorgeschreven kracht uit te oefenen, of kan gebruikt worden ter controle van het productieproces waarbij de kracht tijdens specifieke handelingen in het productieproces tussen voorgeschreven waardes moet blijven. Denk bij dat laatste bijvoorbeeld aan het in de juiste positie komen van klikvingers bij kunststof producten.

3.2 Smart gripper ontwerp met multifunctionele toepasbaarheid

Ongemerkt worden veel uitdagingen die handigheid en kunde vereisen manueel “achteloos” opgelost. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de geometrie van flexibele onderdelen iets aanpassen door kracht uit te oefenen, producten met verschillende geometrieën handelen, of voelen of een onderdeel op de juiste plek zit zonder deze te kunnen zien. Ondanks dat deze handelingen vaak eenvoudig lijken en bij handmatige verwerking vaak geen speciale aandacht nodig hebben, kan

het automatiseren van deze taken zeer uitdagend zijn.

Voor constante productieprocessen met grote series kan er bij automatisering vaak gewerkt worden met end of arm tooling die specifiek ontworpen is op de uit te voeren taak. Echter zien we vaak dat daar waar een cobot goed tot zijn recht komt (productieprocessen met veel variatie) de end of arm tooling een grote en cruciale rol heeft in de automatiseringsoplossing en een dedicated gripperoplossing voor één specifieke taak vaak niet voldoet. Daarbij wordt vaak ook gevraagd dat het systeem operationeel kan blijven zonder menselijke interactie zodat 24/7 productie mogelijk wordt.

Een mogelijke oplossingsrichting om variatie in de taak van de end of arm tooling op te vangen is het gebruik van meerdere afzonderlijke tools die gewisseld kunnen worden. Een handmatige wissel geeft echter een onderbreking van het productieproces en is niet altijd wenselijk bij een proces dat continu door moet lopen of waarbij vaak gewisseld moet worden. Een oplossing is een automatisch wissel systeem waarmee de cobot of robot autonoom kan wisselen tussen tools, inclusief pneumatische en elektrische verbindingen. Echter brengt een automatisch tool wissel systeem (inclusief meerdere tools) hoge kosten en extra cyclustijd voor het wisselen met zich mee. Het laatste punt vormt met name een probleem voor processen waarbij er continue gewisseld moet worden tussen de verschillende tools. Een voorbeeld van een automatische toolchanger is weergegeven in figuur 3.2, waarbij één helft verbonden is met de toolflens van de robot of cobot, en de andere uitwisselbare helft verbonden is met de tool.



Figuur 3.2: Schunk's SWS automatische toolchanger met pneumatische interface

Om toolwissels te voorkomen is multifunctionele en slimme end of arm tooling vaak noodzakelijk om om te kunnen gaan met variatie in het productieproces. Voor bijvoorbeeld pneumatische gripper systemen voor het handlen van verschillende afmetingen plaatmateriaal kan deze bredere functionaliteit gerealiseerd worden door middel van verstelbare posities van de vacuüm zuignappen. Een voorbeeld van een verstelbare vacuüm gripper (handmatig verstelbaar) is gegeven in figuur 3.3. Variatie in grootte kan ook opgevangen worden door de vacuümpunten op te delen in secties en softwarematig een "patroon" aan te sturen. Door de secties efficiënt te verdelen kunnen meerdere productranges opgepakt worden. Twee voorbeeldcases voor het ontwerp van een multifunctionele vacuüm gripper voor een cobot toepassing zijn beschreven in sectie 3.3.1.

Voor het oppakken van onderdelen die niet opgepakt kunnen worden door middel van vacuüm ligt een mechanische gripper, die het product vastklemt, voor de hand. Kenmerkend voor standaard mechanische grippers is vaak de beperkte slag die gemaakt kan worden, wat een uitdaging kan geven voor productieprocessen waarbij veel verschillende producten opgepakt of bewerkt moeten worden. Door middel van een slim ontwerp, en door gebruik te maken van een door-



Figuur 3.3: De VG10 vacuümgrijper van OnRobot met verstelbare grijperarmen in (a) uitgeklapte stand en (b) ingeklapte stand

dachte gripper geometrie, kan de reikwijdte en functionaliteit van de gripper vergroot worden. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit een gripper geometrie die zowel inwendig als uitwendig kan grijpen of een gripper die op verschillende plekken op de gripper verschillende maten of onderdelen vast kan pakken.

Een voorbeeld van een multi-functionele gripper geometrie is weergegeven in figuur 3.4. Deze gripper is ontwikkeld voor het assembleren van de bierfust afsluiters beschreven in sectie 2.3.2, en is in staat om de vier afzonderlijke onderdelen en de samengestelde assemblage op te pakken. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een standaard gripper met zelf ontwikkelde vingers. Door meerdere klem principes zijn de vingers in staat alle onderdelen te handelen. Door een slim ontwerp van de gripper geometrie, kan hierdoor met een enkele standaard gripper aandrijving het complete assemblage proces geautomatiseerd worden (in het beschreven assemblage proces is hiervoor gebruik gemaakt van de Hand-E adaptive gripper van Robotiq).

In het voorgaande deel zijn slechts twee voorbeelden geven van oplossingsrichtingen voor op vacuüm gebaseerde of mechanisch grijpende end of arm tooling welke uitkomst bieden voor processen met veel product variatie. In de praktijk zal bij elke toepassing beoordeeld moeten worden welke techniek het meest geschikt is, en hoe de end of arm tooling effectief ingezet kan worden. Voor alle robot of cobot toepassingen, maar met name voor processen met sterke product variatie, is een goed ontwerp van de end of arm tooling cruciaal voor een succesvolle inzet. Het belang van de end of arm tooling wordt hierbij vaak onderschat, en wordt typisch pas in een laat stadium van het ontwerpproces onderzocht. Het inzetten van een cobot (of robot) eindigt niet bij de aanschaf van de cobot, maar begint hierbij pas. Het ontwerp van de end of arm tooling vormt hierbij een integraal onderdeel van de automatiseringsoplossing.



(a) Gripper (aan de bovenzijde bevestigd aan een mechanische gripper)



(b) Oppakken veer



(c) Oppakken onderdeel 1



(d) Oppakken onderdeel 2



(e) Oppakken onderdeel 3



(f) Oppakken assemblage

Figuur 3.4: Multifunctioneel grijpervinger ontwerp voor het assemblage proces beschreven in sectie 2.3.2

3.3 Voorbeeldcases: Flexibele en multifunctionele tooling

In deze sectie worden twee toepassingen toegelicht waarvoor een specifiek ontwerp van de end of arm tooling is ontwikkeld om automatisering van een proces met veel variatie te realiseren.

3.3.1 Handling van flexibele en niet vormvast materiaal - Projectpartner Collins Aerospace

De handling van blanks (uit het basismateriaal gesneden plaatmateriaal) en tapes (strip unidirectioneel vezelmateriaal) aan het begin van het productieproces voor thermoplastische composiet producten, vormt een uitdaging. Een aantal kenmerkende eigenschappen van deze materialen zijn:

- Sterke an-isotrope mechanische eigenschappen.
- Beperkte dikte en daardoor lage buigstijfheid (met name voor de tapes).
- Grote diversiteit in geometrie.

De grote diversiteit aan vormen gecombineerd met een high mix - low volume productieproces is een uitdaging om effectief te kunnen automatiseren. Dedicated tools ontwikkelen voor ieder afzonderlijk product is namelijk te kostbaar en de benodigde toolwissels veroorzaken extra handelingen van de operator die de tijdswinst door automatisering weer (grotendeels) te niet doet.

Om een cobot effectief in te kunnen zetten voor dit proces is er gekozen voor een patroon van vacuüm cups die onafhankelijk van elkaar aangestuurd worden. Zo kan een selectief aantal vacuüm cups op de juiste positie geactiveerd worden voor een specifiek product zodat een grote variatie aan afmetingen en vormen van producten mogelijk is. De in het project ontworpen gripper in het voorbeeld weergegeven in figuur 3.5 bestaat uit zeven vacuüm cups die ieder afzonderlijk voorzien zijn van een vacuum generator (venturi). Hierdoor zorgt drukval bij één van de cups (als bijvoorbeeld een product scheeft ligt en de cup niet volledig afgedicht wordt) niet voor drukval bij de overige cups. Daarnaast worden de cups onafhankelijk van elkaar geschakeld, verdeeld over 6 groepen, waarbij iedere groep geschakeld wordt vanuit een digitale output van de cobot. Op deze manier worden, afhankelijk van de op te pakken geometrie, bepaalde groep(en) ingeschakeld.

