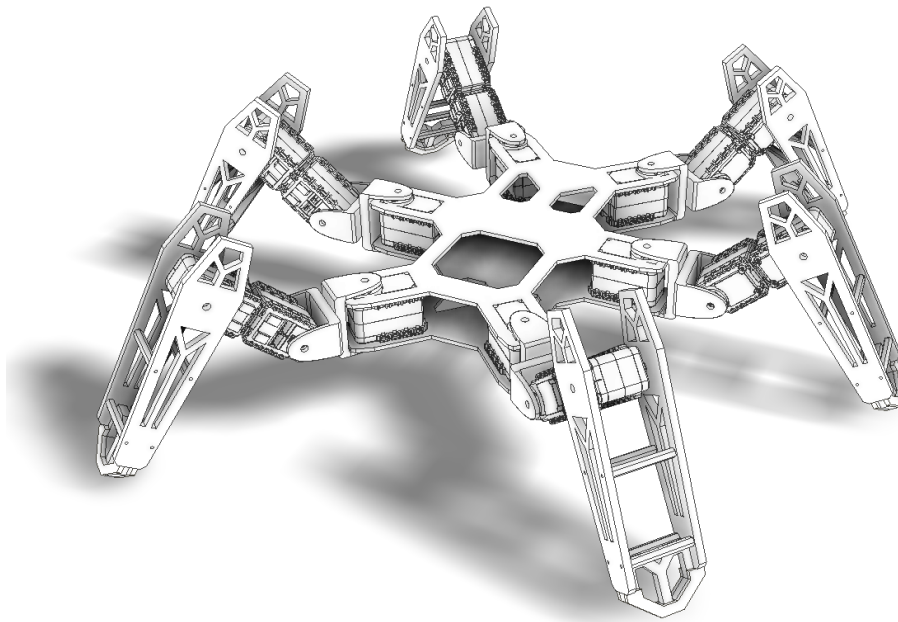


## Robotica: Hexapod

I. van Alphen, S. van Doesburg, E. Salsbach, M. Visser



# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Opdrachtdefinitie</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Onderzoeks opzet</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Specificaties</b>	<b>6</b>
5.1	Noodzakelijke specificaties . . . . .	6
5.2	Gewenste specificaties . . . . .	6
5.3	Testplan . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Ontwerp</b>	<b>8</b>
6.1	Het ontwerpen in Inventor . . . . .	9
6.2	De simulatieomgeving . . . . .	10
6.2.1	Importeren . . . . .	10
6.2.2	Gewrichten . . . . .	10
6.2.3	Convex en Mask . . . . .	10
6.2.4	Dummies . . . . .	11
6.2.5	Scene hierarchy . . . . .	11
6.2.6	physics engine . . . . .	12
6.2.7	Inverse Kinematics . . . . .	12
6.3	Hardware . . . . .	13
6.3.1	XBee USB module . . . . .	13
6.4	Controller board . . . . .	13
6.5	Software . . . . .	14
6.5.1	Lopen . . . . .	14
6.5.2	Informatieverwerker . . . . .	15
6.5.3	Aansturen servomotoren . . . . .	17
6.5.4	Communicatieprotocol . . . . .	21
<b>7</b>	<b>Discussie en resultaten</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>25</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografie</b>	<b>26</b>

# 1 Samenvatting

In dit raamwerk is er onderzoek gedaan naar hoe een simulatieomgeving opgezet kan worden die gekoppeld is aan een fysieke robot. Er zijn meerdere programma's ontwikkeld en er is een simulatie gemaakt van de fysieke robot. Een aantal tegenslagen op het gebied van de simulatie en hardware heeft het onderzoek vertraagd waardoor een aantal additionele specificaties niet behaald konden worden. Uiteindelijk is er een platform ontwikkeld wat een verbinding maakt tussen een fysieke robot en een simulatie model met dezelfde eigenschappen.

## 2 Inleiding

Deze opdracht betreft het ontwikkelen van de besturing en simulatie van een hexapod robot.[1] De robot die gebruikt gaat worden is de PhantomX AX Hexapod van TrossenRobotics.

In de huidige situatie wordt een hexapod handmatig met een afstandbediening bestuurd en kent geen vorm van intelligentie. Ter voorbereiding op het werken met kunstmatige intelligentie, is er voor gekozen om een simulatiemodel van de robot te ontwikkelen. Om praktische informatie te verzamelen is er een koppeling nodig tussen het simulatie model en de hardware van de robot. Met behulp van deze koppeling kan er onderzoek gedaan worden naar bijvoorbeeld efficiënte looppatronen en zelf lerende functies. De focus van dit verslag ligt bij het beantwoorden van de volgende vraag: Hoe wordt een ontwikkelingsomgeving opgezet waarbij een robot aan een simulatie gekoppeld wordt?

Het verslag bestaat uit de volgende relevante hoofdstukken. In de Opdrachtdefinitie komen de probleemstelling en doelstelling aan de orde. In het theoretisch kader wordt er kort wat belangrijke voorkennis gepresenteerd. In het hoofdstuk Specificaties wordt er uitgebreid ingegaan op wat de belangrijkste targets van dit project, en zijn gerangschikt op basis van belang. In het hoofdstuk ontwerp is er een in-depth beschrijving over het model, de simulatieomgeving, de communicatie, het software en hardware. Vervolgens worden de resultaten gepresenteerd met een aantal aanmerkingen, tot slot zijn de conclusies en aanbevelingen te lezen aan het eind van het verslag.

### 3 Opdrachtdefinitie

De hexapod is momenteel alleen te besturen met behulp van een afstandbediening. De huidige besturingssoftware op de robot is niet in staat naast de afstandbediening om externe commando's te verwerken. Daarnaast kent het in de huidige toestand geen vorm van intelligentie. Zo heeft de robot momenteel geen besef van wat zich in zijn directe omgeving bevindt.

Als voorbereiding op het werken met kunstmatige intelligentie op de robot, is er voor gekozen om een simulatiemodel voor en van de robot te ontwikkelen. De redenen hiervoor zijn onder andere dat er in een model oneindig veel verschillende situaties voor de robot gecreeërd kunnen worden. Hiernaast is het simuleren van de hexapod sneller dan real-time testen en is er minder kans op schade van het materieel. Bovendien kan het vanuit financieel oogpunt in situaties nuttig zijn om niet met de echte hardware van de robot te werken. Door een real-time koppeling te maken tussen het simulatiemodel en de hardware van de robot is het mogelijk in staat om meer informatie te verzamelen om de intelligentie te verbeteren.

