

Ontwerp een gearticuleerde robot op schaal

Bachelor verslag Industrieel Ontwerpen

Niek van den Hout

Opdrachtgever: Universiteit Twente
Begeleider: ir. M.S. Essers
Examinator: dr. ir. M.C. van der Voort
Tweede Examinator: dr. ir. J.F. Broenink

Verslag bachelor eindopdracht
Universiteit Twente
Faculteit Construerende Technische Wetenschappen
Opleiding Industrieel Ontwerpen
Postbus 217, 7500 AE Enschede

Enschede, 18 september 2013
Aantal bladzijden: 101

Voorwoord

Dit verslag is geschreven naar aanleiding van de bachelor eindopdracht van de opleiding Industrieel Ontwerpen aan de Universiteit Twente. Bij deze opdracht heb ik mij gericht op het ontwerpen van een industriële robot op schaal. Als industrieel ontwerper heb ik mij al vanaf het begin geïnteresseerd voor zowel vormgeving als techniek. Toen het aankwam op het zoeken van een bachelor opdracht, heb ik in de eerste plaats gezocht naar een opdracht waarbij de nadruk lag op vormgeving. Uiteindelijk is de opdracht die ik heb uitgevoerd voornamelijk technisch georiënteerd geweest. Hoewel dit niet in lijn is met mijn eerste intenties, heb ik dit als zeer positief ervaren. Niet alleen heb ik mij op technisch gebied verder kunnen ontwikkelen, maar ook heb ik gemerkt dat mijn interesses en vaardigheden meer technisch georiënteerd zijn dan ik dacht. De ervaring van deze bachelor opdracht is niet alleen nuttig en leerzaam geweest op zichzelf, maar heeft ook bijgedragen aan mijn standpunt voor het kiezen van een masteropleiding.

Tijdens het uitvoeren van de opdracht heb ik ondervonden dat het ontwerpen van een robot om veel specifieke kennis vraagt waarover ik op voorhand niet beschikte. Dit vormde een grote uitdaging, maar bood ook de mogelijkheid om mij te verdiepen in een voor mij onbekend vakgebied. Zo heb ik niet alleen geleerd om mijn vaardigheden als ontwerper toe te passen, maar heb ik ook veel nieuwe kennis opgedaan. Dit heeft er mede toe geleid dat ik deze opdracht met veel plezier heb uitgevoerd en ik wil graag de mensen bedanken die daaraan hebben bijgedragen. In het bijzonder mijn begeleider en opdrachtgever Maarten Essers. Hij heeft mij binnen deze opdracht de vrijheid gegeven om mijn interesses na te volgen en heeft mij daarbij begeleid.

Enschede, september 2013

Niek van den Hout

Samenvatting

De opdracht die in dit verslag beschreven wordt, richt zich op het ontwerpen van een industriële robot op schaal. Het doel van dit schaalmodel is om te onderzoeken of de manier waarop industriële robots worden bestuurd door experts als handig wordt ervaren. Daarnaast wordt het schaalmodel toegepast bij het uitvoeren van autonome experimenten.

Industriële robot is een breed begrip waaronder meerdere typen robots vallen met elk andere eigenschappen. Deze verschillende typen zijn onderzocht en geïdentificeerd waarna is bepaald welk type het meest geschikt is om op schaal te maken en aansluit bij de uitgangspunten van dit project. Zo is er gekozen voor het type gearticuleerde robot. Dit type is veel voorkomend in de industrie en is daarom representatief voor de productgroep van de industriële robot. Daarnaast is het door de kinematische en esthetische eigenschappen goed mogelijk om de karakteristieken van de gearticuleerde robot om te zetten op schaal. Na deze keuze is het type gearticuleerde robot in meer detail onderzocht. Zo is onder andere een visueel overzicht gemaakt van verschillende modellen van het geselecteerde type. Op basis van dit overzicht kunnen de esthetische eigenschappen en de verhoudingen tussen de onderdelen worden getypeerd.

De analyse van de gearticuleerde robot resulteert in uitgangspunten die zorgen dat het ontwerp de juiste kenmerken bezit die het tot een gearticuleerde robot maken. Daarnaast is het van belang dat de constructie die wordt ontworpen bestand is tegen de krachten die op de robotarm werken. Daartoe wordt een analyse uitgevoerd van de belasting die resulteert in een model waarmee het benodigde koppel van de motoren berekend kan worden. Ook is een analyse gedaan van de kinematica, omdat dit de basis vormt voor de aansturing van de industriële robot. Uit deze analyse volgen onder andere richtlijnen voor de positionering en oriëntatie van de gewrichten waarmee een vereenvoudigd kinematisch model kan worden gerealiseerd. Deze vereenvoudiging biedt voordelen voor de aansturing van de robotarm.

Volgens de kenmerken van de gearticuleerde robot worden uitsluitend rotatiegewrichten toegepast die ieder worden aangedreven door een eigen elektromotor die in het gewricht is geplaatst. Het type elektromotor dat wordt toegepast is van grote invloed op de bewegingseigenschappen en de aansturing. Vandaar dat een analyse is uitgevoerd van de verschillende typen waarvan de eigenschappen zijn afgewogen tegen de gewenste toepassing. Zo blijkt dat met name twee typen elektromotoren geschikt zijn voor toepassing in de modelbouw. Dit zijn de stappenmotor en de servomotor. Op basis van nader onderzoek is gekozen voor de servomotor, omdat dit type beschikt over positieve feedback waardoor een hogere nauwkeurigheid kan worden bereikt dan met de stappenmotor.

De kennis die resulteert uit de voorbeschreven analyse van de gearticuleerde robot, de mechanica en de actuatoren wordt verwerkt tot een programma van eisen waaraan het ontwerp kan worden getoetst. Op deze manier worden de doelen en uitgangspunten gewaarborgd gedurende het project. Met dit als basis wordt het ontwerpproces gestart. Daarbij wordt eerst gekeken naar de ontwerp vrijheid in de kinematische structuur. Deze vrijheid levert een aantal conceptrichtingen die tegen elkaar worden afgewogen. Er wordt gekozen voor het concept dat de meeste flexibiliteit geeft voor het positioneren van de eind-effector binnen het werkgebied.

Na het vaststellen van de kinematische structuur wordt begonnen met het ontwerpen van een constructie die voldoet aan deze structuur en bestand is tegen de werkende belasting. Daartoe worden bestaande schaalmodellen van robotarmen onderzocht waaruit een abstracte basisstructuur van de schakel volgt. Met deze structuur als uitgangspunt wordt door middel van iteratief ontwerpen een schakel ontworpen die voldoet aan de gestelde eisen van belastbaarheid. Het ontwerp vormt een afweging tussen gewicht en stijfheid en kan vervaardigd worden door middel van conventionele productiemethoden. Alle vijf de schakels worden op deze manier ontworpen en vormen samen de constructie van de robotarm. Om ook een realistische uitstraling van het ontwerp te realiseren wordt een behuizing ontworpen. Het ontwerp van de behuizing is enerzijds gebaseerd op de esthetische kenmerken van de gearticuleerde robot en anderzijds op een persoonlijke invloed die de robotarm tot een onderscheidend product maakt.

De constructie en behuizing gecombineerd vormen het totale schaalmodel van een gearticuleerde robot en daarmee het eindproduct van deze opdracht. De robot beschikt over de kinematische, esthetische en constructieve eigenschappen van een gearticuleerde robot en is te vervaardigen met conventionele productiemethoden. Bovendien is het ontwerp geschikt voor het uitvoeren van een freesbewerking. Daarmee wordt voldaan aan de gestelde eisen en worden door middel van dit product de doelen van de opdracht behaald.

Summary

The thesis which is described by this report is aimed at the design of an industrial robot on scale. The goal of this scale model is to provide a way to research if experts experience the control of industrial robots as convenient. Moreover the scale model will be applied at autonomous experiments.

Industrial robot is a term which includes multiple types of robots with each different characteristics. These different types have been researched and classified. This led to the determination of one type that is most suitable for a scale design and corresponds with the starting points of this project. The type that was chosen is the articulated robot. This type appears often in industrial applications and is therefore representative for the product class of the industrial robot. Besides that the characteristics of the articulated robot are suited for a translation to a scale model thanks to the kinematic and aesthetic properties. After this choice the articulated robot was analysed more thoroughly. Amongst others a graphic overview of different models of the selected type was made. Based on this overview the aesthetic properties and proportions between the different parts could be characterized.

The analysis of the articulated robot leads to guidelines that ensure the design to contain the right properties to make it an articulated robot. Furthermore it is of importance that the designed structure is able to withstand the applied forces. To this extend the load on the robotic arm was analysed which resulted in a mathematical model that can be used for calculating the required motor torque. Besides that the robot kinematics were studied because this is the foundation of robot control. From this study guidelines could be concluded for the position and orientation of the joints that lead to a simplified kinematical model. This simplification offers advantages for controlling the robot.

The articulated robot consists of only articulated joints according to its characteristics. These joints are moved by electric motors that are placed at the centre of the joints. The movement properties and control depend strongly on the type of electric motor that is used. That is why several electric motors have been analysed to consider their properties opposed to the required application. This study shows that mainly two types of electric motors are suited for the required scale and movement. These are the stepper motor and the servomotor. Based on further research the servomotor was chosen, because this type has position feedback which results in a higher accuracy than can be achieved with the stepper motor.

The knowledge resulting from the before described research of the articulated robot, mechanics and electric motors is processed into a list of requirements. This can be used to assess the final design and safeguard the goals and starting points of this thesis. The next step is the design process which is based on the results of the analysis phase. First the design freedoms of the kinematic structure are explored. These freedoms result in several conceptual designs that are compared to each other. The concept that offers the most flexibility in positioning the end-effector within the workspace is then chosen as a base for the further design.

After determining the kinematic structure the design is aimed at a mechanical construction that is in accordance with the determined kinematic structure and can withstand the applied load. First existing scale models of robotic arms were studied to provide a starting point for the construction design. This study lead to the definition of an abstract base construction of a robot link. Based on this construction and by way of an iterative design process a link was designed that meets the demands of mechanical properties. The design is formed by a consideration between weight and stiffness and can be produced by way of conventional production methods. All five links are designed this same way and together form the entire construction of the industrial robot. Then a casing was designed to seal the construction and to realize a realistic appearance. The design of this casing based in both the aesthetic characteristics of the articulated robot and a personal influence that makes the robotic arm into a distinguishing product.

The construction and casing combined form the total scale model of the articulated robot and with that the end product of this thesis. The robot has the kinematic, aesthetic and constructive properties of an articulated robot and can be produced with conventional production methods. Moreover the design is appropriate for performing milling tasks. This way the design meets the set requirements and achieves the objectives of this thesis.

Inhoudsopgave

Inleiding	1
Analyse	4
1 Typen industriële robots	5
1.1 Seriële manipulator	5
1.1.1 Cartesiaanse robot	5
1.1.2 Cilindrische robot	6
1.1.3 Sferische robot	6
1.1.4 SCARA robot	7
1.1.5 Gearticuleerde robot	7
1.1.6 Vergelijking van de kinematische structuren	8
1.2 Parallele manipulator	10
1.2.1 Delta robot	10
2 Gearticuleerde robot	12
2.1 Karakterisering model B	14
3 Mechanica	17
3.1 Statica	18
3.2 Dynamica	19
3.3 Kinematica	21
3.3.1 Voorwaartse kinematica	23
3.3.2 Inverse kinematica	28
4 Actuatoren	30
4.1 Elektromotoren	30
4.2 Motorkeuze	31
5 Programma van eisen	34
Ontwerpstudie	36
6 Basisstructuur	37
6.1 Vorm van schakel DE	37
6.2 Positionering van het schoudergewricht	38
6.3 Structuur van schakel CD	39
7 Constructieontwerp	41
7.1 Ontwerpaanpak	41
7.2 Ontwerp van de schakels	43
7.2.1 Plaatdelen	44
7.2.2 Dwarsverbinding	45

8	Ontwerp van de behuizing	47
9	Aansturing	49
9.1	Aansturingsmethode	49
9.2	Aansturingscomponenten	50
10	Eindontwerp	51
10.1	Productomschrijving	51
10.2	Analyse van de belastbaarheid	57
10.3	Terugkoppeling programma van eisen	59
	Conclusie	62
	Begripsbepaling	64
	Bijlagen	65
	Referenties	98

Inleiding

De Europese productie-industrie gaat zich steeds meer richten op een productie met hoge toegevoegde waarde. Daarbinnen spelen industriële robots een belangrijke rol voor het uitvoeren van repetitieve taken, maar de ontwikkeling van deze robots loopt achter op de ontwikkeling van het productieproces. Het SInBot-project richt zich op de ontwikkeling van de methode en tools voor het vergemakkelijken van intelligente, gedecentraliseerde samenwerking van industriële robots, zodat ze beter functioneren binnen de vernieuwde productieomgeving (SmartBot, 2013). Daarbij wordt gestreefd naar een meer flexibele inzet van industriële robots in het productieproces en een verhoging van de efficiëntie in werkvoorbereiding. Een van de kennisinstellingen die betrokken is bij dit project is de Universiteit Twente. Zij is de opdrachtgever voor deze bachelor eindopdracht.

De Universiteit Twente doet binnen het SInBot-project onderzoek naar een verbeterde aansturing van de industriële robotarm. Evolutionaire ontwikkelingen op het gebied van de aansturing worden normaal gesproken getest op kleine industriële robots. Echter, wanneer het gaat om revolutionaire ontwikkelingen mogen deze om veiligheidsredenen niet getest worden op een bestaande robot. De ontwikkelingen binnen het onderzoek van de Universiteit Twente zijn revolutionair van aard en daarom is er behoefte aan een manier om deze ontwikkelingen te testen. Om in deze behoefte te voorzien richt deze opdracht zich op het ontwerpen van een schaalmodel van een industriële robot.

Er zijn twee doelen die worden nagestreefd met het ontwerpen van dit schaalmodel. Ten eerste wordt door middel van het schaalmodel onderzocht of de manier van het besturen van een robotarm door experts handig gevonden wordt. Daartoe wordt de robot op afstand bestuurd en is het van belang dat de experts bij het besturen de ervaring hebben alsof ze een echte industriële robot besturen. Ten tweede wordt de schaalrobot gebruikt bij het uitvoeren van autonome experimenten. Daarbij moet vermeld worden dat de primaire eis van deze opdracht stelt dat het schaalmodel bestand is tegen de belasting ten gevolge van het eigen gewicht van de constructie. Rond de ontwerpfase van dit project is op verzoek van de opdrachtgever rekening gehouden met een freesbelasting. Er is dan ook geen analyse uitgevoerd naar de exact optredende belasting tijdens een freesbewerking. In plaats daarvan is op basis van een aantal aannames het bestaande model dat resulteerde uit de analyse aangevuld. Dit is met name van invloed geweest op de selectie van de motoren en het ontwerpen van de constructie.

Om de gestelde doelen te bereiken is het van belang dat het schaalmodel in zowel beweging als uitstraling representatief is voor robots die worden toegepast in de industrie. Het is daarbij wenselijk dat de robot die wordt ontworpen aansluit bij de uitgangspunten van project SInBot, maar dit is geen vereiste. Vandaar dat het onderzoek dat wordt uitgevoerd deels verifiërend en deels verkennend van aard is. Allereerst wordt onderzoek gedaan naar bestaande industriële robots. Aan de hand van dit onderzoek kunnen karakteristieken in kaart worden gebracht die kenmerkend zijn voor een industriële robot. Deze zullen als richtlijn bij het ontwerp gebruikt worden om de representativiteit van het schaalmodel te waarborgen. Daarnaast is het voor het uitvoeren van autonome experimenten belangrijk dat de constructie van de robot bestand is tegen zijn eigen gewicht en tegen het krachtspel dat optreedt tijdens een freesbewerking. Daartoe

wordt een model opgesteld van de belasting aan de hand waarvan motoren worden geselecteerd en de constructie wordt ontworpen. Een voldoende stijve constructie en voldoende krachtige motoren resulteren in de gewenste realistische beweging. Voor een realistische uitstraling wordt een behuizing ontworpen die op de constructie wordt gemonteerd. Deze behuizing moet in overeenstemming zijn met bestaande industriële robots, maar er wordt ook gepoogd om hierin een deel persoonlijke input te verwerken wat de robot tot een origineel en eigen ontwerp maakt.

Er is door de opdrachtgever een aantal randvoorwaarden voorgeschreven waar de robotarm die bij dit project wordt ontworpen aan moet voldoen. Allereerst dient het product realiseerbaar te zijn tegen beperkte kosten. Hiervoor is een richtlijn gegeven van €100,- voor elektronische componenten. Daarnaast is het vereist dat de robotarm met conventionele productiemethoden te vervaardigen is. Dit is in lijn met de eerder gestelde voorwaarde van beperkte kosten en biedt flexibiliteit bij het produceren van een klein aantal exemplaren en het uitvoeren van eventuele aanpassingen of reparaties. Er wordt geen limiet gesteld aan de grootte van het schaalontwerp. Wel wordt gesteld dat het eindproduct zodanig mobiel moet zijn dat het gemakkelijk verplaatsbaar is en in een testopstelling is te plaatsen. De uiteindelijke keuze voor de schaal waarop de robotarm is ontworpen, is het resultaat van een afweging tussen kosten en ontwerpvrijheid. Een grote schaal betekent meer vrijheid bij het plaatsen van de onderdelen en maakt het mogelijk om op een hoger detail niveau te ontwerpen. Aan de andere kant betekent dit ook hogere kosten door de benodigdheid van meer materiaal en sterkere motoren. Er wordt gestreefd naar een minimalisering van de kosten. Vandaar dat de schaal zodanig gekozen is dat er precies voldoende ruimte is voor het plaatsen van de motoren in de gewrichten met de mogelijkheid om de constructie volledig te omsluiten met een behuizing.

Leeswijzer

De opbouw die eerder in deze inleiding is beschreven wordt hier toegelicht aan de hand van de hoofdstukkenstructuur die in dit verslag wordt gehanteerd. De analyse die de theoretische basis legt voor het ontwerpproces wordt beschreven in het eerste deel van dit verslag. In hoofdstuk 1 worden bestaande industriële robots onderzocht en geclassificeerd. Dit onderzoek leidt tot de keuze van een specifiek type robot waar het ontwerp op wordt gericht. Dit type wordt nader onderzocht en gedefinieerd in hoofdstuk 2. Vervolgens zal in hoofdstuk 3 worden gekeken naar de mechanica van de robotarm. Op basis van deze analyse kunnen modellen worden opgesteld van de constructieve en kinematische structuur van de robotarm. Hoofdstuk 4 richt zich op de toepassing van elektromotoren om een beweging van de robotarm te realiseren. Het resultaat van deze analyse vormt samen met de opgestelde fysische modellen een basis voor de selectie van motoren voor de robotarm. De hiervoor beschreven analyse wordt in hoofdstuk 5 samengevat in een programma van eisen waar het ontwerp aan moet voldoen. Deze dient als richtlijn voor het ontwerpproces en ter toetsing van het eindresultaat.

In hoofdstuk 6 worden verschillende conceptringingen geanalyseerd die worden opgesteld aan de hand van de variabele eigenschappen van de gearticuleerde robot. Uit deze concepten wordt een kinematische structuur samengesteld voor het ontwerp. Op basis van deze structuur wordt een constructie ontworpen. Daarvan wordt het ontwerp beschreven in hoofdstuk 7. Maar de constructie vormt niet het volledige product. Er wordt ook een behuizing ontworpen om de robot zijn realistische uitstraling te geven. Hiervan wordt een vormstudie beschreven in hoofdstuk 8. Vervolgens wordt in hoofdstuk 9 kort stilgestaan bij de aansturing van de motoren waarbij met

name gericht wordt op de benodigde hardware en de implementatie daarvan in het ontwerp. De ontwerpaspecten die beschreven zijn in de hoofdstukken 6 tot en met 8 worden gecombineerd tot een totaal productontwerp dat zal worden toegelicht in hoofdstuk 10. Daarbij wordt ingegaan op de meest kenmerkende eigenschappen en de samenhang tussen de onderdelen waaruit de robotarm is opgebouwd. Ter validatie van het ontwerp wordt in dit hoofdstuk ook geëvalueerd of er met het ontwerp wordt voldaan aan de gestelde eisen en richtlijnen en of daarmee wordt voorzien in de behoeften van de opdrachtgever.

Analyse

Om een robotarm te kunnen ontwerpen dient allereerst een theoretische basis gelegd te worden die als uitgangspunt kan worden gebruikt voor het ontwerpproces. De theoretische basis wordt gevormd door een analyse van verschillende aspecten die samenhangen met het ontwerp van een industriële robotarm. In dit deel volgt een beschrijving van deze analyse. Allereerst zal er gekeken worden naar een classificering van de verschillende typen robotarmen die worden toegepast in de industrie. Vervolgens wordt de mechanica van een robotarm geanalyseerd op het gebied van statica, dynamica en kinematica. Zo kunnen modellen worden opgesteld die informatie geven over de relevante ontwerpparameters. Ten slotte wordt een analyse gedaan naar de verschillende typen elektromotoren gericht op de toepassing op een schaalmodel van een robotarm. Deze informatie gecombineerd met de fysische modellen vormt de basis voor de motorkeuze.

Het resultaat van de hiervoor beschreven analyse is een lijst van eisen waar het ontwerp aan moet voldoen. Daarnaast wordt op basis van de analyse een aantal keuzes gemaakt voor het vastleggen van zekere ontwerpparameters. De parameters die nog variabel zijn, worden als ontwerpvrijheden beschouwd tijdens het ontwerpproces.

Hoofdstuk 1

Typen industriële robots

Het schaalmodel dat bij dit project ontworpen wordt, zal gebruikt worden om vernieuwde aansturing methoden te testen die bedoeld zijn voor de controle van bestaande industriële robots. Om die reden is het van belang dat het schaalmodel representatief is voor robotarmen die worden toegepast in de industrie. Vandaar dat in dit hoofdstuk een analyse wordt gedaan naar de verschillende typen industriële robots en hun kenmerkende eigenschappen. Op basis van deze eigenschappen, ten opzichte van de doelstelling van de opdracht, wordt na deze analyse een keuze gemaakt voor het type robotarm dat het meest geschikt is om voor dit project te ontwerpen.

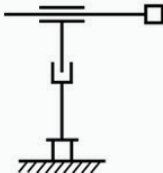
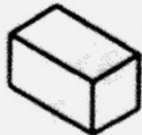
Er zijn meerdere eigenschappen aan de hand waarvan de typen industriële robots geclassificeerd kunnen worden. Bij deze analyse wordt een indeling gemaakt op basis van de kinematische structuur van de robot. Dit is een eigenschap die voor ieder type robot onderscheidend is en daarnaast het meest bepalend is voor zowel de toepassing als de aansturing van de robotarm. Zo zijn er twee categorieën te omschrijven waarbinnen de typen robotarmen ingedeeld kunnen worden. Dit zijn de seriële manipulator en de parallelle manipulator.

1.1 Seriële manipulator

De seriële manipulator dankt zijn naam aan de eigenschap dat de schakels in serie met elkaar zijn verbonden, zodat het uiteinde van schakel 1 via een gewricht is verbonden met het begin van schakel 2. Een nadeel van deze schakeling is dat onnauwkeurigheden van de gewrichten een cumulatieve werking hebben op de eind-effector. Een kleine onnauwkeurigheid van het eerste gewricht werkt via de schakel door op het tweede gewricht. De nauwkeurigheid van de seriële manipulator heeft daarom een negatief verband met het aantal gewrichten. Daarnaast heeft een seriële manipulator een relatief lage stijfheid ten gevolge van de open kinematische structuur. Een gevolg daarvan is dat het gewicht van een seriële manipulator groot is ten opzichte van de maximale belasting op de eind-effector. De verhouding tussen eigen gewicht en maximale belasting ligt voor de gemiddelde seriële robot tussen de 10/1 en de 5/1 (Mohammed, 2011). Het voornaamste voordeel van dit soort manipulator is het grote werkgebied in relatie tot de afmeting van de robot en het vloeroppervlak dat deze in beslag neemt. De typen robots die onder deze categorie vallen zijn de cartesische robot, de cilindrische robot, de sferische robot, de SCARA robot en de gearticuleerde robot.

1.1.1 Cartesiaanse robot

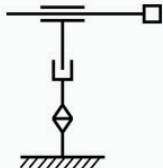
De cartesische robot kan transleren langs drie lineaire assen die ten opzichte van elkaar onder een hoek van 90° zijn gepositioneerd. De robot dankt zijn naam aan de gelijkheid van de bewegingsassen met het orthogonale, of ook wel cartesische, coördinatenstelsel. Doordat de

type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.1: Kenmerken van een cartesische robot.

robot uitsluitend transleert langs de assen en niet roteert, is de aansturing van een cartesische robot relatief eenvoudig. Dat maakt dat dit type robotarm veel wordt toegepast in de vorm van een computer numerated control machine (CNC machine) waarbij de robot via een computer geprogrammeerd wordt voor een specifieke taak. Dit type robot heeft een hoge nauwkeurigheid door zijn stijve constructie en kan hoog worden belast.

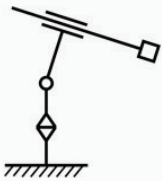
1.1.2 Cilindrische robot

type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.2: Kenmerken van een cilindrische robot.

De naam van dit type industriële robot is afgeleid van zijn werkgebied dat een cilindrische vorm heeft. De robot heeft drie bewegingsassen waarvan een rotatie as op het voetstuk en twee lineaire assen bij de verbinding tussen de schakels. Het is voor een cilindrische robot niet mogelijk om langs obstakels te bewegen of boven zichzelf te reiken.

1.1.3 Sferische robot

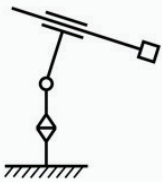
type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.3: Kenmerken van een sferische robot.

De sferische robot is opgebouwd uit minimaal twee rotatie gewrichten en een translatie gewricht. Het werkgebied van deze robot is sferisch gevormd waardoor de bereikbare vlakken berekend

kunnen worden in het sferische coördinatenstelsel. Dit type robot is hoger ontwikkeld dan de cartesische of de cilindrische robot en is de voorganger van de verder ontwikkelde gearticuleerde robot. Beide typen hebben een gelijkvormig werkgebied, maar verschillen in configuratie en toepassing. Een nadeel van de sferische robot is dat dit type niet in staat is om langs obstakels te bewegen.

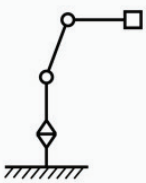
1.1.4 SCARA robot

type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.4: Kenmerken van een SCARA robot.

Net als de sferische robot heeft de SCARA robot twee rotatie gewrichten en een translatie gewricht. Echter zijn de kinematische structuur en het werkgebied sterk verschillend. De twee rotatie gewrichten zijn parallel georiënteerd waardoor er altijd twee configuraties mogelijk zijn voor dezelfde positie van de eind-effector. Daarom is het voor een SCARA robot beperkt mogelijk om obstakels te ontwijken. Dit zorgt voor een hogere complexiteit in de aansturingstechniek. Het werkgebied van de SCARA robot is groot in relatie tot het vloeroppervlak dat dit type robot in beslag neemt. In vergelijking met een cartesische robot is een SCARA robot over het algemeen sneller en meer geschikt voor de manipulatie van kleinere objecten.

1.1.5 Gearticuleerde robot

type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.5: Kenmerken van een gearticuleerde robot.

Een gearticuleerde robot maakt gebruik van uitsluitend rotatiegewrichten om zich binnen zijn werkgebied te verplaatsen. Er zijn minimaal drie rotatiegewrichten nodig om de eind-effector op iedere positie binnen het werkgebied te brengen, maar een veelvoorkomende configuratie is er een met zes gewrichten, ook wel zes assig genoemd. Het begrip 'gearticuleerd' betekent door gewrichten verbonden en komt uit de menselijke anatomie. Omdat in de menselijke anatomie uitsluitend rotatiegewrichten voorkomen, is het begrip articulatie het best van toepassing op dit type robot. Zoals eerder gezegd is dit type robot voortgekomen uit de sferische robot, maar door een extra rotatiegewricht

is de gearticuleerde robot, in tegenstelling tot de sferische robot, in staat om langs objecten heen te bewegen. Dat maakt dat de gearticuleerde robot flexibeler is, maar ook een complexere aansturing heeft. Een bijkomend voordeel van het gebruik van alleen rotatiegewrichten is dat dit type robot goed te beschermen is tegen vuil waardoor er minder onderhoud nodig is.

1.1.6 Vergelijking van de kinematische structuren

Tabel 1.1 geeft een overzicht van de voor- en nadelen die inherent zijn aan de kinematische structuur van ieder type seriële manipulator. Daarnaast geeft de tabel informatie over de toepassingen waar de typen manipulators het meest geschikt voor zijn en het percentage dat ieder type wordt toegepast in de industrie. Deze percentages zijn gemeten in 1990. De verwachting is dat sindsdien met name de toepassing van gearticuleerde robots is toegenomen en dat de toepassing van cilindrische en sferische robots is afgenomen. Op basis van deze verwachting wordt aangenomen dat de onderlinge verdeling van de resultaten uit 1990 nog wel klopt, maar dat de verschillen groter zijn. Bij de interpretatie van de percentages wordt niet gekeken naar de absolute waarde, maar naar de relatieve waarde ten opzichte van de andere typen robots. Zo kan geconcludeerd worden of het ene type meer of minder wordt toegepast dan het andere type en welk type dus het meest representatief is voor de totale toepassing van seriële manipulators in de industrie.

Tabel 1.1: Vergelijking van de verschillende typen seriële manipulators.

Type	Voor- en nadelen	Toepassing	Gebruik ¹
<i>Cartesiaans</i>	<i>Voordelen:</i> Eenvoudig kinematisch model Stijve constructie Kan toegepast worden op grote schaal <i>Nadelen:</i> Gewrichten moeilijk te beschermen tegen vuil Kan niet onder objecten reiken Groot vloeroppervlak in relatie tot het volume van de robot	• pick and place • afdichtmiddel aanbrengen • assemblage • gereedschap hanteren • booglassen • CNC machine • 3D printer	18%

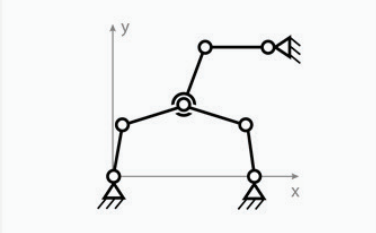
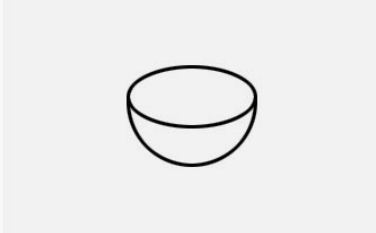
<i>Cilindrisch</i>	<i>Voordelen:</i> Eenvoudig kinematisch model Stijve constructie Groot horizontaal bereik <i>Nadelen:</i> Beperkt werkgebied Gewrichten moeilijk te beschermen tegen vuil Niet mogelijk objecten te ontwijken Niet mogelijk om boven zichzelf te reiken	• assemblage • gereedschap hanteren • puntlassen	15%
<i>Sferisch</i>	<i>Voordelen:</i> Groot horizontaal bereik <i>Nadelen:</i> Complex kinematisch model Niet mogelijk objecten te ontwijken Beperkt verticaal bereik	• gereedschap hanteren • puntlassen • booglassen • autogeen lassen • spuitgieten	10%
<i>SCARA</i>	<i>Voordelen:</i> Hoge bewegingssnelheid Mogelijk objecten te ontwijken Groot werkgebied in relatie tot het volume van de robot <i>Nadelen:</i> Complex kinematisch model	• pick and place • afdichtmiddel aanbrengen • assemblage • gereedschap hanteren	25%
<i>Gearticuleerd</i>	<i>Voordelen:</i> Maximale flexibiliteit Mogelijk objecten te ontwijken Groot werkgebied in relatie tot het volume van de robot Gemakkelijk te beschermen tegen vuil <i>Nadelen:</i> Complex kinematisch model Lineaire beweging is moeilijk aan te sturen Minder stijve structuur rond het maximale bereik	• spuitgieten • assemblage • spuitverven • booglassen • gaslassen	32%

¹ De percentages zijn verkregen via <http://courseweb.stthomas.edu/tpsturm/private/notes/qm380/robotype.html>. De auteur en het publicatiejaar van deze bron zijn niet te achterhalen.

1.2 Parallele manipulator

Bij een parallelle manipulator is de eind-effector verbonden met het voetstuk door meerdere, onafhankelijke schakels die parallel werken. De term parallel slaat hier niet op de oriëntatie van de schakels, maar op het werkingsprincipe: ze werken gelijktijdig. Door de parallelle configuratie van de schakels worden onnauwkeurigheden in positionering gemiddeld met de andere schakels. Dat maakt dat de stijfheid en nauwkeurigheid van een parallelle manipulator, in tegenstelling tot een seriële manipulator, een positief verband houden met het aantal schakels. De configuratie van een parallelle robot maakt het mogelijk om de actuatoren centraal te positioneren op een platform waardoor ze niet meebewegen met de beweging van de manipulator. Dat betekent dat de schakels een lagere massa hebben en dus minder inertie waardoor de robotarm sneller kan bewegen. De grootste voordelen van de parallelle robot zijn de hoge nauwkeurigheid en de hoge bewegingssnelheid. Een nadeel is de beperkte werkruimte ten opzichte van een seriële manipulator. Het type industriële robot dat binnen deze categorie valt is de Delta robot.

1.2.1 Delta robot

type	kinematische structuur	werkgebied
		

Figuur 1.6: Kenmerken van een delta robot.

Een delta robot bestaat uit een platform en een eind-effector die met elkaar verbonden worden door drie parallelle schakels. De schakels vormen samen een driehoek, vandaar de naam delta. Het platform is de gefixeerde basis en is in functionaliteit vergelijkbaar met de basis van de seriële robot. Op dit platform zijn de actuatoren bevestigd. De delta robot maakt gebruik van parallellogrammen om de positie van de eind-effector te bepalen. Dit betekent dat de beweging van de eind-effector is beperkt tot translaties. Het toevoegen van een vierde parallelle schakel zou de eind-effector een extra rotatievrijheid kunnen geven.

