

2017 • 2018
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Masterthesis

Educatief exoskelet voor studenten STEM richtingen

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Nele MENTENS

PROMOTOR :

dr. Ludo CUYPERS

Laurens Osstyn, Simon Vercruysse

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

De transnationale Universiteit Limburg is een uniek samenwerkingsverband van twee universiteiten in twee landen: de Universiteit Hasselt en Maastricht University.



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt



2017 • 2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT

Masterthesis

Educatief exoskelet voor studenten STEM richtingen

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Nele MENTENS

PROMOTOR :

dr. Ludo CUYPERS

Laurens Osstyn, Simon Vercruysse

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT



KU LEUVEN

Voorwoord

Deze scriptie beschrijft de ontwikkeling van een educatief exoskelet voor het bedrijf COMmeto. Het project is ontstaan als spin-off van het bestaande AXO-SUIT van COMmeto. Om dit project tot een goed einde te brengen is er samengewerkt met verschillende partners. In de eerste plaats Jasper Deflander student Burgerlijk Ingenieur Computerwetenschappen aan de KULeuven die samen met ons dit project heeft uitgewerkt. We willen hem bedanken voor zijn inzet en voor het geleverde werk met het oog op het welslagen van dit project.

Vervolgens willen we Dr. Ludo Cuypers, Borbala Maté en Michel D'Have van COMmeto bedanken voor hun uitstekende begeleiding en hun technische input wanneer we op ingewikkelde problemen stuiten.

Ook willen we Kristien Rombouts en Evelyne Vanden Bosch van RVO-society bedanken voor hun hulp met het educatieve aspect van het project.

Verder bedanken we onze promotor Prof. Dr. Nele Mentens voor haar begeleiding en haar bijdrage aan deze thesis. We bedanken ook de deelnemers van de verschillende testsessies voor hun nuttige en leerrijke feedback.

We bedanken de leerkrachten van de het Sint-Bavohumaniora in Gent en het Heilig Hart in Turnhout voor hun input over de mogelijke implementatie van het project in het onderwijs.

We zouden ook nog onze ouders graag bedanken voor het helpen met onze thesis en algemeen voor het vertrouwen die ze in de jaren hebben gehad in ons.

Ik (L. Osstyn) wil mijn vriendin Gitte en vrienden ook nog persoonlijk bedanken voor de hulp, liefde en vriendschap die ze me door de jaren heen hebben gegeven.

Ten laatste bedanken wij nog onze medestudenten die voor een aangename sfeer zorgden.

Inhoudsopgave

Figurenlijst	7
Tabellenlijst	9
Verklarende woordenlijst	11
Abstract (Nederlands).....	15
Abstract (Engels).....	17
1 Inleiding	19
1.1 Introductie	19
1.2 Probleemstelling.....	19
1.3 Doelstellingen.....	20
2 Literatuurstudie	21
2.1 Werking en gebruik van exoskeletten	21
2.2 EduExo suit	23
2.2.1 Standaardpakket	23
2.2.2 EMG-extensie.....	24
2.3 Onderzoek naar componenten	25
2.3.1 Motoren	25
2.3.1.1 Stappenmotor.....	25
2.3.1.2 Servomotor	26
2.3.2 Sensoren	26
2.3.2.1 Load cell.....	26
2.3.2.2 EMG-sensor.....	27
2.3.2.3 Hall-effect sensor	28
2.3.2.4 IMU	29
2.3.2.5 Flex-sensor	32
2.3.2.6 BCI-sensor.....	32
2.3.3 Microprocessoren en microcontrollers	33
2.3.3.1 Arduino.....	33
2.3.3.2 Raspberry Pi	34
2.3.3.3 BeagleBone	35
3 Materialen en methode	37
3.1 Keuze uitwerkingsvorm	37
3.1.1 Assistief exoskelet.....	37
3.1.2 Exoskelet voor revalidatie	37
3.1.3 Exoskelet voor mimicking.....	38
3.1.4 Resultaat enquête.....	38
3.2 Leerplandoelstellingen	39
3.2.1 ASO: Wetenschappen-Wiskunde	39

3.2.2	TSO: Industriële-Wetenschappen.....	41
3.2.3	TSO: Industriële-ICT	42
3.2.4	TSO: Elektriciteit-Elektronica.....	43
3.2.5	TSO: Elektromechanica.....	43
3.2.6	Conclusie van de leerplandoelstellingen	44
3.3	Keuze componenten	44
3.3.1	Motor	44
3.3.2	Sensoren	44
3.3.2.1	IMU	44
3.3.2.2	Flex-sensor	45
3.3.2.3	EMG-sensor.....	46
3.3.2.4	Andere sensoren	46
3.3.3	Microprocessor.....	47
3.3.4	Mechanische arm.....	47
3.3.5	Software.....	47
3.4	Berekeningen en filtering IMU	50
3.5	Externe ADC.....	55
4	Resultaten en discussie.....	57
4.1	Overzicht van de gekozen componenten.....	57
4.2	Implementatie IMU	57
4.2.1	Connectie IMU	57
4.2.2	Uitlezen IMU.....	58
4.2.3	Visualisatie IMU	59
4.2.3.1	Visualisatie accelerometer.....	59
4.2.3.2	Visualisatie magnetometer	61
4.2.3.3	Visualisatie Tait Bryan hoeken	62
4.2.3.4	Motoraansturing met 1 IMU.....	63
4.2.3.5	Motoraansturing met 2 IMU's.....	63
4.3	Visualisatie van de IMU-data.....	65
4.3.1	Accelerometer	65
4.3.2	Gyroscoop	66
4.3.3	Magnetometer.....	69
4.3.4	Kalman filter.....	70
4.3.5	Conclusie van de gegevens.....	73
4.4	Implementatie flex-sensor	73
4.5	Mechanische arm.....	77
4.6	Handboek	78
4.7	User feedback.....	79
4.8	Ondervonden problemen	82

4.8.1	Hardware	82
4.8.2	Software.....	83
5	Toekomstig werk.....	85
6	Conclusie.....	87
	Bibliografie.....	89
	Bijlagen	95

Figurenlijst

Figuur 1 Wheatstone brug	14
Figuur 2 Actief exoskelet	22
Figuur 3 Passief exoskelet.....	22
Figuur 4 Medisch exoskelet	22
Figuur 5 Industrieel exoskelet	22
Figuur 6 Militair exoskelet.....	22
Figuur 7 Ontvangen kit uitgepakt.....	25
Figuur 8 Onderdelen van EduExo arm.....	25
Figuur 9 Load cell	25
Figuur 10 EMG-sensor.....	25
Figuur 11 Volledig arm EduExo	25
Figuur 12 Werking stappenmotor.....	26
Figuur 13 Interne werking servomotor.....	26
Figuur 14 Load cell	27
Figuur 15 Buiging load cell.....	27
Figuur 16 EMG-sigitaal uit biceps	28
Figuur 17 Werking hall-effect	29
Figuur 18 Principiële accelerometer.....	30
Figuur 19 MEMS accelerometer	30
Figuur 20 Gyroscop in cardanische ophanging	31
Figuur 21 MEMS-gyroscop.....	32
Figuur 22 Arduino Uno	33
Figuur 23 Raspberry Pi.....	34
Figuur 24 BeagleBone Black	35
Figuur 25 MPU-9250	45
Figuur 26 Flex-sensor.....	46
Figuur 27 EMG-sensor.....	46
Figuur 28 Diagram in de gebruikersweergave	49
Figuur 29 Add blokje toevoegen uit de stdlib.py	50
Figuur 30 Vergelijking Kalman en Complementary filter	51
Figuur 31 Vergelijking Kalman en Complementary filter ingezoomd.....	51
Figuur 32 Formule Kalman filter	52
Figuur 33 Voorstelling Roll,Pitch en Yaw	52
Figuur 34 Gimbal Lock	53
Figuur 35 Plaatsing IMU's.....	54
Figuur 36 MCP3008.....	55
Figuur 37 Pin lay-out Raspberry Pi model 3.....	58
Figuur 38 Connectie van de IMU met de Raspberry Pi GPIO pinnen	58
Figuur 39 Blokschema accelerometer	59
Figuur 40 Visualisatie accelerometer	59
Figuur 41 Geprinte assen IMU	60
Figuur 42 Visualisatie van de tilt sensor	61
Figuur 43 Visualisatie magnetometer.....	62
Figuur 44 Pijl IMU	62
Figuur 45 Visualisatie van Roll,Pitch en Yaw (Tait Bryan hoeken)	63
Figuur 46 IMU break-out board	64
Figuur 47 Flat ribbon cable	64
Figuur 48 Stroomdiagram van de IMU's die gestuurd worden naar de motor	64
Figuur 49 MPU-9250 representatie van de assen.....	65
Figuur 50 Accelerometer gegevens naar Roll geconverteerd.....	66

Figuur 51 Gyroscop geïntegreerd met de sample tijd voor de hoekpositie rond een as	67
Figuur 52 Modelisatie van de gyroscopische drift	68
Figuur 53 Magnetometer x en y as omgevormd naar rotatiehoek rond de z-as van MPU-9250.....	70
Figuur 54 Roll, Pitch en Yaw voorstelling (Tait Bryan hoeken) na Kalman filter	71
Figuur 55 Roll,Pitch en Yaw drift na Kalman filtering.....	71
Figuur 56 Uitgezoomd beeld van de drift na Kalman filtering van de MPU-9250.....	72
Figuur 57 Connectie ADC en Raspberry Pi	73
Figuur 58 Spanningsdeler voor flex sensor.....	74
Figuur 59 Spanningsverloop bij ruststand en maximale buiging flex-sensor.....	74
Figuur 60 Conversie digitale waarde naar hoek	75
Figuur 61 Data flex-sensor voor en na filtering	76
Figuur 62 Data flex-sensor na filtering van grotere windows	76
Figuur 63 Mimicking arm	77
Figuur 64 Assistentieve arm.....	77
Figuur 65 Bevestiging motor.....	77
Figuur 66 Armcuffs voor bevestiging IMU.....	78
Figuur 67 Feedback sessie 18 april met leerlingen	79
Figuur 68 User feedback over het onderwerp van de cursus.....	80
Figuur 69 User feedback over de moeilijkheid van het project.....	80
Figuur 70 User feedback over het werken aan deze projecten in een klasomgeving	81
Figuur 71 AND& festival momentopname	82
Figuur 72 Flex-sensor stuk gegaan door slechte connectie	83
Figuur 73 Oplossing van de flex-sensor door het te versterken met krimpkous	83

Tabellenlijst

Tabel 1 Raspberry Pi vs BeagleBone	36
Tabel 2 Belangrijkste leerplandoelstellingen ASO: Wetenschappen-Wiskunde.....	39
Tabel 3 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Industriële-Wetenschappen	41
Tabel 4 Belangrijkste leerplandoelstellingen: TSO: Industriële ICT	42
Tabel 5 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Elektriciteit-Elektronica	43
Tabel 6 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Elektromechanica.....	43
Tabel 7 Overzicht van de gekozen componenten.....	57
Tabel 8 Lineaire regressies van de verschillende assen van de gyroscoop in de MPU-9250	69
Tabel 9 Lineaire regressies van de verschillende assen na Kalman filtering van de MPU-9250.....	72
Tabel 10 Drift vergelijking tussen Kalman filter en gyroscoop van de MPU-9250.....	73

Verklarende woordenlijst

ADC: **A**naloog naar **D**igitaal **C**onvertor, dit is een elektronische chip die een analoge signaal omzet naar een digitaal signaal aan de hand van een weerstandstrap een referentiespanning vergelijkt (comparator) met het inkomende signaal en op basis van dit signaal een digitaal signaal genereert. In ons design hebben we gekozen voor een MCP-3008, dit is een vaak gebruikte ADC in combinatie met een Raspberry Pi.

ASO: **A**lgemeen **S**ecundair **O**nderwijs, één van de onderwijsvormen in Vlaanderen.

ARW: **A**ngular **R**andom **W**alk, dit is de fout die ontstaat bij integratie van witte ruis in een MEMS-gyroscoop.

AXO-SUIT: Exoskelet ontwikkeld in EU AAL6 project, COMMeto is het bedrijf dat zorgt voor de software die het AXO-SUIT doet functioneren.

Biocompatibel: De term duidt op de manier waarop een kunststof reageert met zijn omgeving, de kunststof zal bij deze reactie nooit zijn omgeving beschadigen of vervormen. In het geval van mensen zal een biocompatibel materiaal nooit een mens schaden.

BCI: **B**rain-**C**omputer **I**nterface, techniek om EEG-signalen of hersengolven van bepaalde hersengebieden op te meten die vervolgens door een computer worden geclassificeerd en omgezet naar acties. [1]

COMmeto: Softwarebedrijf gevestigd in Ham. Begeleidend bedrijf in dit project.

DAC: **D**igitaal naar **A**naloog **C**onverter, dit is een elektronische chip die een digitaal signaal omzet naar een analoge signaal. Dit is de tegenhanger van een ADC.

DIY Do It Yourself, dit is een methode waarbij de gebruikers zelf allerlei zaken kunnen bouwen of repareren zonder dat ze de hulp van een specialist nodig hebben.

DOF: **D**egrees **O**f **F**reedom, het aantal vrijheidsgraden geeft aan met hoeveel onafhankelijke parameters een fysiek systeem kan worden gedefinieerd. Een sensor met 9-DOF kan bijvoorbeeld 9 onafhankelijke parameters meten, in het geval van een 9-DOF IMU zijn er:

- 3 vrijheidsgraden die in 3 assen versnellingen opmeten;
- 3 vrijheidsgraden die in 3 assen hoeksnelheden opmeten;
- 3 vrijheidsgraden die in 3 assen magnetische velden opmeten.

EEG: **E**lektro-**e**ncefalografie, dit is een methode om de elektrische activiteit in de hersenen te meten. Bij BCI wordt deze methode gebruikt.

EMG: Elektromyografie, dit is een methode om elektrische activiteit in de spieren te meten. Dit wordt op 2 manieren gedaan:

- Op de huid boven de spier, dit wordt typisch met elektrode pads gedaan. Deze pads bevatten een hydrogel dat zorgt voor een goede geleiding van elektrische signalen. Dit wordt typisch gebruikt bij een EMG-sensor zoals die van Sparkfun [2];
- In de spier, dit wordt typisch gedaan met behulp van naald-elektroden. Zodat men veel lokaler in de spier kan meten.

Euler hoeken: Dit zijn drie hoeken die een driedimensionale rotatie voorstellen en de drie afzonderlijke hoek waaruit deze rotatie bestaat. Dit kan voorgesteld worden als een driedimensionaal assenstelsel waarbij elke hoek een rotatie rond één van de assen voorstelt. Een speciale vorm hiervan zijn de Tait-Bryan hoeken.

E-Learning: Dit staat voor elektronisch leren. Met elektronisch leren bedoelt men leeractiviteiten beoefenen met behulp van een computer. Dit heeft de volgende voordelen: de leerlingen kunnen op individueel vlak bijgestuurd worden en klassikale problemen worden sneller ontdekt.

FIW: Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen, dit is de faculteit van S. Vercruyssen en L. Osstyn (de auteurs van deze thesis).

GO!: Gemeenschapsonderwijs, één van de onderwijskoepels in Vlaanderen

GUI: Grafische User Interface, dit is een manier van interactie die een computer of een programma aangaat met zijn gebruikers door visuele feedback te tonen.

I2C: Inter-Integrated Circuit, dit is een communicatieprotocol dat gebruikt wordt om verschillende microprocessors of sensoren met elkaar te laten communiceren. De typische snelheid waarbij I2C opereert is 100KHz in normale modus en 400 KHz in snelle modus. Het bijkomend voordeel dat I2C biedt is dat dit softwarematig kan kiezen tussen verschillende sensoren of microcontrollers.

IDLE: Python's Integrated Development and Learning Environment, dit is een ontwikkelingsplatform specifiek voor Python gemaakt.

IMU: Inertial Measurement Unit, sensor die oriëntatie en rotatie kan meten. Deze bevat inwendig meestal een 3-assige gyroscoop en een 3-assige accelerometer ter compensatie van de drift op de gyroscoop. Soms zit er ook nog een 3-assige magnetometer in.

IW: Industriële Wetenschappen, richting binnen het TSO.

Library: softwarebibliotheek, een library is een verzameling van verschillende klassen en functies die specifiek gemaakt zijn om de gebruiker eenvoudiger te helpen programmeren. Elke library is gemaakt met een specifieke functie.

Load cell: Dit is een transducer (=systeem dat energie converteert naar een andere soort energie) die een elektrisch signaal genereert proportioneel aan de kracht uitgeoefend op de load cell.

MEMS: Micro-ElektroMechanisch Systeem, dit is een verzamelnaam voor elektronische chips met componenten die tussen de 1 en 100 micrometer groot zijn.

Microprocessor: Dit is een processor die op een kleinere chip (IC) is geplaatst. Deze is zo ontworpen om zeer snel aritmetische en logische operaties te verwerken gebruikmakend van kleine opslagplaatsen genaamd registers.

MPU-9250: Dit is de IMU die in dit project gebruikt wordt. Er is geopteerd om deze sensor te nemen met een breakout board van Sparkfun [3]. Dit breakout board voorziet makkelijke connecties met de sensor alsook verschillende bruggen die gesoldeerd kunnen worden om bepaalde zaken te vergemakkelijken zoals het veranderen van adres.

OS: Operating System, dit is een geheel van samenwerkende programma's die de hardware van een computer besturen. Voorbeelden hiervan zijn Windows en iOS of in het geval van de Raspberry Pi: Raspbian OS.

PIP: Python's Package Manager, dit is een programma dat gebruikt wordt om softwarepakketten die geschreven zijn in Python te installeren en te beheren. Als men Pip in een commandolijn uitvoert met daarachter een zoekterm van een package of library die men wil installeren op de Raspberry Pi. Dan zal Pip vervolgens op basis van deze zoekterm een beschikbaar package zoeken in de PyPi database.

PID-regelaar: Proportioneel, Integreerend en Differentiërend zijn de termen die voor PID staan. Deze regeling vertrekt van het verschil (fout) tussen de gewenste instelwaarde en de gemeten waarde. Het systeem gaat dan vervolgens dit foutsignaal bijsturen om naar de gewenste waarde te gaan.

- P-actie: Zorgt voor een versterking van het verschil (fout).
- I-actie: Zorgt voor een constante sommatie van de fout en zal er steeds voor zorgen als er nog een fout aanwezig is dat deze bijgestuurd gaat worden totdat de fout weggewerkt is.
- D-actie: Zorgt voor de snelheid waarmee men gaat reageren op een fout, zo kan men bijvoorbeeld doorschieters verminderen.

PLA: Polyactide dit is een thermoplastisch polymeer van melkzuur. Deze zijn biologisch afbreekbaar en ook biocompatibel. Dit is het gebruikte kunststof filament voor onze ge-3D-printe ontwerpen.

PO: Provinciaal Onderwijs, een van de onderwijskoepels in Vlaanderen.

PWM: Pulse Width Modulation, modulatietechniek die gebruikt wordt om data te encoderen in pulsen. Deze techniek wordt vooral gebruikt om motoren aan te sturen. Deze modulatietechniek werkt op basis van het principe van gemiddelde van het signaal als men bijvoorbeeld een PWM-sigitaal uitstuurt met een arbeidscyclus van 50% zal het gemiddelde ook de helft zijn van de voedingsspanning. Hierna kan men deze spanningen nog discretiseren (zoals men bv. bij een ADC doet) om deze vervolgens te encoderen naar een hoekstand van de motor.

Roll, Pitch en Yaw: Dit zijn drie rotatiehoeken die gebruikt worden om de oriëntatie van vliegtuigen weer te geven in de vorm van Tait Bryan hoeken. In deze thesis stellen ze de 3 rotatiehoeken rond de IMU voor, dit is als volgt gedefinieerd:

- **Roll:** rotatie rond de x-as;
- **Pitch:** rotatie rond de y-as;
- **Yaw:** rotatie rond de z-as.

RVO-society: Bedrijf dat STEM wil promoten bij jongeren. Begeleidend bedrijf bij dit project. RVO-society zal dit project de volgende jaren verder uitrollen in verschillende pilotscholen alsook in hun E-learning platform.

SPI: Serial Peripheral Interface, dit is een communicatieprotocol dat gebruikt wordt in de elektronica om twee of meerdere apparaten met elkaar te laten communiceren. SPI heeft de eigenschap dat men geconnecteerde apparaten hardwarematig moet selecteren (in de vorm van een chip select signaal).

STEM: Science, Technology, Engineering en Mathematics, dit is een verzamelnaam voor verschillende technische, wetenschappelijke, technologische en wiskundige opleidingen. Dit is een nieuw soort vorm van opleiding/vak waarbij de leerlingen vooral met wetenschap en engineering bezig zijn. Het doel hiervan is om op termijn meer beschikbare arbeidskrachten in deze beroepsgebieden te hebben.

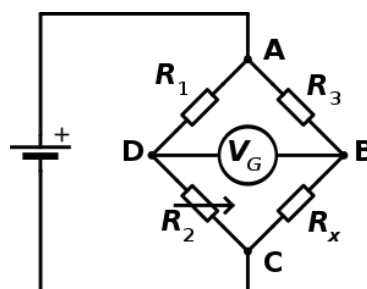
Tait-bryan hoek: Dit is een speciale vorm van Euler hoeken en ook een van de meest gebruikte oriëntatie voorstelling in robotica en luchtvaart. Tait-bryan hoeken stellen hoeken (roll, pitch, yaw) voor die roteren volgens een wereldassenstelsel (excentrische rotaties) genaamd x, y, z.

TSO: Technisch Secundair Onderwijs, onderwijsvorm in Vlaanderen.

Tupel: Dit is een eindige rij van objecten waarin de volgorde van belang is.

VVKSO: Vlaams Verbond van het Katholiek Secundair Onderwijs, de grootste onderwijskoepel van Vlaanderen.

Wheatstone -brug: Dit is een elektrisch circuit om een onbekende weerstand te meten op basis van vier weerstanden en volgende formule: $R_x = \frac{R_2}{R_1} * R_3$. Men kan de weerstand R_x berekenen met behulp van de gemeten spanning V_G op basis van de volgende formule: $V_G = \left(\frac{R_2}{R_2+R_1} - \frac{R_x}{R_x+R_3} \right) * V_S$ waarbij V_S (voedingsspanning) gekend is.



Figuur 1 Wheatstone brug [4]

Abstract (Nederlands)

De nood aan ingenieurs en andere technische specialisten is al verschillende jaren hoog in Vlaanderen. Om aan die noodzaak te voldoen, wordt in deze thesis de ontwikkeling van een educatief exoskelet voorgesteld. Het doel van het exoskelet is om bij jongeren de interesse in STEM op te wekken en er zo voor te zorgen dat de instroom van studenten in STEM-richtingen stijgt. Om dat resultaat te bekomen wordt het product zo ontwikkeld dat het in de 3^{de} graad van Vlaamse scholen kan geïmplementeerd worden.

Concreet bestaat het ontwikkelde pakket uit een exo-arm met de nodige sensoren en actuatoren om aan te sturen. De leerlingen zullen aan de hand van een handboek deze arm zelf stap voor stap opbouwen. Hierbij behalen ze verschillende leerplandoelstellingen en maken ze kennis met de gebruikte componenten. Voor het ontwikkelde pakket zijn de componenten een IMU, een flex-sensor, een servomotor en een Raspberry Pi. Om deze componenten te gebruiken, is er een Python bibliotheek ontwikkeld. De beoogde leerlingengroep heeft weinig tot geen ervaring met tekstueel programmeren; daarom is er een gebruikersomgeving ontwikkeld om de verschillende componenten grafisch te programmeren. De grafische gebruikersomgeving maakt gebruik van de onderliggende bibliotheek om met de componenten te communiceren. Op basis van verschillende testsessies kan er besloten worden dat het ontwikkelde pakket zowel de leerlingen als de leerkrachten aanspreekt.

Abstract (Engels)

The shortage of engineers and other technical specialists is a recurring problem in Flanders. A reason for this is the low popularity of STEM as a field of study for young people. In this thesis, the development of an educational exoskeleton is presented. The goal of the exoskeleton is to raise the interest of young people in STEM and to motivate them to obtain a degree in these domains. To accomplish this goal, the exoskeleton will be developed to be integrated in the study program of the third grade of high school education in Flanders.

The developed kit consists of an exo-arm with the necessary sensors and actuators. The students will be tasked to build the exo-arm step-by-step using a manual. During this process, they will tackle theoretical and practical subjects from multiple courses, which they would otherwise learn during regular classes. The used components in this project are an IMU, a flex-sensor, a servomotor and a Raspberry Pi. To program these components a Python library has been developed. The target group of students has little to no experience in textual programming; for this reason a graphical user interface has been developed. Using this interface, the students can graphically program the components by placing and connecting the available blocks. The resulting program will subsequently be a flowchart consisting of multiple blocks and connections. After multiple test sessions, it can be concluded that the developed kit draws interest from both the students and the teachers.

1 Inleiding

1.1 Introductie

COMmeto is een Belgisch bedrijf dat gevestigd is in Ham. Het bedrijf is vooral gespecialiseerd in software architectuur diensten, softwareontwikkeling voor connecties van heterogene systemen en services, software voor automatiseringsprojecten, communicatie via het Internet, connectie van verschillende netwerktypes (Internet, Intranet, PAN, BAN, draadloos etc.) en signaalverwerking systemen.

Recente activiteiten focussen op eHealth/mHealth/eCare installaties voor residentiële toepassingen met bijpassende services op het Internet. Eén van de projecten is het AXO-SUIT-project. Het doel van dit project is het ontwikkelen van een full-body exoskelet voor mensen met fysieke beperkingen [5].

RVO-Society is een onderzoeksinstituting die nauw samenwerkt met IMEC. Het doel van RVO-Society is om wetenschap en techniek, de zogeheten STEM-richtingen, te promoten bij jongeren. Dit doen ze o.a. door wetenschappelijke projecten uit te werken waarin de jongeren met een maatschappelijk probleem geconfronteerd worden. Dit probleem dienen ze dan zelf op te lossen op een ingenieuze manier m.b.v. een op voorhand klaargemaakte DIY-kit. Voorbeelden van deze projecten zijn onder andere Drone-Age waarbij de jongeren zelf een drone in elkaar zetten en laten vliegen of Planetwatch waarbij jongeren de Belgische luchtkwaliteit meten [6].

Voor dit project zullen COMmeto en RVO-Society samenwerken met twee masterstudenten genaamd S. Vercruyse en L. Osstyn, Industriële Ingenieurswetenschappen Elektronica-ICT van FIIW van UHasselt in associatie met KULeuven en met 1 masterstudent J. Deflander van de faculteit Computerwetenschappen van KULeuven.

1.2 Probleemstelling

Elke jaar behoren de technische- en ingenieursberoepen tot de grootste knelpuntberoepen van Vlaanderen [7]. Dit zorgt ervoor dat verschillende bedrijven geen goede arbeidskrachten vinden en dat er bijgevolg veel vacatures openblijven. Daardoor is het dus belangrijk dat er een grotere instroom komt van arbeidskrachten met een technische achtergrond. Dit zou kunnen door arbeidskrachten die over andere diploma's beschikken bij te scholen tot technisch personeel, maar dit is eigenlijk al een stap te laat. Het is veel beter om jongeren van jongs af aan te laten instromen in technische en wetenschappelijke richtingen, aangezien dat het eenvoudiger is om jongeren iets nieuw te leren dan volwassenen. Hierbij is het essentieel dat de jongeren worden geïnformeerd over de mogelijkheden en toepassingen van STEM-richtingen en technische beroepen.

RVO-Society is één van de instellingen die hier een leidende rol inneemt door tal van wetenschappelijke projecten en activiteiten te ontwikkelen voor jongeren. Er wordt altijd uitgegaan van maatschappelijke thema's om jongeren iets bij te leren. Hierbij ligt de focus dikwijls op de milieuproblematiek en de gezondheidszorg [6]. Een belangrijk thema in de gezondheidszorg is een term genaamd tele-chirurgie waarbij een chirurg vanop afstand snel een diagnose kan stellen en veilig kan opereren. Hierdoor heeft een chirurg meer tijd om effectief te opereren in plaats van zich te moeten verplaatsen tussen verschillende ziekenhuizen [8]. De operatie op afstand gebeurt met een robot die de beweging van de dokter nabootst. Leerlingen kunnen op basis van een handboek zelf een vereenvoudigde versie van zo een robot opbouwen.

1.3 Doelstellingen

De hoofddoelstelling van dit project is om de interesse van leerlingen van de 3de graad van het middelbaar onderwijs te wekken voor STEM. Dit wordt gedaan door een educatief exoskelet te ontwikkelen dat de leerlingen zelf kunnen opbouwen. Concreet moet er dus een DIY-kit gemaakt worden van het exoskelet waarbij de leerlingen vanuit een centrale vraag het exoskelet stapsgewijs kunnen construeren. Deze centrale vraag zal een maatschappelijk probleem zijn dat opgelost kan worden met behulp van het exoskelet. Een voorbeeldvraag zou kunnen zijn: hoe kan men met behulp van een technologische toepassing de beweging van een echte arm nabootsen op een robotarm?

Het project dient opgedeeld te worden in verschillende modules waarbij de leerkrachten afhankelijk van de voorkennis van de leerlingen kunnen kiezen om bepaalde modules al dan niet te doorlopen. Hierdoor kunnen zowel leerlingen uit het algemeen secundair onderwijs (ASO) als leerlingen komende uit technische richting zoals industriële wetenschappen (IW) met het exoskelet aan de slag. Het is hierbij vanzelfsprekend dat de modules voor de leerlingen IW verschillend zijn van die voor de ASO-leerlingen aangezien de leerlingen uit IW een iets meer technische achtergrond hebben. Voor elke afzonderlijke component van het exoskelet dient er een aparte module gemaakt te worden, zodat de leerlingen met weinig elektronica-ervaring eerst aan de hand van enkele experimenten en conceptvragen de verschillende componenten beginnen te begrijpen.

Het is ook belangrijk dat de geziene leerstof verwerkt kan worden in de bouw van het exoskelet. Zo kunnen eigenschappen uit de mechanica en fysica zoals krachten en momenten geïllustreerd worden aan de hand van het exoskelet. Dit kan door middel van opdrachten die tijdens het opbouwen van het exoskelet uitgevoerd dienen te worden. Een voorbeeld van een opdracht kan zijn dat de kracht berekend wordt die een arm nodig heeft om een bepaald gewicht op te tillen. Na het oplossen van de vraag kunnen leerlingen dit verifiëren aan de hand van het exoskelet. Andere voorbeelden van leerstof die kan verwerkt worden met behulp van het exoskelet zijn: werking van de spieren (biologie), gebruik van sensoren (elektronica), etc.

Een ander belangrijk aspect dat op educatief vlak van belang is, is het feit dat de leerkracht feedback krijgt van de verschillende modules van de leerlingen. Aan de hand van de feedback kan de leerkracht zien waar er zich eventueel problemen kunnen voordoen bij de leerlingen. Deze feedback kan men integreren in de modules om deze te optimaliseren voor de verschillende studierichtingen.

Het exoskelet zal gebruikt worden door leerlingen die mogelijk weinig ervaring hebben met elektronica, hierdoor moet er bepaalde voorzorgen genomen worden met betrekking tot veiligheid. Zo mag er geen gevaar tot elektrocutie zijn voor de leerlingen, er moet dus met relatieve lage spanningen en stromen gewerkt worden. Als de mechanische arm bevestigd wordt op een arm om de bewegingen te ondersteunen en versterken dan mag deze niet te krachtig zijn om lichamelijk letsel te voorkomen.

2 Literatuurstudie

2.1 Werking en gebruik van exoskeletten

Een exoskelet is een uitwendig skelet dat gebruikers ondersteunt bij een beweging. De exoskeletten kunnen opgedeeld worden in 2 soorten, namelijk actieve en passieve exoskeletten. Bij actieve exoskeletten wordt er energie aan het skelet toegevoegd, dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een beweging met behulp van elektromotoren. Figuur 2 toont het AXO-SUIT [9] dit is een actief exoskelet dat ontwikkeld is door COMmeto. Passieve exoskeletten zoals in Figuur 3 voegen geen energie toe aan het exoskelet, maar versterken wel passief de bewegingen van de gebruiker. Dit passief versterken van de beweging gebeurt door de energie die vrijkomt dankzij de beweging op te slaan in materialen zoals veren, dempers en mechanische structuren. Deze energie wordt dan vervolgens gebruikt om de beweging te versterken. De wet van behoud van energie geldt bij dit soort exoskeletten er zal dus geen externe energie toegevoegd worden. Zowel actieve als passieve exoskeletten kunnen geïnclassificeerd worden volgens de spiergroep die ze ondersteunen: volledig lichaam, bovenlichaam, onderlichaam of gewricht [10]. In deze thesis zal de focus liggen op de actieve exoskeletten en meer bepaald op het bovenlichaam.

Een actief exoskelet kan opgedeeld worden in 4 grote delen, namelijk de sensoren, de actuatoren, het mechanisch skelet en de microprocessor. De sensoren meten de beweging van de gebruiker, afhankelijk van de geproduceerde data zullen de actuatoren vervolgens worden aangestuurd met behulp van een microprocessor. Dit zorgt er dan voor dat het exoskelet met het lichaam meebeweegt en typisch ook de beweging gaat versterken [11], [12], [13].

Het belangrijkste onderdeel van een actief exoskelet is het sensornetwerk, zonder sensoren is het onmogelijk om het skelet op de gebruiker zijn intenties te laten reageren. Veel gebruikte sensoren in exoskeletten zijn load cellen/rekstroomkjes [11], IMU's [14], EMG-sensoren [12], [13], [15] en BCI-sensoren [16]. Een load cell is een transducer die een elektrisch signaal genereert proportioneel met de kracht die op de sensor wordt geleverd. De load sensor bestaat uit een Wheatstone-brug van 4 weerstanden, aan de hand van de vervorming van de load cell zal de spanning aan de uitgang van de Wheatstone-brug veranderen. De IMU is een positie- en rotatiesensor die een gyroscoop, accelerometer en soms een magnetometer bevat. Uit deze 3 sensoren die in een IMU zitten wordt er met behulp van datafusie nuttige informatie gehaald voor positionering en rotaties. De elektromyografie- of EMG-sensor is een sensor die elektrische signalen in de spieren en zenuwen meet. De Brain-Computer Interface of BCI-sensor meet rechtstreeks de signalen die vanuit de hersenen naar de spieren gestuurd worden. Deze sensoren zullen verder in de thesis uitvoeriger worden besproken. Een actief exoskelet heeft ook aandrijving nodig, hiervoor worden motoren gebruikt. Dit zijn voornamelijk stappenmotoren [10], [15] of servomotoren [17], deze worden verder in de thesis besproken.



Figuur 2 Actief exoskelet [9]



Figuur 3 Passief exoskelet [18]

Exoskeletten hebben verschillende toepassingsmogelijkheden. De eerste en misschien wel de bekendste toepassing is in de gezondheidszorg. Exoskeletten kunnen hier gebruikt worden op verschillende vlakken, bijvoorbeeld als ondersteuning voor mensen die door een ziekte of een ongeval hun spierkracht verloren hebben zoals weergegeven in Figuur 4 [19]. Als revalidatie tool voor mensen die hun spierkracht moeten terugwinnen [20]. Een ander toepassingsgebied is het gebruik van exoskeletten voor fysiek zwaar werk. Hierbij worden arbeiders door het exoskelet geholpen bij het optillen van zware voorwerpen zoals Figuur 5 aantoont [11]. Dankzij dit exoskelet kunnen de arbeiders langer en gezonder werk leveren doordat hun lichaam minder belast wordt. Een laatste toepassingsgebied is de militaire sector, door soldaten uit te rusten met exoskeletten krijgen ze een voordeel t.o.v. hun tegenstanders. Ze kunnen dan sneller lopen en meer uitrusting dragen (Figuur 6) [21].



Figuur 4 Medisch exoskelet [22]



Figuur 5 Industrieel exoskelet [23]



Figuur 6 Militair exoskelet [24]

2.2 EduExo suit

Er is een marktonderzoek uitgevoerd omtrent bestaande educatieve exoskeletten. Hierbij is het enige educatieve exoskelet op de markt (voor November 2017) onderzocht, dit is volgens Kickstarter [25] (een site waar men fundraising kan doen voor creatieve projecten) de eerste kit die voor STEM bedoeld is. De kit heet EduExo – Robotic Exoskeleton kit en is gemaakt door het bedrijf Beyond Robotics uit Zwitserland, met behulp van deze kit kunnen studenten van het middelbaar en hoger onderwijs zelf een exoskelet voor de elleboog ontwikkelen [26].

Deze kit is uitgebreid getest en onderzocht, waarna de positieve en negatieve punten zijn opgesomd. De kit (Figuur 7) bestaat uit een handboek en de bijbehorende hardware om het exoskelet te ontwikkelen. Het handboek is zo opgebouwd dat de leerlingen hiermee zelf een exoskeleton arm kunnen opbouwen. De eerste hoofdstukken geven een theoretische uitleg over de biologische en de mechanische aspecten van de armbeweging en een algemeen beeld over de werking en de toepassingen van exoskeletten. De volgende hoofdstukken zijn meer praktijkgericht, hierin moeten de leerlingen stapsgewijs de verschillende onderdelen leren kennen, om dan uiteindelijk tot een volledige exo-arm te komen. De hardware bestaat uit mechanische deelstukken van de arm die door de leerlingen in elkaar moeten gezet worden (Figuur 8). Hiervoor zijn de nodige bouten en moeren voorzien. Om de arm te laten bewegen is er een servomotor voorzien die de leerlingen op de arm bevestigen. Als laatste bevat het pakket ook nog een sensor, voor het standaardpakket is dit een load cell (Figuur 9). Deze load cell wordt op de onderarm gepositioneerd. De kit bevat ook nog een microcontroller, een Arduino, voor de aansturing van de mechanische arm. Buiten het standaardpakket kan er ook nog een extensie aangekocht worden. Deze extensie bevat een EMG-sensor (Figuur 10) die als alternatief voor de load cell kan dienen. Figuur 11 toont de volledige geassembleerde arm. Na het volgen van het handboek en opbouwen van het exoskelet kunnen de positieve en negatieve punten van deze kit opgesomd worden.

2.2.1 Standaardpakket

Positieve punten:

- Het exoskelet is makkelijk in elkaar te zetten;
- De tutorials zijn makkelijk te volgen en de codevoorbeelden worden goed uitgelegd zodat beginnende programmeurs toch een kleine achtergrond krijgen met wat ze aan het programmeren zijn;
- Het boek is stapsgewijs opgebouwd, het begint met een basissysteem daarna komen de complexere systemen;
- De kostprijs van de kit is niet overdreven hoog, ongeveer 170 euro voor het standaardpakket zoals is weergegeven in Figuur 7;
- Uitleg van de kalibratie van de servomotor is goed en heeft duidelijke educatieve waarde;
- De veiligheid wordt zeer goed in acht genomen.

Negatieve punten:

- De foto's bij de assemblage waren soms onduidelijk, dit leidde soms tot verwarring;
- De assemblage van motor en onderarm om een mechanische rem te bekomen als de arm volledig is uitgestrekt, is niet duidelijk aangegeven;
- De verbinding tussen de servomotor en de onderarm is niet optimaal, dit zorgt voor ongemak bij het dragen van de arm;
- De load cell is niet nauwkeurig genoeg om de arm juist te laten werken. Dit komt doordat de kracht op de load cell wordt gegenereerd door deze vast te klemmen op de elleboog en deze dan

te doen buigen wanneer de arm omhooggaat. Deze buiging is niet optimaal omdat de motor niet krachtig genoeg is, hierdoor verandert de kracht op de load cell niet lineair.;

- De studenten moeten niet veel zelf bedenken, ze moeten vooral code overschrijven uit het boek.
- Er miste een vorm van theoretische diepgang rond de verschillende componenten waardoor de werking van sommige componenten niet duidelijk was;
- De servomotor is niet krachtig genoeg, hierdoor kan die gemakkelijk tegengewerkt worden. Het is ook moeilijk te voelen of de motor meewerkt of niet;
- Veel materiaal dient zelf voorzien te worden: USB-kabel, soldeermateriaal, weerstanden, PC;
- De kit is niet toegankelijk voor studenten met beperkte technische achtergrond, hiervoor is die te complex. De bijgevoegde code is goed uitgelegd, maar de code om de arm als een assistieve arm te laten werken is niet aanwezig. Dit is voor leerlingen met weinig programmeerervaring te moeilijk om zelf te programmeren;
- De exo-arm is niet verbonden met de leefwereld van de studenten, hierdoor zullen ze minder gemotiveerd zijn om het project tot een goed einde te brengen;
- De arm cuffs zitten redelijk slecht, er is geen zacht materiaal gebruikt waardoor het na een tijd redelijk vervelend zit;
- De kalibratie van de load cell is niet nauwkeurig, dit komt omdat er enkel het verschil wordt genomen tussen de waarde van de sensor met en zonder last. Er wordt geen rekening gehouden met andere mogelijk bestaande fouten, zoals niet-lineariteiten in de load cell of verschillen in doorbuiging bij mensen met grotere of kleinere armen;

2.2.2 EMG-extensie

Positieve punten:

- Het handboek legt de werking van de spieren en de redenering tot het gebruik van EMG goed uit;
- De software is eenvoudig en dus ook begrijpelijk voor mensen met een minder technische achtergrond.

Negatieve punten:

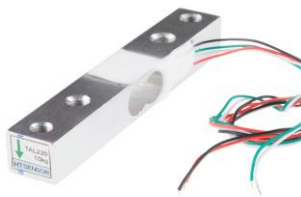
- Er is geen elektrisch schema te vinden over de EMG-sensor. Ook wordt er niet aangegeven wat de verschillen zijn tussen de signal-output en de raw-output;
- De verbindingen moeten gesoldeerd worden, dit zorgt mogelijk voor een moeilijkheid voor mensen die hier geen ervaring mee hebben;
- De kit bevat weinig elektrodes, hierdoor kan de sensor maar enkele keren gebruikt worden;
- De aanwezige elektrodes waren te kort om hoogkwalitatieve EMG-signalen te bekomen;
- De gegeven code is te simpel, er kan geen accuraat werkende exo-arm mee ontwikkeld worden.



Figuur 7 Ontvangen kit uitgepakt



Figuur 8 Onderdelen van EduExo arm [26]



Figuur 9 Load cell [27]



Figuur 10 EMG-sensor



Figuur 11 Volledig arm EduExo [26]

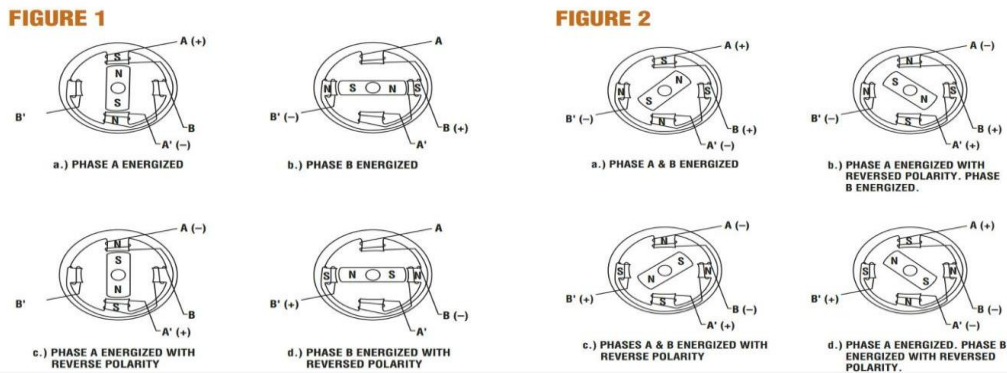
2.3 Onderzoek naar componenten

De belangrijkste keuze in het ontwikkelen van deze exo-arm is het kiezen van de juiste componenten. Op basis van deze keuze zal het pakket verder uitgewerkt worden. Dit hoofdstuk geeft een theoretische achtergrond bij de verschillende onderzochte motoren, sensoren en microprocessors. Een belangrijk aspect dat de keuze van de componenten beïnvloedt is de educatieve diepgang die de sensor biedt. Er moet voldoende samenhang zijn tussen de onderzochte leerplandoelstellingen en de keuze van de sensor. Deze educatieve diepgang weegt het zwaarste door bij de keuze van de sensor.