Het uiteindelijke doel is om in een simulatieomgeving de bewegingseigenschappen van de robot te optimaliseren om deze software vervolgens te testen op het echte model. Er moet dus onderzocht worden hoe een ontwikkelingsomgeving opgezet kan worden waarbij er een koppeling is tussen een simulatie en de robot zelf. Daarnaast moet de robot extern te besturen zijn met behulp van een computer. De robot en het simulatiemodel moeten de mogelijkheid hebben om de stand van de servomotoren real-time naar elkaar over te brengen. Om beschadiging te voorkomen moet het in staat kunnen zijn om fouten te detecteren. De onderlinge poten zouden niet met elkaar in contact moeten komen. Het onderzoeken van het gedrag van een hexapod is van belang om uiteindelijk de hexapod zelf lerende functies te geven.

## 4 Onderzoeks opzet

Het project bestaat uit twee delen. Het eerste deel heeft als doel de hexapod in de simulatie te verwerken. Het tweede deel is ervoor zorgen dat er een verbinding ontstaat tussen de simulatie en de hexapod. Vanwege de wensen van de opdrachtgever zal er gewerkt worden met het simulatie-programma V-REP en zullen andere softwarepakketten buiten beschouwing worden gelaten.

Daarnaast zal er in de eerste deel gekeken worden naar toepassingen die andere hebben bedacht voor de hexapod. Hieruit is inspiratie te halen voor handige en leuke toepassingen.

Om de verbinding te maken tussen robot en computer dienen er verschillende bronnen te worden geraadpleegd. Een groot deel van die bronnen zal worden voorzien door gebruik te maken van het internet. Verder zal kennis die in de les wordt opgedaan, worden toegepast en de boeken kunnen worden bekeken.

De hexapod is al fysiek aanwezig, wat het testen van geschreven code gemakkelijk maakt. Op deze manier wordt gelijk duidelijk of het geschreven programma functioneert. Tijdens het schrijven van de verschillende functies zal de hexapod fysiek aanwezig zijn om direct het resultaat te ondervinden.

## 5 Specificaties

Voor de specificaties van dit project, is het van belang een onderscheid te maken tussen functionaliteiten die noodzakelijk of gewenst zijn bij het ontwerp. De noodzakelijke functies moeten in ieder geval geïmplementeerd worden, terwijl het overige optioneel is, afhankelijk van de tijdrestrictie.

### 5.1 Noodzakelijke specificaties

Het primair doel van dit project is om een verbinding te creëren tussen een fysieke robot hexapod en een simulatiemodel. De verbinding tussen hexapod en de computer dient draadloos te zijn ten gunste van de bewegingsvrijheid van de robot. De datasnelheid van moet ook vastgesteld worden om de hexapod zo responsief mogelijk te maken. De hexapod moet aangestuurd kunnen worden door het simulatiemodel in het programma VREP. Veranderingen aan de stand van de poten moeten direct terug te zien zijn in het simulatiemodel. Het model moet in ieder geval bestaan uit een body en 6 ledematen. Ieder ledemaat moet onderverdeeld worden in drie hoofdcomponenten die gescheiden zijn door gewrichten en ook door middel van een gewricht zijn verbonden aan de body. Verder moeten de afmetingen en verhoudingen tot een halve centimeter nauwkeurigheid overeenkomen met de hexapod. Om te voorkomen dat de hexapod zichzelf kan beschadigen is het noodzakelijk dat de maximale bewegingsvrijheid van de gewrichten (per situatie) wordt uitgerekend of ingesteld. Zodat de poten onderling niet met elkaar botsen of dat de bekabeling beschadigd raakt.

### 5.2 Gewenste specificaties

Er zijn een veel mogelijkheden wat betreft additionele functies die geïmplementeerd kunnen worden. In deze subsectie zijn een aantal functionaliteiten opgesomd die mogelijk geïmplementeerd kunnen worden, maar die niet noodzakelijk zijn voor het uiteindelijke eindproduct.

- De hexapod is er zich van bewust als hij ondersteboven is geplaatst, en kan de stand van zijn poten daarop aanpassen. Wanneer de hexapod horizontaal gepositioneerd wordt, dan zorgt dit systeem er voor dat alle poten op of richting de ondergrond zijn geplaatst.
- Is in staat om zijn poten in- en uit te strekken, zodat het eenvoudig opgeborgen en opgezet kan worden.
- De spin kan muren en/of objecten detecteren en zijn looproute hier op aanpassen.
- Met een beperking aan een of meerdere poten is het in staat om het standaard looppatroon aan te passen.
- Kan zijn looppatroon aanpassen indien nodig, afhankelijk van het gewicht van de eventuele ballast.
- Eventuele functionaliteiten zoals aan/uit, stand van poten en bewegingen via de computer kunnen activeren bijvoorbeeld via een console.

### 5.3 Testplan

Om te kijken of de specificaties gehaald zijn wordt er als eerst gekeken naar de noodzakelijke specificaties. Deze specificaties zijn zo opgesteld dat deze in ieder geval haalbaar zijn. De haalbaarheid van de gewenste specificaties zijn lastig in te schatten omdat dit veelal buiten onze huidige kennis. Daarom kan het blijken dat een of meerdere specificaties te makkelijk of lastig zijn opgesteld naar mate het onderzoek vordert. In dat geval zal er samen met de begeleider gekeken worden of er een alternatieve specificatie mogelijk is. Of de resultaten wel of niet voldoen aan de eisen kan in veel gevallen objectief beoordeeld worden door te kijken naar de exacte eisen en de bijbehorende resultaten. Echter is dit bij enkele specificaties niet mogelijk en zal dit met logische redenering en duidelijke uitleg worden ondersteund. Dit betekent dat de resultaten goed gedocumenteerd worden zodat het bij de conclusie duidelijk is wanneer de specificaties gehaald zijn. Bij twijfel of een specificatie gehaald is zal dit met de begeleider besproken worden.

Het controleren van de noodzakelijke specificaties zal in het begin stadium voornamelijk bestaan uit het afzonderlijk testen van onderdelen. Zo kan de communicatie opgedeeld worden in communicatie tussen het simulatie model  $\rightarrow$  computerprogramma en het computerprogramma  $\rightarrow$  en de hexapod. Dit kan vanzelfsprekend ook met andere onderdelen van de specificaties. Het controleren van een aantal specificaties spreekt voor zich, daar hoeft geen testscenario voor opgesteld te worden.