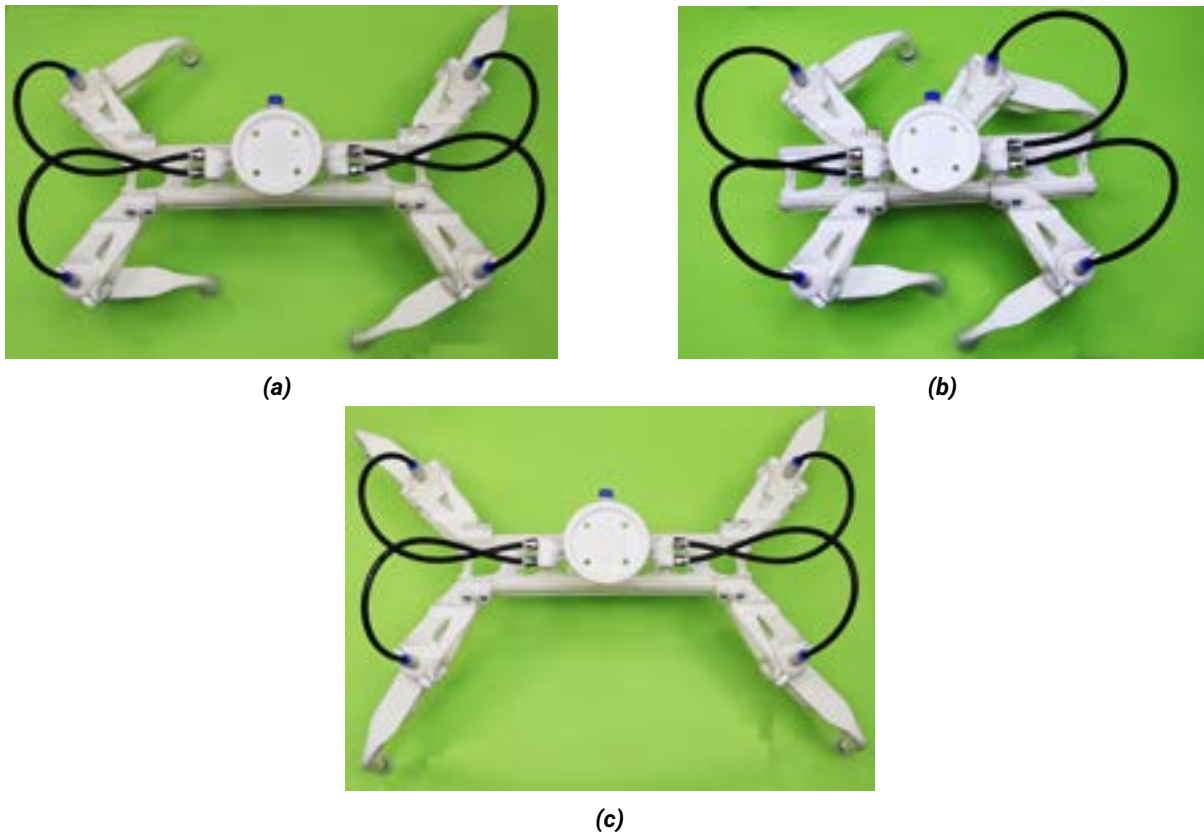


Figuur 3.5: Vacuum gripper met afzonderlijk aangestuurde zuignappen

De positionering van de vacuüm cups is met name voor de tapes experimenteel bepaald op basis van de mechanische eigenschappen van het materiaal, in het bijzonder: hoeveel doorbuiging kan het niet ondersteunde materiaal hebben voordat het parallel aan de vezelrichting scheurt (scheur tussen de vezels). De positionering van de gripper ten opzichte van de vezelrichting is daarbij essentieel voor het proces, waarbij er veel ondersteuningspunten haaks op de vezelrichting nodig zijn (5 ondersteuningspunten), waarbij langs de vezelrichting de relatief hoge stijfheid en sterkte van het materiaal minder ondersteuningspunten nodig heeft (3 ondersteuningspunten).

Op een andere plek in het productieproces, bij het beladen van blanks van thermoplastisch composiet materiaal in een bewerkingsmachine, speelt juist de payload van de cobot en de massa van de gripper een belangrijke rol. Dit omdat met name de grotere blanks een massa van enkele kilo's kunnen hebben. Om de massa van de gripper te minimaliseren met behoud van voldoende stijfheid, is gebruik gemaakt van topologie optimalisatie in combinatie met additive manufacturing. Hiermee kan er massa "weggehaald" worden op de plekken waar het niet nodig is, en behouden blijven waar het bijdraagt aan de draagkracht en stijfheid van de gripper. Hiervoor is nauw samengewerkt met de collega's van het lectoraat Kunststofftechnologie van hogeschool Windesheim, die gespecialiseerd zijn in additive manufacturing en topologie optimalisering. Het resultaat is weergegeven in figuur 3.6. Deze gripper is bovendien voorzien van beweegbare delen waarop de vacuüm cups gemonteerd zijn, zodat deze gripper ingesteld kan worden voor

verschillende maten blanks.



Figuur 3.6: Topologie geoptimaliseerde verstelbare vacuüm gripper voor minimaal gewicht, gemaakt uit Nylon met Selective Laser Sintering.

3.3.2 Plaatsen van zolen in laarzen - Projectpartner Dunlop

Dunlop heeft een gedeeltelijk geautomatiseerde laarzen productie. Na het produceren van de laarzen zijn nog handmatige handelingen nodig voordat de laarzen naar de klant kunnen. Dit gaat met name om de nabewerking en het verpakken. De belangrijkste doelstelling van Dunlop is te onderzoeken hoe met cobots verdergaande automatisering gerealiseerd kan worden. Hierbij is de nodige flexibiliteit vereist, vanwege de verschillende maten, het verschil in de linker en rechter laars en de verschillende typen laarzen die geproduceerd worden. Verschillende typen en maten worden gelijktijdig op één machine (door elkaar) geproduceerd.

Eén van de uitdagingen betreft het plaatsen van zolen in laarzen. In het huidige productieproces wordt deze handeling handmatig uitgevoerd. Ook hier speelt kunde en vaardigheid van werknemers een grote rol in de cyclustijd en uiteindelijke kwaliteit van het plaatsen van de zool. Daarnaast is deze handeling uit ergonomisch oogpunt belastend voor de productiemedewerkers. De productiemedewerkers wisselen elkaar hierbij af omdat het te belastend is dit een hele dag te doen. Met name daarom zoekt Dunlop hier naar een mogelijkheid deze handeling te automatiseren. De grote uitdagingen vanuit het automatiserings oogpunt zijn hierbij de grote buigzaamheid van het rubber van de laars als ook van de stoffen zool, maar tevens ook de grote variatie in maten.

Aangezien de stoffen zool poreuze eigenschappen heeft is vacuüm weliswaar getest, maar blijken andere technieken voor het grijpen van de zolen geschikter. Er zijn twee andere oplossingen getest:

1. Mechanische gripper: door middel van een gripper worden zolen opgepakt en in de breedte

iets gebogen. Hierdoor wordt geometrische stijfheid ingebracht wat de manoeuvreerbaarheid bevordert.

2. Naaldgrijper: dit principe is gebaseerd op het inbrengen van naaldjes in het product. Op deze manier wordt de zool mechanisch gefixeerd.

Met name door de grote variatie aan zoolmaten en de lage vormvastheid, blijkt een mechanische grijper lastig in te zetten voor het betrouwbaar oppakken en met name het manoeuvreren van deze onderdelen in de laars. Door de lage vormvastheid is er een kans dat de zool uit de grijper valt of de positionering van de zool in de grijper niet correct is. Daarbij komt ook dat de lage stijfheid van het product de "aanwezigheidsdetectie" van industriële mechanische grippers niet effectief ingezet kan worden. Een geschikte oplossing is een naaldgrijper die de zool vanaf de vlakke bovenkant vast grijpt, en dus niet afhankelijk is van het nauwkeurig vastgrijpen op de rand van de zool en het doorbuigen van de zool. Ook is het daarmee mogelijk verschillende zoolmaten op te pakken. Nadeel is dat de naaldgrijper niet gebruikt kan worden voor het positioneren van de zool in de laars. Hoe dat positioneren gerealiseerd is, wordt in de volgende alinea beschreven.

De volgende stap bestaat uit het correct plaatsen van de zool in de laars. Door de lage stijfheid van de zool buigt deze in de lengterichting wanneer deze in contact komt met de schacht van de laars bij het inbrengen van de zool, met als gevolg dat deze dubbel gevouwen onder in de laars uit komt. Daarom is er gekozen voor een oplossing waarbij de zool pas onderin de laars "uitgevouwen" wordt door de punt van de zool in de neus van de laars te duwen. Hiervoor is de end of arm tooling (bestaande uit onder andere de naaldgrijper) uitgerust met een uitstoter die door middel van twee pneumatische cilinders de zool uitvouwen. Een foto van de gebruikte end of arm tooling, en een overzicht van de werking, is weergegeven in figuur 3.7.

In verband met de beperkte ruimte en de gegeven diameter van de schacht van de laars, met name bij de kleinere laarsmaten, bestaat de uitstoter uit een tweetal cilinders die in serie zijn geplaatst en scharnierend met elkaar verbonden zijn. Testen met één cilinder hebben niet tot het gewenste resultaat geleid of de cilinder botste met de leest van de laars. Met twee cilinders is de zool goed te positioneren. De eerste verticale cilinder drukt de achterkant van de tweede cilinder naar beneden waardoor deze vanuit een bijna verticale oriëntatie horizontaal komt te liggen (parallel aan de voetzool van de laars). Door vervolgens de tweede cilinder te bekrachtigen schuift de uitstoter tot in de punt van de laars waardoor de zool volledig uitvouwt/uitrolt en correct geplaatst wordt. De realisatie van een proof of principle en een overzicht van het stapsgewijze proces van het plaatsen van de zool in de laars is weergegeven in figuur 3.8.