Conclusie

De voorgaande analyse van de verschillende typen robots dient als basis voor de keuze van het type robotarm dat ontworpen gaat worden bij dit project. Vanuit project SInBot wordt het onderzoek gericht op de aansturing van seriële manipulators. De parallelle manipulator is voor de volledigheid van de classificering wel opgenomen in de analyse, maar wordt bij deze keuze buiten beschouwing gelaten.

Er zijn twee belangrijke criteria aan de hand waarvan een type industriële robot gekozen wordt. De eerste is dat het type representatief moet zijn voor industriële robots die worden toegepast in de industrie. Uit de percentages van tabel 1.1 kan geconcludeerd worden dat de gearticuleerde robot (32%) en de SCARA robot (25%) de twee meest voorkomende typen industriële robots zijn. Op basis van het eerste criterium zijn dit de twee typen robots die het meest geschikt zijn om bij dit project als uitgangspunt te nemen.

Het tweede criterium waar naar gekeken wordt, is dat de kinematische structuur van de robot geschikt moet zijn om realistisch op schaal te ontwerpen. Bij de beoordeling van dit criterium wordt met name gekeken naar de mogelijkheid om met de gegeven kinematische structuur een stabiele constructie te ontwerpen. Daarbij is de oriëntatie van de rotatie assen het meest bepalende verschil tussen de gearticuleerde robot en de SCARA robot. Bij de gearticuleerde robot staan de rotatie assen van het merendeel van de gewrichten loodrecht op de werklijn van de zwaartekracht. Dit zorgt ervoor dat de beweging van de robotarm in grote mate wordt beïnvloed door het eigen gewicht van de constructie waardoor er een hoog risico is op een onnauwkeurige beweging en positionering van de robotarm. In het geval van de SCARA robot zijn de rotatie assen parallel georiënteerd aan de werklijn van de zwaartekracht. Hierdoor wordt de rotatiebeweging van de gewrichten minimaal beïnvloed door het eigen gewicht. Dit maakt het mogelijk om een hoge nauwkeurigheid en een vloeiende beweging te realiseren. Vandaar dat volgens het tweede criterium de SCARA robot meer geschikt is als uitgangspunt voor dit project.

Een objectieve afweging op basis van de beoordelingscriteria zou waarschijnlijk resulteren in een keuze voor de SCARA robot. Hoewel dit niet het meest voorkomende type industriële robot is, is dit wel het type robot met een constructie die het meest geschikt lijkt om een schaalontwerp van te maken. Echter wordt de keuze voor het type industriële robot niet uitsluitend gebaseerd op de resultaten van de analyse die is beschreven in dit hoofdstuk. Er wordt ook rekening gehouden met de belangen van de opdrachtgever. Binnen project SInBot staat de gearticuleerde robot centraal door zijn flexibiliteit en brede toepassingsmogelijkheden. Dit onderzoek is aan de ene kant ingezet als een verkennend onderzoek naar de verschillende typen industriële robots en hun eigenschappen in relatie tot het maken van een schaalontwerp. Aan de andere kant is het een verificatie onderzoek om te onderzoeken of het type gearticuleerde robot, dat al centraal staat bij het SInBot project, ook geschikt is om als uitgangspunt te dienen voor een schaalmodel. Dit laatste wordt bevestigd door de resultaten van dit onderzoek en daarom wordt ervoor gekozen om een robotarm te ontwerpen van het type gearticuleerde robot.

Hoofdstuk 2

De gearticuleerde robot

In hoofdstuk 1 is bepaald dat de robotarm die bij dit project ontworpen wordt van het type gearticuleerde robot is. Om deze keuze toe te kunnen passen op het ontwerpproces, wordt in dit hoofdstuk een meer gedetailleerde analyse gedaan naar de gearticuleerde robot. Allereerst wordt gekeken of er binnen deze klasse nog verder onderscheid te maken is tussen verschillende modellen. Vervolgens zal een van deze modellen worden gekozen als ontwerprichting. Van dit model wordt in paragraaf 2.1 een overzicht gemaakt van de karakteristieken die als concrete richtlijnen dienen voor het ontwerp.

Binnen de klasse van de gearticuleerde robot komen hoofdzakelijk twee varianten voor die zijn weergegeven in figuur 2.1. De modellen hebben dezelfde kinematische structuur, maar verschillen van elkaar in de bouw van de constructie en daarmee ook in de toepassingen waar ze het meest geschikt voor zijn. Model A komt veelal voor op grote schaal en wordt toegepast voor de zwaardere assemblage en pick and place werkzaamheden die een beperkte nauwkeurigheid vereisen. Model B wordt uitgevoerd op een kleinere schaal en is meer geschikt voor nauwkeurige materiaalbewerkingen en assemblages.



(A)



(B)

Figuur 2.1: Twee veel voorkomende modellen binnen de klasse gearticuleerde robot.

Het zou mogelijk zijn om deze modellen beiden mee te nemen in het ontwerpproces, zodat op een hoger niveau besloten kan worden welk model het beste aansluit bij de doelstelling van dit project. Maar om te voorkomen dat de omvang van dit project te groot wordt, wordt op basis

van deze analyse al een keuze gemaakt voor een van de twee modellen uit figuur 2.1. Deze keuze convergeert het ontwerpproces, zodat er efficiënter en gericht tot een detailontwerp gekomen kan worden dat wordt vertaald naar een prototype. Op deze manier is de bouw van het prototype bewust verkozen boven een uitgebreidere ontwerpstudie.

Normaal gesproken volgt de keuze voor een type robot uit de toepassing die de robot moet verrichten. In dit geval wordt de robotarm niet ontworpen voor het uitvoeren van een specifieke manipulatie, waardoor andere criteria een rol spelen bij de keuze. Wel is bekend dat de opdrachtgever de intentie heeft om het eindresultaat van deze opdracht door te ontwikkelen, zodat er een freesbewerking mee uitgevoerd kan worden. Omdat dit niet een directe eis is voor deze opdracht is de toepassing niet het leidende criterium bij de keuze voor een model. Maar de wensen voor doorontwikkeling wordt wel meegewogen in de keuze.

De keuze voor het model gearticuleerde robot dat wordt ontworpen voor dit project wordt gebaseerd op de mogelijkheid om dit model realistisch op schaal te maken. Of het model aan dit criterium voldoet, is afhankelijk van twee factoren. Allereerst wordt beoordeeld of de karakteristieke constructie van het model zodanig op schaal te maken is dat deze stabiel genoeg is om de robotarm op realistische wijze te laten bewegen. Om hier een uitspraak over te kunnen doen, wordt er gekeken naar de structuur van de schakels en de verhouding tussen de lengte van de schakels en het volume van de gewrichten.

De structuur van de schakels is voor een groot deel bepalend voor de stijfheid en de nauwkeurigheid van de robot. Hoe stijver de constructie, hoe groter de mogelijkheid voor een realistische beweging. Wanneer de structuur van de schakels van model A en model B met elkaar vergeleken worden, blijkt dat de schakels van model A slanker zijn vormgegeven dan die van model B. Bovendien beschikt model A over twee parallel georiënteerde schakels die de constructie meer stevigheid geven. Door de slanke geometrie van model A is de grootte van de gewrichten klein in verhouding tot de lengte van de schakels. Dit zou een beperking kunnen zijn voor de bouw van het prototype, omdat de constructie weinig vrijheid geeft voor de plaatsing van componenten en de keuze van actuatoren wordt beperkt door de afmetingen. Model B heeft een groot volume in relatie tot de lengte van de arm en geeft daarmee veel vrijheid in de keuze en positionering van componenten.

Ten tweede wordt er gekeken naar de mogelijkheid om de esthetische kenmerken van het model realistisch om te zetten op schaal. Een belangrijk punt voor dit criterium is dat bij model B de constructie volledig wordt omsloten door een behuizing. Bij model A is dit niet het geval en zijn de componenten en de bedrading goed zichtbaar. Dat betekent dat de schaal van het prototype voor een groot deel wordt beïnvloed door de zichtbare componenten. Daarnaast biedt model A weinig ontwerpvrijheid, omdat de constructie aan de eisen van zowel stevigheid als esthetiek moet voldoen. In het geval van model B kan het ontwerp van de constructie volledig gericht worden op stevigheid en wordt de esthetiek bepaald door het ontwerp van de behuizing.

Concluderend wordt ervoor gekozen om een robotarm te ontwerpen die voldoet aan de karakteristieken van model B. De esthetische eigenschappen van dit model zijn geschikt om realistisch om te zetten op schaal. Daarnaast geven de bouw en de verhoudingen van model B veel vrijheid bij het kiezen van een schaal en het ontwerpen van de constructie. Gezien de toepassing is dit ook het model dat in lijn ligt met de wensen voor doorontwikkeling.

2.1 Karakterisering model B

In hoofdstuk 1 zijn de verschillende typen industriële robots geanalyseerd. Deze analyse heeft geleid tot de keuze voor het type gearticuleerde robot. Van dit type zijn in het eerste deel van dit hoofdstuk twee veelvoorkomende modellen bekeken en daaruit volgde de keuze voor een specifiek model. Deze paragraaf analyseert de kenmerken van het gekozen model B en is daarmee de laatste verdiepende analyse van bestaande industriële robots. Het totaal van de hiervoor beschreven analyses resulteert in richtlijnen voor het ontwerp die onder andere terug komen in het

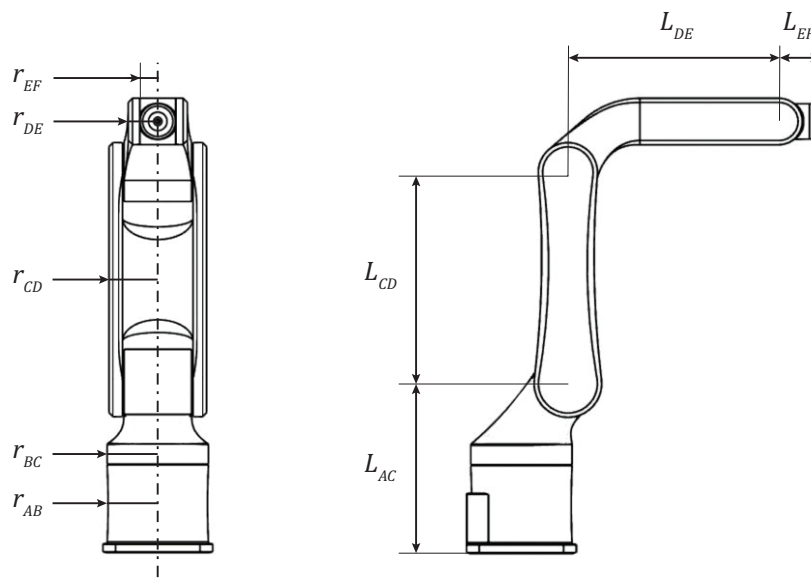


Figuur 2.2: Overzicht van verschillende varianten van model B.

programma van eisen in hoofdstuk 5. Op deze manier kan worden getoetst of het ontwerp daadwerkelijk tot het gekozen type industriële robot behoort.

Het model B gearticuleerde robot wordt met name geanalyseerd op vormgeving, omdat in deze eigenschap het grootste onderscheid ten opzichte van andere gearticuleerde robots tot uitdrukking komt. In figuur 2.2 is een overzicht weergegeven van verschillende robots die behoren tot de klasse van model B gearticuleerde robots. Het doel van dit overzicht is om de globale kenmerken en onderlinge diversiteit van de robots uit de gekozen klasse te illustreren. Daarnaast dient dit overzicht om de esthetiek van het ontwerp te beoordelen.

Uit figuur 2.2 kan geconstateerd worden dat alle robots voldoen aan dezelfde verhoudingen tussen de verschillende onderdelen van de robotarm. Met name bij het ontwerpen van een schaalmodel is het voor een realistisch ontwerp van belang dat het ontwerp aan dezelfde verhoudingen voldoet. Vandaar dat de verhoudingen in formulevorm worden uitgedrukt om als richtlijn te dienen bij het bepalen van de dimensies van het ontwerp.



Figuur 2.3: Annotatie van de maten die in verhoudingen worden uitgedrukt.

In figuur 2.3 zijn de maten van de robotarm aangegeven waarvan de onderlinge verhoudingen in formulevorm worden uitgedrukt in tabel 2.1. Dit zijn de meest kenmerkende maten van de constructie en dit zijn ook de maten die als invoerparameters dienen voor het rekenkundig model dat wordt opgesteld in paragraaf 3.2.

Tabel 2.1: Afmetingsverhoudingen van een model B gearticuleerde robot.

formule	nr.
$0,8 L_{CD} < L_{AC} < L_{CD}$	2.1
$0,9 L_{DE} < L_{CD} < 1,1 L_{DE}$	2.2
$L_{DE} \approx L_{CD}$	2.3
$L_{EF} \approx 0,2 L_{DE}$	2.4
$0,2 L_{CD} < r_{AB} < 0,5 L_{CD}$	2.5
$r_{AB} \approx r_{BC} \approx r_{CD}$	2.6
$r_{CD} > r_{DE}$	2.7
$r_{DE} > r_{EF}$	2.8

Conclusie

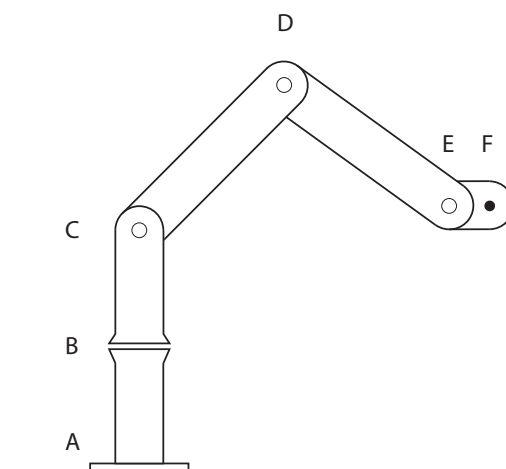
In aanvulling op de analyse van hoofdstuk 1 is in dit hoofdstuk een verdiepende analyse uitgevoerd van de gearticuleerde robot. Deze analyse is gericht op het definiëren van kenmerkende eigenschappen, zodat deze als richtlijn kunnen worden gebruikt bij het ontwerp. Uit de analyse komt naar voren dat er binnen het type gearticuleerde robot meerdere varianten voorkomen. Om voldoende focus aan te brengen in het ontwerpproces worden twee van de meest onderscheidende varianten nader bekeken waarna gekozen is om het ontwerp te richten op model B. Dit model is vanwege de esthetische eigenschappen en verhoudingen geschikter om op schaal te maken en ligt beter in lijn met de wensen voor doorontwikkeling. Op twee manieren worden de karakteristieken van het gekozen model gedefinieerd. Allereerst wordt een visueel overzicht gemaakt van industriële robots die binnen de gekozen klasse vallen. Dit overzicht wordt onder andere gebruikt ter toetsing van de esthetiek van het eindontwerp. Ten tweede worden de meest kenmerkende maten van de constructie uitgedrukt in onderlinge verhoudingen. Dit dient als richtlijn bij het bepalen van de dimensionering van het ontwerp.

Hoofdstuk 3

Mechanica

Voor zowel het ontwerpen van een constructie als het programmeren van de aansturing van de robotarm is het van belang om inzicht te krijgen in de mechanica van een industriële robot. Er zal een theoretische analyse gedaan worden van de relevante mechanica op basis waarvan natuurkundige modellen worden opgesteld. Deze modellen worden onder andere gebruikt om richtlijnen voor het ontwerp te herleiden en dienen als ondersteuning bij de selectie van actuatoren en bij het bepalen van de specificaties van de robotarm.

Binnen de natuurkunde houdt de klassieke mechanica zich bezig met de fysica die beschrijft hoe objecten bewegen onder invloed van krachten. De benadering van de klassieke mechanica is beperkt tot het domein van grote objecten met snelheden die buiten benadering van de lichtsnelheid liggen. De industriële robot valt binnen dit domein en daarom zal de fysica van de robotarm benaderd worden vanuit de klassieke mechanica. Binnen de klassieke mechanica kunnen hoofdzakelijk drie gebieden worden onderscheiden. Het eerste gebied is de statica en zal besproken worden in paragraaf 3.1. De statica gaat uit van een krachterevenwicht waarbij voorwerpen in rust zijn of met een constante snelheid bewegen. Het tweede gebied, de dynamica, richt zich op de relatie tussen de massa, traagheid en beweging en de werkende krachten en momenten. Een analyse van dit gebied van de mechanica zal beschreven worden in paragraaf 3.2. Ten slotte wordt in paragraaf 3.3 gesproken over de kinematica die zich bezig houdt met de implicaties van beweging zonder rekening te houden met de oorzaken van de beweging.



Figuur 3.1: Vereenvoudigd model van een industriële robotarm.

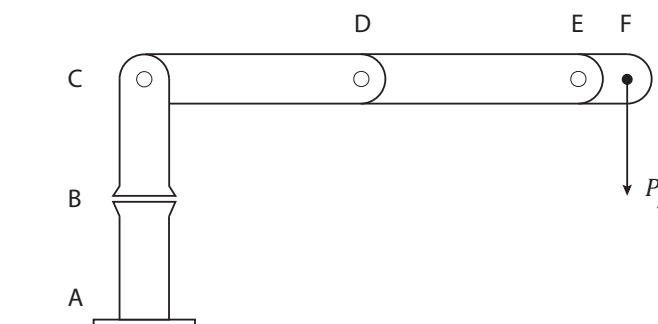
Om een mechanische analyse te kunnen doen van een industriële robot is het van belang om de robot te vereenvoudigen naar een model. Dit model wordt weergegeven door figuur 3.1 en is de basis voor het opstellen van een vrije lichaam structuur en het herleiden van het kinematische model. Volgens het model in figuur 3.1 is de robotarm opgebouwd uit vijf schakels die met elkaar verbonden worden door de rotatiegewrichten B, C, D en E. Schakel AB vormt de basis van de robotarm en is ingeklemd onder een hoek van 90° met de grond. In elk van de rotatiegewrichten is een motor aangebracht die zorgt voor de beweging van de schakels.

Naast een vereenvoudigde weergave van de geometrie wordt nog een aantal aannames gedaan om de krachtenberekening voldoende te simplificeren. De eerste aanname is dat de bewegingen van de robotarm plaatsvinden in een en hetzelfde vlak. De rotatie assen van de gewrichten C, D en E staan loodrecht op dit vlak en de rotatie as van gewricht B loopt in dit vlak en is verticaal georiënteerd. Om aan deze aanname te voldoen, wordt gewricht B beschouwd als starre verbinding. Daarnaast wordt aangenomen dat de massa van iedere schakel homogeen verdeeld is en de wrijvingskrachten worden buiten beschouwing gelaten.

3.1 Statica

In deze paragraaf worden de krachten in de bevestigingspunten A tot en met E berekend, uitgaande van een statisch evenwicht. Uit deze berekening volgt onder andere een momentkracht in de gewrichten B tot en met E. Deze kracht wordt gebruikt bij het selecteren van de actuatoren en moet minimaal gelijk zijn aan het aanzetkoppel dat de actuator kan leveren.

De industriële robot van dit project wordt niet ontworpen voor het uitvoeren van een manipulatie en beschikt daarom niet over een eind-effector. Hieruit volgt de eis dat de constructie enkel bestand moet zijn tegen het eigen gewicht. Met oog op de selectie van actuatoren en de wensen voor doorontwikkeling, wordt er bij deze analyse toch rekening gehouden met een belasting (P_y) op het uiteinde van de robotarm. De gedachte hierachter is dat de actuatoren die gekozen worden op basis van deze berekening niet zullen beperken in de mogelijkheden van de robotarm om meer dan de vereiste belasting kan dragen. De belasting (P_y) werkt als puntbelasting in punt F en wordt beschouwd als constant in grootte en richting. Voor deze berekening wordt ervan uitgegaan dat de belasting wordt veroorzaakt door het bevestigen van een gewicht aan punt F. Daarom kan P_y ook geschreven worden als $m_{p_y}g$. Door de belasting in punt F te beschouwen als gewicht, wordt



Figuur 3.2: Robotarm configuratie waarbij het moment maximaal is.

rekening gehouden met de toevoeging van een eind-effector aan de manipulator. De belasting P_y wordt gevormd door het gewicht van de eind-effector en de belasting die op de eind-effector werkt. Daarbij wordt aangenomen dat de belasting op de eind-effector in dezelfde richting werkt als de zwaartekracht.

Bij deze analyse worden de reactiekrachten in de punten A tot en met E berekend. Daarbij worden de normaalkracht, de zwaartekracht en de belasting in beschouwing genomen. De momentkracht wordt gegeven door de formule $M = F \cdot r$. Hieruit is af te leiden dat het moment afhankelijk is van de kracht (F) en de krachttarm (r). Aangezien de massa van de robotarm en de belasting in punt F constant zijn, varieert de grootte van het moment door de krachttarm (r) die afhankelijk is van de configuratie van de robotarm. Er zijn tal van configuraties mogelijk en het is voor het doel van deze analyse niet zinvol om voor elk van deze configuraties het moment te berekenen. In plaats daarvan wordt gekeken naar de configuratie waarbij de krachttarm maximaal is en zo ook het moment maximaal is. Als de constructie bestand is tegen deze momentkracht, zal deze ook bestand zijn tegen de momentkracht bij elke andere willekeurige configuratie. Figuur 3.2 geeft de configuratie weer waarvoor de momentkracht in de gewrichten maximaal is. Van deze configuratie wordt een vrije lichaam structuur opgesteld die in combinatie met de evenwichtsvergelijkingen voor een statisch krachtenevenwicht resulteert in uitdrukkingen voor de reactiekrachten in de gewrichten van de robotarm. In tabel 3.1 worden de uitdrukkingen weergegeven die het resultaat zijn van deze analyse en aangeven welke kracht er door de motoren geleverd moeten worden. In bijlage A is de volledige berekening te vinden waaruit de formules zijn herleid.

Tabel 3.1: Reactiekrachten in de gewrichten voor een statische situatie.

gewricht	formule	nr.
A	$M_A = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_Pg(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})$	3.3
B	$M_B = m_{Pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})$	3.18
C	$M_C = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_Pg(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})$	3.9
D	$M_D = \frac{1}{2}m_{DE}gL_{DE} + m_EgL_{DE} + m_{EF}g(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_Pg(L_{DE} + L_{EF})$	3.12
E	$M_E = \frac{1}{2}m_{EF}gL_{EF} + m_PgL_{EF}$	3.15

3.2 Dynamica

Als aanvulling op paragraaf 3.1 wordt in deze paragraaf gekeken naar de krachten op de constructie ten gevolge van een beweging van de robotarm. Daartoe worden ook hier de krachten berekend in de bevestigingspunten A tot en met E. De resulterende momentkrachten worden gebruikt bij het bepalen van het nominaal koppel dat de actuator moet kunnen leveren. Daarnaast wordt de stijfheid van de constructie geoptimaliseerd voor deze krachten.

Net als bij de analyse van de statica wordt de dynamica geanalyseerd voor de situatie waarin de krachten maximaal zijn. Ook in dit geval wordt deze situatie bepaald door de momentkracht

en is daarom gelijk aan de situatie die werd beschouwd in paragraaf 3.1. Naast de invloed van de normaalkracht, de zwaartekracht en de belasting (P_y) wordt nu ook rekening gehouden met een hoekversnelling in de gewrichten B, C, D en E. Daarbij wordt de beweging van een schakel beschouwd als een rotatie van een star lichaam om een vaste as. De reactiekrachten in de punten A tot en met E worden berekend door eerst een vrije lichaam structuur op te stellen en door middel van de evenwichtsvergelijkingen tot een uitdrukking voor de reactiekrachten te komen. Deze volledige berekening is te vinden in bijlage B. De resulterende uitdrukkingen voor de het koppel dat de motoren moeten leveren, worden weergegeven door tabel 3.2.

Tabel 3.2: Reactiekrachten in de gewrichten voor een dynamische situatie.

gewricht	formule	nr.
A	$M_A = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_Pg(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})$	3.21
B	$M_B = m_{Pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_B \left(\frac{1}{2}m_{BC}r_{BC}^2 + \frac{2}{5}m_Cr_C^2 + \frac{1}{4}m_{CD}r_{CD}^2 + \frac{1}{3}m_{CD}L_{CD}^2 + \frac{2}{5}m_Dr_D^2 + m_DL_{CD}^2 + \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{12}m_{DE}L_{DE}^2 + m_{DE} \left(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE} \right)^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_E(L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF} \right)^2 + m_{Pz}(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2 \right)$	3.48
C	$M_C = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF} \right) + m_Pg(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_C \left(\frac{1}{4}m_{CD}r_{CD}^2 + \frac{1}{3}m_{CD}L_{CD}^2 + \frac{2}{5}m_Dr_D^2 + m_DL_{CD}^2 + \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{12}m_{DE}L_{DE}^2 + m_{DE} \left(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE} \right)^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_E(L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF} \right)^2 + m_P(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2 \right)$	3.34
D	$M_D = \frac{1}{2}m_{DE}gL_{DE} + m_EgL_{DE} + m_{EF}g \left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF} \right) + m_Pg(L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_D \left(\frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{3}m_{DE}L_{DE}^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_EL_{DE}^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF} \right)^2 + m_P(L_{DE} + L_{EF})^2 \right)$	3.39
E	$M_E = \frac{1}{2}m_{EF}gL_{EF} + m_PgL_{EF} + \alpha_E \left(\frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{3}m_{EF}L_{EF}^2 + m_PL_{EF}^2 \right)$	3.44

Het resultaat van de berekeningen aan de statica en dynamica van de robotarm is verwerkt in een rekenkundig model dat is geprogrammeerd in Microsoft Office Excel. Dit model kan gebruikt worden om het koppel te berekenen dat de motor moet leveren voor een bepaalde beweging van de robotarm. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de aanname die in het begin van dit hoofdstuk is gedaan die stelt dat de motoren in de gewrichten zijn bevestigd. Dat betekent dat de momentkracht die op motor C werkt gelijk is aan het moment om punt C. Om echter tot een waarde te komen voor het benodigde koppel van de motor, dient nog met een aantal dingen rekening gehouden te worden. De eerste is het feit dat er bij het uitvoeren van deze analyse een aantal aannames gedaan is om de berekening te vereenvoudigen. Dat betekent dat de werkelijkheid hoogst waarschijnlijk afwijkt van de situatie waar bij deze analyse van uit wordt gegaan. Om er zeker van te zijn dat

deze onnauwkeurigheid in de berekening niet tot gevolg heeft dat een verkeerde motor wordt toegepast, wordt een veiligheidsfactor toegepast. Daarnaast wordt er nog rekening gehouden met de efficiëntie van de motor. Een motor is nooit 100% efficiënt waardoor maar een deel van het koppel dat de motor kan leveren effectief omgezet wordt in een koppelkracht. Dat alles leidt tot de volgende algemene formule voor de benodigde koppelkracht van motor U.

$$T_U = \left(\frac{M_h}{\eta} \right) q \quad (3.49)$$

Waarin

M_h = momentkracht om punt h

η = efficiëntie van de motor

q = veiligheidsfactor

Op basis van formule 3.49 en de formules uit tabel 3.1 en tabel 3.2 kunnen de invoerparameters van het model bepaald worden. Deze zijn weergegeven in tabel 3.3 in bijlage C.

3.3 Kinematica

De robot kinematica bestudeert de relatie tussen afmetingen en verbindingen van de kinematische ketens en de positie, snelheid en versnelling van de schakels. Op basis van deze relatie kan bepaald worden welke krachten de actuatoren moeten leveren om de robotarm een bepaalde beweging te laten maken. Om de bewegingen van de robotarm te kunnen analyseren, wordt het mechanische systeem vereenvoudigd tot een wiskundig model. Dit model wordt ook wel de kinematische keten genoemd. Een kinematische keten is opgebouwd uit schakels die met elkaar verbonden worden door gewrichten. De schakels worden gemodelleerd als starre lichamen en de bewegingen van de gewrichten worden beschouwd als zuivere translaties of rotaties.

Het aantal vrijheidsgraden, of mobiliteit, van de kinematische keten is gelijk aan het aantal parameters dat de configuratie van de keten bepaalt (McCarthy & Soh, 2010). Dit worden ook wel de gegeneraliseerde coördinaten genoemd. Om een schakel in de vrije ruimte te positioneren, zijn er zes parameters nodig. Drie om de positie vast te leggen en drie om de oriëntatie vast te leggen. Zo heeft een systeem met n schakels $6n$ vrijheidsgraden. Maar doordat de schakels aan elkaar verbonden zijn, wordt hun bewegingsvrijheid beperkt. Deze kinematische beperking wordt opgelegd door de gewrichten. Een beperking betekent een afname van het aantal parameters dat bepalend is voor de configuratie van de keten en dus het aantal vrijheidsgraden. Dit resulteert in de formule van Grübler voor de mobiliteit (M) van een kinematische keten.

$$M = 6(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (3.50)$$

Met

n = aantal schakels

j = aantal gewrichten

f = aantal vrijheidsgraden van een gewricht

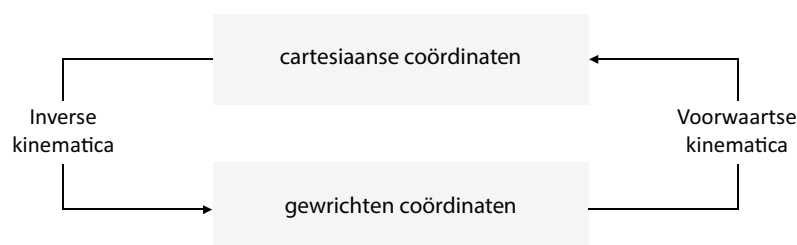
Dit is de algemene formule die voor vrijwel ieder mechanisme van toepassing is. Door de kenmerken van een seriële robotarm kan de formule van Grübler voor dit type verder vereenvoudigd worden. Deze kenmerken hebben betrekking op specifieke eigenschappen van de schakels en gewrichten. De constructie van een seriële manipulator bestaat uit binaire schakels waarvan de eerste schakel is gefixeerd. Een binaire schakel kan maar op twee punten verbonden worden met een andere schakel of met de omgeving, dus geldt $n = j + 1$. De gewrichten die de schakels met elkaar verbinden, zijn van een lage orde en hebben een enkele vrijheidsgraad. Daardoor geldt $\sum_{i=1}^j f_i = j$. De formule van Grübler kan daarmee vereenvoudigd worden tot

$$M = j \quad (3.51)$$

Het aantal vrijheidsgraden van een seriële manipulator is dus gelijk aan het aantal gewrichten.

Door de manier waarop de schakels met elkaar verbonden worden door gewrichten, kunnen twee typen kinematische ketens worden onderscheiden: een open kinematische keten en een gesloten kinematische keten. Bij een open kinematische keten kan het eindgewricht vrij worden bewogen. Dit betekent dat de gewrichten in een open kinematische keten onafhankelijk van elkaar kunnen bewegen zoals het geval is bij een seriële manipulator. De totale beweging van een open keten komt tot stand door een opeenvolging van bewegingen van de afzonderlijke gewrichten. Dit is te vergelijken met een beweging van een menselijke arm. Een buiging van de elleboog betekent niet automatisch een beweging van de pols of van de schouder. In het geval van een gesloten kinematische keten kan het eindgewricht niet vrij worden bewogen. Als een van de gewrichten in een gesloten kinematische keten beweegt, zullen ook de andere gewrichten worden bewogen. Dit is van toepassing op een parallelle manipulator. Een gesloten kinematische keten kan vergeleken worden met de beweging van het been terwijl de voet contact maakt met de grond. Als in deze situatie het kniegewricht beweegt, zullen ook het enkelgewricht en de heup bewegen.

De kinematische analyse wordt gebruikt om de configuratie van de robotarm en de positie van de eind-effector te bepalen. Daarmee wordt de begin- en eindpositie van de beweging bepaald en dat dient als input voor de actuatoren om de beweging te realiseren. Omdat de kinematische analyse beïnvloed wordt door de kinematische keten van de robot, is het van belang om hier enige kennis van te hebben. Er zijn twee benaderingen voor de analyse van de kinematische keten. Dit zijn de voorwaartse kinematica en de inverse kinematica. De relatie tussen beide benaderingen wordt geïllustreerd door figuur 3.15.



Figuur 3.15: Schematische weergave van voorwaartse en inverse kinematica.

In paragraaf 3.3.1 wordt een uitgebreide analyse gedaan naar de voorwaartse kinematica die resulteert in de beschrijving van een methodiek voor het opstellen van een transformatiematrix waarmee de positie van de eind-effector kan worden berekend aan de hand van de stand van de motoren. De inverse kinematica wordt beschreven in paragraaf 3.3.2. Deze analyse is voor een seriële manipulator vele malen complexer dan de voorwaartse kinematica en valt buiten de grenzen van deze opdracht. Vandaar dat de principes van de inverse kinematica op een globaal niveau worden beschreven zonder in te gaan op de methodiek voor het uitvoeren van een kinematische analyse.

3.3.1 Voorwaartse kinematica

Bij de voorwaartse kinematica wordt de positie en oriëntatie van de eind-effector berekend door de configuratie van de gewrichten en de schakels. De totale transformatie van de robotarm, die leidt tot de positie van de eind-effector, is voor een seriële manipulator te bepalen door het totaal van afzonderlijke transformaties van de schakels en gewrichten. Dit is een relatief eenvoudig berekening in het geval van een seriële manipulator, maar voor een parallelle manipulator, waar de schakels op een andere manier geordend zijn, is het berekenen van de voorwaartse kinematica een erg complexe procedure.

Door de voorwaartse kinematica te analyseren, kan een beter idee worden gekregen van hoe een verdraaiing van de gewrichten van invloed is op de positionering van de eind-effector. Bij het ontwerpen van de robotarm wordt gestreefd naar een flexibele arm met groot werkgebied en vrijheid in het positioneren van de eind-effector binnen dit werkgebied. Aan de hand van deze analyse wordt inzicht verkregen in de parameters die bepalend zijn voor de positionering en wat vanuit kinematisch oogpunt een optimale configuratie is. Dit gecombineerd met de analyse van de dynamica geeft een basis voor het beoordelen en bepalen van de kinematische eigenschappen van de robotarm.