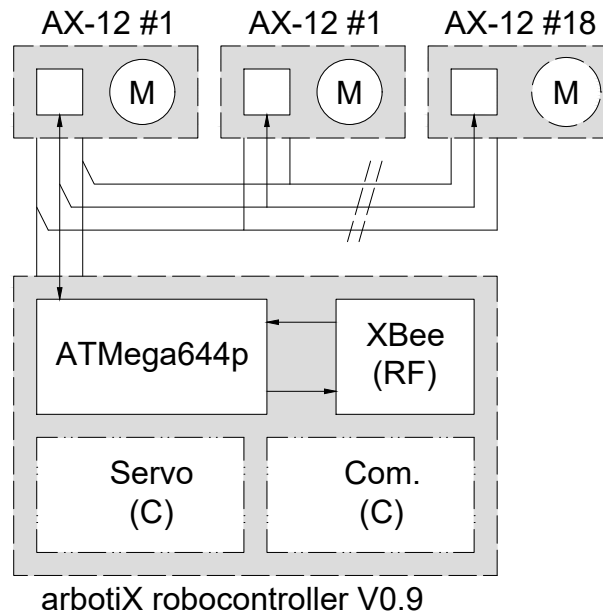
**”Met een beperking aan een of meerdere poten is het in staat om het standaard looppatroon aan te passen.”** Deze specificatie zou getest kunnen worden door één of meerdere poten te verwijderen of te deactiveren in het simulatiemodel.

**”Kan zijn looppatroon aanpassen indien nodig, afhankelijk van het gewicht van de eventuele ballast”** Door een test met verschillende gewichten van bijvoorbeeld 10, 50 en 100% van zijn draagvermogen of geen gewicht op de hexapod, kan gekeken worden naar veranderingen in het loopgedrag van de hexapod. Een vervolg actie zou zijn of er een optimale manier gevonden kan worden voor het verbeteren van het lopen onder druk. Daarnaast zou nog getest kunnen worden of de locatie van de ballast een zelfde soort invloed heeft op het loopgedrag.

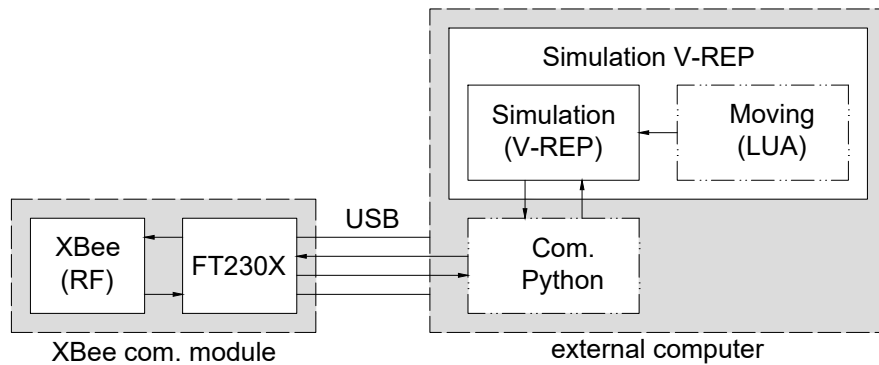


## 6 Ontwerp

Het ontwerp en de hexapod zijn onder te verdelen in verschillende delen: hard- en software. De hardware bestaat uit de hexapod en de hiervoor (zelf) ontwikkelde elektronica. Om de hardware te kunnen gebruiken zijn er ook verschillende programma's geschreven. Om een beeld van te krijgen van de samenhang van het ontwerp met hard- en software zijn er twee blokschema's gemaakt. Eén schema beperkt zich tot de hexapod en het andere schema tot de externe computer(s). In figuur 1 en 2 is deze informatie te vinden.



Figuur 1: Versimpelde weergave in een blokschema van de samenhang van de verschillende systemen en programma's op de hexapod.



Figuur 2: Versimpelde weergave in een blokschema van de samenhang van de verschillende systemen en programma's op de externe computer.

## 6.1 Het ontwerpen in Inventor

Het model van de hexapod bestaat uit verschillende componenten. De body bestaat uit twee platen, en elke poot is onder te verdelen in drie onderdelen. Bovendien hoort bij elk gewricht een motor, in totaal 18 motoren. Als eerste zijn de afmetingen van de hexapod zo exact mogelijk opgemeten. Er is maar één poot opgemeten, deze is in Inventor vijf maal gedupliceerd. Het programma Inventor geeft de mogelijkheid om met behulp van constraints het voorvlak van elk object te schetsen, en vervolgens uit te breiden tot een driedimensionaal object. Met behulp van constraints, is het mogelijk om alle objecten bij elkaar te voegen.

Het driedimensionale model van de robot is gemaakt in het programma Inventor. Dit programma is gekozen omdat dit al bekend is bij de projectleden en gratis te gebruiken voor studenten. Tevens kunnen Inventor bestanden gemakkelijk over worden gezet naar bestanden die leesbaar zijn voor de simulatie software (\*.STL).

Om de robot te reconstrueren in het tekenprogramma moet de robot gezien worden als losse onderdelen. Elk onderdeel moet apart opgemeten worden met alle hoeken en uitsparingen.

Het model is dan ontleedt tot losse solids (onderdeel bestaande uit een stuk) die samen te voegen zijn tot de uiteindelijke assembly (model opgebouwd uit meerdere onderdelen). De poten bestaan uit drie segmenten die worden verbonden door middel van een servomotor. De poten zijn bevestigd aan de main body.

## 6.2 De simulatieomgeving

### 6.2.1 Importeren

Om het inventor bestand te importeren naar V-rep, is het eerst nodig om het model om te zetten naar het STL bestandstype.

Het object wordt initieel in V-rep gezien als geheel object. Met 'divide selected shapes', is het mogelijk om objecten onder te verdelen in zo klein mogelijke stukken. Vervolgens worden die gegroepeerd tot de volgende hoofdonderdelen:

- Main body + Motor 3(6x)
- Connector(6x)
- Motor 1 + 2(6x)
- Leg(6x)

### 6.2.2 Gewrichten

Met behulp van gewrichten worden de 18 pootdelen en de main body met elkaar verbonden. Het is een vrij omslachtig proces om de gewrichten juist toe te voegen. Als allereerst, moet het betreffend hoofdobject geselecteerd worden. Deze wordt vervolgens gekopieërd en in een nieuwe scene geplaatst. In 'triangle edit mode', moet het onderdeel geselecteerd worden op de plek waar de joint uiteindelijk hoort te komen. Met 'invert selection', is het mogelijk om het ongewenste deel van het object te selecteren en te verwijderen. In het menu kan er met 'add → joint' een gewricht worden toegevoegd. In alle gevallen, wordt er gebruik gemaakt van de 'revolute joint'. Met de functie 'object/item position/orientation' is het mogelijk de joint op exact de zelfde positie als het overgebleven object-onderdeel te plaatsen. Daarbij moet eerst het gewricht geselecteerd worden, en daarna het overgebleven object. In de 'positions/translations' tab moeten de x, y en z coördinaten worden overgenomen. In de 'Orientation/Rotations' map hoort het gewricht zijn juiste oriëntatie te krijgen. Dit kan door aanpassen van de alpha, beta of gamma waarden. Dit verschilt uiteraard per poot, gezien elke poot een andere oriëntatie heeft. Als het gewricht eenmaal in de juiste positie is, kan die door middel van kopiëren en plakken weer in de originele scene geplaatst worden. De reden dat de 'triangle edit mode' niet gebruikt moet worden in de hoofdsceen, is omdat het een grafisch zware operatie is. Bij 'scene object properties' kan overigens de diameter en lengte attributen worden aangepast. Bovendien kunnen de gewrichten daar doorzichtig worden gemaakt.

