



Professionele Bachelor Elektronica-ICT



DE SPRONG VAN EEN SKYDIVER IN 3D

Niels Jongen

Promotoren:

Luc Beullens
Willy Vandeput

B&B Controls
Hogeschool PXL

B & B Controls s.a.
n.v.

De eindverantwoordelijkheid voor deze scriptie rust volledig bij de student zelf. Ook na scriptie- en procesbegeleiding valt het niet uit te sluiten dat de scriptie nog onjuistheden en/of onvolledigheden bevat, die wél bij de eindevaluatie in rekening werden gebracht, maar in de finale versie niet meer werden aangepast.



Professionele Bachelor Elektronica-ICT



DE SPRONG VAN EEN SKYDIVER IN 3D

Niels Jongen

Promotoren:

Luc Beullens
Willy Vandeput

B&B Controls
Hogeschool PXL

B & B Controls s.a.
n.v.

I. Dankwoord

Eerst en vooral wil ik graag Luc Beullens en Jo Smolders bijzonder bedanken voor de kans die zij mij gegeven hebben om deze stage te doen bij B&B Controls. In het bijzonder Luc Beullens voor de algemene begeleiding doorheen de hele stageperiode.

Ook wil ik graag de andere collega's van B&B Controls bedanken om mij met open armen te ontvangen en dingen bij te leren. Vooral Lothar Felten heeft mij enorm veel bijgeleerd. Bij hem en de andere collega's kon ik altijd ondersteuning vinden bij problemen.

Willy Vandeput (interne promotor), Bart Stukken en de andere docenten van de PXL die rechtstreeks of onrechtstreeks geholpen hebben met mijn stage wens ik ook graag te vernoemen.

Tot slot natuurlijk ook mijn ouders voor steun tijdens de stageperiode.

II. Abstract

De positie en bodypositie van een skydiver in vrije val of onder de parachute is onbekend. De doelstelling van het onderzoek is het ontwikkelen van tools die het mogelijk maken om het afgelegde traject van een skydiver zo optimaal en correct mogelijk in een 3D grafiek weer te geven. Dit zowel in vrije val als onder de parachute. Hiervoor worden hardware, firmware en software tools ontwikkeld.

Het visueel kunnen voorstellen van het verloop van de sprong kan aanzienlijk helpen bij de ontwikkeling van de volgende generatie "automatic activation devices" (AAD) van Vigil. Een AAD is een apparaat dat de reserveparachute automatisch opent indien de skydiver hier niet meer toe in staat is. Het leerproces en vooral de veiligheid van een skydiver wordt zo verbeterd. Wanneer het mogelijk is het traject van een skydiver in 3D weer te geven, is dit een eerste stap om compensatieparameters te gaan toepassen. Dit resulteert in een optimale bodypositie van de skydiver.

In de paper worden de verschillende hardware tools met elkaar vergeleken. Welke hardware werd ontworpen en welke sensoren spelen een belangrijke rol in het 3D-traject. De opbouw van de firmware wordt besproken aan de hand van de verschillende sensoren met hun specifieke instellingen voor het meten van een 3D-traject van een skydiver. De software dient om data te filteren en om te vormen naar begrijpbare gegevens. Aan de hand van deze gegevens wordt de positie en bodypositie achterhaald en verbeterd.

De nodige hardware is ontworpen en geproduceerd. De analyse van de data staat gedeeltelijk op punt. De software die de positie, mits randvoorwaarden, kan bepalen en weergeven is geschreven. De positie en bodypositie van een skydiver kunnen nog niet bepaald worden. Hiervoor moet er meer onderzoek gebeuren in het filteren van de data. Er moet ook rekening gehouden worden met het doel van de sprong bijvoorbeeld: is het een freeflyer, een wingsuiter,...

III. Inhoudsopgave

I.	Dankwoord	1
II.	Abstract	1
IV.	Gebruikte afkortingen, begrippen en grootheden.....	4
V.	Lijst gebruikte figuren en tabellen	4
1	Inleiding.....	6
2	Voorstelling bedrijf: B&B Controls	6
3	Hardware.....	7
3.1	Onderzoek data en sensoren	7
3.1.1	Accelerometer / Lineaire accelerometer.....	8
3.1.2	Gyroscoop	9
3.2	Gebruikte hardware	14
3.2.1	Type sensoren.....	14
3.2.2	Keuze processor.....	17
3.3	Ontworpen hardware	18
3.3.1	Elektrisch schema	19
3.3.2	Ontworpen PCB: "3D-traject shield"	21
4	Gebruikte software	22
4.1	MBED	22
4.2	STM32CubeMx.....	22
4.3	IAR compiler	24
4.4	Rstudio	24
4.5	Labview communications.....	24
5	Firmware.....	25
5.1	MULTI-SENSOR BOARD (MBED).....	25
5.2	Ontworpen print (IAR)	25
6	Software positie bepalingen	26
6.1	Excel	26
6.1.1	Accelerometer	26
6.1.2	Gyroscoop	35
6.1.3	Conclusie	43
6.1.4	Offset eruit filteren (accelerometer)	43
6.1.5	Accelerometer + Gyroscoop	48
6.2	Rstudio	51
6.3	Labview Communications	51
6.3.1	Test A4: Van punt A naar B en terug.....	55
6.3.2	Test A8: 3 maal van punt A naar B en terug	59
	59	
6.3.3	A7: 10 seconden niks doen	62
6.3.4	Conclusie	62

7	Logger (afgewerkte hardware)	63
7.1	Worp 1	65
7.2	Worp 2	66
8	Algemene Conclusie	67
9	Bijlagen	67
10	Bibliografie	68

IV. Gebruikte afkortingen, begrippen en grootheden

Automatic activation device	AAD
Fast Fourier transform	FFT
Printed circuit board	PCB
Acceleratie	g of mg
Degree per second	dps
Least significant bit	LSB

V. Lijst gebruikte figuren en tabellen

A. Figuren

Figuur 1 Vigil 2+ voorstelling	6
Figuur 2 Freescale sensor fusion toolbox.....	7
Figuur 3 Accelerometer data A naar B en terug.....	8
Figuur 4 Gyroscop data	9
Figuur 5 Berekende hoeken	9
Figuur 6 Gravity verandering op de accelerometer	10
Figuur 7 Roll, Pitch en Yaw	10
Figuur 8 Drift bij Gyroscopen	11
Figuur 9 Voorstelling bereik	12
Figuur 10 NUCLEO-F411RE.....	17
Figuur 11 Ingestelde I/O's op de processor	18
Figuur 12 Elektrisch schema, headers NUCLEO.....	19
Figuur 13 Elektrisch schema (zonder headers).....	20
Figuur 14 Bestukte PCB	21
Figuur 15 Foto PCB en Nucleo-F411RE	21
Figuur 16 Errors/warnings STM32CubeMx.....	22
Figuur 17 Ontwikkelingsomgeving STM32CubeMx.....	23
Figuur 18 Test A1: Van punt A naar B.....	27
Figuur 19 Test A2: Van punt A naar B tussenstop	28
Figuur 20 Test A3: Van A naar B met hogere snelheid	29
Figuur 21 Test A4: Van punt A naar B en terug	30
Figuur 22 Test A5: Van punt A naar B en terug met tussenstop	31
Figuur 23 Test A6: Van punt A naar B met hogere snelheid.....	32
Figuur 24 Test A7: 10 seconden niets doen.....	33
Figuur 25 Test A8: 3 maal van A naar B en terug.	34
Figuur 26 Berekende hoek met range.....	35
Figuur 27 Berekende hoek zonder range.....	35
Figuur 28 Test G1: 10 seconden niets doen	36
Figuur 29 Test G2: 0° naar 180°	37
Figuur 30 Test G3: 0° naar 180 met tussenstop	38
Figuur 31 Test G4: 0° naar 180° met hogere snelheid	39