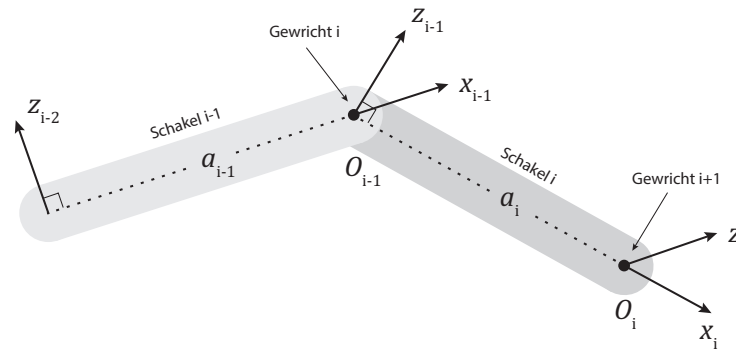
Er zijn meerdere methoden waarmee de voorwaartse kinematica van een manipulator geanalyseerd kan worden. Veel van deze methoden bieden een conventie waarmee de voorwaartse kinematica in vereenvoudigde vorm opgelost kan worden. Dit biedt met name voordelen bij manipulators met een groter aantal schakels, omdat de complexiteit van de analyse toeneemt met het aantal schakels. Een van de meest toegepaste conventiemethoden is de Denavit-Hartenberg conventie (Kucuk & Bingul, 2006). Vandaar dat in dit hoofdstuk de voorwaartse kinematica van een seriële manipulator geanalyseerd zal worden aan de hand van deze conventiemethode.

Denavit-Hartenberg conventie

De aanname dat ieder gewricht een enkele vrijheidsgraad heeft, betekent dat de beweging van ieder gewricht beschreven kan worden door een enkele variabele die ook wel de gewrichtvariabele wordt genoemd. In het geval van een rotatiegewricht is dit de hoekverdraaiing en in het geval van een translatiegewricht is dit de verplaatsing. Het doel van de voorwaartse kinematica is om het totale effect van alle gewrichtvariabelen op de positie van de eind-effector te bepalen.

De eerste stap in de analyse is het typeren van de schakels en gewrichten van de manipulator, zodat hier op een consequente manier naar verwezen kan worden. Deze typering wordt beschreven door figuur 3.16. Een seriële manipulator met n gewrichten heeft $n + 1$ binaire schakels. De gewrichten worden genummerd van 1 tot n en de schakels worden genummerd van 0 tot n , beginnende bij de

basis van de robotarm. Op deze manier verbindt gewricht i schakel i met schakel $i - 1$. De basis, schakel 0, is gefixeerd en beweegt niet onder invloed van een beweging in de gewrichten. Daarom geldt dat schakel i verplaatst door een beweging in gewricht i .



Figuur 3.16: Typing van schakels en gewrichten volgens de Denavit-Hartenberg conventie.

Zoals eerder gezegd wordt met ieder gewricht een gewrichtvariabele geassocieerd die de beweging van het gewricht beschrijft. Voor gewricht i wordt deze gewrichtvariabele weergegeven door q_i . Wanneer er sprake is van een rotatiegewricht is q_i gelijk aan de hoekverdraaiing θ_i en voor een translatiegewricht is q_i gelijk aan de verplaatsing d_i .

Om nu de beweging van de manipulator te analyseren wordt aan iedere schakel een coördinatenframe bevestigd, zodat frame $o_i x_i y_i z_i$ is bevestigd aan schakel i . Een transformatie van de robotarm wordt beschreven door een transformatie van deze coördinatenframes. Daarbij is het van belang om een referentiefraam te hebben aan de hand waarvan de transformaties worden beschreven. Dit is het fraam $o_0 x_0 y_0 z_0$ dat is bevestigd aan de basis van de robot, omdat dit het onderdeel is dat niet beweegt onder invloed van een beweging in de gewrichten.

De beweging en oriëntatie van $o_i x_i y_i z_i$ ten opzichte van $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ worden beschreven door de homogene transformatiematrix ${}^{i-1}T_i$. Ter vereenvoudiging zal de notatie ${}^{i-1}T_i$ vanaf hier worden afgekort als A_i . Deze matrix verandert met de configuratie van de robotarm. De beweging van twee aangrenzende schakels ten opzichte van elkaar wordt bepaald door de gewrichtsvariabele q_i . Dat betekent dat de homogene transformatiematrix A_i enkel afhankelijk is van deze variabele waardoor geldt dat

$$A_i = A_i(q_i) \quad (3.52)$$

Het is mogelijk om de voorwaartse kinematica van een manipulator te analyseren met willekeurige frames verbonden aan iedere schakel. Echter kan de analyse significant worden vereenvoudigd door de frames systematisch te positioneren. De manier waarop de Denavit-Hartenberg conventie bijdraagt aan een simplificatie van de analyse van de voorwaartse kinematica is het bieden van een systematiek voor het selecteren van de coördinatenframes. Door deze conventie kan de homogene transformatiematrix A_i worden weergegeven als product van vier basistransformaties (Forward Kinematics: The Denavit-Hartenberg Convention, z.j.).

$$A_i = Rot_{z,\theta} Trans_{z,d} Trans_{x,a} Rot_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \cos\alpha & \sin\theta \sin\alpha & a \cdot \cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \cos\alpha & -\cos\theta \sin\alpha & a \cdot \sin\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Een willekeurige transformatie tussen twee objecten in een drie dimensionale ruimte wordt gekarakteriseerd door zes parameters. Echter kan uit de bovenstaande matrix worden afgeleid dat door middel van de Denavit-Hartenberg conventie een transformatie tussen twee schakels beschreven kan worden met vier parameters. De reden dat er met deze conventie maar vier in plaats van zes parameters nodig zijn, ligt in de keuze van de positionering van de coördinatenframes. Zo zijn er twee voorwaarden op te stellen die de positie van een deel van de coördinatenframes definiëren, namelijk:

(DH1) As x_i staat loodrecht op as z_0

(DH2) As x_i is snijdend met as z_0

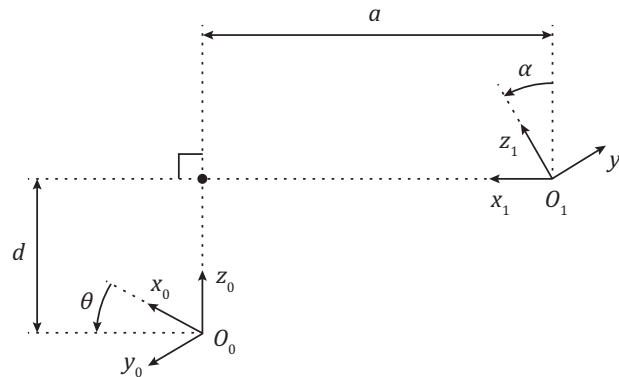
zoals weergegeven in figuur 3.17. Iedere homogene transformatiematrix die aan deze voorwaarden voldoet, kan geschreven worden in de vorm 3.53 en is met de vier parameters θ , a , d en α te specificeren. Elk van deze parameters wordt als volgt geïnterpreteerd:

a_i = de afstand van O_i tot de kruising tussen de assen x_i en z_{i-1} gemeten langs x_i

d_i = de afstand van O_{i-1} tot de kruising tussen de assen x_i en z_{i-1} gemeten langs z_{i-1}

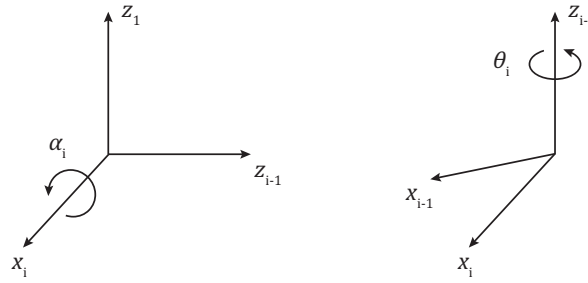
α_i = de hoek tussen z_{i-1} en z_i gemeten om de x_i as. De positieve draairichting wordt bepaald van as z_{i-1} tot as z_i door de rechterhandregel (figuur 3.18)

θ_i = de hoek tussen x_{i-1} en x_i gemeten om de z_{i-1} as. De positieve draairichting wordt bepaald van as x_{i-1} tot as x_i door de rechterhandregel (figuur 3.18)



Figuur 3.17: Coördinatenframes volgens de aannames DH1 en DH2.

Gegeven dat de matrix A_i afhankelijk is van een enkele parameter zijn drie van de vier boven genoemde parameters constant. Voor iedere manipulator zijn de parameters a_i en α_i constant voor iedere i . Daarmee zijn dit de karakteristieken van de manipulator. Voor een rotatiegewricht is d_i constant (gelijk aan 0) en θ_i variabel. In het geval van een translatiegewricht is θ_i constant (gelijk aan 0) en d_i variabel.

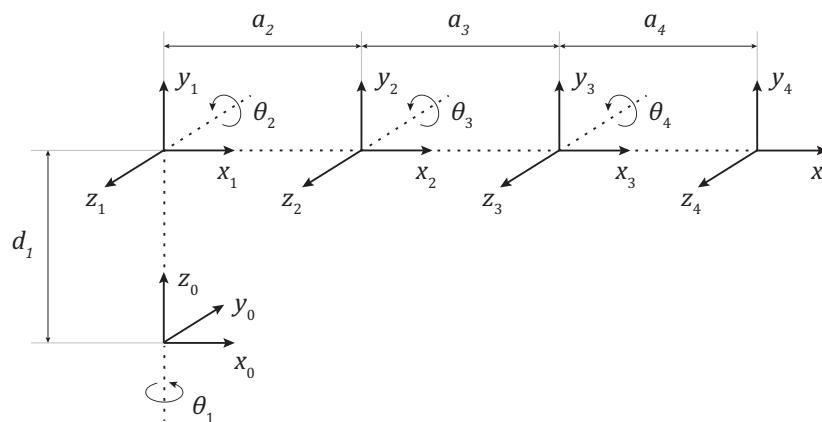


Figuur 3.18: Positieve draairichting voor a_i en θ_i

Er is vastgesteld dat de Denavit-Hartenberg conventie het mogelijk maakt om door een systematische keuze van de coördinatenframes een transformatie tussen twee aangrenzende schakels te beschrijven met vier parameters. Zo zijn er twee voorwaarden (DH1) en (DH2) beschreven waar het kinematische model aan moet voldoen om te kunnen worden geanalyseerd met de Denavit-Hartenberg conventie. Daarnaast bestaat er echter nog een groot aantal vrijheden in de keuze van de rest van de coördinatenframes. Hoewel hier geen voorwaarden aan verbonden zijn voor de analyse, is er wel een aantal richtlijnen op te stellen ten gunste van een systematische analyse.

Het is altijd mogelijk om voor een gegeven manipulator de frames $0, \dots, n$ zo te kiezen dat aan de voorwaarden (DH1) en (DH2) wordt voldaan. Buiten deze voorwaarden is de keuze van de oorsprong en de assen van de coördinatenframes grotendeels willekeurig. Om hier toch structuur in aan te brengen ten gunste van een eenduidige methodiek wordt de plaatsing van de coördinatenframes gedaan aan de hand van de volgende richtlijnen.

- z_i wordt zo gekozen dat dit de bewegingsas is voor gewricht $i + 1$. Als gewricht $i + 1$ een rotatiegewricht is, is z_i de rotatie as van gewricht $i + 1$. Als gewricht $i + 1$ een translatiegewricht is, is z_i de translatie as van gewricht $i + 1$.
- De drie assen van het coördinatenframe zijn vormen samen een rechterhand frame



Figuur 3.19: Toewijzing van de coördinatenframes voor een 4R manipulator.

- Het coördinaten frame van schakel i is geplaatst in het distale uiteinde van schakel i . Dat betekent dat coördinatenframe $i - 1$ gepositioneerd is in gewricht i .
- x_i loopt collineair aan de normaal tussen z_{i-1} en z_i .
- z_n staat in dezelfde richting als z_{n-1} wanneer het n^{de} gewricht een rotatiegewricht is.

Aan de hand van de voorbeschreven methodiek zal nu de voorwaartse kinematica van een 4R gearticuleerde robot worden geanalyseerd. Deze robot is opgebouwd uit vijf binaire schakels die met elkaar zijn verbonden door vier rotatiegewrichten. De eerste stap in de analyse is het opstellen van een model van de kinematische structuur van de manipulator. Dit model wordt weergegeven in de kinematische nulpositie waarbij iedere hoek θ gelijk is aan nul (figuur 3.19).

De coördinatenframes worden geplaatst volgens de richtlijnen die eerder zijn beschreven. Op basis van figuur 3.19 kan tabel 3.3 worden opgesteld met de parameters θ_i , a_i , d_i en α_i . De variabele parameters worden aangegeven door de grijs gemarkeerde cellen.

Tabel 3.3: Denavit-Hartenberg parameters van de 4R manipulator.

i	a_i	α_i	d_i	θ_i	link type
1	0	α_1	d_1	θ_1	$R \perp R(90)$
2	a_2	0	0	θ_2	$R \parallel R(0)$
3	a_3	0	0	θ_3	$R \parallel R(0)$
4	a_4	0	0	θ_4	$R \parallel R(0)$

Door de parameters uit tabel 3.3 in te vullen in uitdrukking 3.53 kunnen de homogene transformatie matrices A_1 , A_2 , A_3 en A_4 als volgt worden opgesteld. Voor een vereenvoudigde notatie worden $\cos_{\theta_i}$ en $\sin_{\theta_i}$ geschreven als respectievelijk c_i en s_i

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

De totale transformatie van de eind-effector ten opzichte van frame 0x_0y_0z_0 wordt verkregen door het totaal van de transformaties van de aangrenzende links zoals deze zijn gegeven door de formules 3.54 tot en met 3.57 met elkaar te vermenigvuldigen. Het resultaat is de homogene transformatiematrix 0T_4 die gegeven wordt door formule 3.58.

$${}^0T_4 = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Met

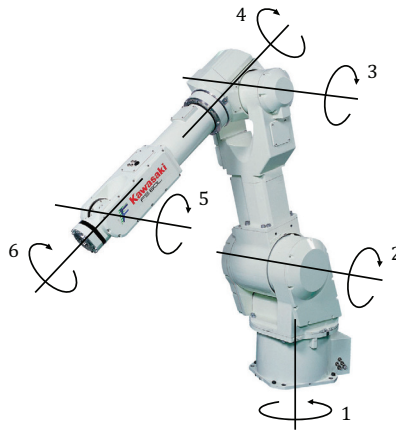
$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1 c_2 c_3 c_4 - c_1 s_2 s_3 c_4 - c_1 c_2 s_3 s_4 - c_1 s_2 c_3 s_4 \\ r_{12} &= -c_1 c_2 c_3 s_4 + c_1 s_2 s_3 s_4 - c_1 c_2 s_3 c_4 - c_1 s_2 c_3 c_4 \\ r_{13} &= s_1 \\ p_x &= c_1 c_2 c_3 c_4 a_4 - c_1 s_2 s_3 c_4 a_4 - c_1 c_2 s_3 s_4 a_4 - c_1 s_2 c_3 s_4 a_4 + c_1 c_2 c_3 a_3 - c_1 s_2 s_3 a_3 + c_1 c_2 a_2 \\ r_{21} &= s_1 c_2 c_3 c_4 - s_1 s_2 s_3 c_4 - s_1 c_2 s_3 s_4 - s_1 s_2 c_3 s_4 \\ r_{22} &= -s_1 c_2 c_3 s_4 + s_1 s_2 s_3 s_4 - s_1 c_2 s_3 c_4 - s_1 s_2 c_3 c_4 \\ r_{23} &= -c_1 \\ p_y &= s_1 c_2 c_3 c_4 a_4 - s_1 s_2 s_3 c_4 a_4 - s_1 c_2 s_3 s_4 a_4 - s_1 s_2 c_3 s_4 a_4 + s_1 c_2 c_3 a_3 - s_1 s_2 s_3 a_3 + s_1 c_2 a_2 \\ r_{31} &= s_2 c_3 c_4 + c_2 s_3 c_4 - s_2 s_3 s_4 + c_2 c_3 s_4 \\ r_{32} &= -s_2 c_3 s_4 - c_2 s_3 s_4 - s_2 s_3 c_4 + c_2 c_3 c_4 \\ r_{33} &= 0 \\ p_z &= s_2 c_3 c_4 a_4 + c_2 s_3 c_4 a_4 - s_2 s_3 s_4 a_4 + c_2 c_3 s_4 a_4 + s_2 c_3 a_3 + c_2 s_3 a_3 + s_2 a_2 + d_1 \end{aligned}$$

p_x , p_y en p_z geven de waarden van respectievelijk de x-, y- en z-coördinaat van de eind-effector.

3.3.2 Inverse kinematica

De inverse kinematica houdt zich bezig met het bepalen van de benodigde beweging van de actuatoren om een gewenste positie van de eind-effector te bereiken. Daartoe is een omzetting nodig van het cartesische coördinatenstelsel, dat de positie van de eind-effector in de ruimte beschrijft, naar het gewrichtten coördinatenstelsel dat als input dient voor de actuatoren. Bij seriële robots is deze kinematische analyse het meest complex. Afhankelijk van de kinematische keten kan de inverse kinematica geanalyseerd worden in gesloten of in open vorm. Een open vorm betekent een iteratieve analyse die veel reken capaciteit vraagt. Daarom wordt bij het ontwerpen vaak gestreefd naar een kinematische keten die in gesloten vorm geanalyseerd kan worden. Let op dat dit iets anders is dan een gesloten kinematische keten. Het is namelijk wel mogelijk om een seriële manipulator, met open kinematische keten, in gesloten vorm te analyseren.

Donald L. Pieper (1968) concludeert in zijn proefschrift dat het voor iedere seriële manipulator met zes gewrichten waarvan de assen van drie opeenvolgende gewrichten elkaar snijden mogelijk is om de inverse kinematica in gesloten vorm te analyseren. Daartoe omschrijft hij een



Figuur 3.20: Rotatie assen van een 6R seriële manipulator.

richtlijn voor de specifieke positionering van de gewrichten die ook wel de 321 kinematische structuur wordt genoemd. Deze structuur wordt weergegeven door figuur 3.20. De assen van de drie polsgewrichten (4, 5 en 6) snijden elkaar orthogonaal in een punt, het schouder- (2) en ellebooggewricht (3) staan parallel aan elkaar en het eerste gewricht (1) staat loodrecht op het schouder gewricht. De kinematische structuur kan in gesloten vorm geanalyseerd worden doordat positie en oriëntatie kinematica van elkaar los gekoppeld kunnen worden. De geometrische eigenschap die dit mogelijk maakt is de intersectie van gewrichtsassen. Vanwege de significante simplificatie van de kinematische analyse door deze specifieke structuur is het grootste deel van de gearticuleerde robots opgebouwd volgens de 321 kinematische structuur.

Conclusie

In dit hoofdstuk is de mechanica van een industriële robot geanalyseerd. Daartoe is allereerst een vereenvoudigd model opgesteld van een robotarm dat als basis dient voor het opstellen van een rekenkundig en kinematisch model. De analyses van de statica en dynamica zijn gecombineerd tot een rekenkundig model waarmee het benodigd motorkoppel berekend kan worden. Daarbij is niet alleen rekening gehouden met het eigen gewicht van de robot, maar ook met een belasting op de eind-effector. De analyse van de kinematica geeft een methodiek voor het opstellen van een transformatiematrix waarmee de positie van de eind-effector kan worden berekend. Dit model van de voorwaartse kinematica kan als input dienen voor een berekening van de inverse kinematica, maar het daadwerkelijk uitvoeren van een dergelijke berekening valt buiten de grenzen van dit project. Op basis van de analyse van de kinematica kan geconcludeerd worden dat de complexiteit van de kinematische keten bepaald door twee factoren. De eerste is de topologie. Dit omvat de ordening van de schakels. Bijvoorbeeld een seriële schakeling of een parallelle schakeling. De tweede factor is de geometrie die bepaalt hoe de opeenvolgende gewrichten te opzichte van elkaar zijn gepositioneerd. De 321 kinematische structuur is een goed voorbeeld van hoe door middel van geometrie de complexiteit kan worden vereenvoudigd.

Hoofdstuk 4

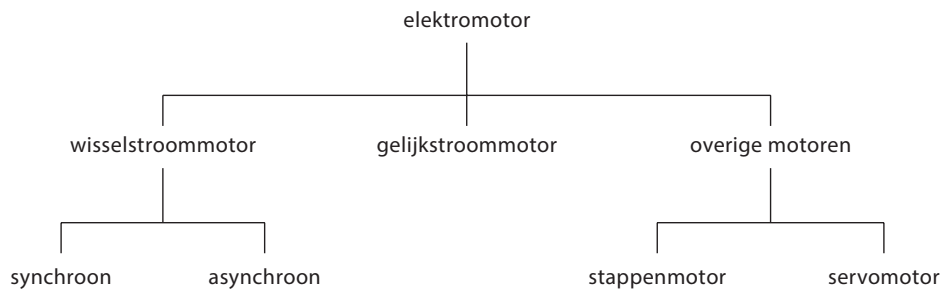
Actuatoren

De actuator is het onderdeel van de robotarm dat voor de beweging van de onderdelen zorgt. Een actuator kan zijn van het type hydraulisch, pneumatisch of elektrisch. Aangezien moderne industriële robots vrijwel uitsluitend worden aangestuurd met elektrische actuatoren, worden in deze analyse de hydraulische en pneumatische actuatoren buiten beschouwing gelaten. Bij een elektrische actuator, of elektromotor, wordt elektrische energie omgezet in mechanische energie door middel van elektromagnetisme. De mechanische energie komt tot uitdrukking in warmte en beweging. In de meeste gevallen is dit een roterende beweging, maar er zijn ook elektromotoren met een lineaire beweging. Zoals in paragraaf 1.1.5 is geconstateerd, beweegt een gearticuleerde robot uitsluitend door rotaties in de gewrichten. Om de bouw van het schaalontwerp overeen te laten komen met het gekozen type robot, worden ook bij dit ontwerp de schakels bewogen door middel van roterende bewegingen. Daarom worden in deze analyse motoren met een lineaire beweging buiten beschouwing gelaten.

Het doel van deze analyse is om kennis op te doen van de verschillende elektromotoren, zodat een beargumenteerde keuze gemaakt kan worden voor de elektromotoren die worden toegepast op het schaalontwerp van de industriële robot. Daartoe zal in paragraaf 4.1 gekeken worden naar de verschillende typen elektromotoren en hun eigenschappen. Uit deze analyse volgt de keuze voor een type elektromotor dat toegepast wordt op de robotarm. Vervolgens richt paragraaf 4.2 zich op de selectie van de specifieke motoren van het gekozen type. Daarbij wordt onder andere gekeken naar het benodigd koppel dat de motoren moeten leveren en wordt er een marktonderzoek gedaan naar de beschikbare modellen en onderlinge verschillen in prijs en specificaties. Hieruit volgt de keuze voor vier elektromotoren die in de robotarm zullen worden verwerkt om de gewenste beweging van de schakels te realiseren.

4.1 Elektromotoren

Er zijn verschillende typen elektromotoren die variëren in constructie en toepassing. In figuur 4.1 is een classificering weergegeven van enkele veelvoorkomende typen elektromotoren (Electrical Engineering, z.j.). Deze typen motoren zijn nader onderzocht op relevante karakteristieke eigenschappen. Hiervan is een uitvoerige beschrijving te vinden in bijlage D. Uit deze analyse blijkt dat met name twee typen elektromotoren geschikt zijn voor toepassing in de modelbouw. Dit zijn de servomotor en de stappenmotor. Allebei deze typen zijn geschikt om toegepast te worden op de schaal waarop de robotarm wordt ontworpen en kunnen relatief eenvoudig worden aangestuurd vanaf een externe computer. Deze eigenschappen van de servomotor en stappenmotor zijn in kaart gebracht en worden afgewogen tegen de gewenste functionaliteit van de robotarm om zo tot een keuze te komen van het type elektromotor dat toegepast zal worden (zie bijlage D).



Figuur 4.1: Classificering van de verschillende typen elektromotoren.

Op basis van deze afweging wordt geconcludeerd dat een servomotor meer geschikt is voor toepassing op een industriële robotarm. Bij een stappenmotor wordt de beweging aangestuurd in een aantal stappen. In het geval van een te hoge belasting kan het voorkomen dat de motor een stap overslaat wat resulteert in een onnauwkeurigheid in de positionering. Bij een servomotor komt dit risico niet voor doordat de motor beschikt over positie feedback. Dit zorgt ervoor dat altijd de gewenste positie wordt bereikt en dat het systeem bovendien weet in welke positie de motor staat op het moment van inschakelen. Door deze eigenschap positioneert een servomotor nauwkeuriger dan een stappenmotor. Dit kan met name van belang zijn wanneer de robotarm bewerkingen als frezen uit gaat voeren waarbij de motoren zwaarder belast worden dan bij een normale verplaatsing van de eind-effector door de ruimte. Een bijkomend voordeel dat de servomotor niet in stappen beweegt, is dat de beweging van een servo vloeiender is, waardoor er minder kans is op resonantie in de beweging. Dit zorgt voor een lagere belasting van de constructie, een hogere nauwkeurigheid en een meer realistische beweging.

4.2 Motorkeuze

In paragraaf 4.1 is gekozen voor de toepassing van servomotoren. De volgende stap is het selecteren van modellen servomotoren die specifiek geschikt zijn voor de robotarm van dit project. De eerste selectie voor deze keuze wordt gemaakt op basis van het koppel dat de servomotor moet kunnen leveren om de gewenste beweging te realiseren. Het model dat is opgesteld in paragraaf 3.2 wordt gebruikt om het benodigde motorkoppel te berekenen. Het resultaat van de berekening is weergegeven in tabel 4.2.

Tabel 4.2: Benodigd motorkoppel per gewricht.

gewricht	motorkoppel ¹ (kg · cm)	motorkoppel ² (kg · cm)
A	10,1	12,6
B	49,2	61,5
C	19,0	23,8
D	1,6	2,0

¹ motorkoppel berekend zonder rekening te houden met een veiligheidsfactor

² motorkoppel berekend met veiligheidsfactor van 1,25

Tabel 4.3 in bijlage E geeft de waarden voor de modelparameters die voor deze berekening zijn gebruikt. Bij het inschatten van de parameters zijn de specificaties van de Lynxmotion AL5D robotarm als referentie genomen. Allereerst is er een schaal gekozen voor de afmetingen van de robotarm. Door middel van de in paragraaf 2.1 vastgestelde verhoudingen kon met de keuze van een armlengte de rest van de afmetingen worden bepaald. De schaal is iets groter gekozen dan die van de AL5D, omdat er rekening mee gehouden moet worden dat de constructie en de motoren binnen de behuizing passen.

Naar aanleiding van de resultaten uit tabel 4.2 is de keuze voor het type servomotor heroverwogen. Het bleek dat servomotoren die geschikt zijn om het benodigd koppel te leveren in een hoog prijssegment zitten waardoor het budget voor dit project zou worden overschreden. Vandaar dat er twee alternatieven zijn onderzocht waarmee mogelijk dezelfde benodigde functionaliteit kan worden gerealiseerd tegen een lagere kostprijs. De eerste mogelijkheid is het toepassen van een gelijkstroommotor in plaats van een servomotor. Gelijkstroommotoren leveren een hoog koppel tegen een relatief lage prijs. Een nadeel is wel dat dit type motor gekoppeld moet worden aan een extra stuk elektronica om feedback over de positie van de motor te krijgen. Het bleek echter dat de implementatie van positiefeedback in combinatie met een gelijkstroommotor zodanig veel meer complicaties met zich mee brengt dat dit niet opweegt tegen de extra kosten van een servomotor. Vandaar dit alternatief is afgeschreven.

Een tweede alternatief was het toepassen van een overbrenging. De overbrenging dient ter verhoging van het motorkoppel, zodat een goedkopere servomotor met een lager koppel kan worden gebruikt. Een nadeel hiervan is dat het rotatiebereik van de servomotor afneemt met dezelfde overbrengingsverhouding als waarmee het motorkoppel toeneemt. Bijlage F beschrijft een analyse van het toepassen van een overbrenging waarbij wordt gekeken naar de mogelijkheden om een overbrenging te koppelen aan een servomotor en wat dat voor implicaties heeft voor de nauwkeurigheid van de robotarm. Uit deze analyse volgt dat het mogelijk is om een overbrenging zodanig toe te passen dat met een goedkopere servo de gewenste kracht te leveren is. Door de juiste positionering van het rotatiebereik van gewricht C kan de maximale momentkracht in dit gewricht verminderd worden tot $41,9 \text{ kg} \cdot \text{cm}$. Daarnaast kan met een geschikt overbrenging een koppel van $57,6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ worden behaald. Daarmee heeft de aandrijving een acceptabele veiligheidsfactor van 1,37.

Uitgaande van de aanname dat er geen speling zit in de motor en de ophanging van de tandwielen bedraagt de onnauwkeurigheid van de overbrenging ongeveer 0,04 mm. Wanneer echter in overweging wordt genomen dat de robotarm geproduceerd wordt met conventionele productiemethoden die geschikt zijn voor enkelstuks productie, is het niet realistisch om aan te nemen dat een constructie kan worden gerealiseerd met een voldoende nauwkeurige ophanging voor de tandwielen. Omwille van de nauwkeurigheid van de robotarm is er daarom in overleg met de opdrachtgever besloten om servomotoren toe te passen zonder overbrenging.

Na deze constatering is er voor ieder rotatiegewricht gekeken naar motoren die het benodigde koppel kunnen leveren. Van deze motoren zijn de specificaties en onderlinge verschillen geanalyseerd op basis waarvan twee voorstellen zijn opgesteld die voor elk gewricht een geschikte motor bevatten. Het eerste voorstel is gericht op een laag budget en bevat motoren waarvan de betrouwbaarheid onzeker is. Dit voorstel is weergegeven door tabel 4.3 in bijlage G. Het tweede

voorstel wordt omschreven door tabel 4.4 in bijlage H en bevat motoren in een hoger prijssegment waarvan bekend is dat ze betrouwbaar en accuraat functioneren. Beide voorstellen worden tegen elkaar afgewogen op prijs-kwaliteitverhouding. Op basis hiervan is in overleg met de opdrachtgever de motorkeuze tot stand gekomen die is weergegeven in figuur 4.4.



Shenzhen XQ Power XQ-S4016D		
voltage	snelheid	koppel
4,8 V	0,14 s/60°	15,5 kg·cm
6,0 V	0,12 s/60°	17,5 kg·cm
afmetingen		gewicht
40 x 20 x 39 mm		56 g



Shenzhen XQ Power XQ-S5650D		
voltage	snelheid	koppel
7,2 V	0,20 s/60°	48 kg·cm
8,5 V	0,18 s/60°	60 kg·cm
afmetingen		gewicht
60,1 x 30,1 x 59,7 mm		177,5 g



Savöx SA-1230SG		
voltage	snelheid	koppel
4,8 V	0,20 s/60°	30 kg·cm
6,0 V	0,16 s/60°	36 kg·cm
afmetingen		gewicht
40,3 x 20,2 x 45 mm		79 g



Savöx SH-0254		
voltage	snelheid	koppel
6,0 V	0,13 s/60°	3,9 kg·cm
afmetingen		gewicht
22,8 x 12 x 29,4 mm		15,8 g

Figuur 4.4: Specificaties van de gekozen servomotoren.

Hoofdstuk 5

Programma van eisen

De analysefase resulteert in een aantal eisen en specificaties waar het ontwerp aan moet voldoen. De eisen en specificaties zijn zodanig opgesteld dat ze voldoen aan de uitgangspunten en doelen van de opdracht. Door ontwerpen te evalueren aan de hand van deze lijst, kan getoetst worden of ze voldoen aan de behoeften van de opdrachtgever. Zo blijft de kwaliteit gedurende het project gewaarborgd en zal er niet worden afgeweken van de uitgangspunten. De eisen zijn in de linker kolom van tabel 5.1 beschreven in abstracte vorm. De tweede kolom koppelt daar indien mogelijk een toetsbare waarde aan.

Tabel 5.1: Programma van eisen

eis	specificatie
De beweging wordt aangedreven door elektrische actuatoren	servomotoren
De robotarm moet geproduceerd kunnen worden met conventionele productiemethoden	lasersnijden, 3D printen, (CNC) frezen
De robotarm moet aangestuurd worden vanaf een externe computer	
De robotarm is een realistische representatie van een industriële robot	
De robotarm moet stabiel bewegen onder invloed van het eigen gewicht	herhaalbaarheid van $\pm 0,3\text{mm}$
De snelheid waarmee de gewrichten van de robotarm bewegen, moet overeen komen met de snelheid van een echte gearticuleerde robot	
De robotarm moet herprogrammeerbaar zijn	
De robotarm moet programmeerbaar zijn in meerdere assen	minimaal drie assen
De robotarm is opgebouwd uit binaire schakels	vijf schakels
De schakels van de robotarm zijn in serie met elkaar verbonden	
De schakels van de robotarm worden met elkaar verbonden door rotatiegewrichten	vier gewrichten met één vrijheidsgraad

Het proximale uiteinde van schakel AB moet door middel van een vaste verbinding verbonden kunnen worden met de omgeving	losneembare bout-moer verbinding
De rotatie assen 2, 3 en 5 zijn evenwijdig aan elkaar en staan parallel aan grondvlak XY	
Rotatie as 1 staat loodrecht op grondvlak XY	
De oorsprongen van de gewrichten 1, 2, 3 en 5 liggen in hetzelfde vlak XZ	
De robotarm voldoet aan de esthetische kenmerken van een gearticuleerde robot	figuur 2.2
De robotarm voldoet aan de verhoudingen van een gearticuleerde robot	tabel 2.1
De robotarm kan tegen beperkte kosten worden geproduceerd	€100,- voor elektronische componenten

Naast de eisen die worden geformuleerd in tabel 5.1 volgt er nog een aantal richtlijnen waarvan het voor het behalen van de doelstellingen niet noodzakelijk is dat het ontwerp hieraan voldoet, maar die wel bij kunnen dragen aan een goed ontwerp. Op basis van de analyse uit paragraaf 3.3.2 kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is om door middel van de geometrie van de robotarm de kinematische analyse te vereenvoudigen. Dit is gunstig voor het aansturen van de robotarm. Om dit te bereiken is het wenselijk dat de kinematische keten van de robot in gesloten vorm geanalyseerd kan worden. Dit kan worden bereikt door de drie polsgewrichten (4, 5 en 6) zo te positioneren dat de gewrichtsassen elkaar orthogonaal snijden. Daarnaast kan het ontwerp worden gestuurd door de richtlijn dat de schakels zodanig zijn vorm gegeven dat ze de eigen beweging zo min mogelijk belemmeren. Dit heeft een positief effect op de grootte van het werkgebied en de flexibiliteit van de robotarm net als het streven om een robot te ontwerpen met een compacte basis die toegang tot het centrum van het werkgebied zo min mogelijk belemmert.