### 6.2.3 Convex en Mask

Omdat V-REP veel berekeningen moet doen bij het simuleren van complexe objecten, is het niet gunstig om te gaan simuleren met de objecten die geïmporteerd zijn. Het is daarom ook nodig om de vorm van de objecten te vereenvoudigen. Dit kan met 'Morph selection into convex shapes', dat zorgt er uiteindelijk voor dat simulaties vele malen vloeier worden uitgevoerd. Om het uiterlijk van de spin te behouden, worden de geïmporteerde objecten gebruikt als mask. Om dit te bereiken, moet in het 'dynamic properties dialog' venster alles worden uitgevinkt. Dat zorgt ervoor dat het object niet met zijn omgeving reageert, en

dat het niet dynamisch gesimuleerd wordt. De convex shapes daarentegen, moeten wel dynamisch zijn en kunnen reageren met de omgeving. Deze instellingen zijn te bereiken via de 'scene object properties' via de knop 'Show Dynamic Properties Dialog'. Om objecten te kunnen laten reageren met de omgeving, kan gebruikt gemaakt worden van 'local mask' of 'global mask'. Local mask is van toepassing op objecten die onder het zelfde hoofdobject staan, terwijl global mask geldt voor de objecten in de hele scene, zoals andere objecten en de vloer. Of het object reageert of niet, hangt af van de geselecteerde blokjes. Als twee objecten maar ook een blokje gemeenschappelijk hebben(aan- of uitgevinkt), dan ontstaat er interactie tussen de objecten bij collisie. Om ervoor te zorgen dat alle aanliggende onderdelen elkaar niet proberen af te stoten, moeten die niet met elkaar kunnen reageren. Zo zijn er bij 'Leg 1' in de local mask de eerste 9 vakjes aangevinkt, terwijl slechtst het laatste vakje aangevinkt is bij 'Motor 1'. Verder moeten de afzonderlijke poten wel met elkaar kunnen reageren, omdat collisie tussen poten mogelijk moet zijn als dat niet voorkomen wordt. Alle convex shapes moeten 'dynamically enabled' zijn om ze te kunnen simuleren, wat ook gebeurd in de 'dynamic properties dialog'. Hier kan onder andere de massa en inertia ingesteld worden. De totale massa van de hexapod is ingesteld op 1.75kg, wat in lijn is met de werkelijkheid. Bovendien worden de convex shapes doorzichtig gemaakt, via 'scene object properties → common → visibility'

#### 6.2.4 Dummies

Voor de positiebepaling en het instellen van de doel coördinaten bij inverse kinematica wordt er gebruikt gemaakt van de zogeheten 'dummy-dummy link'. Hierbij worden er dummies bevestigd aan de tip van elke poot, de zogeheten tip dummies. De dummies worden op bijna de zelfde methode geplaatst op objecten als gewrichten. Bij dummies is het echter eenvoudiger om gelijk gebruik te maken van 'vertex edit mode', omdat je dan op de tip van de poot dummies kan plaatsen met de 'make dummies' knop. In dit specifiek geval, was het niet mogelijk om in het middelpunt een dummie toe te voegen, omdat daar geen vertice was. Dat probleem is opgelost door het toevoegen van dummies op de twee symmetrisch en nabijgelegen vertices. Daarna is een dummy geplaatst tussen deze twee dummies door het gemiddelde van de coördinaten te berekenen.

Naast de tip dummies worden er evenveel target dummies aangemaakt. Deze zitten initieel op exact de zelfde positie als de tip dummies. Kopieren en plakken van de tip dummies is de eenvoudigste manier om die aan te maken. Via het 'scene object properties dialog', kunnen de Tip Dummies gelinkt worden aan hun corresponderende Target Dummies. Wat belangrijk is voor het simuleren, is dat voor elk convex object de optie 'invers kinematics mode' aan staat.

#### 6.2.5 Scene hierarchy

Het is belangrijk om de scene hierarchy goed te ordenen, omdat dit bepaald hoe objecten bewegen ten opzichte van elkaar. Leidraad voor een juiste hierarchy, is dat het hoofdobject bovenaanstaat. De objecten en gewrichten waar die direct meegekoppeld zijn, komen direct daaronder te staan.

Er wordt eerst naar de convex shapes gekeken, omdat die relevant zijn voor het simuleren. De convex body staat dus bovenop, en daaronder komen de eerste zes gewrichten te staan. Onder elke joint komt de convex connector te

liggen. Onder iedere connector, zit de tweede joint, en onder die joints komen de links met de twee overige motoren. Als laatste komt de derde joint daaronder te staan, en de poot onder de derde joint. De dummies worden gebruikt voor de berekeningen. De tip dummies moeten de poten volgen, en moeten daarom direct onder de poten geplaatst worden. De target dummies worden onder het hoofdobject geplaatst. De mask moet visueel de convex shapes kunnen representeren, en moeten die kunnen volgen. Door de mask steeds onder zijn eigen convex object te plaatsen in de scene hierarchy, wordt dit effect bereikt.

#### **6.2.6 physics engine**

V-REP maakt gebruik van 4 verschillende physics engines. Dit zijn Bullet, ODE, Vortex en Newton. Van alle physics engines, bleek Bullet het soepelst te werken. Voor de simulaties is er gekozen om gebruik te maken van deze engine.

#### **6.2.7 Inverse Kinematics**

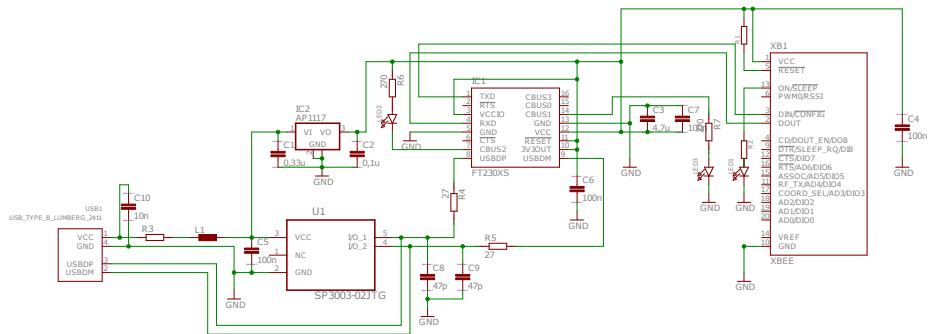
Om inverse kinematics te kunnen gebruiken, moet er nog een inverse kinematics groep worden aangemaakt. Dit gebeurt in de 'inverse kinematics' tab bij 'calculation modules'. In deze inverse kinematics groep worden enkel de tip dummies geplaatst en het daarbijhorend baseobject moet worden geselecteerd voor elke dummie, in dit geval de convex body.