Figuur 32 Test G5: 0° naar 360° en terug.....	40
Figuur 33 Test G6: 0° naar 360° en terug met hogere snelheid.....	41
Figuur 34 Test G7: 2 maal 0° naar 360° en terug	42
Figuur 35 Afgelegde cirkel.....	43
Figuur 36 Ruwe data accelerometer cirkel	44
Figuur 37 Gemeten/berekende afstand.....	44
Figuur 38 Berekende afstand na offset correctie.....	45
Figuur 39 Gemeten cirkel.....	46
Figuur 40 Herberekende grafieken na offset correctie	47
Figuur 41 Accelerometer afstanden.....	48
Figuur 42 Afstand bepalen door accelerometer en gyroscoop.....	48
Figuur 43 Schets liggend vraagteken.....	49
Figuur 44 Gemeten liggend vraagteken.....	49
Figuur 45 Schets X figuur.....	50
Figuur 46 Gemeten/berekende X.....	50
Figuur 47 Labview 6 grafieken	51
Figuur 48 Test A4: Van punt A naar B en terug	55
Figuur 49 Test A4: 261Hz cutoff frequentie	56
Figuur 50 Test A4: 130Hz cutoff frequentie	57
Figuur 51 Test A4: 10Hz cutoff frequentie.....	58
Figuur 52 Test A8: 3 maal van punt A naar B en terug	59
Figuur 53 Test A8: 261Hz cutoff frequentie	60
Figuur 54 Test A8: 10Hz cutoff frequentie.....	61
Figuur 55 Test A7: ruwe accelerometer data	62
Figuur 56 FFT van testcase A7	62
Figuur 57 Schema connector	63
Figuur 58 Connector logger	63
Figuur 59 Bovenaanzicht logger	63
Figuur 60 Logger	64
Figuur 61 Worp 1	65
Figuur 62 Worp 2	66

B. Tabellen

Tabel 1 Afwijkingen.....	9
Tabel 2 keuze sensoren	14
Tabel 3 Sensor LIS311HH.....	15
Tabel 4 Sensor LSM6DS0.....	15
Tabel 5 Sensor BMI160.....	16
Tabel 6 Sensor ICM-20601	16
Tabel 7 Gegevens ruwe data.....	45

1 Inleiding

Is skydiven een veilige sport? Statistisch gezien is het veiliger dan autorijden. Toch gebeuren er elk jaar ongevallen, sommigen met de dood tot gevolg. Het materiaal van de skydivers wordt steeds veiliger. Ondertussen bestaan er zelfs al “automatic activation devices” (AAD) die de reserve parachute van de skydiver automatisch openen indien hij/zij er niet meer toe instaat is.

Skydivers worden opgeleid aan de hand van video materiaal, foto's en regels. Toch gebeuren de meeste ongevallen door inschattingsfouten. Skydivers hebben dus iets nodig zodat hun acties achteraf bestudeerd kunnen worden zodat de kans op inschattingsfouten kan verlaagd worden.

Het afgelegde traject in een 3D-grafiek weergeven is een van de oplossingen. Het 3D-traject van een skydiver is tot op heden onbekend. Indien er een 3D-traject ontworpen wordt kan dit gebruikt worden voor het opleiden van skydivers en om de volgende generatie AAD van Vigil verbeteren. Het 3D-traject van een skydiver wordt in dit onderzoek onderzocht.

In dit onderzoek wordt er gekeken naar de hardware die nodig is om het traject van de skydiver te meten. Eerst wordt er bekeken welke soort sensoren er op de markt zijn. Hierna wordt er een keuze gemaakt welke sensoren nodig zijn en welk type gebruikt wordt.

Aan de hand van deze sensoren en testopstellingen wordt er geanalyseerd wat de voordelen en nadelen zijn van deze sensoren en met welke parameters er rekening moet gehouden worden. Hierna wordt de data van de sensoren verder geanalyseerd om tot slot de 3D-positie weer te geven.

2 Voorstelling bedrijf: B&B Controls

B&B Controls is een elektronica bedrijf dat inspeelt op de markt van het skydiven. B&B Controls ontwerpt en produceert AAD's met de merknaam Vigil.

B&B controls is gelocaliseerd op twee plaatsen. In Brussel bevindt zich het administratief gedeelte, in Tongeren bevinden zich de afdelingen: productie, research & development en research & analysis.

Een AAD is een apparaat wat de reserveparachute van de skydiver opent indien de skydiver er zelf niet meer toe in staat is. Een Vigil wordt zowel ontworpen voor de gewone skydivers als voor speciale aanvragen zoals het leger etc.

B&B Controls heeft met de Vigil tot nu toe 266 levens gered. (8 juni 2017)



Figuur 1 Vigil 2+ voorstelling

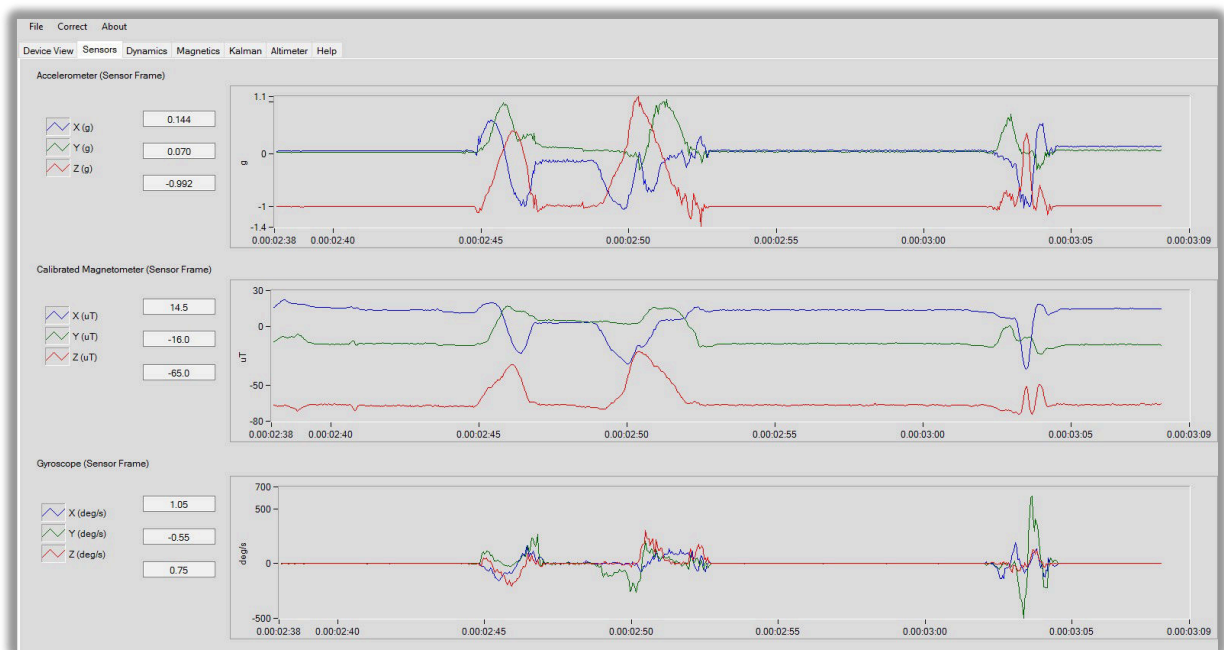
3 Hardware

3.1 Onderzoek data en sensoren

Vooraleer er onderzoek is verricht naar specifieke sensoren is er gekeken naar de verschillende sensoren op de markt. Welke data kan gemeten worden met de verschillende sensoren en welke is hiervan bruikbaar binnen dit onderzoek?

Voor het onderzoeken van de sensoren met de gemeten data is er een FRDM-developmentkit van NXP gebruikt. Op deze kit bevinden zich enkele gyroscopen, accelerometers, lineaire accelerometers, magnetometer, hoogtemeters en temperatuursensoren. Deze kit is gekozen omwille van het grote aantal sensoren, maar vooral omwille van de zeer praktische software. Deze software geeft de realtime data weer van de sensoren. Met andere woorden, de gemeten data is direct visueel zichtbaar op de computer.

Via dit bordje en de bijgeleverde software is het onderzoek en de analyse gestart. Wat gebeurt er wanneer de developmentkit van punt A naar punt B gaat en terug gaat, wanneer het bordje uit de lucht valt, wanneer het om zijn eigen as draait,... Door dit te doen, werd duidelijk welke sensoren nodig zijn voor het onderzoek.



Figuur 2 Freescale sensor fusion toolbox

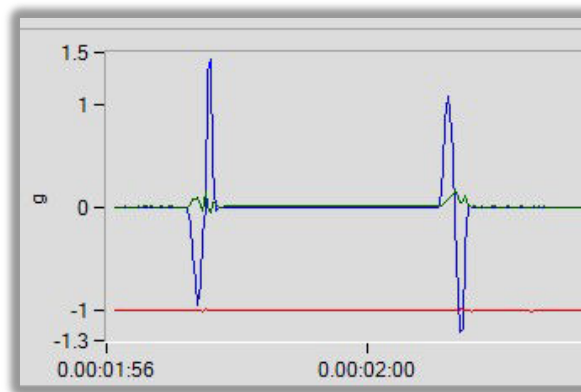
Na selectie is er gekozen om met een accelerometrie, lineaire accelerometer en een gyroscoop het onderzoek verder te zetten.