Ontwerpstudie

Bij dit project wordt door middel van het ontwerpen van een product voorzien in de behoeften van de opdrachtgever. De kennis die is vergaard in het voorgaande deel van dit verslag dient ter ondersteuning van het ontwerpproces. Door middel van dit ontwerpproces wordt onderzocht hoe een product kan worden gerealiseerd dat voldoet aan de gestelde eisen en randvoorwaarden. Een groot deel van de eigenschappen van het ontwerp wordt vastgelegd op basis van de hiervoor beschreven analyse. Zo blijft er slechts een gering aantal producteigenschappen over dat door middel van iteratief ontwerpen kan worden gespecificeerd. Vandaar dat de omvang van de ontwerpstudie relatief beperkt is.

Dit verslagdeel richt zich op de beschrijving van zowel het product als het proces waarmee deze tot stand is gekomen. Allereerst wordt voortgebouwd op de theoretische basis die is gelegd in hoofdstuk 1 en hoofdstuk 2 door verschillende conceptringingen samen te stellen op basis van de variabele eigenschappen van een gearticuleerde robot. Daaruit wordt een kinematische structuur gekozen voor het ontwerp. Op basis van deze structuur zal een constructie worden ontworpen die het geraamte vormt van de robotarm en zorgt voor de vereiste stevigheid en bewegingsvrijheid. Om ook een realistische uitstraling te realiseren wordt een behuizing ontworpen die de constructie volledig omsluit. De constructie en behuizing worden gecombineerd tot een totaal productontwerp. Van dit ontwerp zullen de meest kenmerkende eigenschappen en de samenhang tussen de verschillende onderdelen worden beschreven. Om te valideren dat het ontwerp voorziet in de behoeften van de opdrachtgever, worden de specificaties geëvalueerd en vergeleken met de opgestelde richtlijnen en eisen. Ten slotte wordt met oog op doorontwikkeling en meervoudige productie een overzicht gemaakt van de kosten.

Hoofdstuk 6

Basisstructuur

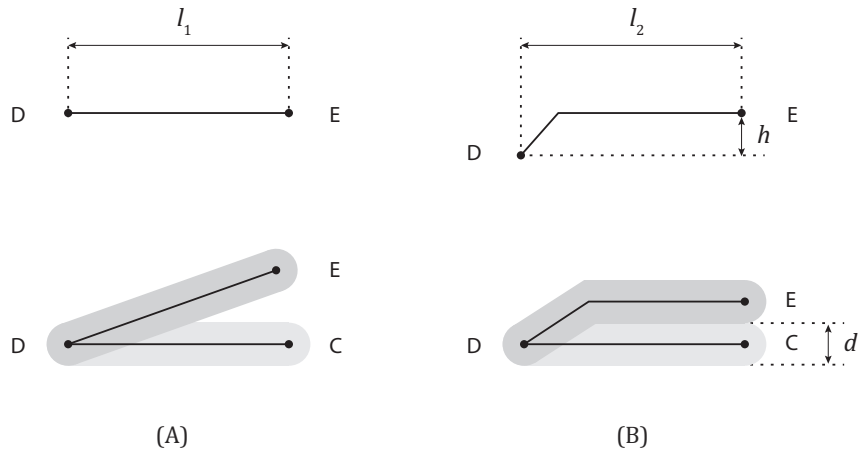
Vanwege het doel van deze opdracht om een robotarm te ontwerpen waarmee onderzocht kan worden hoe experts de besturing van een industriële robot ervaren, is het van belang dat het ontwerp representatief is voor industriële robots die worden toegepast in de industrie. De aansturing die op deze robot wordt getest, wordt namelijk ontwikkeld om toegepast te worden op bestaande industriële robots. Om deze reden richt het ontwerpproces zich op een optimale vertaling van de eigenschappen van een bestaande gearticuleerde robot naar een schaalmodel. Daarbij wordt zo veel mogelijk de bestaande ontwerpen als uitgangspunt genomen.

Een groot deel van de basisstructuur van de robotarm volgt uit de analyses uit hoofdstuk 1 en 2. Dit is het deel van de structuur dat kenmerkend is voor het gekozen typen en is daarmee een vereiste eigenschap van het ontwerp. Daarnaast zijn er binnen het gekozen type gearticuleerde robot verschillen tussen de modellen te constateren. In dit hoofdstuk worden een evaluatie gedaan van de variabele eigenschappen. Zo zijn er drie belangrijke structuureigenschappen te onderscheiden die variëren tussen de modellen. In paragraaf 6.1 zal besproken worden hoe de vorm van schakel DE varieert. Vervolgens wordt in paragraaf 6.2 gekeken naar de positionering van het schoudergewricht (C) waarna in paragraaf 6.3 wordt beschreven hoe er verschillen optreden in de constructie van schakel CD. Op basis van deze analyses wordt aan het eind van dit hoofdstuk gekozen volgens welke structuur de robotarm ontworpen wordt.

6.1 Vorm van schakel DE

De vorm van schakel DE varieert op twee manieren die zijn weergegeven in figuur 6.1. In deze paragraaf zullen de voor en nadelen van beide varianten worden besproken om op basis hiervan een keuze te maken voor de variant die wordt toegepast op de robotarm.

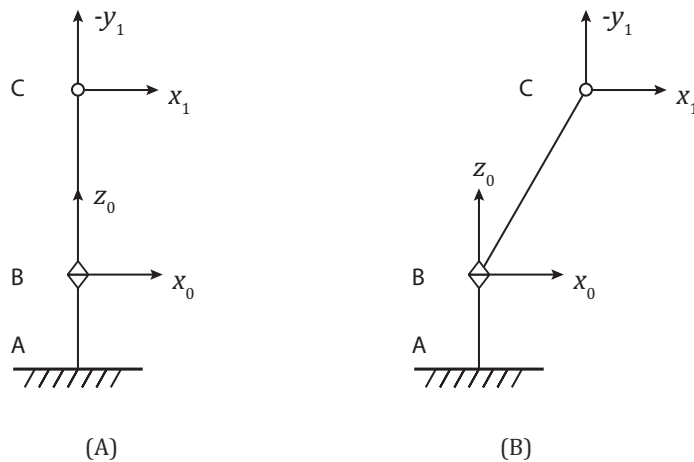
Variant A is de conventionele schakel waarbij de structuur van de schakel een lineaire verbinding vormt tussen de uiteinden D en E. Bij variant B vormt de schakel een soort L-profiel waarbij punt E langs de verticale as is verplaatst ten opzichte van D. Voor de verhouding tussen de twee varianten geldt dat $l_1 = l_2$ en $h \leq d$. Het voordeel van variant B is dat het met dit ontwerp mogelijk is om schakel CD en DE parallel te positioneren. Met deze eigenschap is de robotarm flexibeler en heeft een groter werkgebied doordat de beweging van de manipulator minder wordt beperkt door de eigen constructie. Omdat $l_1 = l_2$ is de momentkracht om punt D voor beide varianten gelijk. Er wordt aangenomen dat beide varianten met voldoende stijfheid kunnen worden ontworpen, zodat de gehele constructie van de robotarm stevig en nauwkeurig genoeg is. Om die reden wordt op basis van de toegevoegde flexibiliteit gekozen om de structuur van schakel DE te ontwerpen volgens variant B.



Figuur 6.1: Twee varianten van de structuur van schakel DE.

6.2 Positionering van het schoudergewricht

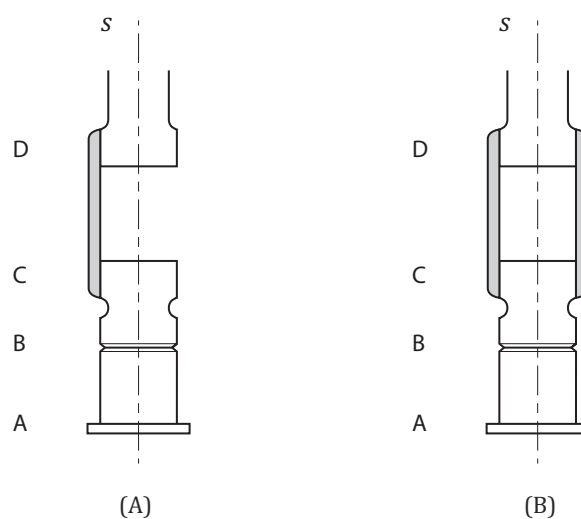
De positie van het schoudergewricht (C) varieert op twee manieren ten opzichte van het referentiefraam. Dit wordt beschreven door figuur 6.2. Volgens variant A is het schoudergewricht snijdend met de rotatie as van gewricht C. Bij variant B is het schoudergewricht in x-richting verschoven, zodat z_1 en z_0 niet in hetzelfde vlak liggen. Door het schoudergewricht te positioneren volgens variant B is het mogelijk om een groter werkgebied te realiseren met hetzelfde volume en gewicht van de constructie. Een nadeel is dat de punten A en B belast worden met een groter moment, maar dit heeft een minimale invloed op de beweging en nauwkeurigheid van de robot, omdat de rotatie as in punt B verticaal georiënteerd is en punt A is gefixeerd. Op basis hiervan wordt ervoor gekozen om het schoudergewricht te verplaatsen in x-richting ten opzichte van het referentiefraam, zodat z_1 en z_0 niet coplanair zijn.



Figuur 6.2: Twee varianten van de positionering van het schoudergewricht.

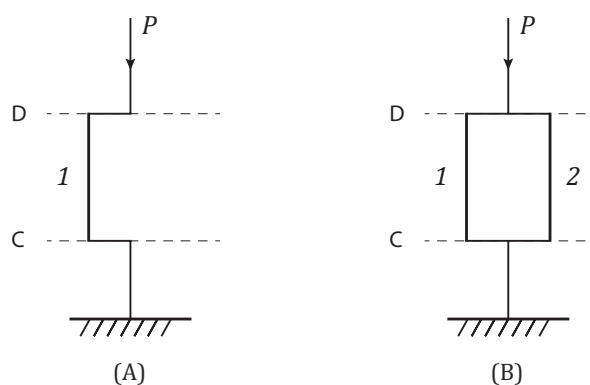
6.3 Structuur van schakel CD

Een schakel vormt een starre verbinding tussen twee gewrichten. Een vervorming van een schakel leidt tot een onnauwkeurigheid in het kinematische model waardoor de positie van de eind-effector een afwijking heeft. Uit figuur 2.2 blijkt dat er zowel een symmetrische als een asymmetrische constructie wordt toegepast op bestaande industriële robots. In deze paragraaf wordt nog niet de beslissing genomen voor de exacte constructie van de schakels van de robotarm. Wel zal worden bepaald of symmetrische of asymmetrische schakels worden toegepast.



Figuur 6.3: Asymmetrische (A) en symmetrische (B) variant van schakel CD.

In figuur 6.3 zijn twee vooraanzichten te zien van een gearticuleerde robot die is uitgestrekt in verticale richting. Variant A illustreert een asymmetrische constructie van schakel CD en variant B is een weergave van een symmetrisch geconstrueerde schakel CD. Lijn s is de middenlijn van de robotarm. Hierop liggen de oorsprongen van alle vier de gewrichten. Tevens loopt lijn s collineair met rotatie as van gewricht B. Om de constructies van de varianten A en B te evalueren op stijfheid, wordt van beide varianten een vereenvoudigd model opgesteld (figuur 6.4). Er wordt aangenomen dat er een statische belasting op de eind-effector werkt die collineair loopt met de symmetrie as s .

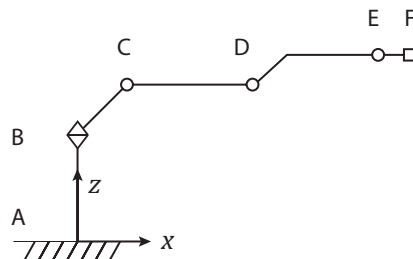


Figuur 6.4: modelweergave van figuur 6.4.

In geval A bestaat het risico dat schakel CD_1 doorbuigt onder invloed van het moment dat wordt geleverd door belasting P . Dit heeft tot gevolg dat de rotatie assen door C en D niet meer parallel zijn georiënteerd aan het grondvlak waardoor het kinematische model waar de aansturing op gebaseerd is niet langer overeenkomt met de werkelijkheid. Dit resulteert in een onnauwkeurigheid in de positionering van de eind-effector. Constructie B is stijver, omdat de belasting P gelijk wordt verdeeld over de schakeldelen CD_1 en CD_2 . Het risico op een onnauwkeurigheid in de positionering is daarom minder groot. Op basis daarvan wordt besloten om bij het ontwerp van de robotarm uitsluitend schakels toe te passen die symmetrisch zijn gevormd rond de middenlijn s die collineair loopt met de werklijn van de belasting op de eind-effector

Conclusie

Dit hoofdstuk richt zich op het vaststellen van de kinematische structuur van de robotarm. Deze structuur wordt deels bepaald door de kenmerkende eigenschappen van de gearticuleerde robot die geanalyseerd zijn in hoofdstuk 1 en hoofdstuk 2. Er is ook een aantal eigenschappen dat varieert tussen robots van hetzelfde type. Van de variabele eigenschappen die bepalend zijn voor de kinematische structuur worden de vorm van schakel DE en de positionering van het schouder gewricht het meest onderscheidend bevonden. Deze eigenschappen zijn geanalyseerd en dat heeft geleid tot de keuze voor een L-vormige schakel DE waarbij punt E in positieve z-richting is verplaatst ten opzichte van D en de keuze voor een verplaatsing van het schoudergewricht (C) in positieve x-richting ten opzichte van gewricht B. Wanneer deze gekozen eigenschappen worden gecombineerd met de standaard kinematische structuur van een gearticuleerde robot resulteert dat in de kinematische structuur die is weergegeven in figuur 6.5.



Figuur 6.5: Gekozen kinematische structuur voor het ontwerp.

Daarnaast is ook de constructie van schakel CD onderzocht. Deze is niet bepalend voor de kinematische structuur, maar wel voor de constructieve eigenschappen van de robotarm. Het blijkt dat schakel CD zowel symmetrisch als asymmetrisch wordt gepositioneerd rond de middenlijn s . Op basis van deze analyse wordt besloten om de schakels symmetrisch te positioneren rond de lijn s , zodat de belasting (P) evenredig wordt verdeeld over de constructie.

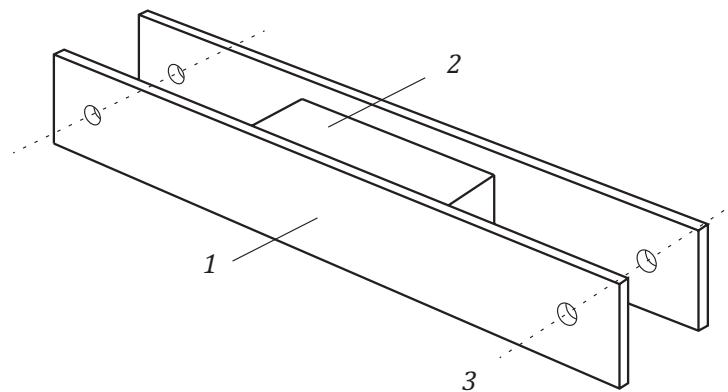
Hoofdstuk 7

Constructieontwerp

Het vorige hoofdstuk heeft geresulteerd in een kinematische structuur van de robotarm. Dit hoofdstuk richt zich op het ontwerp van een constructie die aan deze structuur voldoet. Hierbij wordt gestreefd naar een ontwerp dat tegen lage kosten met conventionele productiemethoden te produceren is en een voldoende laag gewicht heeft met een voldoende stijfheid. Bij de selectie van de motoren is een schatting gemaakt van het gewicht van iedere schakel (bijlage E). Hierop zijn de motoren geselecteerd en dit is dan ook het gewicht waarnaar gestreefd wordt bij het constructieontwerp. Allereerst wordt in paragraaf 7.1 beschreven hoe het ontwerpproces is aangepakt. Op basis van een analyse van onder andere het krachtspel en bestaande schaalmodellen is een aantal richtlijnen opgesteld voor het ontwerp. Vervolgens beschrijft paragraaf 7.2 de ontworpen constructie met motivatie van de ontwerpkeuzes die tot dit ontwerp hebben geleid.

7.1 Ontwerpaanpak

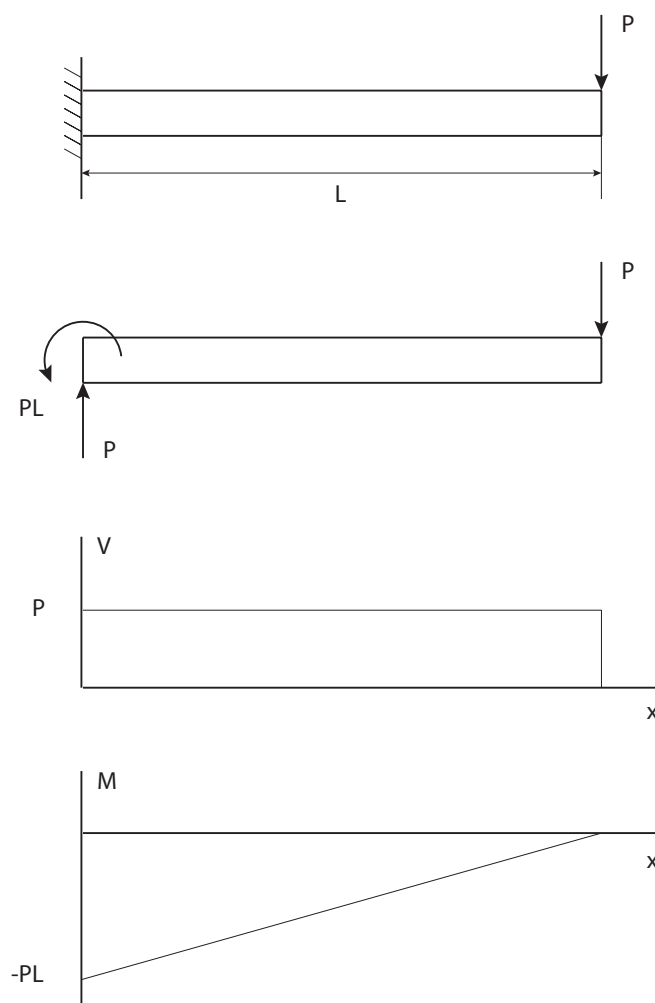
Om een eerste richting te geven aan het ontwerpproces worden bestaande schaalmodellen van industriële robots geanalyseerd. Bij deze analyse wordt er specifiek gekeken naar de manier waarop de schakels zijn geconstrueerd. Daartoe is een overzicht van enkele modellen gemaakt dat wordt weergegeven door figuur 7.1 in bijlage I. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het overgrote deel van de schaalmodellen vergelijkbaar geconstrueerde schakels heeft. Deze constructie wordt vereenvoudigd weergegeven door figuur 7.2.



Figuur 7.2: Veel voorkomende schakelconstructie bij schaalmodellen van industriële robots.

De schakel uit figuur 7.2 is opgebouwd uit twee parallelle plaatdelen (1) die ten opzichte van elkaar worden verbonden door een dwarsverbinding (2) die rond het zwaartepunt van de schakel is gepositioneerd. De rotatieassen van de gewrichten worden weergegeven door een stippellijn (3). Dit model wordt als uitgangspunt genomen voor het ontwerp van de schakels.

De vorm van deze constructie wordt hoofdzakelijk ontworpen om bestand te zijn tegen de werkende krachten op de robotarm. Daarom is het van belang om een idee te hebben van hoe de krachten op de constructie werken. Daartoe wordt er een dwarskrachten- en een momentenlijn opgesteld van de constructie van een schakel (figuur 7.3) met als doel om een beeld te verkrijgen van de verdeling van de belasting over de constructie. Bij deze analyse wordt de schakel benaderd door een balk die aan een zijde is ingeklemd. Op het uiteinde werkt een puntbelasting P in negatieve y -richting. Deze belasting simuleert het gewicht van de aangrenzende schakels dat wordt overgebracht in het gewrichtspunt waar de schakels aan elkaar zijn bevestigd.

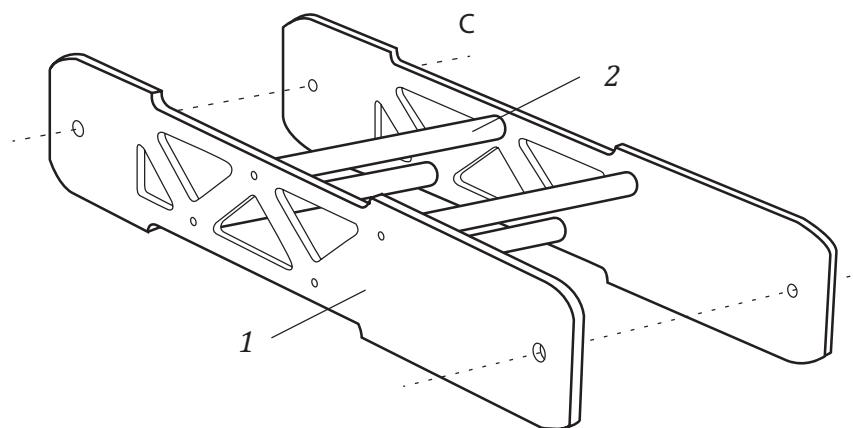


Figuur 7.3: Dwarskrachtenlijn (V) en momentenlijn (M) voor de belasting van een schakel.

Op basis van figuur 7.3 kan worden geconcludeerd dat de dwarskracht over de gehele lengte van de balk gelijk is, maar dat de momentkracht het grootst is aan het proximale uiteinde van de schakel die is ingeklemd en steeds kleiner wordt richting het distale uiteinde waar de kracht werkt. Wanneer deze constatering wordt omgezet naar het ontwerpen van een geometrie, wordt gekozen voor een conische vorm van de schakels waarbij de schakel het dikst is aan het proximale uiteinde. Zo loopt de verdeling van het materiaal, en dus ook van de sterkte van de constructie, mee met het verloop van de momentkracht. Op deze manier is het mogelijk om een voldoende stijve constructie te realiseren met een laag gewicht. Het resultaat van de hiervoor beschreven analyse wordt ondersteund door de bevindingen van Ahmed en Alyaa (2011) die onderzoek gedaan hebben naar de optimalisatie van het ontwerp van een seriële manipulator.

7.2 Ontwerp van de schakels

Bij het ontwerp van de constructie wordt gestreefd naar een zo laag mogelijk gewicht met zo min mogelijk vervorming. Daarbij mag de maximale spanning in het materiaal niet hoger zijn dan de vloeigrens van het materiaal. Na het vaststellen van de basisstructuur die is beschreven in paragraaf 7.1, is er direct overgegaan op een iteratieve ontwerpaanpak waarbij de constructie is gemodelleerd in SolidWorks. Van daaruit kon het ontwerp eenvoudig worden geëvalueerd op gewicht, vervorming en spanning door middel van SolidWorks Simulation. Aanpassingen in het ontwerp zijn direct doorgevoerd in het model, zodat het effect op de constructie-eigenschappen zichtbaar werd. Deze aanpak was doeltreffend, omdat de relatief eenvoudige geometrie van de schakel snel gemodelleerd kon worden. Zo is het mogelijk geweest om binnen beperkte tijd van een aanzienlijke hoeveelheid iteraties de prestaties te beoordelen en op basis hiervan ontwerpbeslissingen te maken.



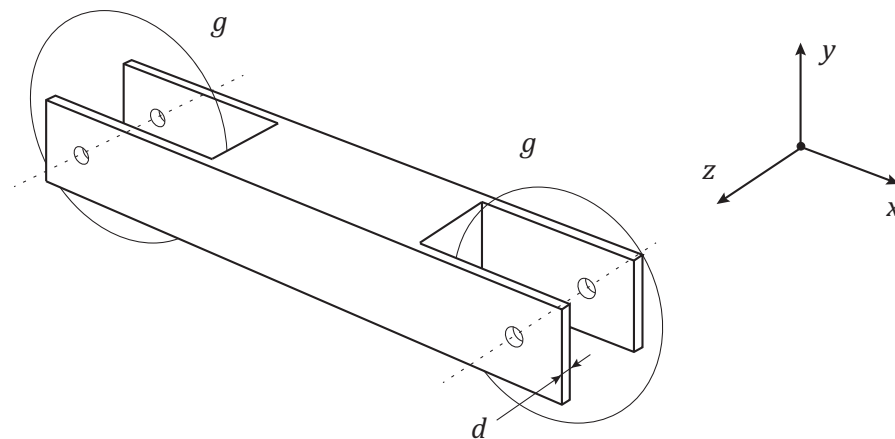
Figuur 7.4: Constructie schakel CD

De ontwerpaanpak die is gehanteerd, wordt toegelicht aan de hand van schakel CD die wordt afgebeeld door figuur 7.4. De andere vier schakels zijn op dezelfde manier ontworpen, dus daar zal geen aparte beschrijving van worden gegeven. Zoals gezegd dient het model uit figuur 7.2 als uitgangspunt voor het ontwerp van de schakels. Volgens dit model bestaat de schakel uit twee parallel georiënteerde plaatdelen die met elkaar verbonden worden door een dwarsverbinding

rond het zwaartepunt van de constructie. Bij het ontwerp wordt als uitgangspunt genomen dat de dwarsverbinding en de plaatdelen bestaan uit aparte onderdelen. Paragraaf 7.2.1 gaat in op het ontwerp van de plaatdelen (nr. 1, figuur 7.4) waarna de dwarsverbindingen (nr. 2, figuur 7.4) worden toegelicht in paragraaf 7.2.2.

7.2.1 Plaatdelen

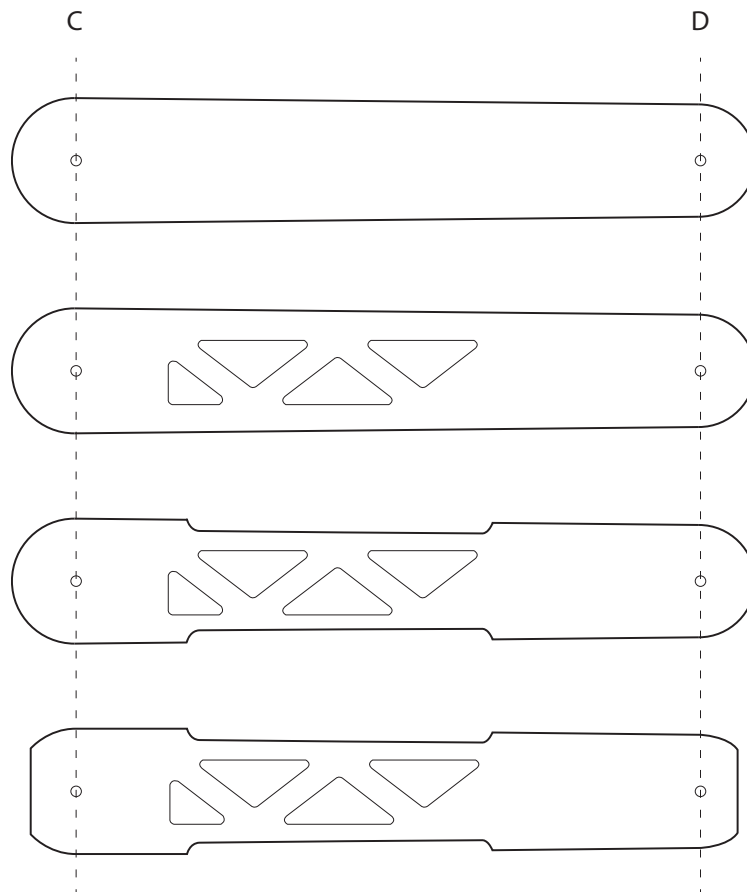
De plaatdelen zijn hoofdzakelijk verantwoordelijk voor de stijfheid van de constructie. Daarnaast worden deze delen aan de uiteinden verbonden aan de aangrenzende schakels. De verbindingpunten vormen de gewrichten van de robotarm doordat hier de motoren zijn bevestigd.



Figuur 7.5: Ontwerp met maximale ondersteuning tussen de twee plaatdelen.

Voor voldoende rotatievrijheid van de robotarm is er een zekere ruimte nodig rond ieder gewricht. Deze benodigde ruimte wordt geïllustreerd door cirkel g in figuur 7.5. Binnen deze ruimte kunnen geen dwarsverbindingen worden geplaatst. Dit heeft gevolgen voor de minimaal haalbare vervorming van de schakel. Deze minimale vervorming wordt hoofdzakelijk bepaald door de sterkte van het plaatdeel op de plekken waar deze niet wordt ondersteund door de dwarsverbinding. Om te onderzoeken wat deze minimaal haalbare vervorming is voor een bepaalde plaatdikte (d), is een analyse uitgevoerd van twee plaatdelen die op het gehele beschikbare oppervlakte tussen de cirkels (g) wordt ondersteund (figuur 7.5). Uit deze analyse bleek dat met een plaatdikte (d) van 2mm een minimale vervorming te realiseren is van 0,167 mm in y -richting en 0,103 mm in z -richting. De constructie weegt dan 1604 g wanneer deze wordt vervaardigd uit aluminium. Door het toepassen van een plaatdikte (d) van 3 mm is het mogelijk om de constructie zo ver te optimaliseren dat met een gewicht van 232 g een maximale vervorming optreedt van 0,166 mm in y -richting en 0,093 mm in z -richting. Zo is door uitsluitend het aanpassen van de geometrie een stijvere constructie gerealiseerd met 1372 g minder gewicht.

Figuur 7.6 beschrijft aan de hand van vier 2D aanzichten de iteratiestappen van het ontwerp van het plaatdeel van schakel CD. Allereerst is op basis van de constatering in paragraaf 7.1 uitgegaan van een conische vorm waarbij de hoogte afloopt in de lengterichting van punt C naar punt D. Op de plaatsen waar de dwarsverbindingen zijn bevestigd is minder spanning in het onderdeel. Daar is materiaal weggehaald om gewicht te besparen. Dit is zo gedaan dat er een driehoeksconstructie



Figuur 7.6: Iteratiestappen van het ontwerp van schakel CD.

wordt gevormd die door zijn geometrische eigenschappen geschikt is voor het opvangen van krachten in y-richting. Vervolgens is rond de randen extra materiaal weg gehaald en ten slotte is er rond de uiteinden materiaal weg gehaald, zodat er nog net voldoende materiaal aanwezig is voor een voldoende stevige bevestiging in de gewrichtspunten.

7.2.2 Dwarsverbinding

Er moet bij het ontwerpen van de constructie rekening gehouden worden met de beschikbare ruimte voor het plaatsen van elektronische componenten. De dimensie die hier het meest op van invloed is, is de afstand tussen de twee plaatdelen van de schakelconstructie en deze wordt bepaald door de dwarsverbindingen. Vanwege de beperking die wordt opgelegd door de benodigde ruimte voor componenten zal deze dimensie als gegeven worden beschouwd en niet als variabele om de eigenschappen van de constructie te optimaliseren.

Allereerst is gekeken naar de vorm van de dwarsverbindingen. Daarbij is onder andere rekening gehouden met de mogelijkheid om het onderdeel met conventionele productiemethoden te vervaardigen. 3D printen is daarbij buiten beschouwing gelaten, omdat deze methode met de voorzieningen van de Universiteit Twente is beperkt tot het kunststof ABS. Een metaal is op basis van zijn materiaaleigenschappen een meer geschikt materiaal voor deze toepassing. Op basis

hiervan is gekeken naar de mogelijkheid om de constructie van de dwarsverbinding op te bouwen uit plaatonderdelen of cilindrische staven. Het blijkt uit een analyse met SolidWorks Simulation met beide concepten mogelijk om de gewenste constructie-eigenschappen te bereiken. Er is gekozen voor de toepassing van cilindrische staven, omdat deze nauwkeurig gepositioneerd kunnen worden op de plaatdelen door middel van een vormgesloten en losneembare verbinding. Bovendien de cilindrische onderdelen nauwkeurig te produceren zijn door middel van een freesbewerking.