## 6.3 Hardware

Aan het begin van het project is overwogen om de hardware, op de servomotoren na, te vervangen voor zelf ontworpen hardware. Uiteindelijk is besloten om de focus meer op de software kant te leggen en gebruik te maken van de aanwezige hardware. Er was echter nog een module nodig om de informatie van een XBee module te verwerken. Een XBee module met USB verbinding is te koop alleen relatief duur. Naar aanleiding van de hoge kosten is besloten zelf een module te ontwerpen met USB en XBee aansluiting.

### 6.3.1 XBee USB module

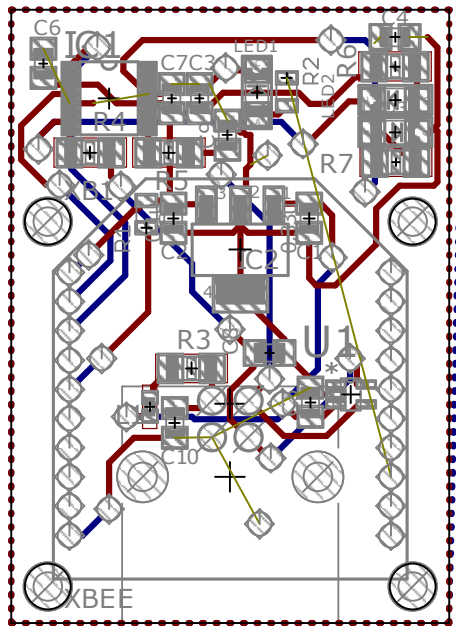
Op de printplaat zijn aansluitingen aanwezig voor een XBee module. De communicatielijnen van de XBee zijn verbonden met een FTDI IC. Dit IC verwerkt binnenkomende en uitgaande informatie en beschikt over een USB driver die herkent kan worden door een computer. Ter beveiliging van de USB bus en de printplaat zelf is er ook een component geplaatst die voorkomt dat er statische spanning op de bus komt. Er zijn een aantal indicatie LED's aanwezig die aangeven of de XBee module actief is en of er informatie wordt ontvangen of verstuurd.



Figuur 3: Schema van de XBee USB module

## 6.4 Controller board

De hexapod bestaat uit 18 servomotoren die aangestuurd worden door een arbotiX robocontroller board (zie figuur 5). Deze controller bestaat uit een AT-Mega644P, een XBee module, servo connectoren en wat algemene in en outputs voor onderandere UART verbindingen.



Figuur 4: Printplaat layout van de XBee USB module

## 6.5 Software

In dit hoofdstuk wordt de software van het project besproken. De software is onder te verdelen in diverse programma's met andere doeleinden.

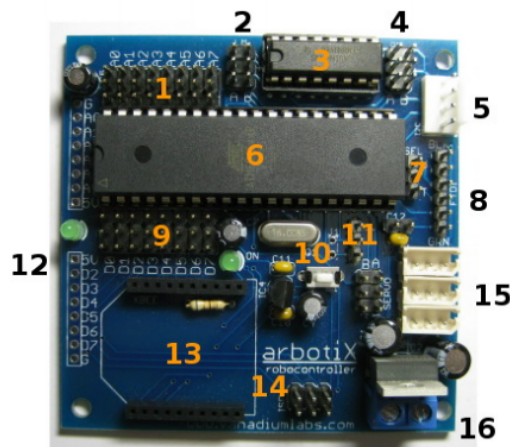
### 6.5.1 Lopen

Wanneer de spin in de fysieke wereld moet lopen, en de koppeling tussen simulatie en de robot is gemaakt, moet het simulatie model ook een loop beweging uitvoeren. Hiervoor is een LUA programma geschreven, wat er voor zorgt dat het simulatiemodel zich voortbeweegt door de ruimte. Het programma wordt uitgevoerd binnen de simulatieomgeving zelf.

Het programma is geïnspireerd op het programma van de AntRobot, een standaard robot uit de V-REP bibliotheek. Deze robot komt qua fysieke kenmerken redelijk overeen met de hexapod. Dit model heeft ook een lichaam met daaraan zes poten welke op dezelfde wijze kunnen scharnieren als de hexapod. Dit maakt de beweging van de poten vrijwel identiek. Daarnaast maakt dit model eveneens gebruik van 'Inversed Kinematics', wat voor het toepassen van bepaalde aspecten van dit programma op de hexapod ideaal is.

Het ontwerp van de code is hetzelfde gebleven, alleen zijn er bepaalde aanpassingen gemaakt waardoor het toepasbaar is voor de hexapod. Het volledige programma is te vinden in de bijlage.

Voor de testfase van het project is er voor gekozen om het model repeterende bewegingen te laten maken. In het huidige programma loopt de robot daarom ook een aantal seconden rechtdoor om vervolgens een bocht te maken naar rechts. Deze beweging wordt oneindig lang herhaald.



- 1 - Analog port headers
- 2 - Left motor/encoder headers
- 3 - Dual motor driver, max current 1A
- 4 - Right motor/encoder headers
- 5 - I2C header
- 6 - ATMEGA644P
- 7 - Power selection header
- 8 - FTDI serial0/programming
- 9 - Digital port headers
- 10 - Reset Switch
- 11 - Serial1 header (also J1)
- 12 - Prototyping headers and user led
- 13 - XBEE socket
- 14 - In-system programming (ISP)
- 15 - 3 Bioloid headers
- 16 - Power terminals

Figuur 5: Robocontroller overzicht

### 6.5.2 Informatieverwerker

Zoals in de opdracht staat omschreven, is het de bedoeling dat de fysieke robot aangestuurd kan worden door het simulatie model. Om dit te kunnen realiseren is er informatie nodig vanuit de simulatie. Het simulatiemodel is zo opgebouwd dat het overeenkomt met het fysieke model. Door deze overeenkomsten zouden de modellen het zelfde gedrag moeten vertonen bij gebruik van dezelfde parameters van de gewrichten.