(a) Beide cilinders ingeschoven



(b) Eerste cilinder uitgeschoven



(c) Beide cilinders uitgeschoven

Figuur 3.7: Werking van de end of arm tooling voor het plaatsen van zolen in laarzen met (a) de gripper in volledig ingeschoven toestand (b) de eerste cilinder uitgeschoven en (c) de tweede cilinder uitgeschoven



(1)



(2)



(3)



(4)



(5)

Figuur 3.8: Gerealiseerd proof of principle voor het plaatsen van zolen in laarzen. (1) Zool oppakken met naaldgrijper uit dispenser (2) zool inbrengen in laars (3) zool door de schacht duwen waardoor de zool dubbel klapt (4) zool zit onder in de laars (5) zool uitklappen doormiddel van uitstoter

4. Integratie in (bestaande) systemen

Een cobot, een geschikte taak en een bijbehorende gripper zijn ingrediënten voor een geslaagde automatiseringsstap. De laatste fase, welke vaak niet de aandacht krijgt die het verdient, is de integratie in het bestaande proces en de samenwerking met bestaande systemen. Deze stap wordt vaak bewaard voor het laatst en in eerste instantie vaak buiten beschouwing gelaten in het automatiseringsvraagstuk. Dit is begrijpelijk; belangrijk is eerst te onderzoeken of een proces te automatiseren is. Maar het is minstens zo belangrijk voldoende aandacht te hebben voor de integratie om te voorkomen dat een succesvol te automatiseren proces onnodige problemen oplevert bij implementatie omdat deze stap te ondoordacht en te snel is gezet.

Bij het robotiseren van productieprocessen zijn er op een aantal fronten interfaces waarbij producten en informatie overgedragen worden van het ene proces naar het andere proces. Deze interfaces kunnen bestaan uit voor de hand liggende zaken zoals de aan- en afvoer van producten in het proces, maar er dient er ook gecommuniceerd te worden met de periferie (randapparatuur). Deze periferie kan bestaan uit hardware, zoals bijvoorbeeld een spuitgiet- of freesmachine, maar ook uit software systemen zoals databases en centrale besturingssystemen. Zeker bij de overgang van een bestaand productieproces met reeds aanwezige, en soms oudere machines, kan dit een grote uitdaging zijn waarbij er verschillende communicatie protocollen en interfaces in gebruik zijn waarmee gecommuniceerd moet worden. Soms kan het zelfs voorkomen dat bestaande machines geen mogelijkheid hebben tot integratie met bestaande systemen, of dat de leverancier geen ondersteuning (meer) biedt. Al deze zaken spelen een rol in de overstap in het automatiseren van bestaande en nieuwe productielijnen.

Belangrijk om te realiseren is dat enkel een cobot of robot een “blind” systeem is dat niet kan waarnemen waar de aangevoerde producten zich bevinden. Bij de overdracht van producten aan het systeem is het dus cruciaal dat bekend is om welk product en proces het gaat, en waar het product zich bevindt om vervolgens de juiste bewerking toe te kunnen passen. Daarnaast is er steeds meer behoefte aan een borging van de kwaliteit van geproduceerde componenten en de traceerbaarheid hiervan tot op productniveau. Om dit te kunnen realiseren is integratie met de periferie en (ICT)systemen noodzakelijk.

4.1 Aanvoer van producten

In tegenstelling tot de mens, kan een cobot (zonder externe input) niet waarnemen waar een product zich bevindt. Een standaard oplossing om de locatie van een product af te stemmen met een robot is via het aanbieden van producten op een vaste en exact gedefinieerde locatie. Hiervandaan kunnen de producten vervolgens opgepakt en gemanipuleerd worden. Als deze gestructureerde aanvoer mogelijk is, bijvoorbeeld omdat het voorafgaande proces een gestructureerde output heeft, geeft dit een eenvoudige en robuuste oplossing. Echter komt het vaak voor dat bestaande processen die aan de cobot vooraf gaan niet over deze structuur in de productstroom beschikken, bijvoorbeeld als de product los gestort worden in een bak of op een lopende band terecht komen (bijvoorbeeld bij het uitstoten van producten uit een spuitgietmatrijs op de lopende band). Structuur aanbrengen in deze “chaotische” productstroom is dan cruciaal om succesvol te kunnen automatiseren.

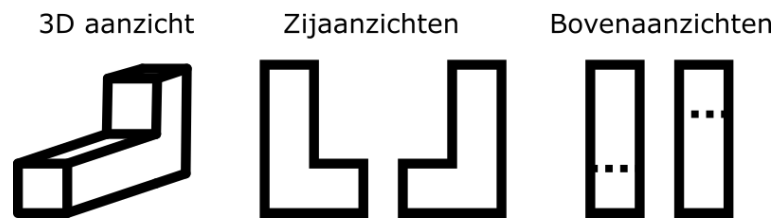
2D vision

Voor productstromen waarbij producten ongestructureerd aangevoerd worden, maar wel één voor één worden aangeboden en niet tegen/over elkaar liggen, kan de locatie bepaald worden via een 2D vision systeem. Dit kan bijvoorbeeld de situatie zijn bij stuksgewijze aanvoer via een lopende band. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een camera om de contour van het product te herkennen, waarmee vervolgens de positie bepaald kan worden en het product kan worden opgepakt. Vandaag de dag zijn diverse camera systemen beschikbaar die geïntegreerd kunnen worden met de aansturing van een cobot systeem [11].

Een vision systeem maakt typisch gebruik van contrast tussen het object en de achtergrond om de contour van het object te bepalen, die vervolgens gebruikt wordt om de locatie en oriëntatie vast te stellen. Hiermee kan vanuit een ongestructureerde productstroom structuur aangebracht worden die gebruikt kan worden om de producten op te pakken. Hierbij kunnen verschillende liggingen van het object ingeleerd worden om voor elk mogelijke oriëntatie van het object een specifieke oppak-strategie toe te passen. Daarnaast is er geen product specifieke hardware nodig waardoor deze methode geschikt is voor processen met veel product-variatie en wisselingen in het productieproces. Daarbij kan het vision systeem zelfs ingezet worden om niet alleen de locatie en oriëntatie te bepalen, maar ook om verschillende producten van elkaar te onderscheiden en te herkennen. Een nadeel van een vision systeem is vaak de relatief lange (cyclus)tijd die nodig is om de afbeelding te maken en te verwerken. Voor systemen waar een cobot goed tot zijn recht komt, vaak processen met een ruime cyclustijd, vormt dit echter niet altijd een beperking.

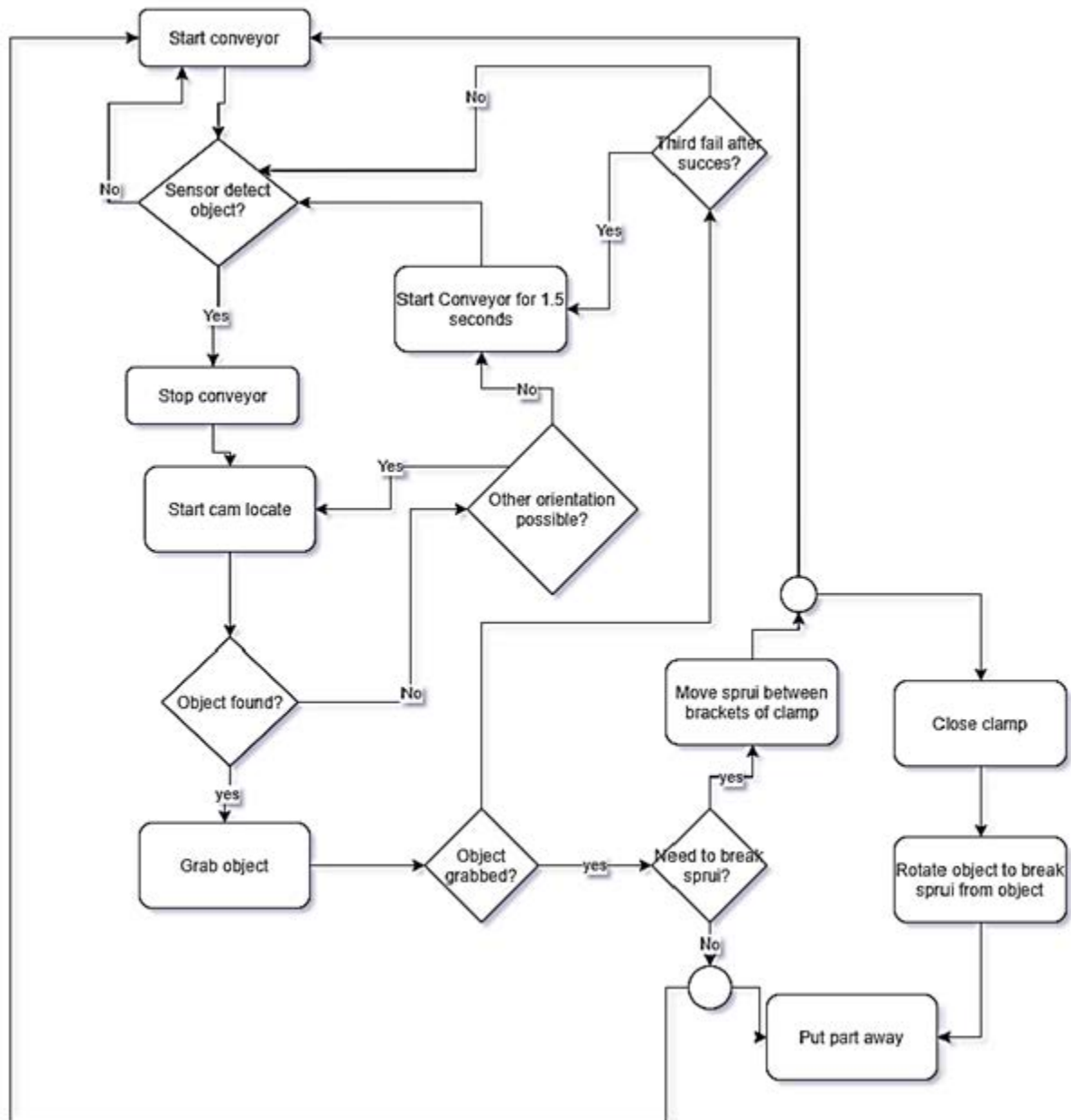
Bij het inzetten van 2D vision systemen moet er wel rekening gehouden worden met de vraag of alle mogelijke contouren van het product (voor verschillende liggingen) uniek gelinkt kunnen worden aan een oriëntatie van het product. Het is namelijk noodzakelijk dat voor ieder mogelijke oriëntatie (op de linker zijkant, rechter zijkant, bovenkant, etc.) de contour eenduidig gekoppeld kan worden aan de oriëntatie van het object. Ter illustratie, het L-vormige object weergegeven in figuur 4.1 kan in vijf verschillende oriëntaties liggen zonder om te vallen (in de zesde verticale oriëntatie, waarbij de L-vorm ondersteboven staat, kan van nature niet voorkomen). Wanneer de zij-contouren zichtbaar zijn, kunnen deze uniek gekoppeld worden aan de oriëntatie van het object. Wanneer de oriëntatie van het object dusdanig is dat alleen het bovenste vlak zichtbaar is, zijn twee oriëntaties van het object mogelijk (180 graden ten opzichte van elkaar gedraaid). Bij deze oriëntatie is het onderscheid afhankelijk van de mate waarin de contourlijn zichtbaar is. Deze lijn is als licht-rode lijn aangegeven in figuur 4.1 bij de bovenaanzichten. Deze contourlijn zal moeilijker te onderscheiden zijn dan de buitencontouren, wat een minder robuust proces voor herkenning oplevert. Een mogelijkheid dit te verbeteren is een metalen staaf boven de aanvoerband aan te brengen, die eventuele 'rechttopstaande' producten omgooit, zodat alle producten vanuit het zij-aanzicht herkend worden. Deze methode brengt minder flexibiliteit met zich mee omdat bij een ander product de positie van de metalen staaf aangepast moet worden en alleen het aanpassen van de software niet voldoende is. Bij toepassing van een 2D vision systeem die product herkenning mogelijk maakt aan de hand van het contour, zijn dus de mogelijke oriëntaties van een product een belangrijk aspect dat meegenomen, of "voorkomen" moet worden.