Conclusie

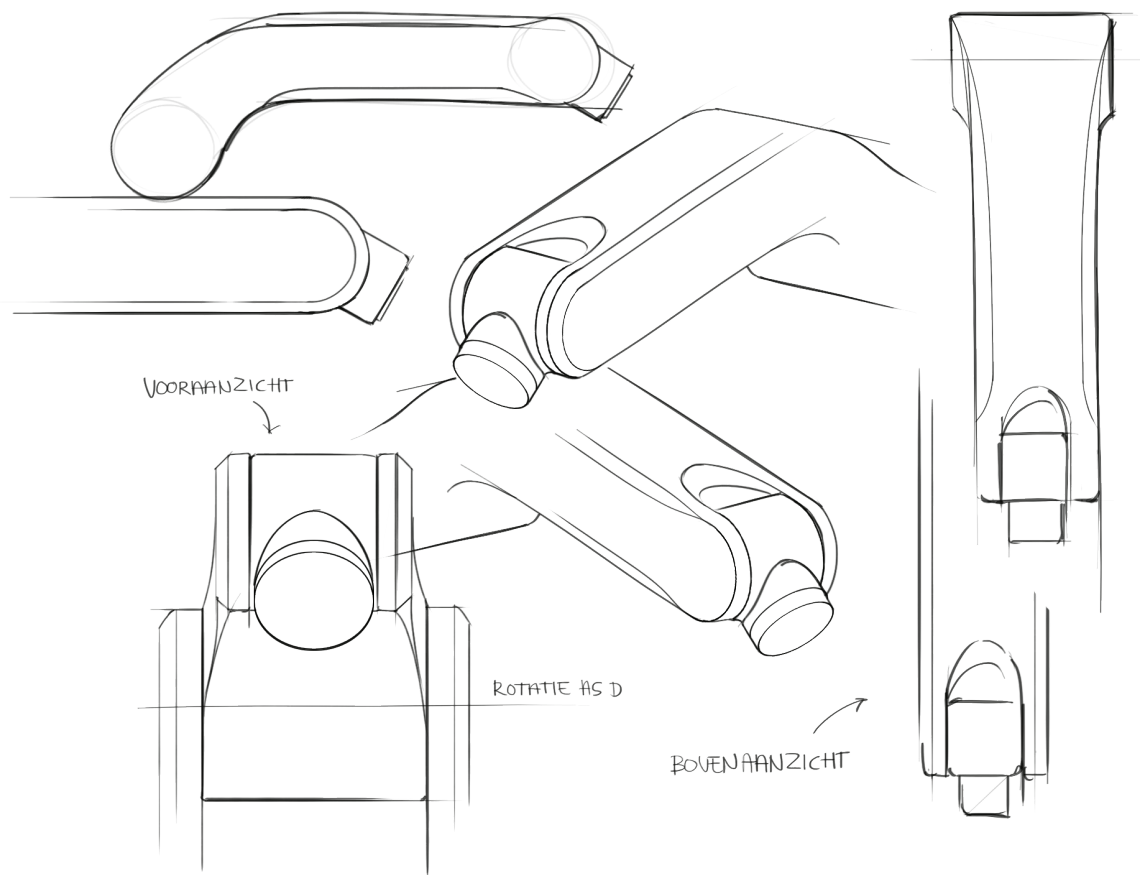
In dit hoofdstuk is beschreven welke aanpak is gehanteerd bij het ontwerpen van de constructie van de robotarm. De gehele constructie bestaat uit het totaal van de vijf schakels waarvan het ontwerp allemaal wordt gericht op een constructie met een zo laag mogelijk gewicht en zo min mogelijk vervorming tegen een materiaalspanning die kleiner is dan de vloeigrens. Omdat de schakels weinig van elkaar verschillen en met dezelfde methodiek worden ontworpen, is het ontwerpproces met de belangrijkste ontwerpbeslissingen besproken aan de hand van het voorbeeld van schakel CD. Door te analyseren hoe bestaande schaalmodellen van robotarmen zijn opgebouwd is een vereenvoudigd model opgesteld van een schakelconstructie. Om het ontwerp te kunnen optimaliseren voor het opvangen van de werkende krachten is de belasting op een schakel geanalyseerd door middel van een kracht- en momentlijn. Deze kennis dient als uitgangspunt voor het ontwerpen van de geometrie van de schakel. Daarbij wordt een iteratief ontwerpproces toegepast waarbij de iteraties direct geëvalueerd worden aan de hand van SolidWorks Simulation. Dit resulteert in een ontwerp voor de constructie van de schakels. Binnen de uitgangspunten en grenzen van de ontwerpmethodiek is het ontwerp zodanig geoptimaliseerd dat deze een voldoende laag gewicht heeft met voldoende stijfheid om te voldoen aan de gestelde eisen.

Hoofdstuk 8

Ontwerp van de behuizing

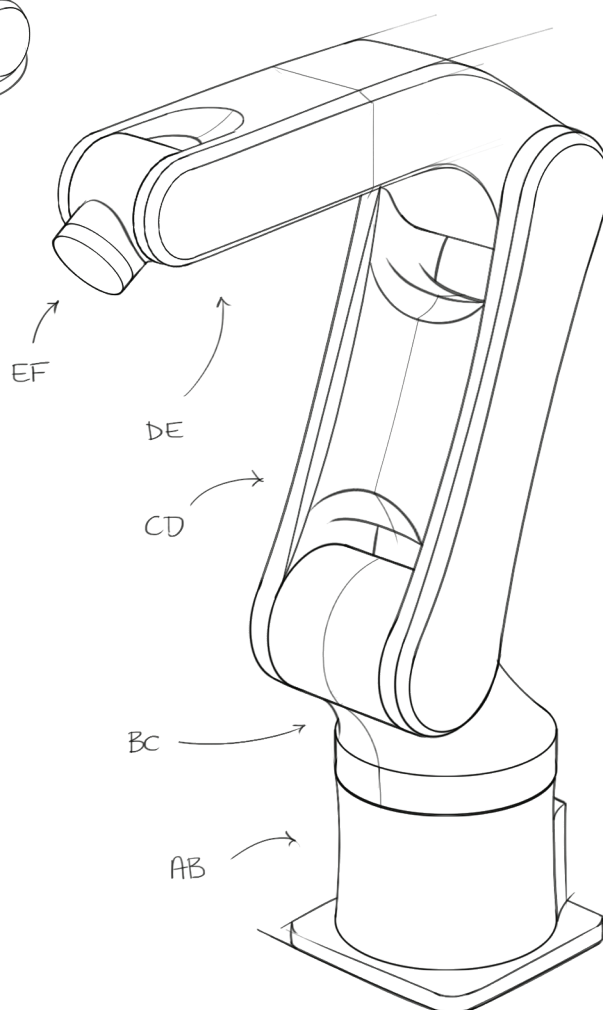
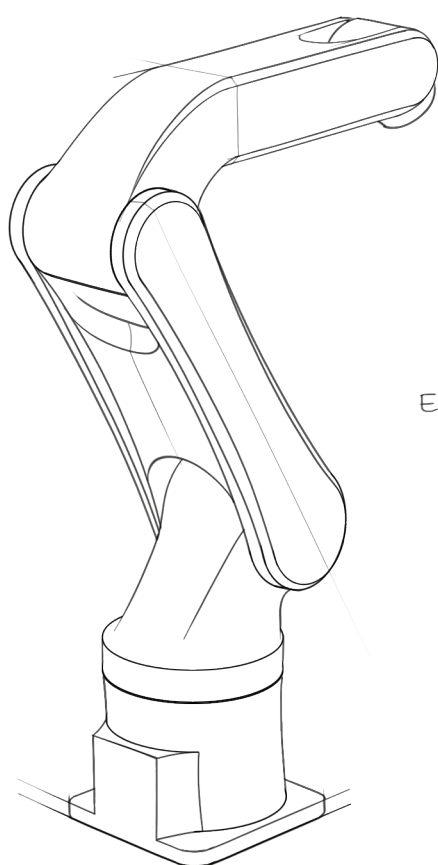
De behuizing heeft als functie om de robotarm een realistische uitstraling te geven. Daarnaast dient deze ter bescherming van de constructie en de elektronica. De constructie wordt beschermd tegen vuil en de elektronica wordt afgeschermd van direct contact met de omgeving. Het ontwerp van de behuizing wordt gericht op de esthetische functionaliteit.

Net als de constructie moet ook de behuizing voldoen aan de kenmerken van het gekozen model gearticuleerde robot dat is beschreven in hoofdstuk 2. De relevante kenmerken voor het esthetisch ontwerp worden herleid uit figuur 2.2. Het ontwerp wordt gebaseerd op deze kenmerken, zodat een realistische uitstraling kan worden gerealiseerd. Daarnaast is er bewust voor gekozen om een eigen invulling te geven aan het ontwerp van de behuizing, zodat het wel voldoet aan de gestelde eisen, maar ook onderscheidend is binnen de gekozen productklasse.





ZIJAAANZICHTEN SCHAKEL CD



Hoofdstuk 9

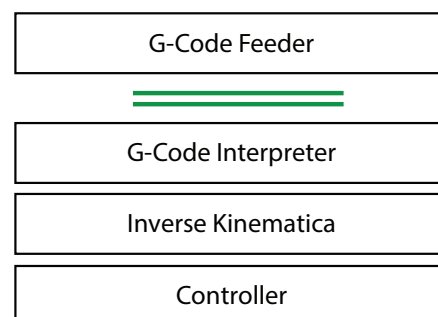
Aansturing

Voor het functioneren van de robotarm is het van belang dat de actuatoren aangestuurd kunnen worden. Bij het programmeren van deze aansturing kan gebruik gemaakt worden van de kinematische analyse uit paragraaf 3.3. Het softwarematig programmeren van de beweging van de robotarm valt buiten de grenzen van deze opdracht. Toch is het voor het behalen van de doelstellingen wel van belang dat de robotarm aangestuurd wordt. Daarom is in overleg met de opdrachtgever besloten dat de benodigde hardware voor de aansturing wordt onderzocht en verwerkt in het ontwerp. De opdrachtgever draagt zorg voor de software codering waarmee de beweging wordt aangestuurd. In paragraaf 9.1 wordt een korte beschrijving gegeven van de theoretische achtergrond van de aansturing die is aangeleverd door de opdrachtgever. Paragraaf 9.2 beschrijft vervolgens de benodigde hardwarecomponenten.

9.1 Aansturingsmethode

De robot arm wordt aangestuurd door een Arduino Mega, welke over een relatief sterke microprocessor beschikt om complexe berekeningen in een korte loop uit te voeren. De servomotoren in de robotarm worden aangestuurd door middel van pulsbreedtemodulatie (PWM), waardoor een aansturingsnauwkeurigheid van ongeveer 10 stappen per graad rotatie kan worden gerealiseerd. De uiteindelijke nauwkeurigheid is een combinatie van vier punten:

- de nauwkeurigheid van de servo bij belasting
- het aantal stappen dat de servo nodig heeft voor zijn kleinste mogelijke beweging
- de aansturingsnauwkeurigheid
- de omzetting van cartesische coördinaten naar gewricht coördinaten en de afronding naar PWM

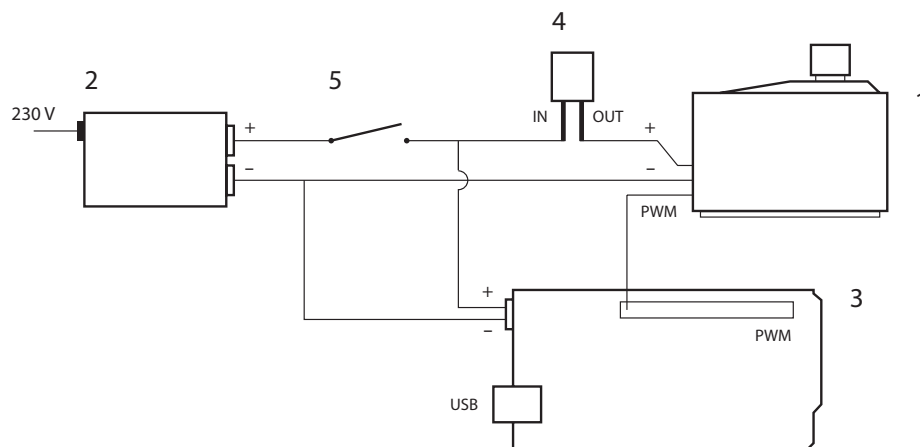


Figuur 9.1: Software architectuur voor de aansturing van de robotarm.

Voor project SInBot zijn een groot aantal applicaties ontwikkeld, waaronder een Arduino programma welke seriële communicatie van CNC-codes (G-Code) omzet naar PWM. In figuur 9.1 is een deel van de uiteindelijke software architectuur belicht om dit te verduidelijken. Boven de *G-code Feeder* lopen meerdere applicaties die de omgeving in de gaten houden, veiligheid garanderen, sensor informatie opvragen en taken claimen. De *G-code Feeder* stuurt CNC-codes lijn voor lijn via een seriële verbinding (dubbele groene lijn) naar een bijbehorende Arduino. De *G-code Interpreter* is een aangepaste versie van de *G-code Interpreter* van de RepRap, toegespitst op gearticuleerde robots. Deze *G-code Interpreter* stuurt met hoge frequentie cartesische coördinaten naar de *Inverse Kinematica* algoritmes. De *Inverse Kinematica* algoritmes zijn gebaseerd op de cosinusregel van driehoeken, gevalideerd met de Jacobian matrix. Deze opbouw van de architectuur en aansturing is gevalideerd met Lynxmotion AL5D 5-DOF robotarmen.

9.2 Aansturingscomponenten

In de vorige paragraaf is het theoretische aspect van de aansturing toegelicht. In deze paragraaf worden de benodigde hardware componenten besproken. Deze worden toegelicht aan de hand van figuur 9.2 waarin alle componenten worden beschreven inclusief de onderlinge verbindingen. Een servomotor (1) heeft drie aansluitingen. Dit zijn een plus- en minpoort voor de aansluiting op de voeding (2) en een PWM-poort waarover de aansturingsprotocollen worden verstuurd. De PWM-poort wordt verbonden met de Arduino Mega 2560 (3) die de aansturingssignalen naar de servo verstuurt. Op de Arduino zit een USB-poort waarmee de Arduino aangesloten kan worden op een computer. Vanaf deze computer wordt de aansturing geprogrammeerd. Daarnaast wordt ook de Arduino aangesloten op de voeding. Deze voeding bestaat uit een adapter die aangesloten wordt op het lichtnet. De adapter zet 230V wisselstroom om naar 12V gelijkstroom. Wanneer de servomotor minder dan 12V nodig heeft, kan een spanningsregulator (4) die de 12V ingangsspanning omzet naar een lagere uitgangsspanning. Om het systeem uit te kunnen schakelen, is een schakelaar (5) aangebracht die de stroomkring kan doorbreken.



Figuur 9.2: Schematisch overzicht van de aansturingscomponenten.

Hoofdstuk 10

Eindontwerp

De constructie die is beschreven in hoofdstuk 7 en de behuizing die is behandeld in hoofdstuk 8 vormen samen het totale ontwerp van de robotarm. Het ontwerp als geheel zal in dit hoofdstuk worden besproken. In paragraaf 10.1 zal het ontwerp worden beschreven aan de hand van een exploded view. Daarbij wordt met name ingegaan op de samenhang tussen de verschillende onderdelen en een aantal kenmerkende ontwerpaspecten. In paragraaf 10.2 zal worden geëvalueerd hoe de constructie zich gedraagt onder invloed van een belasting. Tot dat doel wordt een model opgesteld dat wordt gebruikt om een simulatie uit te voeren in SolidWorks Simulation. Ten slotte zal in paragraaf 10.3 het ontwerp worden teruggekoppeld naar de eisen en richtlijnen die zijn opgesteld in analyse sectie van dit verslag. Het ontwerp zal zowel kinematisch, mechatronisch als esthetisch worden beoordeeld.

10.1 Productbeschrijving

Het resultaat van dit project is een schaalontwerp van een industriële robot die wat betreft constructie, beweging en uitstraling representatief is voor het type gearticuleerde robot (figuur 10.1). In bijlage J zijn de belangrijkste parameters van het ontwerp weergegeven in een tabel en de belangrijkste afmetingen worden geïllustreerd door een maattekening. Het product is door middel van de conventionele productieprocessen frezen, lasersnijden en 3D printen te vervaardigen. Dit biedt de mogelijkheid voor enkelstuksproductie of productie in kleine series.

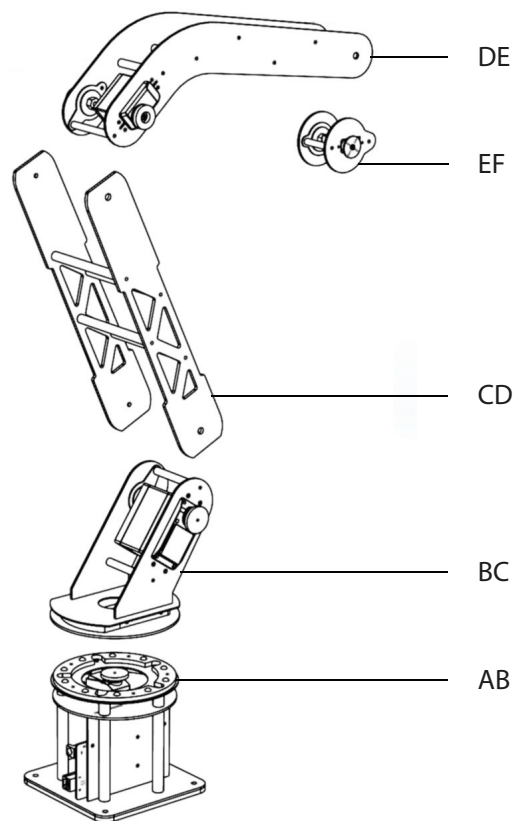
De onderdelen zijn zodanig ontworpen dat het product eenvoudig te assembleren is door middel van vormgesloten, losneembare verbindingen. Dit resulteert in een minder arbeidsintensieve productie en maakt het mogelijk om reparaties of aanpassingen aan het product uit te voeren. Bovendien verzekert een vormgesloten verbinding met de juiste passing een hoge nauwkeurigheid.

Allereerst wordt gekeken naar de manier waarop de robotarm is opgebouwd uit verschillende schakels. Uit figuur 10.2 wordt duidelijk dat het product bestaat uit vijf schakels die met elkaar verbonden worden door vier rotatiegewrichten die gepositioneerd zijn in de distale uiteinden van de schakels AB, BC, CD en DE. De schakels worden aan de twee buitenzijden verbonden met de opeenvolgende schakel. Aan een zijde is een directe verbinding met de servomotor en aan de andere zijde is een glijlager geplaatst die een nauwkeurige bevestiging mogelijk maakt ten gunste van een stabiele beweging.

De positionering van de schakels is zodanig dat de middenas van iedere schakel is uitgelijnd met de rotatie as van gewricht B. Zo wordt een symmetrische constructie gerealiseerd waarbij een belasting op de eind-effector evenredig wordt verdeeld voor een optimale nauwkeurigheid.



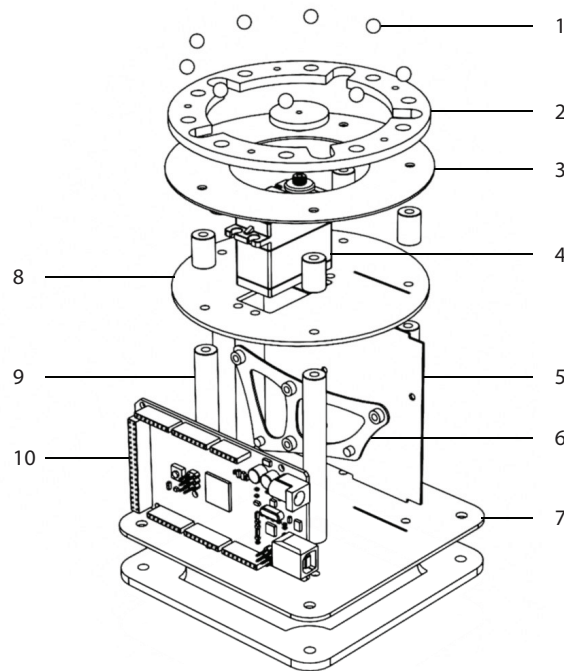
Figuur 10.1: Schaalontwerp van een gearticuleerde robot.



Figuur 10.2: Exploded view van de schakels.

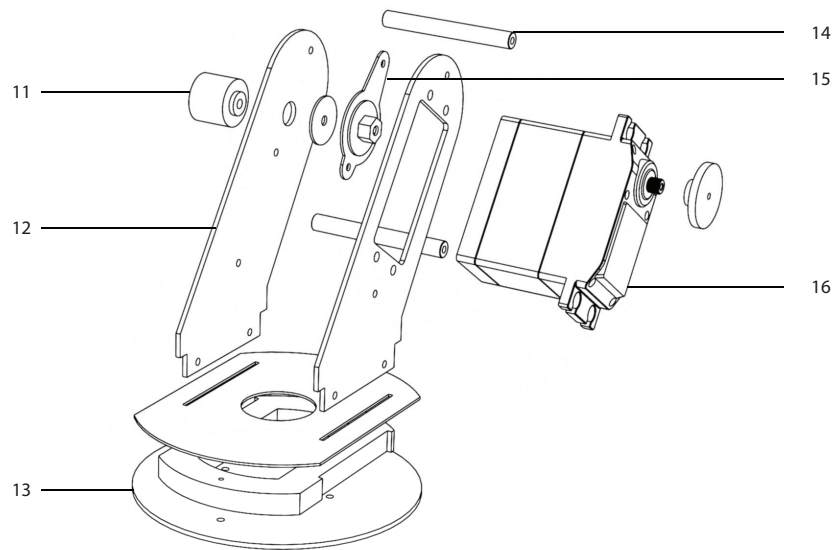
Nu duidelijk is hoe de robotarm is opgebouwd uit de verschillende schakels wordt nader gekeken naar het ontwerp van de schakels op zich. Iedere schakel wordt op onderdeelniveau beschreven waarbij de belangrijkste onderdelen worden toegelicht. De nummering in de tekst verwijst naar de nummers in de figuren 10.3 tot en met 10.7.

- 1 De onderdelen 1, 2 en 3 vormen samen een kogellager dat is ontworpen voor een verhoogde stabilisatie in het gewricht. Onderdeel 2 is de lagerkooi die wordt bevestigd op de grondplaat (3). De stalen kogels (1) worden in de gaten van de lagerkooi gelegd. Wanneer schakel BC aan de servo (4) wordt bevestigd, zal de deze ondersteund worden door het kogellager. Doordat de kogels vrij rollen in het lager, zal er een minimale weerstand worden ondervonden bij een rotatie in gewricht B.
- 4 Shenzhen XQ Power XQ-S4016D servomotor
- 5 Metalen plaat om de arduino (10) te positioneren in de schakel. De positie is zo gekozen dat de USB aansluiting op een gunstige positie staat ten opzichte van de behuizing. Daarnaast is er rekening mee gehouden dat er voldoende ruimte beschikbaar blijft om een aanvullend component, zoals een WiFi module, op de arduino aan te sluiten.
- 6 Dit onderdeel dient ter ondersteuning van de arduino (10) bij de bevestiging op onderdeel 5 en voorkomt dat de arduino direct op het metaal wordt bevestigd. Onderaan de printplaat van de arduino steken de contacten uit. Deze mogen niet in aanraking komen met de het metaal van de constructie, omdat dit kortsluiting veroorzaakt. Dit onderdeel wordt vanwege de kleine dimensies en een gemakkelijke assemblage geproduceerd door middel van 3D printen.



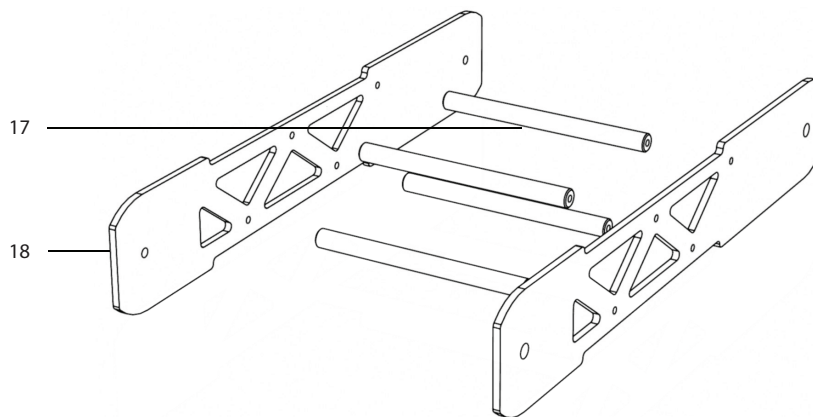
Figuur 10.3: Exploded view van schakel AB.

- 7 Grondplaat van schakel AB. Onderaan de grondplaat wordt nog een MDF rand bevestigd, omdat er schroefkoppen uitsteken. Op de vier hoekpunten van dit onderdeel zijn gaten aangebracht voor een M5 bout. Hiermee kan de robotarm verbonden worden met de omgeving.
- 8 Bevestigingsplaat van de servomotor. Deze is zo gepositioneerd dat de servo horn op dezelfde hoogte staat als het loopvlak van de kogellager.
- 9 Busje waarmee onderdeel 8 op de juiste hoogte wordt geplaatst. Rondom zijn vijf van deze onderdelen gepositioneerd. Dit geeft de constructie de benodigde stijfheid. Tussen onderdeel 8 en onderdeel 3 is in het verlengde van deze busjes nog een tweede reeks busjes aangebracht om de rollager op de juiste hoogte te positioneren.
- 10 Arduino Mega 2560. Dit is de component die het mogelijk maakt om de motoren aan te sturen via pulsbreedtemodulatie.
- 11 Glijlager waarmee schakel BC bevestigd kan worden aan schakel CD. Dit onderdeel is zodanig gedimensioneerd dat de constructieplaten (12) gecentreerd zijn ten opzichte van de constructie van schakel CD. Dit onderdeel wordt gemaakt van POM, omdat dit materiaal de juiste eigenschappen heeft voor de toepassing van een glijlager en nauwkeurig gemaakt kan worden door middel van een freesbewerking op een draaibank.
- 12 Constructieplaat die de schakel hoofdzakelijke stijfheid geeft. Er zijn twee van deze platen die op de juiste afstand gepositioneerd worden door middel van busjes (14). Daarnaast dient een van deze platen ter bevestiging van de servomotor.
- 13 Grondplaat van de schakel. Dit onderdeel wordt bevestigd aan de servo van schakel AB.
- 14 Busje dat de twee onderdelen 12 met elkaar verbindt.



Figuur 10.4: Exploded view van schakel BC.

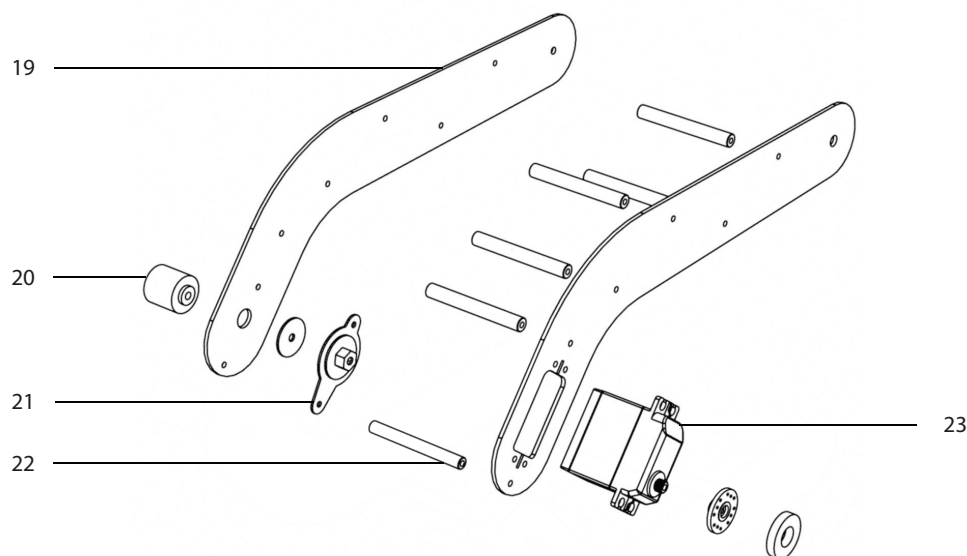
- 15 De glijlager wordt door middel van een bout-moer verbinding tussen schakel BC en schakel CD bevestigd. Om ervoor te zorgen dat deze verbinding vanaf een kant in te stellen is, is onderdeel 15 ontworpen. Deze wordt aan de binnenzijde van de schakel bevestigd aan onderdeel 12. In dit onderdeel worden een moer en een sluitring gelegd die zo op hun plaats worden gehouden. Door de vormgesloten verbinding tussen moer en onderdeel 15, kan de bout van buitenaf aangedraaid worden, zonder dat de moer meedraait. Deze verbinding maakt een eenvoudige assemblage en demontage mogelijk.
- 16 Shenzhen XQ Power XQ-S5650D servomotor.



Figuur 10.5: Exploded view schakel CD.

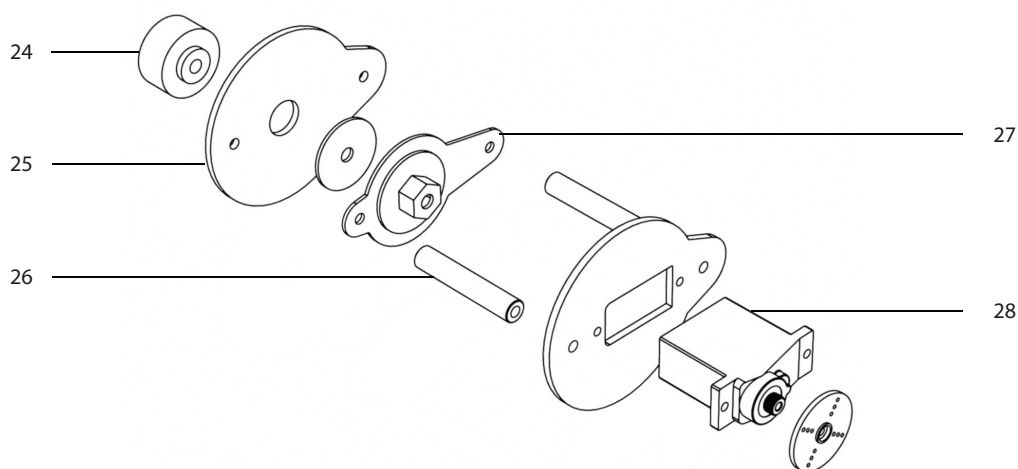
- 17 Busje om de twee onderdelen 15 op de juiste afstand van elkaar te positioneren. De busjes zijn in een driehoek patroon gepositioneerd voor een verhoogde stijfheid van de constructie.

- 18 Constructieplaat die zorgt voor de stevigheid van de constructie. De linker plaat wordt bevestigd aan de glijlagers van de gewrichten C en D en de rechterplaat wordt bevestigd aan de motoren in de gewrichten C en D.



Figuur 10.6: Exploded view van schakel DE.

- 19 Constructieplaat. In functie vergelijkbaar met de onderdelen 12 en 18.
 20 Glijlager. In functie vergelijkbaar met onderdeel 11
 21 Dit onderdeel heeft dezelfde functie als onderdeel 15, maar is lichtelijk anders gedimensioneerd vanwege de dimensies van onderdeel 19.
 22 Busje om de twee onderdelen 19 met elkaar te verbinden. Dit onderdeel is in functie vergelijkbaar met de onderdelen 9, 14 en 17.
 23 Savöx SA-1230SG servomotor.



Figuur 10.7: Exploded view van schakel EF.

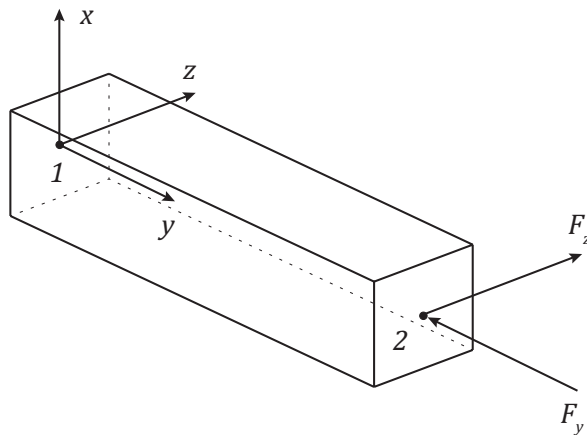
- 24 Glijlager. In functie vergelijkbaar met onderdeel 11 en
- 25 Constructieplaat. In functie vergelijkbaar met de onderdelen 12, 18 en 19.
- 21 Dit onderdeel heeft dezelfde functie als onderdeel 15 en 21, maar is lichtelijk anders gedimensioneerd vanwege de dimensies van onderdeel 25.
- 22 Busje om de twee onderdelen 25 met elkaar te verbinden. Dit onderdeel is in functie vergelijkbaar met de onderdelen 9, 14, 17 en 19.
- 23 Savöx SH-0254MG servomotor.

Materiaal

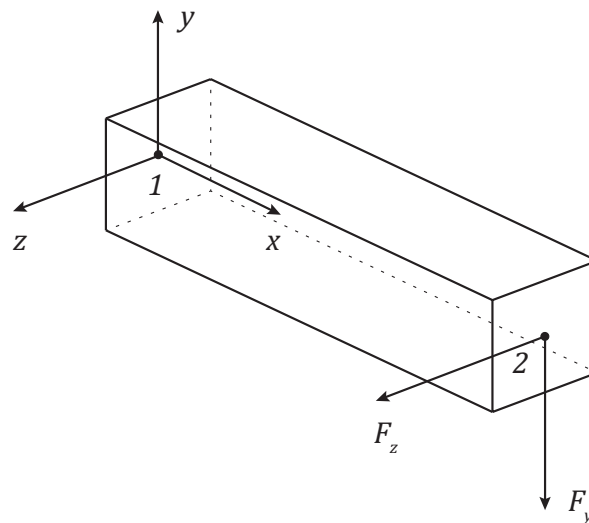
De krachtdragende onderdelen van de constructie worden gemaakt van aluminium. Dit is een materiaal dat geschikt is voor bewerking met conventionele productiemethoden zoals lasersnijden en frezen. Daarnaast heeft het materiaal de eigenschappen van een hoge stijfheid met een lage dichtheid wat het materiaal geschikt is voor toepassing op een lichtgewicht constructie. De onderdelen van de behuizing worden gemaakt van het kunststof ABS, omdat de productie van deze onderdelen in de eerste plaats is gericht op de faciliteiten van de Universiteit Twente. Gezien de geometrie en de eisen aan de uitstraling is 3D printen het meest geschikte proces voor de productie van de behuizing. Het model 3D printer van de Universiteit Twente dat het meest geschikt is voor deze productie, print ABS. Hieruit volgt de keuze voor het materiaal.

10.2 Analyse van de belastbaarheid

In een vroeg stadium van het ontwerpproces wordt de constructie al geëvalueerd op doorbuiging en spanning onder invloed van een belasting. Daarbij wordt gebruik gemaakt van SolidWorks Simulation. Om de evaluatie uit te kunnen voeren dient een model van de belasting opgesteld te worden. Bij het opstellen van het model wordt uitgegaan van de configuratie waarvoor de belasting maximaal is, zoals deze is beschreven in figuur 3.2. Wanneer de schakels vanuit deze configuratie individueel worden beschouwd, kan er onderscheid gemaakt worden tussen de belasting van de schakels AB en BC en de schakels CD, DE en EF. Dit onderscheid komt voort uit de oriëntatie van de schakels in de beschouwde configuratie. Daarbij zijn de schakels AB en BC verticaal georiënteerd in y-richting en zijn de schakels CD, DE en EF horizontaal georiënteerd in x-richting. Er wordt voor zowel de horizontaal georiënteerde als voor de verticaal georiënteerde schakels een model opgesteld welke zijn weer gegeven in respectievelijk figuur 10.8 en figuur 10.9. In deze modellen wordt de schakel benaderd door een massieve balk. Geometrisch gezien is dit geen realistische representatie, maar bij de analyse in SolidWorks Simulation kan de analyse direct uitgevoerd worden op het 3D model van de schakel. De modellen uit figuur 10.8 en figuur 10.9 worden dan gebruikt om te bepalen hoe de constructie moet worden ingeklemd en waar de belasting aangebracht moet worden. Vandaar dat de geometrische representatie van de schakel voor dit doeleinde niet van belang is.