2.3.1 Motoren

2.3.1.1 Stappenmotor

Stappenmotoren werken met behulp van elektromagneten, de elektromagneten worden beurtelings ontladen en opgeladen afhankelijk van de gewenste rotatie. Wanneer een magneet is opgeladen trekt het de tandwielen van de motor aan waardoor deze roteert tot de tandwielen recht tegenover de opgeladen elektromagneet staan. Daarna wordt de volgende magneet opgeladen en de huidige ontladen waardoor de tandwielen zich opnieuw verplaatsen. Op deze manier kan de motor een stap zetten [28]. Figuur 12 geeft deze werking weer.



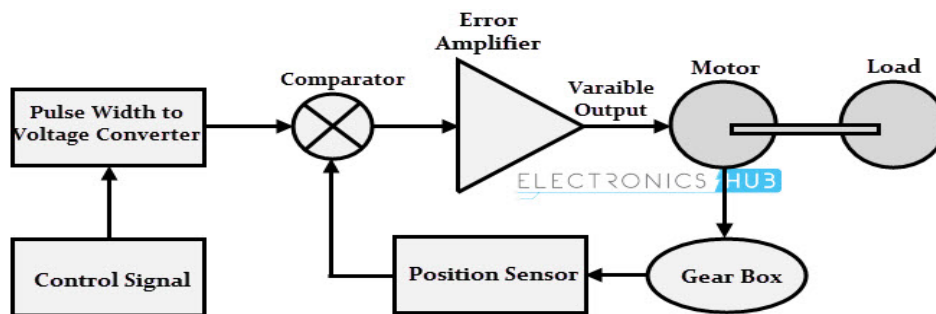
Figuur 12 Werking stappenmotor [28]

2.3.1.2 Servomotor

De servomotor bestaat uit een motor (DC of zelden AC), een potentiometer, tandwielen en een intelligent circuit zoals weergegeven in Figuur 13. In een DC of AC servomotor wordt er intern gewerkt met tandwielen om de snelheid (Rounds Per Minute, RPM) te verlagen en het koppel te verhogen dat de DC of AC motor kan leveren.

Een servomotor wordt aangestuurd door middel van een Pulse Width Modulation (PWM) signaal dat intern geconverteerd wordt naar een hoek. Vervolgens wordt deze hoek vergeleken (comparator) met de positie van de motor door middel van een positiesensor (typisch een potentiometer) en komt er een error signaal uit de comparator. Dit wordt daarna versterkt door een versterker. Vervolgens wordt dit versterkte error signaal doorgevoerd naar de motor, dit signaal zal steeds aanwezig zijn als de motor niet in zijn gewenste positie staat. Vanaf het moment dat de motor in zijn gewenste positie staat, wordt het error signaal nul en blijft de motor staan. De meest gebruikte interne controller voor een servomotor is een PID-regelaar [29].

Een voordeel van een servomotor ten opzichte van de stappenmotor is dat de servomotor geen constante stroom nodig heeft. De servomotor neemt maar zoveel stroom als nodig is voor de huidige beweging terwijl de stappenmotor constant gestuurd wordt door eenzelfde stroom [30].



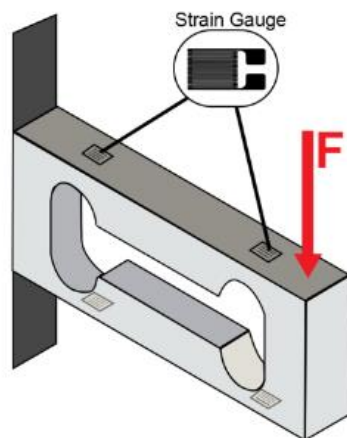
Figuur 13 Interne werking servomotor [30]

2.3.2 Sensoren

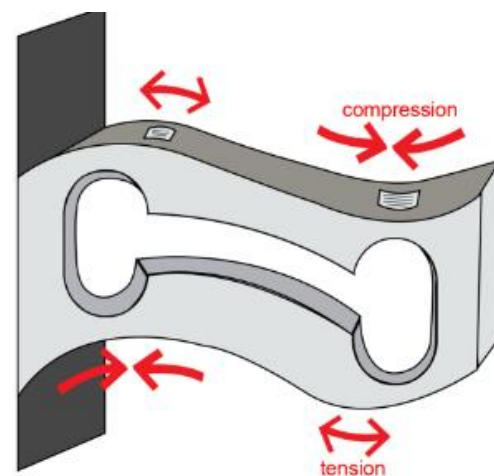
2.3.2.1 Load cell

Een load cell bestaat uit een Wheatstone-brug van 4 weerstanden, aan de hand van de buiging van de load cell zal de spanning aan de uitgang veranderen. Figuur 14 geeft een mogelijke implementatie van een load cell weer. Op Figuur 14 zijn 4 rekstrookjes geplaatst die intern met behulp van een Wheatstone-brug zijn verbonden. Wanneer de load cell buigt zoals weergegeven in Figuur 15 dan zullen deze rekstrookjes uitzetten of inkrimpen waardoor hun weerstand verandert. Doordat er een constante stroom

door de rekstrookjes vloeit zal de uiteindelijke uitgangsspanning veranderen omdat de interne weerstand ook veranderd is [31]. Het type van deze load cell is het beam type, andere mogelijke types zijn het can type, het S type en het washer type [32]. Deze laatste types worden niet meer verder gebruikt en zullen daarom niet verder besproken worden.



Figuur 14 Load cell [31]

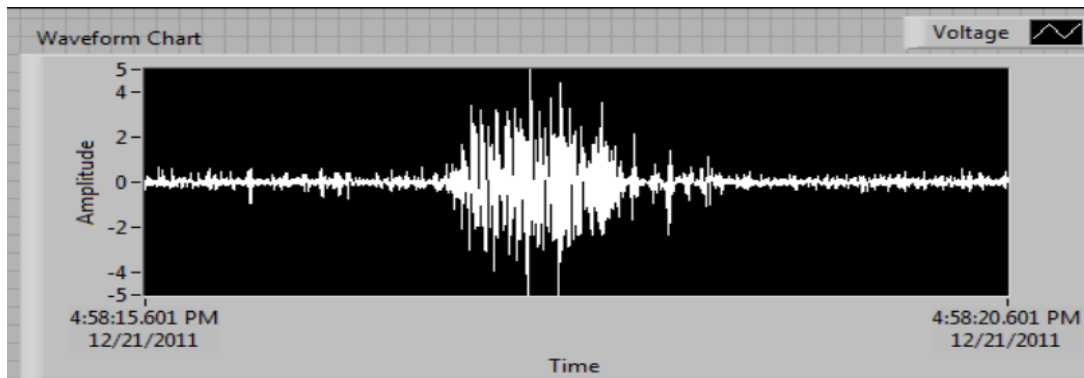


Figuur 15 Buiging load cell [31]

Een voordeel van deze sensor is de kostprijs. Een nadeel is de snelheid en daarmee ook de gevoelsmatigheid in vergelijking met andere sensoren zoals de EMG-sensor, aangezien dat er bij de load cell pas iets opgemeten wordt als de gebruiker al een beweging doet. Dit werkt dus minder gevoelsmatig. Dit is een type van admittantie controller waarbij een kracht wordt opgemeten en de beweging wordt gecontroleerd (door bv. een servomotor te bewegen). De tegenhanger hiervan is een impedantie controller waarbij een positie wordt gemeten en de kracht gecontroleerd wordt (typisch met een *direct torque control* motor, DTC) [26]. De educatieve mogelijkheden van beide systemen bestaan uit het moment berekenen op de motor en daarbij de overeenstemmende krachten te berekenen.

2.3.2.2 EMG-sensor

De elektromyografie- of EMG-sensor is een sensor die elektrische signalen in de spieren en zenuwen meet. Deze signalen worden vanuit de hersenen door het zenuwstelsel naar de spier gestuurd. Dit resulteert in een depolarisatie/repolarisatie golf in de spiervezels. Deze golf creëert een actiepotentiaal in de spiervezel, die leidt tot de verplaatsing van elektrische ladingen. Deze elektrische activiteit zorgt dan voor een elektrisch signaal in de spieren dat kan worden opgevangen door strategisch geplaatste elektrodes [12]. Voor onze toepassing kan de sensor aan de bovenarm van de gebruiker bevestigd worden. De elektrodes van de EMG-sensor staan hierbij op de biceps terwijl de referentie elektrode aan de onderkant van de arm of op een andere botachtige structuur aangebracht worden. Dit kan op een plaats op de arm waar geen spier zit of bijvoorbeeld op de achterkant van de rug rond de ruggenwervel. De referentie moet hier geplaatst worden omdat de sensor dan geen actiepotentialen uit de spier ontvangt, enkel de ruis van het lichaam wordt op deze positie gemeten zodat dit als referentie kan dienen voor de actiepotentialen zoals een grond als referentie dient bij elektrische signalen. Deze signalen zullen variëren in grootte afhankelijk van de mate van het opspannen of ontspannen van de gemeten spier. Deze variatie uit zich in de uitgangsspanning van de sensor. Een gespannen spier zal dus voor een grotere spanning zorgen dan een ontspannen spier. Dit omdat een gespannen spier meer actiepotentialen bevat dan een ontspannen spier. Figuur 16 geeft een opgemeten EMG-signaal uit een biceps weer.



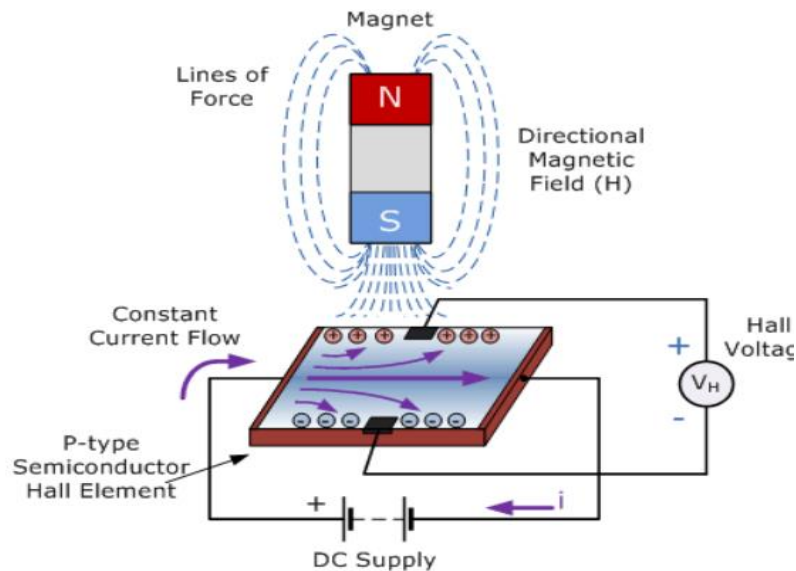
Figuur 16 EMG-sigitaal uit biceps [12, p. 2]

Deze sensor werkt gevoelsmatiger dan de load cell, omdat er bij de beweging aan de spier zelf gemeten wordt waardoor de mechanische arm al kan bewegen alvorens de persoon zijn arm effectief in beweging is. De EMG-sensor kan onafhankelijk van het mechanisch design op het lichaam geplaatst worden in tegenstelling tot een load cell die afhankelijk is van een mechanisch ontwerp om een juiste werking te garanderen. Een accuratere sensor zorgt dat het exoskelet beter kan reageren op de bewegingen van de gebruiker. Een nadeel is wel dat deze sensor duurder is omdat er met zeer kleine spanningen wordt gewerkt, hierdoor is de EMG-sensor wel aanzienlijk gevoeliger dan een load cell. Een bijkomend nadeel is dat de sensor op de huid van de persoon moet worden aangebracht, dit kan tot mogelijke huidirritatie leiden. Om de sensor te bevestigen zijn elektrode pads nodig, het nadeel hiervan is dat deze vaak vervangen moeten worden en bijna niet meer herbruikbaar zijn. Het is tevens net iets complexer om nuttige gegevens uit een EMG-sensor te halen dan uit een load cell. Men kan bijvoorbeeld een Fuzzy regelaar gebruiken om nuttige data te verkrijgen uit de signalen van de EMG-sensor [33], [34]. Op educatief vlak kunnen de spierstructuur en de aansturing van de spieren uitgelegd worden.

2.3.2.3 Hall-effect sensor

De Hall-effect sensor werkt met behulp van magnetisme en het Hall-effect. Het Hall-effect zegt dat als een magnetisch veld loodrecht op een geleider aangelegd wordt dan zal dit magnetisch veld de negatieve elektronen en positieve gaten afbuigen zoals weergegeven is in Figuur 17 Deze afbuiging is aan de Lorentzkracht te danken, dit is de kracht die een magnetisch veld uitoefent op een bewegende lading (elektron in de geleider). Deze kracht kan de richting van de bewegende lading veranderen. Eén kant waar er meer elektronen zijn ten opzichte van een andere kant in een geleider creëert een potentiaalverschil, dit spanningsverschil heet de hallspanning.

Hoe groter de kracht van het magnetisch veld, des te groter zal de spanning over de geleider zijn. Als de afstand van de magneet tot de sensor vergroot zal de spanning over de geleider verkleinen aangezien de magnetische veldsterkte zal dalen en daarbij ook minder kracht zal uitoefenen op de ladingen.



Figuur 17 Werking hall-effect sensor [35]

De educatieve mogelijkheden van de Hall-effect sensor zijn breed. Zo kan deze sensor onder andere de magneetwerking, de Lorentzkracht en het Hall-effect aantonen. De linkerhandregel om de richting van de Lorentzkracht te achterhalen kan men met een Hall-effect sensor ook aantonen.

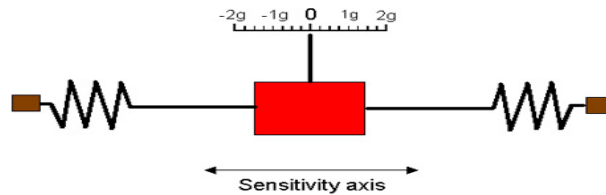
2.3.2.4 IMU

IMU-sensoren zijn MEMS-sensoren die bestaan uit een 3-assige accelerometer die de acceleratie van de chip opmeet alsook een 3-assige gyroscoop die de rotatie van de sensor opmeet. Dit kan nuttige informatie opleveren in verband met de hoek waarin de chip zich bevindt. In een IMU-sensor zit ook nog een 3-assige magnetometer die informatie geeft over de verdraaiing ten opzichte van het magnetische noorden [36]. Een IMU die alle 3 deze sensoren bevat, wordt een 9-DOF (*Degrees Of Freedom*) IMU genoemd. Het aantal DOF of vrijheidsgraden staat voor het aantal onafhankelijke parameters die de IMU kan uitlezen en waarmee het dus het fysische systeem kan definiëren. Dit soort sensor wordt gebruikt om de positionering en rotatie van verschillende objecten te meten, kortom inertie metingen. De keuze voor het gebruik en onderzoek van deze component in het project zit in het feit dat deze redelijk veel gebruikt wordt om bewegingen op te meten en op te slaan, zoals men doet in *motion capture* [37]. In het geval van exoskeletonen wordt dit voornamelijk gebruikt bij het opmeten van lichaamsparameters tijdens een revalidatie, voornamelijk bij een gang analyse van een patiënt [38], [39], [40].

Accelerometer

Een accelerometer werkt op basis van de Tweede Wet van Newton. Deze wet stelt dat een verandering van impuls van een voorwerp recht evenredig is met de resulterende kracht op dat voorwerp ($F = m * a$). In een simpele versie van een accelerometer kan dit voorgesteld worden als een massa-veersysteem zoals weergegeven in Figuur 18. Hierbij is de massa van het rode blokje bekend en meet deze sensor de kracht waarmee de veren uitgetrokken worden. De kracht die het blokje uitoefent op de veren is gelijk aan de kracht die de veren zullen uitoefenen door een vervorming van de veren die men via de wet van Hooke ($F = \text{veerconstante} * \Delta \text{ lengte}$) kan berekenen.

Uit deze 2 waarden wordt dan de versnelling berekend aan de hand de Tweede Wet van Newton ($a = F/m$).

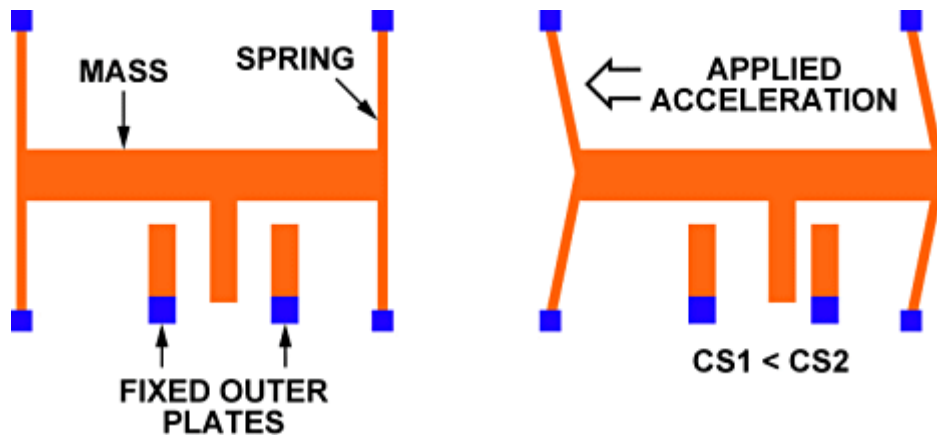


Figuur 18 Principiële accelerometer [41]

Hetzelfde principe wordt toegepast in een MEMS accelerometer. Het verschil is dat de kracht die de massa op de veren uitoefent capacitief wordt ingelezen. Figuur 19 toont de werking van zo een MEMS accelerometer. De capaciteit van een vlakke condensator wordt weergegeven in formule (1):

$$\text{Capaciteit} = \text{permittiviteit} * \frac{\text{Oppervlakte}}{\text{afstand tussen de platen}} \quad (1)$$

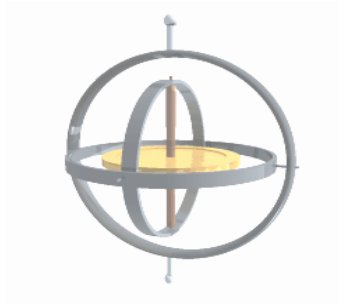
De werking van de accelerometer is gebaseerd op formule (1). Als de massa een kracht ondervindt dan zal deze massa verplaatst worden. De afstand tussen de vaste plaat (plaat met blauw uiteinde in Figuur 19) en de plaat op de massa zal vervolgens toenemen. Door dit afstandsverschil kan er dan een capaciteitsverschil gemeten worden. Dit capaciteitsverschil kan men correleren aan de kracht op de veren aangeduid met 'SPRING' in Figuur 19. Hier zitten buiten de wet van Hooke, de Tweede Wet van Newton en het principe van zwaartekracht nog educatieve mogelijkheden in namelijk het begrip capaciteit [42].



Figuur 19 MEMS accelerometer [42]

Gyroscoop

Een gyroscoop is een sensor die de hoeksnelheid meet. Uit deze hoeksnelheid kan de oriëntatie in graden berekend worden door de hoeksnelheid te integreren. Deze sensor kan voorgesteld worden als een tol, die aan een hoge snelheid draait om drie onafhankelijke assen, waarvan één de tol-as zelf is zoals is weergegeven in Figuur 20. Door de gelijkmatige massaverdeling om de as ligt het middelpunt van de tol precies op het midden van de as. Dit volgt het principe van behoud van impulsmoment dat zegt dat als een voorwerp eenmaal in een bepaald tempo aan het draaien is, het de neiging heeft om deze draaiing vol te houden. Er is een externe kracht nodig om de draaiing te veranderen, als deze niet aanwezig is wordt het impulsmoment behouden [43].

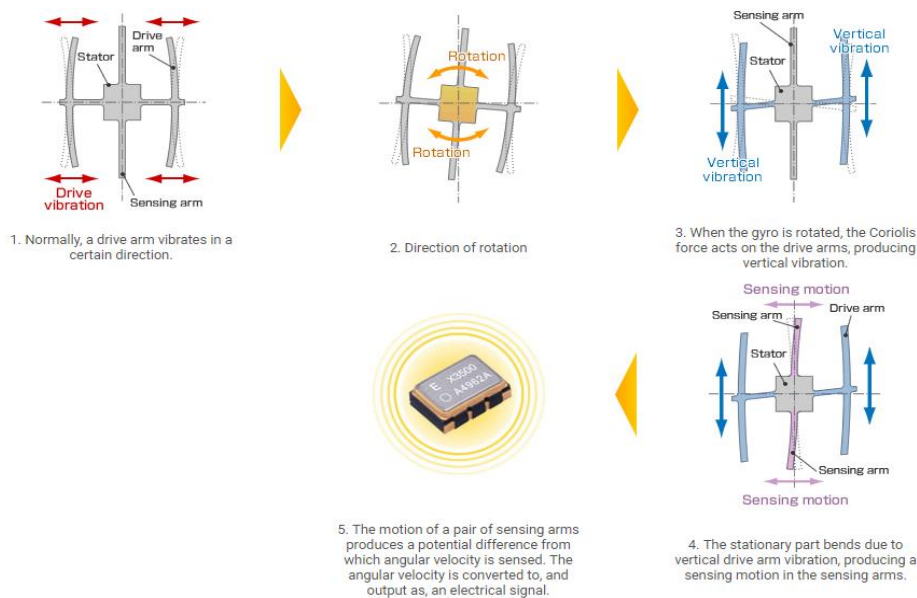


Figuur 20 Gyroscop in cardanische ophanging [44]

Een MEMS-gyroscop bestaat uit een trillende massa die op een vaste frequentie trilt dankzij een kristal dat een welbepaalde eigenfrequentie heeft. Wanneer de gyroscop beweegt dan zal deze steeds terug naar zijn rustpositie willen terugkeren en zal deze dus een corioliskracht uitoefenen op de meetarmen die zich op de stator bevinden in Figuur 21. Hier bestaan verschillende uitvoeringen van zoals bijvoorbeeld stemvorken die bij een rotatie gaan plooiën onder invloed van de corioliskracht. Ook bestaan er kamachtige structuren die op en neer trillen en bij een rotatie verschuiven dankzij corioliskrachten en die dan capacitief kunnen ingelezen worden [45], [46]. Een nadeel dat de gyroscop heeft is het fenomeen genaamd gyroscopische drift. Dit is te wijten aan de integratie van twee fenomenen enerzijds de traag veranderende *bias instability* en anderzijds de hoogfrequente ruis variabele genaamd angular random walk (ARW) [47]. De bias instability komt overeen met de minimale afwijking die niet geschat kan worden, deze afwijking ontstaat door temperatuurwijzigingen en interne vibraties van de gyroscop. De ARW is het equivalent van de integratie van witte ruis in de output van de gyroscop. [48] Om de gemeten hoeksnelheid te converteren naar een hoek moet er geïntegreerd worden over de snelheid. De integratie zorgt ervoor dat de fouten ook geïntegreerd worden, hierdoor zullen deze zwaarder doorwegen waardoor er drift ontstaat. De principiële formule (2) voor de gyroscop is:

$$GyroX (graden) = \left[\begin{array}{l} Hoeksnelheid gyroX \left(\frac{graden}{s} \right) \\ + bias instability \left(\frac{graden}{s} \right) \\ + ARW \left(\frac{graden}{s} \right) \end{array} \right] * dt \quad (2)$$

Als de gyroscop een rotatie van een bepaald aantal graden uitvoert in een richting met een constante hoeksnelheid en vervolgens een rotatie met hetzelfde aantal graden, dezelfde hoeksnelheid en in tegengestelde richting. Dan zal de oriëntatie (in graden) van de sensor niet meer dezelfde zijn als de verwachte initiële oriëntatie maar deze zal iets verschoven zijn door de geïntegreerde bias instability en ARW. Dit fenomeen heet gyroscopische drift. Concreet houdt dit in wanneer er een beweging is gedaan met de gyroscop, het onmogelijk is om terug te keren naar de initiële stand van de gyroscop aangezien dat er gyroscopische drift bij de beweging is opgeteld. Als de gyroscop de initiële stand terug bereikt dan is deze drift er nooit vanaf getrokken en zal deze positie iets afwijken ten opzichte van de initiële stand.



Figuur 21 MEMS-gyroscoop [45]

Magnetometer

De magnetometer is typisch een Hall-effect sensor, voor verdere uitleg verwijzen we naar voorgaande paragraaf 2.3.2.3 over de Hall-effect sensor.

Conclusie deelcomponenten IMU

De voordelen van dit type sensoren zijn de veelzijdigheid en het feit dat ze op verschillende posities op de arm gebruikt kunnen worden. Doordat de IMU uit 3 verschillende sensoren bestaat, kan datafusie zorgen voor accurate weergaves van de rotatie en oriëntatie. Hierbij kunnen de sensoren als referentie dienen ten opzichte van elkaar om zo de berekeningen van de rotatie en oriëntatie te verbeteren. Andere voordelen van de 3 verschillende sensoren op een IMU zijn de verschillende educatieve mogelijkheden. Een nadeel van de sensor is het feit dat de info over de beweging pas verkregen wordt nadat de beweging gedaan is. Dit kan problemen geven bij het *realtime* werken van de sensor. Bijvoorbeeld wanneer de arm omhoog beweegt dan zal de IMU dit meten, maar voordat deze meting ontvangen en gefilterd is door de microprocessor zal de arm van de gebruiker al iets verder naar boven hebben bewogen. Hierdoor lopen de metingen altijd een beetje achter op de effectieve beweging.

2.3.2.5 Flex-sensor

Een flex-sensor is een rekstrookje waarvan de weerstand verandert bij een buiging. Dit is eigenlijk een soort van load cell maar dan zonder Wheatstone-brug. De verandering van weerstand gebeurt lineair, dit betekent dat de spanning over de sensor ook lineair verandert. In tegenstelling tot de load cell is deze sensor heel elastisch waardoor deze makkelijk kan plooiën. Zo kan de flex-sensor bijvoorbeeld makkelijk in de plooiing van de elleboog geplaatst worden. Het uitlezen van deze sensor gebeurt typisch met behulp van een spanningsdeler.

2.3.2.6 BCI-sensor

Een BCI-sensor registreert elektrische signalen die het brein uitstuurt. Deze sensor meet de intentie om een actie te doen door het zenuwstelsel uit te lezen. Dit in tegenstelling tot de EMG-sensor die de actie uitleest die binnenkomt bij de spieren. Om de signalen uit te lezen gebruikt een BCI-sensor elektro-encefalografie (EEG). Dit is een methode waarmee hersengolven gemeten worden. Door gebruik van

deze sensoren zou de arm heel nauwkeurig kunnen werken, aangezien dat zowel naar de echte arm als het exoskelet dezelfde signalen worden gestuurd. Een nadeel is wel dat zo een BCI-sensor zeer complex is en dat het misschien het niveau van het project te boven gaat. Ook is de kostprijs van een BCI-sensor zeer hoog waardoor het misschien eerder als theoretische uitwerking kan dienen. Dit kan educatieve informatie bieden over de werking van de hersenen tot de werking van het zenuwstelsel.

2.3.3 Microprocessors en microcontrollers

Om de data uit de verschillende sensoren te verwerken alsook de motor aan te sturen is er een microcontroller met een microprocessor nodig. Mogelijke microcontrollers die gebruikt kunnen worden zijn de Arduino, Beaglebone Black of Raspberry Pi.

2.3.3.1 Arduino

Arduino is wereldwijd een van de bekendste en meest gebruikte microcontrollers. Deze kan gebruikt worden om diverse sensoren in te lezen via verschillende communicatieprotocollen zoals I2C en SPI. De microcontroller heeft ook verschillende uitgangen die allerlei elektronica kunnen aansturen zoals motoren of LEDs. Intern bevat een Arduino zowel ADCs als DACs hierdoor kan zowel analoge als digitale data ontvangen en uitgestuurd worden.

Op vlak van software heeft de Arduino een eigen programmeertaal namelijk de Arduino programming language. Deze taal is een vereenvoudigde versie van C++. Er zijn er ook verschillende functies en libraries toegevoegd om het gebruik te vereenvoudigen. Arduino heeft ook een grote online-gemeenschap, dit is handig voor beginnende programmeurs omdat ze zo een hulplijn hebben als ze met vragen zitten. Dankzij deze gemeenschap bestaat er ook een database met talloze voorbeeldprojecten die beginnende programmeurs op weg kunnen helpen. De kostprijs van een Arduino is naar behoren, neem hierbij als voorbeeld de Arduino Uno (Figuur 22) die maar 20 euro kost of zelfs een Arduino Nano die maar 16 euro kost. Dit is zeer weinig in vergelijking met andere microcontrollers en microprocessors die meer dan 40 euro kunnen kosten.

Een nadeel van Arduino is dat het geen eigen operating system heeft, hierdoor kan het niet standalone geprogrammeerd worden. Er is dus altijd nog een externe PC of laptop nodig. Een tweede nadeel is dat de Arduino op grafisch vlak niet sterk is, er kunnen moeilijk externe displays op aangesloten worden. Dit is vooral onhandig in een klasomgeving waarbij het praktischer is wanneer de leerlingen veranderingen kunnen waarnemen in een grafische gebruikersomgeving. Op vlak van dataopslag scoort de Arduino niet goed, neem bijvoorbeeld de Arduino Uno die een flashgeheugen heeft van 32 kB, een SRAM van 2 kB en een EEPROM van 1 kB [49].



Figuur 22 Arduino Uno [50]

2.3.3.2 Raspberry Pi

Een Raspberry Pi is een microprocessor die net als een Arduino gebruikt kan worden om allerlei sensoren en actuators aan te sturen of in te lezen. In tegenstelling tot een Arduino heeft een Raspberry Pi wel de mogelijkheid om een eigen operating system te draaien. Een voorbeeld van zo een operating system is Raspbian. Dit is een operating system dat gebaseerd is op Linux en dat speciaal voor de Raspberry Pi ontwikkeld is. Doordat er de mogelijkheid is om een operating system te draaien kan een Raspberry Pi als standalone computer werken indien er een scherm, een toetsenbord en een muis aanwezig en geconnecteerd zijn. Dit is in een klasomgeving handig aangezien er dan geen extra computers voorzien moeten worden.

Een voordeel van een Raspberry Pi ten opzichte van een Arduino is dat deze compatibel is met verschillende programmeertalen. Zo kunnen Python, Java, Javascript, HTML5, C en C++ allemaal op de Raspberry Pi geprogrammeerd worden.

Net als bij een Arduino bestaat er voor de Raspberry Pi ook een grote online-gemeenschap. Hierdoor bestaan er ook voor deze microprocessor talloze voorbeeldprojecten. Zo is er ook een grote bibliotheek van libraries beschikbaar, zo kan je een tal van libraries vinden op *PyPi.org*. Dit is tevens ook de database die gebruikt wordt door het commando 'pip install' te gebruiken om een library te installeren in een project [51].

Het geheugen van een Raspberry Pi is veel groter dan dat van een Arduino, aangezien dat er een externe SD-kaart kan ingestoken worden om de data op te slaan. Een ander voordeel van de Raspberry Pi ten opzichte van de Arduino is dat de Pi via Wi-Fi of Ethernet met het internet kan geconnecteerd worden. Dit is handig wanneer de leerlingen dingen moeten opzoeken op het internet. Via Wi-Fi zou de leerkracht ook met de Raspberry Pi's van de leerlingen kunnen connecteren, zo kan de vooruitgang van de leerlingen beter gecontroleerd worden.

Een nadeel van de Raspberry Pi is dat de eerste installatie van een operating system redelijk ingewikkeld is, eerst moet een operating system op een geformatteerde SD-kaart geplaatst worden. Vervolgens moet dit operating system nog geïnstalleerd worden op de Raspberry Pi zelf. Dit kan enige tijd in beslag nemen. Dit zou verholpen kunnen worden door Raspberry Pi's aan te kopen waarbij deze installatie al gedaan is. Hierdoor zal de kostprijs wel oplopen. Een ander nadeel van de Raspberry Pi ten opzichte van een Arduino is dat deze geen interne ADC heeft, hierdoor kunnen er enkel digitale signalen ingelezen worden. Dit probleem kan verholpen worden door een externe ADC toe te voegen, maar dit doet de kostprijs stijgen. In vergelijking met een Arduino is een Raspberry Pi een stuk duurder, zo kost een Raspberry Pi 3 (Figuur 23) ongeveer 35 euro [52]. Een Raspberry Pi heeft ook een externe voeding nodig in tegenstelling tot de Arduino die door een laptop zijn USB-uitgang gevoed kan worden [53].

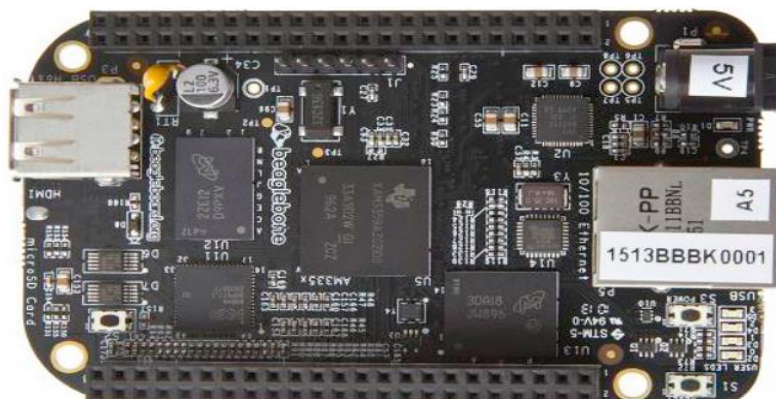


Figuur 23 Raspberry Pi [52]

2.3.3.3 BeagleBone

De laatste en waarschijnlijk ook minst bekende microprocessor die wordt onderzocht is de BeagleBone Black (Figuur 24). Deze microprocessor kan net als de Raspberry Pi een eigen operating system draaien, maar in tegenstelling tot de Raspberry Pi is dit bij de BeagleBone wel automatisch geïnstalleerd. Een BeagleBone Black heeft 2 46-pinheaders waardoor het 92 connecties kan maken met externe hardware. Dit is veel meer dan zowel de Arduino Uno en een Raspberry Pi die respectievelijk 20 en 40 connecties hebben. Een BeagleBone Black kan hierdoor simultaan meer sensoren uitlezen en actuatoren aansturen. In tegenstelling tot een Raspberry Pi bevat een BeagleBone Black wel een interne ADC. Dit zorgt ervoor dat de BeagleBone wel analoge input kan ontvangen. Een ander voordeel van de BeagleBone is het feit dat zowel de hardware als de software open-source zijn, hierdoor kunnen ontwikkelaars zelf alle specificaties van de BeagleBone opzoeken en deze aanpassen naar hun wensen.

Op vlak van multimedia doet de BeagleBone Black duidelijk onder voor de Raspberry Pi 3, de grafische specificaties van de Raspberry Pi zijn hoger en de Raspberry Pi bevat een on-board audio Jack voor geluid en HDMI-poort voor beeld, terwijl de BeagleBone zowel geluid als beeld moet sturen via zijn HDMI-poort. Hierdoor is het voor beginners complexer om het geluid van het beeld te scheiden bij een Beagle Bone Black. Net als een Raspberry Pi 3 heeft een BeagleBone Black een Ethernet-poort om met het internet te verbinden, maar het bevat geen on-board 802.11 Wireless LAN of Bluetooth wat de connectiviteit niet ten goede komt. De kostprijs voor een BeagleBone Black is ongeveer 55 euro, dit is hoger dan een Raspberry Pi en een Arduino. De BeagleBone is een minder gebruikt microprocessor dan de Raspberry Pi hierdoor is de online-gemeenschap (<http://beagleboard.org/Community>) ook minder uitgebreid. Daardoor moeten beginnende gebruikers meer zelf ontdekken. Dit resulteert in een grotere kans op problemen. Tabel 1 vergelijkt de Raspberry Pi 2 en 3 met de BeagleBone Black. Op vlak van processing power is de BeagleBone Black duidelijk minder goed dan de Raspberry Pi 3 [54]. Dit is te zien aan het feit dat de Raspberry Pi 3 een core heeft van 64-bit in vergelijking met de 32-bit core van de Beaglebone Black. Hierdoor kan de Raspberry Pi 3 meer en snellere berekeningen simultaan uitvoeren. Ook het RAM-geheugen speelt in het voordeel van de Raspberry Pi 3 doordat dit geheugen dubbel zo groot is zal de Raspberry Pi meer programma's en zwaardere operating systemen kunnen draaien.



Figuur 24 BeagleBone Black [55]

Tabel 1 Raspberry Pi vs BeagleBone [54]

Form Factor	Raspberry Pi 2	Raspberry Pi 3	Beaglebone
Processor	900 MHz quad-core ARM Cotex-A7 CPU	1.2 GHz 64-bit quad-core ARMv8 CPU	1 GHz TI Sitara AM3359 ARM Cortex A8
Architecture	32-bit	64-bit	32-bit
Instruction set	ARMv7	ARMv8	ARMv7
RAM	1 GB LPDDR2	1 GB LPDDR2	512MB DDR3L 4GB on-board
Storage	SD	SD	eMMC, MicroSD

3 Materialen en methode

3.1 Keuze uitwerkingsvorm

Een eerste belangrijke keuze is de manier waarop de context rond het exoskelet opgebouwd is. Hiervoor bestaan verschillende mogelijkheden die allemaal hun voor- en nadelen hebben zowel op educatief als technisch vlak. Om een juiste keuze te kunnen maken is er een enquête opgesteld met daarin drie mogelijke contexten om het exoskelet op te bouwen. Deze enquête werd dan naar het doelpubliek gestuurd zodat er een gefundeerde keuze kon gemaakt worden. De 3 uitwerkingsmogelijkheden voor het exoskelet zijn: een assistief exoskelet, een exoskelet voor revalidatie en een exoskelet voor mimicking. In de enquête zijn deze 3 verschillende mogelijkheden beschreven in de vorm van een verhaaltje dat de leerlingen moet warm maken om aan de slag te gaan met het exoskelet. De leerlingen moesten elke uitwerkingsmogelijkheid een score op 5 geven, zodat er uiteindelijk een algemeen beeld is over de populariteit van elke uitwerkingsmogelijkheid. In de volgende paragrafen worden de uitwerkingsmogelijkheden kort toegelicht en wordt het verhaal dat de doelgroep te zien kreeg weergegeven.

3.1.1 Assistief exoskelet

Een assistief exoskelet heeft als doel om de gebruiker te ondersteunen bij bewegingen die anders te zwaar zouden zijn. Dit soort exoskelet wordt vooral gebruikt bij mensen wiens spieren niet meer sterk genoeg zijn om de normale bewegingen uit te voeren. Ook kan het gebruikt worden om de spierkracht te versterken bij arbeiders die zwaar werk leveren.

Context verhaal:

Lara 16 jaar is cool, slim en sportief. Later wil ze ingenieur worden. Want ze wil iets doen voor haar broertje Thomas. Thomas is 13 jaar en hij heeft de ziekte van Duchenne. Dit is een degeneratieve spierziekte die bijna uitsluitend bij jongens voorkomt. Vroeger werden jongens met Duchenne meestal geen twintig jaar, maar dankzij verbeterde behandeling is hun levensverwachting drastisch gestegen tot zelfs 40+ jaar. Ze kunnen studeren en werken, hun eigen leven leiden. Zoals de meeste jongens met de ziekte van Duchenne zit Thomas al sinds zijn tiende in een rolstoel. Dat vindt hij al lang geen probleem meer. Vervelender vindt hij dat hij de laatste tijd het steeds moeilijker heeft om zelfstandig te eten en te drinken. Als hij bijvoorbeeld een blikje cola naar zijn mond wil brengen, is zijn eigen arm en het blikje samen te zwaar voor Thomas. Het ontmoedigt hem dat hij nu zelfs aan zijn vrienden moet vragen om hem drinken te geven. Lara toonde een filmpje dat ze vond op internet aan haar broertje, iets over een assistief exoskelet en een robotarm. Thomas was enthousiast, het gaf hem wat hoop, dat zag Lara aan zijn ogen. Ze is vastbesloten hem zo'n robotarm te bezorgen, als het moet, maakt ze er gewoon zelf een. Wie helpt Lara en Thomas?

3.1.2 Exoskelet voor revalidatie

Dit exoskelet zal gebruikt worden als revalidatietoestel voor personen die omwille van een ziekte of ongeval moeten revalideren. In plaats van de persoon te helpen, werkt het exoskelet de gebruiker tegen zodat de spieren gecontroleerd belast kunnen worden om de spierkracht geleidelijk te kunnen vergroten.

Context verhaal:

Jan, 15 jaar, werd aangereden op zijn fiets. Helaas had hij zijn fietshelm niet op, en heeft hij ook hersenbeschadiging, een niet-aangeboren hersenletsel. Daardoor kan hij onder andere de rechterhelft van zijn lichaam niet goed gebruiken. De revalidatie richt zich vooral op het opnieuw leren gebruiken van zijn arm. Jan zijn spieren zijn er nog, maar door zijn hersenletsel kan hij geen signaal doorgeven aan zijn rechterarm. Hieraan wordt gewerkt met herhalingsoefeningen. Jan heeft elke dag een half uur kiné, de kinesiste oefent met hem om zijn arm vanaf zijn elleboog op te tillen, zij tilt voor hem zijn arm op, op en neer, op en neer. Door de neuroplasticiteit van de hersenen zal in theorie Jan uiteindelijk deze beweging terug zelf kunnen aansturen. Maar daarvoor moet Jan deze beweging heel vaak herhalen, op een correcte manier. Veel vaker dan hij kiné heeft. Een exoskelet dat deze beweging uitvoert en gaandeweg minder kracht uitoefent zou Jan kunnen helpen om zijn arm terug te leren gebruiken.

3.1.3 Exoskelet voor mimicking

Deze toepassing is iets anders dan de vorige twee aangezien in dit geval het skelet niet aan de arm van de gebruiker bevestigd wordt. Bij dit exoskelet zal de persoon met behulp van sensoren de arm vanop afstand besturen.

Context verhaal:

Thomas 18 jaar kan na jaren sparen eindelijk zijn droom waar maken. Een reis van 3 weken doorheen Australië, van Sydney tot het befaamde Uluru. Maar daar dan gaat het mis, tijdens een rit doorheen de Outback krijgt de jeep plots een klapband waardoor de wagen omslaat en Thomas uit de wagen geworpen wordt. Hij komt ongelukkig neer en breekt enkele wervels in zijn rug. Na het accident wordt hij zo snel mogelijk met een helikopter naar het lokale ziekenhuis gebracht. Al snel wordt duidelijk dat hij een operatie nodig heeft om zijn rug te herstellen, anders zou hij voorgoed verlamt kunnen zijn. Maar helaas zijn de artsen in het lokale ziekenhuis niet ervaren met dergelijke operaties, hierdoor zouden ze meer kwaad dan goed kunnen doen als ze toch de operatie zouden proberen. De hoofddarts van het ziekenhuis belt dadelijk rond of er in de buurt een arts is die de operatie zou kunnen uitvoeren. Maar helaas is de dichtstbijzijnde arts in Sydney, op meer dan 1000 km afstand van het ziekenhuis. Hij kan er dus onmogelijk geraken. Gelukkig is er in het ziekenhuis een exo-arm aanwezig waarmee de dokter uit Sidney de operatie van op afstand kan uitvoeren. Hierdoor kan Thomas gered worden en overleeft hij zijn Australisch avontuur zonder ernstige gevolgen.

3.1.4 Resultaat enquête

De enquête over de uitwerkingsmogelijkheden gaf volgende resultaten:

1. Exoskelet voor mimicking 4.33/5
2. Assistief exoskelet 4.18/5
3. Exoskelet voor revalidatie 3.39/5

Het exoskelet voor mimicking komt met de hoogste score uit deze enquête, dit zal dus de eerste uitwerkingsmogelijkheid zijn voor het exoskelet. Hierbij is er nog een bijkomend voordeel dat deze uitwerkingsmogelijkheid het eenvoudigst en veiligst is voor de leerlingen aangezien dat de arm en de sensoren afzonderlijk worden ophangen. Aangezien dat het assistief exoskelet ook een hoge score behaalt, is dit een mogelijke uitbreiding op het mimicking exoskelet. Op basis van deze gekozen uitwerkingsmogelijkheid zullen de nodige componenten gekozen worden.