3.1.1 Accelerometer / Lineaire accelerometer

Een accelerometer en een lineaire accelerometer meten beide de versnelling (acceleratie) die optreedt op de sensor. Dit houdt in dat wanneer een object beweegt, de snelheid met een bepaalde versnelling zal verhogen. Eénmaal de snelheid constant blijft, zal er geen versnelling meer zijn waardoor de sensor niets meer meet. Wanneer het object afremt, zal er een negatieve versnelling optreden doordat de snelheid verlaagt. Versnellingen worden in G-krachten uitgedrukt ($1g = 9,81m/s^2$).

Een accelerometer kan enkel acceleratie meten in één richting en terug, met andere woorden op één as. Eén accelerometer is dus niet voldoende voor dit project. Er zijn minstens drie accelerometers nodig om de X-, Y- en Z-as te meten. Vandaar is in dit project een 3-axis accelerometer nodig. Dit is een accelerometer die de drie assen afzonderlijk meet (drie accelerometers in elkaar).

Figuur 3 is een voorbeeld van een object dat van punt A naar B gaat en terug.



Figuur 3 Accelerometer data A naar B en terug

De grafiek geeft drie lijnen weer, één lijn voor elke as (XYZ). Een rode lijn die constant $-1g$ aangeeft, een groene die $0g$ aangeeft en een blauwe die $0g$ aangeeft tenzij er van punt A naar B verplaatst wordt en terug.

Zowel de groene als de blauwe lijn meten in rust geen acceleratie. De rode lijn meet in rust wel acceleratie. Dit komt door de aantrekkingskracht van de aarde. Deze is standaard $1g$ of $-1g$ afhankelijk hoe de sensor georiënteerd is.

De accelerometer wordt beïnvloed door de aantrekkingskracht van de aarde (zoals de rode lijn in figuur 3). Indien er een as recht naar de aarde wijst meet deze sensor $1g$. Indien de sensor onder een hoek van 45 graden gedraaid is, wordt de aantrekkingskracht van de aarde verdeeld op twee assen. Beide sensoren meten dan $0,707g$. Dit kan berekend worden door onderstaande formule.

$$\begin{aligned} \text{Gemeten acceleratie op een as} &= \text{Aantrekkingskracht van de aard} \times \sin \text{hoek} \\ &= 1g \times \sin 45^\circ = 0.707 \end{aligned}$$

In de formule wordt of de sinus of de cosinus gebruikt. Dit is afhankelijk van de as en de hoek.

Nadeel van de accelerometer

Indien de accelerometer verkeerde waardes meet, heeft dit grote gevolgen indien de afstand hieruit afgeleid wordt. Daardoor is er veel kritiek op accelerometers indien ze gebruikt worden om afstand te berekenen. Onderstaande tabel geeft aan wat er gebeurt indien de sensor een verkeerde acceleratie meet en wat de afwijking doorheen de tijd is.

Tijd = 1 seconden		Tijd = 5 seconden		Tijd = 60 seconden	
Acceleratie (mg)	Afwijking (m)	Acceleratie (mg)	Afwijking (m)	Acceleratie (mg)	Afwijking (m)
3	0.02943	3	0.73575	3	105.948
5	0.04905	5	1.22625	5	176.58
8	0.07848	8	1.962	8	282.528
10	0.0981	10	2.4525	10	353.16
15	0.14715	15	3.67875	15	529.74

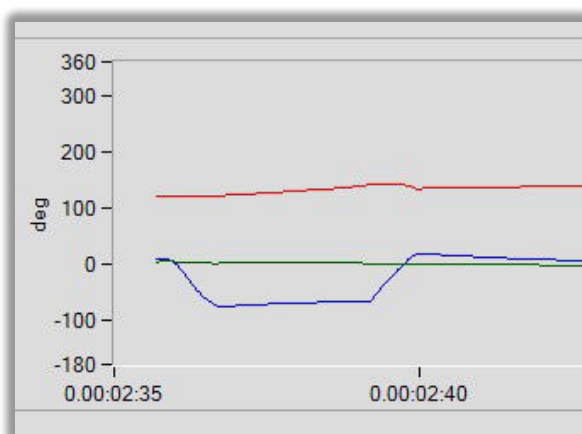
Tabel 1 Afwijkingen

Indien er een afwijking van de acceleratie is van 3mg, dan heeft deze een afwijking van 106m na 1 minuut. Hierdoor is het zeer belangrijk dat er gebruik gemaakt wordt van een goede accelerometer, samplesnelheid en ingestelde range (hetgeen in hoofdstuk 3.1.2.1 wordt uitgelegd).

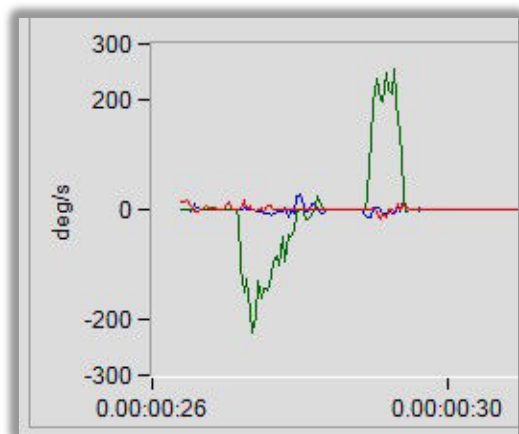
3.1.2 Gyroscop

Een gyroscop is een sensor die meet hoeveel de sensor om zijn eigen as gedraaid is ten opzichte van zijn vorige meting. Deze data is in "degree per second" (dps). Dit vertaald in makkelijke woorden: hoeveel graden is de sensor verdraaid in één seconde. Dus met welke snelheid draait de sensor om zijn eigen as? Door te weten hoelang deze snelheid aangehouden wordt, kan de hoekverdraaiing gemeten worden.

Figuur 5 is een voorbeeld van een object dat 90 graden om zijn eigen as draait en terug (groene lijn). Dit is de data die de gyroscop meet. In figuur 4 wordt deze data omgevormd naar een hoekverplaatsing (blauwe lijn).

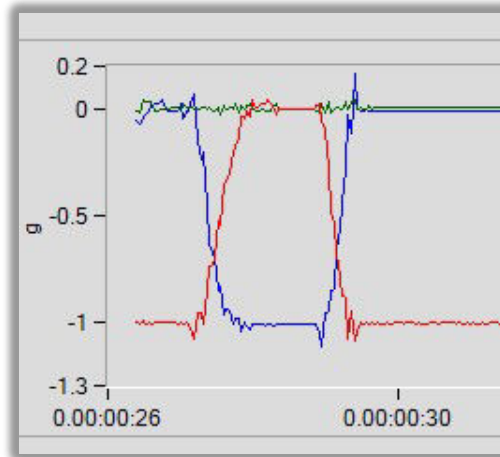


Figuur 5 Berekende hoeken



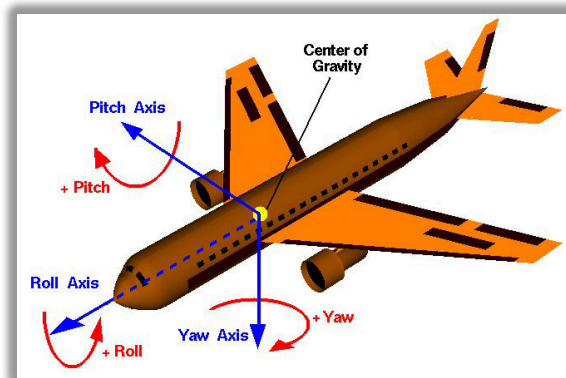
Figuur 4 Gyroscop data

Indien de developmentkit om zijn eigen as draait (afhankelijk rond welke as), zal de aantrekkingskracht van de aarde zich verdelen over meer assen van de accelerometer of volledig overgaan op een andere as. Hierdoor zal de aantrekkingskracht van de aarde zich van de Z-as (rode lijn) verdelen naar de X-as (blauwe) en Z-as en tot slot tot enkel de X-as. Bij het terugdraaien staat de volledige aantrekkingskracht van de aarde terug op de Z-as zoals in het begin.