Figuur 10.8: Model van de belasting van een horizontaal georiënteerde schakel.



Figuur 10.9: Model van de belasting van een verticaal georiënteerde schakel.

Bij het ontwerpen van de constructie wordt rekening gehouden met een kracht op de eind-effector. Volgens de opdrachtomschrijving hoeft enkel rekening gehouden te worden met het eigen gewicht van de constructie. Bij het opstellen van het rekenkundig model in paragraaf 2.2 en de motorkeuze in paragraaf 4.3 is rekening gehouden met een belasting met oog op een doorontwikkeling van het resultaat van deze opdracht. Aan het begin van de ontwerpfase is ervoor gekozen om ook bij het ontwerpen van de constructie rekening te houden met een belasting op de eind-effector. Dit gaat weliswaar buiten de grenzen van deze opdracht, maar wanneer erin geslaagd wordt om een constructie te ontwerpen die bestand is tegen een belasting heeft dit een significant toegevoegde waarde voor de opdrachtgever. Met oog op de toepassing van een freesbewerking wordt rekening gehouden met een belasting in y-richting (P_y) en een kracht in z-richting (P_z). De grootte van P_y wordt bepaald op basis van de gemiddelde verhouding tussen de lading en het eigen gewicht van bestaande industriële robots, zoals deze is vastgesteld in paragraaf 1.1. Volgens de gegevens uit

tabel 10.1 in bijlage J weegt de robotarm ongeveer 2 kg. Vandaar wordt gekozen voor een waarde van 0,25 kg voor P_y . Er zal een belasting in z-richting optreden wanneer de frees zijwaarts door het materiaal wordt bewogen. Er wordt aangenomen dat P_z een waarde heeft van 0,15 kg. Omdat de schakels individueel worden geëvalueerd, moet berekend worden hoeveel kracht er in de eindpunten van de schakels werkt. Deze waarden zijn weergegeven in tabel 10.2.

Tabel 10.2: Belasting op de eind-effector omgerekend naar een belasting in de gewrichten.

gewricht	F_y (N)	F_z (N)
C	4	22
D	3,24	18
E	1,62	7
F	1,47	3,2

Tabel 10.3 geeft van de schakels BC tot en met EF een overzicht van enkele constructie eigenschappen en de optredende spanning en vervorming onder invloed van de krachten die zijn beschreven in tabel 10.2. In bijlage K wordt dit geïllustreerd door een plot van de belasting waarin goed is te zien hoe de spanning door de constructie loopt. Uit deze plots kan geconcludeerd worden dat de spanning goed wordt verdeeld over de constructie en dat er geen overmatige spanningsconcentraties optreden.

Tabel 10.3: Prestaties van de individuele schakels

schakel	m (kg)	l (m)	ϵ_y (mm)	ϵ_z (mm)	σ_{max} (N/mm ²)
BC	0,178	0,09	0,012	0,067	6,57
CD	0,448	0,25	0,176	0,093	43,87
DE	0,340	0,25	0,040	0,076	22,39
EF	0,052	0,05	0,000	0,001	14,19

Zoals beschreven in paragraaf 10.2 zijn de constructieonderdelen gemaakt van aluminium. Om precies te zijn Al 5052-H32. Dit materiaal heeft een vloeigrens van 195 N/mm². De gegevens in de laatste kolom van tabel 10.3 geven de maximale spanning die optreedt bij een belasting van de schakel. De hoogste waarde is 43,87 N/mm² bij schakel CD, maar ver onder de waarde van de vloeigrens. Dit betekent dat de deformatie die optreedt elastisch is en dat het materiaal hier dus van hersteld bij een afname van de belasting.

10.3 Terugkoppeling programma van eisen

Het eindproduct van deze opdracht is een schaalmodel van een gearticuleerde robot die bestaat uit vijf binaire schakels die door middel van vier rotatiegewrichten serieel met elkaar worden verbonden. De eerste schakel (AB) wordt door middel van een losneembare bout-moer verbinding met de omgeving verbonden. In alle vier de rotatiegewrichten is een servomotor bevestigd waarvan de beweging wordt aangestuurd door een Arduino Mega. Deze Arduino is

herprogrammeerbaar vanaf een externe computer. Wanneer gekeken wordt naar de kinematische structuur van het ontwerp liggen de oorsprongen van alle gewrichten in hetzelfde vlak XZ. Daarvan is de rotatie as van het eerste gewricht zo georiënteerd dat deze loodrecht staat op het grondvlak XY. De rotatie assen van de andere drie gewrichten zijn evenwijdig aan elkaar georiënteerd en staan parallel aan het grondvlak XY (figuur 3.19). Bovendien is de gehele constructie inclusief behuizing te vervaardigen met de conventionele productiemethoden lasersnijden, frezen en 3D printen. Het feit dat erin geslaagd is om te ontwerpen voor deze processen met gangbare materialen betekent dat het product tegen beperkte kosten kan worden geproduceerd. Ondanks dat is er niet voldaan aan de eis van maximaal €100,- voor elektronische componenten. Dit heeft te maken met de servomotoren waarvan de kosten, vanwege het benodigd koppel, boven het budget uitkwamen. Dit kan gevalideerd worden door het rekenkundig model dat is opgesteld en een onderzoek naar mogelijke alternatieven zoals het toepassen van een ander soort motor of een overbrenging. Op basis hiervan is in overleg met de opdrachtgever het budget verruimd.

Met het ontwerp van de behuizing kan gesteld worden dat het schaalmodel voldoet aan de esthetische kenmerken van een gearticuleerde robot, zoals deze worden beschreven door figuur 2.2. Dit wordt aangetoond door bijlage L waarin een afbeelding van het schaalmodel in figuur 2.2 is geplaatst. Ook voldoet het ontwerp aan de verhoudingen van een gearticuleerde robot, zoals deze zijn beschreven door tabel 2.1. Dit wordt aangetoond door tabel 10.4 waarin de uitdrukkingen voor de verhoudingen zijn ingevuld met de waarden van de variabelen. Daarbij is alleen de eerste formule niet volledig correct, maar dit een zodanig klein verschil dat het geen afbreuk doet aan de gestelde verhoudingen

Tabel 10.4: Verhoudingsvergelijkingen ingevuld met de afmetingen van het schaalmodel.

formule	nr.
$0,2 < 0,2 < 0,25$	2.1
$0,225 < 0,25 < 0,275$	2.2
$0,25 \approx 0,25$	2.3
$0,05 \approx 0,05$	2.4
$0,05 < 0,06 < 0,125$	2.5
$0,06 \approx 0,06 \approx 0,058$	2.6
$0,058 > 0,035$	2.7
$0,035 > 0,022$	2.8

De beweging van de robotarm kan niet worden beoordeeld, omdat er nog geen prototype is gerealiseerd. Vandaar dat niet kan worden bevestigd dat de robot een realistische beweging heeft die overeenkomt met de snelheid van een gearticuleerde robot en een herhaalbaarheid heeft van ongeveer 0,3 mm. Wel kan worden gesteld dat de geselecteerde servomotoren een snelheid kunnen bereiken die theoretisch gezien de snelheid van een gearticuleerde robot benadert. Bovendien is de constructie zodanig ontworpen dat deze een nauwkeurigheid heeft van 0,23 mm bij een belasting van 250 g. Dit staat nog niet gelijk aan de herhaalbaarheid, maar is hierop wel van invloed. Doordat

de nauwkeurigheid in dezelfde orde grootte ligt als de herhaalbaarheid, kan aangenomen worden dat de vereiste herhaalbaarheid met dit ontwerp kan worden gerealiseerd. Daarbij moet wel kritisch worden vermeld dat er bij de analyse van de constructie geen rekening gehouden is met onnauwkeurigheid in de gewrichten. Bovendien kan het gewicht van de onderdelen nog variëren door de toevoeging van verbindingen of afwerkingsmateriaal. Toch is de verwachting dat deze onzekerheden geen zodanige uitwerking hebben dat de gestelde doelen met dit ontwerp niet kunnen worden bereikt.

Conclusie

De opdracht voor dit project was het ontwerpen van een schaalmodel van een industriële robot. Dit schaalmodel heeft als doel om te onderzoeken of de manier waarop een industriële robot wordt bestuurd handig gevonden wordt door experts. Daarnaast wordt de robotarm toegepast bij het uitvoeren van autonome experimenten. De behoefte aan een schaalmodel komt voort uit het feit dat revolutionaire ontwikkelingen in de aansturingsmethodiek niet getest mogen worden op bestaande industriële robots vanwege de veiligheidsrisico's.

Met name voor het testen van de gebruikservaring van experts is het van belang dat het schaalmodel representatief is voor robots die worden toegepast in de industrie. Dit geldt voor zowel de kinematische en esthetische eigenschappen als voor de beweging. Om de representativiteit van het ontwerp te realiseren, wordt een onderzoek gedaan naar bestaande typen industriële robots en hun eigenschappen. Om voldoende focus aan te brengen binnen de opdracht wordt op basis van dit onderzoek een specifiek type gekozen waarvan een schaalrobot ontworpen wordt. Dit type is de gearticuleerde robot die onder andere gekenmerkt wordt door de toepassing van uitsluitend rotatiegewrichten. Wanneer de kenmerken van het schaalontwerp worden geëvalueerd, kan gesteld worden dat erin is geslaagd om een schaalmodel te maken van een industriële robot dat representatief is voor het type gearticuleerde robot. De esthetische eigenschappen van de behuizing en de verhoudingen van de onderdelen komen overeen met de conclusies uit hoofdstuk 2. Daarnaast is het ontwerp gevormd volgens de juiste kinematische structuur waarbij de rotatiegewrichten serieel met elkaar worden verbonden door binaire schakels. Bovendien is de positionering en de oriëntatie van de gewrichten zodanig dat een simplificatie mogelijk is van zowel de voorwaartse als de inverse kinematica wat voordelen biedt voor de aansturing van de beweging.

De constructie die is ontworpen is in de eerste plaats gericht op het dragen van de belasting die het gevolg is van het eigen gewicht en beweging van de robotarm. Daarnaast is er gekeken naar het effect van de belasting die optreedt bij een freesbewerking. Er is voor gekozen om de constructie zo ver te optimaliseren dat deze voldoende sterk is om een freesbewerking uit te voeren met de gewenste nauwkeurigheid. Op deze manier is het schaalmodel ook geschikt voor het uitvoeren van autonome experimenten, zoals frezen. De gehele robot bestaande uit behuizing en constructie is te produceren met conventionele productiemethoden. Dit biedt de mogelijkheid voor een enkelstuksproductie tegen lage kosten en de optie om gemakkelijk aanpassingen en reparaties aan het ontwerp uit te voeren in het geval van eventuele doorontwikkeling.

Er is bij de selectie van de motoren zo goed mogelijk rekening gehouden met de belasting en de eisen aan de beweging. Door een veiligheidsfactor mee te nemen in de berekening van het motorkoppel, worden verschillen tussen de werkelijkheid en het rekenkundig model gecompenseerd. Daarnaast is bij het selecteren van een type motor rekening gehouden met de nauwkeurigheid en karakteristieken van de beweging, zodat er theoretisch gezien een vloeiende en nauwkeurige beweging kan worden gerealiseerd. Toch is het niet mogelijk om op basis hiervan te concluderen dat de beweging van het schaalmodel representatief is voor een gearticuleerde robot. Dit kan pas bevestigd worden na de bouw van een prototype.

Al met al kan geconcludeerd worden dat is voldaan aan de gestelde eisen en dat daarmee een schaalontwerp gerealiseerd is waarmee de gestelde doelen worden behaald. Wel is het zo dat deze uitspraak is gebaseerd op de theoretische eigenschappen van het ontwerp. Dit betreft bijvoorbeeld de doorbuiging van de constructie die is gebaseerd op een computer simulatie en de eigenschappen van de beweging die worden gebaseerd op de theoretische kenmerken van het geselecteerde motor type. Voor een volledige verificatie van het ontwerp is het nodig om een prototype te realiseren waarvan de prestaties worden beoordeeld.

Begripsbepaling

Aanzetkoppel	De koppelkracht die een motor levert wanneer de hoeksnelheid gelijk is aan nul.
Basis	De schakel van een robotarm die door middel van een vaste verbinding verbonden is met de omgeving. Deze schakel beweegt niet onder invloed van een actuatie van de gewrichten.
Binaire schakel	Een schakel die op twee punten door middel van een gewricht verbonden wordt met een andere schakel.
Distaal	Het meest veraf gelegen van de basis.
Eind-effector	De eind-effector is verbonden met het uiteinde van de robotarm en is het onderdeel dat een manipulatie uitvoert aan de omgeving.
Gewrichtsas	De as waarover de beweging plaatsvindt van een eendimensionaal rotatie- of translatiegewricht.
Gewrichtvariabele	De grootte die varieert ten gevolge van een beweging in het gewricht
Industriële robot	Een automatisch aangestuurde, herprogrammeerbare, multifunctionele manipulator die programmeerbaar is in drie of meer assen.
Kinematische structuur	Beschrijft de topologische aspecten van een kinematische representatie door middel van schakels en gewrichten.
Nominaal koppel	De koppelkracht bij een zekere hoeksnelheid die het beoogde gebruik van de motor representeert.
Proximaal	Het dichtst gelegen bij de basis.
Rondsel	Aangedreven tandwiel.
Schakel	Starre verbinding tussen twee gewrichten.
Volger	Het tandwiel dat ingrijpt op het rondsel.
Werkgebied	Een gebied in de driedimensionale ruimte waarbinnen de eind-effector gepositioneerd kan worden.
Wiel	Zie definitie volger.

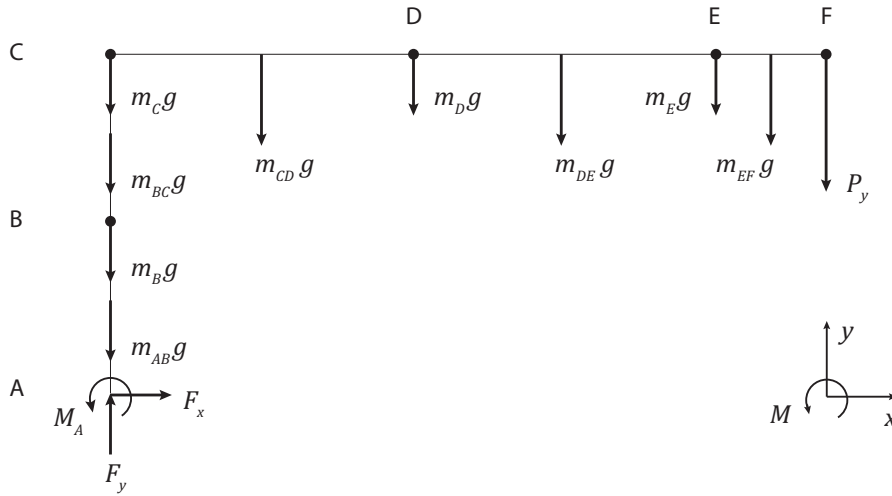
Bijlagen

Bijlage A: Statica berekening van een seriële manipulator	66
Bijlage B: Dynamica berekening van een seriële manipulator	70
Bijlage C: Invoerparameters rekenkundig model	77
Bijlage D: Elektromotoren	78
Bijlage E: Modelparameters motorkeuze	84
Bijlage F: Tandwieloverbrenging servomotor	85
Bijlage G: Voorstel motorkeuze budget	90
Bijlage H: Voorstel motorkeuze kwaliteit	91
Bijlage I: Overzicht schaalmodellen robotarm	92
Bijlage J: Parameters robotarm	93
Bijlage K: Spanningsplots van de constructie	95
Bijlage L: Overzicht van gearticuleerde robots inclusief eindontwerp	97

Bijlage A

Statica berekening van een seriële manipulator

De eerste stap in de berekening is het opstellen van een vrije lichaam structuur die is weergegeven in figuur 3.3. Bij het opstellen van iedere vrije lichaamstructuur worden de positieve richting van de krachten bepaald door het assenstelsel dat in de rechter onderhoek is weergegeven. Voor alle andere vrije lichaamstructuren in deze analyse wordt hetzelfde assenstelsel toegepast tenzij anders aangegeven. Om de krachten in punt A te kunnen berekenen is de constructie in dit punt losgekoppeld van de vaste wereld en zijn als gevolg daarvan de reactiekrachten F_x , F_y en M_A ingetekend. Op dezelfde manier wordt de constructie in de punten B, C, D en E losgekoppeld om daar de reactiekrachten te berekenen. De vrije lichaamstructuren van deze situaties zijn weergegeven in respectievelijk de figuren 3.4 tot en met 3.7.



Figuur 3.3: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt A.

In het geval van een statisch evenwicht gelden de volgende evenwichtsvergelijkingen:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M_o = 0$$

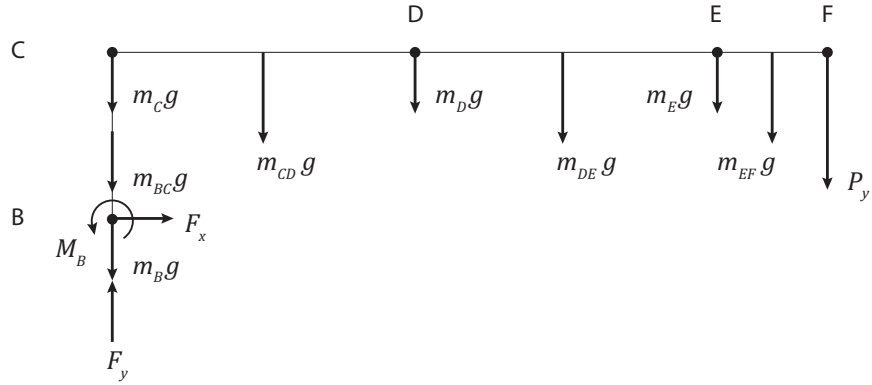
$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.1)$$

$$\sum F_y = F_y - m_{AB}g - m_Bg - m_{BC}g - m_Cg - m_{CD}g - m_Dg - m_{DE}g - m_Eg - m_{EF}g - m_{Py}g = 0$$

$$F_y = g(m_{AB} + m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.2)$$

$$\sum M_A = M_A - \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} - m_DgL_{CD} - m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) - m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) - m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) - m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = 0$$

$$M_A = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \quad (3.3)$$

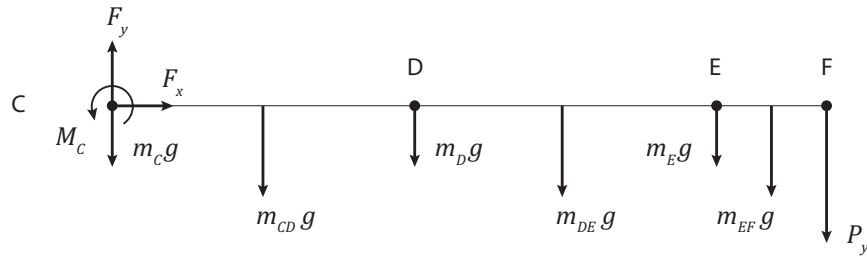


Figuur 3.4: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt B.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y &= F_y - m_B g - m_{BC} g - m_C g - m_{CD} g - m_D g - m_{DE} g - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = 0 \\ F_y &= g(m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sum M_B &= M_B - \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} - m_D g L_{CD} - m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) - m_E g (L_{CD} + L_{DE}) - \\ &\quad m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) - m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = 0 \\ M_B &= \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} + m_D g L_{CD} + m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) + m_E g (L_{CD} + L_{DE}) + \\ &\quad m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) + m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

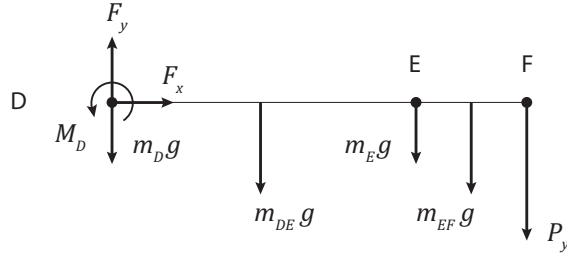


Figuur 3.5: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt C.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y &= F_y - m_C g - m_{CD} g - m_D g - m_{DE} g - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = 0 \\ F_y &= g(m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \sum M_C &= M_C - \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} - m_D g L_{CD} - m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) - m_E g (L_{CD} + L_{DE}) - \\ &\quad m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) - m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = 0 \\ M_C &= \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} + m_D g L_{CD} + m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) + m_E g (L_{CD} + L_{DE}) + \\ &\quad m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) + m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \end{aligned} \quad (3.9)$$



Figuur 3.6: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt D.

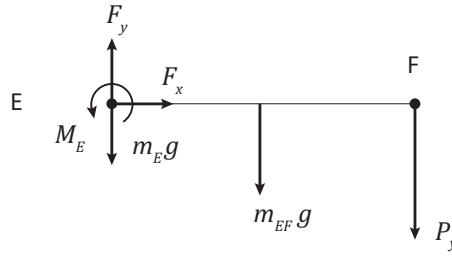
$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.10)$$

$$\sum F_y = F_y - m_D g - m_{DE} g - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = 0$$

$$F_y = g(m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.11)$$

$$\sum M_D = M_D - \frac{1}{2} m_{DE} g L_{DE} - m_E g L_{DE} - m_{EF} g \left(L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right) - m_{Py} g (L_{DE} + L_{EF}) = 0$$

$$M_D = \frac{1}{2} m_{DE} g L_{DE} + m_E g L_{DE} + m_{EF} g \left(L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right) + m_{Py} g (L_{DE} + L_{EF}) \quad (3.12)$$



Figuur 3.7: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt E.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.13)$$

$$\sum F_y = F_y - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = 0$$

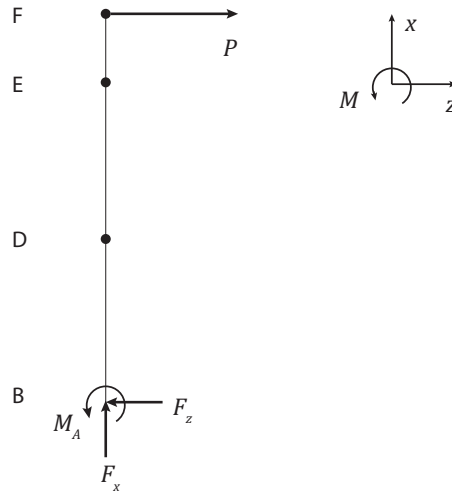
$$F_y = g(m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.14)$$

$$\sum M_E = M_E - \frac{1}{2} m_{EF} g L_{EF} - m_{Py} g L_{EF} = 0$$

$$M_E = \frac{1}{2} m_{EF} g L_{EF} + m_{Py} g L_{EF} \quad (3.15)$$

Gewricht B

De voorgaande berekening geeft wel de reactiekrachten in gewricht B ten gevolge van het gewicht van de robotarm en een belasting in punt F, maar dit zijn niet de reactiekrachten die de grootste invloed hebben op de beweging van gewricht B. Dit komt doordat gewricht B roteert rond de y-as en de andere gewrichten roteren rond de z-as. Daarom wordt hier een analyse gedaan van een rotatiebeweging van gewricht B waarbij de krachten in het XZ-vlak worden beschouwd. Er wordt dezelfde configuratie beschouwd als beschreven is in figuur 3.2, omdat hierbij de grootste belasting optreedt in gewricht B.



Figuur 3.8: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt B.

Figuur 3.8 beschrijft de vrije lichaam structuur en de werkende krachten die worden geanalyseerd. Daarbij is schakel BC georiënteerd in y-richting en overlappen de punten B en C in het XZ-vlak. Uitgaande van een homogene massaverdeling van schakel BC en het buiten beschouwing laten van de wrijvingskracht, heeft deze schakel geen invloed op de belasting in punt B en wordt daarom buiten beschouwing gelaten. Er is wederom rekening gehouden met een belasting P_z . Deze belasting stelt de reactiekracht voor van het materiaal wanneer de robotarm tijdens een freesbewerking in z-richting door het materiaal beweegt. De kracht P_z zal worden uitgedrukt als massa en wordt daarom geschreven als $m_{py} \cdot g$. Zo kunnen de volgende formules worden opgesteld voor de reactiekrachten in gewricht B.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.16)$$

$$\sum F_z = F_z - m_{pz}g = 0$$

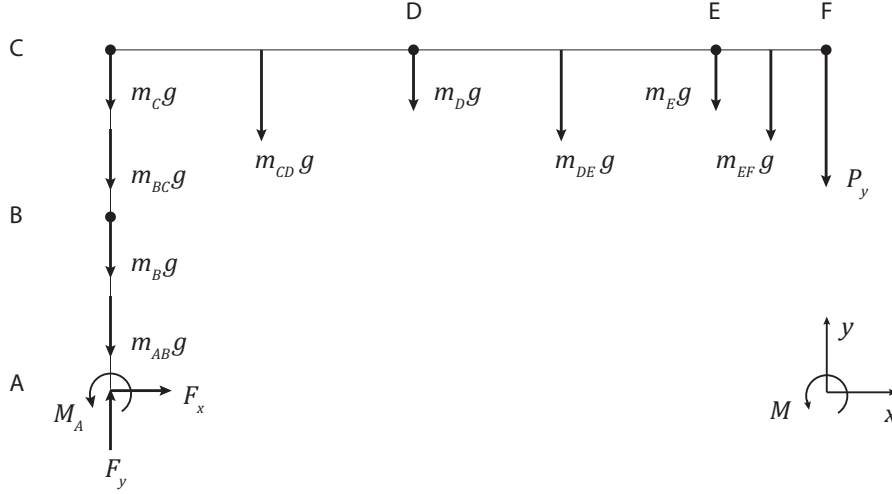
$$F_z = m_{pz}g \quad (3.17)$$

$$\sum M_B = M_B - m_{pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = 0$$

$$M_B = m_{pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \quad (3.18)$$

Bijlage B

Dynamica berekening van een seriële manipulator



Figuur 3.9: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt A.

In het geval van een dynamisch evenwicht gelden de volgende algemene evenwichtsvergelijkingen:

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y \quad \sum M_o = I_o \alpha$$

In de situatie die wordt beschouwd, is de robotarm horizontaal georiënteerd vanaf het draaipunt waardoor de versnelling in x-richting (a_x) gelijk is aan nul. De versnelling in y-richting (a_y) is gelijk aan de tangentiële component van de versnelling. Dat resulteert in de volgende evenwichtsvergelijkingen die van toepassing zijn op de robotarm configuratie die bij deze analyse wordt bekeken.

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = mra \quad \sum M_o = I_o \alpha$$

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.19)$$

$$\sum F_y = F_y - m_{AB}g - m_Bg - m_{BC}g - m_Cg - m_{CD}g - m_Dg - m_{DE}g - m_Eg - m_{EF}g - m_{Py}g = mra$$

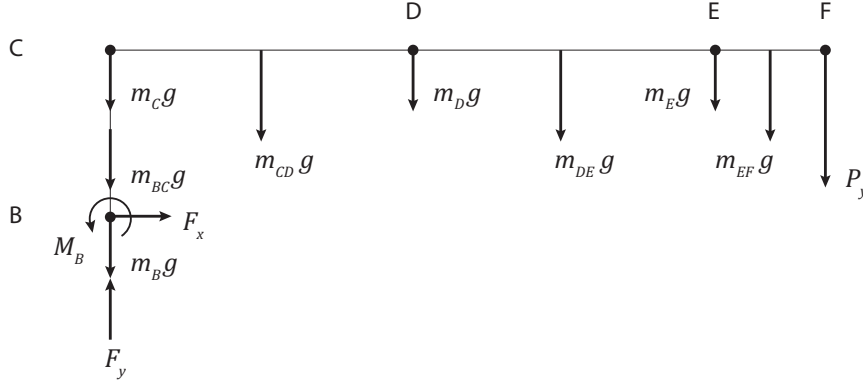
$$F_y = g(m_{AB} + m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) + r\alpha(m_{AB} + m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.20)$$

$$\sum M_A = M_A - \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} - m_DgL_{CD} - m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) - m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) - m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) - m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = I_A\alpha_A$$

$$M_A = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + I_A\alpha_A$$

Omdat de constructie is ingeklemd in punt A zal α_A gelijk zijn aan 0. Dat leidt tot de volgende uitdrukking voor M_A

$$M_A = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \quad (3.21)$$



Figuur 3.10: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt B.

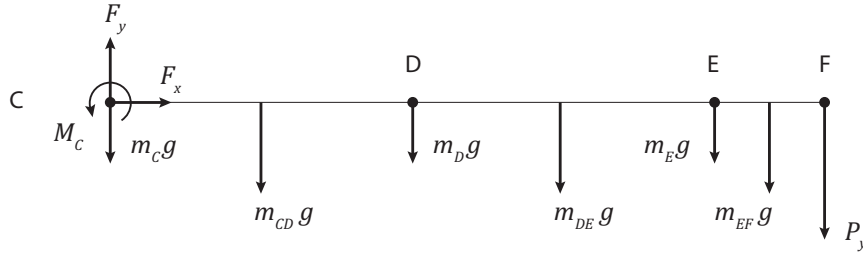
$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \sum F_y = F_y - m_Bg - m_{BC}g - m_Cg - m_{CD}g - m_Dg - m_{DE}g - m_Eg - \\ m_{EF}g - m_{Py}g = m\alpha \\ F_y = g(m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) + \\ r\alpha(m_B + m_{BC} + m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \sum M_B = M_B - \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} - m_DgL_{CD} - m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) - m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) - \\ m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) - m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = I_B\alpha_B \\ M_B = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + \\ m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + I_B\alpha_B \end{aligned}$$

Vanwege de aanname dat punt B bij deze analyse beschouwd wordt als starre verbinding zal α_B gelijk zijn aan 0. Dat leidt tot de volgende uitdrukking voor M_B

$$M_B = \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + m_{EF}g(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) \quad (3.24)$$



Figuur 3.11: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt C.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.25)$$

$$\sum F_y = F_y - m_C g - m_{CD} g - m_D g - m_{DE} g - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = m r \alpha$$

$$F_y = g(m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) + r \alpha (m_C + m_{CD} + m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.26)$$

$$\sum M_C = M_C - \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} - m_D g L_{CD} - m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) - m_E g (L_{CD} + L_{DE}) -$$

$$m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) - m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = I_C \alpha_C$$

$$M_C = \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} + m_D g L_{CD} + m_{DE} g (L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE}) + m_E g (L_{CD} + L_{DE}) +$$

$$m_{EF} g (L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF}) + m_{Py} g (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + I_C \alpha_C \quad (3.27)$$

Om formule 3.27 verder te kunnen herleiden, moet een uitdrukking voor I_C gevonden worden. Het traagheidsmoment van een star lichaam dat roteert om een vaste as (h) wordt gegeven door de volgende formule.

$$I_h = \int_V \rho(r) \cdot d^2 dV \quad (3.28)$$

Waarin

$\rho(r)$ = massadichtheid in punt r

d = radiusvector van een punt r van het lichaam tot het draaipunt h

Uit formule 3.28 kan worden geconcludeerd dat de grootte van het traagheidsmoment afhankelijk is van de massa van het object en de geometrie die de massaverdeling bepaalt. De exacte geometrie van de robotarm is nog niet bekend en daarom kan deze formule niet gebruikt worden voor de berekening van het traagheidsmoment. In plaats daarvan wordt een aantal aannames gedaan waarmee het traagheidsmoment kan worden uitgedrukt in een massa en twee afmetingen die de geometrie beschrijven. De aanname is dat een schakel van de robotarm benaderd kan worden als massieve cilinder. Dat gecombineerd met de eerdere aanname dat de massa van de schakels homogeen is verdeeld, leidt tot de volgende formule voor het traagheidsmoment van een schakel om zijn massamiddelpunt G .

$$I_G = \frac{1}{4} m r^2 + \frac{1}{12} m L^2 \quad (3.29)$$

Waarin

m = massa van de schakel

r = straal van cilinder

L = lengte van de schakel

Naast het traagheidsmoment van de schakels van de robotarm, is er ook het traagheidsmoment van de gewrichten. Deze gewrichten worden benaderd als massieve bol waardoor de volgende formule kan worden gebruikt voor het berekenen van het traagheidsmoment een gewricht om een willekeurige as door zijn zwaartepunt.

$$I_G = \frac{2}{5}mr^2 \quad (3.30)$$

Waarin

m = massa van het gewricht

r = straal van de bol

Ten slotte moet de invloed van de belasting (P) op punt F meegenomen worden in de berekening van het traagheidsmoment om punt C. Gezien de aanname dat P een puntbelasting is, wordt het traagheidsmoment ten gevolge van P gegeven door de volgende formule.

$$I_h = mr^2 \quad (3.31)$$

Waarin

m = massa van het gewicht

r = afstand van de puntmassa m tot de draaias h

Om iets te kunnen zeggen over de krachten in de gewrichten, zal het traagheidsmoment van de schakels moeten worden berekend om het gewrichtspunt in plaats van om het massazwaartepunt. Daarbij wordt er gebruik gemaakt van de stelling van Steiner die stelt dat het traagheidsmoment om een as (h) parallel aan de as door het massazwaartepunt wordt gegeven door de volgende formule.

$$I_h = I_G + md^2 \quad (3.32)$$

Waarin

I_G = traagheidsmoment om het massazwaartepunt G

m = massa van de schakel

d = radiusvector van punt h tot punt G

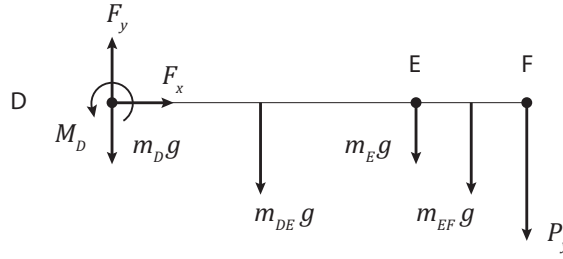
Het traagheidsmoment van een robotarm, bestaande uit meerdere schakels, om punt h is gelijk aan de som van de traagheidsmomenten van de afzonderlijke schakels om punt h . Dit gegeven gecombineerd met de formules 3.29 tot en met 3.32 leidt tot de volgende uitdrukking voor I_c

$$\begin{aligned} I_c = & \frac{1}{4}m_{CD}r_{CD}^2 + \frac{1}{12}m_{CD}L_{CD}^2 + m_{CD}\left(\frac{1}{2}L_{CD}\right)^2 + \frac{2}{5}m_Dr_D^2 + m_DL_{CD}^2 + \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \\ & \frac{1}{12}m_{DE}L_{DE}^2 + m_{DE}\left(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}\right)^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_E(L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \\ & \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{EF}\left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right)^2 + m_{Py}(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_C = & \frac{1}{4}m_{CD}r_{CD}^2 + \frac{1}{3}m_{CD}L_{CD}^2 + \frac{2}{5}m_Dr_D^2 + m_DL_{CD}^2 + \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{12}m_{DE}L_{DE}^2 + \\
& m_{DE}\left(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}\right)^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_E(L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + \\
& m_{EF}\left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right)^2 + m_{Py}(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Wanneer deze uitdrukking voor I_C wordt ingevuld in formule 3.27 resulteert dat in de volgende uitdrukking voor de momentkracht in punt C.

$$\begin{aligned}
M_C = & \frac{1}{2}m_{CD}gL_{CD} + m_DgL_{CD} + m_{DE}g(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}) + m_Eg(L_{CD} + L_{DE}) + \\
& m_{EF}g\left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right) + m_{Py}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_C\left(\frac{1}{4}m_{CD}r_{CD}^2 + \right. \\
& \frac{1}{3}m_{CD}L_{CD}^2 + \frac{2}{5}m_Dr_D^2 + m_DL_{CD}^2 + \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{12}m_{DE}L_{DE}^2 + \\
& m_{DE}\left(L_{CD} + \frac{1}{2}L_{DE}\right)^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_E(L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + \\
& \left. m_{EF}\left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right)^2 + m_{Py}(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2\right)
\end{aligned} \tag{3.34}$$



Figuur 3.12: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt D.

$$\sum F_x = F_x = 0 \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
\sum F_y = & F_y - m_Dg - m_{DE}g - m_Eg - m_{EF}g - m_{Py}g = mra \\
F_y = & g(m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py}) + r\alpha(m_D + m_{DE} + m_E + m_{EF} + m_{Py})
\end{aligned} \tag{3.36}$$

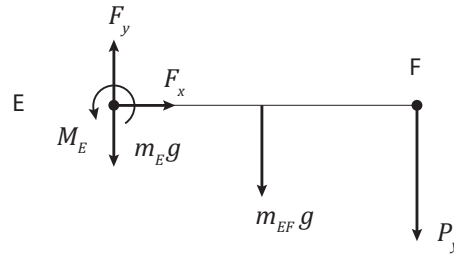
$$\begin{aligned}
\sum M_D = & M_D - \frac{1}{2}m_{DE}gL_{DE} - m_EgL_{DE} - m_{EF}g(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}) - m_{Py}g(L_{DE} + L_{EF}) = I_D\alpha_D \\
M_D = & \frac{1}{2}m_{DE}gL_{DE} + m_EgL_{DE} + m_{EF}g\left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right) + m_{Py}g(L_{DE} + L_{EF}) + I_D\alpha_D
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Het traagheidsmoment om punt D wordt gegeven door de volgende formule.

$$\begin{aligned}
I_D = & \frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{3}m_{DE}L_{DE}^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_EL_{DE}^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + \\
& m_{EF}\left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right)^2 + m_{Py}(L_{DE} + L_{EF})^2
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Wanneer formule 3.38 wordt ingevuld in formule 3.37 wordt de volgende uitdrukking voor de momentkracht in punt D verkregen.

$$M_D = \frac{1}{2}m_{DE}gL_{DE} + m_EgL_{DE} + m_{EF}g\left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right) + m_{Py}g(L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_D\left(\frac{1}{4}m_{DE}r_{DE}^2 + \frac{1}{3}m_{DE}L_{DE}^2 + \frac{2}{5}m_Er_E^2 + m_EL_{DE}^2 + \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{12}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{EF}\left(L_{DE} + \frac{1}{2}L_{EF}\right)^2 + m_{Py}(L_{DE} + L_{EF})^2\right) \quad (3.39)$$



Figuur 3.13: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt E.

$$\sum F_x = F_x = 0 \quad (3.40)$$

$$\sum F_y = F_y - m_E g - m_{EF} g - m_{Py} g = m r \alpha$$

$$F_y = g(m_E + m_{EF} + m_{Py}) + r \alpha (m_E + m_{EF} + m_{Py}) \quad (3.41)$$

$$\sum M_E = M_E - \frac{1}{2}m_{EF}gL_{EF} - m_{Py}gL_{EF} = I_E \alpha_E$$

$$M_E = \frac{1}{2}m_{EF}gL_{EF} + m_{Py}gL_{EF} + I_E \alpha_E \quad (3.42)$$

Het traagheidsmoment om punt E wordt gegeven door de volgende formule.