3.2 Leerplandoelstellingen

Een belangrijk aspect van deze thesis is het educatieve luik. Om te zorgen dat dit luik in overeenstemming is met de leerstof die momenteel in de 3^{de} graad gezien wordt, vergelijken we de leerplandoelstellingen van de verschillende onderwijskoepels voor verschillende richtingen. Op basis van deze vergelijking kunnen vervolgens de juiste sensoren, motor en microprocessor gekozen worden. De richtingen die onderzocht worden zijn gekozen omwille van hun technische of wetenschappelijke achtergrond. Zo kan het project aan zoveel mogelijke leerplandoelstellingen voldoen. De onderzochte richtingen vallen zowel binnen het ASO als het TSO om een zo breed mogelijk doelpubliek te hebben.

3.2.1 ASO: Wetenschappen-Wiskunde

De eerste richting die onderzocht wordt is de richting: Wetenschappen-Wiskunde in het ASO. Tabel 2 toont de verschillende doelstellingen die dit project kan behalen en vergelijkt deze doelstellingen voor alle leerplannen in het Vlaamse onderwijs. Het VVKSO [56], GO! [57] en het PO [58] zijn de drie onderzochte scholenkoepels. Dit omdat deze 3 koepels meer dan 95 procent van de scholen in Vlaanderen vertegenwoordigen. Voor dit project wordt enkel naar Vlaamse scholen gekeken omdat dit de doelgroep is van RVO-society en in eerste instantie ook van COMmeto. De cursus wordt in eerste instantie in het Nederlands geschreven waardoor het onderzoeken van de leerplandoelstellingen voor de Vlaamse scholen een logische stap is.

Tabel 2 Belangrijkste leerplandoelstellingen ASO: Wetenschappen-Wiskunde

Leerplandoelstelling	Vak	VVKSO	GO!	PO	Mogelijke component
Berekening afgeleide	Wiskunde	X	X	X	IMU
Berekening integraal	Wiskunde	X	X	X	IMU
Bewerkingen met vectoren en coördinaatgetallen	Wiskunde	X	X	X	IMU, Load cell
Spanning, stroom, weerstand van componenten	Fysica	X	X	X	Load cell, Flex-sensor
Wet van Ohm	Fysica	X	X	X	Load cell, Flex-sensor
Versnelling als tijdsverandering per tijdseenheid	Fysica	X	X	X	IMU
Tweede wet van Newton	Fysica	X	X	X	IMU, Load Cell

Derde wet van Newton	Fysica	X	X	X	IMU, Load Cell
Zwaartekracht	Fysica	X	X	X	IMU, Hall-effect sensor
Magnetisme	Fysica	X	X	X	IMU, Hall-effect sensor
Lorentzkracht	Fysica	X	X	X	IMU, Hall-effect sensor
Werking spieren	Biologie (2de graad)	X	X	X	EMG-sensor

De vergelijking in Tabel 2 laat zien dat er binnen het ASO vooral binnen de vakken Fysica en Wiskunde veel mogelijkheden liggen. Ook Biologie biedt een mogelijkheid met de werking van de spieren, maar dit valt eerder binnen de leerstof van de 2^{de} graad. Terwijl de doelgroep toch eerder de 3^{de} graad is. Ook valt op dat de leerplandoelstellingen gelijklopend zijn voor de verschillende onderwijskoepels. De IMU is de sensor waarmee men in Wetenschappen-Wiskunde de meeste leerplandoelstellingen kan behalen. Daarnaast zijn er ook nog verschillende doelstellingen te behalen met de load cell, flex-sensor en EMG-sensor. De Hall-effect sensor haalt dezelfde doelstellingen als men met een IMU haalt doordat een IMU een Hall-effect sensor bevat.

3.2.2 TSO: Industriële-Wetenschappen

Tabel 3 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Industriële-Wetenschappen

Leerplandoelstelling	Vak	VVKSO	GO!	PO	Mogelijke component
Samen-gestelde beweging van een puntmassa. (Versnelling, snelheid, positie)	Toegepaste Wetenschappen en engineering	X	X	X	IMU
Krachten in de ruimte berekenen	Toegepaste Wetenschappen en engineering	X	X	X	IMU, Load cell
Werking servomotor	Toegepaste Wetenschappen en engineering	X	-	-	Servomotor
Programmeren met micro-controller	Toegepaste Wetenschappen en engineering	X	-	-	Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone
Afgeleide	Wiskunde	X	X	X	IMU
Integraal	Wiskunde	X	X	X	IMU
Vectoren	Wiskunde	X	-	-	IMU, Load cell

Deze richting is technischer georiënteerd, zeker binnen VVKSO vallen de meer technische aspecten van het project in de leerplannen. Opvallend is dat de leerplandoelstellingen minder overeenkomen tussen de verschillende onderwijskoepels. Zo zijn de werking van de servomotor, het programmeren met de microcontroller en het werken met vectoren enkel verplichte leerstof in het VVKSO. De IMU komt ook bij Industriële Wetenschappen naar voor als de meest geschikte component op vlak van educatieve mogelijkheden.

3.2.3 TSO: Industriële-ICT

Tabel 4 Belangrijkste leerplandoelstellingen: TSO: Industriële ICT

Leerplandoelstelling	Vak	VVKSO	GO!	PO	Mogelijke Component
Werking en opbouw micro-controller	Engineering	X	X	-	Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone
Basisprincipes programmeren kennen	Programmeren	X	X	X	Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone
ADC/DAC-omvorming	Elektronica	X	X	-	Flex-sensor, load cell, EMG-sensor
RC-servomotor	Elektriciteit	X	-	X	Servomotor
I2C-bussysteem	Interfacetechnieken	-	X	X	IMU
Sensoren	Elektronica	X	X	X	Alle sensoren
Elektrische eigenschappen van weerstanden en andere componenten	Elektriciteit	X	X	X	Load cell, flex-sensor

Uit Tabel 4 kan men concluderen dat er voor deze richting meer diepgang zit in praktische zaken zoals de werking van een servomotor. In vergelijking met het ASO waar er meer diepgang is in het theoretische zoals afgeleiden, krachten, etc. Zo past het gebruik van de sensoren en de servomotor perfect in de huidige leerplandoelstellingen. Tevens horen de ADC/DAC-omvorming van de gegevens uit sommige sensoren en het gebruik van het I2C om de sensoren uit te lezen in de huidige leerplandoelstellingen van Industriële-ICT. De load cell en flex-sensor zijn duidelijk de sensoren die het meest voorkomen in deze richting.

3.2.4 TSO: Elektriciteit-Elektronica

Tabel 5 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Elektriciteit-Elektronica

Leerplandoel stelling	Vak	VVKSO	GO!	PO	Mogelijke component
RLC-kring	Elektriciteit	X	X	X	Load-cel, Flex-sensor
Werking motor (Servo)	Elektriciteit	X	X	X	Servomotor
Werking en gebruik van micro-controller	Elektronica	X	X	X	Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone
Seriële communicatie	Elektronica	X	-	-	Alle sensoren
AD-conversie	Elektronica	X	X	X	EMG-sensor, Flex-sensor, Load cell
Afgeleide	Wiskunde	X	X	X	IMU
Integraal	Wiskunde	X	X	X	IMU

Alweer zijn hier de technische aspecten van het project meer op hun plaats dan de theoretische. De verschillen tussen de onderwijskoepels zijn minimaal. In deze richting is er eveneens geen duidelijke optimale sensor, dezelfde sensoren keren terug in de leerplandoelstellingen.

3.2.5 TSO: Elektromechanica

Tabel 6 Belangrijkste leerplandoelstellingen TSO: Elektromechanica

Leerplandoels telling	Vak	VVKSO	GO!	PO	Mogelijke component
Afgeleide	Wiskunde	X	X	X	IMU
Integralen	Wiskunde	X	X	X	IMU
Krachten	Mechanica	X	X	X	IMU, Load cell
Werking servomotor	Elektriciteit	-	X	X	Servomotor
Micro-controller werking	Elektronica	-	X	-	Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone

Bij deze richting zijn er op technisch vlak minder doelstellingen te behalen dan bij de voorgaande TSO-richtingen. Op theoretisch vlak is er wel een interessante mogelijkheid voor het berekenen van krachten in de Mechanica. De IMU komt uit deze vergelijking als beste sensor, buiten de load cell kunnen met de andere sensoren zelfs geen leerplandoelstellingen behaald worden.

3.2.6 Conclusie van de leerplandoelstellingen

De IMU is de beste sensor op vlak van de leerplandoelstellingen. Zowel binnen het ASO als het TSO komt deze sensor regelmatig aan bod. Andere sensoren waarmee nog extra leerplandoelstellingen kunnen behaald worden zijn de load cell, de flex-sensor en de EMG-sensor. Op vlak van motoren komt de servomotor overduidelijk in de leerplandoelstellingen van alle technische richtingen voor. In het ASO is de werking van de servomotor geen leerstof. Het gebruik en de werking van microcontrollers valt eveneens binnen de leerplandoelstelling van alle onderzochte TSO-richtingen, wederom is dit niet het geval voor het ASO.

3.3 Keuze componenten

Na het onderzoeken van de verschillende componenten is er uiteindelijk een keuze gemaakt over de te gebruiken componenten in het pakket. Deze keuze is gemaakt op basis van de keuze van uitwerking (mimicking), de leerplandoelstellingen en de technische specificaties van de verschillende sensoren, motoren en microcontrollers.

3.3.1 Motor

De keuze van de motor is gevallen op een servomotor, hiervoor zijn enkele redenen. Ten eerste neemt een servomotor een variabele stroom af in functie van de nodige torsie. Wanneer de servomotor stilstaat zal hij zeer weinig stroom gebruiken in tegenstelling tot de stappenmotor die altijd eenzelfde stroom gebruikt. Aangezien dat bij onze applicatie de motor regelmatig zal stilstaan is een servomotor een betere optie. Ten tweede is de servomotor ook makkelijker aan te sturen doordat het een intern circuit heeft dat een PWM-sigitaal omzet naar een hoek. Hierdoor moet de microprocessor dit niet doen, waardoor deze minder rekenkracht nodig heeft. Ten derde heeft een servomotor ook een ingebouwde feedback die gebruikt kan worden om de huidige hoekstand van de motor uit te lezen. Dit is ook handig wanneer we de hoek van de motor exact willen controleren. Ten vierde past de servomotor ook beter binnen de leerplandoelstellingen dan de stappenmotor, aangezien dat die in tegenstelling tot de stappenmotor bij alle onderzochte TSO-richtingen in de leerplannen zit. Specifiek is er gekozen voor de Tower Pro MG996R servomotor [59]. Deze motor is gekozen omdat de tandwielkast van metaal gemaakt is, hierdoor is deze motor minder gevoelig aan trillingen en gaat die dus minder snel stuk. De motor is ook sterk genoeg om de arm op te tillen en niet te duur.

3.3.2 Sensoren

Uit de verschillende sensoren zijn er uiteindelijk drie sensoren gekozen. Dit zijn de IMU, de EMG-sensor en de flex-sensor. Deze sensoren zijn gekozen omwille van hun technische en educatieve mogelijkheden. Deze mogelijkheden zullen nu sensor voor sensor kort worden toegelicht.

3.3.2.1 IMU

Als eerste sensor is er gekozen voor de IMU. Doordat deze sensor uit 3 verschillende sensoren bestaat, biedt hij verschillende educatieve mogelijkheden. Als eerste kan de accelerometer gebruikt worden om de krachten op de IMU te berekenen met behulp van de Tweede Wet van Newton ($F = m \cdot a$). Deze

krachten kunnen als vectoren voorgesteld worden, waardoor de leerlingen hiermee vector rekenen beter onder de knie kunnen krijgen. Door de gemeten versnelling 1 of 2 keer te integreren kunnen respectievelijk de snelheid en positie gevonden worden. Hierdoor kunnen de leerlingen de integraalrekening op een praktische manier toepassen. Omgekeerd kunnen hier dan ook afgeleiden mee verbonden worden. De werking van een massa-veer-systeem (wet van Hooke) kan ook met de accelerometer worden gedemonstreerd op basis van verschillende simulaties. [60], [61], [62]

De gyroscoop kan de begrippen hoeksnelheid en hoekversnelling demonstreren. Ook de conversie van radialen naar graden ligt binnen de mogelijkheden van deze sensor. Het integreren van deze hoeksnelheid zal een rotatie in de ruimte voorstellen waardoor dit ook de mogelijkheid biedt om het begrip integreren uit te leggen.

Met behulp van deze sensor kunnen de leerlingen eveneens hun ruimtelijk denken verbeteren. Zoals uitgelegd in de literatuurstudie heeft deze sensor last van gyroscopisch drift. Om dit weg te werken zal er gebruik gemaakt worden van datafusie. Hoe dit precies geïmplementeerd is, zal verder in de thesis beschreven worden.

De magnetometer is in feite een soort Hall-effect sensor en deze sensor maakt aldus het gebruik van een aparte Hall-effect sensor onnodig. Met deze sensor kunnen de leerplandoelstellingen met betrekking tot magnetisme en Lorentzkracht behaald worden.

Er is gekozen om de MPU-9250 met het breakout-board van Sparkfun [3] te gebruiken als IMU. Dit omdat deze sensor on-board dataverwerking bevat. De dataverwerking omvat o.a. kalibratie-tools om de sensor te kalibreren en ADC's om een digitaal signaal uit te sturen. Een andere reden voor deze keuze is dat specialisten van COMmeto deze sensor eveneens in hun AXO-SUIT gebruiken. Deze sensor kan zowel via I2C als SPI met de microcontroller verbonden worden. Figuur 25 toont deze IMU.

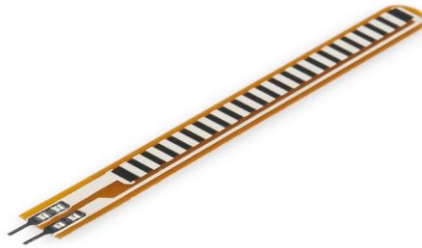


Figuur 25 MPU-9250 [3]

3.3.2.2 Flex-sensor

De tweede sensor die gebruikt wordt in de kit is de flex-sensor. Met deze sensor kunnen verschillende leerplandoelstellingen behaald worden zoals weerstand, spanning, stroom en de Wet van Ohm in het ASO en de werking van ADC-conversie in het TSO. Ook de werking van een spanningsdeler kan uitgelegd worden met behulp van deze sensor omdat een spanningsdeler nodig is om de spanning over de flex-sensor te verdelen zodat ze uitgelezen kan worden door de ADC. Een bijkomend voordeel is dat de connectie van de sensor met de microcontroller/microprocessor eenvoudig is. Hierbij moet er wel opgelet worden dat de connectoren van de sensor niet breken door een overmatige buiging. Dit kan opgelost worden door de connectoren van de sensor te verstevigen met krimpkous en door de sensor zo vast te maken dat enkel de weerstand zelf kan buigen. Hierdoor zal de kans dat de connectoren afbreken veel kleiner zijn. De sensor die voor dit pakket is gekozen, is de 2.2 inch Flex Sensor [63]. Er is voor deze sensor gekozen omdat deze flex-sensor speciaal gemaakt is om in een breadboard te passen en omdat de weerstand lineair verandert, dit maakt een eenvoudige conversie van weerstand naar buigingshoek mogelijk. Deze sensor wordt al in verschillende projecten gebruikt om de hoekstand te

meten een voorbeeld hiervan is de Nintendo Power Glove waar de sensor de buiging van de vingers meet [64]. Figuur 26 toont deze flex-sensor.

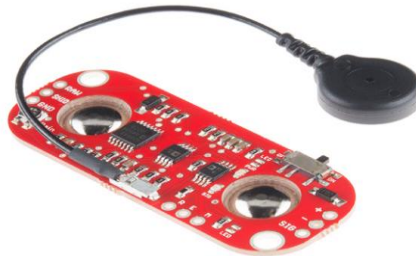


Figuur 26 Flex-sensor [63]

3.3.2.3 EMG-sensor

Op basis van de leerplandoelstellingen kan de EMG-sensor ook gebruikt worden voor dit project, omdat deze sensor de werking van de spieren en het zenuwstelsel kan aantonen. Hierdoor past ons project ook binnen het vak Biologie. Door tijdsgebrek is deze sensor nog niet geïmplementeerd in het huidige pakket. Omdat deze sensor toch mogelijkheden biedt, wordt die hier toch even aangehaald. In sectie 5 zal de huidige implementatie worden uitgelegd. De Myoware Muscle Sensor [2] is gekozen als EMG-sensor, omdat deze sensor een goede prijs/kwaliteitverhouding heeft. Deze sensor biedt ook nog het voordeel dat de gebruiker kan kiezen tussen het onverwerkte EMG-sigitaal en een verwerkt EMG-sigitaal.

De sensor geeft als output een analoge spanning afhankelijk van de gemeten signalen met de elektrodes. Een interne of externe ADC moet dit signaal nog converteren naar een digitaal signaal voor het gebruikt kan worden met de microcontroller/microprocessor. Figuur 27 toont de Myoware Muscle Sensor.



Figuur 27 EMG-sensor [2]

3.3.2.4 Andere sensoren

De andere sensoren zijn omwille van verschillende redenen niet gekozen. Als eerste de load cell omdat deze moeilijk te integreren is met het mimicking gedeelte, aangezien de sensor een mechanische ophanging nodig heeft die een kracht op de sensor kan uitoefenen bij een beweging van de arm. De elektrische werking van de load cell is ook redelijk gelijklopend met die van de flex-sensor, hierdoor biedt de load cell niet veel extra educatieve mogelijkheden. De leerplandoelstellingen met betrekking tot krachten kunnen eveneens met een IMU in combinatie met een mechanische arm behaald worden. De Hall-effect sensor is gekozen in de vorm van een magnetometer die intern in een IMU zit die in feite een Hall-effect sensor is. Het zou het niet nuttig zijn om nog eens eenzelfde type sensor gebruiken. De BCI-sensor is niet gekozen omdat deze te duur en te complex is voor leerlingen van het middelbaar. Er is ook geen directe link tussen een BCI-sensor en de onderzochte leerplandoelstellingen.

3.3.3 Microprocessor

De Raspberry Pi (Figuur 23) is gekozen als te gebruiken microprocessor. De eerste reden om voor de Raspberry Pi te kiezen, is omdat er werd geopteerd om Python te kiezen als programmeertaal voor de bibliotheek en de grafische gebruikersweergave. Hierdoor valt een Arduino af als mogelijk ontwikkelingsplatform, gegeven dat het gebruik van Python hier moeilijker is. De Arduino heeft in vergelijking met de Raspberry Pi en BeagleBone Black ook te weinig grafische mogelijkheden om als ontwikkelingsplatform te dienen. De keuze tussen de Raspberry Pi en de BeagleBone was moeilijker, ze hebben elk hun sterktes en zwaktes.

Zo is de BeagleBone ruimschoots de betere op vlak van in- en uitgangspinnen met 92 ingangen ten opzichte van de 40 ingangen van de Raspberry Pi. De BeagleBone bevat ook een interne ADC waardoor er geen extra ADC voorzien moet worden zoals bij de Raspberry Pi. Ook op vlak van installatie is de BeagleBone makkelijker dan de Raspberry Pi. Toch is er voor de Raspberry Pi gekozen. Een tweede reden voor deze keuze is het feit dat de online-gemeenschap rond de Raspberry Pi veel groter is dan die rond de BeagleBone. Dit zorgt voor een extra hulplijn voor leerlingen en leerkrachten die met problemen zitten. Een andere reden is het feit dat RVO-society al ervaring heeft met de Raspberry Pi uit andere projecten. Over het algemeen zijn scholen ook meer bekend met de Raspberry Pi, hierdoor zal het voor hen makkelijker zijn om ons pakket te gebruiken. Vervolgens heeft een Raspberry Pi ook meer grafische opties waardoor het gemakkelijker is om de Raspberry Pi als standalone computer te gebruiken. Een ander voordeel van een Raspberry Pi is het feit dat de Pi draadloos via WiFi kan verbinden. Dit is zeker in een klasomgeving een groot voordeel. Ten laatste is de prijs van een Raspberry Pi 3 35 euro, dit is goedkoper dan de BeagleBone Black die 55 euro kost.

Voor dit project is de **Raspberry Pi 3 model B** gekozen als ontwikkelingsplatform. Omdat deze versie van de Raspberry Pi de beste vormfactoren heeft. Hij is dan ook de enige Raspberry Pi die krachtig genoeg is om als volwaardige PC te dienen.

3.3.4 Mechanische arm

Het mechanische ontwerp van de arm zal bestaan uit verschillende onderdelen die de leerlingen zelf moeten assembleren m.b.v. bouten en schroeven. De onderdelen worden gemaakt met een 3D-printer, hierbij zal PLA als materiaal gebruikt worden. PLA is een biologisch afbreekbare kunststof die het voordeel biedt dat het biocompatibel is, waardoor deze kunststof nooit huidirritaties zal geven. Het gebruik van een 3D-printer biedt het voordeel dat scholen de arm zelf kunnen printen indien ze dit zouden wensen. Om de maat van de arm te bekomen is er uitgegaan van de lengte van de gemiddelde boven- en onderarm van een volwassen persoon. De totale lengte van de arm is gemiddelde 63 cm, dus de gemiddelde boven- en onderarm van de menselijke arm bedragen elk 30 cm [65]. Een uitgebreide bespreking hiervan volgt verder in sectie 4.5.

3.3.5 Software

De laatste belangrijke component van het project is de software, deze dient net als de hardware en cursus modulair opgebouwd te worden. Zoals reeds eerder vermeld zal de software in Python geschreven worden, aangezien dat deze taal makkelijk leesbaar is en er een grote online-gemeenschap rond bestaat. Python is standaard geïnstalleerd op de Raspberry Pi samen met IDLE (Python's Integrated Development and Learning Environment) en pip (Python's package manager). De software bestaat uit een bibliotheek waarmee de leerlingen zelf de verschillende componenten kunnen aansturen. Zoals reeds aangegeven wordt dit gedeelte in samenwerking met J. Deflander ontwikkeld. Hierbij maakt J. Deflander het grondwerk van de bibliotheek en de grafische gebruikersweergave, terwijl L. Osstyn en S. Vercruyssen (auteurs van deze thesis) functies schrijven om de componenten te implementeren gebruikmakend van de library die J. Deflander schrijft [66].

De bibliotheek en de grafische userinterface (GUI) moeten voor dit project aan enkele voorwaarden voldoen. Ten eerste moet de software eenvoudig zijn, gebruikers die nog nooit hebben geprogrammeerd moeten ook met de software aan de slag kunnen. Dit betekent dat het grootste deel van de technische complexiteit verborgen moet zijn voor de gebruikers. Ten tweede moet het systeem ook herbruikbaar zijn, aangezien dat het in de toekomst mogelijk voor andere projecten zal gebruikt worden. Het moet dan ook eenvoudig zijn om nieuwe systemen te implementeren in de bibliotheek. Ten derde moeten de meer geïnteresseerde leerlingen ook de mogelijkheid hebben om aan de slag te gaan met de meer low-level modules om daarmee zelf complexere projecten te maken. Ten vierde zal de bibliotheek real-time communiceren met de hardwarecomponenten, dit betekent dat de performantie van de bibliotheek voldoende groot moet zijn. Er mag geen merkbare vertraging tussen de detectie van de sensoren en de beweging van de motor zitten.

De bibliotheek zal functioneel geïmplementeerd worden, dit omdat de gebruikers dan programma's kunnen schrijven met behulp van pure functies in plaats van met objecten en procedures met neveneffecten. Een ander voordeel van het functioneel programmeren is dat het systeem dan robuuster zal zijn.

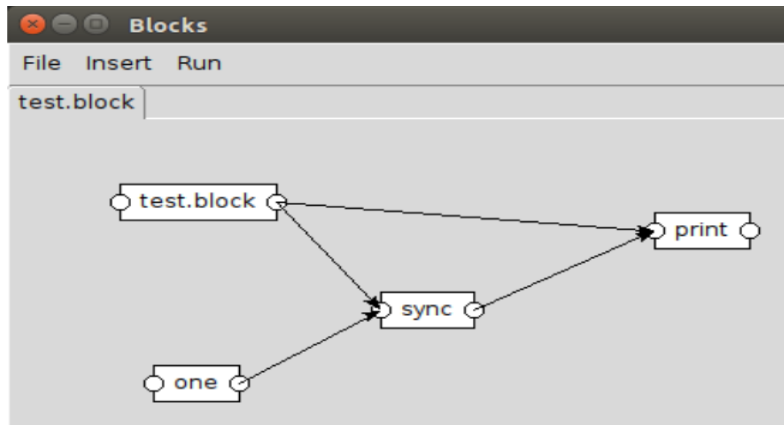
Om aan de voorwaarde van simpliciteit te voldoen, zal de Application Programming Interface (API) opgebouwd worden rond een simpel Block [T, U] type. Dit Block type stelt een operatie voor op een stroom van data, T en U stellen respectievelijk de input en output van het blokje voor. Het interageren met het exoskelet zal simpelweg bestaan uit het juist connecteren van verschillende blokken. Concreet bestaan er 3 soorten blokken data sources, pipelines en data sinks. Data sources verwachten geen input en produceren op verschillende tijdstippen output waarden, dit kan bijvoorbeeld data uit een sensor zijn. Pipelines zijn blokken die een input verwachten, waarna ze op die input een operatie uitvoeren. De uitkomst van deze operatie zal als output geproduceerd worden. De derde en laatste soort blok is de data sink, deze blok verwacht een input en verwerkt dan deze input op een bepaald manier. Dit verwerken van de data kan bijvoorbeeld het aansturen van de servomotor zijn. Dit systeem is push-based geïmplementeerd, de blokken verwachten altijd een input voordat ze de vorige datastroom verder duwen.

Het connecteren van blokken kan op twee manieren, zowel in serie als in parallel. Om de blokken in serie te zetten moet de functie *series* gebruikt worden. Deze functie zorgt dat er een nieuwe blok ontstaat die bestaat uit de vorige twee blokken in serie. Het parallel zetten van de blokken kan met de functie *spread*, hierbij ontstaat er een nieuwe blok die bestaat uit de twee blokken in parallel. De uitgaande datastroom van deze parallelle blok bestaat uit de gecombineerde data van beide blokken. Concreet zullen dit telkens tupels zijn met als eerste waarde de data van het ene blok en als tweede waarde de data van het tweede blok. Voor de exacte implementatie van het Block Type en de series en spread functies verwijzen we naar de thesis van J. Deflander [66].

Een groot deel van de leerlingen uit de doelgroep zal geen tot weinig ervaring hebben met tekstueel programmeren en dit valt bij verschillende richtingen ook niet binnen de leerplandoelstelling (zie sectie 3.2). Daarom is er gekozen om een grafische gebruikersweergave te ontwikkelen, waarin de leerlingen op een grafische manier leren programmeren. Net als de bibliotheek dient de grafische gebruikersweergave (GUI) eenvoudig en herbruikbaar zijn. De gebruikersweergave moet namelijk ook voor andere toekomstige projecten kunnen gebruikt worden. Hiervoor moet de GUI zo opgebouwd worden dat er voor een nieuw project op een eenvoudige manier een nieuwe extensie kan worden toegevoegd.

Om de interactie met de bibliotheek simpel te houden zal de GUI ook met Python ontwikkeld worden. Hiervoor levert Python een ingebouwde module genaamd TkInter. Deze module bevat widgets om

simpele desktopapplicaties te maken. Om op een natuurlijke manier de concepten rond de blokken als datastromen uit te leggen, representeert de gebruikersweergave het Block type als rechthoeken. Elke blok heeft een input en een output die met andere blokken verbonden kunnen worden. Figuur 28 toont een voorbeeld van een simpel diagram dat in de grafische gebruikersomgeving gemaakt is. Merk op dat elke blok meerdere voorgangers en opvolgers kan hebben. In de presentatie ziet het diagram eruit als een flowchart, waarbij de rechthoeken de processen voorstellen, de cirkels de connectoren en de lijnen de richting van de stroom van gegevens van het diagram.

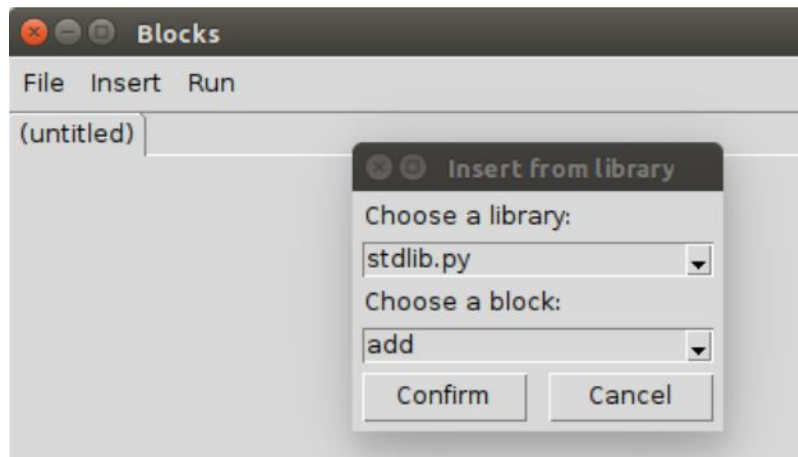


Figuur 28 Diagram in de gebruikersweergave

De bibliotheek ondersteunt enkel connecties door middel van de functies *series* en *spread*, deze functies zijn zo ontworpen dat het onmogelijk is om een cyclisch diagram te maken. Hierdoor kan de gebruiker dit ook niet doen in de grafische interface. Het maken van meerdere parallele connecties tussen twee blokken wordt niet ondersteund. Dit omdat dit het tekenen van het diagram bemoeilijkt voor de gebruiker en omdat dit makkelijk kan gesimuleerd worden door een extra blok tussen de twee blokken te plaatsen. Dit blok zou dan de data rechtstreeks doorgeven naar de volgende blok.

Om het diagram uit te voeren, moet dit diagram omgezet worden naar een waarde van het Block type. Dit kan enkel als het diagram zelf uit blokken bestaat. Om het diagram op te bouwen uit blokken voorziet de GUI het **Insert > From library...** menu. Hiermee kunnen voorgeprogrammeerde blokken uit een ingeladen Python file gehaald worden. Figuur 29 toont hoe een **add**-blokje uit het **stdlib.py** bestand gehaald kan worden. Met het **Insert > Add library...** menu kunnen gebruikers nieuwe Python files met geprogrammeerde blokken toevoegen aan de GUI. S. Vercruysse en L. Osstyn zullen zo een type bibliotheek schrijven zodat leerlingen bijvoorbeeld een bibliotheek genaamd *exoskelet.py* kunnen inladen en daaruit verschillende blokken voor het exoskelet gebruiken.

Het is ook mogelijk om zelfgemaakte diagrammen op te slaan als een block-bestand. Dit gaat met het **File > Save** menu, hierbij wordt gevraagd om een naam te kiezen zodat de gebruikers dit bestand later kunnen terugvinden. Een zelfgemaakt diagram wordt als een blokje opgeslagen, dit blokje kan later terug geopend worden in een nieuw diagram, waarbij het de functionaliteit van het zelfgemaakte diagram heeft behouden. Het openen van zo een blokje gaat met het **Insert > From file...** menu. Om een diagram uit te voeren dient er op de **Run** knop gedruwd te worden. Figuur 28 bevindt deze knop zich bovenaan uiterst rechts in het menu. Wanneer het diagram wordt uitgevoerd verandert de **Run**-knop in een **Stop**-knop. Met deze knop kan de executie van het diagram gestopt worden.



Figuur 29 Add blokje toevoegen uit de stdlib.py

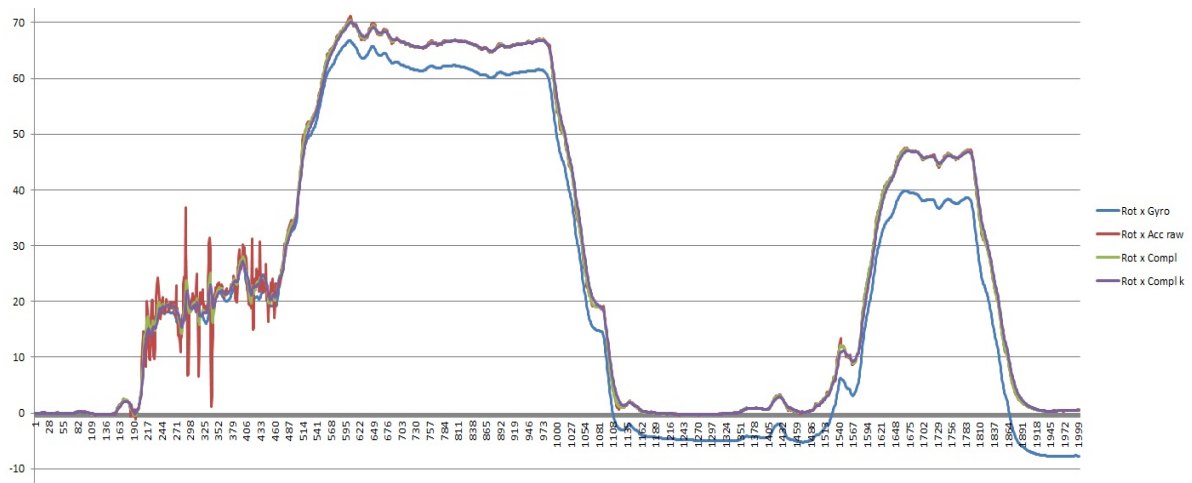
Om met het exoskelet te communiceren, zullen er voor elk onderdeel verschillende blokjes worden geïmplementeerd. Deze blokjes worden gemaakt door eerst een functie te schrijven die een bepaalde operatie op een blokje uitvoert. Er zijn 2 mogelijke soorten functies die kunnen gebruikt worden om blokken te maken, namelijk synchrone en asynchrone functies. Beide functies kunnen gebruikt worden om pipelines, data sources en data sinks te implementeren. Het voordeel van een asynchrone functie is dat de gebruiker zelf kan kiezen met welke frequentie samples worden doorgestuurd. Om de asynchrone functie te implementeren wordt er gebruik gemaakt van de **asyncio** library.

3.4 Berekeningen en filtering IMU

Dit hoofdstuk beschrijft alle berekeningen en filtering die nodig zijn om een IMU concreet te gebruiken. Zoals uitgelegd in de literatuurstudie is de IMU onderhevig aan gyroscopische drift. Hierdoor kan de rotatie en oriëntatie niet accuraat berekend worden. Om dit op te lossen is er gekozen om data- of sensorfusie te gebruiken. Sensorfusie of het samennemen van sensoren haalt relevante gegevens uit sensoren en combineert deze gegevens tot verbeterde data. Dit gebeurt door het signaal van de accelerometer, dat veel ruis bevat maar zonder drift is, te combineren met het signaal van de gyroscoop, die wel onderhevig is aan drift. Zo ontstaat er een beter signaal dat minder ruis en minder drift bevat. De meest gebruikte datafusie filters zijn:

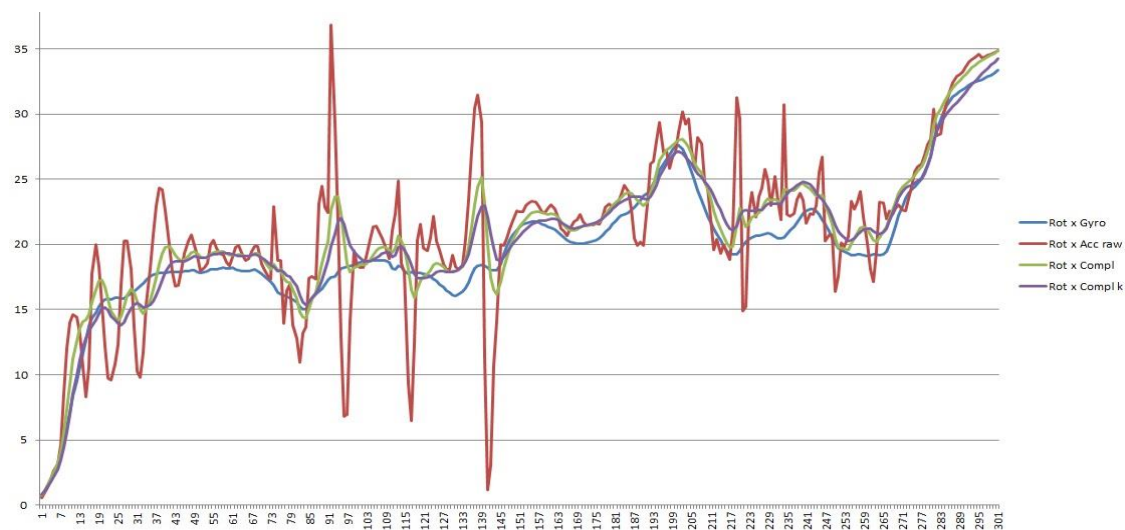
- Complementary filter;
- Kalman filter.

Een Complementary filter is een vereenvoudigde vorm van de Kalman filter, het is een eerste orde filter die gebruik maakt van een high pass en een low pass filter om ruis en drift te verwijderen [67]. De Kalman filter daarentegen is een iteratieve filter die efficiënt werkt, maar wel meer rekenkracht vereist. Er is gekozen om een Kalman filter te gebruiken omdat deze de data beter filtert dan de Complementary filter alsook het feit dat er voldoende rekenkracht ter beschikking is op de Raspberry Pi om deze Kalman filter te kunnen gebruiken. Figuur 30 vergelijkt beide filters voor een bepaalde dataset uit een IMU.



Figuur 30 Vergelijking Kalman en Complementary filter [68]

In Figuur 30 is de blauwe lijn de data uit de gyroscoop, de rode lijn de data uit de accelerometer, de groene lijn de data uit de Complementary filter en de paarse lijn de data uit de Kalman filter. Op het eerste zicht lijken de paarse en groene lijnen grotendeels gelijk te lopen, maar als er wordt ingezoomd op het linkse stuk waar de trillingen uit de accelerometer zeer duidelijk zijn (Figuur 31), dan is de Kalman filter duidelijk de betere [68].



Figuur 31 Vergelijking Kalman en Complementary filter ingezoomd [68]

Een Kalman filter werkt concreet als volgt. Eerst wordt de data uit de gyroscoop gebruikt om de te bekomen waarde te schatten aan de hand van een vooropgesteld fysisch model dat een goede benadering geeft van een hoekverdraaiing. Maar omdat deze data nog onderhevig is aan het verschijnsel van gyroscopische drift is deze niet accuraat genoeg. De schatting wordt dan vergeleken met de data uit de accelerometer en magnetometer (voor de Yaw) en aan de hand daarvan wordt dan de Kalman Gain berekend. Met behulp van deze Kalman Gain kan er dan een beter schatting voor de te bekomen waarde verkregen worden. Hoe vaker deze schatting herhaald wordt, hoe accurater deze wordt. Figuur 32 toont de basisformule voor een Kalman filter en duidt daarbij de belangrijkste componenten aan. Bij de IMU is X_k gelijk aan de huidige schatting, X_{k-1} is gelijk aan de vorige schatting, Z_k is de gemeten waarde. Z_k is de data uit de gyroscoop gefuseerd met omgevormde accelerometer gegevens (voor de rotaties rond de x en y as) en magnetometer (voor de rotatie rond de z-as). K_k is de berekende Kalman Gain voor de huidige schatting.

$$\hat{X}_k = K_k \cdot Z_k + (1 - K_k) \cdot \hat{X}_{k-1}$$

Diagram illustrating the Kalman filter update equation. The equation is shown with arrows pointing to its components: \hat{X}_k is labeled "current estimation", Z_k is labeled "measured value", K_k is labeled "Kalman Gain", and \hat{X}_{k-1} is labeled "previous estimation".

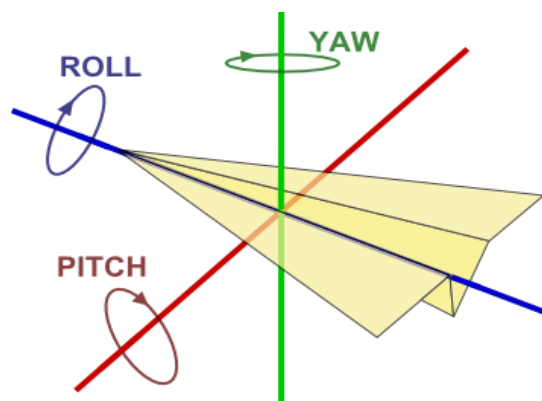
Figuur 32 Formule Kalman filter [69]

De gegevens voor de plaatsbepaling van de IMU die uit de Kalman filter komt wordt voorgesteld als een quaternion. Een quaternion is een mathematische methode om de oriëntatie en rotatie van een voorwerp in de 3D-ruimte voor te stellen. Formule (3) stelt de wiskundige notatie van een quaternion voor.

$$q = w + xi + yj + zk \quad (3)$$

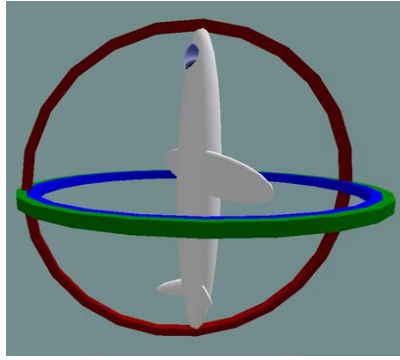
In deze notatie stellen w , x , y en z 4 reële getallen of componenten voor die samen eenduidig de rotatie en oriëntatie van het quaternion bepalen. Het imaginaire deel (i , j , k) stelt een vector in de 3D ruimte voor, het scalaire deel (w) stelt de rotatie rond deze vector voor en gedraagt zich als een reëel getal.

Nu de data gefilterd is, is de volgende stap om de rotatiehoeken rond de IMU te berekenen. Dit zijn 3 hoeken die allemaal een rotatie om een bepaalde as voorstellen. Hierbij zijn verschillende rotatie voorstellingen mogelijk, maar in dit project is er voor Tait Bryan hoeken (roll, pitch, yaw) gekozen omdat deze volgens 3 verschillende assen een rotatie voorstellen (meestal en ook in ons geval een wereld assenstelsel gedefinieerd door de MPU-9250, dit zijn excentrische Tait-Bryan hoekvoorstellingen). Deze voorstelling wordt ook vaak in vliegtuigen gebruikt omwille van het feit dat deze hoekvoorstelling makkelijk voor te stellen is in cijfers of in een grafische gebruikersweergave zoals een cockpit dashboard bijvoorbeeld. De roll is de rotatie rond de x-as, de pitch is de rotatie rond de y-as en de yaw is de rotatie rond de z-as. Figuur 33 stelt deze 3 hoeken in de ruimte voor.



Figuur 33 Voorstelling Roll, Pitch en Yaw [70]

Een probleem van deze voorstelling is het fenomeen van singulariteiten ook wel bekend als Gimbal Lock. Wanneer de pitch-hoek zich rond 90 graden bevindt dan komen de roll-as en de yaw-as parallel te staan. Waardoor veranderingen in rotaties rond de x-as overeenkomen met veranderingen rond de z-as, hierdoor wordt er 1 vrijheidsgraad verloren. Figuur 34 stelt dit fenomeen voor, in deze Figuur 34 is de rode cirkel de pitch, de blauwe de roll en de groene de yaw. Als de blauwe cirkel een aantal graden gerooteerd wordt dan zal dit tot eenzelfde uitkomst leiden als een rotatie van de groene cirkel.



Figuur 34 Gimbal Lock [71]

Om dit op te lossen bij één IMU, zijn er enkele thresholds ingesteld bij de pitch hoek. De thresholds zijn zo ingesteld dat de pitch-hoek nooit groter dan 90 graden of kleiner dan -90 graden kan worden. Hierdoor zal de pitch nooit extreem snel wisselen als deze in Gimbal Lock komt maar is deze toch in zekere zin gelimiteerd door deze thresholds.