Een schematisch voorbeeld van de workflow van een cobot die gebruik maakt van een vision systeem om structuur aan te brengen in een ongestructureerde toevoer van producten is weergegeven in figuur 4.2 en wordt in hoofdstuk 4.4.1 verder beschreven. In dit voorbeeld registreert een sensor (in dit geval een lichtsluis) de aanwezigheid van een object en stopt de transportband



Figuur 4.1: Contouren van de zij- en bovenaanzichten van een L-vormig object. De zij aanzichten kunnen uniek gekoppeld worden aan de oriëntatie van het object, de bovenaanzichten zijn minder robuust voor het herkennen van de oriëntatie. De stippel-lijn is voor de camera moeilijker te onderscheiden dan de buitencontouren.

die voor de toevoer van producten zorgt. Vervolgens wordt met behulp van de camera de positie van het object op de band bepaald en wordt deze opgepakt door de cobot. Indien nodig wordt vervolgens de aanspuittak afgebroken. Extra controle stappen zijn ingebouwd om tussentijdse fouten (product wordt bijvoorbeeld niet goed opgepakt door de cobot) of niet gedetecteerde onderdelen af te vangen.



Figuur 4.2: Schematisch overzicht van de proces logica voor het herkennen en bepalen van de product locatie op een lopende band

3D vision

Voor sommige scenario's is het niet mogelijk om individuele producten te herkennen en lokaliseren aan de hand van een 2D vision systeem. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat de oriëntatie niet bepaald kan worden aan de hand van de contour, de producten in bulk gestort liggen, of tegen en over elkaar kunnen liggen. Een mogelijke oplossing hiervoor is een 3D vision systeem.

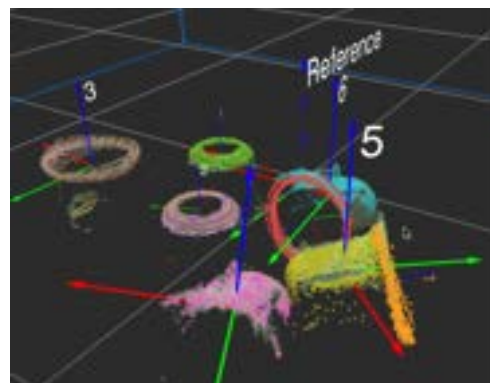
Een 3D vision systeem maakt gebruik van een camera die diepte kan waarnemen om zo een 3-dimensionaal beeld te maken. Veel voorkomende methodes voor het maken van het 3D beeld zijn stereoscopie, structured light en time-of-flight camera systemen. Ook laser triangulatie wordt toegepast. Deze methodes bepalen de 3D hoogte informatie op basis van:

- **Stereoscopie:** op basis van meerdere beelden (vaak twee) vanuit verschillende invalshoeken met verschil in perspectief.
- **Structured light:** op basis van een geprojecteerd lichtpatroon dat vervormt onder invloed van hoogteverschillen.
- **Time-of-flight:** op basis van een uitgezonden lichtsignaal waarbij de tijdsduur wordt gemeten totdat het licht terug valt op de sensor.
- **Laser triangulatie:** op basis van laser triangulatie waarbij de plek waar het laser signaal terugvalt op de sensor bepalend is voor de gemeten afstand

Een belangrijke overeenkomst tussen de verschillende methoden is dat 3-dimensionale informatie wordt gegenereerd, vaak in de vorm van een puntenwolk, die gebruikt wordt om de individuele onderdelen te herkennen. Een voorbeeld van een 3D beeld van 6 assemblages van de case zoals beschreven in hoofdstuk 2.3.2 is weergegeven in figuur 4.3. De 3D data voor dit voorbeeld is gemaakt met behulp van een Pickit HD 3D camera systeem. Hierbij is zichtbaar dat de individuele objecten worden gedetecteerd en de oriëntatie juist bepaald kan worden. Deze locatie en oriëntatie kan vervolgens gebruikt worden om een cobot aan te sturen om de onderdelen op te pakken. Wel moet opgemerkt worden dat de camera "slechts" een beperkt zichtveld heeft waardoor onderdelen met een klein zichtvlak vanuit het perspectief van de camera (onderdeel 1 en 2) weinig 3D data bevatten waardoor onderdelen soms lastig te detecteren kunnen zijn. Anders geformuleerd, het 3D vision systeem kan van een 3D object alleen de "zichtbare" vlakken van een object zien en niet het volledige 3D object inclusief de achterzijde reconstrueren. Daarvoor zijn andere technieken nodig, waarbij het object of het 3D vision systeem beweegt.



(a) 2D beeld vanuit bovenaanzicht



(b) 3D puntenwolk

Figuur 4.3: Camerabeeld van 6 assemblages gemaakt met de Pickit 3D camera

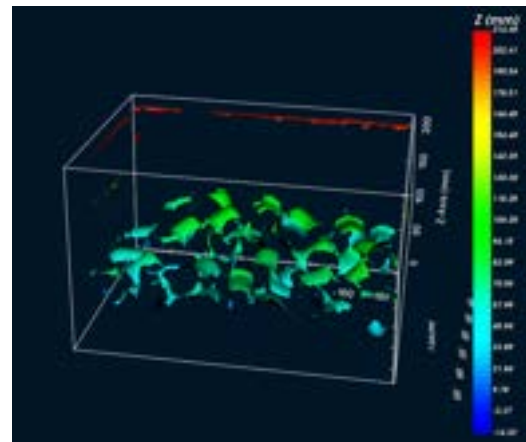
Voor onderdelen met goed gedefinieerde 3D kenmerken kan een 3D vision systeem uitkomst bieden. Met name als de producten "verenkeld" zijn en los van elkaar liggen, is de 3D informatie vaak goed bruikbaar. Echter, voor sommige toepassingen waarbij dit niet het geval is,

bijvoorbeeld een bak gevuld met onderdelen, is het lokaliseren van de producten complexer. Een voorbeeld van onderdelen die willekeurig in een bak liggen, met het bijbehorende 3D beeld, is weergegeven in figuur 4.4. Uit het 3D beeld is het identificeren en herkennen van de oriëntatie van de individuele delen complexer omdat de onderdelen vaak slechts voor een klein deel zichtbaar zijn. Daarnaast is de overgang tussen de individuele onderdelen minder duidelijk. Hiermee moet in de toepassing rekening gehouden worden. Dit kan bijvoorbeeld bij het uit de bak pakken van onderdelen door te identificeren welk onderdeel 'bovenop' ligt en deze met een cobot te pakken. Vervolgens kan opnieuw een 3D beeld gemaakt worden, aan de hand waarvan bepaald wordt welk onderdeel vervolgens als beste gepakt kan worden.