Figuur 6 Gravity verandering op de accelerometer

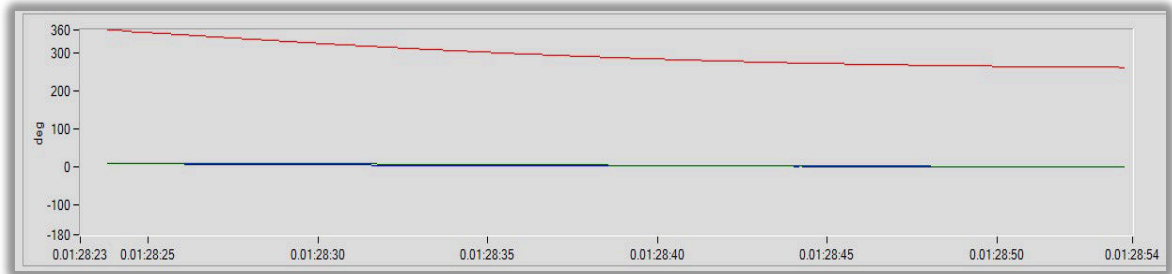
Bij een accelerometer wordt er gesproken over acceleratie op de X, Y of Z-as. Bij een gyroscoop draait men om deze as. Bij een gyroscoop wordt daarom niet gesproken over 'zoveel graden gedaaid rond de X-as, maar over de hoeken roll (X-as), pitch (Y-as) en yaw (Z-as).



Figuur 7 Roll, Pitch en Yaw

Nadeel gyroscoop

Indien de gyroscoop stilligt, treedt er drift (offset) op. De drift is wanneer de gyroscoop denkt te draaien, maar dit is niet zo. Dit is te zien in figuur 8. De sensor ligt stil, maar denkt te draaien (rode lijn). Op 30 seconden denkt de sensor dat hij ongeveer 90 graden gedraaid is.



Figuur 8 Drift bij Gyroscopen

3.1.2.1 De range

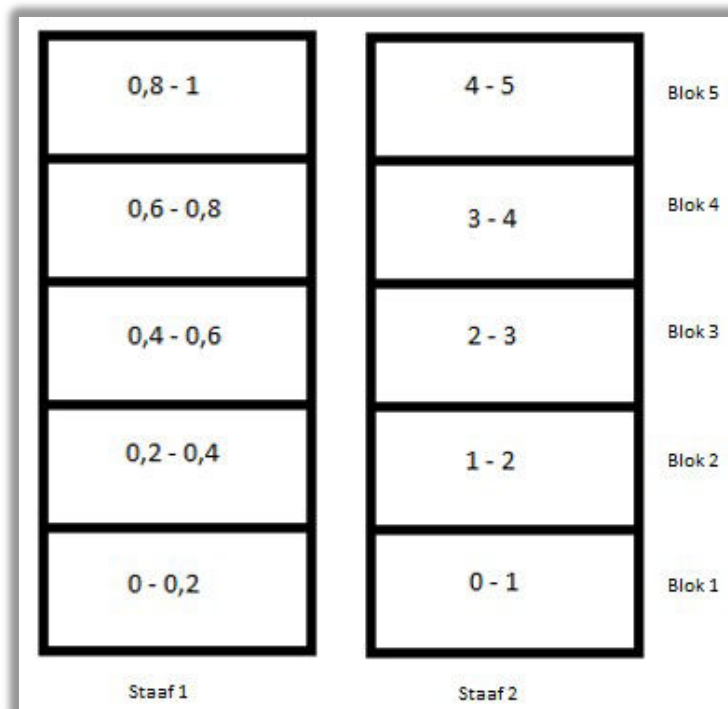
Elke sensor heeft een andere range waarin metingen gedaan kunnen worden. Of met andere woorden, ze hebben een ander bereik. Bij veel sensoren kan dit ingesteld worden met keuzes uit standaard ranges.

De lineaire accelerometer en de accelerometer moeten minstens een bereik hebben van $\pm 16g$. Dit is nodig doordat er hele hoge G-krachten ontstaan bij het openen van de parachute. De gyroscoop moet minstens een range hebben van $\pm 2000dps$ omdat de skydiver zeer snel kan roteren om zijn eigen as.

De range van de sensor moet goed afgesteld worden op de verwachte data. Indien er bijvoorbeeld een accelerometer gebruikt wordt van $\pm 2g$ en er ontstaan krachten van $3g$ op de sensor, zal de sensor maar $2g$ meten waardoor er een foutieve meting is van $1g$. Indien er een veel te grote range gekozen wordt, zullen er afwijkingen gemeten worden.

Onafhankelijk hoe groot de range gekozen wordt kan niet elke waarde van 0 tot de maximum range gemeten worden. Waardes worden altijd in een bepaalde blok gezet. We stellen ons even voor dat de totale range over vijf blokken verdeeld wordt. In figuur 9 staan twee staven met elk vijf blokken.

In de eerste staaf is een range van $0g$ tot $1g$ gekozen en de tweede staaf een range van $0g$ tot $5g$. Het bereik van elke blok kan berekend worden door de totale range te delen door het aantal blokken. Bij de eerste staaf zijn de blokken dus $0,2g$ groot en bij de tweede staaf hebben ze een grootte van $1g$.



Figuur 9 Voorstelling bereik

Stel, er is een acceleratie van 0,65g. Bij de eerste staaf valt deze in het gebied (blok) van 0,6 - 0,8 waardoor de sensor 0,7g meet (gemiddelde van de blok). In de tweede staaf zou de acceleratie van 0,65g in het gebied vallen van 0 – 1 waardoor de sensor een acceleratie meet van 0,5g (gemiddelde van deze blok).

Bij de eerste staaf is er dus een foute meting van 0,05g en in de tweede staaf 0,15g. Hierdoor is het belangrijk dat de juiste maximum range gekozen wordt. Deze range moet gekozen worden afhankelijk van de waardes die in werkelijk voorkomen. Bij sensoren kan niet zomaar elke range ingesteld worden en zijn er voorgeprogrammeerde ranges waardoor er gekozen moet worden welke standaard range nodig is. De ranges van een accelerometer zijn standaard: $\pm 2g$, 4g, 8g, 16g,... en bij een gyroscoop: $\pm 125dps$, 250dps, 500dps, 1000dps, 2000dps,... Natuurlijk zijn er sensoren die afwijken op deze standaard.

3.2 Gebruikte hardware

3.2.1 Type sensoren

Er is gekozen om verder te werken met een accelerometer, lineaire accelerometer en een gyroscoop. Doordat van alle drie de soorten sensoren veel verschillende types zijn is een lijst opgesteld van de verschillende sensoren die in aanmerking kunnen komen. De volledige lijst van de onderzochte sensoren bevindt zich in bijlage 1.

Van deze sensoren is een lijst samengesteld waar de volgende aspecten een onderdeel in spelen: merk, type, range, offset, aantal samples, stroomverbruik en prijs. Met als voornaamste parameters de range, offset en aantal samples. Bijlage 1 is de volledige lijst opgedeeld per soort sensor (accelerometer, lineaire accelerometer of gyroscoop). De sensoren die aangeduid zijn in het groen zijn de gekozen sensoren.

Doordat het onderzoek heel breed wordt genomen is ervoor gekozen om voor elke sensor minstens twee types te gebruiken. In dit geval twee lineaire accelerometers, twee accelerometers en drie gyroscopen. Hiervoor zijn vier sensoren gebruikt. LIS331HH en LSM6DS0 van ST, BMI160 van Bosch en de ICM-20601 van Invensense. Tabel 2 geeft info over het type sensoren. In de volgende punten wordt er dieper op de specificaties ingegaan.