De koppeling van simulatie naar de robot kan alleen worden gemaakt wanneer de simulatie in V-REP is gestart. In een Python programma wordt de verbinding gemaakt met de simulatieomgeving. Met behulp van de onderstaande regels code wordt deze verbinding tot stand gebracht. Het is eventueel ook mogelijk om het simuleren op een andere computer te doen dan de computer waarop het informatieverwerkende programma op draait(zie regel 190).

```

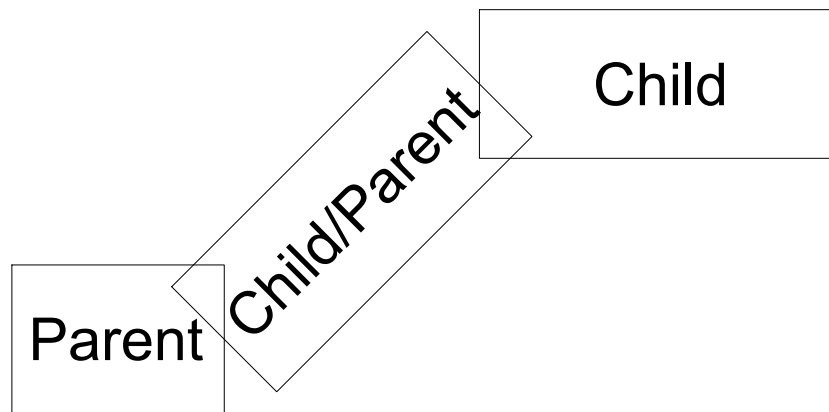
189 vrep.simxFinish(-1)
190 # clientID = vrep.simxStart('192.168.10.151',19999,True,True
    ,5000,5)
191 clientID = vrep.simxStart('127.0.0.1',19999,True,True,5000,5)
192 if clientID != -1:
193     print "Connected to remote API server"
194 else:
195     print "Connection not succesful"
196     sys.exit("Could not connect")

```

Listing 1: main.py - python informatieverwerker - Verbinding maken met de simulatieomgeving.



Zodra het programma is gestart en de verbinding tussen de twee programma's tot stand is gebracht, worden de hoeken van de servomotoren uitgelezen. De hoeken worden ten opzichte van een bovenliggend object in de hiërarchie van het model berekend. Om dit te verduidelijken is er als voorbeeld een afbeelding gemaakt van drie objecten die aan elkaar zijn verbonden.



Figuur 6: Voorbeeld van een child/parent hiërarchie van drie met elkaar verbonden objecten. De hoek tussen de parent en child is de hoek die nodig is in het programma.

De hoekverandering is dan in het geval van de hexapod altijd over één van de drie dimensionale assen. Het uitlezen van de hoeken gebeurt met behulp van een programma wat per gewricht de hoek uitleest. Door gebruik te maken van de remote-API van V-REP is het extern aanroepen van functies mogelijk. De verkregen hoek wordt door de functie teruggegeven in radialen. In de onderstaande code wordt de hoek verkregen en omgerekend naar graden. Vervolgens wordt er nog een correctiefactor toegepast, omdat de toegepaste servomotoren op de hexapod 1023 stappen kunnen maken in plaats van 360.

```

151 def GetObjectAngle(handle_parent , handle_child , angleId):
152     servoEulerAngles = []
153     eulerAngles = vrep.simxGetObjectOrientation(clientID ,
154         handle_child , handle_parent , vrep.simx_opmode_streaming)[1]
154     angle = math.floor(((eulerAngles[angleId] + math.pi) / (2 *
155         math.pi) ) * 1023)
156     return angle

```

Listing 2: main.py - python informatieverwerker - functie om de hoek tussen twee objecten op te vragen.

Tabel 1: Instructie pakket van master naar servo.

0xFF	0xFF	ID	Length	Instruction	Parameter0	Parameters-n	Checksum
------	------	----	--------	-------------	------------	--------------	----------

Naast de verbinding met het simulatieprogramma is er een externe draadloze verbinding nodig met de hexapod. Deze draadloze communicatie verloopt met behulp van het ZigBee protocol. Een zelf ontworpen printplaat met daarop een XBee module en een USB aansluiting moet worden aangesloten op de computer waarop het informatieverwerkende programma draait.

Het programma maakt verbinding met de COM poort van de computer waarop de printplaat met XBee module is aangesloten. Vervolgens wordt er met behulp van verschillende functies een verbinding tot stand gebracht. Zie hiervoor de volledige code die als bijlage is te vinden.

### 6.5.3 Aansturen servomotoren

De servomotoren die gebruikt zijn de Dynamixel AX-18F. Deze motoren werken op 12 volt en kunnen maximaal 2,2 ampere aan stroom gebruiken. Voor het aansturen gebruiken de motoren een eigen serieel protocol.

Het protocol werkt met een master die steeds een pakket over de communicatie bus stuurt en mogelijk een pakket terug kan krijgen. Elk pakket is gericht aan één, meerdere of alle motoren (slaves). De inhoud van een instructie pakket (master naar servo) bestaat uit de informatie uit tabel 2.

Twee maal '0xFF' geeft het begin van een pakket aan. Wanneer dit ontvangen wordt weet iedereen van de bus dat er een pakket aankomt.

Een 'ID' geeft het ontvangers ID aan. Elke servo heeft een uniek ID die gebruikt kan worden. Verder is er een speciaal BROADCAST id waar elke servo naar luistert.

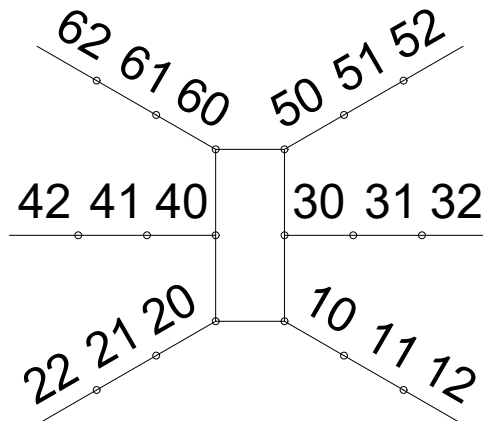
De parameter 'LENGTH' bevat de lengte van het pakket aan informatie. Hierdoor weet de ontvanger hoeveel parameters het kan verwachten

Een 'INSTRUCTION' is het type pakket. Dit kan een 'READ', 'WRITE' of 'SYNCWRITE' zijn. Bij READ word er een waarde uitgelezen, Bij WRITE een waarde weggeschreven en bij SYNCWRITE kan er bij meerdere servomotoren tegelijk worden geschreven.

De waarde 'PARAMETER0' is het lees/schrijf adres. 'PARAMETER-N' is alle informatie die weggeschreven moet worden. Bij een SYNCWRITE instructie bevat dit de servo ID's en DATA per servo zodat meerdere servo's tegelijk beschreven kunnen worden.

De 'CHECKSUM' bevat een checksum van het gehele pakket zodat gecontroleerd kan worden of alles goed is aangekomen.

Een 'status pakket' (servo naar master) bestaat uit de volgende stukken informatie:



Figuur 7: Elke servomotor heeft een eigen ID, het nummer is bepaald aan de hand van de positie.

Tabel 2: status pakket van servo naar master.