Of onderdelen geschikt zijn voor herkennen door middel van 3D vision (of 2D vision) hangt sterk af van de eigenschappen van het product. Aspecten zoals materiaal, glans, transparantie, vorm en kleur spelen hierbij een belangrijke rol, waardoor veelal per individueel geval onderzocht moet worden hoe goed het onderdeel herkend en opgepakt kan worden. Daarnaast vormt de bak zelf een extra obstakel, dat ontweken moet worden bij het oppakken van de onderdelen uit een bak. Daarvoor moeten naast een juiste inzet van een vision-systeem ook de juiste oriëntatie van de cobot bij het oppakken gerealiseerd worden en geschikte grippers ingezet worden. Daardoor is met 3D vision systemen het succesvol herkennen, bepalen van de oriëntatie van het product en het oppakken veelal niet 100% gegarandeerd (niet ongebruikelijk dat het vaker niet dan wel lukt) en is het noodzakelijk om extra controle stappen in te bouwen om te zorgen dat de producten juist worden aangevoerd. Daarnaast kan er rekening mee gehouden worden dat bijvoorbeeld de laatste producten niet meer uit de bak gehaald kunnen worden en de operator deze bij het wisselen van een bak eerst in de volgende bak moet doen. Het geautomatiseerde systeem kan vervolgens weer autonoom verder werken.



(a) 2D beeld van bovenaanzicht vanuit één van de twee camera's



(b) 3D puntenwolk, de kleur geeft de hoogte van de punten in de puntenwolk

Figuur 4.4: Camerabeeld van gevulde bak met baskets gemaakt met een Solomon 3D stereo camera

Mechanisch positioneren

Vision systemen hebben een aantal voordelen voor het lokaliseren en herkennen van producten, zo is het breed inzetbaar voor veel verschillende onderdelen en kan het te verwerken product makkelijk gewijzigd worden zonder hardwarematig omstellen. Het is zelfs mogelijk om verschillende producten door elkaar te herkennen en te verwerken. Maar vision systemen komen ook met een aantal uitdagingen, zoals relatief hoge kosten, gevoeligheid in variatie van omgevingslicht, verwerkingstijd voor de beelden en is de implementatie ervan niet altijd even robuust en mogelijk storingsgevoelig. Met name voor processen met grote aantallen producten en geringere product variatie kan een mechanische oplossing dan ook uitkomst bieden.

De meest eenvoudige variant voor het mechanisch positioneren van onderdelen is door gebruik te maken van een mechanische aanslag. Als de locatie van een onderdeel bijvoorbeeld bij benadering bekend is, kan de cobot het onderdeel oppakken en tegen een aanslag aanduwen. Door gebruik te maken van de kracht-terugkoppeling van de cobot, kan de aanslag gedetecteerd worden en de positie van het object relatief aan de cobot bepaald worden. Een andere oplossingsroute is om het onderdeel in een mechanische aanslag te laten vallen of glijden, waardoor deze op een exact gedefinieerde plek komt te liggen. Voorwaarde voor deze methode is wel dat het product hiervoor geschikt is, en dat de locatie van het product bij benadering bekend is (bijvoorbeeld het beladen van gesneden plaatmateriaal vanuit een stapel)

Een ander mechanisch systeem dat veel gebruikt wordt en bij de toevoer van (vaak kleine) componenten, zijn trilvullers. Door gebruik te maken van een trillende bak of kom worden onderdelen juist georiënteerd en aangevoerd richting de oppak locatie. Echter moet dit systeem vaak wel ontwikkeld worden voor een specifiek product en is het niet multifunctioneel en flexibel inzetbaar.

Voor een brede inzetbaarheid zijn er inmiddels ook systemen op de markt die gebruik maken van trilplaten om producten te scheiden en juist te oriënteren. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 4.5. De producten komen door de trilplaat in een willekeurige volgorde te liggen en vervolgens wordt met behulp van een camerasysteem bepaald welke producten in de juiste oriëntatie liggen en deze worden opgepakt. Als alle herkende producten opgepakt zijn, trilt de trilplaat om de onderdelen te draaien en te verplaatsen. Hiermee kunnen de producten alsnog gedetecteerd en opgepakt worden. Dit heeft als voordeel dat het breder inzetbaar is voor verschillende onderdelen zonder dat er een productspecifieke oplossing ontstaat.



Figuur 4.5: Asycube flexibele productfeeder met 2D vision systeem [12]

Overzicht

Een schematisch overzicht van verschillende systemen die gebruikt kunnen worden voor de aanvoer van producten, met name voor processen met veel variatie en wisselingen in het productieproces, zijn weergegeven in tabel 4.1

	Snelheid	Verenkelde invoer noodzakelijk	Bekende aanvoerlocatie noodzakelijk	productspecifiek
Productaanvoer vanaf exacte locatie	o	ja	ja	soms
2D vision	-	ja	nee	nee
3D vision	-	soms	nee	nee
Mechanische aanslag	-	ja	ja	nee
Trilvuller	+	nee	nee	ja
Trilplaat + camera	-	nee	nee	nee

4.2 Koppeling met bestaande systemen

Daar waar cobots tot hun recht komen in een high mix - low volume productieproces, komt het omschakelen van product A naar product B vaak voor. Belangrijk daarbij is dat binnen het proces (en dus voor de cobot) bekend is welk product er verwerkt gaat worden. In sommige productielijnen is deze informatie eerder in het proces al beschikbaar, en is het zaak deze informatie te delen met, en te gebruiken voor, de aansturing van de cobot.

Communicatie met de rest van het besturingssysteem is daarbij essentieel om een proces effectief aan te kunnen sturen. Moderne productiesystemen worden digitaal aangestuurd, waarbij communicatie gebeurt via een digitaal communicatie protocol zoals Modbus, Profibus, Profinet, Ethernet/IP of één van de vele andere protocollen die gebruikt worden. Hiermee kan proces-, diagnostische en stuurinformatie uit het systeem opgevraagd worden.

Als er bij de bestaande systemen is voorzien in ondersteuning en interfaces om informatie uit het bestaande proces/machine uit te lezen, en eventueel een stuursignaal te sturen, dan behoort (digitale) integratie in bestaande systemen tot de mogelijkheden. Echter blijken bestaande machines niet altijd ondersteuning te bieden voor communicatie met externe systemen of is ondersteuning en documentatie schaars waardoor implementatie tijdrovend kan blijken omdat deze machinespecifiek is. Daarbij komt ook, bij interactie tussen beide systemen, dat veiligheidsvoorzieningen aan elkaar gekoppeld moeten worden (bijvoorbeeld het doorverbinden van veiligheidscircuits). Hierdoor kan integratie met bestaande systemen een complexe opgave zijn.

Om toch een stap te zetten op het gebied van automatisering kan er daarom gekozen worden om de systemen effectief van elkaar te scheiden, waarbij ze los van elkaar, maar wel samen met elkaar, kunnen opereren. Hierdoor blijft het oorspronkelijke systeem ongewijzigd en fungeert, bijvoorbeeld de cobot, als een extra toevoeging aan het systeem. Het verkrijgen van proces informatie kan dan gerealiseerd worden vanuit extra sensoriek (zie bijvoorbeeld de lichtsluis in de case uit sectie 4.4.1. Als alternatief kan proces informatie verkregen worden vanuit externe hardware, zoals is toegepast bij het scannen van een barcode op de mal om proces specifieke informatie te kunnen verkrijgen (sectie 2.3.1). Om bij dit laatste voorbeeld te blijven zijn er onder andere de volgende twee varianten mogelijk om de informatiestromen te realiseren om de juiste software in de cobot te laden: 1. vanuit de orderinformatiesystemen kan gehaald worden welk product bewerkt wordt. 2. een bar- of QR-code op een productspecifieke mal wordt gelezen.

4.3 Kwaliteitsinspectie

In productieprocessen waarbij een operator aanwezig is wordt de inspectie van kwaliteit van de geproduceerde of geassembleerde onderdelen vaak (al dan niet bewust) meegenomen door de operator. Vrijwel onmiddellijk wordt het dan duidelijk wanneer iets niet goed is gegaan en corrigeert de operator dat indien mogelijk. Bij het automatiseren van processen is dit aspect iets wat meestal extra aandacht nodig heeft. Het niet meenemen van kwaliteitsinspectie als integraal onderdeel van de productielijn komt namelijk met het risico dat een gehele productie batch afgekeurd wordt. Waar mensen vrijwel onbewust checken of niet alleen halffabrikaat maar ook eindproduct aan de gestelde kwaliteit voldoen, vergt dit bij een geautomatiseerd proces de nodige aandacht. Voor veel processen is het dus van belang dat verzekerd wordt dat de kwaliteit van het proces (zowel halffabrikaat als eindproduct) voldoet aan de eisen en dat deze kwaliteit eventueel gelogd wordt.

Een voor de hand liggende oplossing is het kopiëren van de visuele vaardigheden van de mens. Dus met een vision systeem, geschikte belichting en dito softwareverwerking om vervolgens een visuele check te doen van het onderdeel. Los van de bijkomende complexiteit en kosten, loopt men specifiek in de kunststof industrie vaak tegen de beperkingen van het onderscheiden van (semi)transparante onderdelen aan. Ook reflectie (van zowel product als achter-/ondergrond) en externe lichtvervuiling zijn variabelen die nauwkeurig beheerst moeten worden om een robuust en betrouwbaar controleproces te kunnen creëren.