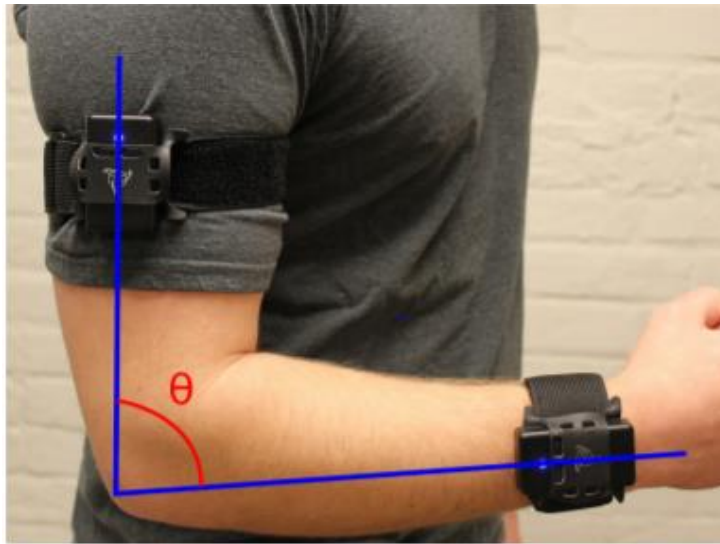
Om deze 3 hoeken te berekenen wordt het quaternion komende van de Kalman filter gebruikt. Formules (4), (5) en (6) stellen deze berekening voor. Hierbij staan w, x, y en z voor de 4 componenten van het inkomende quaternion in Formule (3) [72].

$$Roll = atan\left(\frac{2 * (w * x + y * z)}{1 - 2 * (x * x + y * y)}\right) \quad (4)$$

$$Pitch = asin(2 * (w * y - z * x)) \quad (5)$$

$$Yaw = atan\left(\frac{2 * (w * z + x * y)}{1 - 2 * (y * y + z * z)}\right) \quad (6)$$

Wanneer de hoeken rond 1 IMU gekend zijn, kan er worden overgegaan naar een volgende stap, namelijk het berekenen van de hoek tussen 2 IMU's. Het voordeel van het gebruik van 2 IMU's t.o.v. 1 IMU is dat de berekening van de hoeken in een variabel assenstelsel kan gedaan worden. Dit assenstelsel zal gelijk zijn aan het assenstelsel van 1 van de IMU's. Concreet zal 1 van de IMU's aan de onderarm bevestigd worden en de andere IMU zal zich op de bovenarm bevinden. Een ander voordeel van het gebruik van 2 IMU's is dat de hoek van de elleboog ook juist berekend wordt wanneer de schouder bewogen wordt. Dus als de arm bijvoorbeeld horizontaal gehouden wordt in plaats van verticaal kan men toch op deze manier makkelijk een hoek tussen de boven- en onderarm berekenen. Figuur 35 stelt een mogelijke plaatsing van de IMU's voor.



Figuur 35 Plaatsing IMU's [73]

Om de hoek tussen beide IMU's te berekenen zoals in Figuur 35 aangegeven, moet er eerst uit de 2 quaternionen van de IMU's een nieuw quaternion berekend worden [74]. Dit nieuwe quaternion zal een rotatie rond een assenstelsel van één van de IMU's voorstellen. Het is belangrijk dat dit quaternion berekend wordt ten opzichte van het assenstelsel van 1 van de IMU's, zodat de hoek in alle posities van de arm juist berekend wordt. Er is gekozen om de IMU op de bovenarm te nemen als referentie assenstelsel, ten opzichte van dit assenstelsel zal het nieuwe quaternion worden berekend. Er is voor de bovenste IMU gekozen omdat deze minder verandering ondergaat dan de IMU op de onderarm bij een beweging van de elleboog. De IMU op de bovenarm zal in de berekening aangeduid worden als IMU1, de IMU op de onderarm als IMU2. De eerste stap in deze berekening is het normaliseren van de inkomende quaternionen. Dit wordt gedaan door de 4 componenten van elke quaternion te delen door de vierkantswortel van de som van de kwadraten van de verschillende componenten. Formules (7), (8), (9) en (10) tonen deze bewerkingen. Formule (11) toont het volledige genormaliseerd quaternion. In deze formules stellen w , x , y en z de vier componenten van het binnenkomend quaternion voor, w_{norm} , x_{norm} , y_{norm} en z_{norm} stellen de componenten van het genormaliseerde quaternion (q_{norm}) voor. Merk op dat de normalisatie van beide quaternionen essentieel is, anders zal het uiteindelijke resultaat foutief zijn.

$$w_{norm} = \frac{w}{\sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2}} \quad (7)$$

$$x_{norm} = \frac{x}{\sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2}} \quad (8)$$

$$y_{norm} = \frac{y}{\sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2}} \quad (9)$$

$$z_{norm} = \frac{z}{\sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2}} \quad (10)$$

$$q_{norm} = w_{norm} + i * x_{norm} + j * y_{norm} + k * z_{norm} \quad (11)$$

De tweede stap is het inverteren van het quaternion van IMU1. Formules (12), (13), (14) en (15) stellen deze inversie wiskundig voor, formule (16) stelt het nieuwe geïnverteerde quaternion voor [75].

$$w_{inv} = w_{norm1} \quad (12)$$

$$x_{inv} = -x_{norm1} \quad (13)$$

$$y_{inv} = -y_{norm1} \quad (14)$$

$$z_{inv} = -z_{norm1} \quad (15)$$

$$q_{norm} = w_{norm} + i * x_{norm} + j * y_{norm} + k * z_{norm} \quad (16)$$

Het nieuwe quaternion kan bekomen worden door middel van de “dot”-multiplicatie van het quaternion van IMU2 en het inverse quaternion van IMU1. Formules (17), (18), (19) en (20) stellen deze “dot”-multiplicatie voor waarbij formule (21) het nieuwe quaternion is en de parameters w, x, y, z de parameters zijn van het tweede quaternion komende van IMU2 en de parameters $w_{inv}, x_{inv}, y_{inv}, z_{inv}$ de parameters van het geïnverteerde quaternion van IMU1 voorstellen [76].

$$w_{dot} = w * w_{inv} - x * x_{inv} - y * y_{inv} - z * z_{inv} \quad (17)$$

$$x_{dot} = w * x_{inv} + x * w_{inv} + y * z_{inv} - z * y_{inv} \quad (18)$$

$$y_{dot} = w * y_{inv} - x * z_{inv} + y * w_{inv} + z * x_{inv} \quad (19)$$

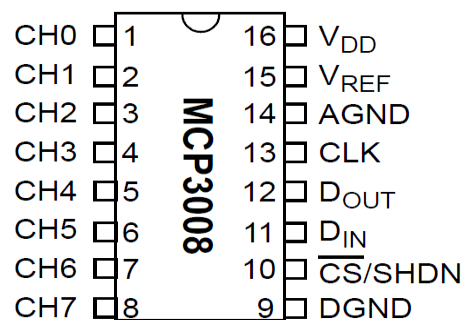
$$z_{dot} = w * z_{inv} + x * y_{inv} - y * x_{inv} + z * w_{inv} \quad (20)$$

$$q_{dot} = w_{dot} + i * x_{dot} + j * y_{dot} + k * z_{dot} \quad (21)$$

Het bekomen quaternion stelt nu de rotatie voor van IMU2 ten opzichte van IMU1 volgens het lokaal assenstelsel van IMU1. Met formules (4), (5) en (6) kunnen nu respectievelijk de roll, pitch en yaw van het nieuwe quaternion berekend worden. Deze kunnen dan later gebruikt worden om de arm aan te sturen.

3.5 Externe ADC

De flex-sensor en de EMG hebben in tegenstelling tot de IMU geen interne ADC ter beschikking, hierdoor zullen ze beide analoge signalen naar de Raspberry Pi sturen. Het probleem hierbij is dat de Raspberry Pi niet over een interne ADC beschikt, waardoor alle inkomende data digitaal moet zijn. Om dit probleem op te lossen, wordt er een externe ADC tussen de sensoren en de Raspberry Pi geplaatst. De gekozen ADC is een MCP3008 IC (Figuur 36).



Figuur 36 MCP3008 [77]

Dit is een 10-bit ADC die over acht kanalen beschikt, hierdoor kunnen er acht verschillende sensoren aangesloten worden. Gegeven dat er later nog extra modules kunnen ontwikkeld worden is dit zeker een voordeel. Een ander voordeel van deze ADC is de kostprijs, de prijs voor een MCP3008 ligt tussen twee en drie euro. Een laatste reden om voor deze ADC te kiezen is, dat deze bij verschillende Raspberry Pi projecten als ADC gebruikt wordt [77]. De connectie met de Raspberry Pi gebeurt via SPI, hiervoor zijn

in totaal 8 kabels nodig, namelijk 4 buslijnen, 2 voedingslijnen en 2 grondlijnen. Het uitlezen van de ADC wordt gedaan met behulp van de MCP3008 library van Adafruit, het voordeel van deze library is dat deze intern functies heeft om de verschillende kanalen van de ADC apart uit te lezen. Ook is het mogelijk om de GPIO-pinnen die nodig zijn voor SPI softwarematig te definiëren, hierdoor is er meer vrijheid om de connecties te maken.

4 Resultaten en discussie

4.1 Overzicht van de gekozen componenten

Tabel 7 Overzicht van de gekozen componenten

Component	Type
Motor	Tower Pro MG996R servomotor [59]
IMU	SparkFun IMU Breakout - MPU-9250 [3]
Flex-sensor	SparkFun Flex Sensor 2.2" [63]
Microprocessor	Raspberry Pi 3 model B [52]
ADC	MCP3008 [77]

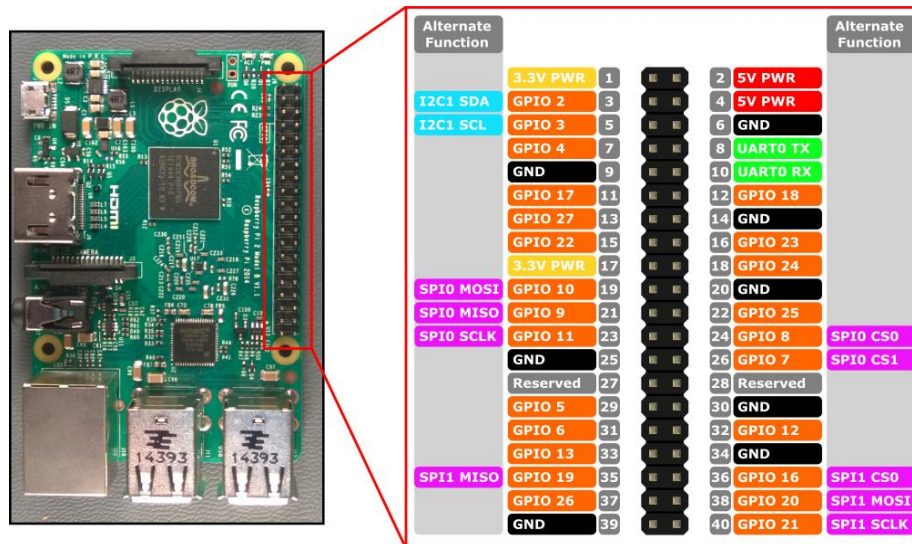
4.2 Implementatie IMU

Zoals beschreven in sectie 3.2 is de sensor die het meeste leerplandoelstellingen kan behalen een IMU, daarom is ook deze sensor gekozen om als eerste te worden geïmplementeerd. Eerst zal één IMU geconnecteerd worden met de Raspberry Pi waarmee de leerlingen dan kunnen leren over de accelerometer, gyroscoop en magnetometer. Vervolgens zullen twee IMU's gebruikt worden om de hoek van de arm van de persoon te berekenen, dit zal gebeuren door de IMU's strategisch op een arm te plaatsen.

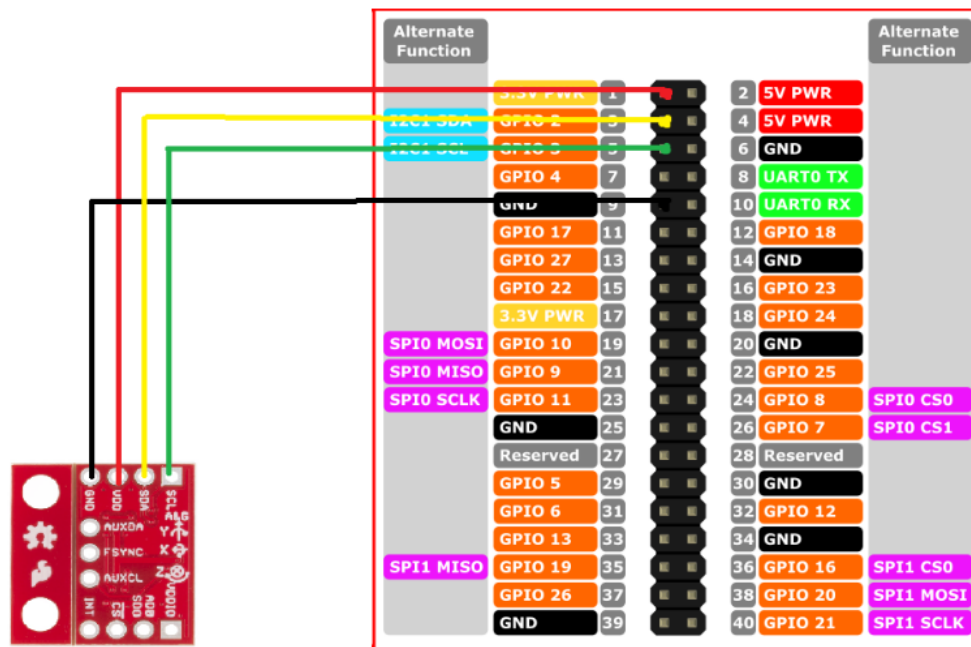
4.2.1 Connectie IMU

Er zijn twee mogelijkheden om een IMU met de Raspberry Pi te connecteren, namelijk I2C (Inter-Integrated Circuit) en SPI (Serial Peripheral Interface). I2C biedt als voordeel dat er maar 2 buslijnen nodig zijn in vergelijking met de 4 (of 5 bij 2 IMU's) buslijnen voor SPI. De extra buslijn bij SPI voor 2 IMU's is nodig om de IMU's afzonderlijk uit te lezen, bij I2C kan er softwarematig tussen de 2 IMU's gewisseld worden. Een ander voordeel is dat de I2C-pinnen op de Raspberry Pi langs elkaar zijn geplaatst, terwijl de SPI-pinnen verspreid zijn over de GPIO-pinnen van de Raspberry Pi zoals in de pin layout te zien is op Figuur 37. De maximale klokfrequentie van I2C is wel beduidend lager dan die van SPI. Deze klokfrequentie van I2C ligt tussen 100 en 400 kHz terwijl SPI een klokfrequentie van meer dan 10 MHz kan hebben.

Uiteindelijk is er gekozen om I2C te gebruiken om de IMU's met de Raspberry Pi te connecteren. De voornaamste redenen hiervoor zijn dat er bij I2C minder kabels nodig zijn en dat er softwarematig tussen de IMU's kan gewisseld worden. De data rate die tussen de 100 en 400 kHz ligt is snel genoeg voor dit project, gegeven dat de software de binnenkomende data bemonsterd met een snelheid van 250 Hz. Figuur 38 geeft de connectie van een IMU met een Raspberry Pi weer.



Figuur 37 Pin lay-out Raspberry Pi model 3 [78]



Figuur 38 Connectie van de IMU met de Raspberry Pi GPIO pinnen

4.2.2 Uitlezen IMU

Om de IMU uit te lezen, wordt er gebruik gemaakt van de **RTIMULib**-library. Dit is een C++ en Python library die speciaal ontwikkeld is om 9-DOF IMU's uit te lezen. Voordat de IMU's kunnen uitgelezen worden, moeten ze eerst gekalibreerd worden. Hiervoor heeft de RTIMULib een interne command-line tool genaamd, **RTIMULibCal**. Met deze tool kunnen zowel de accelerometer als de magnetometer juist gekalibreerd worden. Bij een foute kalibratie zullen twee IMU's een verschillend assenstelsel hebben, hierdoor komt de data uit de IMU's niet overeen wanneer ze beiden op dezelfde manier zijn gepositioneerd. Dit verschil is dan vooral duidelijk in de Yaw, omdat deze bepaald wordt met behulp van de magnetometer. Deze sensor is het gevoeligste voor foutieve kalibratie.

Men kan de magnetometer nog beter kalibreren met behulp van een interne functie *ellipsoid fitting tool* die op basis van een ellipsoïde fitting de gegevens komende van de magnetometer fit. Dit is op basis van verschillende .m files die in de RTIMULib aanwezig zijn, hiervoor is wel nog een programma genaamd *Octave* nodig dat .m files kan uitvoeren.

Een probleem dat optreedt bij het uitlezen van de IMU's is de gyroscopische drift. Dit is opgelost door gebruik te maken van datafusie door middel van een Kalman filter. Voor dit project is gekozen om de Kalman filter te gebruiken die intern in de RTIMULib library aanwezig is. Deze Kalman filter geeft als output een quaternion dat de rotatie over de verschillende assen van de IMU voorstelt.

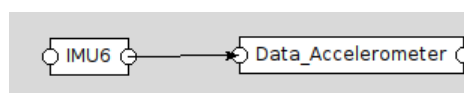
Om de IMU uit te lezen is er een sample functie geschreven. Deze functie heeft als input een configuratie file met daarin de kalibratie-waarden van de gebruikte IMU. Als output geeft deze functie een tupel die zowel de afzonderlijk data uit de drie sensoren (accelerometer, gyroscoop en magnetometer) als het gefilterde quaternion bevat. Deze functie is als blokje geïmplementeerd onder de naam IMUX, waarbij de X staat voor het nummer van de gebruikte IMU zodat men een gekalibreerde configuratie file kan toekennen aan de gekozen IMU.

4.2.3 Visualisatie IMU

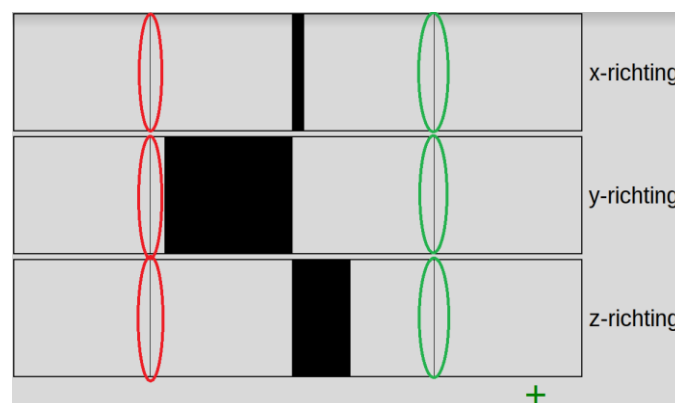
De accelerometer en magnetometer van de IMU hebben beide verschillende educatieve mogelijkheden overeenstemmend met de huidige leerplandoelstellingen beschreven in 3.2. Zo kan de accelerometer gebruikt worden om de Wetten van Newton en de zwaartekracht te illustreren, terwijl de magnetometer de werking van een magnetisch veld en de Lorentzkracht kan aantonen. Om dit visueel te presenteren zijn twee simulaties ontwikkeld. Eén om de data van de accelerometer te visualiseren en een andere om de data van de magnetometer te visualiseren.

4.2.3.1 Visualisatie accelerometer

Figuur 40 toont de visualisatie van de accelerometer. In Figuur 40 stelt elke horizontale balk de acceleratie in een bepaalde richting voor. Een beweging van de balk naar de rechterkant is een positieve acceleratie ten opzichte van het assenstelsel van de IMU, een beweging naar de linkerkant stelt een negatieve acceleratie voor. De groen omcirkelde lijn stelt een verplaatsing met een versnelling van 1 G voor, de rode omcirkelde lijn een verplaatsing met een versnelling van -1 G. 1 G is de versnelling die overeenkomt met de zwaartekracht, m.a.w. de versnelling die de aarde op elk voorwerp op zijn oppervlak uitoefent. Met behulp van deze visualisatie kunnen de leerlingen de versnelling (de zwaartekracht) die de aarde op de IMU uitoefent meten. Met deze visualisatie kunnen de leerlingen ook de assen van de IMU ontdekken, wat voor praktische inzichten met betrekking tot de IMU zorgt. Figuur 39 toont het blokschema dat de leerlingen moeten tekenen.

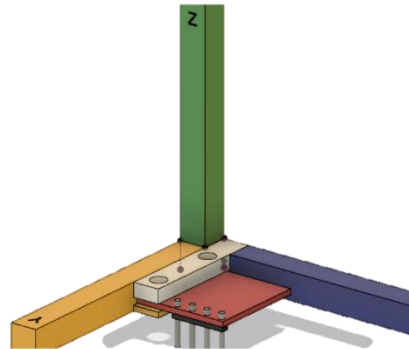


Figuur 39 Blokschema accelerometer



Figuur 40 Visualisatie accelerometer

Om de leerlingen het assenstelsel van de IMU te helpen ontdekken is er een houder voor de IMU ontwikkeld die de 3-assen in de realiteit voorstelt. Figuur 41 toont dit assenstelsel. Met behulp van boutjes en moeren kan de IMU aan het assenstelsel worden vastgemaakt via het bruine plaatje in Figuur 41. De assen hebben ook een andere kleur zodat de leerlingen visueel zien hoe de assen zich zullen roteren bij verschillende standen van de IMU. Deze differentiatie in kleur helpt ook om de assen te ontdekken op basis van het programma in Figuur 40



Figuur 41 Geprinte assen IMU

Een tweede manier om de accelerometer te visualiseren is door de data uit de accelerometer te gebruiken om een tilt sensor te maken. Deze tilt sensor wordt gebruikt om de hoek over de X-as of Y-as van een vast assenstelsel te berekenen. In dit assenstelsel staat de Z-as loodrecht op het aardoppervlak terwijl de X-as en Y-as evenwijdig aan het aardoppervlak liggen met een hoek van 90 graden tussen beide. De tilt wordt berekend op basis van het feit dat de versnelling gelijk is aan 1 G wanneer de meet-as van de accelerometer loodrecht op het aardoppervlak staat. Op dit moment werkt de zwaartekracht dus volledig volgens 1 richting van de accelerometer. Als de meet-as van de accelerometer evenwijdig staat met het aardoppervlak dan wordt er een versnelling van 0 G gemeten. Op alle posities tussen deze twee uitersten zal de versnelling variabel zijn afhankelijk van de hoek die de accelerometer met de Aarde maakt. Op basis van die versnelling kan dan de juiste hoek berekend worden. De exacte berekening van de Pitch en de Roll hoek gebeurt aan de hand van formules (22) en (23) [79].

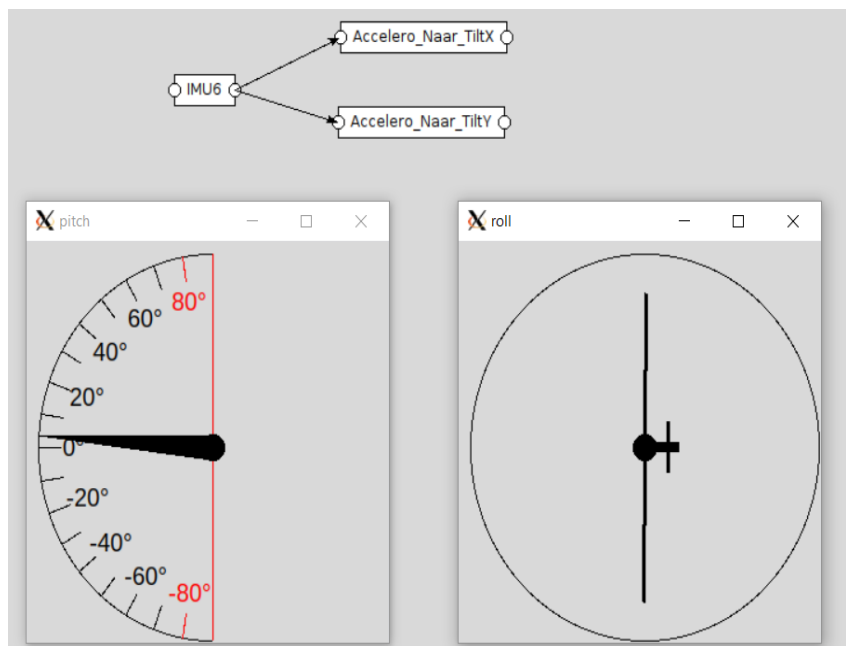
$$Roll = atan\left(\frac{y}{z}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (22)$$

$$Pitch = atan\left(\frac{-x}{\sqrt{y * y + z * z}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (23)$$

In deze formules stellen x, y en z de gemeten versnellingen voor in de drie richtingen van de accelerometer. De Roll is de rotatie over de x-as en de Pitch is de rotatie over de y-as.

Het is de bedoeling dat de leerlingen opmerken dat de accelerometer veel ruis bevat, maar dat deze driftvrij is. Daardoor kan een accelerometer helpen om de gyroscopische drift te verminderen. Hierbij beginnen ze het nut te ontdekken van datafusie. Met deze methode kan de draaiing over de z-as (Yaw) niet berekend worden, hiervoor is een magnetometer nodig. Dit komt doordat de z-as in dezelfde zin en richting staat als de zwaartekracht. Wanneer een IMU zo gepositioneerd is dat deze evenwijdig is met het aardoppervlak dan zal er enkel in de z-richting een versnelling (valversnelling) gemeten worden. Als er in deze positie rond de z-as gedraaid wordt dan zal er nog steeds enkel in de z-richting een meting

plaatsvinden van 1G. Hierdoor kan de rotatie rond de z-as niet berekend worden. Figuur 42 geeft deze visualisatie weer.



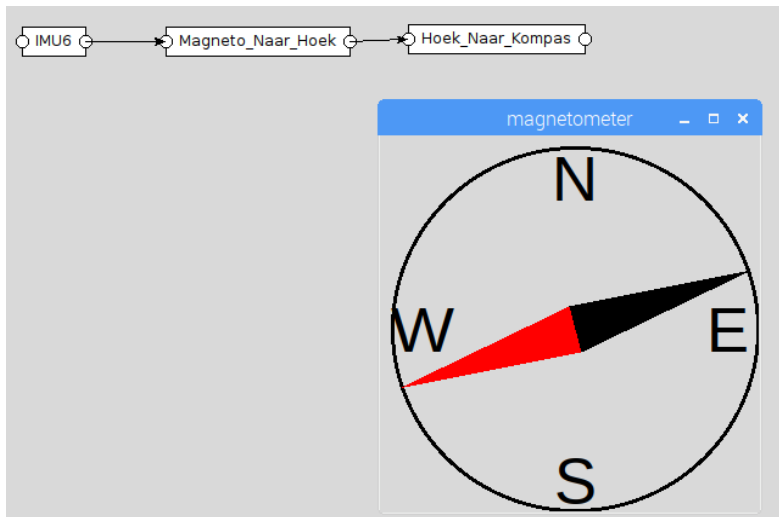
Figuur 42 Visualisatie van de tilt sensor

4.2.3.2 Visualisatie magnetometer

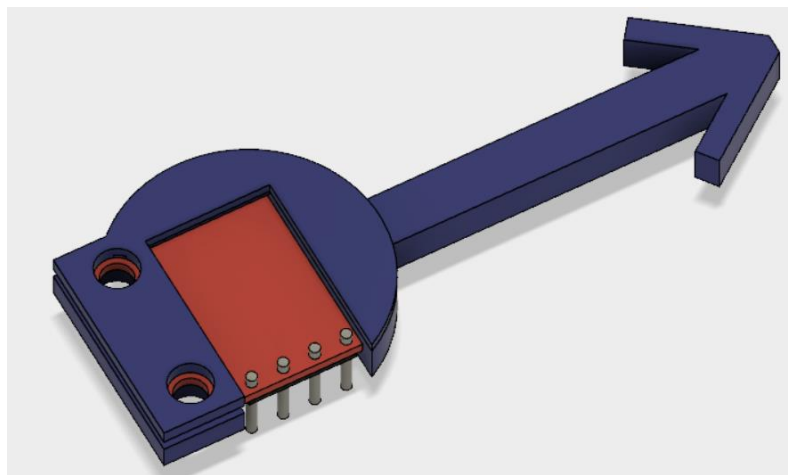
De magnetometer is gevisualiseerd als een kompas. Deze visualisatie wordt weergegeven in Figuur 43. Een kompas is een vertrouwd instrument voor zowel leerlingen als leerkrachten en waarmee een rotatie rond de z-as gepresenteerd kan worden. De berekening van deze rotatie gebeurt aan de hand van formule (24) [80].

$$Hoek = atan\left(\frac{y}{x}\right) * \frac{180}{pi} + 180 \quad (24)$$

In deze formule (24) stellen x en y de data in de x en y-richting van de magnetometer voor. De *hoek* is de hoek die de rode pijl van het kompas maakt met de horizontale lijn door de oorsprong van het kompas. Wanneer er geen magneet in de buurt is, zal de rode pijl steeds de afwijking ten opzichte van het magnetische Noorden aanwijzen. Als er een magnetisch veld in de buurt van de magnetometer wordt gebracht dan zal de rode pijl naar het Noorden van dit magnetisch veld wijzen. Dit is een handige tool om de werking van het magnetisch veld te illustreren. [80] Om de juiste werking te garanderen moet de IMU horizontaal liggen, dit komt door de designkeuze van formule (24), wil men de IMU toch in verschillende standen die niet horizontaal liggen gebruiken als kompas dan moet men de tilt komende van de accelerometer uit de formules (22) en (23) meten die de IMU maakt in de ruimte om zo de opgemeten x, y en z waardes van de magnetometer te kunnen projecteren in een representatief x, y vlak [81]. Om dit kompas fysiek weer te geven is er een pijl ontworpen waarin de IMU geplaatst kan worden. Wanneer de leerlingen vervolgens zorgen de rode pijl van de visualisatie overeenkomt met het Noorden, dan zal deze fysieke pijl naar het werkelijke Noorden wijzen. Figuur 44 toont deze pijl.



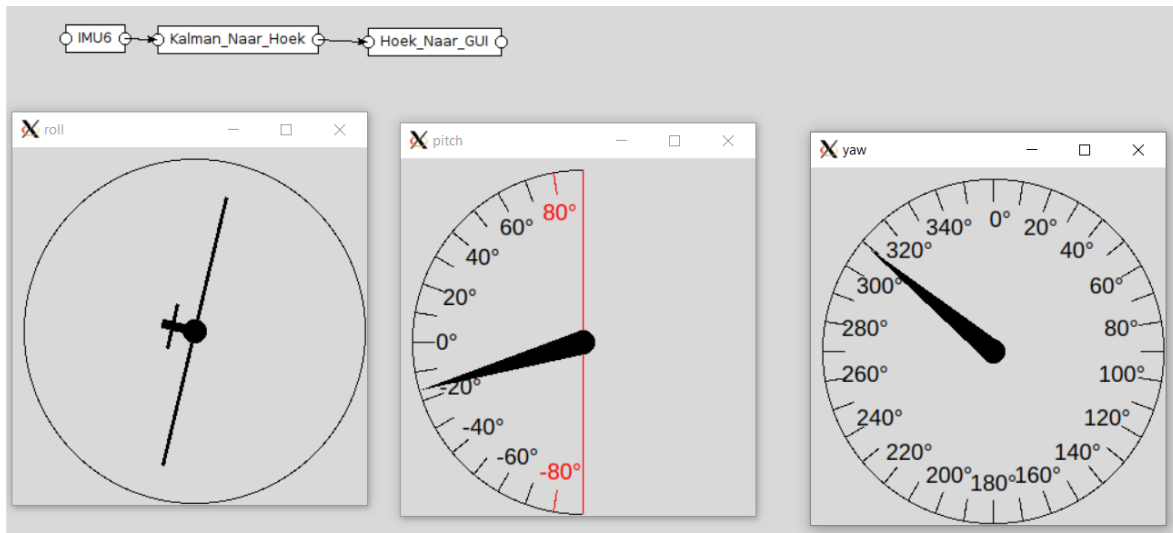
Figuur 43 Visualisatie magnetometer



Figuur 44 Pijl IMU

4.2.3.3 Visualisatie Tait Bryan hoeken

De volgende stap in de implementatie van de IMU, is het ontwikkelen van een blokje dat de Roll, Pitch en Yaw van 1 IMU berekent. Dit blokje krijgt als input de data uit het IMUX-blokje en geeft als output 3 Tait Bryan hoeken. Om deze 3 hoeken te visualiseren is er een nieuw blokje ontwikkelt. Deze visualisatie wordt weergegeven in Figuur 45. Dankzij het gebruik van de Kalman filter is er geen gyroscopische drift meer te zien.



Figuur 45 Visualisatie van Roll, Pitch en Yaw (Tait Bryan hoeken)

4.2.3.4 Motoraansturing met 1 IMU

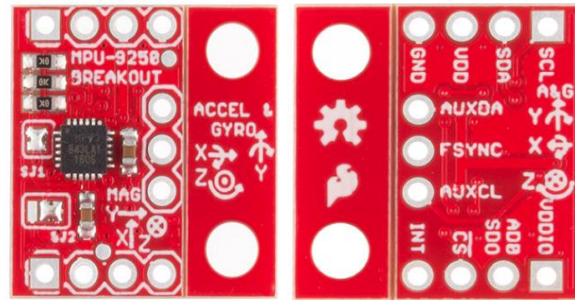
Nu één IMU juist uitgelezen wordt, is de volgende stap naar het bereiken van een werkend exoskelet, het aansturen van de servomotor met de data uit 1 IMU. Om dit te doen zijn er 2 blokjes ontwikkeld. Het eerste blokje zet één van de binnenkomende Tait Bryan hoeken om in een PWM-signaal. Het tweede blokje stuurt dit PWM-signaal naar de motor. Om de hoek om te zetten naar een PWM-signaal wordt formule (25) gebruikt. Deze formule vormt een hoek om naar een nuttig PWM-signaal dat door **apigpio** library gebruikt kan worden, waarbij 2500 de maximum PWM-waarde is (hier stelt het getal 2500 een PWM-signaal met arbeidscyclus van 100% voor). Hier wordt er nog + 540 gedaan omdat als men een hoek van 0° (-180° + 180 in formule (25)) uitstuurt naar de motor dit in realiteit ook moet overeenkomen met 0° en bij een PWM-waarde van 540 wordt dit gerealiseerd.

$$PWM = \min\left(\frac{hoek + 180}{360} * 2000 + 540, 2500\right) \quad (25)$$

Het aansturen van de motor gebeurt met de **apigpio** library, deze library stuurt het PWM-signaal via een van de GPIO-pinnen van de Raspberry Pi naar de servomotor. Deze library is gekozen omdat de motor hiermee asynchroon kan worden aangestuurd, hierdoor kan de motor verschillende asynchrone taken uitvoeren zonder al te veel stil te staan bij de motor aansturing. De functie **set_servo_pulsewidth** is gebruikt van de **apigpio** library. Hierbij stelt een waarde van 500 de uiterste hoek tegen de klok in van de motor voor en 2500 de uiterste hoek met de klok mee van de motor. Vandaar komt men in formule (25) aan het getal 540, dit gaf het beste resultaat voor een hoek van -180 graden. Deze designkeuze zorgt er ook voor dat een hoek van 0° overeenkomt met de middenstand van de motor.

4.2.3.5 Motoraansturing met 2 IMU's

Nu één IMU een motor kan controleren, kan er in een volgende stap overgegaan worden en dat is het aansturen van de motor met twee IMU's. De tweede IMU wordt hierbij op dezelfde I2C-bus gezet als de eerste. Om te zorgen dat de Raspberry Pi beide IMU's kan onderscheiden, worden deze op een verschillend adres gezet. Dit gebeurt door de SJ2-brug op het IMU-break-out board van Sparkfun te verleggen zoals men op Figuur 46 kan zien. Hierdoor kan de AD0-pin gebruikt worden om te kiezen tussen adressen 68 en 69 afhankelijk van een lage of hoge ingang.



Figuur 46 IMU break-out board [3]

Het connecteren van de 2 IMU's gebeurt met behulp van een 8-wire flat ribbon cable (Figuur 47), hierbij worden de 4 gebruikte pinnen zo op de flat ribbon cable gemonteerd dat er telkens een ongebruikte draad tussen elke gebruikte kabel zit. De 4 ongebruikte kabels worden vervolgens met de grond verbonden om crosstalk tussen de verschillende datalijnen te vermijden.



Figuur 47 Flat ribbon cable [82]

In de grafische gebruikersweergave wordt de berekening van de hoek tussen de twee IMU's voorgesteld met behulp van twee blokjes. Het eerste blokje fuseert de data uit beide IMU's tot één datastroom. Hierbij plaatst het programma de data uit beide IMU's in 1 tuple, vervolgens stuurt het deze tuple naar het volgende blokje. Het tweede blokje berekent de hoek tussen de twee IMU's, dit doet het volgens de methode uitgelegd in sectie 3.4. De bekomen hoek kan vervolgens gebruikt worden om de motor aan te sturen. Het uiteindelijk stroomdiagram voor de aansturing van de motor met twee IMU's is weergegeven in Figuur 48.



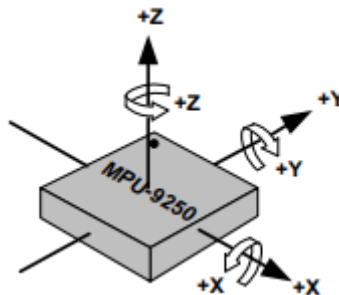
Figuur 48 Stroomdiagram van de IMU's die gestuurd worden naar de motor

4.3 Visualisatie van de IMU-data

Nu de IMU geïmplementeerd is met de nodige educatieve tussenstappen zoals de roll en pitch van de accelerometer te visualiseren en de visualisatie van de magnetometer in de vorm van een kompas. Is de volgende stap het vergelijken van de verschillende gegevens uit de sensoren van de IMU en te kijken of de Kalman filter zorgt voor een verbetering op vlak van gyroscopische drift. Deze vergelijking is representatief voorgesteld door de data vanuit python code te printen naar de terminal waarin het commando wordt ingegeven om de code uit te voeren. Door aan dit commando `>>>textfile.txt` toe te voegen zal de data in een tekstbestand worden opgeslagen. Het uiteindelijke commando wordt dus **commando** `>> textfile.txt` en hierbij zullen alle gegevens die geprint worden in de terminal rechtstreeks in het textfile.txt bestand worden ingevuld. Vervolgens zullen de gegevens met behulp van Matlab ingelezen en verwerkt worden tot een grafische voorstelling zoals een grafiek of een histogram. De sample tijden worden gemeten op basis van een functie die in de **time library** van Python zit namelijk `perf_counter ()` [83].

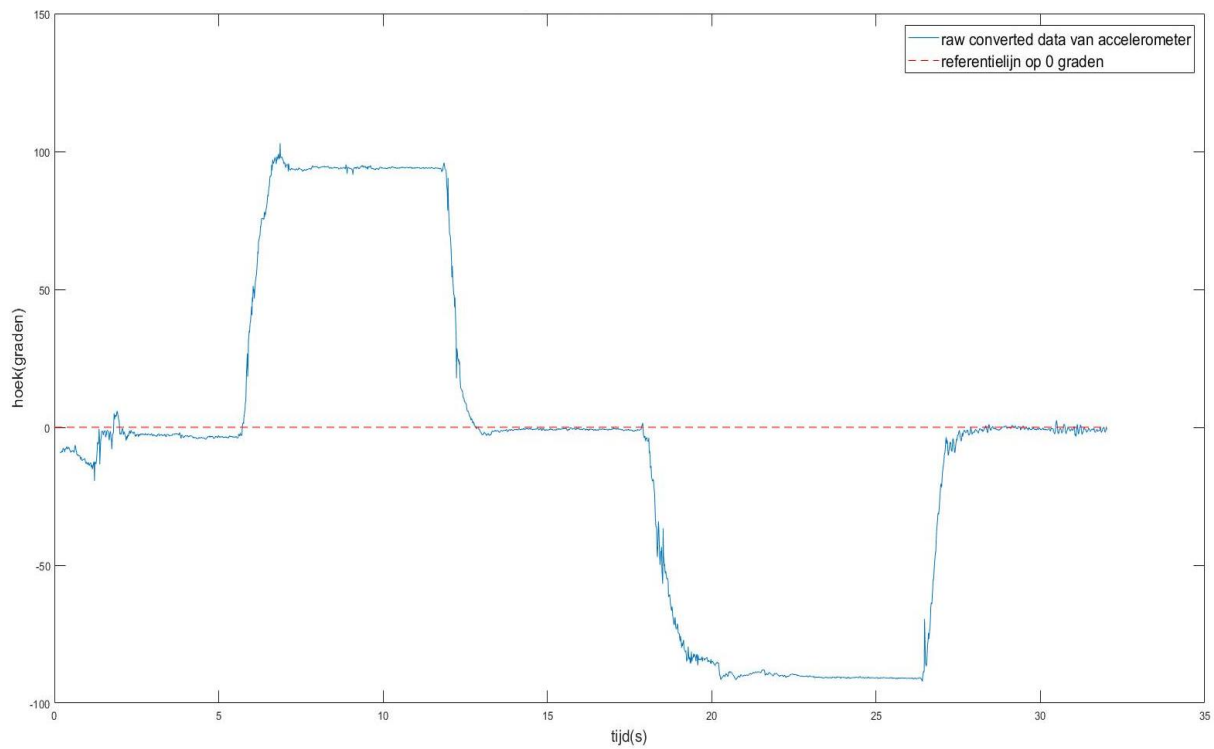
4.3.1 Accelerometer

Figuur 50 stelt de gegevens van de accelerometer omgevormd naar roll voor met behulp van formule (22). Hierbij stelt de rode streeplijn een referentielijn voor rond 0° . De blauwe lijn stelt de data van accelerometer voor die een rotatie rond de x-as in Figuur 49 maakt die vertrekt van 0° en naar $\pm 90^\circ$ roteert en in deze stand een tiental seconden blijft stilstaan om vervolgens terug te keren naar 0° en dan rond dezelfde as $\pm 90^\circ$ in de tegengestelde richting terug te draaien.



Figuur 49 MPU-9250 representatie van de assen [84, p. 38]

Figuur 50 laat zien dat de accelerometer redelijk veel hoogfrequente ruis bevat maar toch drift-vrij is. Deze hoogfrequente ruis komt door het ontwerp van de MEMS accelerometer omdat de massa die beweegt bij een versnelling bij de kleinste trilling beweegt, wat voor de hoogfrequente ruis zorgt. De data van de accelerometer is nuttig voor een Kalman filter omdat deze drift-vrij is, Figuur 50 laat dit zien door middel van een referentielijn rond 0° . In een Kalman filter zal een klein stuk van de accelerometer toegevoegd worden aan de gegevens van de gyroscoop om zo de drift te verminderen en een representatieve hoekrotatie te krijgen, dit is uitvoeriger beschreven in sectie 3.4.