Type	Sensoren	Merk	Reden
LIS331HH [1]	Lineaire accelerometer	ST	Laag stroomverbruik en een hoge range van G-waardes
LSM6DS0 [2]	Lineaire accelerometer & Gyroscoop	ST	Staat op het MULTI-SENSOR Board waardoor code (firmware) beschikbaar is.
BMI160 Bosch [3]	Accelerometer & Gyroscoop	Bosch sensortech	Laag stroomverbruik. Kleine offset. Grote keuze uit aantal samples
ICM-20601 [4]	Accelerometer & Gyroscoop	Invensense	Wordt voorgesteld als high speed motion analysis en kan hele hoge sample rate aan (4000-8000Hz)

Tabel 2 keuze sensoren

3.2.1.1 LIS331HH

Type:	lis331hh	
Merk:	ST	
Lineaire accelerometer:	Range:	±6/12/24g
	Sensitivity:	±24g → 12mg/digit 220µg/VHz
	Offset:	±6g → ±70mg
Stroomverbruik:	250µA	
Samples:	50/100/400/1000Hz	
Prijs:	€5,36	
Keuze:	Lage stroom Hogere G-waardes	
Link:	http://be.farnell.com/stmicroelectronics/lis331hh/accelerometer-mems-3axis-16lga/dp/1838525?mckv=sfsjCZnTU_dc pcrid 175432093837 keyword lis331hh match e plid &CMP=KNC-GBE-GEN-SKU-MDC&gclid=CjwKEAiAz4XFBRCW87vj6-28uFMSJAAHeGZbmCp1mu7vbpYRpkrmM8M-n7XFigajTNh4dp_YJgZLyRoCUPvw_wcB	

Tabel 3 Sensor LIS311HH

3.2.1.2 LSM6DS0

Type:	LSM6DS0	
Merk:	ST	
Accelerometer:	Range:	±2/4/8/16g
	Sensitivity:	±16g → 0.732mg/LSB
	Offset:	±8g → ±90mg
Gyroscoop:	Range:	±245/500/2000dps
	Sensitivity:	±2000dps → 70mdps/LSB
	Offset:	±2000dps → ±30dps
Stroomverbruik:	4mA	
Samples:	14.9/59.5/119/238/476/952Hz	
Prijs:	€7,35	
Keuze:	Door de reeds werkende code van de IKS01A1 sensor shield (I ² C code, in het onderzoek wordt SPI gebruikt) Grote keuze uit samples	
Link:	http://www.farnell.com/datasheets/1878202.pdf?_ga=1.12959287.1654968829.1424168254	

Tabel 4 Sensor LSM6DS0

3.2.1.3 BMI160

Type:	BMI160	
Merk:	Bosch sensortec	
Accelerometer:	Range:	±2/4/8/16g
	Sensitivity:	±16g → 2048LSB/g
	Offset:	±40mg
Gyroscoop:	Range:	±125/250/500/1000/2000dps
	Sensitivity:	±2000dps → 16.4 LSB/dps 180µg/VHz
	Offset:	±10dps
Stroomverbruik:	950µA	
Samples:	1600Hz ... 25/32Hz	
Prijs:	€5,03	
Keuze:	Laag stroomverbruik Kleine offset Grote keuze uit samples	
Link:	https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmi160/	

Tabel 5 Sensor BMI160

3.2.1.4 ICM-20601

Type:	ICM-20601 (High speed motion analysis)	
Merk:	Invensense	
Accelerometer	Range:	±4/8/16/32g
	Sensitivity:	2,048LSB/g - 1,024LSB/g
	Offset:	±60mg
Gyroscoop:	Range:	±500/1000/2000/4000dps
	Sensitivity:	16.4LBS/dps - 8.2LBS/dps
	Offset:	±5dps
Stroomverbruik:	390µA + 2.6mA = 3mA (accelerometer + gyroscoop)	
Samples:	10/100/500/4000Hz → Accelerometer 10/100/500/8000Hz → Gyroscoop	
Prijs:	€9,72	
Keuze:	Wordt voorgesteld als high speed motion analysis Zeer hoge sample rate ter beschikking	
Links:	http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/12/DS-000191-ICM-20601-v1.0.pdf https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/ http://www.digikey.be/product-detail/en/invensense/ICM-20601/1428-1058-1-ND/5872873	

Tabel 6 Sensor ICM-20601

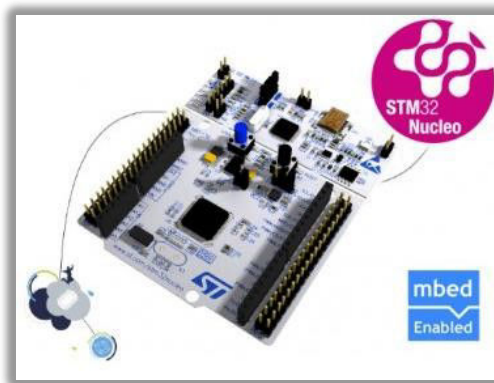
3.2.2 Keuze processor

Het bedrijf heeft een voorkeur voor de STM32 van ST omdat deze processor in de volgende generatie Vigil gebruikt gaat worden.

Doordat er een NUCLEO-L476RG [5], een STM32 development board van ST en een multi-sensor board [6](X-NUCLEO-IKS01A1 van ST) ter beschikking waren, kon hiermee reeds getest worden. Op het multi-sensor board zitten zowel accelerometers als gyroscopen.

De NUCLEO-L476RG heeft als groot voordeel dat deze onder de categorie valt van “Ultra-low-power”. Tijdens het onderzoek is dit nog niet van groot belang. Maar wanneer een STM32 gebruikt wordt in een Vigil is het de bedoeling dat deze een laag stroomverbruik heeft. De batterij van een Vigil gaat op het moment 10 jaar mee, het is de bedoeling dat dit ook zo blijft ongeacht er een nieuwe processor gebruikt wordt.

Daarom is er gekozen voor de NUCLEO-F411RE [7] die onder de categorie valt van “High-performance”. De beschikbaarheid van vijf SPI-bussen en één SDIO-interface heeft ook een rol gespeeld in de keuze van deze processor.



Figuur 10 NUCLEO-F411RE

SDIO-interface

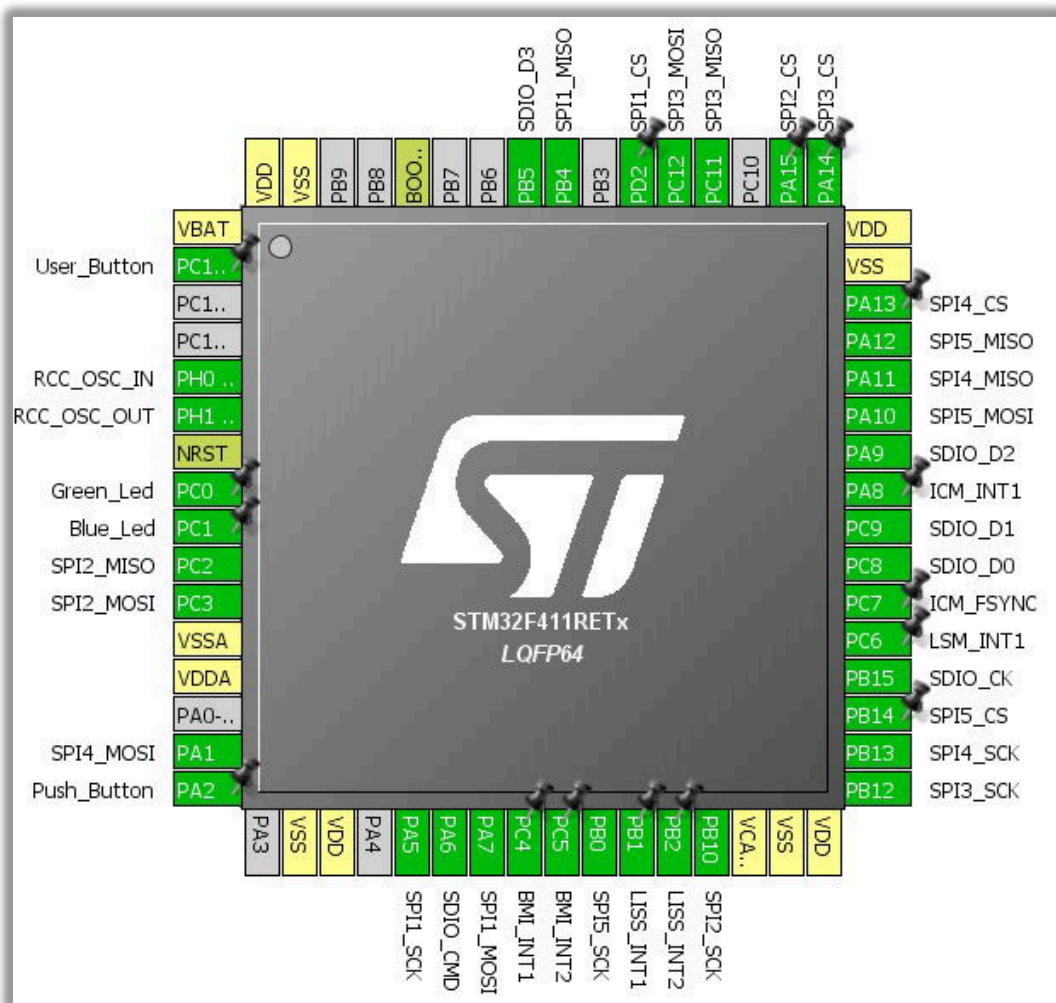
Een SDIO interface is een interface speciaal ontworpen voor het schrijven en lezen van SD-cards. Hier wordt nog eens een onderscheid gemaakt tussen 1-bit en 4-bit. De 4-bit interface is sneller dan de 1-bit interface, maar niet alle SD-cards kunnen dit aan. De 4-bit SDIO is sneller dan SPI, namelijk 50MHz tegenover 40MHz. Vandaar is de SDIO-interface handig bij dit onderzoek zodat de data zeer snel weggeschreven kan worden naar de SD-card.