Op het gebied van (2D) camera systemen voor product herkenning en lokalisatie bieden cobot leveranciers veelal “standaard” oplossingen die relatief laagdrempelig in te zetten zijn. Voor kwaliteitsinspectie zijn de standaard oplossingen echter beperkt, en is veelal een specifiek ontworpen oplossing nodig. Dit betekent in de praktijk dat er uitgebreid gekeken moet worden naar een geschikte camera, optiek, belichting en beeldverwerkingssoftware, wat specialistische kennis vergt en per controle en product vaak specifiek ingericht dient te worden. Daarnaast moet de cobot ook kunnen handelen op basis van output van de kwaliteitsinspectie, waardoor extra communicatie en/of hardware (bijvoorbeeld een PLC) nodig kan zijn om de systemen met elkaar te kunnen verbinden. Een voorbeeld van kwaliteitsinspectie door middel van een industrieel camerasysteem wordt verder besproken in sectie 4.4.1

Een minder complexe oplossing voor de borging van de kwaliteit kan ook gehaald worden uit andere sensor input, denk hierbij bijvoorbeeld aan meetdata van de cobot zelf (bijvoorbeeld kracht terugkoppeling op de toolflens) of externe meetinstrumenten (ultrasoon scanner, weegschaal, output van externe actuator). Voor sommige toepassingen kan deze informatie voldoende zijn om een beoordeling te kunnen geven van het proces. Een goed voorbeeld hiervan is gegeven in hoofdstuk 2.3.2, waarbij de grootte van de perskracht gebruikt wordt om te monitoren of het product correct is geassembleerd. Aangezien deze meetwaardes makkelijker te interpreteren en te controleren zijn (product is bijvoorbeeld goed als de waarde binnen een vaste range valt), geeft dit een laagdrempeligere oplossing die ook eenvoudiger ge(her)configureerd kan worden voor andere productseries.

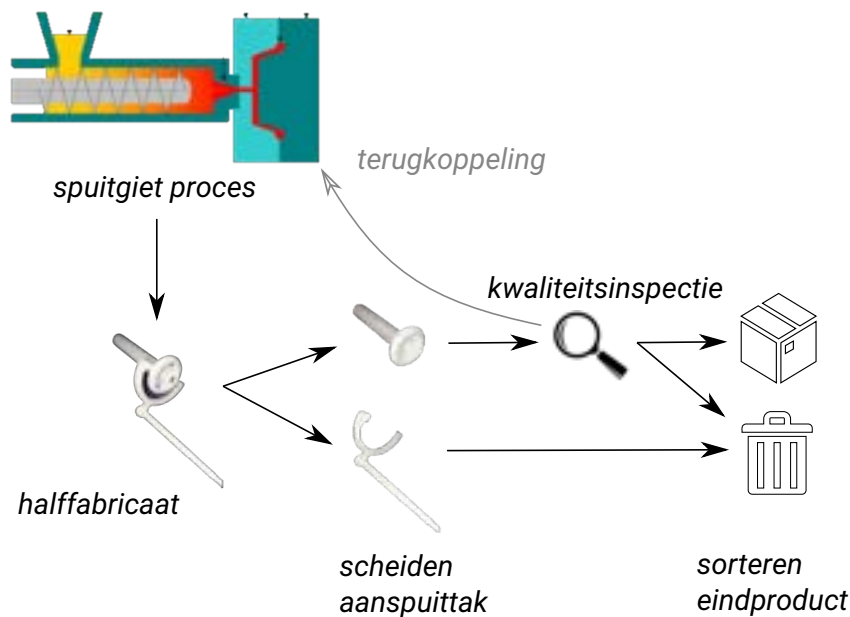
4.4 Voorbeeldcases: Integratie in (bestaande) systemen

In verschillende cases is in praktijk gebracht hoe en waar een cobot in te passen is in een bestaand productieproces in de kunststofindustrie. Interactie met de operator en communicatie met de omliggende systemen staan hierbij centraal.

4.4.1 Onderzoekscase: scheiden van aanspuittak en kwaliteitsinspectie - Project-partner Moba

Deze onderzochte automatiseringscase heeft betrekking op het scheiden en verwijderen van de aanspuittak van spuitgegoten onderdelen bij onderzoekspartner Moba. Moba is wereldwijd toonaangevend fabrikant voor machines voor het sorteren, verpakken en verwerken van eieren. Alle spuitgietonderdelen van de onderdelen voor deze machines worden in een eigen spuitgietafdeling gefabriceerd. Het matrijzenbestand bestaat uit circa 1650 matrijzen waarmee ruim 2000 verschillende onderdelen geproduceerd kunnen worden. Het grootste deel van de onderdelen worden in relatief kleine series geproduceerd. Veel van de nabewerkingen, zoals bijvoorbeeld het verwijderen van de aanspuittak en het controleren van de kwaliteit van de spuitgegoten onderdelen, worden nu nog met de hand gedaan. Voor deze case is de motivatie om met automatisering het mogelijk maken van productie van onderdelen gedurende meer dan acht uur per dag, zodat de productiecapaciteit kan worden verhoogd zonder dat er uitbreiding en grote investeringen in het machinepark noodzakelijk zijn. Hierbij biedt de grote variatie aan verschillende producten en de relatief kleine series een grote uitdaging. Belangrijk voor deze case zijn lage omsteltijden en het vermijden van product specifieke tooling vanwege de grote diversiteit aan producten die geproduceerd worden. Een voorbeeld van het productieproces van één van de onderdelen die gebruikt is voor deze case is weergegeven in figuur 4.6, waarbij één halffabricaat van het product elke 20 seconden uit de spuitgietmachine komt.

Bij dit productieproces vallen de onderdelen vanuit de spuitgietmachine op een lopende band. Bij het huidige proces worden de onderdelen verzameld in een bak, waarbij vervolgens naderhand handmatig de aanspuittakken worden verwijderd en de aanspuittak wordt gesorteerd van het onderdeel. Voor de automatiseringsoplossing is gebruik gemaakt van een cobot (de universal robots UR10e [8]) gecombineerd



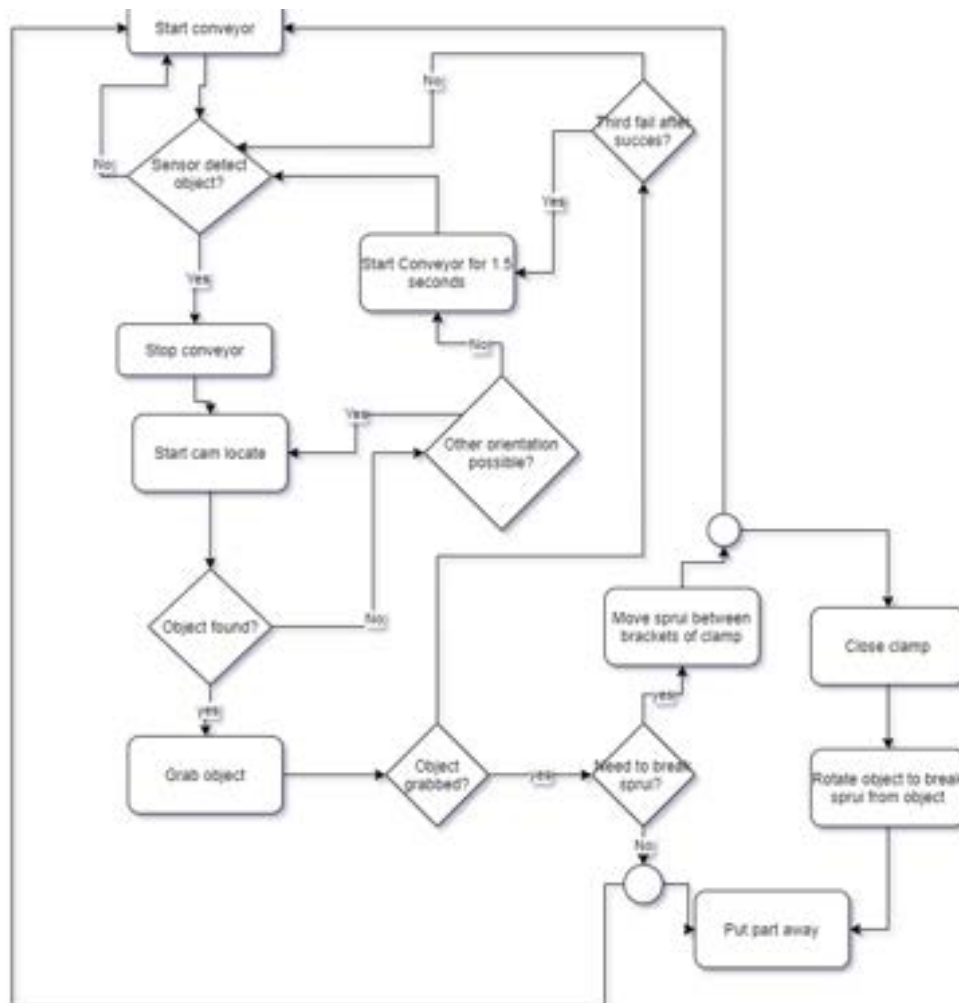
Figuur 4.6: Schematisch overzicht van productieproces

met een Robotiq wrist camera [9] voor het herkennen en lokaliseren van halffabricaten op de aanvoerband. Belangrijk aspect voor deze casus is om een generieke oplossing te bieden voor de grote diversiteit aan onderdelen die geproduceerd worden, zonder dat er noodzaak is tot het (hardwarematig) omstellen van het systeem of het verbinden van de cobot-opstelling met de spuitgietmachine.