Figuur 50 Accelerometer gegevens naar Roll geconverteerd

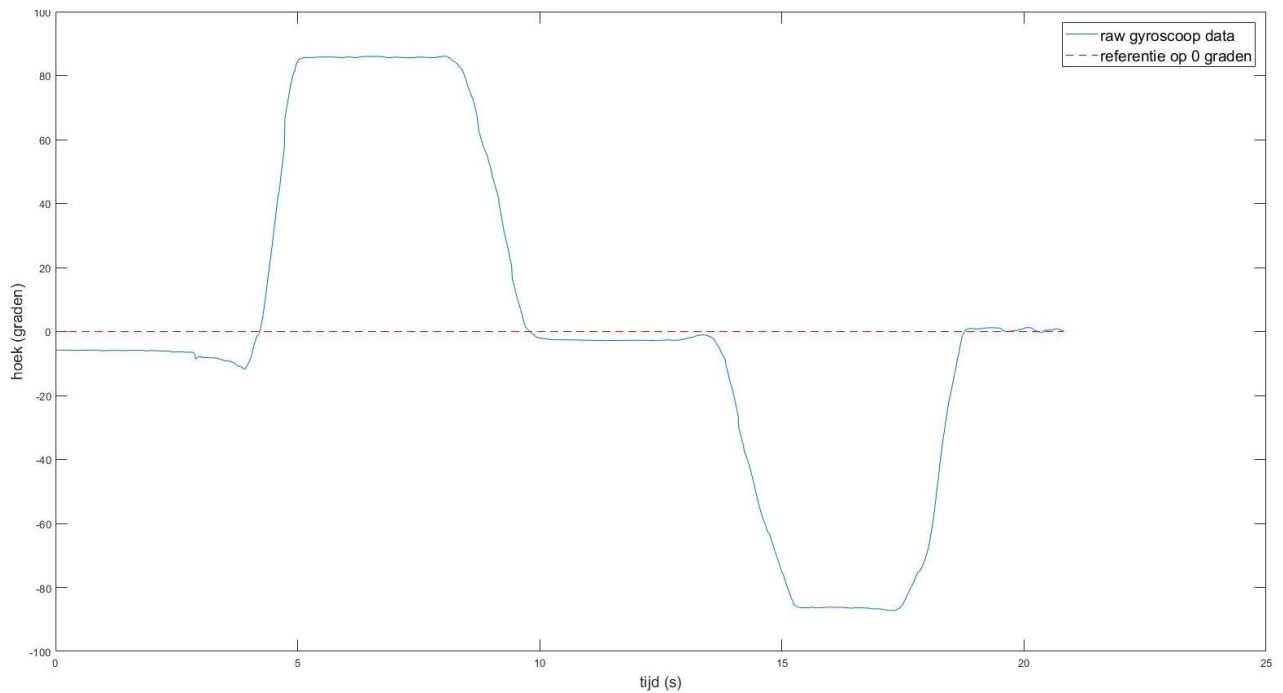
4.3.2 Gyroscop

Figuur 51 stelt de gyroscop met zijn hoekverdraaiing voor rond de x-as. Uit de gyroscop komen hoeksnelheden voor iedere as, deze worden dan opgeslagen en in Matlab verwerkt tot een hoekstand. Dit wordt gedaan door middel van de trapeziumvormige integratiemethode [85], concreet komt dit neer op formule (26).

$$\text{NieuweHoek (graden)} = \text{OudeHoek (graden)} + \int_a^b f(x)dx \quad (26)$$

Waarbij

$$\int_a^b f(x)dx = \text{sampletijd}(\text{tijdstip } x) * f(x - 1) + 0.5 * \text{sampletijd}(x) * [(f(x) - f(x - 1))]$$



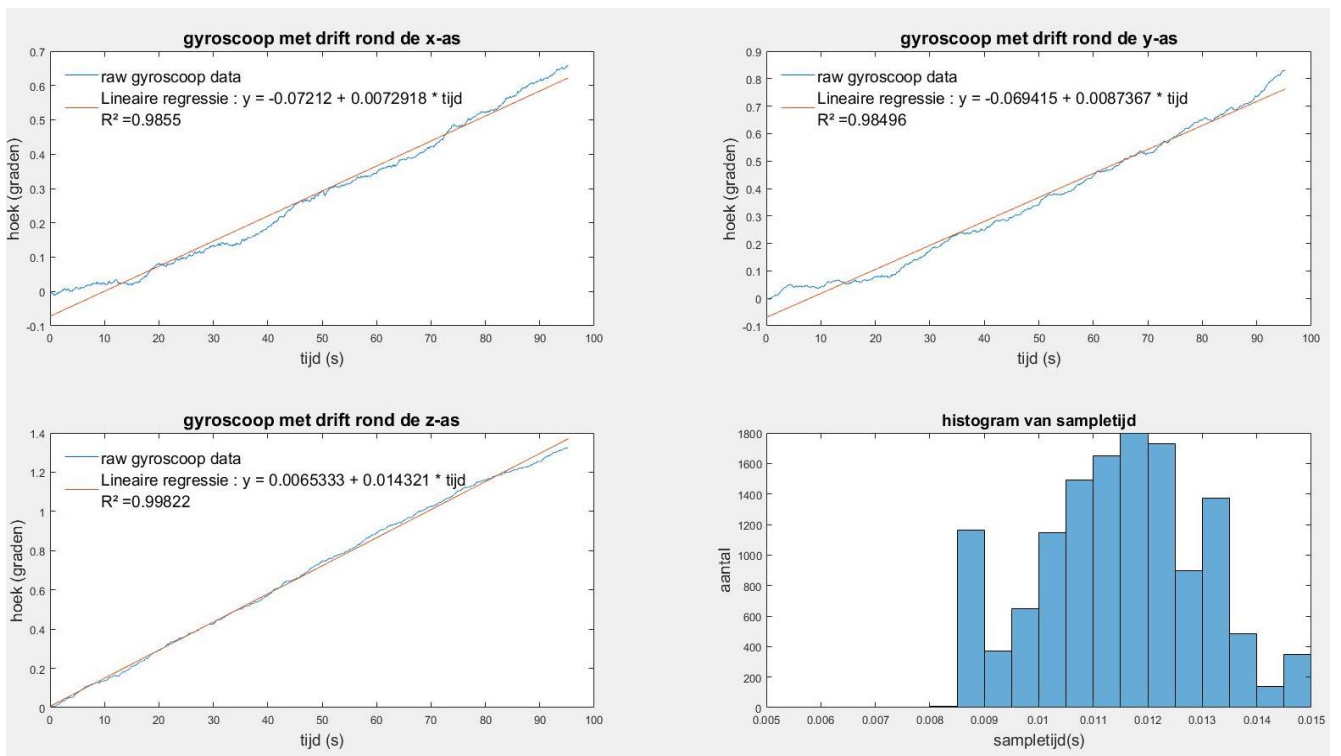
Figuur 51 Gyroscopie geïntegreerd met de sample tijd voor de hoekpositie rond een as

Figuur 51 stelt ongeveer dezelfde beweging voor als Figuur 50 de rotatie is rond dezelfde as gedaan als bij de accelerometer, namelijk de x-as van de MPU-9250. Merk op Figuur 51 dat de gegevens veel minder ruis bevatten, dit komt omdat een gyroscopie veel minder gevoelig is voor ruis van plotse bewegingen of trillingen in vergelijking met een accelerometer. Een nadeel van het integreren van de hoeksnelheid is een fenomeen dat gyroscopische drift heet, dit is niet goed te zien in Figuur 51 omdat dit fenomeen pas merkbaar is op langere tijdsintervallen. De reden waarom de MPU-9250 niet perfect teruggekeerd is naar zijn beginpunt kan te maken hebben met het feit dat deze manueel in de lucht werd gehouden, op het einde (rond 20 seconden) eindigt de grafiek ongeveer op 5 graden meer dan de startwaarde dit zou op een gyroscopische drift van 0.25 graden/seconden duiden wat redelijk veel is. Tussen 17-21 seconden is de MPU-9250 ‘gestabiliseerd’ en is de drift bijna niet meer waarneembaar. Om dit verder te onderzoeken moet men de drift modelleren door een IMU voor een langere tijd bewegingsloos te houden.

Om de gyroscopische drift te modelleren is er een meting gedaan waarbij de sensor perfect stil bleef liggen voor een langere periode. Hierna is de hoek opnieuw geplotted met Matlab door formule (26), (24) te gebruiken. Figuur 52 toont de gyroscopische drift alsook een histogram van de verkregen sample tijden links onderaan in de afbeelding. Zoals de literatuur al doet vermoeden kloppen deze modellen aangezien dat meerdere bronnen zeggen dat de gyroscopische drift rond de z-as (yaw) altijd het grootste is [47], [86].

De gyroscopische drift is op basis van lineaire regressie gemodelleerd aangezien er een direct lineair verband is tussen de tijd (s) en de gyroscopische drift in graden [86], [87]. Volgens de principiële formule (2) kan men dit lineaire verband tussen de drift en de tijd zien in de vorm van:

$$\text{Sensor bias (graden/s)} * \text{tijd(s)}$$



Figuur 52 Modelisatie van de gyroscopische drift

In Figuur 52 is de gyroscopische drift waarneembaar. Dit is aan de hand van lineaire regressie gemodelleerd. Hierbij is de MPU-9250 95 seconden bewegingsloos neergelegd. Daarna is deze data geplott in Matlab met behulp van de trapeziumvormige integratiemethode. Lineaire regressie is erop toegepast aan de hand van een Matlab functie **polyfit (x, y, n)** als men in de functie parameter n de waarde 1 invult krijgt men de coëfficiënten van een lineair model in de vorm van $y = \text{coëfficiënt (2)} + \text{coëfficiënt (1)} * x$. Vervolgens kan men deze grafiek plotten met behulp van de functie **polyval(coëfficiënten, x)**, in ons geval is er in de x parameter een vector van de tijd ingevuld. Tabel 8 vat de lineaire regressie samen van de verschillende assen van de gyroscoop in de MPU-9250 volgens de formule $y = a + b*x$.

Om de drift/minuut te berekenen voor de verschillende assen moet men coëfficiënt b van Tabel 8 vermenigvuldigen met zestig seconden, in Tabel 8 is dit weergegeven in de laatste kolom. Hierbij is waargenomen dat er vooral in de rotatie rond de z-as (yaw) veel drift aanwezig is, na anderhalve minuut is de gyroscoop namelijk al 1 graad uitgeweken door de gyroscopische drift. Dit is te veel voor deze educatieve toepassing waarbij de MPU-9250 gebruikt wordt om de armbeweging na te bootsen.

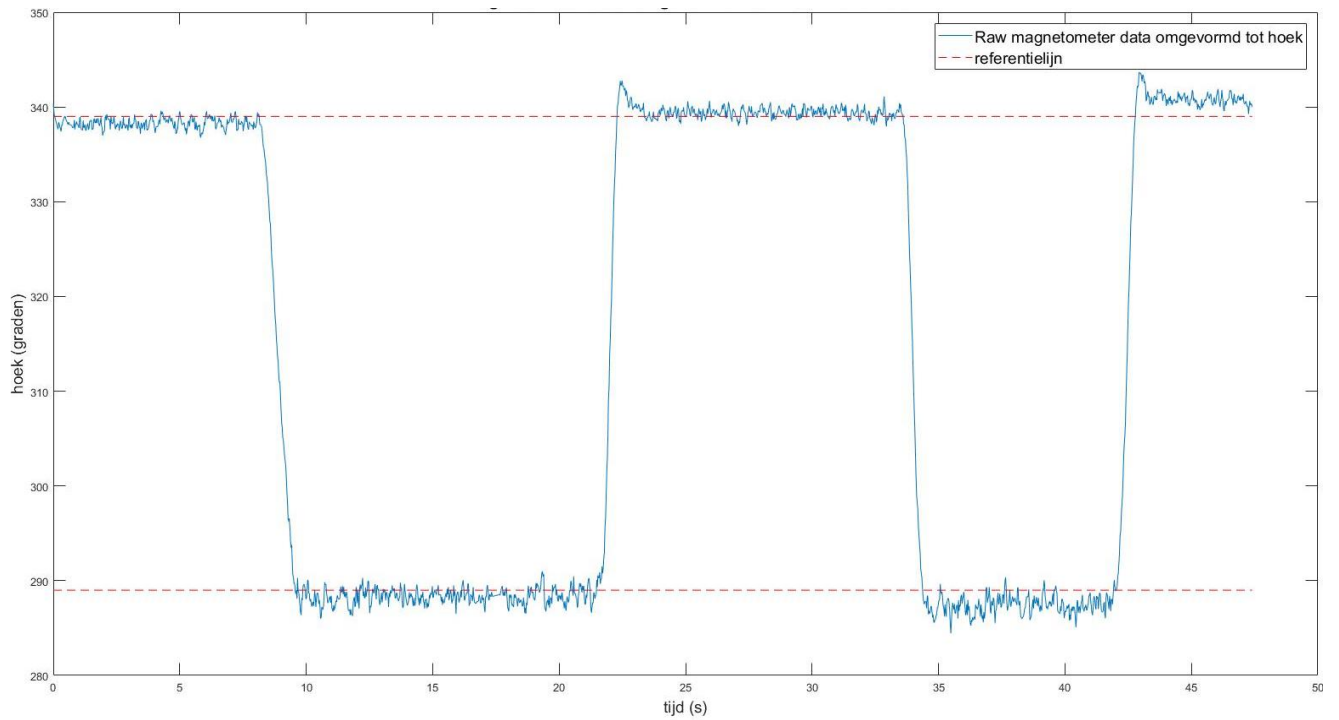
Tabel 8 Lineaire regressies van de verschillende assen van de gyroscoop in de MPU-9250

As	Coëfficiënt a	Coëfficiënt b	R ²	Drift (graden) / min.
X	-0.07212	0.0072918	0.9855	0.437508
Y	-0.069415	0.0087367	0.98496	0.524202
Z	0.0034936	0.014321	0.99822	0.85926

De derde kolom van Tabel 8 toont de R² waarde, deze is in Matlab berekend aan de hand van de functie **regress (x, y)** [88]. Als men hierbij naar de laatste kolom genaamd *stats* kijkt die deze functie als output geeft, dan kan men daar verschillende nuttige waardes uit halen zoals de R² waarde. Deze R² is een goede indicatie van hoezeer de curve van de lineaire regressie de gegevens die uit de gyroscoop benadert. Concreet wil dit zeggen dat hoe hoger de R²-waarde is des te lineairder het verband tussen de gegevens uit de gyroscoop zal zijn. Er is een duidelijk lineair verband tussen de tijd en de gyroscopische drift waardoor de drift (graden) /min kan benaderd worden door een lineaire regressie, deze kan gemodelleerd worden op basis van de coëfficiënten a en b uit Tabel 8.

4.3.3 Magnetometer

Een volgende stap is de magnetometer inlezen en visueel weergegeven in een grafiek, hierbij is gebruik gemaakt van formule (24) om de gegevens uit de Hall-effect sensoren in de x en y-richting om te vormen naar een nuttige rotatiehoek rond de z-as van de MPU-9250 die in Figuur 49 geïllustreerd is. Figuur 53 stelt een rotatie rond deze z-as voor.

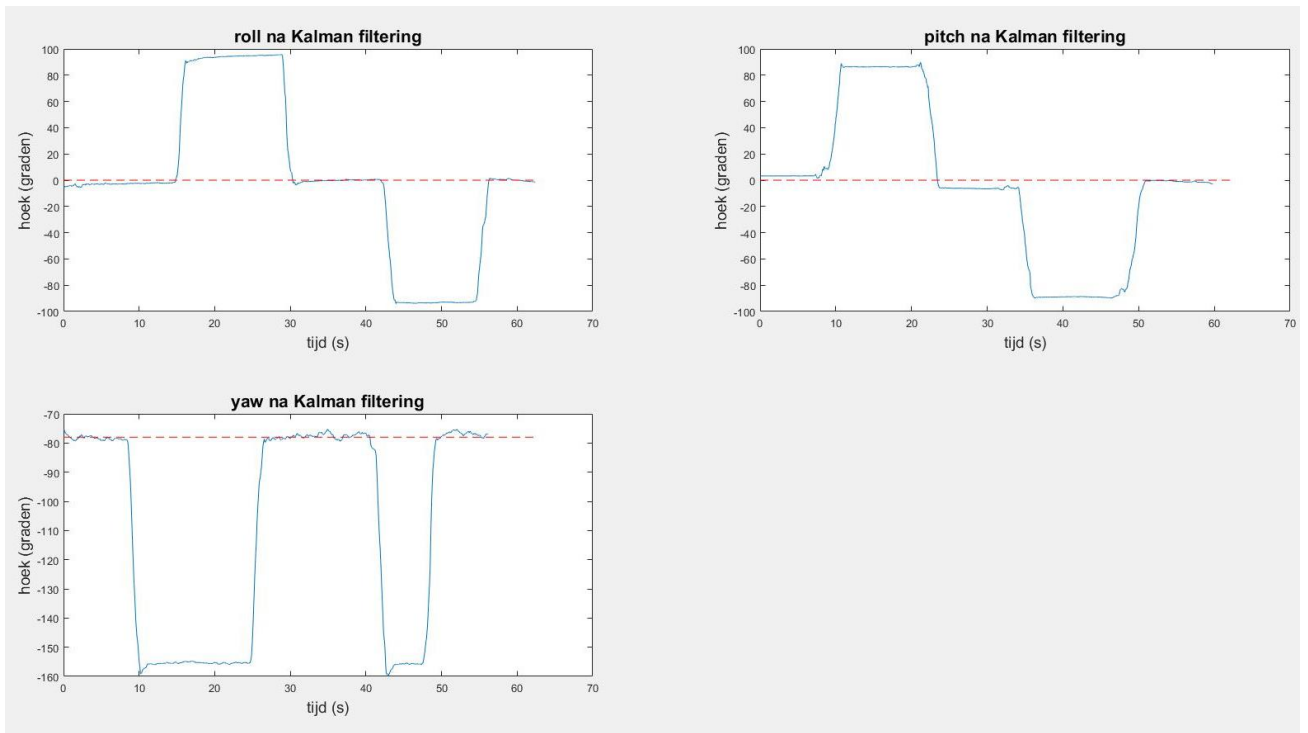


Figuur 53 Magnetometer x en y as omgevormd naar rotatiehoek rond de z-as van MPU-9250

Figuur 53 laat een rotatie rond de z-as zien die een beginpositie heeft van $\pm 340^\circ$ en die dan $\pm 50^\circ$ met de klok mee roteert rond de z-as van de MPU-9250. Vervolgens wordt dezelfde rotatie in de andere richting terug naar het startpunt uitgevoerd. Deze Figuur 53 toont aan dat de gegevens uit de magnetometer drift vrij zijn. De Hall-effect sensor bevat wel redelijk veel ruis wat te verwachten is bij dit soort sensor [89], [90]. De reden waarom de magnetometer niet rond 0° is geroteerd zoals de rotaties in deelstukken 4.3.1 en 4.3.2, is omdat het redelijk moeilijk is om de magnetometer op die wijze te positioneren zonder enige vorm van referentie. Hierdoor is er gemakkelijker halve een eenvoudig referentiepunt gekozen, namelijk een van de vlakke kanten van de MPU-9250 die gelijklag met een vlakke, rechte kant van een tafel.

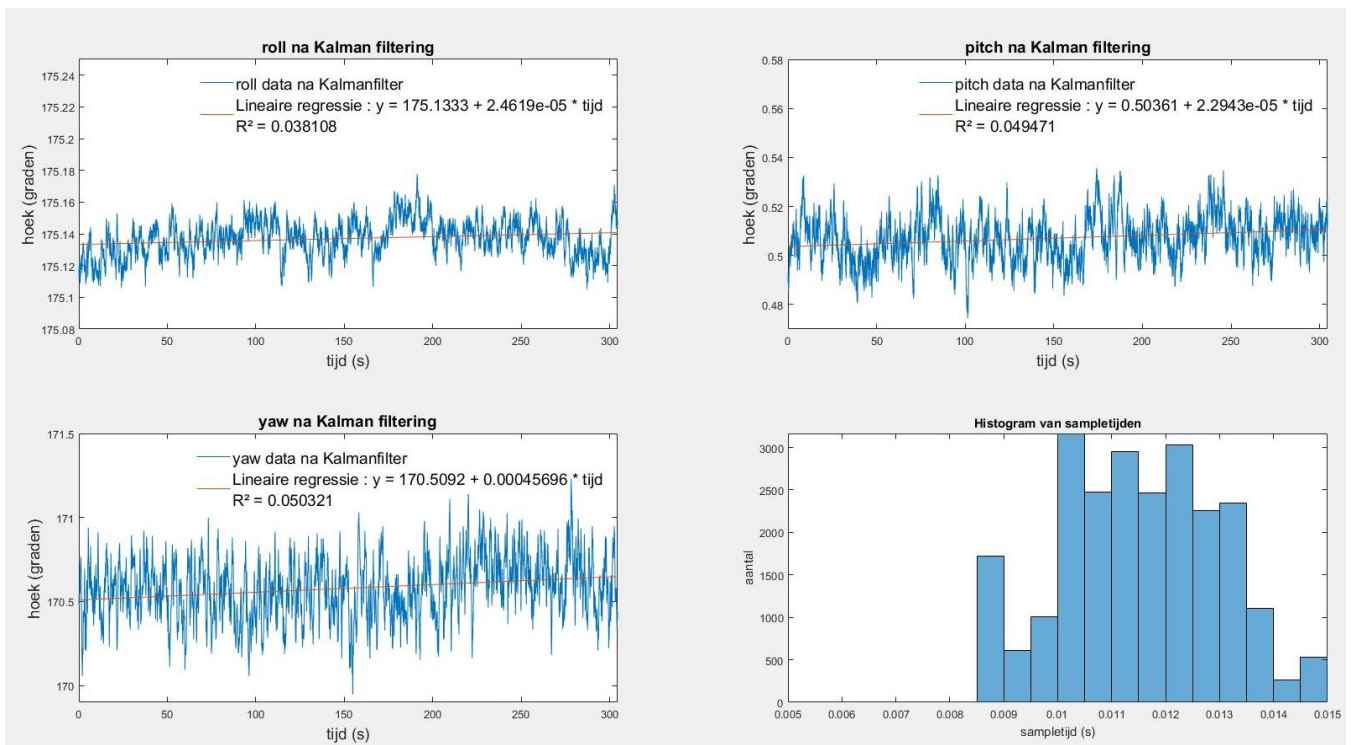
4.3.4 Kalman filter

De laatste stap maar ook een van de belangrijkste is het inlezen en analyseren van de gegevens die komen uit de Kalman Filter. Zoals men in sectie 3.4 heeft besproken komt er een quaternion uit de Kalman filter, deze wordt eerst nog omgevormd naar Tait Bryan hoeken (roll, pitch en yaw) om ze vervolgens te kunnen visualiseren in Figuur 54. Hier is te zien dat in vergelijking met de accelerometer deze veel minder ruis bevat zeker op vlak van roll en pitch. In de yaw-as is er een stuk van de magnetometer gebruikt voor de datafusie hierdoor bevat deze iets meer ruis, dit kan te wijten zijn aan externe magneetvelden door kabels of de omgeving die de hall-effect sensor verstoren. Merk bij Figuur 54 ook op dat er geen drift meer aanwezig is in het signaal, dit is ook nog eens uitvoerig getest in Figuur 55.



Figuur 54 Roll, Pitch en Yaw voorstelling (Tait Bryan hoeken) na Kalman filter

In Figuur 55 is de MPU-9250 300 seconden lang bewegingsloos gelegd op een vlak oppervlak, vervolgens zijn de waarden voor de roll, pitch en yaw die komen uit het omgevormde quaternion van de Kalman filter gevisualiseerd met behulp van Matlab. Hierop is een lineaire regressie toegepast om de curve te kunnen fitten volgens een lineair model zoals men in het deelstuk 4.3.2 bij de gyroscoop ook heeft gedaan. De lineaire regressie is op dezelfde manier toegepast als in 4.3.2.

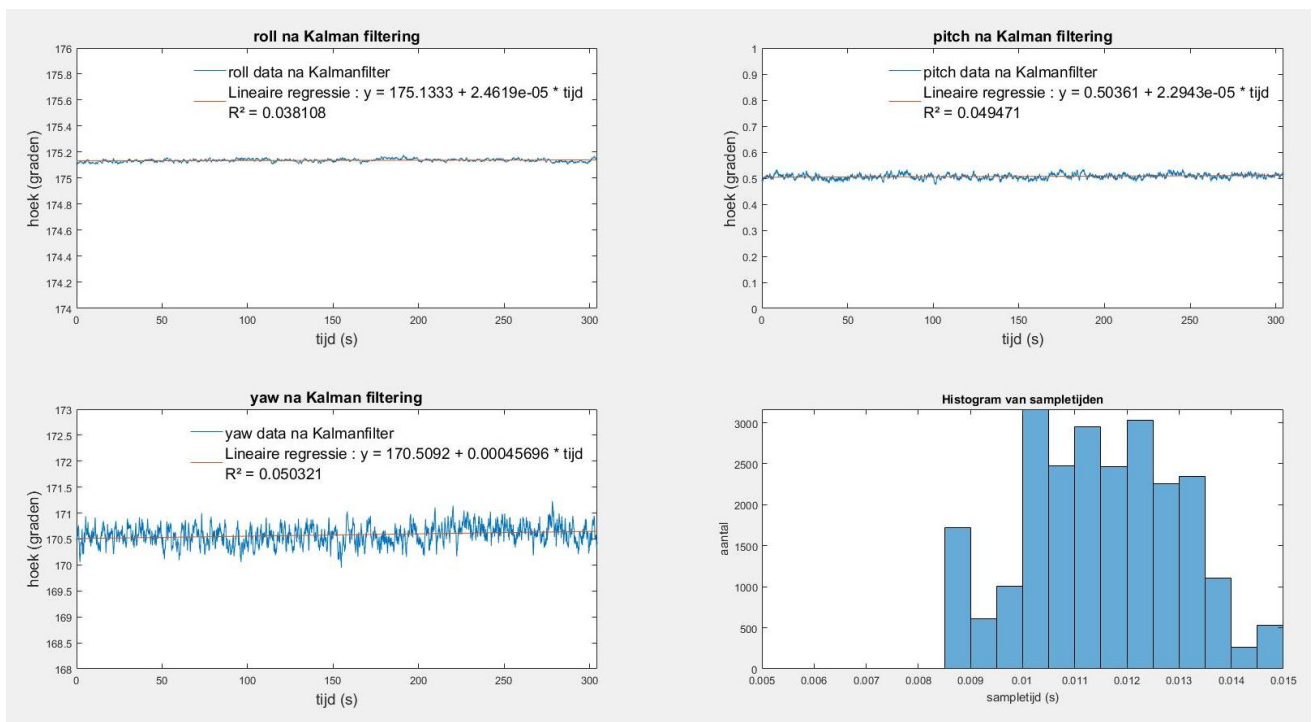


Figuur 55 Roll, Pitch en Yaw drift na Kalman filtering

Tabel 9 Lineaire regressies van de verschillende assen na Kalman filtering van de MPU-9250

As	Coëfficiënt a	Coëfficiënt b	R ²	Drift (graden) / min
X	175.1333	2.4619e-05	0.038108	0.001477
Y	0.50361	2.2943e-05	0.049471	0.001377
Z	170.5092	0.00045696	0.050321	0.027418

Wat in Tabel 9 opvalt is de lage R² waarde, dit is te wijten aan het feit dat er een grote ‘spreiding’ is in de resultaten hierdoor kan de lineaire regressie deze spreiding of in het geval van onze sensor ruis niet voorspellen waardoor er een grote residuele variantie is. Dit neemt niet weg dat deze curve fitting correct is, want Figuur 56 geeft een uitgezoomd beeld van de curve fitting weer en hier ziet men dat de curve komende van de lineaire regressie de gegevens komende van de MPU-9250 goed nabootst wat er toch op wijst dat de curve fitting een goede benadering van de drift komende uit de Kalman filter is. In Figuur 56 zien we hetzelfde terugkomen op vlak van de yaw als in Figuur 54, hierbij bevat deze iets meer ruis in vergelijking met de andere assen.



Figuur 56 Uitgezoomd beeld van de drift na Kalman filtering van de MPU-9250

4.3.5 Conclusie van de gegevens

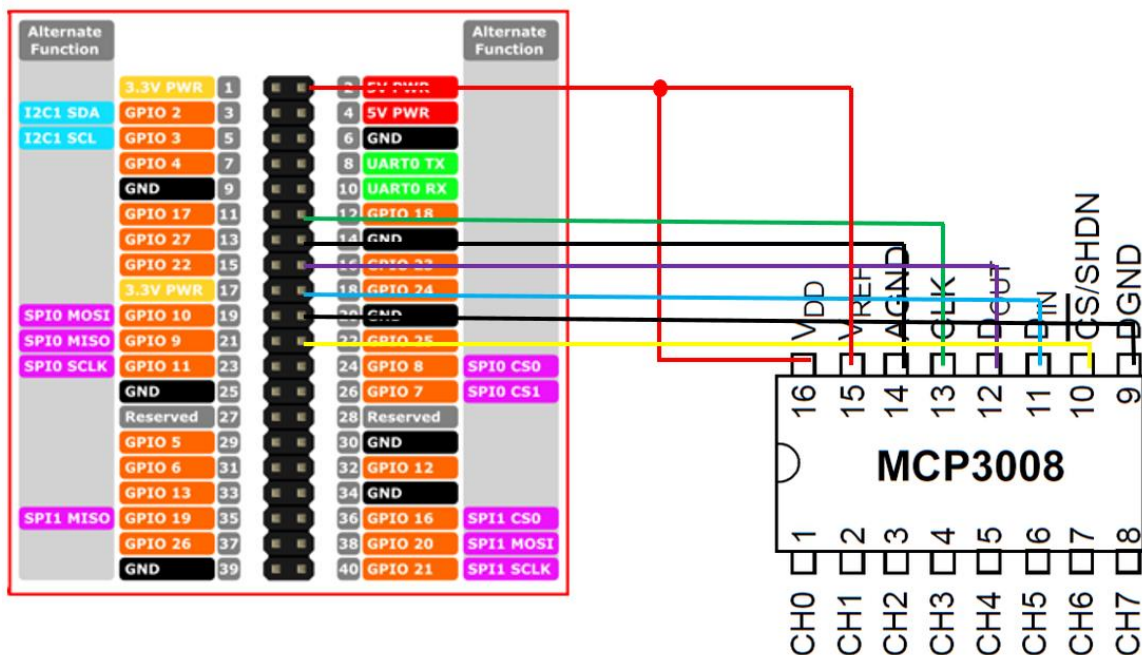
Tabel 10 Drift vergelijking tussen Kalman filter en gyroscoop van de MPU-9250

As	Drift (graden) / min Kalman	Drift (graden) / min Gyroscoop	Verbeteringsfactor gyroscoop / Kalman
x	0.001477	0.437508	~105
y	0.001377	0.524202	~381
z	0.027418	0.85926	~31

Uit Tabel 10 kan er geconcludeerd worden dat er toch een significante verbetering is door gebruik te maken van een Kalman filter in vergelijking met een gyroscoop. Deze verbetering is niet overal gelijk, dit kan te maken hebben met het feit dat bij de z-as een magnetometer gebruikt wordt voor de datafusie, deze werkt minder accuraat als een accelerometer.

4.4 Implementatie flex-sensor

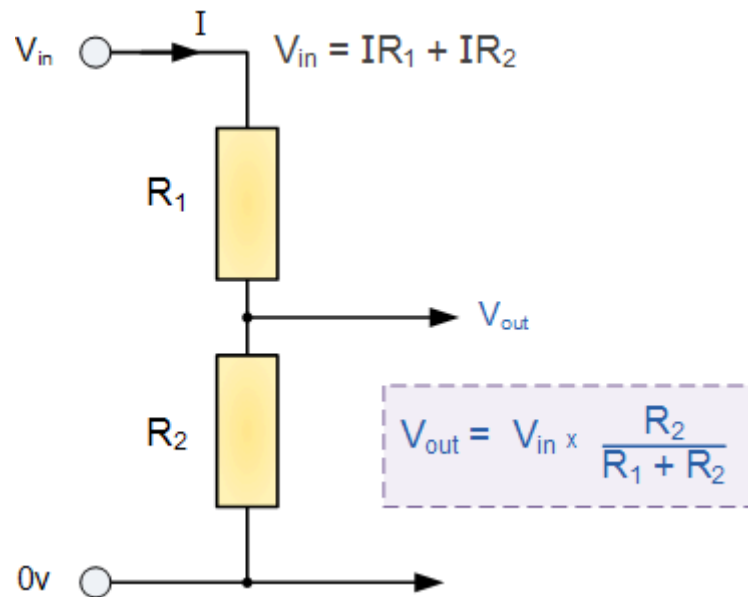
Zoals beschreven in sectie 3.5 is er een ADC nodig om de flex-sensor uit te lezen, de gekozen ADC hiervoor is de MCP3008. Om deze uit te lezen wordt de MCP3008-library van ADAFRUIT gebruikt. In de grafische gebruikersweergave is deze implementatie gebundeld in één blokje. Dit blokje neemt als input een integer tussen 0 en 7 die het gewenste kanaal voorstelt. Afhankelijk van het gekozen kanaal zal het blokje dan een bepaalde digitale waarde uitzenden. Figuur 57 toont de connectie tussen de ADC en de Raspberry Pi.



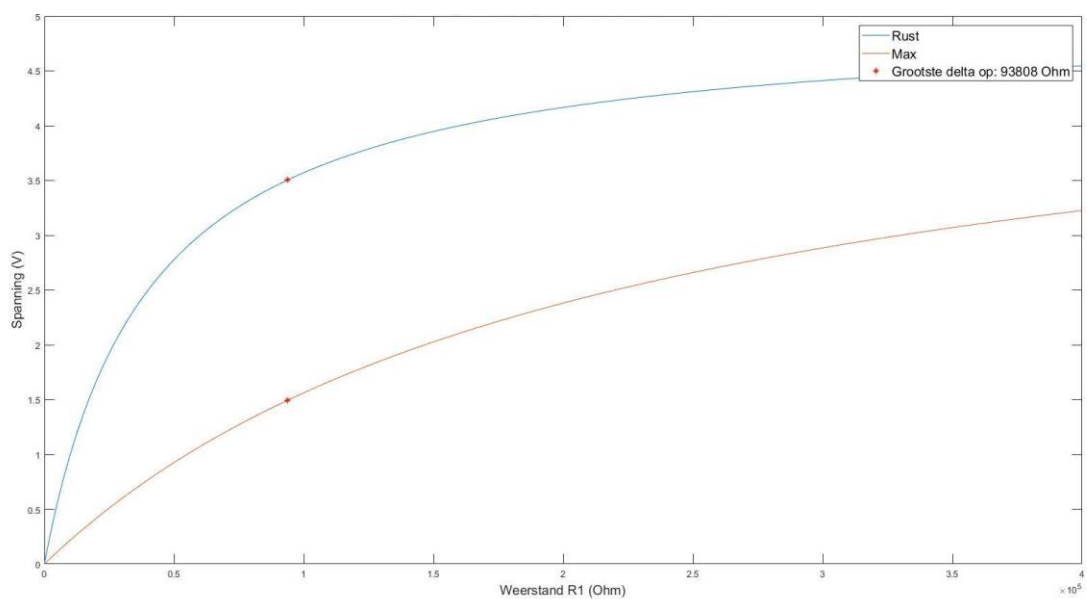
Figuur 57 Connectie ADC en Raspberry Pi

De flex-sensor is een buigzame, variabele weerstand, om deze te lezen wordt er gebruikt gemaakt van een spanningsdeler. Figuur 58 toont het schakelschema van een spanningsdeler. In de gebruikte opstelling stelt R1 de flex-sensor voor en R2 een hulpweerstand met een waarde van 100 kΩ. Deze

waarde is theoretisch bepaald door de uitgangsspanning van de spanningsdeler te plotten. Deze uitgangsspanning wordt berekend met behulp van de formule in Figuur 58. Hierbij stelt R1 de weerstandswaarde van flex-sensor in rust (40 kΩ) voor terwijl de weerstandswaarde voor R2 gevarieerd wordt. De voedingspanning (V_{in}) bedraagt 5V. Vervolgens op dezelfde wijze een andere grafiek geplott waarbij R1 de weerstandswaarde van de flex-sensor bij maximale buiging (220 kΩ) voorstelt. Tenslotte wordt het verschil tussen beide grafieken berekend, dit verschil komt overeen met het bereik waartussen de uitgangsspanning kan variëren. Deze grafieken zijn te zien in Figuur 59, het grootste verschil tussen beide grafieken zit rond 93 kΩ, dit is de reden dat er geopteerd is voor weerstand van 100 kΩ. Om de hoek van de elleboog te meten, wordt de flex-sensor aan de binnenkant van de elleboog geplaatst. Op deze manier beweegt de flex-sensor mee met de buiging van de arm.

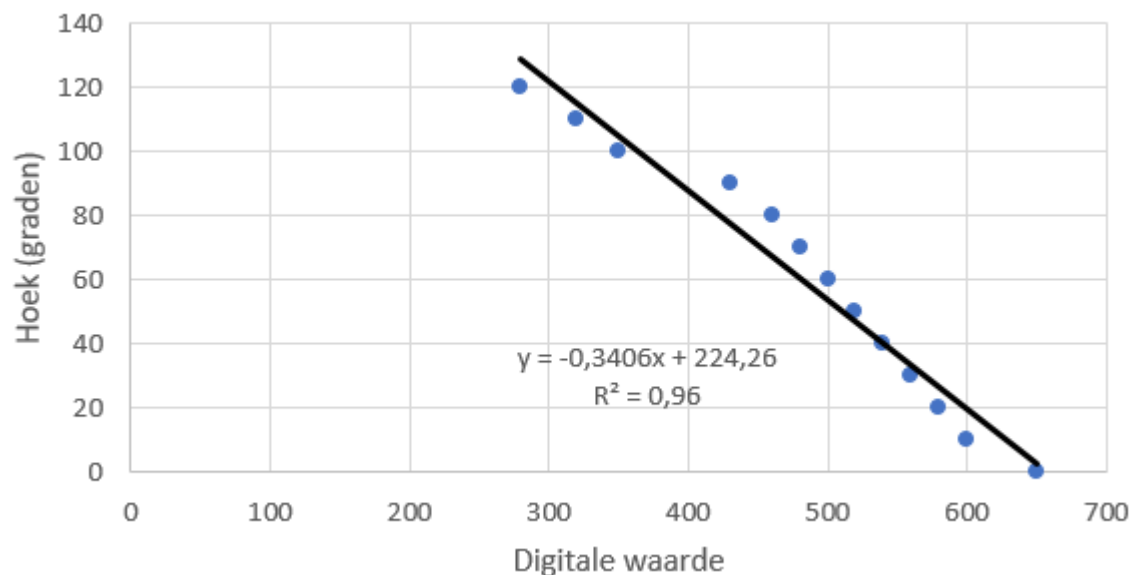


Figuur 58 Spanningsdeler voor flex sensor [91]



Figuur 59 Spanningsverloop bij ruststand en maximale buiging flex-sensor

Het ADC-blokje converteert de analoge waarde naar een digitale waarde en stuurt dit uit. Deze digitale waarde zegt niet veel over de effectieve hoek die de elleboog maakt. Hiervoor is er een extra blokje ontwikkeld dat de digitale waarde omzet naar een hoek. Dit gebeurt op basis van de lineaire verandering van de weerstand van de flex-sensor die experimenteel bepaald is. Het bepalen van de lineaire verandering van de digitale output van de ADC en de daarmee overeenkomstig hoeken is gedaan door de arm op verschillende hoeken stil te houden en dan de waarde van de output bij te houden. Deze waarden zijn dan geplot op Figuur 60, waarna de trendlijn is berekend. Uit deze trendlijn is dan de formule gehaald om de digitale waarde uit de ADC naar de overeenkomstige hoek te converteren.



Figuur 60 Conversie digitale waarde naar hoek

Als uitkomst geeft deze meting dus Formule (27).

$$Hoek = -0.3406 * Digitale\ waarde + 224.26 \quad (27)$$

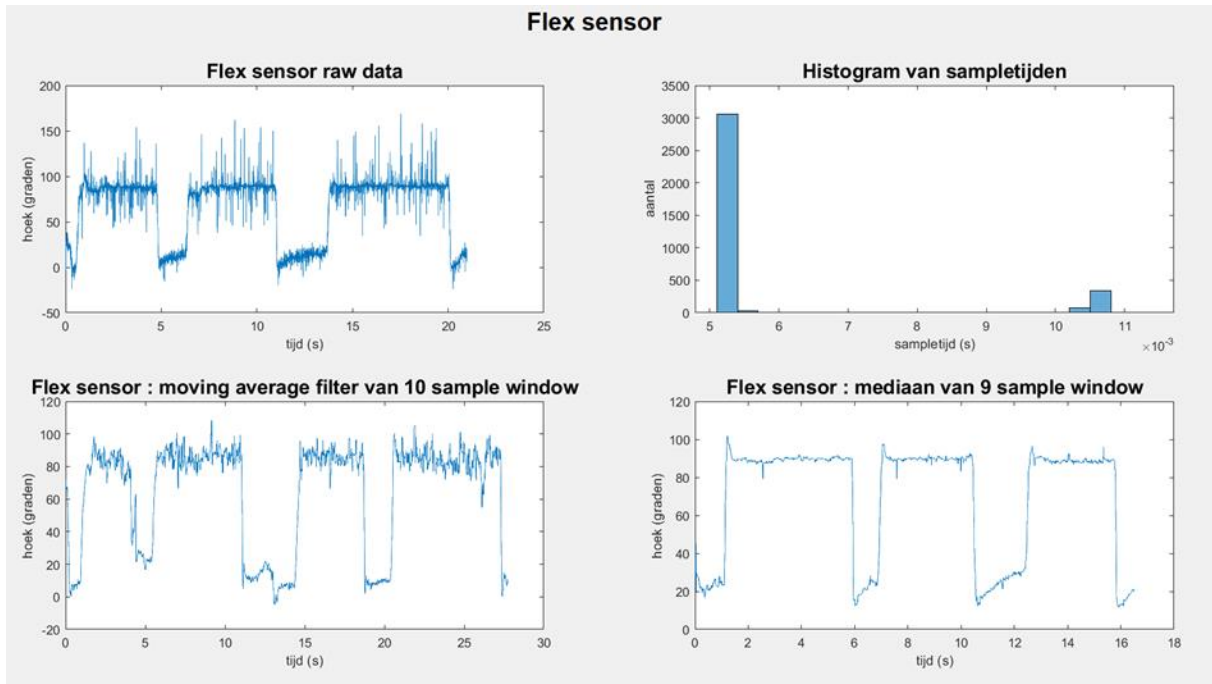
De offset die hier 224.26 bedraagt is afhankelijk van de gekozen vaste weerstand van de spanningsdeler R2 in Figuur 58. Hoe hoger de gekozen weerstand, hoe groter de offset zal zijn.

Uit de hoge R² waarde blijkt dat de lineaire curve fitting een goede benadering is voor het lineaire verband tussen hoek en digitale waarde dat komt van de ADC.

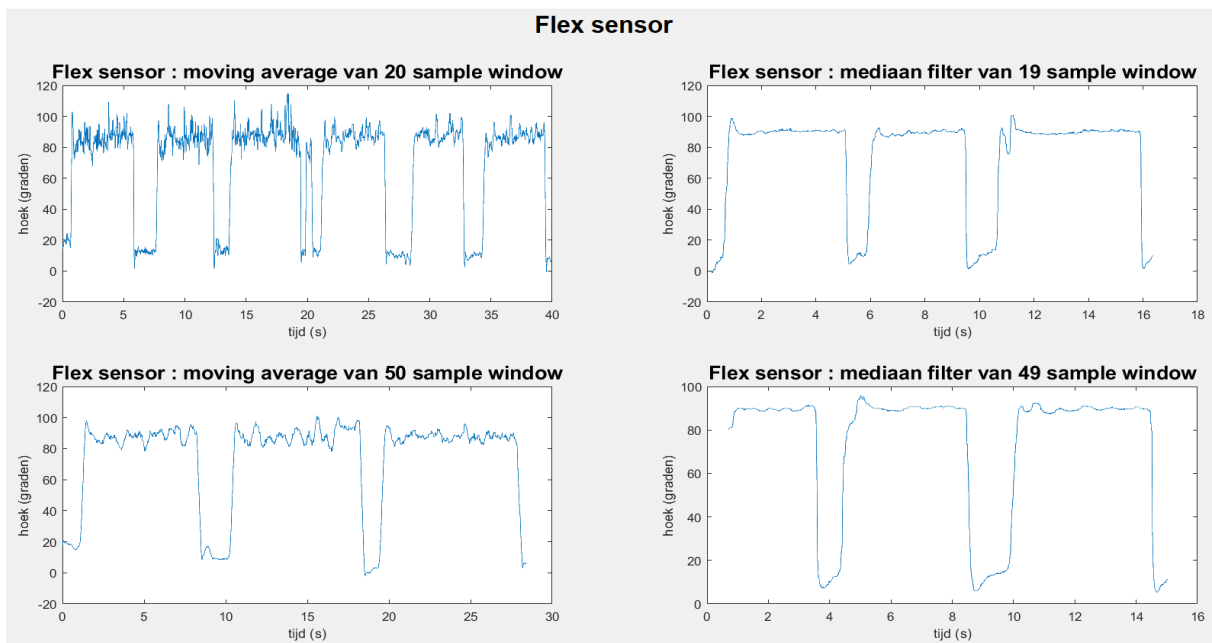
Het signaal uit de flex-sensor bevat ruis in de vorm van outliers. Dit betekent dat de berekende hoek willekeurig een stijgende of dalende piek vertoont. Linksboven in Figuur 61 is de ongefilterde data geplot, hierbij zijn de outliers duidelijk te zien. Om deze pieken uit het signaal te filteren, zijn er 2 mogelijke filters onderzocht enerzijds een moving average filter en anderzijds een mediaan filter. Bij de moving average filter wordt er telkens het gemiddelde genomen van een schuivend window. Hierbij is er getest met 3 mogelijke windows, één met een lengte van 10 samples, één met een lengte van 20 samples en één met een lengte van 50 samples. De mediaan filter neemt telkens de mediaan van het schuivende window. Hierbij worden windows van 9, 19 en 49 samples gebruikt, om dat de mediaan als middelste getal van de array wordt genomen is er gekozen voor oneven getallen van het window.