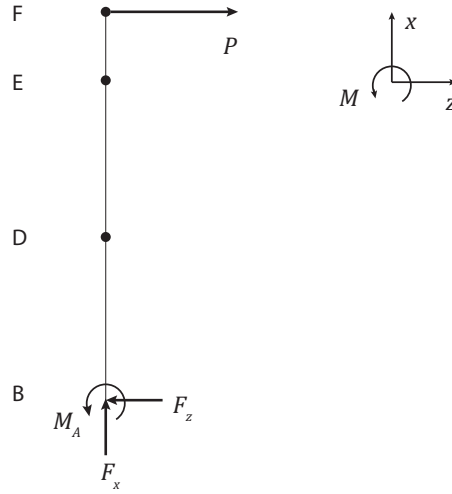
$$I_E = \frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{3}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{Py}L_{EF}^2 \quad (3.43)$$

Wanneer formule 3.43 wordt ingevuld in formule 3.42 wordt de volgende uitdrukking voor de momentkracht in punt E verkregen.

$$M_E = \frac{1}{2}m_{EF}gL_{EF} + m_{Py}gL_{EF} + \alpha_E \left(\frac{1}{4}m_{EF}r_{EF}^2 + \frac{1}{3}m_{EF}L_{EF}^2 + m_{Py}L_{EF}^2 \right) \quad (3.44)$$

Gewricht B

Net als bij de berekening van de statica wordt de benodigde koppelkracht in gewricht B apart berekend voor de dynamische situatie. Daarbij wordt dezelfde configuratie (figuur 3.14) beschouwd onder dezelfde aannames. In tegenstelling tot de statica berekening wordt hier wel rekening gehouden met schakel BC in verband met het massastraagheidsmoment ten gevolge van deze schakel. Deze kan berekend worden aan de hand van formule 3.45 voor het massastraagheidsmoment van een massieve cilinder die om zijn eigen as roteert.



Figuur 3.14: Vrije lichaam structuur losgekoppeld in punt B.

$$I = \frac{1}{2} m r^2 \quad (3.45)$$

Waarin

m = massa van de schakel

r = straal van de cilinder

Formule 3.45 gecombineerd met de formules 3.29 tot en met 3.32 resulteert in de volgende uitdrukking voor de momentkracht in gewricht B die gelijk staat aan de koppelkracht die in dit gewricht geleverd moet worden.

$$\begin{aligned} \sum M_B &= M_B - m_{Pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) = I_B \alpha_B \\ M_B &= m_{Pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + I_B \alpha_B \end{aligned} \quad (3.46)$$

Het traagheidsmoment om punt B wordt gegeven door de volgende formule.

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{1}{2} m_{BC} r_{BC}^2 + \frac{2}{5} m_C r_C^2 + \frac{1}{4} m_{CD} r_{CD}^2 + \frac{1}{3} m_{CD} L_{CD}^2 + \frac{2}{5} m_D r_D^2 + m_D L_{CD}^2 + \frac{1}{4} m_{DE} r_{DE}^2 + \\ &\quad \frac{1}{12} m_{DE} L_{DE}^2 + m_{DE} \left(L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE} \right)^2 + \frac{2}{5} m_E r_E^2 + m_E (L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4} m_{EF} r_{EF}^2 + \\ &\quad \frac{1}{12} m_{EF} L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right)^2 + m_{Pz} (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Wanneer formule 3.47 wordt ingevuld in formule 3.46 wordt de volgende uitdrukking voor de momentkracht in punt B verkregen.

$$\begin{aligned} M_B &= m_{Pz}g(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF}) + \alpha_B \left(\frac{1}{2} m_{BC} r_{BC}^2 + \frac{2}{5} m_C r_C^2 + \frac{1}{4} m_{CD} r_{CD}^2 + \frac{1}{3} m_{CD} L_{CD}^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{2}{5} m_D r_D^2 + m_D L_{CD}^2 + \frac{1}{4} m_{DE} r_{DE}^2 + \frac{1}{12} m_{DE} L_{DE}^2 + m_{DE} \left(L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE} \right)^2 + \frac{2}{5} m_E r_E^2 + \right. \\ &\quad \left. m_E (L_{CD} + L_{DE})^2 + \frac{1}{4} m_{EF} r_{EF}^2 + \frac{1}{12} m_{EF} L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. m_{Pz} (L_{CD} + L_{DE} + L_{EF})^2 \right) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Bijlage C

Invoerparameters rekenkundig model

Tabel 3.3: Invoerparameters rekenkundig model.

symbool	betekenis	eenheid
m_{AB}	massa schakel AB	kg
m_B	massa gewricht B	kg
m_{BC}	massa schakel BC	kg
m_C	massa gewricht C	kg
m_{CD}	massa schakel CD	kg
m_D	massa gewricht D	kg
m_{DE}	massa schakel DE	kg
m_E	massa gewricht E	kg
m_{EF}	massa schakel EF	kg
m_{P_y}	massa belasting P_y	kg
m_{P_z}	massa belasting P_z	kg
L_{AB}	lengte schakel AB	m
L_{BC}	lengte schakel BC	m
L_{CD}	lengte schakel CD	m
L_{DE}	lengte schakel DE	m
L_{EF}	lengte schakel EF	m
r_{BC}	straal schakel BC	m
r_C	straal gewricht C	m
r_{CD}	straal schakel CD	m
r_D	straal gewricht D	m
r_{DE}	straal schakel DE	m
r_E	straal gewricht E	m
r_{EF}	straal schakel EF	m
α_B	hoekversnelling punt B	deg/s ²
α_C	hoekversnelling punt C	deg/s ²
α_D	hoekversnelling punt D	deg/s ²
α_E	hoekversnelling punt E	deg/s ²
η_B	efficiëntie motor B	%
η_C	efficiëntie motor C	%
η_D	efficiëntie motor D	%
η_E	efficiëntie motor E	%
q	veiligheidsfactor	-

Bijlage D

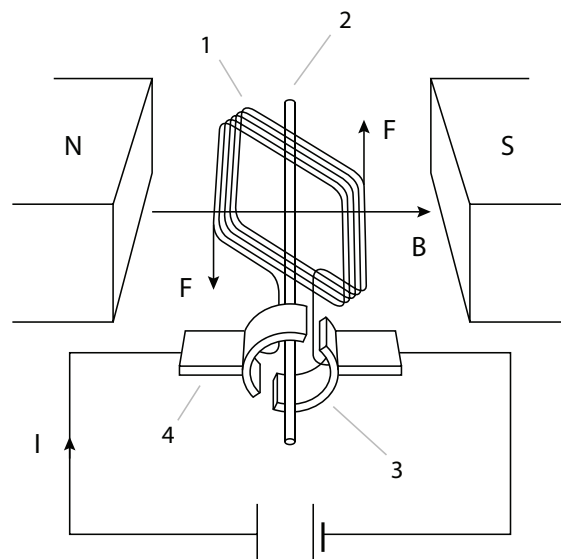
Elektromotoren

Deze bijlage bevat een beschrijving van verschillende typen elektromotoren die worden weergegeven in figuur 4.1. Allereerst zal worden gekeken naar de gelijkstroommotor en de wisselstroommotor. Daartoe wordt een algemene beschrijving gegeven van de motortechniek, zodat aan de hand daarvan de verschillen tussen de types geduid kunnen worden. Vervolgens worden de eigenschappen geanalyseerd van twee specifieke elektromotoren die worden toegepast in de modelbouw en mogelijk geschikt zijn als actuator van een schaalmodel van een robotarm. Van deze twee motoren worden de eigenschappen geanalyseerd en geëvalueerd wat resulteert in de keuze voor een type elektromotor.

Een elektromotor bestaat uit hoofdzakelijk twee onderdelen: de stator en de rotor. De stator is het statische onderdeel van de motor waarbinnen de rotor beweegt. In ieder geval is of de stator of de rotor uitgevoerd als elektromagneet. De ander kan uitgevoerd zijn als elektromagneet of als permanente magneet. Op basis van het type aanvoerstroom dat de motor nodig heeft om te functioneren, zijn er twee typen elektromotoren te onderscheiden. Deze twee typen zijn de gelijkstroommotor en de wisselstroommotor.

Gelijkstroommotor

Een gelijkstroommotor wordt aangedreven door gelijkstroom. Bij dit type elektromotor is het magneetveld van de stator constant in grootte en richting. Bij gelijkstroommotoren met een laag vermogen komt het magneetveld van de stator over het algemeen tot stand door een permanente magneet. Wanneer er sprake is van grotere vermogens bestaat de stator uit een elektromagneet. Een voordeel van het toepassen van een permanente magneet is dat de motor compacter en efficiënter is vergeleken met een elektromagnetische stator. Daarentegen is een voordeel van een elektromagneet dat de grootte van het magneetveld aangepast kan worden.



Figuur 4.2: Opbouw gelijkstroommotor.

De opbouw van een gelijkstroommotor wordt geïllustreerd door figuur 4.2. Om een beweging van de rotor te verwezenlijken zal er in de rotor een wisselend magneetveld moeten worden opgewekt. Daartoe is er een spoel (1) op de rotor (2) bevestigd waar gelijkstroom (I) door gevoerd wordt. Door deze stroomvoerende spoel in het magneetveld (B) van de stator te plaatsen, worden Lorentzkrachten (F) opgewekt die de gelijke polen van beide magneetvelden van elkaar afstoten. Dit zet een roterende beweging in gang, maar deze stopt na 180° omwenteling wanneer de tegengestelde polen met elkaar zijn uitgelijnd. Om de beweging voort te zetten, wordt de richting van het magneetveld van de rotor omgedraaid. Dit gebeurt door de commutator (3) die de richting van de stroom door de spoel op de rotor omdraait. De spoel is door middel van sleepcontacten in de vorm van koolborstels (4) verbonden met de positieve en negatieve stroomklem van de commutator. Het toerental van een gelijkstroommotor is rechtevenredig met de frequentie waarmee het magneetveld van de rotor wordt omgedraaid. Een groot voordeel van de gelijkstroommotor is dat het toerental op eenvoudige wijze gevarieerd kan worden door de bekrachtigingsstroom of de motorspanning te variëren.

Borstelloze gelijkstroommotor

De borstelloze motor is een speciaal soort gelijkstroommotor dat niet op mechanische wijze door middel van een commutator en koolborstels de richting van de gelijkstroom omdraait, maar op elektronische wijze door middel van een sensor en een transistor. De transistor draait de richting van de stroom om en is daarmee een vervanging van de commutator. De sensor, in de meeste gevallen een Hall-sensor, vervangt de koolborstels en bepaalt het moment waarop de stroomrichting moet worden omgedraaid. Het voordeel van de borstelloze motor is dat de componenten betrouwbaarder en duurzamer zijn doordat er niet langer sprake is van vonkvorming en slijtage van de koolborstels. Daarnaast heeft een borstelloze motor gemiddeld een efficiëntie van 85–90% waarmee deze gemiddeld 5–15% efficiënter is dan geborstelde elektromotoren (Miller, 2010). Een nadeel is dat borstelloze motoren vaak duurder zijn en een complexere aansturing hebben door het gebruik van een sensor.

Wisselstroommotor

Een wisselstroommotor werkt, in tegenstelling tot een gelijkstroommotor, op wisselstroom. Als een wisselstroommotor is aangesloten op een accu zal er een DC/AC omzetter nodig zijn, omdat een accu gelijkstroom afgeeft. Wanneer de motor is aangesloten op het lichtnet is er geen omzetter nodig. Daarom worden wisselstroommotoren vaak toegepast op stationaire robots.

In het geval van een wisselstroommotor is het magneetveld van de stator variabel en is het magneetveld van de rotor constant. Daarmee lijkt de wisselstroommotor veel op de borstelloze gelijkstroommotor. Een belangrijk verschil is echter dat het wisselend magneetveld bij de wisselstroommotor tot stand komt door wisselstroom en niet door gelijkstroom. Door de eigenschap van wisselstroom dat de richting van de stroom periodiek wisselt, zijn er bij een wisselstroommotor geen commutator en koolborstels of transistor en sensor nodig om de richting van de stroom om te draaien. Dat maakt dat een wisselstroommotor betrouwbaarder en duurzamer is dan een gelijkstroommotor. Het toerental van de wisselstroommotor is rechtevenredig met de frequentie waarmee het stator magneetveld draait. Wanneer de motor is aangesloten op het lichtnet, is het dit altijd een veelvoud van de constante netfrequentie van 50Hz in Europa en 60Hz in Amerika. Met een frequentieregelaar kan, binnen grenzen, elk gewenst toerental worden ingesteld.

Afhankelijk van het type rotor dat wordt gebruikt, kunnen twee typen wisselstroommotoren onderscheiden worden. Het eerste type is een synchrone wisselstroommotor. Bij deze motor loopt het draaiveld van de rotor gelijk met het draaiveld van de stator. De rotor heeft een constant magneetveld door een permanente magneet of een elektromagneet gevoed met gelijkstroom. Dit kan zowel geborsteld als ongeborsteld. Het nadeel van een synchrone elektromotor is dat deze niet zelfstartend is. Er is daarom een aanloop mechanisme nodig. Vaak worden synchrone motoren toegepast op installaties waar een constant toerental nodig is zoals uurwerken, platenspelers, pompen en compressors.

Bij het tweede type, de asynchrone wisselstroommotor, loopt het draaiveld van de rotor niet gelijk met het draaiveld van de stator. Dit is nodig voor de inductiewerking in de rotor. Dat betekent dat de stator en de rotor een andere draaisnelheid hebben. Het verschil tussen deze twee draaisnelheden wordt de slip genoemd. Door de magneet van de rotor in het wisselend magneetveld van de stator te plaatsen ontstaat er een inductiespanning over de rotor. Deze spanning doet een wervelstroom vloeien die Lorentzkrachten ontwikkelt die werken als koppel dat de motor doet draaien. Een eigenschap van dit type motor is dat het een zeer groot aanloopkoppel heeft doordat vanuit stilstand de slip maximaal is en daarom de ontwikkelde spanning, stroom en Lorentzkrachten ook.

Binnen het type asynchrone wisselstroommotor zijn nog twee classificeringen aan te brengen op basis van het type stator dat bepaalt op welke manier het draaiveld in de statorholte tot stand komt. Zo kunnen eenfasige en driefasige asynchrone wisselstroommotoren worden onderscheiden. Bij een eenfasige wisselstroommotor bestaat de stator uit een parallelgeschakelde hoofdwikkeling en hulpwikkeling die onder een hoek van 90° ten opzichte van elkaar verdraaid zijn. Er wordt een condensator in serie geschakeld met de hulpwikkeling. Dit zorgt voor een faseverschuiving waardoor de magneetvelden van beide wikkelingen op een ander moment hun maximale waarde bereiken. Het resultaat is een draaiend magneetveld. De hulpwikkeling is alleen nodig om de motor op te starten en is daarom zwakker dan de hoofdwikkeling wat resulteert in een elipsvormige fluxvector.

In het geval van een driefasige wisselstroommotor is de stator opgebouwd uit meerdere identieke, eenfasige wikkelingen. Zo een fasewikkeling is in feite een spoelgroep bestaande uit meerder in serie of parallel geschakelde spoelen. Het aantal wikkelingen kan variëren per model, maar voor deze beschrijving wordt uitgegaan van een stator bestaande uit drie wikkelingen. In dat geval staan de wikkelingen 120° van elkaar verschoven. Om een draaiveld op te leveren, wordt op iedere fasewikkeling een wisselstroom toegevoerd met gelijke amplitude en frequentie, maar met een 120° verschoven fase zodat het magneetveld van iedere wikkeling op een ander moment zijn maximale waarde bereikt. Doordat de spoelen van een driefasige wisselstroommotor identiek zijn, is de vorm van de fluxvector bij dit model wel cirkelvormig.

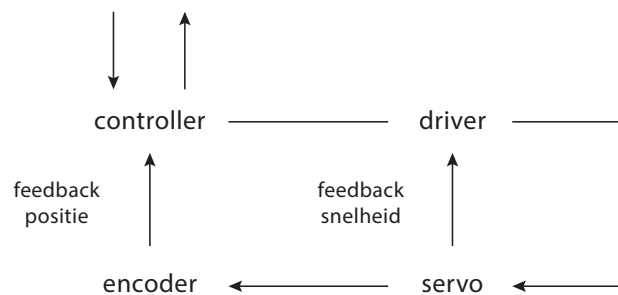
Toepassing op modelbouw

In de voorgaande twee paragrafen is de algemene theorie besproken van een gelijkstroommotor en een wisselstroommotor. De keuze voor het type motor dat toegepast wordt op de robotarm gaat echter een stap verder dan alleen de keuze voor een gelijkstroom- of een wisselstroommotor. Er zijn tal van varianten mogelijk die allemaal hun specifieke eigenschappen en toepassing hebben. Hiervan zijn er in het bijzonder twee typen motoren die veel gebruikt worden in de modelbouw en

robotica en geschikt zijn om toegepast te worden op een robotarm. Dit zijn de servomotor en de stappenmotor. Deze twee types zullen in de volgende paragrafen worden besproken waarna er een keuze gemaakt zal worden uit een van deze twee typen elektromotoren.

Servomotor

Een servomotor is een servomechanisme met een gesloten loop dat gebruikt maakt van positiefeedback om de beweging aan te sturen. In figuur 4.3 is een schematische weergave te zien van een servomotor. Het servosysteem bestaat uit een elektromotor, een feedback component, een elektronische controller en een driver. Er wordt een referentiesignaal opgewekt door de feedback component, in de meeste gevallen is dit een encoder, dat informatie geeft over de huidige positie van de motor. Dit referentiesignaal wordt door de controller vergeleken met het stuursignaal dat informatie geeft over de gewenste positie van de motor. Op basis van het verschil tussen referentiesignaal en stuursignaal wordt de beweging van de elektromotor aangestuurd. Dit proces wordt net zo lang herhaald tot de gewenste eindpositie is bereikt. Het gevolg van deze feedback loop is dat een servomotor altijd nauwkeurig positioneert.



Figuur 4.3: Schematische weergave servomotor.

Wat een motor tot een servomotor maakt is de gesloten feedback loop. De elektromotor is maar een deel van het servosysteem en kan van het type gelijkstroom- en wisselstroommotor zijn en voorkomen als synchrone of asynchrone variant. Dit bepaalt voor een deel de eigenschappen van een servomotor. Om die reden is het moeilijk om een servomotor te typeren met algemene eigenschappen. Iets dat echter wel voor alle servomotoren geldt is dat de beweging van de motor continue is waardoor ze geschikt zijn voor toepassingen met een constante, vloeiende beweging. Daarnaast kan een servomotor koppel leveren zonder hoeksnelheid en kan daar daarmee als standrem fungeren.

Stappenmotor

Bij een stappenmotor is een speciaal type borstelloze gelijkstroommotor en heeft daarmee het voordeel dat de motor robuust is en weinig onderhoud vraagt. Een belangrijke eigenschap van de stappenmotor is dat de rotor niet continue draait, maar stapsgewijs. Dit veroorzaakt resonantie in de beweging waardoor een stappenmotor minder geschikt is voor toepassingen die een constante beweging vragen. De stapsgewijze beweging wordt bereikt door impulsvormige spanningen aan de stator toe te voeren. Iedere puls in het aanvoersignaal wordt omgezet in een stap van de motor. Door aanpassingen in het aanvoersignaal kan de beweging van een stappenmotor geoptimaliseerd worden. Dit wordt ook wel micro stepping genoemd. Dit houdt in dat het aantal pulsen in het signaal wordt verhoogd, zodat de motor meer, kleinere stappen zet. Door het aanpassen van de

stapgrootte kan de resolutie van een stappenmotor aanzienlijk worden verhoogd, maar dit heeft een negatief effect op het koppel dat de motor kan leveren. Dit kan afnemen met wel 30% (Dawson, z.j.).

De beweging van de stappenmotor wordt door de controller aangestuurd in een aantal stappen. Daarbij gaat het systeem ervan uit dat iedere stap de gewenste verplaatsing tot gevolg heeft en dat na het uitvoeren van alle stappen de gewenste eindpositie is bereikt. Een probleem van deze manier van aansturen is dat het tot fouten in de beweging kan leiden wanneer de motor een stap overslaat door bijvoorbeeld een te hoge belasting. Een ander nadeel van de stappenmotor is dat de torque curve dramatisch afneemt bij een hogere snelheid. Dat betekent dat de motor minder kracht kan leveren bij een hoog toerental en daarom een hoog risico op een onnauwkeurige beweging. Het voordeel van stappenmotoren is het relatief hoog koppel dat ze kunnen leveren op een veilige 48V gelijkstroom. Daarnaast is de motor in staat om koppel te leveren zonder hoeksnelheid waardoor dit type motor geschikt is om een constructie stabiel te ondersteunen in stilstand.

Vergelijking servomotor en stappenmotor

In de voorgaande paragrafen zijn de algemene eigenschappen van een servomotor en stappenmotor besproken. Om te bepalen welk van deze typen motoren het meest geschikt is om toepast te worden op een robotarm worden de eigenschappen geëvalueerd aan de hand van de eigenschappen en gewenste functionaliteit van een gearticuleerde robot.

Tabel 4.1: Voor- en nadelen servomotor en stappenmotor.

motor	voordelen	nadelen
servomotor	Positie feedback Nauwkeurige positionering Kan koppel leveren zonder snelheid Vloeiende beweging	Duur vanwege complexere aansturing
stappenmotor	Kan koppel leveren zonder snelheid Relatief hoog koppel ten opzichte van benodigde spanning Goedkoop	Schokkerige beweging Geen positie feedback Hoog risico op onnauwkeurigheid Sterk negatief verband tussen koppel en toerental

Een stappenmotor is niet geschikt vanwege de stapsgewijze beweging in combinatie met de constructie van een robotarm. Zoals in paragraaf 1.1 besproken is, heeft een onnauwkeurigheid van de gewrichten in een seriële schakeling een cumulatieve werking op de eind-effector. Dat geldt ook voor de resonantie die het gevolg is van de discrete stappen in de beweging van de stappenmotor. Een robotarm moet niet alleen stabiel bewegen, maar ook stabiel zijn in stilstand. Hoewel beiden motoren als standrem kunnen fungeren, is een stappenmotor een betere keuze voor een systeem dat stabiel moet zijn in stilstand. Een servomotor kan wel koppel leveren vanuit stilstand, maar heeft dan meer last van resonantie (Dawson, z.j.).

Een stappenmotor en een servomotor van ongeveer dezelfde grootte hebben een vergelijkbaar nominaal koppel. Een stappenmotor kan weinig koppel leveren bij lage en hoge toerentallen

waardoor dit type motor niet geschikt is voor verticale toepassingen waarbij een belasting stabiel moet worden gehouden. Een voordeel van een servomotor is dat het koppel van de motor te regelen is. Dat betekent dat er heel precies een kracht uitgeoefend kan worden waardoor de beweging nauwkeurig te sturen is. Stappenmotoren leveren van zichzelf altijd het volledig koppel. Bij zowel stappenmotoren als servomotoren geldt dat hoe hoger de stroom, hoe hoger het koppel.

Bijlage E

Modelparameters motorkeuze

Tabel 4.3: Modelparameters voor het berekenen van het motorkoppel voor de motorkeuze.

symbool	betekenis	waarde	eenheid
m_{AB}	massa schakel AB	0,30	kg
m_B	massa gewricht B	0,05	kg
m_{BC}	massa schakel BC	0,30	kg
m_C	massa gewricht C	0,16	kg
m_{CD}	massa schakel CD	0,40	kg
m_D	massa gewricht D	0,11	kg
m_{DE}	massa schakel DE	0,40	kg
m_E	massa gewricht E	0,06	kg
m_{EF}	massa schakel EF	0,15	kg
m_{Py}	massa belasting P_y	0,25	kg
m_{Pz}	massa belasting P_z	0,15	kg
L_{AB}	lengte schakel AB	0,10	m
L_{BC}	lengte schakel BC	0,08	m
L_{CD}	lengte schakel CD	0,25	m
L_{DE}	lengte schakel DE	0,25	m
L_{EF}	lengte schakel EF	0,05	m
r_{BC}	straal schakel BC	0,05	m
r_C	straal gewricht C	0,05	m
r_{CD}	straal schakel CD	0,05	m
r_D	straal gewricht D	0,04	m
r_{DE}	straal schakel DE	0,04	m
r_E	straal gewricht E	0,02	m
r_{EF}	straal schakel EF	0,02	m
α_B	hoekversnelling punt B	50	deg/s ²
α_C	hoekversnelling punt C	50	deg/s ²
α_D	hoekversnelling punt D	50	deg/s ²
α_E	hoekversnelling punt E	50	deg/s ²
η_B	efficiëntie motor B	100	%
η_C	efficiëntie motor C	100	%
η_D	efficiëntie motor D	100	%
η_E	efficiëntie motor E	100	%
q	veiligheidsfactor	1	-

Bijlage F

Tandwieloverbrenging servomotor

De mogelijkheid voor het toepassen van een overbrenging wordt onderzocht voor het gewricht waar het hoogste koppel geleverd moet worden. Uit tabel 4.2 blijkt dat dit gewricht C is en dat daar een koppel van $49,2 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ geleverd moet worden. De servo die bij deze analyse als uitgangspunt wordt genomen om de overbrenging op toe te passen is de Savöx SA-1230SG. Dit is een betaalbare servo die een voldoende koppel levert ($36 \text{ kg} \cdot \text{cm}$) om met een overbrengingsverhouding van ongeveer $2/3$ het benodigde koppel te leveren met een voldoende veiligheidsfactor. Omdat de overbrengingsverhouding (i) kleiner is dan 8 wordt een overbrenging toegepast met een enkel tandwielpaar (Muhs, Wittel, Becker, & Jannasch, 2002).

Voor de overbrenging worden uitwendige cilindrische tandwielen gebruikt. Hieraan is een aantal definities gerelateerd dat van belang is voor het uitvoeren van berekeningen aan de overbrenging. Deze definities worden weergegeven door tabel 4.4.

Tabel 4.4: Definities van een uitwendig cilindrisch tandwiel.

grootheid	symbool
diameter steekcirkel	d
modulus	m
steek	p
aantal tanden	z
tandbreedte	b
diameter-breedteverhouding	γ_d
modulus-breedteverhouding	γ_d

De informatie die van tandwielen beschikbaar is, bevat vaak maar een deel van de definities uit tabel 4.4. Er kan dan gebruik gemaakt worden van formule 4.1 om ontbrekende gegevens te berekenen.

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z} \quad (4.1)$$

De selectie van de tandwielen voor de overbrenging wordt gedaan aan de hand van een aantal richtlijnen die zijn opgesteld op basis van ervaring binnen de machinebouw (Muhs et al., 2002). In tabel 4.5 zijn deze richtlijnen weergegeven met bijbehorende specificatie.

Tabel 4.5: Richtlijnen voor de selectie van tandwielen.

richtlijn	specificatie
Tandwielen die op elkaar ingrijpen moeten dezelfde modulus hebben	
De twee tandwielen hebben geen gemeenschappelijke deler om slijtage te voorkomen	$z_1 = \text{priemgetal}$ $z_2 = \text{even aantal}$
Kies z_1 zo groot mogelijk voor rustig lopende tandwielparen	$z_1 > 14$
De tandbreedte van het rondsel (b_1) is vaak groter dan de tandbreedte van de volger (b_2)	$b_1 > b_2$
De tandbreedte wordt zo groot mogelijk gekozen voor een lage belasting van de tanden	$b_1 = d_1 \cdot \gamma_d$ $b_2 = m \cdot \gamma_m$

Voor de tandwieloverbrenging is een speciaal soort tandwiel nodig voor het rondsel, omdat deze op de servospline bevestigd moet worden. Afhankelijk van het type servo heeft de servospline een verschillend aantal tanden en dus specifieke tandwielen. De Savöx SA-1230SG heeft net als Futaba motoren een spline met 25 tanden. Tabel 4.6 geeft een overzicht van verkrijgbare tandwielen die bevestigd kunnen worden op de Savöx SA-1230SG. Dit overzicht is gebaseerd op het aanbod van de webwinkel van ServoCity. Al deze tandwielen hebben een nominale drukhoek van 20° .

Tabel 4.6: Geschikte rondsels voor de Savöx SA-1230SG servomotor.

onderdeelnummer	z	d (mm)	b (mm)	m
RSA48-FMG-15	15	8,0	6,4	0,5
615298	16	12,7	6,4	0,8
RSA48-FMG-20	20	10,6	6,4	0,5
615302	20	15,9	6,4	0,8
RSA48-FMG-24	24	12,7	6,4	0,5
RSA48-FMG-30	30	15,9	6,4	0,5
RSA48-FMG-36	36	19,1	6,4	0,5

Vervolgens wordt er gekeken naar mogelijke tandwielen voor het wiel. Zo worden er in tabel 4.7 vier opties samengesteld voor de overbrenging. Van iedere optie worden onder andere het koppel van het wiel (T_{wiel}) en het rotatiebereik van het wiel (θ_{wiel}) berekend. Daarbij wordt gebruik gemaakt van formule 4.2. Over het rotatiebereik van de servo zijn geen gegevens bekend, dus wordt voor deze berekening aangenomen dat de servomotor een bereik heeft van 180° .

$$i = \frac{T_{\text{wiel}}}{T_{\text{rondsel}}} = \frac{z_{\text{wiel}}}{z_{\text{rondsel}}} = \frac{\theta_{\text{wiel}}}{\theta_{\text{rondsel}}} \quad (4.2)$$

Tabel 4.7: Mogelijke overbrengingen Savöx SA-1230SG.