De onderzochte oplossing bestaat hierbij uit een cobot die met behulp van een camera aangevoerde halffabricaten herkent en detecteert. Voor dit doel is de lopende band uitgerust met een optische sensor die de lopende band stopt zodra het product de lichtstraal van een sensor passeert. Nu de positie van het onderdeel bij benadering bekend is (namelijk ter hoogte van de optische sensor), wordt met behulp van de camera de exacte locatie van het product bepaald en wordt het product opgepakt. Deze manier van detectie is universeel toepasbaar voor een groot aantal producten waarbij de (2D) contour van het product voldoende unieke informatie bevat om de oriëntatie en locatie van het product te kunnen bepalen met de camera. Voor het product weergegeven in figuur 4.6 zijn twee unieke poses mogelijk met betrekking tot de ligging van het onderdeel. Voor de detectie van het onderdeel is het dus belangrijk om alle mogelijke poses in kaart te brengen en een bijbehorende geschikte oppak-strategie te bepalen. Dit betekent dat in de proces-afloop voor elke mogelijke pose herkenning en oppakken ingeleerd moet worden. Opgemerkt moet worden dat de pose van sommige producten niet altijd bepaald kan worden aan de hand van enkel een 2D contour, en dus met behulp van een 2D camerasysteem.

Nadat de locatie van het product bepaald is, wordt deze opgepakt door de cobot. Voor het oppakken wordt in dit project gebruik gemaakt van de E-hand gripper van Robotiq. Een belangrijk aspect voor tooling en grippers voor cobots is dat ook deze moeten voldoen aan de "colaboratieve" eisen die gelden voor de cobot. Dit betekent voor de gebruikte gripper dat de kracht die uitgeoefend wordt door de gripper gemonitord en gelimiteerd wordt om te voldoen aan deze veiligheidseisen. Hiervoor beschikt de gripper over kracht-terugkoppeling die ook gebruikt kan worden om het object met lichte grijpkracht vast te pakken om te voorkomen dat het product beschadigd of vervormd raakt. Daarnaast kan de gemeten kracht gebruikt worden om te verifiëren of het product correct opgepakt is. Indien dit niet het geval is, kan hier naar gehandeld worden, bijvoorbeeld door de product lokalisatie met de camera opnieuw uit te voeren (mogelijk scenario; het product valt tijdens het oppakken uit de gripper en is op een nieuwe plek terecht gekomen).

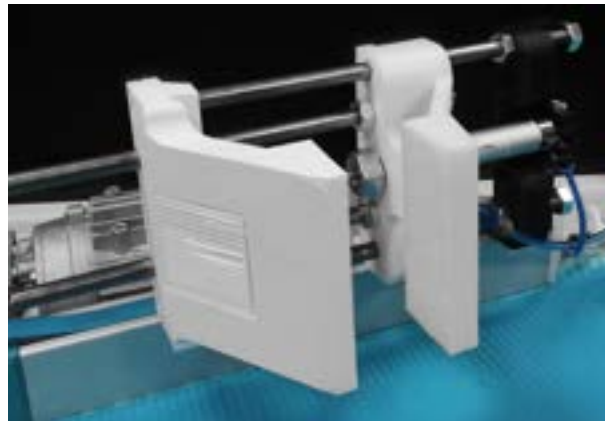
Als de cobot het product heeft opgepakt kan de aanspuittak worden verwijderd. Voor deze taak is een pneumatische gripper, lijkend op een bankschroef, ontworpen die gebruikt kan worden om de aanspuittak los te breken (figuur 4.8). Bij dit proces wordt de aanspuittak in de klem gefixeerd, waarna de cobot het product losbreekt van de aanspuittak met een draaiende beweging. Vervolgens kan de cobot het product ter controle aanbieden bij een kwaliteitsinspectie station, waarna het weggelegd wordt in de



Figuur 4.7: Proces logica voor het verwijderen van de aanspuittak

desbetreffende doos. Een uitgebreid overzicht van de proces logica is weergegeven in figuur 4.7, inclusief de uitgevoerde acties bij een foutieve product identificatie.

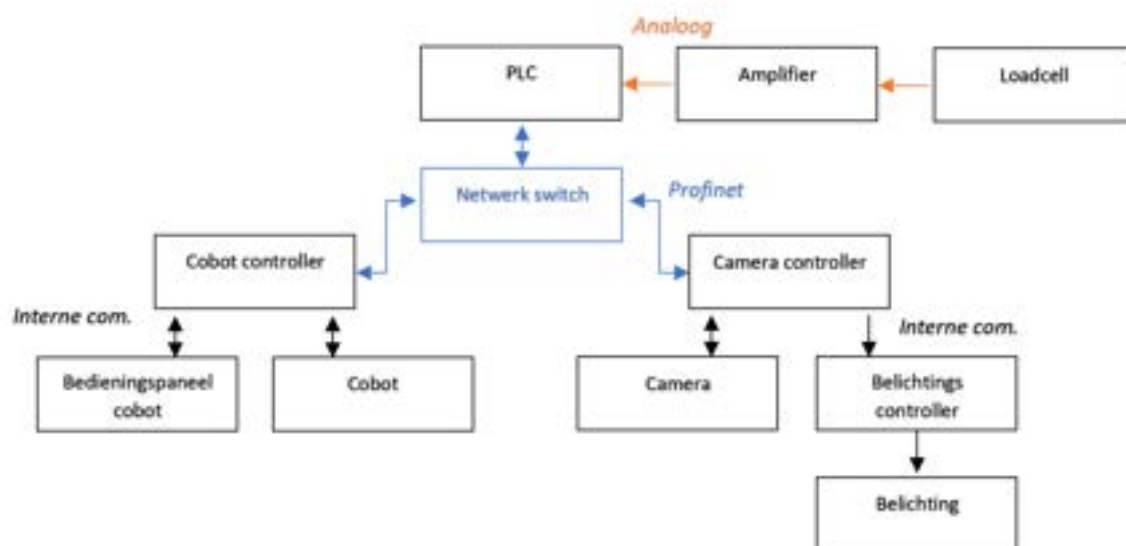
Doordat de locatie van de producten bij dit proces wordt bepaald met behulp van een camera systeem en niet afhankelijk is van product specifieke tooling, is het systeem inzetbaar voor een breed scala aan verschillende onderdelen. Zo is het mogelijk om het systeem elders in te zetten zonder hardware-matig omstellen. Daarnaast kan door het ontbreken van de afscherming bij de cobot, het systeem relatief eenvoudig ingezet worden bij andere bestaande productielijnen zonder dat dit grote impact heeft op het beschikbare vloeroppervlak en de aanwezige infrastructuur.



Figuur 4.8: Pneumatische “bankschroef” voor het verwijderen van de aanspuittak

Voor de kwaliteitscontrole van de spuit gegoten onderdelen zijn voor deze case een aantal aspecten belangrijk, zoals gewicht, kleur en afmeting. Verkregen informatie en meetdata dient te worden opgeslagen met als mogelijk lange termijn doel om in-the-flow het spuitgiet proces aan te kunnen passen (bijv. het bijsturen van de temperatuur) en om foutieve producten uit het proces te verwijderen. Voor de realisatie van kwaliteitsinspectie, in combinatie met de koppeling met de cobot en periferie, is een PLC gebruikt als centraal punt voor de communicatie en aansturing. Een PLC is gebruikt om ondersteuning te bieden voor de sensoren (o.a. een loadcell die via een amplifler een analoog signaal uitstuurt), en de communicatie tussen de cobot en PLC, en de camera en PLC via een Profinet verbinding.

Om het gewicht van de spuitgietdelen te verifiëren is gebruik gemaakt van een loadcell. Via een amplifler wordt het signaal van de loadcell versterkt die vervolgens via een analoog signaal ingelezen wordt op de PLC. Op het moment dat de cobot een product op de loadcel heeft geplaatst ontvang de PLC een signaal van de cobot waarna het gewicht wordt vastgelegd. Vervolgens biedt de cobot het product aan bij een camera station die kleur, belangrijke contouren en/of maten van het onderdeel verifieert. Een schematisch overzicht van de workflow is weergegeven in figuur 4.9.

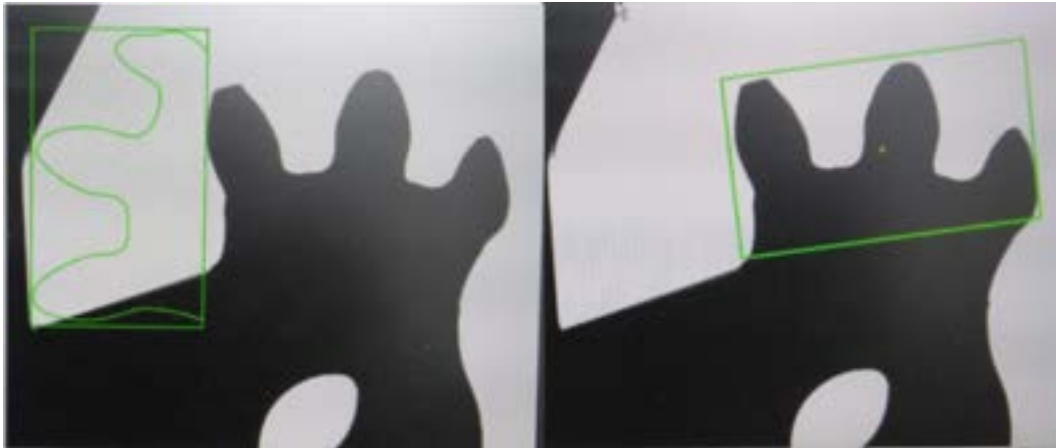


Figuur 4.9: Flow diagram van de gerealiseerde kwaliteitsinspectie voor spuitgegoten onderdelen

Voor de kwaliteitsinspectie met behulp van vision is gebruik gemaakt van een Omron FH-SMX05 camera met 5MP sensor in combinatie met een TC23024 telelens van Opto engineering. Door gebruik te maken van een telecentrische lens representeren de pixels van de camera's een vaste effectieve afmeting. Hierdoor heeft de afstand van het controleren oppervlak ten opzichte van de lens geen invloed op de “maatvoering” zoals deze gedetecteerd wordt door de camera. Met name voor het nauwkeurig con-

troleren van belangrijke maten en toleranties is dit van belang. Zo is voor het product weergegeven in figuur 4.6 de afmeting van het cilindrische onderdeel belangrijk. De geselecteerde camera met optiek geeft hierbij een resolutie van $10\mu m$, waarmee een nauwkeurigheid behaald kon worden van $\pm 0.02mm$, wat voldoende is om de gewenste geometrische tolerantie te kunnen verifiëren.