In Figuur 61 en Figuur 62 zijn deze filters afwisselend op de ongefilterde data toegepast. De mediaan filter werkt duidelijk beter dan de moving average filter, dit komt vermoedelijk doordat deze outliers

negeert in de plaats van ze te gebruiken om het gemiddelde te berekenen. Wanneer de mediaan filter van 49 samples gebruikt wordt, is er een merkbare vertraging bij het aansturen van de motor. Hierdoor is er gekozen om de mediaan filter van 19 samples te gebruiken om de data te filteren. Om dit concreet te implementeren is er een nieuw blokje gemaakt dat de mediaan over 19 signalen berekent. Dit blokje werkt als een moving mediaanfilter, de 19 recentste samples worden in een array geplaatst waarna de array gesorteerd wordt op basis van grootte. Het programma kiest dan het tiende sample als mediaan, dit getal produceert dit tiende sample als output-waarde. Het volgende inkomende sample wordt vervolgens in de array bijgevoegd, terwijl het oudste sample verwijderd wordt.



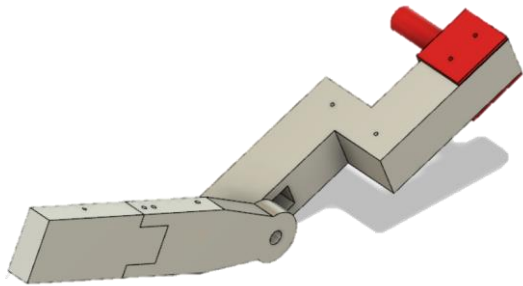
Figuur 61 Data flex-sensor voor en na filtering



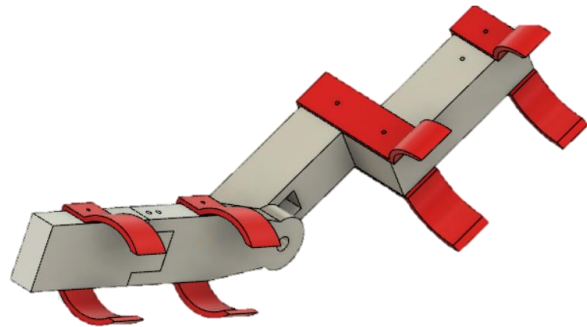
Figuur 62 Data flex-sensor na filtering van grotere windows

4.5 Mechanische arm

Na verschillende iteraties is er een uiteindelijk ontwerp van de mechanische arm gemaakt. Figuur 63 en Figuur 64 tonen de 3D-tekeningen van de arm. Hierbij is er rekening gehouden met de plooiing van de onderarm van het menselijk lichaam door het bovenste stuk van de mechanische arm in een scharnierende as te zetten, zodat deze kan aangepast worden afhankelijk van de persoon bij assistief gebruik.

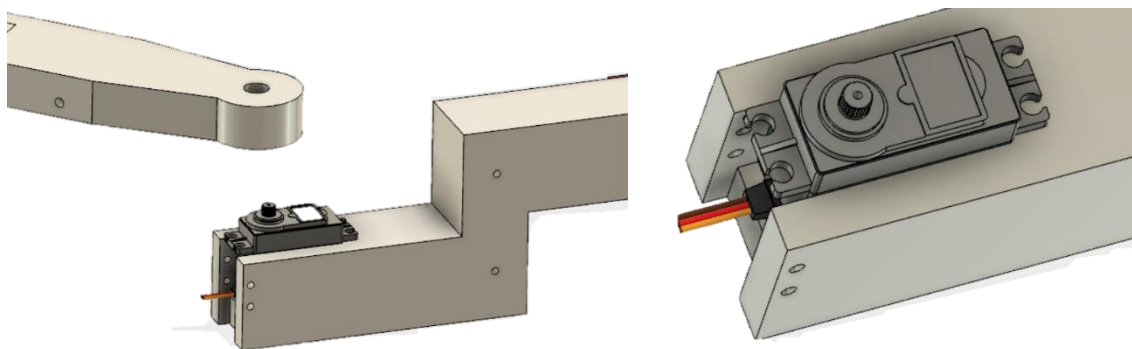


Figuur 63 Mimicking arm



Figuur 64 Assistieve arm

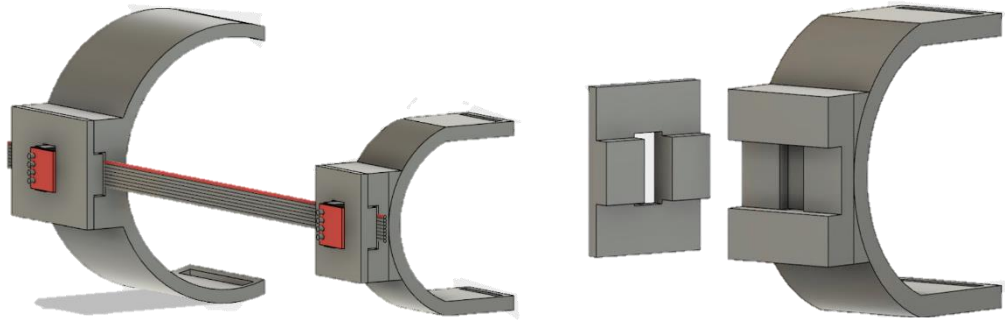
De arm in Figuur 63 is de arm die gebruikt wordt voor de mimicking-toepassing, hierbij dient de rode houder om de arm vast te maken op een staander. Bij deze arm zijn ook verschillende gaten voorzien om arm-cuffs aan vast te maken. Wanneer er dan in de toekomst een assistieve variant ontwikkeld wordt kan dezelfde arm gebruikt worden. Figuur 64 toont zo een mogelijke assistieve arm. Alle onderdelen zijn ontwikkeld zodat ze met 1 maat van bouten en moeren kunnen worden vastgemaakt. Tussen de boven- en onderarm zal de motor bevestigd worden, zoals weergegeven in Figuur 65. Het monteren gebeurt als volgt, door de 4 gaten in de arm aan de linkerkant van de motor zullen 2 bouten geplaatst worden. Aan de rechterkant worden er 2 schroefjes door de cirkelvormige gaten van de motor in de arm geschroefd. Deze bouten en schroeven zorgen dat de motor stevig blijft vastzitten.



Figuur 65 Bevestiging motor

Om de IMU's op de arm te bevestigen in het geval van mimicking zijn er 2 extra cuffs gemaakt, één voor de bovenarm en één voor de onderarm. Deze zijn zo ontworpen dat ze met een elastische band aan de arm vastgemaakt worden. De IMU's worden bevestigd door de ribbon cable met behulp van een plaatje vast te schroeven op de cuff. Figuur 66 toont deze cuffs. De linkerfoto geeft zowel de onder- als bovenarm-cuff weer, in de rechterfoto wordt er meer ingezoomd op de bevestiging van de ribbon cable.

Merk hierbij op dat deze cuffs losstaand van het voorgaande mechanisch ontwerp zijn, deze zullen op de arm van de gebruiker geplaatst worden om een goede plaatsing van de IMU's te garanderen.



Figuur 66 Armcuffs voor bevestiging IMU

4.6 Handboek

Naast de hardware en software is er ook een handboek ontwikkeld. Dit handboek heeft als doel om aan de hand van de technische componenten verschillende leerplandoelstellingen te behalen. De handleiding is in 2 delen opgesplitst, namelijk een leerlingencursus en een leerkrachtencursus. De leerlingencursus bevat de nodige theorie zodat de leerlingen verschillende technische opgaven kunnen oplossen. In de leerkrachtencursus staan de oplossingen voor de opgaven en extra achtergrondinformatie over de componenten.

De huidige leerlingencursus is enkel voor de IMU uitgewerkt. De cursus is als volgt opgebouwd. Eerst is er een inleiding over de werking en de mogelijke toepassingen van exoskeletten. Daarna volgt er een hoofdstuk waarin er een theoretisch kennismaking is met de IMU. Om de werking visueel duidelijk te maken zijn er enkele visuele filmpjes in dit hoofdstuk geïncorporeerd. Deze cursus is bijgevoegd in Bijlage A: Leerlingencursus

Het volgende hoofdstuk gaat dieper in op de werking van de afzonderlijke sensoren van de IMU. De eerste sensor die in dit hoofdstuk wordt behandeld is de accelerometer. Aan de hand van twee online-simulaties wordt de werking geïllustreerd, waarna de leerlingen enkele vragen krijgen over de werking van de sensor. De leerlingen gebruiken hierbij ook de accelerometer in hun smartphone om de werking te simuleren. Dit doen ze met de Google Science Journal-app [92]. Op vlak van leerplandoelstellingen zijn hierbij enkele opdrachten voorzien die werken rond krachten en versnellingen. Vervolgens wordt de werking van de gyroscoop met behulp van enkele educatieve filmpjes uitgelegd. De leerlingen lossen hierbij ook enkele vraagstukken op. Ten slotte maken de leerlingen kennis met de magnetometer, hierbij leren ze de richting van het magnetisch veld te bepalen met behulp van de linkerhandregel. Aan de hand van een simulatie leren ze over de plaatsing van de veldlijnen rond een staafmagneet. Hierna zijn er nog enkele opgaven rond de berekening van het magnetisch veld.

Het volgende hoofdstuk leert de leerlingen hoe ze de IMU met de Raspberry Pi moeten verbinden en laat hen met de IMU enkele simulaties rond de accelerometer, gyroscoop en magnetometer doen. Hierbij is er eerst een korte uitleg over het gebruikte protocol (I2C) om te communiceren tussen de IMU en de Raspberry Pi. Waarna de leerlingen zelf de IMU met de Raspberry Pi moeten connecteren aan de hand van afbeeldingen. Na deze connectie leren de leerlingen om de GUI te gebruiken, hierbij gebruiken ze voorgeprogrammeerde blokken om de IMU uit te lezen. De gebruikte blokken in dit hoofdstuk zorgen dat de leerlingen de 3 sensoren apart kunnen uitlezen en uittesten.

Het laatste hoofdstuk beschrijft hoe de leerlingen 1 of 2 IMU's kunnen gebruiken om de servomotor aan te sturen. Eerst is er een kort stuk theoretische uitleg rond de Kalman filter, waarna de leerlingen met

behulp van een zelfgemaakt diagram in de GUI de gefilterde quaternionen uit 1 IMU omzetten naar de roll, pitch en yaw van deze IMU. Hierop volgend leren de leerlingen hoe een servomotor aangestuurd wordt en hoe ze deze moeten connecteren met de Raspberry Pi. Daarna maken ze zelf een nieuw diagram om met de IMU de motor aan te sturen. Als dit gelukt is, gaan de leerlingen over naar twee IMU's om de motor aan te sturen. Hierbij moeten ze weer zelf een diagram maken.

4.7 User feedback

Een belangrijk deel van dit project is het educatieve aspect, hieronder vallen o.a. de te behalen leerplandoelstellingen en het handboek. Een eerste actie die in dit educatieve kader is ondernomen, is het voorstellen van het project bij enkele scholen die al verschillende jaren met STEM-projecten bezig zijn. De bezochte scholen zijn het Sint-Bavohumaniora in Gent en het Heilig Graf in Turnhout. De aanwezige leerkrachten van deze scholen waren allemaal zeer enthousiast over het project. Ze vonden het wel belangrijk dat het project binnen de leerplandoelstellingen valt, aangezien dat het anders onmogelijk wordt om het in de klas te gebruiken. Een andere belangrijk punt was de kostprijs van het product, de meeste scholen hebben namelijk maar een beperkt budget voor STEM-projecten. De leerkrachten waren over het algemeen wel vragende partij voor dit soort projecten, mits ze goed zijn uitgewerkt.

Om het educatieve materiaal te testen op mogelijke problemen, zijn er gebruikerstesten georganiseerd. Deze testsessies vonden plaats op 18 en 25 april 2018 in de gebouwen van IMEC in Leuven. Bij deze eerste testsessie hebben 11 leerlingen van het vijfde jaar van het algemeen secundair onderwijs een eerste versie van het project doorlopen en uitgeprobeerd. Figuur 67 toont een korte momentopname van die dag. Aan de hand van een handboek moesten ze proberen om zelf met behulp van een of twee IMU's een motor aan te sturen. Hierbij was het de bedoeling dat de leerlingen eerst zelf de theoretische uitleg verwerkten met behulp van simulaties en filmpjes. Vervolgens moesten ze verschillende blokjes op een juiste manier combineren om de hardware juist te laten werken. Aan het einde van de testsessie werd aan alle leerlingen gevraagd om een feedbackformulier in te vullen.



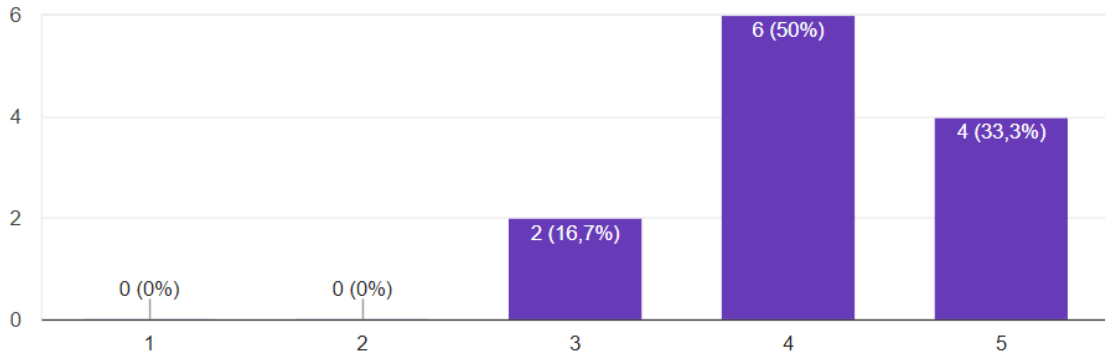
Figuur 67 Feedback sessie 18 april met leerlingen

Uit de feedback van de leerlingen konden enkele interessante conclusies getrokken worden. Een eerste vraag die gesteld werd, ging over de interesse van de leerlingen in het onderwerp. Bij deze vraag moesten ze een score op 5 geven afhankelijk van hun interesse. Uiteindelijk blijkt dat de meerderheid van de

leerlingen dit een interessant onderwerp vindt (Figuur 68). Dit is positief, aangezien dat het uiteindelijk de bedoeling is dat de leerlingen zelf met dit project aan de slag gaan.

Hoe interessant vond je het onderwerp?

12 reacties

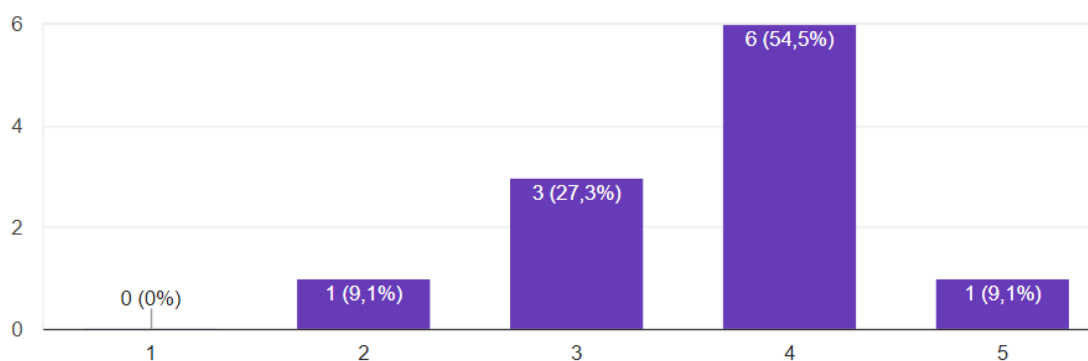


Figuur 68 User feedback over het onderwerp van de cursus

Naast hun interesse werd er ook gepeild naar wat de leerlingen vonden van het niveau van het project. Hierbij moesten ze een score op 5 geven, waarbij 1 staat voor niet moeilijk en 5 staat voor heel moeilijk (Figuur 69). Hieruit bleek dat de leerlingen de opgaven toch eerder moeilijk vonden. Dit is niet noodzakelijk een probleem, aangezien dat de moeilijkheid de educatieve waarde van het project niet uitsluit. Een mogelijke reden dat ze het moeilijk vonden is dat een deel van de theoretische achtergrond pas in het 6de jaar behandeld wordt. Om dit op te lossen kunnen de leerkrachten zelf de theoretische onderdelen uitkiezen die passen binnen het niveau van de leerlingen. Een andere reden voor de moeilijkheid is het gebruik van specifiek vakjargon dat de leerlingen onbekend was voor de leerlingen.

Hoe moeilijk waren de opgaven voor jou?

11 reacties

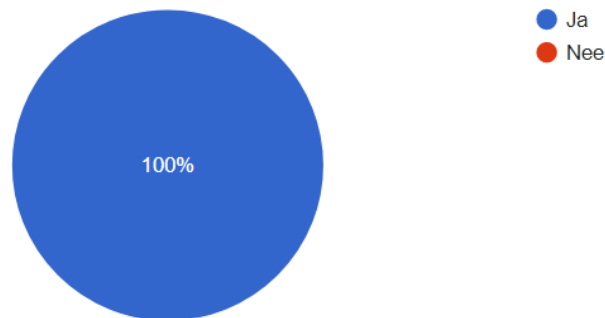


Figuur 69 User feedback over de moeilijkheid van het project

Ten slotte werd er ook nog gepeild of de leerlingen dit soort projecten graag in de klas zouden doen. De leerlingen waren hier unaniem voorstander van (Figuur 70).

Zou je graag tijdens de lessen op school aan dit soort opgaves werken?

11 reacties



Figuur 70 User feedback over het werken aan deze projecten in een klasomgeving

Deze testsessie heeft ook enkele problemen met het handboek aan het licht gebracht. Deze problemen zijn:

- Het vakjargon werd niet voldoende uitgelegd;
- De juiste antwoorden op de vragen waren niet aanwezig;
- Theorie en opdracht waren niet duidelijk te onderscheiden;
- Sommige vragen waren moeilijk te begrijpen.

Op basis van deze opmerkingen is het handboek verbeterd.

In de tweede sessie op 25 april werden leerkrachten uitgenodigd om deel te nemen. De deelnemende leerkrachten kregen de opdracht om het leerlingen handboek te doorlopen, wanneer ze op problemen stuiten konden ze extra informatie halen uit de leerkrachtenbundel. De aanwezige leerkrachten waren zeer enthousiast over het project, maar door de geringe opkomst konden hier geen algemene conclusies uit getrokken worden.

Een extra derde sessie is gehouden op zaterdag 5 mei tijdens de familiedag van het AND&-festival in Leuven. Het doel hiervan was om het project te promoten en om extra feedback te krijgen om zo mogelijk verbeterpunten te ontdekken. Tijdens dit festival kregen de bezoekers uitleg over het project en konden ze een kleine demo van de arm uitproberen. Iedereen die ons project op het AND& festival probeerde vonden dit een interessant project. Een nadeel was dat de meerderheid van de bezoekers niet de doelgroep was, het waren typisch kinderen van de lagere school of soms ook hobbyisten. In Figuur 71 kan men een foto van die dag zien waarin S. Vercruysse (1 van de auteurs van deze thesis) de robotarm probeert te bewegen aan de hand van een IMU die geplaatst wordt op de arm van iemand die interesse had in ons project.



Figuur 71 AND& festival momentopname

4.8 Ondervonden problemen

In dit onderdeel zullen de belangrijkste problemen die plaatsvonden tijdens de ontwikkeling van deze kit samengevat worden. Deze problemen zijn onderverdeeld in softwarematige en hardware matige problemen.

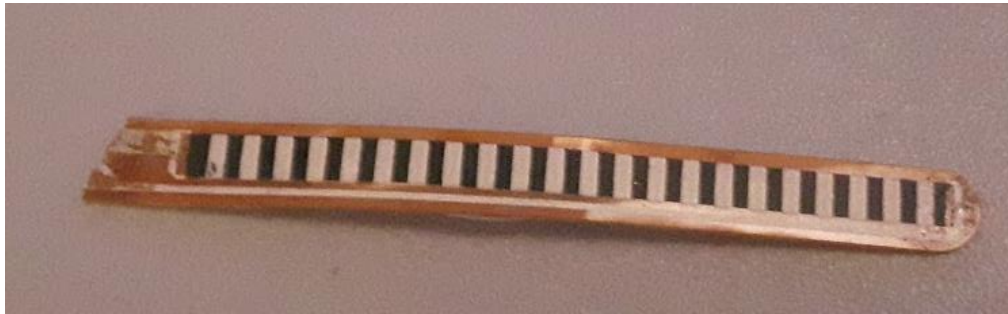
4.8.1 Hardware

Een eerste probleem vond plaats bij het uitlezen van 2 IMU's via I2C. Om dit te doen, moet het adres van 1 van de 2 IMU's veranderd worden van 68 naar 69. Hiervoor moet de SJ2 brug op Figuur 46 verlegd worden. Buiten dit is er ook nog een verbinding tussen de AD0-pin en de voeding nodig. Als deze verbinding niet aanwezig is, zal het adres van de IMU zweven tussen 68 en 69. De eerst ontvangen set van 2 IMU's was al gewisseld van adres, maar hier was deze laatste verbinding niet aanwezig. Hierdoor konden de IMU's soms niet uitgelezen worden of stopte het uitlezen plots doordat de IMU van adres wisselde. Door de foutieve aanname dat de eerste set juist geconnecteerd was, is veel tijd verloren voordat de fout ontdekt werd.

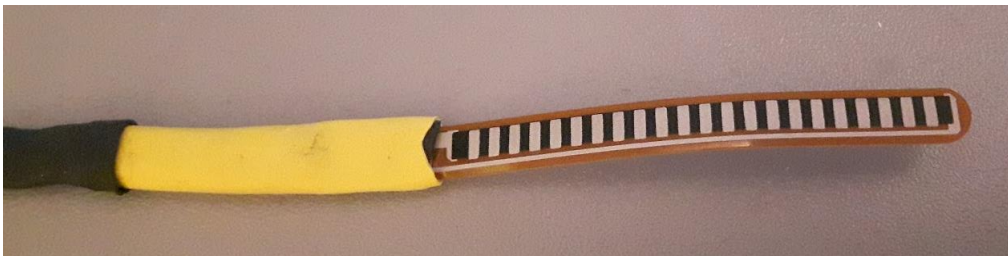
Een tweede probleem met het uitlezen van 2 IMU's was bij het verbinden van 2 IMU's met een flat-cable. Doordat de data- en kloklijnen van de I2C te dicht bij elkaar lagen in de flat-cable had deze last van crosstalk. Hierdoor kwam er bij momenten zeer fluctuerende data uit de IMU's wanneer er 2 tegelijk werden uitgelezen. Dit probleem is opgelost door de 4 ongebruikte draden van de flat cable met de grond te verbinden. Bij deze oplossing ligt er dan altijd minstens 1 grond tussen de data- en kloklijn.

De kalibratie van de IMU's was ook belangrijk, aangezien dat deze anders niet hetzelfde wereldassistentiel hebben. Hierdoor ontstaan er problemen wanneer de hoek tussen 2 IMU's berekend wordt. Om de kalibratie goed te doen, wordt er gebruikt gemaakt van de RTIMULibCal dit is een kalibratietool uit de RTIMULib-library. Deze kalibratietool bevat 3 kalibratiefuncties, 2 voor de magnetometer en 1 voor de accelerometer. Ze moeten alle 3 gebruikt worden, want anders zullen er vooral bij de Yaw-hoek grote verschillen zijn tussen de IMU's. Om de magnetometer te kalibreren met de ellipsoid fitting tool is er nog een extra programma nodig genaamd, GNU octave. Dit programma dient nog onafhankelijk van de RTIMULib geïnstalleerd te worden. Als deze kalibratie niet gedaan wordt dan zullen de Yaw-componenten niet accuraat zijn.

Bij de flex-sensor was het probleem dat de connectie tussen de sensor en de soldering pads redelijk fragiel was. Hierdoor is er 1 sensor doorgebroken tijdens de ontwikkelingsfase zoals te zien is in Figuur 72. Om dit op te lossen is de connectie versterkt met verschillende lagen krimpkous zoals weergegeven in Figuur 73.



Figuur 72 Flex-sensor stuk gegaan door slechte connectie



Figuur 73 Oplossing van de flex-sensor door het te versterken met krimpkous

Het aansturen van de servomotor gaf ook een probleem, wanneer de **RPi.GPIO** library samen met eigen geschreven code gebruikt werd om de servomotor aan te sturen dan verbruikte de motor te veel stroom. Hierdoor kreeg de Raspberry Pi niet meer genoeg stroom, waardoor de motor soms stilviel. Om dit op te lossen is er gebruikt gemaakt van de **apigpio** library. Deze library voorziet een daemon om de servomotor aan te sturen deze daemon regelt dan zelf optimaal het stroomverbruik van de servomotor.

Ten laatste waren er enkele problemen bij het ontwikkelen van de mechanische arm, een eerste probleem was dat de initiële cuffs te klein gemaakt waren, waardoor ze lastig waren om ze langdurig te dragen. Om dit op te lossen zijn de cuffs van het AXO-suit van COMmeto als voorbeeld gebruikt om nieuwe cuffs te maken die beter zitten. Een ander probleem was dat door het 3D-printen de gaten om de houder en de cuffs te bevestigen kleiner waren dan in de 3D-tekening. Als oplossing is de tekening aangepast om met deze offset rekening te houden.

4.8.2 Software

Op softwaregebied waren er ook enkele problemen. Ten eerste was de keuze van de juiste Python-versie een probleem. De eerste versie van de library was namelijk geschreven voor Python3.6, terwijl Raspbian, het standaard-OS van de Raspberry Pi, standaard Python3.5 geïnstalleerd heeft. Hierdoor zouden de gebruikers altijd manueel Python3.6 moeten installeren. Om dit op te lossen is de library aangepast zodat ze voor Python3.5 werkt.

Een tweede softwarematig probleem was de installatie van de library Numpy. Dit is een wiskundige library die allerlei handige wiskundige en numerieke functies bevat. Doordat deze library niet geïnstalleerd kon worden, waren er nog verschillende andere libraries die gebruik maken van Numpy

niet bruikbaar. Voorbeelden van deze niet-buikbare librarielis zijn Pyquaternion en matplotlib. Om dit op te lossen zijn alle nodige wiskundige formules door de ontwikkelaars zelf uitgeschreven.

5 Toekomstig werk

De eerstvolgende stap na dit project, is de opstart van een pilootproject. Hierbij zal het project tijdens het schooljaar 2018-2019 in enkele scholen proefdraaien. Tijdens dit proefjaar zal het project op basis van de feedback van de verschillende scholen aangepast worden. COMmeto en RVO-society zullen samen dit proefproject opstarten en verder opvolgen. Naast dit pilootproject zorgt RVO-society dat het project ook binnen hun E-learning platform ter beschikking wordt gesteld.

Een eerste mogelijke uitbreiding bij dit project is het implementeren van de EMG-sensor, aangezien dat hierbij zeker voor de tweede graad interessante leerplandoelstellingen behaald kunnen worden. Ook worden in veel bestaande assistieve projecten een EMG-sensor en IMU gecombineerd om een arm te controleren [93], [94]. Een andere mogelijke uitbreiding is om de arm echt van op afstand te laten werken door bijvoorbeeld de data via Bluetooth door te sturen in de plaats van kabels.

Tijdens dit project is er al met behulp van een Arduino een Fuzzy-regelaar ontwikkeld om de EMG-sensor uit te lezen [33]. Door tijdsgebrek is het niet gelukt om deze te incorporeren in het eindproduct. Deze Fuzzy-regelaar bestaat uit 4 Fuzzysets waar de EMG-data tussen kan variëren. Afhankelijk van de Fuzzysets waarin het EMG-signaal zich bevindt, zal de hoek van de arm variëren. Deze Fuzzyregelaar is geïmplementeerd met behulp van de Fuzzy-library voor Arduino [95]. Het huidige project is zo opgebouwd dat de EMG-sensor eenvoudig kan uitgelezen worden met de bestaande ADC-blokken.

Op basis van de resultaten van de enquête die beschreven staat in sectie 3.1 kan er geconcludeerd worden dat de doelgroep het assistieve exoskelet eveneens een interessante toepassing vindt. Dit is dan ook een logische volgende stap voor dit project. Om dit te ontwikkelen kan dezelfde mechanische arm gebruikt worden, aangezien dat er cuffs voorzien zijn. De moeilijkheid zal zijn om de dataregistratie en de daaropvolgende actuatie betrouwbaar en gevoelsmatig met elkaar te laten samenwerken.

Nieuwe projecten kunnen de bestaande library gebruiken om verschillende sensoren uit te lezen of om actuatoren aan te sturen. Het enige wat ze hiervoor moeten aanpassen is het ontwikkelen van nieuwe blokken om deze operaties uit te voeren. De juiste manier om nieuwe blokken aan te maken staat gedocumenteerd in het README.md bestand van de library. Bestaande blokken zoals de ADC of de motoraansturing kunnen ook in nieuwe projecten hergebruikt worden.

6 Conclusie

In deze thesis werd de ontwikkeling van een educatief pakket met als onderwerp een exo-arm gepresenteerd. Het pakket bestaat uit een ge-3D-printe mechanische arm, een IMU, een flex-sensor, een servomotor en een Raspberry Pi. Deze componenten zijn gekozen op basis van hun technische en educatieve mogelijkheden. Naast deze hardwarecomponenten is er ook software ontwikkeld om de arm aan te sturen. Deze software bestaat enerzijds uit een library om de componenten te controleren en anderzijds uit een GUI waarmee de leerlingen op een grafische manier de arm kunnen programmeren. Bij dit pakket zit er ook een handboek dat de leerlingen uitdaagt om zelf aan de slag te gaan met de arm. Stap voor stap wordt in dit handboek de nodige theorie aangebracht aan de hand van tekstuele uitleg, informatieve filmpjes en educatieve simulaties.

Als eerste maken de leerlingen kennis met de IMU. Initieel leren ze over de werking van de verschillende sensoren die op een IMU zitten en hoe ze deze kunnen uitlezen met behulp van de grafische interface. Deze aparte sensoren hebben nog last van ruis en gyroscopische drift, hierdoor is er datafusie nodig om de arm met de IMU te kunnen aansturen. Voor deze datafusie is een Kalman-filter gebruikt. Vervolgens krijgen de leerlingen de opdracht om de arm met één IMU aansturen, hiervoor moeten ze de juiste blokjes in de GUI connecteren. De volgende stap is het gebruiken van twee IMU's om de arm aan te sturen. Om dit correct te doen, moet de hoek tussen de 2 IMU's berekend worden. Dit gebeurt door een relatief quaternion te berekenen tussen de IMU's met behulp van de dot-multiplicatie. Vervolgens wordt de hoek berekend van dit quaternion op dezelfde manier als dit bij één IMU gebeurt. Deze berekening doen de leerlingen in de GUI door de juiste blokjes te gebruiken.

Daarna leren de leerlingen hoe ze de arm met de flex-sensor kunnen aansturen. Dit is geïmplementeerd op basis van de lineaire verandering van de weerstand van de sensor bij een buiging. Met behulp van een experimenteel bepaalde formule wordt de gemeten spanning omgezet naar de hoek van de elleboog. Daarna wordt deze data met een mediaan-filter gefilterd om de outliers weg te filteren. Om de sensor in te lezen wordt er gebruik gemaakt van een externe ADC. De leerlingen moeten wederom de juiste blokjes connecteren in de GUI om de arm aan te sturen met de flex-sensor.

De volgende stap voor dit project is de opstart van een pilootproject door RVO-society en COMmeto. Hierbij zal dit project in het schooljaar 2018-2019 in enkele scholen uitgetest worden om de kinderfouten eruit te halen. Vanaf het schooljaar 2019-2020 zal het project dan voor alle scholen opengesteld worden. Mogelijke uitbreidingen van dit project zijn o.a. de EMG-sensor en uitbreidingen op de library.

Bibliografie

- [1] NL. Wikipedia.org, „Brain computer interface,” 2018. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Brain-computer_interface . [Geopend 21 May 2018].
- [2] Sparkfun, „Myoware Muscle Sensor.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13723>. [Geopend 15 May 2018].
- [3] Sparkfun, „SparkFun IMU Breakout - MPU-9250 - SEN-13762 - SparkFun Electronics,” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13762>. [Geopend 20 October 2017].
- [4] Wikipedia, „Brug van Wheatstone,” 17 April 2018. [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Brug_van_Wheatstone. [Geopend 28 May 2018].
- [5] COMmeto, „COMmeto,” [Online]. Available: <http://www.commeto.be>. [Geopend 19 Oct 2017].
- [6] RVO-society, „RVO-society,” [Online]. Available: <http://www.rvo-society.be>. [Geopend 2017 Oct 19].
- [7] Vlaamse Dienst voor Arbeidsbemiddeling en Beroepsopleiding, Knelpuntberoepen, 2014.
- [8] Business, R, „Telechirurgie: dokter kan vanop grote afstand opereren dankzij robot,” [Online]. Available: <https://nl.express.live/2017/03/03/telechirurgie-dokter-kan-opereren-vanop-grote-afstand-dankzij-robot/> . [Geopend 23 May 2018].
- [9] AXO-SUIT, „Consortium rond AXO-SUIT,” [Online]. Available: <http://www.axo-suit.eu/>. [Geopend 20 May 2018].
- [10] T. Mikolajczyk, A. Olaru en P. Walkowiak, „Upper Limb Exoskeleton Controlled by Stepper Motor,” Appl. Mech Mater, 2015.
- [11] C. Walsh et al., „An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation,” IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 2006.
- [12] M. Novak, „Design of an Arm Exoskeleton Controlled by the EMG Signal,” 2011.
- [13] V. Krasin, V. Gandhi, Z. Yang en M. Karamanoglu, „EMG based elbow joint powered exoskeleton for biceps brachii strength augmentation,” Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks, vol.2015-Septe, 2015.
- [14] J. Chen, C. Yang en J. Hofschulte, „Improvement of an Arm Exoskeleton by Data Fusion with an Inertial Measurement Unit,” Proc 2nd Int. Symp. Comput. Commun. Control Autom, no. 3ca, 2013.
- [15] A. Rana en R. Aggarwal, „2-d Robotic Arm Control using EMG Signal,” Int. J. Comput. Appl., Vol. 72, no.14, 2013.
- [16] J. Hurtier et al., „A closed-loop BCI system for rehabilitation of the hemiplegic upper-limb: A performance study of the systems ability to detect intention of movement,” Ann. Phys. Rehabil. Med., Vol. 59, 2016.
- [17] A. Ruiz, A. Forner-Cordere, E. Rocon en J. Pons, „Exoskeletons for rehabilitation and motor control,” Proc. First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, BioRob 2006,vol.2066, 2006.
- [18] Semantic scholar.org, „A passive exoskeleton with artificial tendons: Design and experimental evaluation - Semantic Scholar.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-passive-exoskeleton-with-artificial-tendons%3A-and-Dijk-Kooij/8d78792d26108c44c30d296379a37807f7e96946> . [Geopend 13 May 2018].
- [19] B. Gazcorek, „Exoskeleton supportive hand__Sinterit”.
- [20] E. Pons en J. Pons, „Exoskeletons in Rehabilitation Robotics-Tremor Suppression.,” 2011.

- [21] B. Marinov, „19 Military Exoskeletons into 5 Categories Exoskeleton Report,” Exoskeleton Report, 2016.
- [22] Medgadget, „Talking Medical Exoskeletons with CEO of US Bionics,” 16 February 2016. [Online]. Available: <https://www.medgadget.com/2016/02/talking-medical-exoskeletons-ceo-us-bionics-live-hangout-today-1-pm-est.html>. [Geopend 11 May 2018].
- [23] F. Agis, „Industrial exoskeletons at work,” 28 November 2014. [Online]. Available: <https://wordlesstech.com/industrial-exoskeletons-work/>. [Geopend 11 May 2018].
- [24] YouTube, „Military Robots and Exoskeletons,” 14 June 2017. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=9Ahebm3VAXQ>. [Geopend 11 May 2018].
- [25] Kickstarter, „EduExo: The First Robotic Exoskeleton Kit for STEM Education.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1485976654/eduexo-the-first-robotic-exoskeleton-kit-for-stem>. [Geopend 13 May 2018].
- [26] EduExo, 2018. [Online]. Available: <https://www.eduexo.com/eduexo-kit/>. [Geopend 13 May 2018].
- [27] Sparkfun, „Load Cell - 10kg, Straight Bar (TAL220),” Sparkfun, 2018. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13329>. [Geopend 14 May 2018].
- [28] B. Earl, „What is a Stepper Motor?,” Ardufruit, 2015.
- [29] Compumotor.com, „Servomotor Fundamentals,” 2018. [Online]. Available: <http://www.compumotor.com/whitepages/ServoFundamentals.pdf>. [Geopend 14 May 2018].
- [30] Electronics Hub, „Servo Motor - Types and Working Principle.,” 2018. [Online]. Available: <https://www.electronicshub.org/servo-motors/>. [Geopend 14 May 2018].
- [31] LoadStar Sensors, „What is a load cell.,” 2016.
- [32] A&D, „Types of load cells,” [Online]. Available: <http://www.aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/pdf/5-1.pdf>. [Geopend 14 May 2018].
- [33] Ieeexplore.ieee.org., „Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals - IEEE Journals & Magazine.,” 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1321076/>. [Geopend 14 May 2018].
- [34] Ieeexplore-ieee-org.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be. , „Shibboleth Authentication Request,” 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.kuleuven.ezproxy.kuleuven.be/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6151182>. [Geopend 14 May 2018].
- [35] Colvin, „What Is The Hall Effect?,” 24 February 2015. [Online]. Available: <https://blog.digilentinc.com/what-is-the-hall-effect/>. [Geopend 20 May 2018].
- [36] analog.com, „Inertial Measurement Units (IMU) | Analog Devices.,” 2018. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems/inertial-measurement-units.html>. [Geopend 24 May 2018].
- [37] Y. Long, Z. Du, W. Wang en W. Dong, „Development of a wearable exoskeleton rehabilitation system based on hybrid control mode,” Int. J. Adv. Robot. Syst., vol. 13, no. 5, 2016.
- [38] Ieeexplore.ieee.org, „Mirror therapy with an exoskeleton upper-limb robot based on IMU measurement system - IEEE Conference Publication.,” 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5966732>. [Geopend 14 May 2018].
- [39] U. Rehman, S. Gobee en D. Vickneswari, „Design and Development of a Lower Limb Exoskeleton for Rehabilitation,” SpringerLink, 6 December 2015. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-0266-3_34. [Geopend 14 May 2018].
- [40] Ieeexplore.ieee.org, „Design and implementation of IMU-based human arm motion capture system - IEEE Conference Publication.,” 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6283221/>. [Geopend 14 May 2018].

- [41] Rotoview, „Accelerometers for View Navigation”.
- [42] Sensorsmag.com, „Sonic Nirvana: MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments | Sensors Magazine,.” 2018. [Online]. Available: <https://www.sensorsmag.com/embedded/sonic-nirvana-mems-accelerometers-as-acoustic-pickups-musical-instruments>. [Geopend 23 May 2018].
- [43] Exo.science.ru.nl, „Gyroscoop,” 2018. [Online]. Available: <http://www.exo.science.ru.nl/bronnen/natuurkunde/gyroscoop.html>. [Geopend 21 May 2018].
- [44] Wikipedia, „Gyroscoop,” 2018. [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Gyroscoop>. [Geopend 20 May 2018].
- [45] Www5.epsondevice.com, „Gyro sensors - How they work and what's ahead | about Gyro sensor | Technical Information | other Information,.” 2018. [Online]. Available: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/gyro/. [Geopend 21 May 2018].
- [46] L. Sujatha en B. Preethi, „Design and Analysis of MEMS Gyroscope,” Vol.14, no. 4, 2010.
- [47] Beavers, „The case of the misguided gyro,” March 2017. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-139.html>. [Geopend 5 May 2018].
- [48] Analog.com, „Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter | Analog Devices,” 2018. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/technical-articles/gyro-mechanical-performance.html>. [Geopend 27 May 2018].
- [49] Arduino, „Memory,” Arduino, 2018. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Memory>. [Geopend 10 May 2018].
- [50] Arduino, „Arduino Uno,” Arduino, 2018. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. [Geopend 5 May 2018].
- [51] PyPi, „PyPI – the Python Package Index,” 2018. [Online]. Available: <https://pypi.org>. [Geopend 10 May 2018].
- [52] RS-online, „Raspberry Pi 3 Model B+,” 2018. [Online]. Available: <https://benl.rs-online.com/web/p/processor-microcontroller-development-kits/1373331?src=raspberrypi>. [Geopend 8 May 2018].
- [53] Raspberry Pi Foundation, „Raspberry Pi,” 2018. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Geopend 6 May 2018].
- [54] A. Nikhil, „Raspberry Pi 2 & 3 Vs Beaglebone Black,” [Online]. Available: <https://www.engineersgarage.com/blogs/raspberry-pi-2-3-vs-beaglebone-blac>. [Geopend 3 May 2018].
- [55] BeagleBoard, „BeagleBone Black,” 2018. [Online]. Available: <http://beagleboard.org/black>. [Geopend 4 May 2018].
- [56] VVKSO, „Curriculum secundair onderwijs,” VVKSO, 2018. [Online]. Available: <http://ond.vvkso-ict.com/lele/leerplannen.asp>. [Geopend 5 May 2018].
- [57] GO!, „Leerplannen en lessentabellen secundair onderwijs,” GO!, [Online]. Available: <http://pro.g-o.be/pedagogische-begeleiding/leerplannen/leerplannen-en-lessentabellen-so>. [Geopend 5 May 2018].
- [58] Provinciaal Onderwijs Vlaanderen, „Leerplannen secundair onderwijs,” POV, 2018. [Online]. Available: <http://www.pov.be/site/index.php/leerplannen/leerplannen-secundair-onderwijs>. [Geopend 5 May 2018].
- [59] Tower Pro, „MG996R,” [Online]. Available: <http://www.towerpro.com.tw/product/mg996r/>. [Geopend 6 May 2018].
- [60] Phet, „Hookes law,” [Online]. Available: https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_en.html. [Geopend 21 May 2018].

- [61] Phet.colorado.edu, „Capacitor lab basics,” [Online]. Available: https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_en.html . [Geopend 21 May 2018].
- [62] Nationalmaglab.org, „Hall Effect - MagLab,” 2018. [Online]. Available: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/hall-effect>. [Geopend 21 May 2018].
- [63] Sparkfun, „Flex sensor 2.2 Inch,” 2018. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10264>. [Geopend 25 February 2018].
- [64] C. Preetham, G. Ramakrishnan, S. Kumar, A. Tamse en N. Krishnapura, „Hand talk-implementation of a gesture recognizing glove,” Texas Instruments India Educ. Conf. TIEEC 2013, 2013.
- [65] Reference, „How Long Is the Average Human Arm?,” IAC Publishing, LLC, 2018. [Online]. Available: <https://www.reference.com/science/long-average-human-arm-62c7536c5e56f385>. [Geopend 24 May 2018].
- [66] J. Deflander, „Functional programming with real-time sensor data for educational purposes,” 2018 (To be Published).
- [67] T. Islam, M. Islam, M. Shajid-UI-Mahmud en M. Hossam-E-Haider, „Comparison of complementary and Kalman filter based data fusion for attitude heading reference system,” AIP Conf. Proc., vol. 1919, 2017.
- [68] Solenerotech, „How to combine data from Gyro and Accel,” 10 October 2013. [Online]. Available: <https://solenerotech1.wordpress.com/tag/accelerometer>. [Geopend 12 May 2018].
- [69] Bilgin, „Kalman Filter for Dummies,,” March 2009. [Online]. Available: <http://bilgin.esme.org/BitsAndBytes/KalmanFilterforDummies>. [Geopend 12 May 2018].
- [70] Unity Forum, „Trying to simulate a ships rocking motion in the ocean,” 2018. [Online]. Available: <https://forum.unity.com/threads/trying-to-simulate-a-ships-rocking-motion-in-the-ocean.465557/>. [Geopend 1 May 2018].
- [71] Wikipedia, „Gimbal lock,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal_lock. [Geopend 5 May 2018].
- [72] En.wikipedia.org, „Conversion between quaternions and Euler angles,” 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Conversion_between_quaternions_and_Euler_angles. [Geopend 10 May 2018].
- [73] Yost labs, „Calculating Angles Between Two Yost Labs 3-Space Sensor™ Devices on a Human Body,” January 2013,” [Online]. Available: <https://yostlabs.com/wp/wp-content/uploads/pdf/Yost-Calculating-Angles-Between-Two-3-Space-Sensor-Devices-on-a-Human-Body.pdf> . [Geopend 12 May 2018].
- [74] Nl.mathworks.com, „Relative motion between Quaternions - MATLAB Answers - MATLAB Central,” 2018. [Online]. Available: <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/answers/244747-relative-motion-between-quaternions> . [Geopend 20 May 2018].
- [75] Nl.mathworks.com, „Calculate inverse of quaternion - MATLAB quatinv- MathWorks Benelux,” 2018. [Online]. Available: <https://nl.mathworks.com/help/aerotbx/ug/quatinv.html> . [Geopend 20 May 2018].
- [76] Nl.mathworks.com, „Calculate product of two quaternions - Simulink- MathWorks Benelux,” 2018. [Online]. Available: <https://nl.mathworks.com/help/aeroblks/quaternionmultiplication.html> . [Geopend 20 May 2018].
- [77] DiCola, „MCP3008,” 9 February 2016. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/raspberry-pi-analog-to-digital-converters/mcp3008>. [Geopend 12 May 2018].