De SD-card, of in dit project een micro-SD-card wordt dus gekoppeld aan de SDIO-interface. Iedere sensor wordt aan een afzonderlijke SPI-bus geconnecteerd zodat de sensoren sneller uitgelezen kunnen worden. Hierdoor blijft er nog één extra SPI-bus over die via een andere micro-SD-cardconnector ook aan een micro SD-card gekoppeld wordt. Dit heeft als nut dat er in een latere fase een keuze is tussen SDIO en SPI indien er een andere processor gebruikt wordt zonder SDIO-interface. De sensoren zelf kunnen ook op dezelfde SPI-bus gezet worden, maar doordat er voldoende SPI-bussen zijn, worden ze ook gebruikt.

3.3 Ontworpen hardware

Van de vier sensoren en twee micro-SD-cardconnectoren is een “printed circuit board” (PCB) ontworpen. Deze PCB gaat als shield dienen op de NUCLEO-F411RE. Door alle nodige SPI-bussen en GPIO-pinnen te connecteren met behulp van het programma STM32CubeMx, is er 100% zekerheid dat de processor voldoende I/O's heeft voor deze shield. Meer informatie over STM32CubeMx staat in hoofdstuk 4.2. Deze test is niet alleen nuttig voor de controle van de pinnen, maar zo zijn alle pinnen ook al ingesteld voor het elektrische schema en later voor de firmware.

Figuur 11 geeft weer welke I/O's worden gebruikt en wat hun bijhorende functie is. Meer informatie over de processor zoals kloksnelheid, I/O's,... staat in bijlage 2.

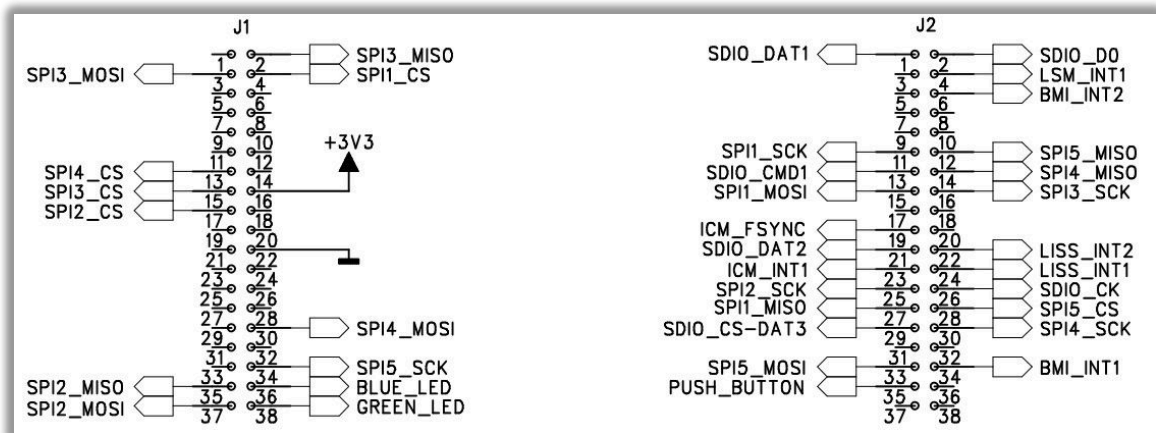


Figuur 11 Ingestelde I/O's op de processor

'SPI3_CS' en 'SPI4_CS' zijn op bovenstaande figuur en op de shield aan PA14 en PA13 bevestigd, maar in de firmware zijn deze aan PA0 en PA3 geconnecteerd (met jumpers op de shield). Dit is zo gekozen omdat PA13 en PA14 op de processor niet werken. Of dit een fout is in de processor zelf of in de code generator is onbekend.

3.3.1 Elektrisch schema

De I/O's zijn vastgelegd. Onderstaande tekening geeft weer welke I/O's geconnecteerd zijn op de headers van de NUCLEO-F411RE.

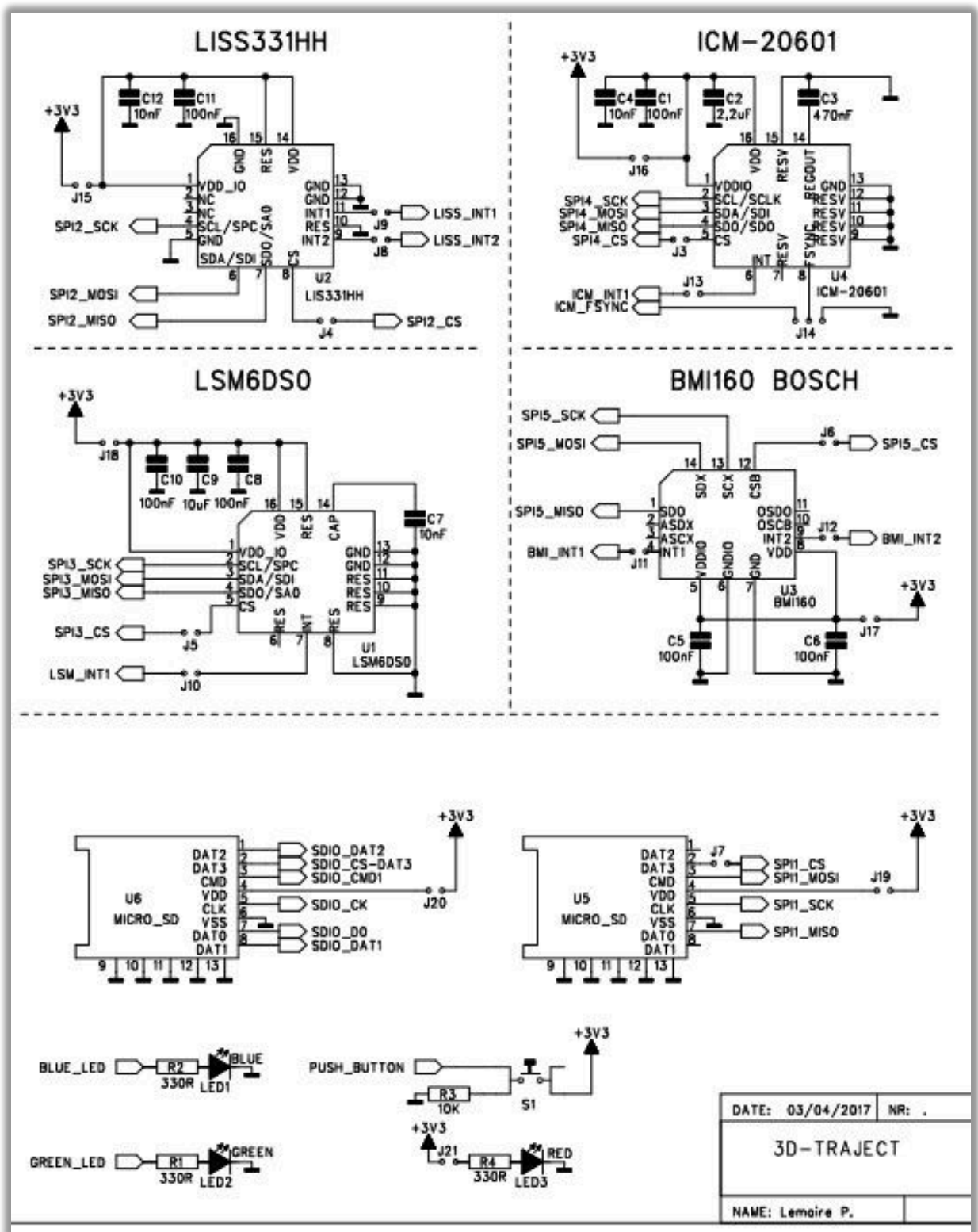


Figuur 12 Elektrisch schema, headers NUCLEO

Verder zijn de vier sensoren met de nodige componenten, de twee micro-SD-cardconnectoren, leds en drukknop uitgetekend. De micro-SD-cardconnector die geconnecteerd wordt op de SDIO is als een 4-bit SDIO geconnecteerd. Indien een 1-bit interface gebruikt wordt, is dit geen enkel probleem.