Voor een ander onderdeel is de verificatie van de aanwezigheid, en correcte vorm, van de vertanding (als in een segment van een tandwiel aanwezig op het onderdeel) van belang. Om dit te verifiëren is de bekende (correcte) geometrische contour van de vertanding gebruikt, die "opgezocht" wordt in het te controleren onderdeel. Bij de juiste aanwezigheid van de vertanding kan deze geometrie herkend worden en wordt het onderdeel "goedgekeurd". Kan de geometrie niet gevonden worden, dan is de vertanding onjuist en betreft het een afkeur. Een voorbeeld van de onderzochte geometrie voor het controleren van de vertanding is weergegeven in figuur 4.10



Figuur 4.10: Kwaliteitscontrole doormiddel van de zogeheten "Shape Serach III" methode van het Omron FH systeem. Links het aangeleerde model in groen en rechts de gevonden vorm in geanalyseerde foto (product OK)

Opgemerkt moet worden dat voor de controle van verschillende onderdelen, of verschillende aspecten binnen eenzelfde onderdeel, er geschakeld moet worden tussen verschillende programma's binnen de vision software (ook wel scene's genaamd). Door gebruik te maken van de Profinet communicatie tussen PLC en de controller voor het vision systeem kan de PLC ook een stuursignaal sturen naar de camera controle waarmee er gewisseld kan worden tussen verschillende "scene's". Hierdoor kan zonder omstellen geschakeld worden tussen verschillende producten, waarbij de PLC het centrale punt is die bepaald welke controle wanneer uitgevoerd moet worden. Daarbij kan ook, voor elk gewenst product, de benodigde belichting aangepast worden voor de desbetreffende controle.

5. Conclusie en samenvatting

Doel van het CoKu project is om voor de fabricage van middelgrote en kleine series kennis te ontwikkelen rondom de inzet van cobots (collaboratieve robots). Dit project is daarbij toegespitst op bedrijven in de kunststofverwerkende industrie. Om deze doelstelling praktisch te maken, is het project opgedeeld in drie werkpakketten:

1. De plek van cobots binnen een huidig productieproces.
2. Flexibele en multifunctionele tooling.
3. Integratie in (bestaande) systemen.

Door middel van meerdere cases zijn voor elk van deze werkpakketten concrete proof-of-principles gerealiseerd. Daaruit zijn generieke methoden en handreikingen opgesteld die door een breed scala aan bedrijven in de kunststofindustrie ingezet kunnen worden om een cobot in te zetten, danwel te integreren in een bestaand productieproces. Daarmee is het projectdoel gerealiseerd.

Concreet is met de projectpartners tenminste één case onderzocht en een demonstrator gerealiseerd. Verschillende cases zijn:

1. Positioneren van composiet “blanks” in een productpers bij Collins Aerospace. Uitdagingen hierbij zijn:
 - Kleine series en de grote productvariatie wat vorm en maat betreft.
 - Nauwe tolerantie bij het positioneren als gevolg van meerdere vaste uitlijnposities.
 - Niet vlakke producten.
2. Plaatsen van stoffen zolen in rubberlaarzen bij Dunlop Protective Footwear. Uitdagingen hierbij zijn:
 - Grote range in afmetingen.
 - Flexibiliteit, het niet vormvast zijn van het materiaal, voor zowel zolen als laarzen.
 - Korte beschikbare cyclustijd.
3. Assemblage van drie spuitgegoten producten in combinatie met een metalen drukveer bij Alligator Plastics. Uitdagingen hierbij zijn:
 - Productpicking vanuit losgestorte halffabrikaten.
 - Kwaliteitscontrole van zowel halffabrikaat als eindproduct.
 - Procesoptimalisatie van de verschillende handelingen (zowel van cobot als medewerker) om de vereiste cyclustijd te realiseren.
4. Scheiden van aanspuittakken en kwaliteitscontrole van spuitgegoten onderdelen bij MoBa. Uitdagingen hierbij zijn:
 - Productherkenning, zowel locatie op transportband als positie aanspuittak.
 - Productbelichting t.b.v. kwaliteitscontrole (specifiek: afmetingen van het product).
 - Kracht leveren voor het scheiden van de aanspuittak.

Samenvattend hebben deze projecten gezamenlijk geleid tot inzicht in het (semi)automatiseren van high mix - low volume productie processen met relatief lage seriegroottes. Concrete leerpunten uit het CoKu project zijn:

- De plek van cobots binnen productieprocessen vindt men met name bij: processen met relatief lange cyclustijd, processen waarbij een deel van het proces geautomatiseerd wordt en processen waarbij samen met of dicht bij een operator gewerkt wordt.
- Vision kan ingezet worden voor product- en procesherkenning zodat cobots effectiever ingezet kunnen worden voor processen met veel variatie.
- De ingebouwde kracht-terugkoppeling van de cobot kan gebruikt worden voor positioneercontrole en het inbouwen van extra robuustheid tegen procesvariatie.
- Voor een optimaal proces is de combinatie geschikt van een cobot en externe componenten (pneumatische pers, -cilinders, PLC) waarbij de cobot of een PLC het proces aanstuurt.
- Kennis is opgedaan hoe cobots te integreren met bestaande systemen en bijbehorende communicatieprotocollen.
- Controle/beheersing van belichting bij (kwaliteits)inspectie van onderdelen is belangrijk voor een goed resultaat. Denk ook aan omgevingslicht!
- Een flexibel inzetbare gripper is belangrijk, al dan niet door eigen ontwerp (b.v. vacuümcups, aan te sturen in verschillende zones) dan wel gebruik van inkoopdelen (naaldgripper) in combinatie met eigen ontworpen componenten.
- De geautomatiseerde aanvoer van halffabrikaten en onderdelen (binpicking danwel geordende aanvoer/productdrager) is een niet te onderschatten activiteit. Het is belangrijk hier de nodige aandacht aan te schenken.

Eenvoudige handelingen zijn in de regel goed te automatiseren met een cobot. De binnen CoKu uitgevoerde projecten hebben aangetoond dat ook complexere taken te automatiseren zijn met een cobot. Echter, daarbij nemen ook de uitdagingen en de complexiteit van de automatiseringstaak toe. Dit rapport geeft een beeld van welke uitdagingen aan bod (kunnen) komen, welke oplossingen hiervoor succesvol geïmplementeerd zijn en hoe met soortgelijke uitdagingen om te gaan. Al met al hebben we beoogd met dit rapport een waardevolle bron voor een brede inzet in praktijkgericht onderzoek, onderwijs en het bedrijfsleven ter beschikking te stellen.

Bibliografie

- [1] L. v. Koert, "Cobotaandeel robotmarkt 29 procent in 2030," *Vision + Robotics*, no. 5, p. 18, 2018.
- [2] CBS, "7 procent bedrijven gebruikt robots." "<https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/42/7-procent-bedrijven-gebruikt-robots>", 2018.
- [3] M. Wilson, *Implementation of robot systems: an introduction to robotics, automation, and successful systems integration in manufacturing*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [4] Smart Industry, "Smart industry implementatieagenda 2018-2021." "<https://smartindustry.nl/downloads/2c3a0f/SIimplementatieagenda2018DEFRLR.pdf>", 2018.
- [5] M. J. Rosenstrauch and J. Krüger, "Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using iso/ts 15066," in *2017 3rd International conference on control, automation and robotics (ICCAR)*, pp. 740–744, IEEE, 2017.
- [6] B. Siciliano, O. Khatib, and T. Kröger, *Springer handbook of robotics*, vol. 200. Springer, 2008.
- [7] IFR, "Executive summary world robotics 2020 industrial robots." "https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf", 2020.
- [8] Universal Robots, "E-Series brochure." "<https://www.universal-robots.com/media/1802432/e-series-brochure.pdf>", 2021.
- [9] Robotiq, "Wrist camera." "<https://robotiq.com/products/wrist-camera>", 2022.
- [10] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk, *Robot grippers*. John Wiley & Sons, 2007.
- [11] Olmia Robotics, "Welk visionsysteem kies jij voor jouw cobot." "https://www.olmia-robotics.nl/files/whitepaper/OlmiaRob_WhiteP_VisionVergelijk.pdf", 2022.
- [12] Asuril, "Asycube." "<https://asyril.com/en/products-and-plugins/asycube/>", 2022.