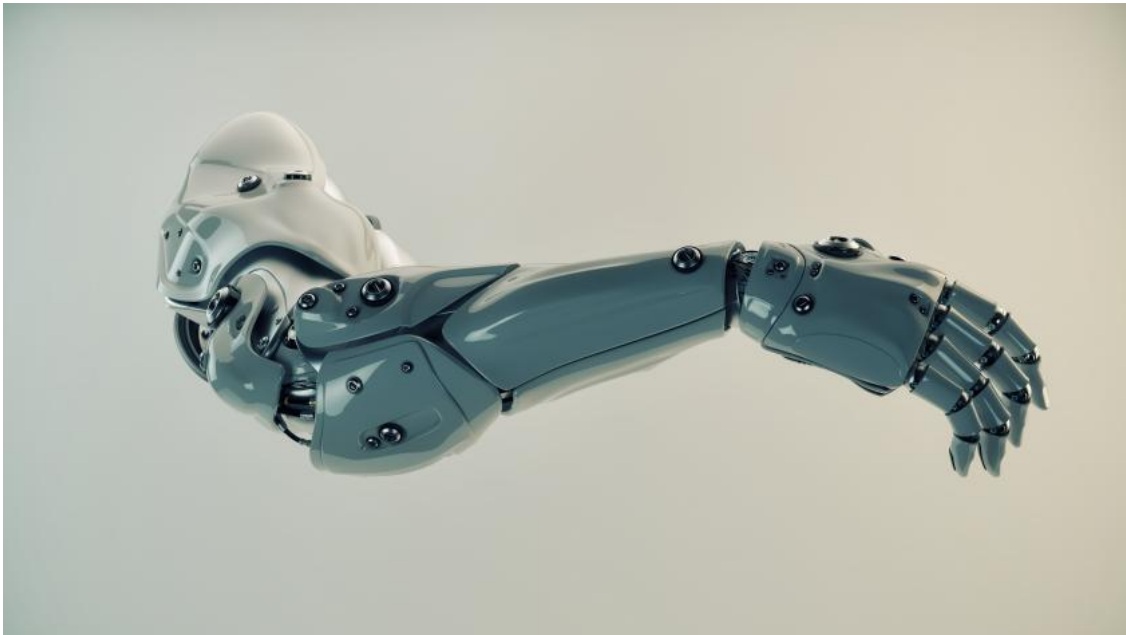
- [78] Microsoft, „Raspberry Pi 2 & 3 Pin Mappings,” [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/iot-core/learn-about-hardware/pinmappings/pinmappingsrpi>. [Geopend 5 May 2018].
- [79] dfrobot, „How to Use a Three-Axis Accelerometer for Tilt-Sensing,” [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/How_to_Use_a_Three-Axis_Accelerometer_for_Tilt_Sensing. [Geopend 5 May 2018].
- [80] Honeywell, „compass heading using magnetometers,” [Online]. Available: https://aerocontent.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic__Literature_Application_notes-documents/AN203_Compass_Heading_Using_Magnetometers.pdf. [Geopend 10 May 2018].
- [81] Sensorsmag.com, „Sonic Nirvana: MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments | Sensors Magazine,” 2018. [Online]. Available: <https://www.sensorsmag.com/embedded/sonic-nirvana-mems-accelerometers-as-acoustic-pickups-musical-instruments>. [Geopend 4 May 2018].
- [82] Fetsource, „Ribbon cable 8 position,” Fetsource, 2018. [Online]. Available: <https://fetsource.com/idc-ribbon-cable-8p>. [Geopend 20 May 2018].
- [83] Docs.python.org, „16.3. time — Time access and conversions — Python 3.6.5 documentation,” 2018. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/time.html> . [Geopend 16 May 2018].
- [84] Cdn.sparkfun.com, „MPU-9250 Product Specification Revision 1.0,” 2018. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/5/0/MPU9250REV1.0.pdf. [Geopend 30 October 2017].
- [85] ResearchGate, „Implementing a Sensor Fusion Algorithm for 3D Orientation Detection with Inertial/Magnetic Sensors,” 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/264707640_Implementing_a_Sensor_Fusion_Algorithm_for_3D_Orientation_Detection_with_InertialMagnetic_Sensors?_sg=Y7fqNzra6zyDGHvr1f3e74Nm_Cxy-LfFxGHNv9NCtCytIKmkePDYWtnx3FN9Xq0DDegpso-s7Q . [Geopend 10 May 2018].
- [86] Ieeexplore.ieee.org, „Gyroscope drift correction algorithm for inertial measurement unit used in hand motion tracking - IEEE Conference Publication,” 2018. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7808525/>. [Geopend 19 May 2018].
- [87] Google Books, „Space Microsystems and Micro/Nano Satellites,” 2018. [Online]. Available: https://books.google.be/books?id=YUwgDgAAQBAJ&pg=PA258&lpg=PA258&dq=linear+regression+gyroscope+drift&source=bl&ots=uBw5ZGV4An&sig=44B0ZZTN18gMmS1gsfht8Vvk4Jw&hl=nl&sa=X&ved=0ahUKEWjP_KvlpLbAhWEalAKHTWpDRIQ6AEIczAN#v=onepage&q=linear%20regression%20gyros. [Geopend 5 May 2018].
- [88] Nl.mathworks.com, „Multiple linear regression - MATLAB regress- MathWorks Benelux,” 2018. [Online]. Available: <https://nl.mathworks.com/help/stats/regress.html>. [Geopend 15 May 2018].
- [89] Anon, 2018. [Online]. Available: <https://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4402401> . [Geopend 20 May 2018].
- [90] Diva-portal.se, 2018. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:862315/FULLTEXT01.pdf> . [Geopend 13 May 2018].
- [91] Carter, „Know More about Voltage Divider Circuits,” 3 November 2011. [Online]. Available: <https://www.eeweb.com/profile/andrew-carter/articles/know-more-about-voltage-divider-circuits>. [Geopend 14 May 2018].
- [92] Google, „Science Journal,” Google, [Online]. Available: <https://sciencejournal.withgoogle.com/>. [Geopend 3 May 2018].

- [93] J. Lopes, M. Simao, N. Mendes, M. Safeea, J. Afonso en P. Neto, „Hand/arm Gesture Segmentation by Motion Using IMU and EMG Sensing,” *Procedia Manuf*, Vol. 11,no. June, 2017.
- [94] Y. Ganesan, S. Gobee en V. Durairajah, „Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 76, no. Iris, 2015.
- [95] Zerokol, „eFLL (embedded Fuzzy Logic Library),” Github, 15 November 2017. [Online]. Available: <https://github.com/zerokol/eFLL>. [Geopend 30 December 2017].
- [96] Analog.com, „Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter | Analog Devices,” 2018. [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/technical-articles/gyro-mechanical-performance.html>. [Geopend 27 May 2018].

Bijlagen

Bijlage A: Leerlingencursus

EDUCATIEF EXOSKELET



Inhoudsopgave

<u>1.</u>	<u>Waarom exoskeletten?</u>	97
<u>2.</u>	<u>IMU</u>	101
<u>2.1</u>	<u>Kennismaking met de IMU</u>	101
<u>2.2</u>	<u>Praktische kennismaking met IMU</u>	103
<u>2.2.1</u>	<u>Accelerometer</u>	103
<u>2.2.2</u>	<u>Gyroscoop</u>	107
<u>2.2.3</u>	<u>Magnetometer</u>	109
<u>2.3</u>	<u>Technisch aspect</u>	112
<u>2.3.1</u>	<u>Aansluiten</u>	112
<u>2.3.2</u>	<u>Accelerometer</u>	114
<u>2.3.3</u>	<u>Magnetometer</u>	118
<u>2.4</u>	<u>Praktisch</u>	119
<u>2.4.1</u>	<u>IMU-datafusie</u>	119
<u>2.4.2</u>	<u>Servomotor</u>	121
<u>2.4.3</u>	<u>2 IMU's</u>	123
<u>3.</u>	<u>Blokjes Overzicht</u>	127
<u>4.</u>	<u>Bibliografie</u>	130

1. Waarom exoskeletten?

De term exoskelet beschrijft een *uitwendig* skelet of omhulsel dat insecten of dieren zoals krabben, kreeften, slakken, etc. ondersteunt en beschermt tegen hun omgeving of roofdieren. Ingenieurs proberen ook zo'n exoskelet voor mensen te maken dat bescherming, ondersteuning en kracht kan bieden. Zo bestaan er 2 uitweringsmogelijkheden:

- *Actief* exoskelet: Dit is misschien de meest bekende versie van een exoskelet want hier zijn de robot exoskeletten een voorbeeld van. Dit zijn systemen die een kracht leveren om het exoskelet aan te drijven. Bij actieve exoskeletten wordt er energie aan het exoskelet toegevoegd, dit gebeurt meestal in de vorm van actuatie door middel van elektromotoren. Figuur 74 toont hier een voorbeeld van.
- *Passief* exoskelet: Dit zijn exoskeletten die materialen, veren en dempers gebruiken om energie op te slaan die vrijgegeven wordt bij de beweging van het exoskelet. Bij passieve exoskeletten wordt er geen energie toegevoegd en geldt de wet van behoud van energie
Figuur 75 toont hier een voorbeeld van.



Figuur 74 Actief exoskelet [1]



Figuur 75 Passief exoskelet [2]

Verder is er nog een onderverdeling mogelijk in de verschillende toepassingsgebieden:

- In de *industrie*: Hierin kan het exoskelet gebruikt worden om handarbeid te vergemakkelijken. Hierbij ondersteunt het de arbeider bij het werken met zwaar gereedschap of mechanische structuren en geeft het ook de kracht om deze zware structuren op te tillen zoals je kan zien in de Figuur 77.
- Voor *militaire* doeleinden kan dit exoskelet ondersteuning bieden voor het laden en lossen van zware materialen zoals munitie uit vliegtuigen of vrachtwagens. Ze kunnen ook de soldaat ondersteunen bij het dragen van hun zwaar materiaal zoals weergegeven is in Figuur 79. In de toekomst kan het ook als een soort van robot waarin een soldaat zich in bevindt worden geïmplementeerd die de bewegingen van de soldaat nabootst zoals in de films: 'Pacific Rim', 'Elysium'.
- Voor *revaliderende* doeleinden dient het exoskelet om mensen die moeite hebben om bepaalde bewegingen uit te voeren zoals wandelen te ondersteunen en eventueel de kracht te geven om terug te kunnen wandelen. Door steeds de ondersteunende kracht van het exoskelet doen af te nemen op de patiënt zal deze langzamerhand zijn krachten weer terugkrijgen om dan later zelfstandig te kunnen wandelen zoals men in Figuur 76 kan zien. Zo'n exoskelet kan ook dienen voor mensen met een verlamming

aan hun benen of armen terug te leren wandelen. Het volgende filmpje toont dit aspect aan:

<https://www.youtube.com/watch?v=2Xd27c-pz4Y>

- Voor *medische* doeleinden kan een exoskelet ontworpen worden dat de bewegingen van de chirurg nabootst. Dit exoskelet vertaalt deze ruwe en grote bewegingen vervolgens naar zeer nauwgezette fijne bewegingen om zo een patiënt zeer nauwkeurig te kunnen opereren. Dit heeft een specifieke benaming namelijk *tele-chirurgie*. Deze vorm van opereren biedt veel voordelen. Zo moet men minder snijden in het lichaam om bij het te opereren gedeelte te komen. Dit zorgt voor minder littekens, minder complicaties en betere genezing na de operatie. Zo zijn ongeveer 70-90% van de patiënten waarbij ze een operatie met een robot hebben uitgevoerd om prostaatkanker te verwijderen ongeveer na 2 weken terug hersteld [3]. Als we dit nu vergelijken met een traditionele operatie, dan was er pas een volledig herstel na 3-6 maanden, dit komt voornamelijk met de precisie waarmee de robot kan werken.

Een mooi voorbeeld is een topchirurg genaamd Leonardo die in China zat voor een conventie, hier werd hij opgeroepen om een operatie te doen aan patiënt Lucas. Lucas was fout gevallen met zijn fiets en had hierbij ernstige verwondingen aan zijn rug opgelopen. Zijn rug was gebroken en moest onmiddellijk geopereerd worden door Leonardo. Helaas was Leonardo niet aanwezig waardoor de operatie normaal niet zou kunnen doorgaan. Gelukkig had Leonardo dankzij de technologische vooruitgang een Da Vinci machine ter beschikking zoals weergegeven in Figuur 78 waardoor hij vanuit China Lucas toch kon opereren. Leonardo zit hierbij met zijn hoofd en handen in een soort van console. Hij ziet met zijn ogen sterk vergrootte 3D-beelden die komen van een camera die men in Lucas zijn ruggenwervel heeft geplaatst, dit kan je zien als een soort van Virtual Reality bril die de chirurg zal op zetten tijdens het opereren zoals je links kan zien in Figuur 80. Rechts in Figuur 80 kan je de controle van de armen van de robot zien die Lucas zal opereren [4].



Figuur 76 exoskelet voor rehabilitatie [5]



Figuur 77 Exoskelet voor industriële toepassingen [6]



Figuur 78 Medische toepassing [4]



Figuur 79 Exoskelet voor militaire toepassingen [7]



Figuur 80 Onderdelen van de Da Vinci Machine [8]

De bedoeling van deze cursus is dat jij zo'n robot gaat maken die de armbewegingen van een chirurg nabootst op een echte robotarm. Deze arm is opgebouwd uit een paar sensoren die de beweging van de arm van de chirurg meten, deze beweging zal ervoor zorgen dat een elektromotor beweegt, dit allemaal wordt aangestuurd met behulp van een microprocessor genaamd *Raspberry Pi*.

2. IMU

2.1 Kennismaking met de IMU

De eerste en meest belangrijkste sensor die in jullie robot zal zitten is een IMU, dit is een afkorting voor Inertial Measurement Unit. Dit is een sensor die onderverdeeld is in 3 verschillende andere sensoren namelijk:

- Sensor om in 3 richtingen versnellingen op te meten genaamd een *accelerometer*. De eenheid hiervoor is meestal uitgedrukt in m/s^2 of in G-krachten.
- Sensor om in 3 richtingen hoeksnelheden op te meten genaamd een *gyroscop*. De eenheid die uit de sensor komt is in graden/seconden of in radialen/seconden.

Wat is het verschil tussen beide eenheden?

.....

- Sensor om in 3 richtingen het magnetisch noorden te detecteren genaamd een *magnetometer*. De eenheid hiervoor is Tesla (T). Omdat dit zo'n grote eenheid is wordt dit vaak in microTesla (μT) uitgedrukt. Hoeveel μT is 1 T?

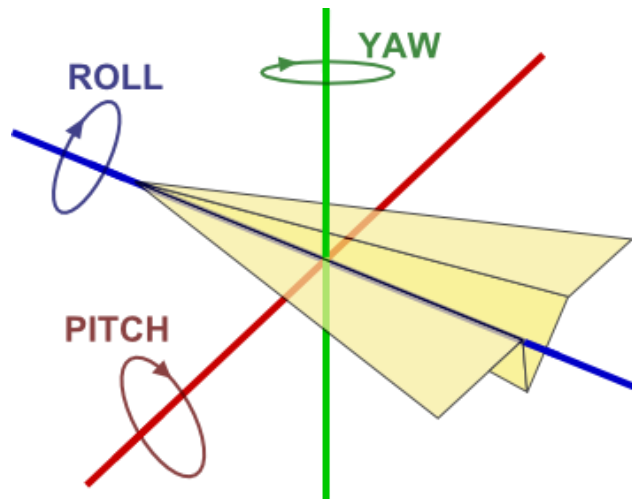
1 T = μT

Al deze deelsensoren dienen om de beweging van de IMU te weten te komen. Dit kan handig zijn om zijn stand of positie in de ruimte te weten te komen of om een traject dat deze heeft afgelegd te weten te komen. Zo'n IMU wordt veel gebruikt in de ruimtevaart en op boten. Deze sensor geeft de stand van een vliegtuig of boot weer ten opzichte van een as zoals is weergegeven in Figuur 81. Zo kan men de IMU ook gebruiken om dingen te stabiliseren zoals een drone, camera etc. Zo een voorbeeld kan je zien in het volgende filmpje die de werking van de IMU toont en met de waardes van de IMU gaat men verschillende motoren aansturen om de beweging van de IMU na te bootsen naar de bewegingen van de camera:

<https://www.youtube.com/watch?v=dL--RQqZ3LM>

Met een smartphone, waar ook een IMU in zit, kunnen we een camera aansturen die op een robot of drone is bevestigd om zo het camerabeeld te bewegen naar de gewenste positie. Zo kan je een extra bewegende dimensie toevoegen aan een besturing van een robot. Dit principe is ook weergegeven in het volgende filmpje waar ze een IMU op een plaatje hebben bevestigd en zo de camera de beweging van de IMU volgt.

<https://www.youtube.com/watch?v=7GVXqNLLH7Q>



Figuur 81 Roll, Pitch en Yaw bij een vliegtuig [104]

Tegenwoordig biedt een IMU nog veel meer toepassingen met de komst van Virtual Reality en motion capture. Zo gaat men de IMU's gebruiken om de beweging van een persoon of object te volgen in de ruimte om zo een idee te geven van hoe een persoon stapt. Dit biedt veel voordelen ten opzichte van andere veelgebruikte technieken die op basis van verschillende camera's gekleurde bollen volgen in een grote studio. Zoals je ziet in Figuur 82 heeft men dan veel oppervlakte nodig en apparatuur om een persoon of object te kunnen volgen. Zo'n IMU kan deze hele installatie van camera tot gekleurde bolletjes vervangen hierdoor bespaart men veel plaats uit. Het volgende filmpje laat goed de werking van motion capture zien:

<https://www.youtube.com/watch?v=tyiuocPvUes>



Figuur 82 Motion Capture gebruikmaken van camera's [10]

2.2 Praktische kennismaking met IMU

2.2.1 Accelerometer

De accelerometer in de IMU meet de versnelling van de IMU. Dit wordt gedaan op basis van een fysische wet genaamd: De Tweede Wet van Newton: die stelt dat de verandering van impuls van een voorwerp recht evenredig is met de resulterende kracht op dat voorwerp ($F=m*a$). In Figuur 83 kan je een massa-veer systeem zien die op basis van de versnelling op de massa een kracht op de veren gaat uitoefenen.

Oefening 1

Stel dat men deze massa verticaal zal houden dus gericht naar de aardbol wat zal dan de kracht zijn die uitgeoefend zal worden op de veren? Wetende dat het blokje 1 gram weegt?

.....

.....

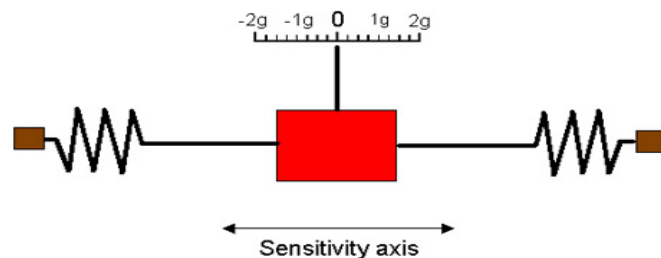
.....

.....

Wat zijn de eenheden G die boven het blokje zijn aangeduid?

.....

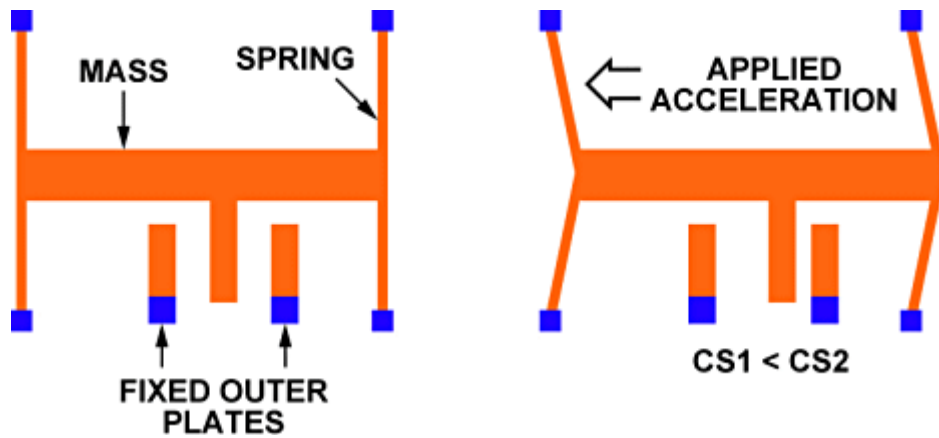
.....



Figuur 83 Accelerometer principieel [106]

Hetzelfde principe wordt toegepast in de nieuwste IMU's die ook in jouw smartphone zitten. Alleen is er nog een verschil, men gaat namelijk niet op basis van de kracht op de veren de meting doen maar op basis van een kleine plaat die men op de massa plaatst en die zo een capaciteit zal veranderen. De capaciteit van een vlakke condensator wordt weergegeven in de volgende formule:

$$\text{Capaciteit} = \text{permittiviteit} * \frac{\text{Oppervlakte}}{\text{Afstand tussen de platen}}$$



Figuur 84 MEMS accelerometer [12]

Als de massa een kracht ondervindt dan beweegt deze vlakke plaat en zal de afstand tussen een vaste plaat (aangegeven op Figuur 84 met *fixed outer plates*) en de plaat op de massa toenemen (de plaat met geen blauw uiteinde in Figuur 84), hierdoor zal er een verschil in capaciteit te zien zijn. Deze werking is goed uitgelegd in het onderstaande filmpje. Het principe kan je ook in Figuur 84 zien.

https://www.youtube.com/watch?v=T_iXLNkkjFo

We kunnen deze principes ook gaan simuleren om eens te kijken hoe de fysica in zijn werk gaat. Een goede simulatie is gegeven in onderstaande link, die de situatie in zo'n accelerometer goed weergeeft.

https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_en.html

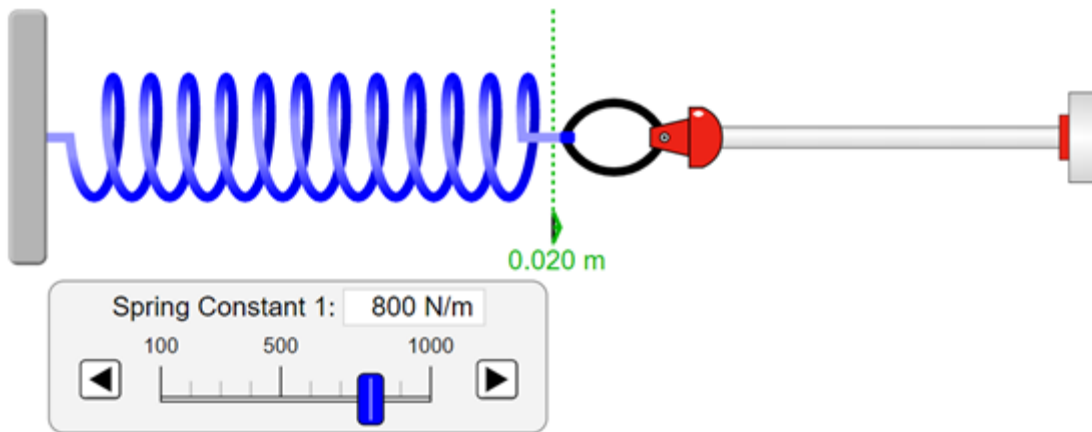
Hier kan je wat parameters aanpassen en kijken wat voor effect het heeft op de krachten die er spelen. Kijk ook eens naar het verband tussen de afstand van het rustpunt van de veer en de kracht (N) die er zal optreden als een veer wordt uitgetrokken.

Oefening 2

Stel dat men nu een veer uitrekt met een veerconstante van 800 N/m over een afstand van 2 cm met behulp van een massa van 50 kg. Wat is de kracht dan die de veer uitoefent op de massa, als men even de zwaartekracht buiten beschouwing laat zoals is weergegeven in Figuur 85? Wat gaat dan theoretisch de acceleratie zijn die het blok doet bewegen en de kracht op de veer werkt?

.....

(Opl. 16N en 0.32 m/s²)

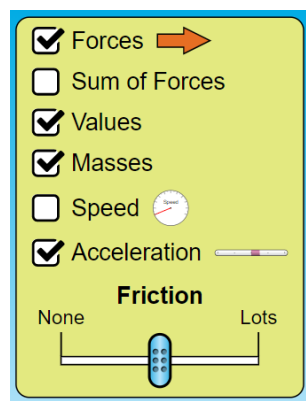


Figuur 85 Massa-veer systeem [13]

Als je alles hebt berekend kun je dit eens testen in de bovenstaande link naar de simulatie. Hier pak je best het deeltje 'Intro' en kun je de 'displacement' aanzetten om de 2 cm te simuleren. Als je alle parameters goed hebt ingesteld kan je nu de kracht rechtsonder controleren. Zo kun je ook met onderstaande link naar de simulatie de acceleratie controleren.

https://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_en.html

Hier ga je het deeltje 'acceleration' moeten aanduiden en dan nog alles aanvinken zoals is weergegeven in Figuur 86.



Figuur 86 Aanvinken bij simulatie van acceleratie [109]

Oefening 3

Stel dat de interne plaat van de massa 8 mm is verschoven ten gevolge van een acceleratie zoals principieel is weergegeven in figuur 8. Stel dat beide platen 2 cm² groot zijn. Hoe groot is dan de capaciteit die men zal meten ten gevolge van deze acceleratie?

(Tip: pico = 10⁻¹², Elektrische veldconstante)

.....

.....


.....

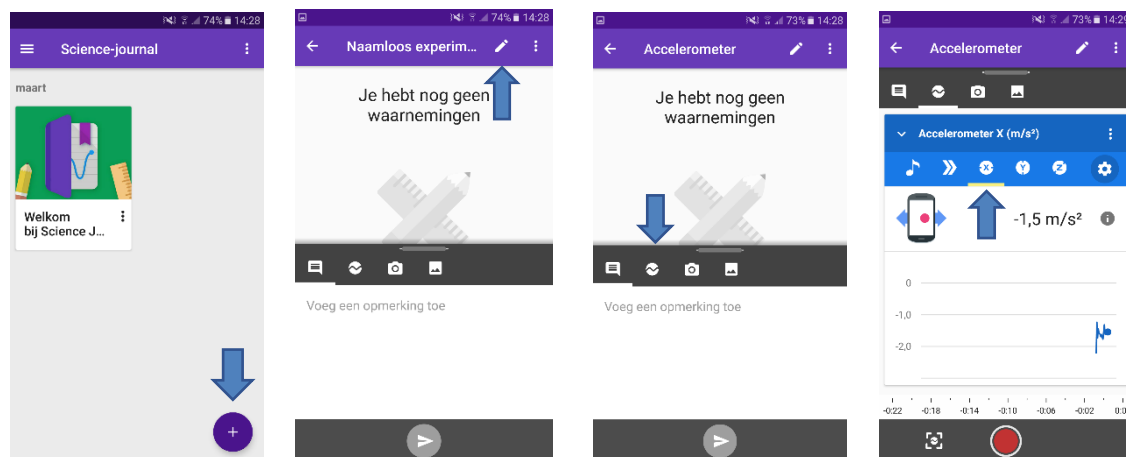
Test dit ook in de volgende simulatie onder het deeltje 'Capacitance'. Je kan hier best alles aanduiden zodat je ook kan zien hoe de stromen gaan lopen en het elektrisch veld zich zal plaatsvinden bij het aanschakelen van de batterij.

https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_en.html

Als je verder wil zien hoe een capaciteit werkt en wat het doet kan je ook eens kijken naar het ander deeltje van bovenstaande simulatie bij 'Light Bulb' daar ga je zien hoe een capaciteit zijn energie opslaat en ontlad.

Om aan te voelen hoe een accelerometer in de werkelijkheid werkt gaan we nu gebruik maken van de Google Science Journal-app. Met deze app gebruiken we de accelerometer die in je smartphone zit. Volg onderstaande stappen om zelf een experiment op te starten.

1. Open de app
2. Duw rechts onderaan op het plus-icoontje
3. Verander de naam van het experiment naar Accelerometer
4. Duw op het sensor icoontje 
5. Duw vervolgens op de x-as van de accelerometer



Figuur 87 Stappenplan Google Science Journal

Nu staat alles klaar om een experiment te beginnen, om een experiment te starten moeten jullie op de rode knop onderaan het beeld duwen. Vanaf het moment dat deze knop is ingedruwd, begint de opname van de data. Om het experiment te stoppen moet er nog eens op de knop gedruwd worden.


Oefening 4

Nu zijn jullie klaar voor het eerste experiment. Duw op de rode knop en probeer eens met je smartphone horizontaal van links naar rechts te bewegen. Wat merk je op? Is er een verschil tussen de data bij de beweging naar links en de data bij de beweging naar rechts?

.....

Beweeg nu eens horizontaal van boven naar beneden. Is er een verschil met de data uit het vorige experiment? Hoe komt dit?

.....
Probeer nu eens dezelfde experimenten met de y-as maar beweeg van voor naar achter i.p.v. links naar rechts. Welke verschillen zie je?

.....
Voor het volgende experiment gaan we de z-as bekijken, duw op deze knop . Start nu eens opnieuw het experiment en beweeg de smartphone omhoog en omlaag. Wat merk je op?

.....
Leg de smartphone nu eens stil op tafel. Welke versnelling zie je in de z-richting? Hoe komt dit?

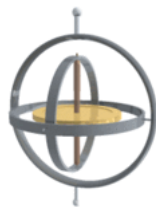
.....
Vat nu zelf in enkele zinnen de werking van de accelerometer samen. (tip: duw op het i-knopje voor meer informatie). Probeer ook goed de sensitiviteitsassen van de sensor te weten te komen en in welke richting deze gericht zijn.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

2.2.2 Gyroscop

Een gyroscop is een sensor die de hoeksnelheid en oriëntatie meet. Dit werkt op basis van het principe van behoud van impulsmoment dat zegt dat als een voorwerp in een bepaald tempo aan het draaien is het de neiging heeft om deze draaiing vol te houden. Er is een externe kracht voor nodig om de draaiing te veranderen, als deze niet aanwezig is wordt het impulsmoment behouden.

Zo'n externe kracht heet de corioliskracht. Zo'n gyroscop kun je zien als een soort van tol die in een cardanische ophanging (Figuur 88) bevindt. Dit wil zeggen dat de tol zo gemonteerd is dat deze in alle richtingen vrij kan bewegen.



Figuur 88 Cardanische ophanging [15]

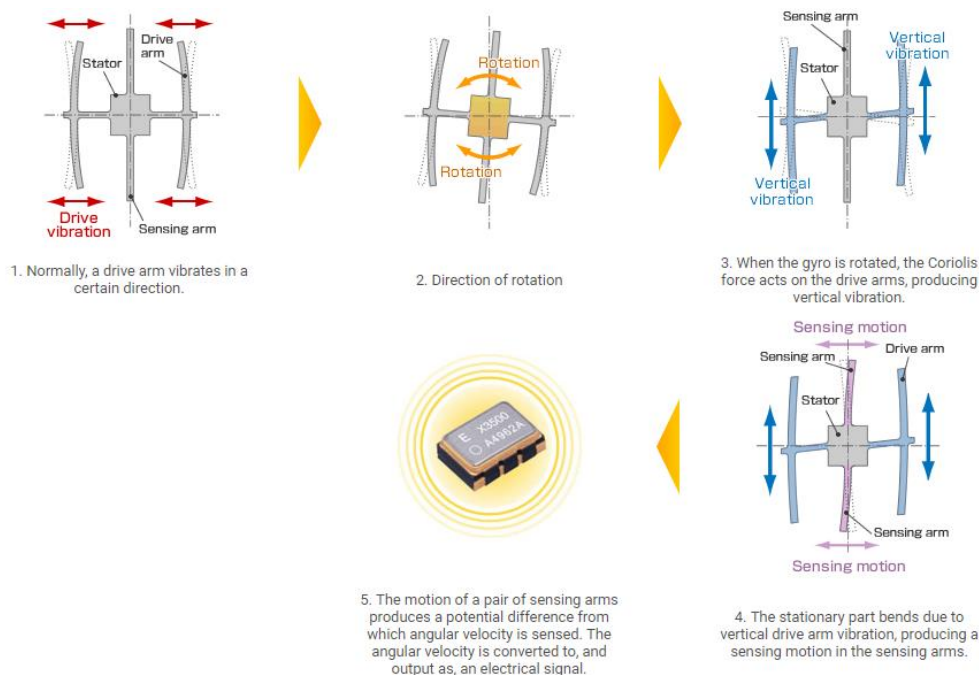
De gyroscopische werking is in het onderstaande filmpje ook uitgelegd:

<https://www.youtube.com/watch?v=cMatPVUg-8>

In MEMS (micro elektromechanische systemen) gebruiken ze een trillende massa die op een vaste frequentie trilt dankzij een kristal dat zijn eigenfrequentie heeft. Wanneer men de gyroscoop beweegt dan gaat deze terug naar zijn *rustpositie* willen terugkeren dus zal het een corioliskracht leveren op de meetarmen die zich op de stator bevinden in Figuur 89. Opmerking hierbij is dat hier veel uitvoeringen van bestaan zoals stemvorken die bij een rotatie gaan plooiën onder invloed van de corioliskracht. Ook bestaan er kamachtige structuren die op en neer trillen, bij een rotatie verschuiven deze dankzij corioliskrachten en kunnen ze capacitief ingelezen worden.

In onderstaand voorbeeld is een filmpje dat een van deze uitwerkingmogelijkheden uitlegt:

<https://www.youtube.com/watch?v=XsjvaYAFN1M>



Figuur 89 MEMS-gyroscoop werking [16]

Als je dit in levenden lijve wilt testen kun je eens een tol nemen en deze aan het draaien brengen. Vervolgens geef je eens een duwtje aan de tol en zal na verloop van tijd de tol terug in rust draaien dankzij het corioliseffect.

Oefening 5

Heb je een idee hoe je van hoeksnelheid naar positie (hoekstand in graden) kan gaan? (*Tip*: de eenheid voor hoeksnelheid is in rad/s of graden/s).

.....

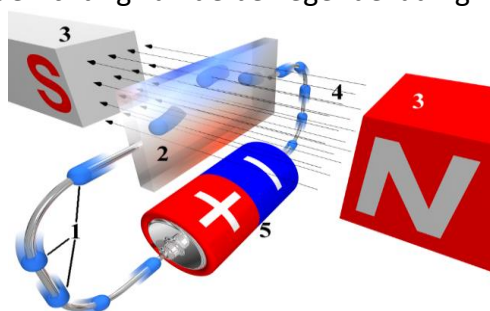
Stel dat we om de 0.01 seconden een waarde van een MEMS-gyroscoop krijgen op een computer, op wat voor frequentie werkt dan de MEMS-gyroscoop? Stel dat we op deze frequentie een hoeksnelheid van 5 graden/seconden binnen krijgen en dat de gyroscoop op 0° in rust zit. In welke stand zal deze gyroscoop zich dan bevinden?

.....
.....

Het grote probleem bij gyroscopen op dit moment zeker bij vibrerende gyroscopen is het feit dat deze last hebben van ruis. Deze ruis is te wijten aan de kleine, schokkende beweging van de gyroscoop. Als men deze ruis integreert dan zal de gyroscoop in rust wegdriften naar oneindig. Wegdriften wil zeggen dat als men op tijdstip 0 in 0° zit en men de gyroscoop niet laat bewegen deze op tijdstip 1 op 2° zal zitten en dan nog verder op tijdstip 5 zal deze op 5° zitten. Zo zal men als men deze gyroscoop beweegt nooit meer in de ruststand 0° terechtkomen. Een manier om dit op te lossen is een klein stukje van de accelerometer die geen last heeft van drift bij de gyroscoop op te tellen. Dit heeft sensorfusie of het samenvoegen van verschillende sensors. Door deze sensorfusie te doen kan men fouten die optreden bij één sensor, zoals veel ruis bij de accelerometer maar zonder drift, tenietdoen door dit te fuseren met een andere sensor die een ander type fout zal hebben, zoals een gyroscoop die minder last heeft van 'ruis' maar eerder van gyroscopische drift.

2.2.3 Magnetometer

De derde en laatste sensor die de IMU bevat is de magnetometer. Zoals de naam doet vermoeden, kunnen we met behulp van deze sensor een magnetisch veld meten. Deze sensor werkt door gebruik te maken van het Hall-effect. Het hall-effect zegt dat als men een magnetisch veld aanlegt dat loodrecht staat op een geleider dan gaat dit magnetisch veld de elektronen gaan afbuigen zoals men kan zien in Figuur 90. De afbuiging is aan de Lorentzkracht te danken, dit is de kracht van een magnetisch veld op een bewegende lading (elektron in de geleider). Deze kracht kan de richting van de bewegende lading veranderen.



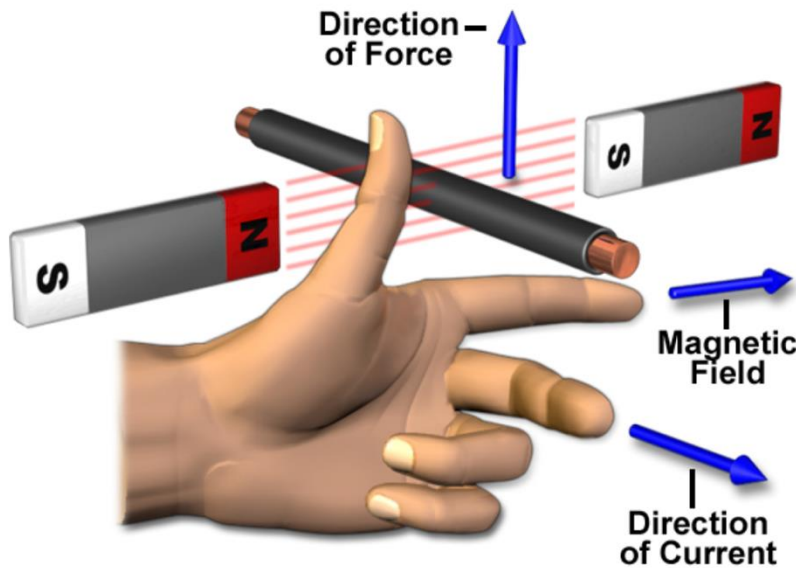
Figuur 90 Magnetometer principieel [17]

Een visuele interpretatie met de bijbehorende uitleg van het hall effect kan je in het volgende filmpje zien:

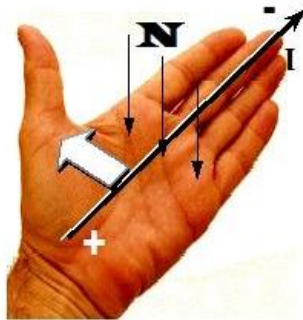
<https://www.youtube.com/watch?v=FLWcJQhgsvc>

De richting is via de linkerhandregel te achterhalen. De linkerhandregel zegt dat als de wijsvinger de richting van het magneetveld volgt en de middelvinger volgt de richting van de stroom dan wijst de duim naar de kracht die de elektronen doet afbuigen, dit is ook weergegeven in Figuur 91. Op Figuur 92 kan men ook nog een andere linkerhandregel zien.

Deze zegt dat als magnetische veldlijnen de linkerhandpalm doorboren en de vingertoppen dan gericht zijn zoals de stroom zal vloeien dan wijst de gestrekte duim naar de Lorentzkracht.



Figuur 91 Linkerhandregel lorentzkracht [18]



Figuur 92 Tweede linkerhandregel lorentzkracht [19]

Deze afbuiging door de Lorentzkracht zorgt ervoor dat er op ene kant van de geleider iets meer elektronen gaan zitten ten opzichte van de andere kant waardoor er een potentiaalverschil kan ontstaan en kan men dus ook deze spanning meten.

Oefening 6

Stel dat men aan de linkerkant meer elektronen gaat hebben ten gevolge van zo'n extern magnetisch veld. Waar gaat dan de positieve potentiaal kant zijn in deze geleider?

.....

Je kan dit ook eens bekijken in onderstaande simulatie:

<https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/hall-effect>

Probeer hierbij eens zelf de *linkerhandregel* toe te passen op verschillende situaties. Hoe komt het dat als je de batterij omdraait met behulp van de knop in Figuur 93 de Lorentzkracht zich omdraait? Leg dit uit aan de hand van de linkerhandregel.

.....



Figuur 93 Kop om de batterij om te draaien

Hoe komt het als de magneet verder weg wordt gehouden van de geleider dat het potentiaalverschil ook zal dalen?

.....
.....

Nu je in de simulatie gezien hebt hoe een magneetveld zich rond een staafmagneet kun je deze eens proberen te tekenen op onderstaande staafmagneet:



Als je alles getekend hebt kun je dit eens in een programma uit testen om te kijken of je het goed hebt getekend. In de volgende link kan je dit eens simuleren:

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html

Let op: het minteken komt overeen met de zuidpool en het plusteken komt overeen met de noordpool. Je kan ook eens met zo'n geel bolletje die een sensor voorstelt kijken hoe de veldsterkte zich verhoudt voor zo'n staafmagneet door dit bolletje over het scherm eens op een paar plaatsen te zetten.

Wat valt je op? (Tip: zet de sensor eens wat verder weg van de polen)

.....
.....

Oefening 7

Wat gaat de Lorentzkracht zijn in een geleider die een ladingsdrager met een snelheid van 0.0000236 m/s voortbeweegt met een lading q van $-1,60218 \cdot 10^{-19}$ C. Als men een magneet met een magnetische inductie B van 0.5 T met zijn magnetisch veld loodrecht op de bewegingsrichting van de ladingdrager. Wat is de Lorentzkracht?

.....
.....
.....
.....

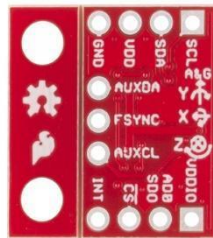
Wat gebeurt er als er geen magneet in de buurt is van de hall effect sensor, welke magnetisch veld wordt er dan opgemeten? Zie je nog andere toepassingen voor deze sensor buiten het detecteren van magneten? (Tip: denk aan een kaart en een wandeltocht)

.....
.....
.....
.....