De PCB is voorzien van veel jumpers, deze dienen om signalen makkelijk te meten, sensoren uit te schakelen, connecties aan te passen,...

Onderstaande figuur is het elektrisch schema van de sensoren met de nodige componenten, micro-SD-cardconnectoren, leds en de drukknop. De headers zelf die op de print staan, werden in figuur 12 gezet.



Figuur 13 Elektrisch schema (zonder headers)

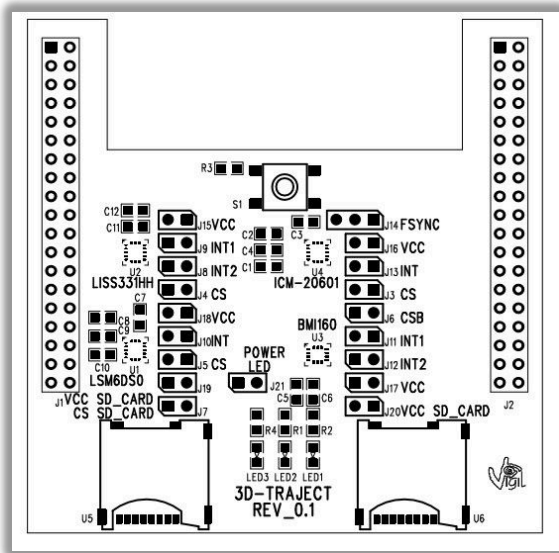
3.3.2 Ontworpen PCB: “3D-traject shield”

De ontworpen PCB met de sensoren en twee micro-SD-cardconnectoren is ontworpen met Pads.

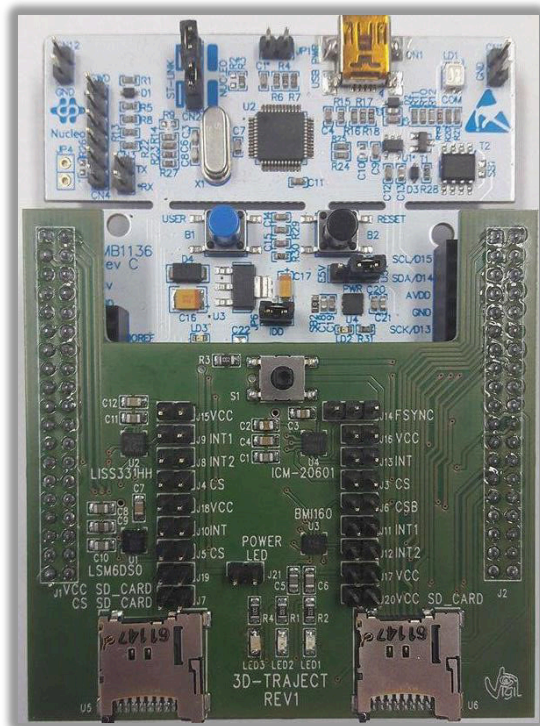
Doordat er zich tussen de twee headers van de NUCLEO-F411RE drukknoppen bevinden, kan er geen rechthoekige print ontworpen worden. Hierdoor zouden de knoppen overdekt geraken waardoor deze niet meer ingedrukt kunnen worden. Bij het multi-sensor board van ST is om deze reden een inham voorzien. Vandaar is er gekozen om de vorm en maten van het multi-sensor board over te nemen voor de eigen shield.

De ontworpen print heeft twee lagen waaraan alle componenten aan de bovenzijde worden bevestigd. Figuur 14 is de bestuikte PCB en figuur 15 is een foto van de shield in werkelijkheid. De PCB heeft een grootte van 70x70mm.

Van de ontworpen PCB zijn er drie volledig afgewerkt.



Figuur 14 Bestuikte PCB



Figuur 15 Foto PCB en Nucleo-F411RE

4 Gebruikte software

Doorheen het onderzoek is er gebruikt gemaakt van diverse programma's. MBED, STM32CubeMX en IAR voor het schrijven van de Firmware. Excel, Rstudio en Labview communications zijn gebruikt voor de software te schrijven om de data van de sensoren om te vormen naar snelheid, afstand en filteringen toe te passen.

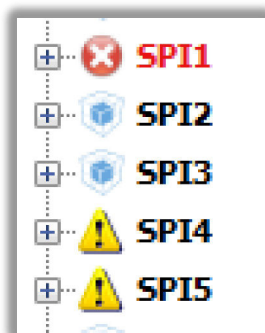
4.1 MBED

MBED is een online compiler meer zeer veel beschikbare libraries. Dit kan vergeleken worden met de compiler van Arduino. MBED ondersteunt veel meer verschillende development boards en heeft meer mogelijkheden. Hierdoor is de MBED compiler professioneler dan de Arduino compiler. MBED kan dan wel professioneler zijn dan de Arduino compiler maar deze compiler beschikt net zoals de Arduino compiler niet over een debugger waardoor debuggen moeilijk is en heel erg onprofessioneel. Debuggen moet dus met printf gedaan worden. Voor bedrijven is dit niet snel en ook niet altijd correct waardoor deze compilers dus bijna nooit gebruikt worden.

Op de website van MBED bevindt zich zeer veel documentatie over de ondersteunde development kits en boards waardoor MBED interessant wordt voor een startend project. Wanneer er toch een debugger of speciale toepassingen nodig zijn die MBED niet ondersteund, kan het programma geëxporteerd worden naar zeer professionele compilers zoals IAR, Keil, Eclipse,... Nadeel van deze export functie is dat deze niet altijd werkt. MBED is een online compiler waardoor soms toepassingen niet werken door problemen bij MBED zelf.