0xFF	0xFF	ID	Length	Error	Parameters-n	Checksum
------	------	----	--------	-------	--------------	----------

Net zoals bij een instructie pakket geeft tweemaal '0xFF' het begin van een pakket aan. Wanneer dit ontvangen wordt weet iedereen dat er een pakket aankomt.

De parameter 'ERROR' geeft een binaire code terug met de fouten die op dat moment actief zijn in de servo. Zo een fout kan bijvoorbeeld zijn: overbelasting, checksum fout of een ingangsspanning fout.

PARAMETER-N geeft de informatie terug die door de instructie pakket is opgevraagd

**Implementatie** Het controller board werkt met een ATmega644P waarbij de Servo connectoren direct aangesloten zijn op een UART ingang van de atmega. De servo communicatiebus werkt met een enkele seriële lijn en dat betekent dat zowel de verzend als de ontvang kant via dezelfde lijn werkt (half duplex). Daarom moet elke keer wanneer informatie verzonden wordt de ATmega UART ontvang hardware uitgezet worden. Andersom geldt dit ook, wanneer er informatie ontvangen wordt de ATmega UART verzend hardware uit worden gezet.

De AX18FWrite functie werkt vrij vanzelfsprekend. De UART Tx module wordt aangezet, de transmit buffer wordt leeg gehaald en vervolgens wordt de buffer weer gevuld met informatie van het pakketje. Op het eind wordt nog een checksum toegevoegd en de Tx module weer uitgezet.

```

46 /**
47  * Writes to the Servo
48  * @param id      Servo identifier
49  * @param address  Servo memory write address
50  * @param data     Data to write to memory
51  * @param length   Length of data
52  */
53 void AX18FWrite(unsigned char id, unsigned char address, unsigned
    char *data, unsigned char length) {
54
55     // Enable Uart Tx so we can send
56     uart1_RxDisable();
57     uart1_clearTxBuffer();
58     uart1_TxEnable();
59
60     uart1_putc(AX_START);
61     uart1_putc(AX_START);
62     uart1_putc(id);
63     uart1_putc(length + 3);
64     uart1_putc(AX_WRITE_DATA);
65     uart1_putc(address);
66
67     for(unsigned char i = 0; i < length; i++) {
68         uart1_putc(data[i]);
69     }
70
71     uart1_putc(generateTxChecksum(id, address, data, length));
72     //_delay_us(500);
73     uart1_TxWaitDisable();
74 }

```

Listing 3: AX18ServoDriver.c - AX18Write functie

De Read functie is iets uitgebreider omdat het de informatie echt moet kunnen analyseren. Eerst wordt een pakket verzonden naar de servo met een aanvraag voor informatie. Dit gebeurt op dezelfde manier zoals in de AX18FWrite functie. Daarna wacht de functie tot er informatie terug komt van de servo. Elke byte die dan terug komt wordt in een state machine gestopt die alles byte voor byte analyseert. Zo zijn state 1 en state 2 de start bytes. Wanneer een andere byte dan de start byte is gevonden wordt de state weer naar 0. De rest van de states zijn ook duidelijk.

```

119 /**
120  * Reads from the servo
121  * @param id      Servo identifier
122  * @param address  Servo memory read address
123  * @param buffer   Buffer to save data
124  * @param length   Length to read
125  * @return        Error occurred, return 0 on success, 1 on error
126  */
127 unsigned char AX18FRead(unsigned char id, unsigned char address,
    unsigned char *buffer, unsigned char length) {
128
129     unsigned char checksum = generateRxRequestChecksum(id, length,
        address);
130
131     // Enable Uart Tx so we can send
132     uart1_clearTxBuffer();
133     uart1_TxEnable();
134     uart1_RxDisable();

```

```

135 uart1_putc(AX_START);
136 uart1_putc(AX_START);
137 uart1_putc(id);
138 uart1_putc(4);
139 uart1_putc(AX_READ_DATA);
140 uart1_putc(address);
141 uart1_putc(length);
142 uart1_putc(checksum);
143
144
145 uart1_TxWaitDisable();
146 uart1_RxEnable(); // TEMP
147
148 // Wait for response
149 while(uart1_canRead() <= 0);
150
151 //_delay_us(TX_READ_DELAY_TIME);
152 unsigned char RxState = 0, RxDataCount = 0, RxServoId = 0,
    RxLength = 0, RxError = 0, RxChecksum = 0, Error = 0;
153
154 // Wait a couple of micro seconds to receive some data
155 // Loop through all received bytes
156 while(uart1_canRead() > 0) {
157     //printf("Buffer size: %d\r\n", uart1_canRead())
158     char c = uart1_getc();
159     printf("(%d): 0x%x\r\n", RxState, c);
160     switch(RxState) {
161
162         // 1) First Start byte
163         case 0:
164             if(c == AX_START) {
165                 RxState = 1;
166             }
167             break;
168
169         // 2) Second start byte
170         case 1:
171             if(c == AX_START) {
172                 RxState = 2;
173             } else {
174                 RxState = 0;
175             }
176             break;
177
178         // 3) Id byte
179         case 2:
180             if(c != AX_START) {
181                 RxServoId = c;
182                 RxState = 3;
183             } else {
184                 RxState = 0;
185                 Error = 1;
186             }
187             break;
188
189         // 4) Length byte
190         case 3:
191             RxLength = c;
192             RxState = 4;
193             break;
194
195         // 5) Error byte

```

```

196     case 4:
197         RxError = c;
198         RxState = 5;
199     break;
200
201     // Data bytes and checksum byte
202     case 5:
203         if(RxDataCount >= RxLength - 2) {
204             RxChecksum = c;
205             RxState = 6;
206             break;
207         }
208         printf("Data (%d): 0x%x\r\n", RxDataCount, c);
209         buffer[RxDataCount++] = c;
210     break;
211
212     // There is no state 6 unless we got more data then expected
213     ...
214     case 6:
215         Error = 1;
216         break;
217     }
218 }
219
220 // Check if packet is correct by comparing the checksum
221 if(generateRxChecksum(RxServoId, RxError, address, buffer, length
222 ) != RxChecksum) {
223     Error = 1;
224 }
225
226 printf("error: 0x%x\r\n", RxError);
227
228 return Error;
229 }

```

Listing 4: AX18ServoDriver.c - AX18Read functie

#### 6.5.4 Communicatieprotocol

Om de robot draadloos aan te sturen wordt er gebruik gemaakt van XBee modules. Deze modules werken via een seriële verbinding. XBee bevat de mogelijkheid om de seriële informatie in data pakketten te versturen om zo individuele pakketten te kunnen onderscheiden. Echter maken wij daar geen gebruik van om het geheel wat simpeler te houden. Dit betekent dat er één continue stroom van data is die geanalyseerd moet worden om losse informatieberichten te onderscheiden.