2.3 Technisch aspect

2.3.1 Aansluiten

Er volgt nu een klein beetje technische uitleg over de IMU zodat jullie goed begrijpen wat deze sensor allemaal kan doen en hoe je deze sensor kan gebruiken in combinatie met een robotarm. De sensor ziet er als volgt uit:



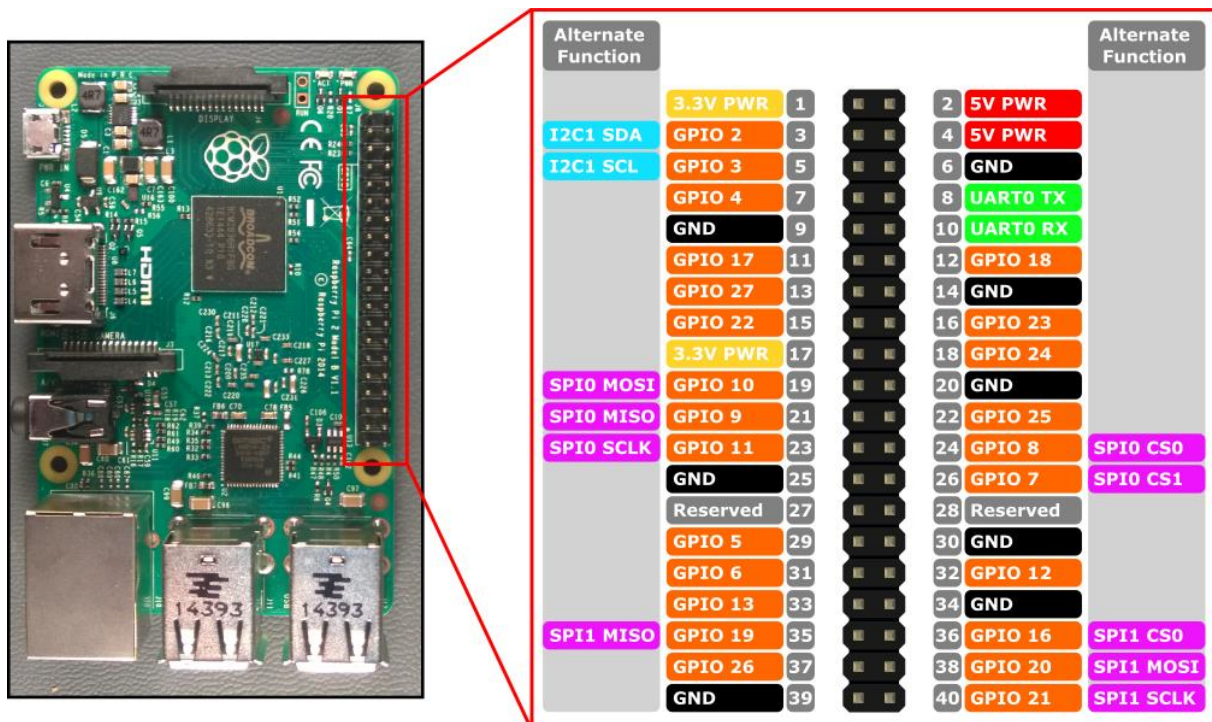
Figuur 94 IMU-sensor (MPU-9250) [20]

Deze sensor bevat 3 kleinere sensoren namelijk een gyroscoop, accelerometer en magnetometer die in 3 assen werkt dit wil zeggen dat het ten opzichte van de x, y en z-as kan werken. Om met deze IMU-sensor te communiceren zijn er verschillende digitale communicatieprotocollen voorzien zoals I2C en SPI. Wij gaan I2C gebruiken. Dit staat voor inter-ic-communicatie of beter gezegd een protocol dat speciaal voor de communicatie tussen sensoren/chips is gemaakt. In Figuur 94 worden de volgende pinnen gebruikt voor de I2C communicatie:

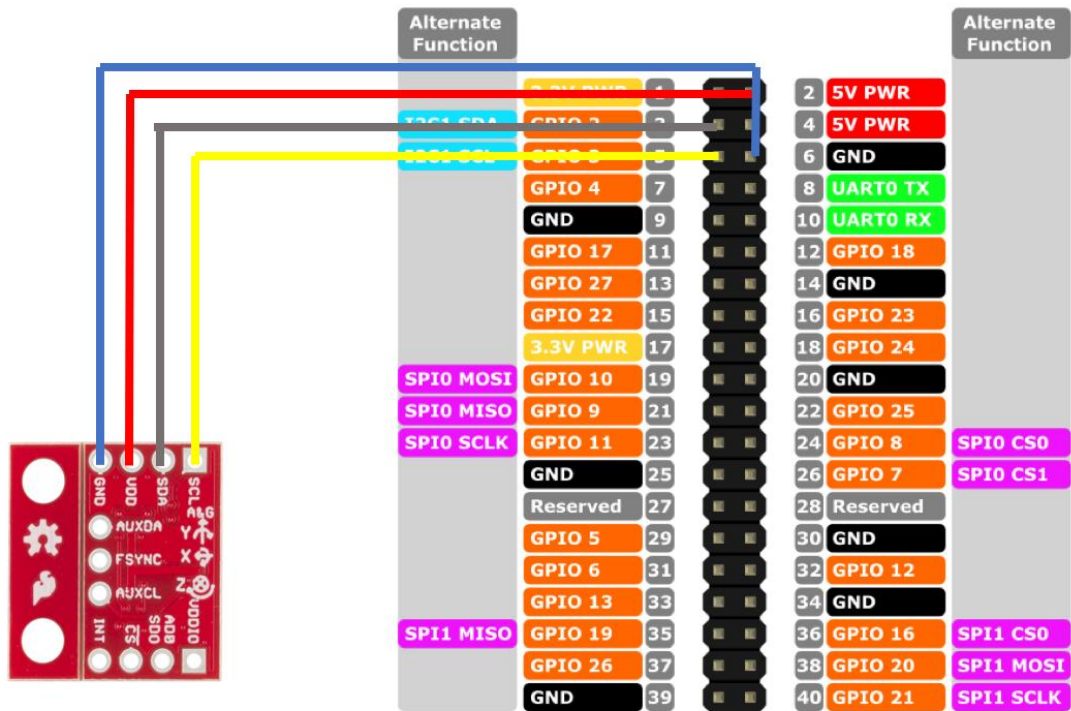
- SCL: Dit is de seriële klok van het I2C protocol, die zorgt ervoor dat de communicatie op een regelmatig tijdstip door wordt gestuurd. Dit kan tussen 0.9 tot 20 MHz zijn. Hoeveel keer per seconden wordt er dan iets doorgestuurd naar de SCL van deze sensor?
.....
- SDA: Dit is de afkorting van I2C seriële data. Weten jullie waarvoor dit gebruikt wordt?
.....
.....
- GND: grond van de sensor. Deze dient om overige stroom af te voeren naar de grond van de microcontroller. Dit dient ook als een soort van gemeenschappelijke referentie voor spanningen waarover de sensor gaat communiceren

- VDD: voeding van de sensor, weet jij welke spanningen er typisch optreden bij kleine sensoren en chips zoals bij deze IMU?

Nu we weten hoe zo'n IMU geconnecteerd moet worden, kunnen we al een eerste stap nemen om met deze IMU een robot aan te sturen. Een eerste stap zal zijn om 1 IMU te koppelen aan een Raspberry Pi. Een tekening van hoe de pinnen op de Raspberry georiënteerd zijn kan je vinden in Figuur 95. Probeer eerst eens zelf deze aansluiting te realiseren en vergelijk dan met het connectieschema dat is weergegeven in Figuur 96.



Figuur 95 Pin layout in Raspberry Pi [21]



Figuur 96 Connectie-schema Raspberry Pi

2.3.1 Accelerometer

Oefening 8

Op basis van Figuur 97 kan men ongeveer 1G meten als de zwarte as van de accelerometer in de IMU loodrecht staat op het aardoppervlak en wijst naar het centrum van de aarde. Hoe komt dit? En als we parallel tot het aardoppervlak zijn gaat de sensor in de richting van de gele as ongeveer 0G meten. Hoe kunnen we nu aan de hand van de gegevens die uit de accelerometer komen een soort van tilt-sensor maken? Maak ook een schets als we de accelerometer in een hoek zetten van 45° en bereken met welke G-kracht dit overeenkomt. (Tip: Tilt is de hoek tussen de stand van de gele as van de accelerometer en het aardoppervlak)

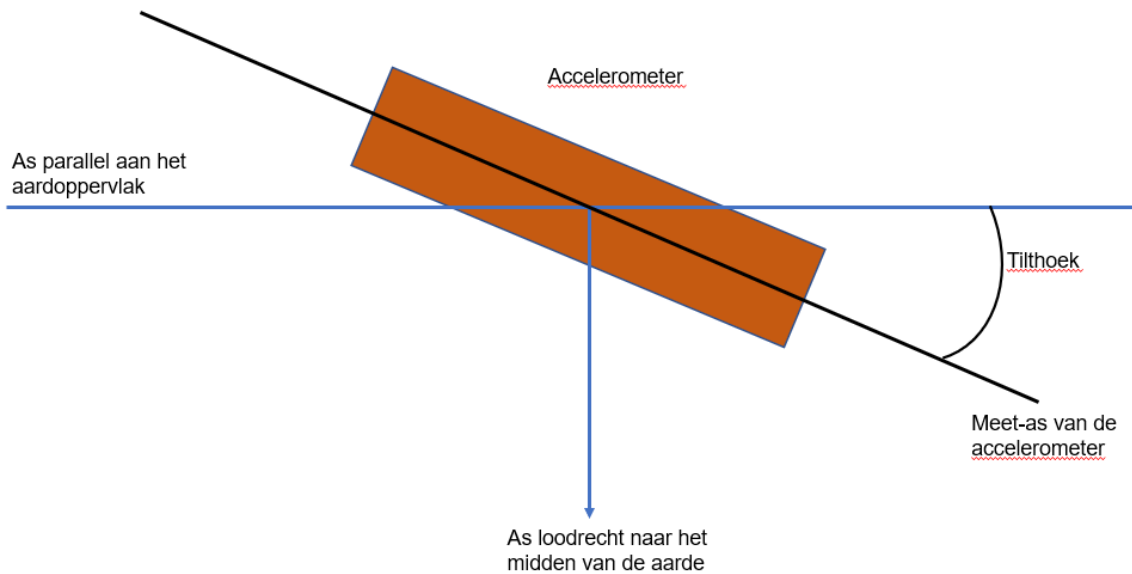
.....

.....

.....

.....

.....



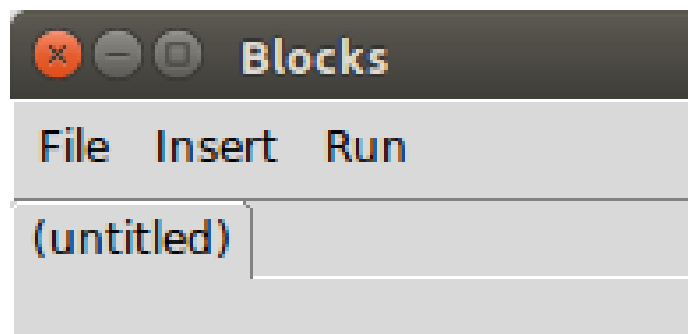
Figuur 97 Tilt meten bij een accelerometer [106]

De grafische userinterface (GUI) is opgebouwd als een flowchart of stroomdiagram (meer info: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Stroomdiagram>) waardoor de data stroomt. (deze stroom van data loopt van links naar rechts). Dit kan je je inbeelden als een soort van rivier. Om deze flowchart op te bouwen hebben we bouwstenen nodig. Die noemen we hier voor de simpliciteit blokjes. Elk van die blokjes heeft een bepaalde functie, zo zijn er bijvoorbeeld blokjes om de sensor uit te lezen en blokjes om de data uit de sensor te filteren. Om nu een programma te schrijven moeten jullie deze blokjes in de juiste volgorde zetten en juist connecteren. Het connecteren doe je door een lijntje te trekken tussen 2 blokjes (Een lijntje loopt typisch van de uitgang van een blokje naar de ingang van een ander blokje). Nu gaan we over naar een eerste kennismaking met de GUI. Dit principe is hieronder weergegeven. Een eerste echte test om te kijken of de IMU's goed zijn geconnecteerd met de Raspberry Pi zal bestaan uit het connecteren van 2 blokjes:

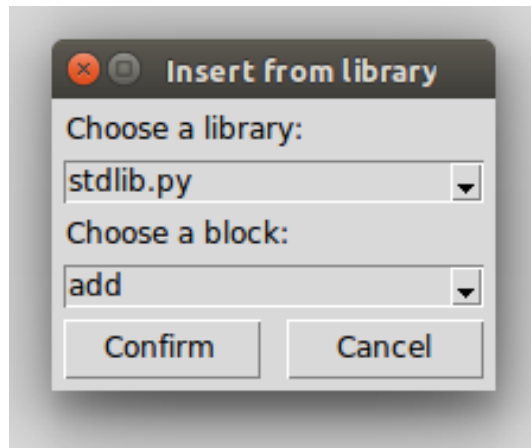
- **IMUX**
- **Data_Accelerometer**

(X duidt op het nummer van de IMU die je hebt, dit staat er normaal op geschreven)

Dit gaat ervoor zorgen dat de gegevens die uit de accelerometer komen van de IMU visueel weergeeft.



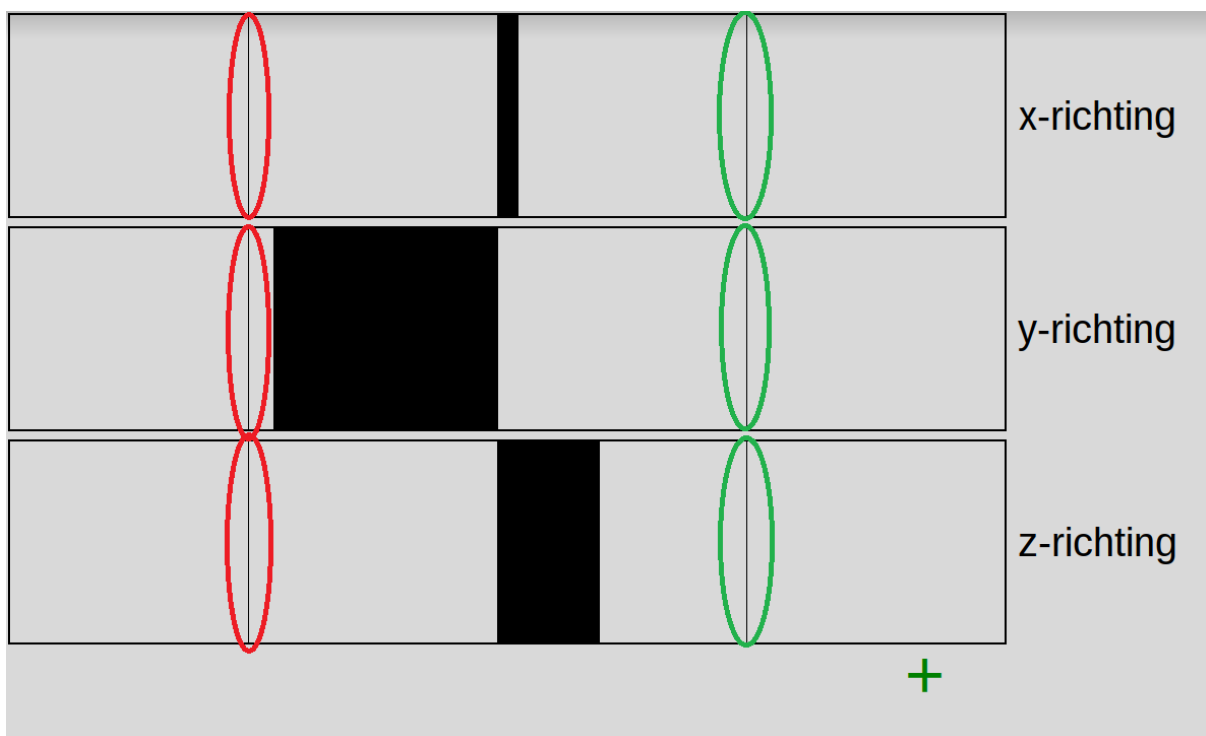
Figuur 98 GUI om blokjes toe te voegen



Figuur 99 Scherm om blokjes vanuit een library toe te voegen

Om je een beetje op weg te helpen zullen we eerst uitleggen hoe je deze blokjes kan toevoegen. Eerst en vooral moet je op insert duwen in de tabjes zoals is weergegeven in Figuur 98. Daarna heb je de keus of je een blokje vanuit een file wil openen of vanuit een library of bibliotheek. Dit laatste, library, gaan we nemen. Als je daarop duwt krijg je een schermje zoals is weergegeven in Figuur 99. Hier moet je de testsessieLib.py library nemen en vervolgens het blokje Data_Accelerometer nemen en op confirm klikken. Als dit allemaal correct is verlopen kun je op run, dat in Figuur 98 ook staat, klikken om het programma uit te voeren. Aangezien dat dit jullie eerste programma is, komt er een pop-up met de vraag om je programma op te slaan. Kies hiervoor een map die je later makkelijk kan terugvinden. Vervolgens kun je aan de slag gaan met de acceleratie data.

De 6 strepen die je ziet in het programma duiden de grens van 1G (rechts en in het groen omcirkeld) en -1G (links en in het rood omcirkeld) aan voor iedere mogelijk as: x,y en z. Als je het geprogrammeerd hebt zou je onderstaande figuur moeten krijgen.



Figuur 100 Accelerometer Output

Oefening 9

Probeer nu op elk van de assen op de IMU 1G te krijgen, als je niet meer weet wat 1G wil zeggen kun eens terug gaan kijken naar *oefening 2*.

(Tip: Newton met de vallende appel)

Wat kun je concluderen uit de gegevens van de IMU, zijn deze stabiel? Kun je ook de assen goed vinden op de IMU en deze dan op basis van het schermpje goed zien? (Tip: de rechterkant is de positieve kant, dit is aangeduid met een groene +)

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

We gaan nu eens proberen om de tilt sensor te maken. Probeer nu eens zelf zo een programma te schrijven door op dezelfde manier blokjes in het programma toe te voegen zoals je hiervoor hebt gedaan. Je zult vervolgens nog blokjes met elkaar moeten connecteren om er een echt diagram van te maken. De volgende blokjes zul je nodig hebben uit de testsessieLib.py library:

- **IMUX**
- **Accelero_To_TiltX**
- **Accelero_To_TiltY**

(X is afhankelijk van de nummers van de gebruikte IMU)

(Tip: je kan ook beide resultaten laten zien door vanuit IMUX 2 connecties te maken: 1 naar TiltX en de andere naar TiltY)

We kunnen hierbij enkel de pitch en roll voorstellen van Figuur 5. Omdat men met deze methode geen informatie over de verdraaiing in de Z-as kan bekomen omdat de zwaartekracht niet op deze richting inwerkt. Hiervoor zullen we een extra sensor nodig hebben namelijk een magnetometer die wel een oriëntatie in de Z-as kan berekenen door middel van het magnetisch noorden.

Oefening 10

Probeer dit programma nu eens te connecteren op basis van bovenstaande blokjes door ze op dezelfde manier toe te voegen zoals je bij de vorige oefening hebt gedaan. Als je denkt dat je schema correct is kun je op de run-knop die in Figuur 98 is weergegeven duwen om het programma uit te voeren.

Wat valt je op aan de data, zeker op vlak van nauwkeurigheid en stabiliteit van de sensor? Zie je hier ongeveer hetzelfde resultaat als in oefening 9? Kan je de rotaties zien zoals in Figuur 100 gegeven is?

.....
.....
.....
.....
.....
.....

2.3.2 Magnetometer

Uit de voorgaande opgaven weten jullie dat een IMU naast de accelerometer en gyroscoop ook een magnetometer bevat. In de volgende opgave gaan we deze eens uitproberen.

Oefening 11

In deze opgave gaan we proberen om met behulp van de magnetometer een kompas te maken. Zoals jullie inmiddels weten meet een magnetometer magnetische velden die in de buurt zijn. Maar wat gebeurt er nu wanneer er geen enkele magneet in de buurt is? Op dat moment zal het grootste magnetisch veld op aarde gemeten worden, namelijk het magnetisch veld van de aarde. Zoals jullie waarschijnlijk weten hebben zowel magneten als de aarde een noordpool en een zuidpool, dit is niet toevallig de aarde is namelijk zelf 1 grote magneet. Dit is een magneet die enkel werkt in de x-y richting, dus als de IMU plat ligt. Meer informatie over het magnetisch veld van de aarde vind je in onderstaande link:

<https://natuurkundeuitleg.wordpress.com/tag/aardmagnetisch-veld/>

Probeer nu met onderstaande blokjes zelf een kompas te maken:

- **Magneto_Naar_Hoek**
- **Hoek_Naar_Kompas**
- **IMUX**

2.4 Praktisch

2.4.1 IMU-datafusie

Je hebt nu hopelijk al een idee van wat er zich allemaal afspeelt rond een IMU en wat voor problemen sommige sensoren zich met zich mee brengen. Sensorfusie of het samennemen van sensoren dient ervoor om relevante data uit sensoren te combineren tot een verbeterde data. Dit kan zijn om bv. het signaal van de accelerometer, dat veel ruis bevat maar zonder drift zit, te combineren met het signaal van de gyroscoop, waar er wel drift in zit. Drift is het fenomeen dat ervoor zorgt dat de metingen van een sensor steeds verder afwijken van de werkelijke waarde. Dus zelfs al staat een gyroscoop perfect stil, zal de opgemeten hoek niet constant blijven. Door metingen van de accelerometer en de gyroscoop te combineren kan men een beter signaal dat minder ruis en minder drift bevat bekomen. De meest gebruikte methoden om deze combinatie uit te voeren zijn:

- Complementary filter
- Kalman filter

Meer informatie over de defecten en gevolgen ervan kan je in volgende link vinden:

<https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/APN064.pdf>

Een Kalman filter werkt concreet als volgt, eerst gebruiken we de data uit de gyroscoop om de te bekomen waarde te schatten aan de hand van een vooropgesteld fysisch model dat een goede benadering wordt van een hoekverdraaiing. Maar omdat deze data nog onderhevig is aan het verschijnsel van gyroscopische drift is deze niet accuraat genoeg. De schatting wordt dan samengenomen met een kleine portie van de data uit de accelerometer en magnetometer (voor de Yaw) en aan de hand daarvan gaat men dit vergelijken met een vooropgesteld model en wordt daaruit de Kalman Gain berekend. Met behulp van deze Kalman Gain kunnen we dan een beter schatting om de te bekomen waarde te vinden. Hoe meer men deze schatting gaat doen, hoe beter deze ook gaat worden. De berekening van deze gain is te complex om hier verder te worden uitgewerkt. De geïnteresseerden kunnen volgende links bekijken om meer over de Kalman filter te weten te komen, zeker de laatste link is een zeer uitgebreide Kalman filter tutorial.

<http://bilgin.esme.org/BitsAndBytes/KalmanFilterforDummies>

https://home.wlu.edu/~levys/kalman_tutorial/

Wanneer men deze sensorfusie toepast dan zou normaal gezien de drift volledig weg moeten zijn.

Oefening 12

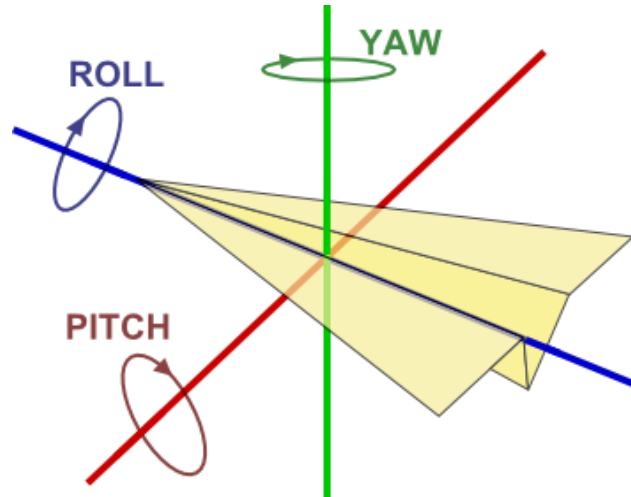
Dit kunnen we testen door het in het programma met de volgende blokken op een logische manier te schakelen:

- **IMUX**
- **Kalman_Naar_GUI**
- **Hoek_Naar_GUI**

(X is afhankelijk van de nummers van de gebruikte IMU)

Probeer nu de IMU eens stil te houden en kijk dan eens of je nog gyroscopische drift kan zien in de grafische userinterface. Als je geen gyroscopische drift kunt waarnemen kunnen we aan de slag. Kijk eens naar de volgende simulatie en speel eens wat met de waardes van pitch, roll en yaw en probeer dan dit eens zelf te doen op een zelfgemaakt papieren vliegtuig waar je de IMU op gaat bevestigen zoals op Figuur 101.

<http://www.ctralie.com/Teaching/COMPSCI290/Materials/EulerAnglesViz/>



Figuur 101 Roll, Pitch en Yaw vliegtuig [104]

Heb je trouwens al gemerkt dat als je de pitch rond 90° zit dat de roll en yaw zeer snel variëren bij een kleine verandering in de x of z richting van de IMU?

Dit fenomeen heet Gimbal Lock. Dit is wanneer een van de assen van het vliegtuig overeenkomen met een andere as en men geen duidelijke waarneming kan doen over de oriëntatie in de ruimte van de IMU of het vliegtuig.

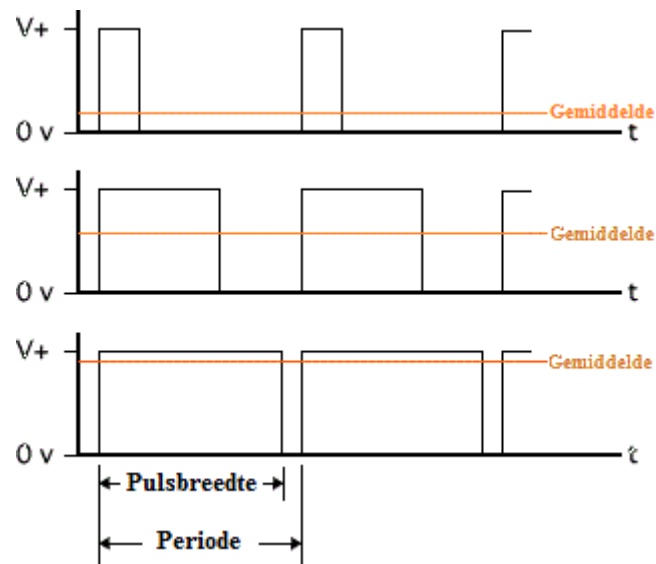
Dit kan je trouwens ook heel makkelijk visueel voorstellen in de bovenstaande simulatie, probeer een zo van die assen samen te laten vallen met een andere as en bekijk dit fenomeen eens.

2.4.2 Servomotor

Een servomotor is een elektrische motor die intern verschillende tandwielen bevat die uiteindelijk eindigen in een as hierop kan men dan nog een tussenstuk zetten. Zoals is weergegeven in Figuur 102. Er zit typisch ook een elektrisch circuit in de motor dat een PWM-sigitaal of pulse width modulation omzet naar een hoekstand van de motor. Een PWM-sigitaal is eigenlijk een soort van combinatie van hoog (5V of voedingsspanning) en laag (0V of grond). Door dit sigitaal op een vaste frequentie aan/af te zetten kan men zo het 'gemiddeld' sigitaal of de arbeidscyclus (Meer info: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Arbeidscyclus>) van het sigitaal aanpassen en zo een hoekstand doorsturen naar de servomotor. Een arbeidscyclus van 50% bijvoorbeeld komt ongeveer overeen met 2.5V omdat men 50% van de tijd het sigitaal hoog heeft staan (5V) en 50% van de tijd laag heeft staan (0V). Dit principe is ook nog eens weergegeven in Figuur 103.



Figuur 102 Servomotor [22]



Figuur 103 PWM-sigitaal [23]

Oefening 13

Om te testen of de motor correct is aangesloten kunnen we het volgende blokje even programmeren:

Motor_0_180_Graden

Met dit blokje zal de motor variëren tussen 0 en 180 graden. Als dit niet het geval is, controleer dan de connecties van de motor.

2.4.3 Alles combineren

Oefening 14

Nu we alle onderdelen kennen en als een mee geprogrammeerd hebben kunnen we nu eens met jullie opgedane kennis eens 1 IMU aan de motor aansluiten. Dit doen we door de volgende blokjes te gebruiken:

- **IMUX**
- **Hoek_Naar_PWM1**
- **PWM_Naar_Motor**
- **Kalman_Naar_Hoek**

Dit is al een eerste echte stap om beweging van een chirurg op te meten en om te vormen naar een concrete beweging. Als alles goed verlopen is kun je de eens rond de x-as eens draaien. Hoe je dit doet kun je eens kijken naar de assen die op de IMU staan, als je dit goed doet kun je zien dat de servomotor de beweging van de IMU al goed volgt.

2.4.4 2 IMU's

Nu jullie hebben geleerd hoe je interessante metingen kan doen met 1 IMU, gaan we in dit hoofdstuk een stap verder. In plaats van 1 IMU worden er nu 2 gebruikt. Dit heeft als grote voordeel dat nu de positie of hoek kan berekend worden t.o.v. een referentie. We doen dit door 1 IMU rond de pols te bevestigen en 1 IMU rond de bovenarm bij de biceps te bevestigen. De eerste stap is het aankoppelen van de extra IMU aan de Raspberry Pi. Doe dit door de beide IMU's aan een flat ribbon cable te hangen.

Oefening 15

Nu de extra IMU is aangesloten kunnen we een klein programma schrijven om de accelerometer van de 2de IMU uit te lezen. Doe dit door de blokjes uit het vorige hoofdstuk te hergebruiken. Probeer beide gyroscopen simultaan uit te lezen. Zie je een verschil tussen de data van de 2 IMUs? Hoe komt dit?

.....
.....
.....
.....

Oefening 16

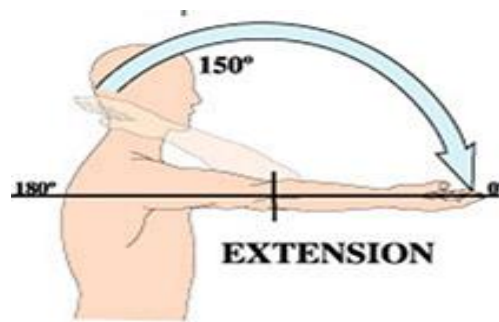
Nu we beide IMUs kunnen uitlezen, kunnen we overgaan naar een eerste echte test. Bevestig 1 IMU aan de pols en de andere aan de bovenarm. Plaats nu je elleboog op tafel, en beweeg snel naar beneden met je onderarm (Figuur 104). Vergelijk de acceleraties van beide IMUs. Wat merk je op?

.....
.....
.....
.....

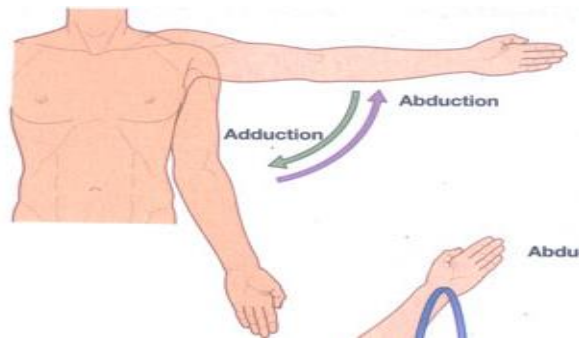
Oefening 17

Houd nu je arm gestrekt en beweeg in 1 vloeiende beweging naar beneden (Figuur 105). Bereken de gemiddelde acceleratie tijdens de beweging. Bereken vervolgens de hoeksnelheid met behulp van de gevonden lineaire versnelling en de afstand van de schouder tot de IMU. Wat stel je vast? In welke as was je aan het bewegen van de IMU?

.....
.....
.....
.....



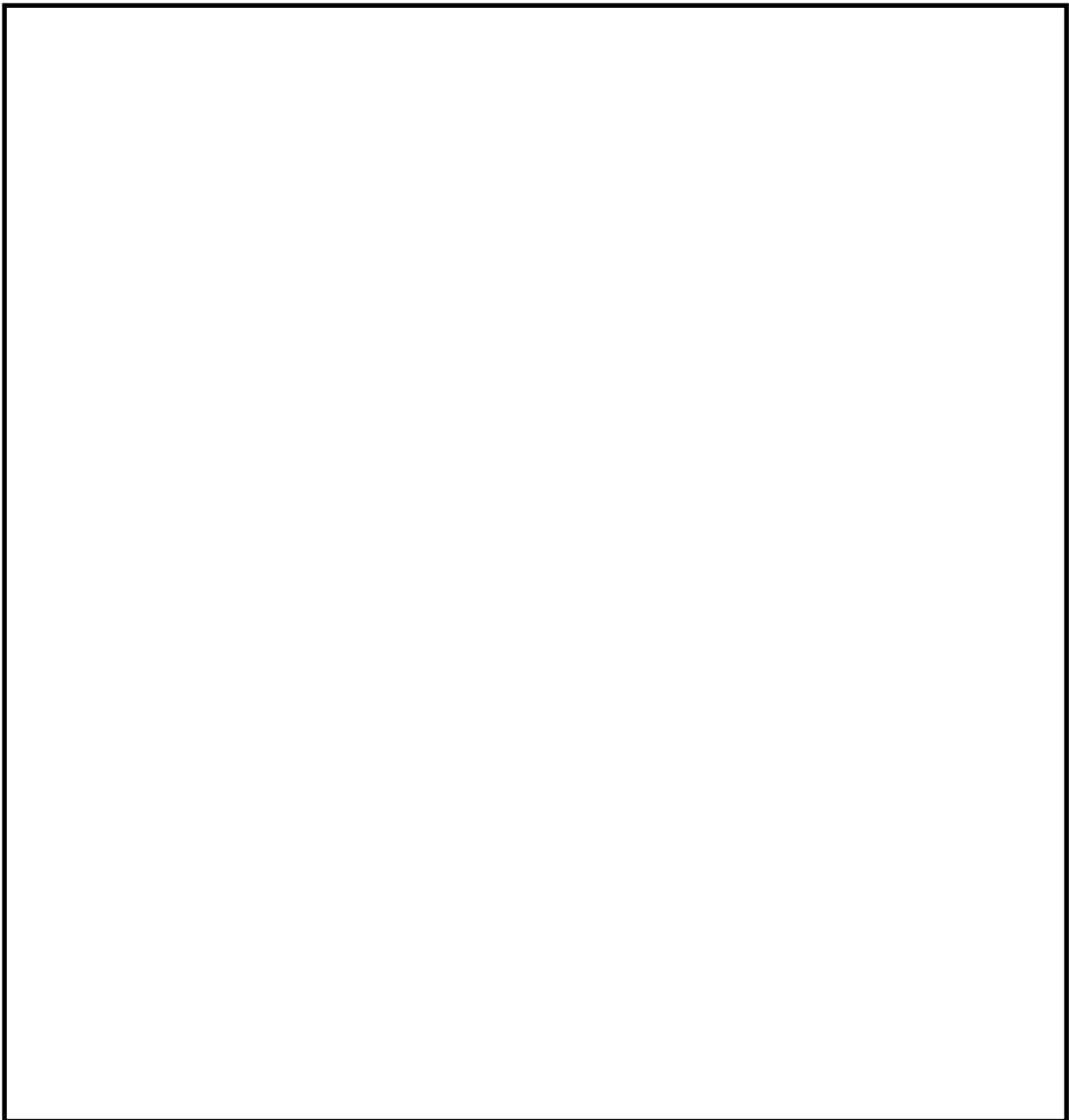
Figuur 104 Beweging arm 1 [24]



Figuur 105 Beweging arm 2 [25]

Oefening 18

Als laatste proef gaan we proberen om de hoek van de arm te berekenen met behulp van de IMUs. Probeer eerst theoretisch de hoeken te schetsen om zo een idee te krijgen welke hoeken je nodig gaat hebben in je berekening.



Oefening 19

Bij deze oefening gaan we de relatieve hoek tussen de 2 IMU's berekenen. Om dit te doen moet je 1 IMU op de onderarm plaatst en de andere IMU op de bovenarm zodat we dan een relatieve hoek tussen beide armen kunnen berekenen. Dit wordt gedaan door de hoeken te berekenen ten opzichte van een assenstelsel van de IMU op de bovenarm. Hiervoor worden volgende blokjes gebruikt:

- **2x IMUX**
- **Print_Data**
- **Bereken_Hoek**
- **Combineer_IMUs**

(X is afhankelijk van de nummers van de gebruikte IMU)

Oefening 20

We kunnen nu de hoek tussen 2 IMU's berekenen, hiermee kunnen we dus ook weer een motor gaan aansturen. Probeer dit met de volgende blokken:

- **2x IMUX**
- **Hoek_Naar_PWM2**
- **Bereken_Hoek**
- **PWM_Naar_Motor**
- **Combineer_IMUs**

(X is afhankelijk van de nummers van de gebruikte IMU)

3. Blokjes Overzicht

Print_Data: Toont de inkomende data op het scherm

Input: Eender welke data

Output: geen, er is wel een pop up die de data in een woord uitprint op deze pop up

Combineer_IMUs: Combineert data van 2 ingangen tot 1 uitgang

Input: 2 ingangen met data komende van een IMU

Output: een lijst met 2 elementen van de gegevens van de IMU

Bereken_Hoek: Berekent de hoek tussen 2 IMUs

Input: Lijst met 2 elementen, waarbij elk element de sample data uit 1 IMU is.

Output: De hoek tussen de 2 IMUs (in graden)

IMU0: Leest de data van IMU0 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU0, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU1: Leest de data van IMU1 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU1, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU2: Leest de data van IMU2 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU2, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU3: Leest de data van IMU3 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU3, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU4: Leest de data van IMU4 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU4, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU5: Leest de data van IMU5 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU5, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

IMU6: Leest de data van IMU6 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU6, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer.

IMU7: Leest de data van IMU7 uit

Input: geen

Output: Sample data van IMU7, bestaande uit kalman filter hoeken, accelerometer, gyroscoop en magnetometer

PWM_Naar_Motor: Stuurt de motor aan met het inkomend PWM-sigitaal

Input: PWM-sigitaal om de motor aan te sturen

Output: Geen output, de motor wordt aangestuurd

Kalman_Naar_Hoek: Zet de data uit 1 IMU komende van de Kalman filter om naar pitch, roll, yaw

Input: Sample data van 1 IMU

Output: Hoeken rondom 1 IMU in roll,pitch, yaw (in graden)

Hoek_Naar_PWM1: Zet de hoek van 1 IMU om naar een PWM-sigitaal

Input: Hoeken rondom 1 IMU (in graden)

Output: PWM-sigitaal afhankelijk van de gewenste hoek

Hoek_Naar_PWM2: Zet de hoek van 2 IMUs om naar een PWM-sigitaal

Input: Hoek tussen 2 IMUs

Output: PWM-sigitaal om deze hoek op de motor te krijgen

Hoek_Naar_GUI: Toont de hoeken rond 1 IMU grafisch op het scherm

Input: Hoeken rondom 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de hoeken rondom de IMU

Hoek_Naar_Pitch: Toont de pitch van 1 IMU grafisch op het scherm

Input: Hoeken rondom 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de pitch van de IMU

Hoek_Naar_Roll: Toont de roll van 1 IMU grafisch op het scherm

Input: Hoeken rondom 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de roll van de IMU

Hoek_Naar_Yaw: Toont de yaw van 1 IMU grafisch op het scherm

Input: Hoeken rondom 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de yaw van de IMU

Data_Accelerometer: Toont de data uit de accelerometer grafisch op het scherm

Input: Sample data uit 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de acceleraties van de IMU

Motor_0_180_Graden: Laat de motor variëren tussen de 0 en 180 graden. Dient gebruikt te worden om de servomotor te testen.

Input: Geen

Output: Geen, motor wordt aangestuurd

Accelero_Naar_TiltX: Toont de pitch berekent uit de accelerometer data

Input: Sample data uit 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de berekende tilt uit de acceleratiemeting

Accelero_Naar_TiltY: Toont de roll berekent uit de accelerometer data

Input: Sample data uit 1 IMU

Output: Geen, er komt een pop up met daarop de berekende tilt uit de acceleratiemeting

Magneto_Naar_Hoek: Zet de data uit de magnetometer om tot een hoek tov het magnetische Noorden.

Input: Sample data uit 1 IMU

Output: Hoek ten opzichte van het magnetische Noorden

Hoek_Naar_Kompas: Toont de hoek uit de magnetometer op het scherm

Input: Hoek ten opzichte van het magnetische Noorden

Output: Geen, er komt een pop up met daarop een kompas

4. Bibliografie

- [1] Consortium rond AXO-SUITa, «AXO-SUIT,» [En ligne]. Available: <http://www.axo-suit.eu/>. [Accès le 3 Juni 2018].
- [2] v. Dijk, «A passive exoskeleton with artificial tendons: Design and experimental evaluation,» 2011. [En ligne]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-passive-exoskeleton-with-artificial-tendons%3A-and-Dijk-Kooij/8d78792d26108c44c30d296379a37807f7e96946>. [Accès le 3 Juni 2018].
- [3] Prostaat.nl, «Da Vinci Operatie,» [En ligne]. Available: <https://www.prostaat.nl/behandelingen/behandeling-van-prostaatkanker/behandeling-van-prostaatkanker-zonder-uitzaaiingen/da-vinci-robot-operatie/>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [4] Armstrong, «See futuristic surgery that helped young woman become first to have lung cancer removed by ROBOT,» 8 Maart 2016. [En ligne]. Available: <https://www.mirror.co.uk/news/technology-science/technology/see-futuristic-surgery-helped-young-7518450>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [5] WSEiT, «Robotic exoskeleton - the presentation of a new rehabilitation method,» 1 Februari 2016. [En ligne]. Available: <https://www.wseit.edu.pl/en/news/presentation-of-a-new-rehabilitation-method-using-robotic-exoskeleton>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [6] Nichols, «Prediction: You'll see a whole bunch of people wearing robots at work in 2018,» 4 December 2017. [En ligne]. Available: <https://www.zdnet.com/article/prediction-youll-see-a-whole-bunch-of-people-wearing-robots-at-work-in-2018/>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [7] Warrior Maven, «The Army is testing a new super-soldier exoskeleton,» 27 November 2017. [En ligne]. Available: <http://www.businessinsider.com/army-testing-super-soldier-exoskeleton-2017-11?international=true&r=US&IR=T>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [8] da Vinci.Surgery, «The da Vinci Surgical System,» [En ligne]. Available: <http://www.davincisurgery.com/da-vinci-surgery/da-vinci-surgical-system/>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [9] U. forum, «Trying to simulate a ships rocking motion in the ocean,» 2018. [En ligne]. Available: <https://forum.unity.com/threads/trying-to-simulate-a-ships-rocking-motion-in-the-ocean.465557/>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [10] Lighthouse, «Motion Capture Lab – A Trip to Pinewood Studios,» 1 Maart 2012. [En ligne]. Available: <http://www.lighthouse.org.uk/news/motion-capture-lab-a-trip-to-pinewood-studios>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [11] Rotoview, «Accelerometers,» [En ligne]. Available: <http://www.rotoview.com/accelerometer.htm>.
- [12] Khenkin, «Sonic Nirvana: MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments,» 1 Juni 2009. [En ligne]. Available: <https://www.sensormag.com/embedded/sonic-nirvana-mems-accelerometers-as-acoustic-pickups-musical-instruments>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [13] Phet Colorado, «Hooke's law,» [En ligne]. Available: https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_en.html.
- [14] Phet Colorado, «Forces and motion basics,» [En ligne]. Available: https://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_en.html. [Accès le 2 Juni 2018].

- [15] Wikipedia, «Gyroscope,» 14 Maart 2018. [En ligne]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [16] Epson, «Gyro sensors - How they work and what's ahead,» [En ligne]. Available: https://www5.epsondevice.com/en/information/technical_info/gyro/. [Accès le 6 Juni 2018].
- [17] Wikipedia, «Hall-effect,» 25 April 2018. [En ligne]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Hall-effect>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [18] Magnet Academy, «Right and Left Hand Rules,» 9 December 2014. [En ligne]. Available: <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/right-and-left-hand-rules>. [Accès le 6 Juni 2018].
- [19] Wikipedia, «Lorentzkracht,» 8 December 2017. [En ligne]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Lorentzkracht>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [20] Sparkfun, «SparkFun IMU Breakout - MPU-9250,» [En ligne]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/13762>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [21] Microsoft, «Raspberry Pi 2 & 3 Pin Mappings,» 28 Augustus 2017. [En ligne]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/iot-core/learn-about-hardware/pinmappings/pinmappingsrpi>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [22] RCSuperstore, «Futaba Bulk S3003 Standard Servo,» [En ligne]. Available: <https://www.rcsuperstore.com/Futaba-Bulk-S3003-Standard-Servo-p/futm0028.htm>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [23] Wikipedia, «Pulsbreedtemodulatie,» 25 Augustus 2017. [En ligne]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Pulsbreedtemodulatie>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [24] Pruzansky, «Elbow Anatomy,» [En ligne]. Available: <https://handsport.us/patient-education/elbow-anatomy/>. [Accès le 2 Juni 2018].
- [25] Outlander Anatomy, «Arms!Arms!Arms!,» 28 April 2015. [En ligne]. Available: <https://www.outlanderanatomy.com/arms-arms-arms-redux/>. [Accès le 2 Juni 2018].

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Educatief exoskelet voor studenten STEM richtingen

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektronica-ICT**
Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Osstyn, Laurens

Vercruysse, Simon

Datum: **4/06/2018**