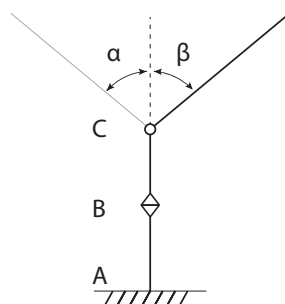
optie	i	T_{wiel} (kg · cm)	$z_{rondsel}$	z_{wiel}	m	θ_{wiel} (°)
1	9/5	57,6	24	45	0,5	100
2	8/5	52,2	24	40	0,5	112,5
3	7/4	56	20	35	0,5	102,9
4	3/2	48	20	30	0,5	120

Optie 1 uit tabel 4.7 lijkt de beste keuze voor de overbrenging. Het aantal tanden van het rondsel en het wiel hebben geen gelijke deler, dus de kans op slijtage is kleiner. Daarnaast zorgt de overbrengingsverhouding voor een voldoende groot koppel. Het vervolg van deze analyse wordt gebaseerd op deze overbrenging.

Herberekening van de benodigde koppelkracht in gewricht C

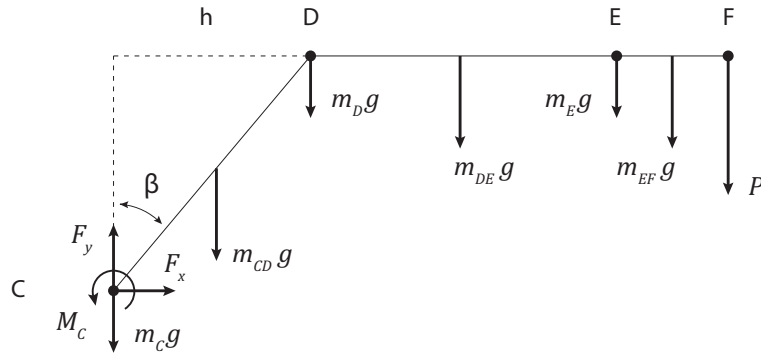
Een gevolg van de toepassing van een overbrenging is dat een hoger koppel kan worden gerealiseerd, maar zoals wordt geïllustreerd door formule 4.2 is het rotatiebereik van de overbrenging omgekeerd evenredig met het krachtkoppel. Bij een overbrengingsverhouding van 9/5 kan gewricht C nog maar roteren over een bereik van 100° (tabel 4.7). Met deze beperkte rotatievrijheid kan het bereik van gewricht C zodanig worden gekozen dat niet de kinematische nulpositie kan worden bereikt waarvoor de momentkracht in punt C maximaal is. Dat resulteert in een lager maximaal moment in gewricht C, waardoor er een lager koppel nodig is voor de vereiste functionaliteit. Om te onderzoeken hoe het benodigd koppel verminderd kan worden door de juiste keuze van het bereik van gewricht C wordt een model opgesteld van deze situatie. Op basis van dit model wordt de momentkracht in gewricht C herberekend.

Figuur 4.5 illustreert het rotatiebereik van gewricht C waarmee de maximale momentkracht om punt C zo veel mogelijk wordt beperkt. Het totale bereik (θ_{wiel}) is gelijk aan $\alpha + \beta$. Het bereik is zodanig gepositioneerd dat deze evenredig is verdeeld rond de rotatie as van gewricht B die wordt weergegeven door een stippellijn. In dit geval geldt dat $\alpha = \beta = 0,5 \cdot \theta_{wiel}$.



Figuur 4.5: Bereik gewricht C.

Het maximale moment dat met het bereik uit figuur 4.5 optreedt, is in de uiterste stand van het gewricht. Van deze configuratie is de vrije lichaam structuur weergegeven in figuur 4.6. Door een kleiner bereik kan schakel CD niet horizontaal gepositioneerd worden waardoor de momentarm en



Figuur 4.6: Vrije lichaam structuur van het maximale moment voor het bereik uit figuur 4.3.

dus ook het maximale moment kleiner is. De exacte waarde voor het maximale moment voor deze situatie wordt gegeven door formule 4.3.

$$\begin{aligned}
 M_C = & \frac{1}{2} m_{CD} g L_{CD} \cdot \sin \beta + m_D g L_{CD} \cdot \sin \beta + m_{DE} g \left(L_{CD} \cdot \sin \beta + \frac{1}{2} L_{DE} \right) + m_E g \left(L_{CD} \cdot \sin \beta + L_{DE} \right) + \\
 & m_{EF} g \left(L_{CD} \cdot \sin \beta + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right) + m_P g \left(L_{CD} \cdot \sin \beta + L_{DE} + L_{EF} \right) + \alpha_C \left(\frac{1}{4} m_{CD} r_{CD}^2 + \frac{1}{3} m_{CD} L_{CD}^2 + \right. \\
 & \frac{2}{5} m_D r_D^2 + m_D L_{CD}^2 + \frac{1}{4} m_{DE} r_{DE}^2 + \frac{1}{12} m_{DE} L_{DE}^2 + m_{DE} \left(L_{CD} + \frac{1}{2} L_{DE} \right)^2 + \frac{2}{5} m_E r_E^2 + m_E \left(L_{CD} + L_{DE} \right)^2 + \\
 & \left. \frac{1}{4} m_{EF} r_{EF}^2 + \frac{1}{12} m_{EF} L_{EF}^2 + m_{EF} \left(L_{CD} + L_{DE} + \frac{1}{2} L_{EF} \right)^2 + m_P \left(L_{CD} + L_{DE} + L_{EF} \right)^2 \right) \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Formule 4.3 wordt ingevuld met de parameters uit tabel 4.3 in bijlage E. Tabel 4.8 geeft het resultaat van deze berekening voor een gegeven totaal rotatiebereik van 100°.

Tabel 4.8: Resultaat van de herberekening van M_c voor het bereik uit figuur 4.3.

M_c (kg · cm)	T_{wiel} (kg · cm)	β (°)	q
41,9	57,6	50	1,37

Op basis van de resultaten uit tabel 4.8 kan geconcludeerd worden dat er met de gekozen overbrenging in combinatie met de Savöx SA-1230SG een voldoende hoog koppel bereikt kan worden.

Nauwkeurigheid van de vertanding

Het tweede aspect dat onderzocht wordt is de onnauwkeurigheid die de overbrenging toevoegt aan de constructie. Daartoe wordt de flankspeling tussen de tandwielen berekend. Bij deze berekening wordt aangenomen dat er geen speling zit in de motor en dat de tandwielen exact nauwkeurig gepositioneerd kunnen worden.

Theoretisch is de tandbreedte op de steekcirkel gelijk aan de helft van de steek. In dit geval zou echter een ingrijping van beide tandwielen op de juiste hartafstand niet mogelijk zijn, omdat de tandwielen dan zouden klemmen. Daarom is er in de praktijk een zekere flankspeling nodig. Deze kan bepaald worden aan de hand van de nauwkeurigheidsgraad, de asafstand en de modulus.

De nauwkeurigheidsgraad wordt volgens de DIN normalisatie onderverdeeld in 12 klassen met ieder een eigen tolerantieveld uitgaande van een nominale drukhoek van 20° . Er kan een schatting worden gemaakt van de nauwkeurigheidsgraad op basis van het productieproces waarmee de tandwielen zijn vervaardigd. Er wordt aangenomen dat de tandwielen zijn gefreesd zonder warmtebehandeling en zo wordt gekozen voor een nauwkeurigheidsgraad van 8.

Op basis van de toepassing van de overbrenging een inschatting gemaakt worden van de nauwkeurigheidsgraad van de overbrenging (Stichting Verspanersforum, 2011). De toepassing valt in dit geval in drie categorieën: kleinere industriële overbrenging, periodiek werkende aandrijving en motorreductor. Deze drie categorieën hebben de nauwkeurigheidsklassen 7 en 8 gemeen. Er wordt voor gekozen om voor deze berekening de nauwkeurigheidsklasse van 8 toe te passen.

De hartafstand (a) van de tandwielen wordt gegeven door de volgende formule

$$a = \frac{z_1 \cdot m + z_2 \cdot m}{2} = \frac{24 \cdot 0,5 + 45 \cdot 0,5}{2} = 17,25 \text{ mm}$$

Met deze waarde kan bepaald worden dat het tolerantieveld voor een nauwkeurigheidsgraad van 8 gelijk is aan $\pm 13,5 \mu\text{m}$ (Bierens, Cornelis & Bourguignon, z.j.). Voor een vermindering van de hartafstand met $0,0135 \text{ mm}$ wordt de vermindering van de flankspeling gegeven door de volgende formule.

$$m \cdot 0,0135 \cdot \sin \cdot \alpha = 0,5 \cdot 0,0135 \cdot \sin \cdot 20 = 0,0023 \text{ mm}$$

Waarin

α = nominale drukhoek

De minimale flankspeling (j) bij een nauwkeurigheidsgraad van 8 wordt gegeven door de volgende formule.

$$j = 0,07 + 0,01 \left(\frac{a}{50} + m \right) = 0,07 + 0,01 \left(\frac{17,25}{50} + 0,5 \right) = 0,078 \text{ mm}$$

De maximale flankspeling is gelijk aan $j \cdot 1,5$. Het invullen van de waarde voor de minimale flankspeling in deze formule geeft een waarde van $0,118 \text{ mm}$ voor de maximale flankspeling. De ondermaat en bovenmaat van de tolerantie wordt verkregen door respectievelijk de minimale en maximale flankspeling te vermeerderen met $0,0023 \text{ mm}$. Dat resulteert in een tolerantie van $0,04 \text{ mm}$. Deze waarde voor de tolerantie staat gelijk aan de onnauwkeurigheid van de overbrenging.

Bijlage G

Voorstel motorkeuze budget

Tabel 4.3: Voorstel motorkeuze gericht op lage kosten.

gewricht	motoreigenschappen		Prijs (€)
B	Shenzhen XQ Power XQ-S4016D		31,80
	Gewicht	56 g	
	Afmetingen	40 * 20 * 39 mm	
	Aanvoerspanning 4,8 V		
	Snelheid	0,14 s/60°	
	Aanzetkoppel	15,5 kg·cm	
C	Shenzhen XQ Power XQ-5650D		88,07
	Gewicht	177,5 g	
	Afmetingen	60,1 * 30,1 * 59,7 mm	
	Aanvoerspanning 7,2 V		
	Snelheid	0,20 s/60°	
	Aanzetkoppel	48 kg·cm	
D	Shenzhen XQ-Power XQ-S4230D		49,61
	Gewicht	56 g	
	Afmetingen	40,2 * 20,1 * 38,8 mm	
	Aanvoerspanning 9,6 V		
	Snelheid	0,15 s/60°	
	Aanzetkoppel	24,5 kg·cm	
E	EMAX ES9258		11,30
	Gewicht	26,9 g	
	Afmetingen	35 * 14,9 * 30,1 mm	
	Aanvoerspanning 4,8 V (deze servo alleen met 4,8 V gebruiken)		
	Snelheid	0,05 s/60°	
	Aanzetkoppel	3,0 kg·cm	

Bijlage H

Voorstel motorkeuze kwaliteit

Tabel 4.4: Voorstel motorkeuze gericht op kwaliteit en betrouwbaarheid.

gewicht	motoreigenschappen		Prijs (€)
B	Savöx SA-1256TG		60,13
	Gewicht	52,4 g	
	Afmetingen	40,3 * 20,2 * 37,2 mm	
	Aanvoerspanning 4,8 V		
	Snelheid	0,18 s/60°	
	Aanzetkoppel	16,0 kg·cm	
C	Shenzhen XQ Power XQ-5650D		88,07
	Gewicht	177,5 g	
	Afmetingen	60,1 * 30,1 * 59,7 mm	
	Aanvoerspanning 7,2 V		
	Snelheid	0,20 s/60°	
	Aanzetkoppel	48 kg·cm	
D	Savöx SA-1230SG		81,50
	Gewicht	79 g	
	Afmetingen	40,3 * 20,2 * 45 mm	
	Aanvoerspanning 4,8 V		
	Snelheid	0,20 s/60°	
	Aanzetkoppel	30,0 kg·cm	
E	Savöx SH-0255MG		24,99
	Gewicht	15,8 g	
	Afmetingen	22,8 * 12 * 29,4 mm	
	Aanvoerspanning 4,8 V		
	Snelheid	0,16 s/60°	
	Aanzetkoppel	3,1 kg·cm	

Bijlage I

Overzicht schaalmodellen robotarm



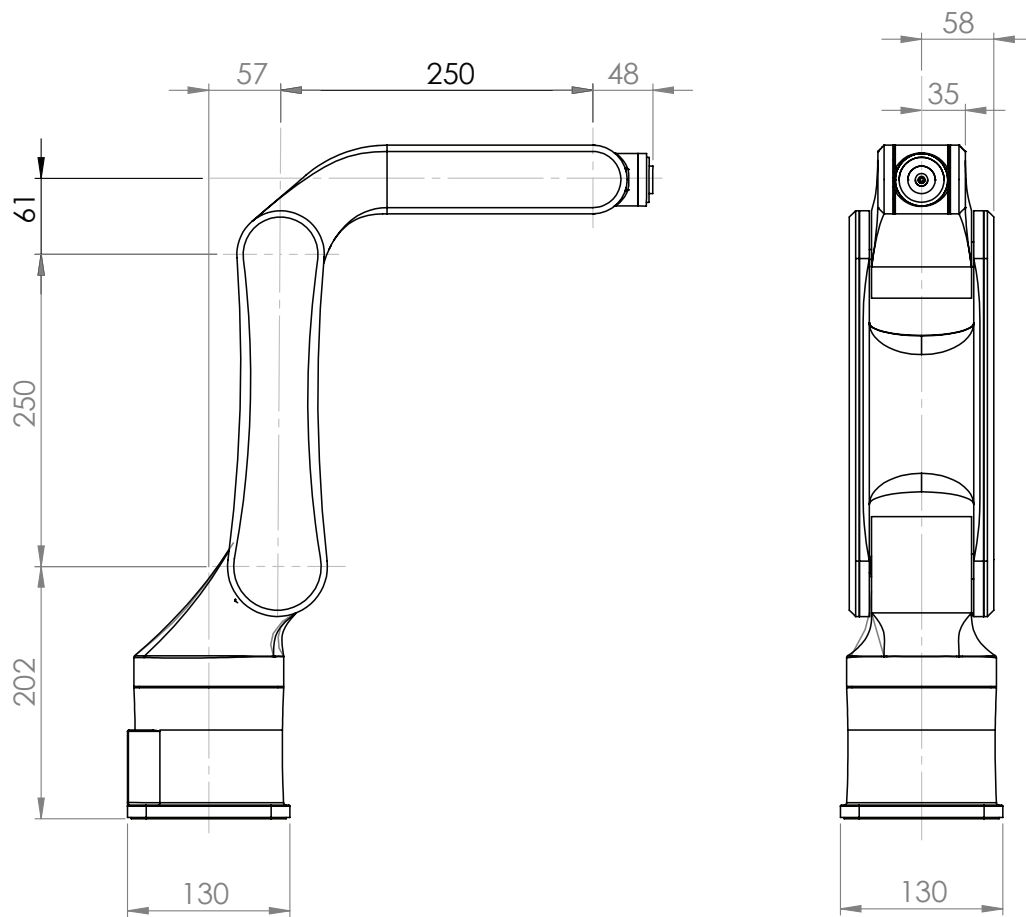
Figuur 7.1: Overzicht van bestaande schaalmodellen van een industriële robot.

Bijlage J

Parameters robotarm

Tabel 10.1: Parameters van het ontwerp van de robotarm.

symbool	betekenis	waarde	eenheid
m_{AB}	massa schakel AB	0,30	kg
m_B	massa gewricht B	0,056	kg
m_{BC}	massa schakel BC	0,18	kg
m_C	massa gewricht C	0,1775	kg
m_{CD}	massa schakel CD	0,45	kg
m_D	massa gewricht D	0,079	kg
m_{DE}	massa schakel DE	0,34	kg
m_E	massa gewricht E	0,0158	kg
m_{EF}	massa schakel EF	0,052	kg
L_{AB}	lengte schakel AB	0,11	m
L_{BC}	lengte schakel BC	0,092	m
L_{CD}	lengte schakel CD	0,25	m
L_{DE}	lengte schakel DE	0,25	m
L_{EF}	lengte schakel EF	0,048	m
r_{AB}	straal schakel AB	0,06	m
r_{BC}	straal schakel BC	0,06	m
r_C	straal gewricht C	0,04	m
r_{CD}	straal schakel CD	0,058	m
r_D	straal gewricht D	0,04	m
r_{DE}	straal schakel DE	0,035	m
r_E	straal gewricht E	0,022	m
r_{EF}	straal schakel EF	0,022	m

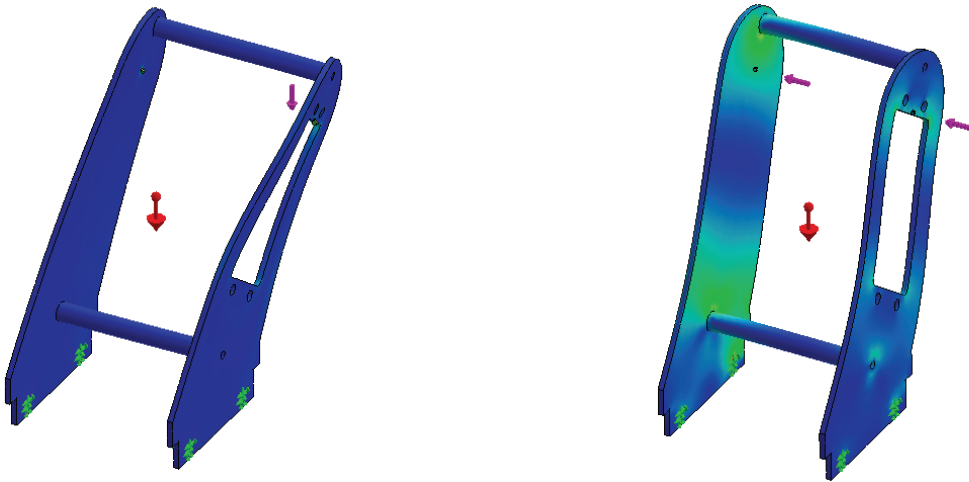


Bijlage K

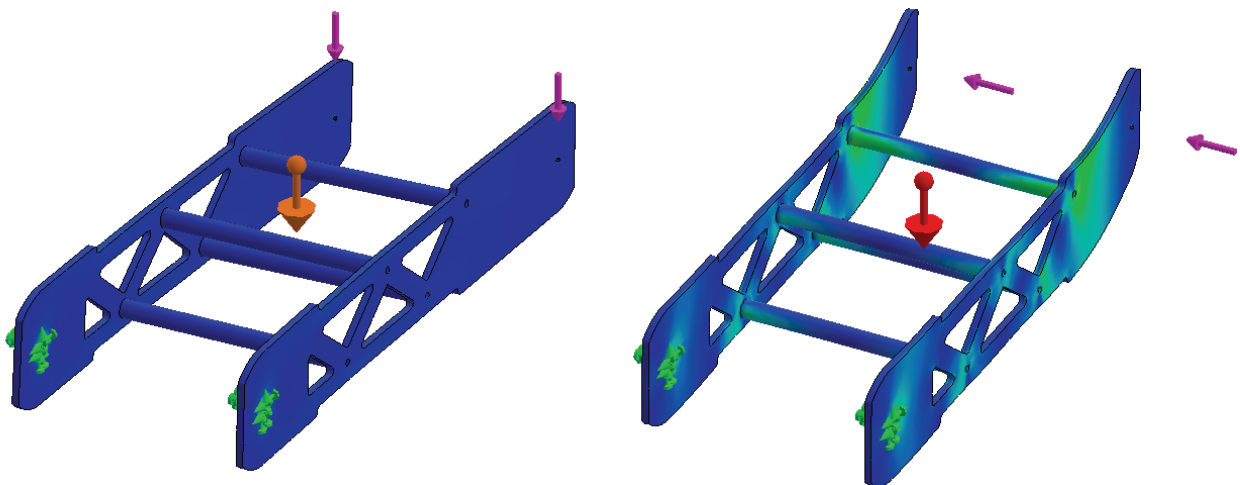
Spanningplots van de constructie

In deze bijlage worden de spanningplots van de constructie van de schakels weergegeven. De linker kolom bevat de plots voor de belasting in y-richting en de rechter kolom bevat de plots voor de belasting in z-richting.

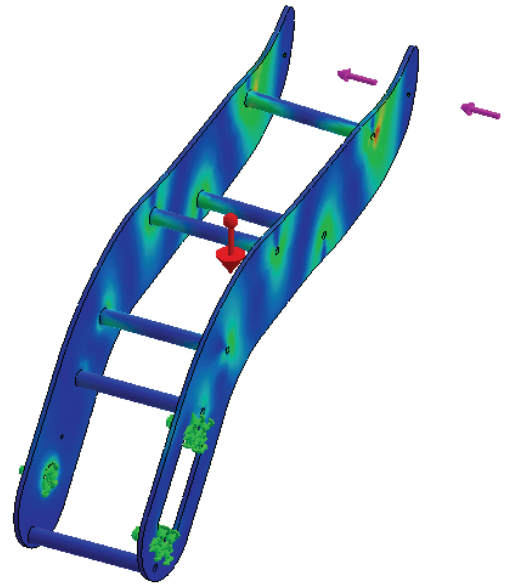
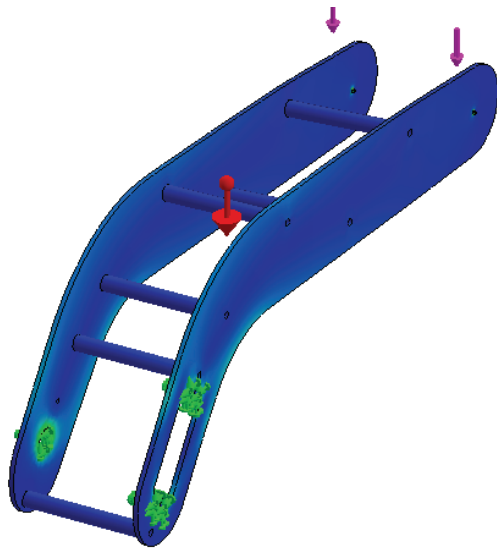
Schakel BC



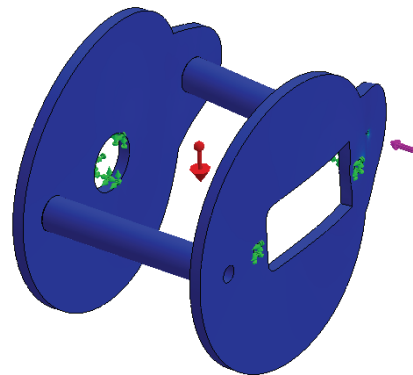
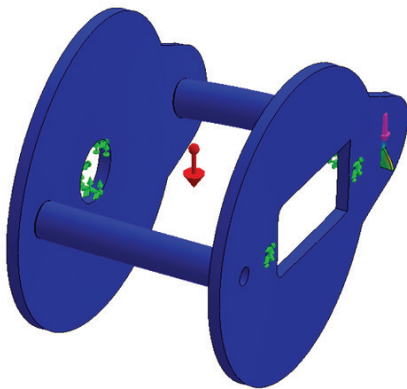
Schakel CD



Schakel DE



Schakel EF



Bijlage L

Overzicht gearticuleerde robots inclusief eindontwerp



Referenties

- 3 2 1 Kinematic Structure. (z.j.). Verkregen op 5 mei 2013 via <http://web.archive.org/web/20100106074814/http://www.roble.info/robotics/serial/html/SerialRobots-1se4.html>
- Ahmed, F.F., & Alyaa, H.A. (2011). Design Optimization of Serial Robot Manipulators. Journal of Engineering. 17. 558-576.
- All On Robots. (2013). Spherical robots. Verkregen op 27 april 2013 via <http://www.allonrobots.com/spherical-robots.html>
- ART CNC Machines. (2009, 4 januari). Stepper or Servo [video bestand]. Verkregen op 11 juni 2013 via <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=oOvRf7xa5r4&feature=fvwp>
- Asynchrone Draaistroommotor. (2013). Verkregen op 6 juni 2013 via https://nl.wikipedia.org/wiki/Asynchrone_draaistroommotor
- Bierens, H., Cornelis, F., & Bourguignon, P. (z.j.). Uitvoering en Nauwkeurigheidsgraad van Vertandingen. Verkregen op 3 juli 2013 via <http://www.tandwiel.info/kennisbank/uitvoering-en-nauwkeurigheidsgraad-van-vertandingen>
- Classical mechanics. (2013). Verkregen op 5 mei 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Classical_mechanics
- Dawson, N. (z.j.). 10 tips for servos and steppers. Festo. Verkregen op 16 mei 2013 via http://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/10257/Festo_10_Tips_servos_steppers.pdf
- De Opbouw van het Bewegingsapparaat. (2011). Verkregen op 9 mei 2013 via <http://assortiment.bsl.nl/files/f660ab09-17ea-43f2-b8b1-86e727f20ec3/9789031387267proefhoofdstuk.pdf>
- Delta Robot. (2013). Verkregen op 30 april via http://en.wikipedia.org/wiki/Delta_robot
- Dentler, D. R., (2008). Design, Control and Implementation of a Three Link Articulated Robot Arm. Verkregen op 7 juni 2013 via <http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/Dentler%20Donald%20Richard%20II.pdf?akron1217208877>
- digitalPimple. (2012, 24 mei). Stepper Motor Basics and Control – How It Works [video bestand]. Verkregen op 12 juni 2013 via <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=bngx2dKl5jU&feature=fvwp>
- Draaistroommotor. (2013). Verkregen op 5 juni 2013 via <http://nl.wikipedia.org/wiki/Draaistroommotor>
- Draaiveld. (2013). Verkregen op 3 juni 2013 via <http://nl.wikipedia.org/wiki/Draaiveld>
- Driefasige Asynchrone Motor. (2013). Verkregen op 5 juni 2013 via http://nl.wikipedia.org/wiki/Driefasige_asynchrone_motor
- Electric Motor. (2013). Verkregen op 3 juni 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor
- Electrical Engineering. (z.j.). Electrical Motor | Types Classification and History of Motor. Verkregen op 30 augustus 2013 via <http://www.electrical4u.com/electrical-motor-types-classification-and-history-of-motor/>
- Eriks Aandrijftechniek. (2013). Verkregen op 25 mei 2013 via http://www.elmeq.nl/theorie/elektromotoren-theorie#synchrone_stappenmotor
- Eriks Aandrijftechniek. (2013). Stappenmotoren. Verkregen op 11 juni 2013 via <http://www.elmeq.nl/types/stappenmotoren-19.html>

Forward Kinematics. (2005). Verkregen op 2 juni 2013 via <http://www.usna.edu/Users/cs/crabbe/SI475/current/arm-kin/kinematics.pdf>

Forward Kinematics: The Denavit-Hartenberg Convention. (z.j.). Verkregen op 28 augustus 2013 via <http://www.cs.duke.edu/brd/Teaching/Bio/asmb/current/Papers/chap3-forward-kinematics.pdf>

Gelijkstroommotor. (2013). Verkregen op 3 juni 2013 via <http://nl.wikipedia.org/wiki/Gelijkstroommotor>

Hibbeler, R. C. (2007). Engineering Mechanics: Dynamics (11de ed.). Singapore: Pearson Education

Hibbeler, R.C. (2008). Mechanics of Materials (7de ed.). Singapore: Pearson Education

Hollerbach, J. M. (2004). Forward Kinematics for Position

International Federation of Robotics. (z.j.). Industrial robots. Verkregen op 28 april 2013 via <http://www.ifr.org/industrial-robots/>

Jazar, R.N. (2010). Theory of Applied Robotics. New York, NY: Springer.

Kinematics. (2013). Verkregen op 5 mei 2013 via <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinematics>

Kinematic Chain. (2013). Verkregen op 9 mei 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Kinematic_chain

Kucuk, S., & Bingul, Z. (2006). Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics. Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. Sam Cubero. InTech.

Machine Design. (2013). Verkregen op 2 september 2013 via http://www.electricmotors.machinedesign.com/guiEdits/Content/bdeee4a/bdeee4a_1.aspx

Mason, M. (z.j.). Mechanics of Manipulation: Kinematic Models of Contact. Verkregen op 12 mei 2013 via <http://www.cs.rpi.edu/~trink/Courses/RobotManipulation/lectures/lecture11.pdf>

McCarthy, M., & Soh, G. S. (2010). Geometric Design of Linkages. New York, NY: Springer.

Miller, J. (2010). Brushless Motors vs Brush Motors, what's the difference?. Verkregen op 24 juli 2013 via <http://quantumdevices.wordpress.com/2010/08/27/brushless-motors-vs-brush-motors-whats-the-difference/>

Mohammed, F. M. (2011). Digital Machine and Robotics. University of Technology

Muhs, D., Wittel, H., Becker, M., Jannasch, D. (2002). Roloff/Matek Machineonderdelen (3de ed.). Schoonhoven: Academic Service.

Nave, R. (z.j.). Moment of Inertia: Cylinder. Verkregen op 12 mei 2013 via <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/icyl.html#icyl>

Nave, R. (z.j.). Parallel Axis Theorem. Verkregen op 17 mei 2013 via <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/parax.html>

Parallel Manipulator. (2013). Verkregen op 23 april 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_manipulator

Pieper, D.L. (1968). The kinematics of manipulators under computer control. Stanford University. Department of Mechanical Engineering

Robot Kinematics. (2013). Verkregen op 28 april 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Robot_kinematics

Robot Types. (z.j.). Verkregen op 5 juni 2013 via <http://courseweb.stthomas.edu/tpsturm/private/notes/qm380/robotype.html>

Robotshop. (2013). Robot Arm Torque Tutorial. Verkregen op 2 mei 2013 via <http://www.robotshop.com/robot-arm-torque-tutorial.html>

Serial Manipulator. (2013). Verkregen op 23 april 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_manipulator

Servomotor. (2013). Verkregen op 3 juni 2013 via <http://en.wikipedia.org/wiki/Servomotor>

SmartBot. (2013). SInBot. Verkregen op 26 augustus 2013 via <http://www.smartbot.eu/nl/projectinformatie/sinbot/>

Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2005). Forward and Inverse Kinematics. Robot Modeling and Control. New York, NY: John Wiley & Sons.

Stanford University. (2008, 22 juli). Lecture 2 | Introduction to Robotics [video bestand]. Verkregen op 16 april 2013 via <http://youtu.be/QKyDrUonp98>

Stelling van Steiner. (2013). Verkregen op 21 mei 2013 via http://nl.wikipedia.org/wiki/Stelling_van_Steiner

Stepper Motor. (2013). Verkregen op 12 juni 2013 via http://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor

Stichting Verspanersforum (2011). Vertanden. Verkregen op 1 juli 2013 via http://www.verspanersforum.nl/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=69

Synchrone Draaistroommotor. (2013). Verkregen op 6 juni 2013 via https://nl.wikipedia.org/wiki/Synchrone_draaistroommotor

Union College Mechanical Engineering. (z.j.). Dynamics and Kinematics (of Mechanisms) . Verkregen op 12 mei 2013 via <http://www.engineering.union.edu/~tchakoa/mer312/Lectures/Lecture%202.pdf>

Afbeeldingen

Figuur 1.1 http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/cartesian-robot-for-fast-cycle-time-78484-2943197.jpg

Figuur 1.2 <http://www.industrial-electricity.com/images/14-2.jpg>

Figuur 1.3 http://preview.turbosquid.com/Preview/2010/12/02_12_12_00/polar01.jpgb43e7ba3-c322-49f1-b928-9ebca3c90c64Larger.jpg

Figuur 1.4 http://www.mikrokontrol.co.rs/slike_proizvoda/velike/adm344.jpg

Figuur 1.5 http://www.kuka.com/NR/rdonlyres/2C233B0D-8E20-47F6-B199-1F9545C90753/0/PR_KUKA_Industrial_Robot_KR360_01.jpg

Figuur 1.6 http://kvarc.extra.hu/step/motor/emc/delta_robot.jpg

Figuur 2.1 img.directindustry.com/images_di/photo-g/6-axis-articulated-robot-15481-3082345.jpg
<http://www.robotsdotcom.com/f5ts.jpg>

Figuur 2.2 <http://www.designworldonline.com/uploads/Imagegallery/adept-clean-room-robotics.jpg>
<http://ih.constantcontact.com/fs126/1103431943912/img/314.jpg?a=1111292339292>
http://www.onexia.com/img/Denso-V6_Clean.png
http://www.pv-tech.org/images/sized/assets/images/DENSO_New_VS-Series_Robot_550-0x600.jpg
<http://www.densorobot.co.uk/images/295/1/VP6242-Lightbox.jpg>
<http://www.robotsdotcom.com/f5ts.jpg>
http://www.designworldonline.com/uploads/ImageGallery/EPSON_C3_6-Axis_robot.jpg

	http://blog.cgco.com/wp-content/uploads/2010/07/RV-2SD_Robot_Image.jpg
Figuur 3.18	http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/6-axis-articulated-robot-18836-4049208.jpg
Tabel 4.3	http://www.modellismo.it/prodotti/radiosistemi/XQ-S4016D_2.jpg http://www.xq-power.com/UploadFiles/2012116175514942.jpg http://www.the-border.com/images/P/001-182.jpg http://www.vdv-modellbau.com/media/image/thumbnail/sh-0255mg_geschlossen_1000_720x600.jpg
Figuur 7.1	http://i00.i.aliimg.com/wsphoto/v0/1224047606_1/Free-Shipping--New-6-DOF-Programmable-Clamp-font-b-Robot-b-font-font-b-Arm.jpg http://preview.turbosquid.com/Preview/2010/12/08_15_36_00/armbot.jpg6c16deb8-4ddf-497b-b9b1-03dee9ec5fc9Larger.jpg http://users.ece.gatech.edu/~fumin/images/Lynx6.JPG http://tlogan5491.files.wordpress.com/2013/06/sg6_foldeda.jpg http://www.crustcrawler.com/products/AX-18F%20Smart%20Robotic%20Arm/images/Side_View1.jpg www.robotshop.com/content/images/lynxmotion-al5df-kt-robotic-arm-flowbotics-studio-1-large.jpg