Dit wordt gedaan op dezelfde manier zoals de servo motoren worden aangestuurd. Het pakket begint wanneer er vier start bytes zijn gevonden. Daarna komt de lengte van de data, het commando, de data zelf en als laatste een checksum om het gehele pakket te controleren op fouten. Zie tabel 3. Deze pakketten kunnen op dit moment nog één kant op worden gestuurd (van de computer naar de spin) maar dit is later gemakkelijk uit te breiden om ook de andere kant op te gaan op dezelfde manier zoals bij de servomotoren het geval is.

**Implementatie** Bij de implementatie van het communicatieprotocol is geprobeerd het systeem zo robuust mogelijk te maken. De communicatie over de

byte nr	Example value	meaning
0-3	0x5A - 0x3C - 0x42 - 0x99	Start bytes
4	0x02	Data length
5	0x00	Command
6-(6+length)	0x60	Additional data
7+length	0xFF	Checksum (length, command and data)

Tabel 3: XBee pakket

XBee werkt als een seriele lijn waar een lange stroom aan informatie uitkomt. Omdat de XBee ook met buffers werkt en bij draadloos verkeer alle bytes niet altijd aankomen en opnieuw verzonden moeten worden kan het voorkomen dat er 1 byte binnenkomt en soms 25 bytes. Elke byte moet verwerkt worden en bytes die een tijd later aankomen kunnen nog horen bij een pakket die eerder is begonnen.

Om dit allemaal in goede banen te leiden is er een 'XBee\_communication\_processSerialData' functie gemaakt waar de staat van een pakket wordt opgeslagen en het pakket via meerdere stukken opgebouwd kan worden. Deze functie werkt ook met een state machine, het grote verschil is dat het pakket inclusief de ontvangst staat globaal opgeslagen wordt. Verder kunnen pakketten worden opgeslagen en direct door worden gegaan met het analyseren van de rest van de informatie. De pakketten worden opgeslagen in een ringbuffer hierdoor kan de buffer nooit overstroomd worden met te veel informatie maar zullen de meest oude pakketten verwijderd worden van de buffer zodat de nieuwste pakketten in ieder geval nog uitgelezen kunnen worden.

```

119 unsigned char XBee_communication_processSerialData(char *data,
120 unsigned char length) {
121     unsigned char countNewPackets = 0;
122
123     for(unsigned char i = 0; i < length; i++) {
124         unsigned char c = data[i];
125         //printf(" State: %d (0x%x)\r\n", RxState, c);
126
127         if(RxState == 0) {
128             if (c == PACKET_START_BYTE1) {
129                 RxState = 1;
130             } else {
131                 RxState = 0;
132             }
133         } else if(RxState == 1) {
134             if(c == PACKET_START_BYTE2) {
135                 RxState = 2;
136             } else {
137                 RxState = 0;
138             }
139         } else if(RxState == 2) {
140             if(c == PACKET_START_BYTE3) {
141                 RxState = 3;
142             } else {
143                 RxState = 0;
144             }
145         } else if(RxState == 3) {
146             if(c == PACKET_START_BYTE4) {

```

```

147         } else {
148             RxState = 0;
149         }
150     } else if (RxState == 4) {
151         RxPacket.length = c;
152         RxChecksum |= c;
153         if (RxPacket.length > MAX_DATA_SIZE) {
154             RxState = 0;
155         } else {
156             RxState = 5;
157         }
158     } else if (RxState == 5) {
159         RxPacket.command = c;
160         RxChecksum |= c;
161
162         RxState = 6;
163     } else if (RxState == 6) {
164         if (RxDataCount < RxPacket.length) {
165             RxPacket.data[RxDataCount++] = c;
166             RxChecksum |= c;
167         }
168         if (RxDataCount >= RxPacket.length) {
169             RxState = 7;
170         }
171     } else if (RxState == 7) {
172         RxPacket.checksum = c;
173
174         if (RxPacket.checksum == RxChecksum) {
175             XBee_communication_saveRxPacket(&RxPacket);
176             countNewPackets++;
177         } else {
178             printf("Checksum failed: 0x%x vs 0x%x\r\n", RxPacket.
checksum, RxChecksum);
179         }
180
181         RxState = 0, RxChecksum = 0, RxDataCount = 0;
182     }
183 }
184 }
185 }
186 }
187 return countNewPackets;
188 }

```

Listing 5: XbeeCom.c - processSerialData functie



## 7 Discussie en resultaten

In de specificatie van dit raamwerk staan noodzakelijke en gewenste specificaties. Het primaire doel van het project was een verbinding creëren tussen de fysieke hexapod en het simulatiemodel. Deze verbinding moest draadloos zijn om de hexapod niet te beperken in zijn bewegingsvrijheid. Het doel van deze verbinding was dat het simulatiemodel de fysieke robot kon aansturen. Vanwege deze reden was het van belang dat de maatgeving van de modellen overeen kwamen met elkaar. Om te voorkomen dat de robot zichzelf zou beschadigen was het van belang dat het simulatiemodel geen onmogelijke commando's naar de fysieke robot zou sturen.

Alle bovengenoemde noodzakelijke specificaties zijn behaald. De hexapod kan draadloos aangestuurd worden vanuit het simulatiemodel en verricht exact de zelfde handeling. Het simulatiemodel is zo ingesteld dat het onmogelijk is gemaakt dat de robot zichzelf kan beschadigen door een verkeerde stuuractie. Daarnaast vinden er op verschillende plaatsen in de software checksums plaats die corrupte berichten filteren uit de informatieoverdracht.

De gewenste specificaties zijn door verschillende redenen niet gerealiseerd. Dat heeft te maken met de opgelopen vertraging door het weigeren of defect raken van hardware en problemen met het simulatiemodel.

## 8 Aanbevelingen

In het voorgaande hoofdstuk bleek dat niet alle gewenste specificaties zijn behaald. Dit blijven opties om te implementeren in de toekomst.

Het huidige model heeft nog een aantal beperkingen. Zo is het momenteel niet mogelijk om bijvoorbeeld de poot van de fysieke hexapod te bewegen en dit terug te zien in het simulatiemodel. Die communicatie verloopt nu namelijk één richting op.

Daarnaast kwam het team er achter dat de huidige hardware (de robocontroller) toch nog een aantal beperkingen heeft. Zo bleek de ATmega moeite te hebben met het verwerken van de draadloze informatieoverdracht. Dit resulteerde in het falen van checksum en het traag reageren van de fysieke robot. Momenteel wordt iedere 20 milliseconde een update van de stand van de poten opgevraagd om een nog enigszins vloeiende beweging te creëren. Achteraf gezien was het wellicht toch beter om een eigen "robocontroller" te ontwikkelen.

## 9 Bibliografie

### Referenties

- [1] *Beroepsopdrachten Minor Robotica*, Hogeschool van Amsterdam, 2015.