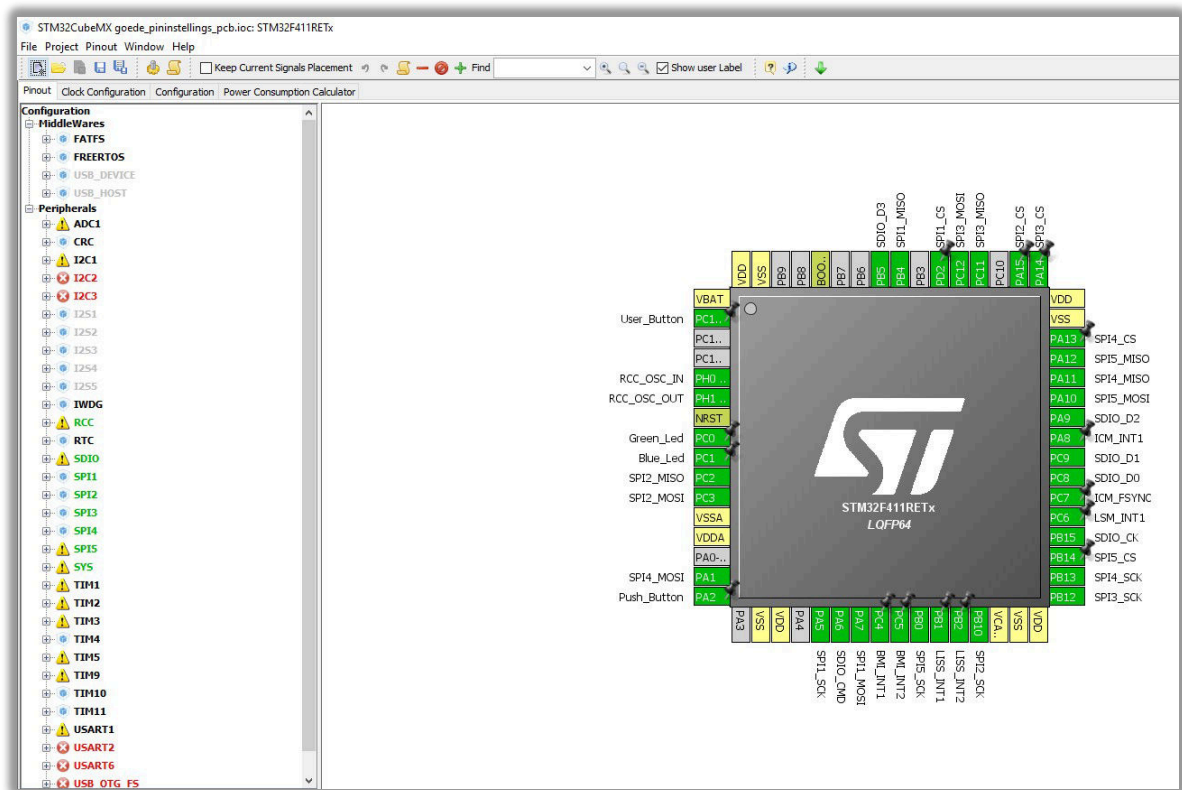
4.2 STM32CubeMx

STM32CubeMx is speciaal ontworpen om ontwikkelaars het programmeren te vereenvoudigen. Via deze weg kan de tijd die nodig is voor het instellen van pinnen en interfaces via een grafische manier gebeuren. Een ander groot voordeel is dat STM32CubeMx rekening houdt met alles wat er ingesteld wordt. Bij sommige instellingen kan er bijvoorbeeld geen gebruik meer gemaakt worden van SPI1 of worden er warnings gegeven indien niet alle instellingen van bijvoorbeeld SPI4 en SPI5 kunnen worden gebruikt. Hierdoor ziet de programmeur direct als er bepaalde instellingen niet werken en hoeft de programmeur de speciale toepassingen van de processor niet van buiten te leren of achteraf te onderzoeken waarom een bepaalde functie in het programma niet werkt. Dit weet STM32CubeMx en geeft het ook aan, te zien in figuur 16.



Figuur 16 Errors/warnings STM32CubeMx

Een beeld van hoe de ontwikkelingsomgeving van STM32CubeMX eruit ziet wordt weergegeven in figuur 17. Nadat alles ingesteld is, worden de mappen en code gegenereerd. Meer informatie over de ingestelde waarden zoals clocksnelheid, ... bevindt zich in bijlage 2.



Figuur 17 Ontwikkelingsomgeving STM32CubeMx

4.3 IAR compiler

De gegenereerde code van STM32CubeMx kan hierna in andere ontwikkelingsomgevingen geïmporteerd en verder bewerkt worden. In dit geval IAR.

IAR is een stuk professioneler dan MBED doordat deze beschikt over een debugger. IAR is gratis tot en met 32kbytes. Wordt dit overschreden, dan moet er een licentie gekocht worden. Het voordeel dat ik hierin zie is dat IAR bekend is en zeer professioneel, vandaar de kostprijs. Onnodige libraries moeten eruit gehaald worden zodat het programma de 32kbytes niet overschrijdt. De compiler van MBED en Arduino zijn gratis maar hebben beperkingen waardoor ze niet professioneel zijn. De bedoeling bij IAR is dat er geen onnodige zaken in het programma gezet worden.

4.4 Rstudio

Rstudio is een platform om software te schrijven in de taal R. Rstudio wordt voornamelijk gebruikt voor het analyseren van data, zoals machine learning.

4.5 Labview communications

Labview is een ontwikkelingsomgeving voor het creëren van toepassingen die interactie hebben met de real-world. Het unieke aan Labview is dat het niet werkt zoals de meeste software pakketten waar men de code in regels schrijft zoals in C,C++,R,... In Labview programmeer je aan de hand van blokjes. Elk blokje heeft zijn eigen functionaliteiten, via draden kunnen er verbindingen tot stand komen.

Zo kunnen er makkelijk en snel ingewikkelde toepassingen ontworpen worden. Het goede aan Labview is dat de achterliggende code niet altijd begrepen hoeft te worden en er in een korte tijd een grafische interface is opgebouwd, terwijl dit in andere ontwikkelingsomgevingen veel tijd en ervaring vereist.

5 Firmware

Hier wordt in het kort uitgelegd hoe elke firmware is opgebouwd voor de verschillende shields.

5.1 MULTI-SENSOR BOARD (MBED)

Vooraleer de PCB afgewerkt was, is het multi-sensor board van ST gebruikt voor het onderzoek. De firmware hiervan is geschreven in de compiler van MBED. De keuze voor dit platform is gekomen doordat er een library bestaat van alle sensoren op de shield. Hierdoor kon er zeer snel getest worden. In hetzelfde programma is een opstelling gemaakt zodat data direct opgeslagen wordt naar een SD-card. Zo kan er getest worden en data opgeslagen worden zonder er een verbinding met een computer nodig is. Via de micro SD-card kan de data makkelijk overgezet worden.

De firmware is als volgt opgebouwd:

- Initialiseren van de sensoren.
- Openen of aanmaken van een csv-file en het wegschrijven van een controlelijn.
- Data van de sensoren lezen en deze per sample (Tijd, AccX, AccY, AccZ, GyroX, GyroY, GyroZ) wegschrijven in de csv-file.

Buiten de bovenstaande puntjes zitten in het programma enkele controles zoals: is de SD-card aanwezig? Als de controles geslaagd zijn of het programma afgelopen is wordt dit met leds aangeduid.

5.2 Ontworpen print (IAR)

Zoals eerder uitgelegd is er voor IAR gebruikt gemaakt van STM32CubeMx voor de I/O's in te stellen, waardoor tijd bespaard wordt.

In IAR is hetzelfde gebeurd voor de PCB als in MBED voor het multi-sensor board. Het verschil is dat er in IAR op een professionelere manier gewerkt is en er geen gebruik is gemaakt van libraries om de sensoren aan te spreken. Aan de hand van het schrijven van registers en uiteindelijk ook te lezen kan de data van de accelerometers en gyroscopen uitgelezen worden en hierna via SDIO weggeschreven worden op de micro-SD-card.

De laatste firmware versie is geschreven voor de test jumps uit een vliegtuig. Volgende punten leggen uit hoe deze werkt.

- Initialisatie van de sensoren.
- Openen van de csv file.
- Lezen van alle sensoren en direct wegschrijven in de csv file (dit zolang de schakelaar ingedrukt blijft).
- Sluiten van de csv file.

Het voorlaatste punt zit in een loop. Bij de start van het programma wordt een csv file geopend. Het programma is zo geschreven dat de data opgeslagen wordt in de csv file zolang de schakelaar is ingeschakeld. Wanneer deze wordt uitgezet stopt het loggen. Dit kan in totaal vijf keer gebeuren. Indien de schakelaar opnieuw ingedrukt wordt zal de data in hetzelfde csv bestand opgeslagen worden. Vooraleer de nieuwe data opgeslagen wordt zal er een initialisatie regel geüpload worden. Hierdoor is het duidelijk welke data bij elkaar hoort. Na het opslaan van vijf sprongen wordt de csv file afgesloten.

6 Software positie bepalingen

Doorheen het onderzoek is er gewerkt met drie programma's om de positie te bepalen. Excel, RStudio en Labview communications. Hier wordt uitgelegd waarom elk programma gebruikt wordt met de voor- en nadelen van de verschillende programma's en geschreven software.

6.1 Excel

6.1.1 Accelerometer

Bij de start van het onderzoek werd de ruwe data verwerkt in Excel. Door de ruwe data twee maal te integreren en van deze waardes steeds de som te nemen, kan de afstand berekend worden. Zoals eerder vermeld is de nauwkeurigheid van de accelerometer zeer belangrijk om de afstand te meten. Want 1mg fout meten heeft enorme gevolgen.

De volgende punten betreft het stappenplan over hoe de positie bepaling onderzocht is. Er is eerst gestart met één as. De positie berekenen van meerdere assen is precies hetzelfde.

Bij elke test worden twee grafieken weergegeven. De eerste grafiek (bovenste) is de data die uit de accelerometer komt in mg en de tweede grafiek (onderste) is de berekende afstand in meter. De grafieken zijn boven elkaar gezet zodat er makkelijk kan onderzocht worden welke ruwe data de afstand doet veranderen.

De tijd die gebruikt is voor de data te meten is standaard 10 seconden. Dit zal in de praktijk ongeveer 1880 samples zijn.

Onderstaande testen zijn gebeurd met de LSM6DS0 van het multi-sensor board. De ingestelde ranges van de sensor zijn $\pm 4g$ en $\pm 2000dps$.

In de volgende testcases wordt er gewerkt met 2 punten, namelijk A en B, de afstand tussen A en B is 0,6m.

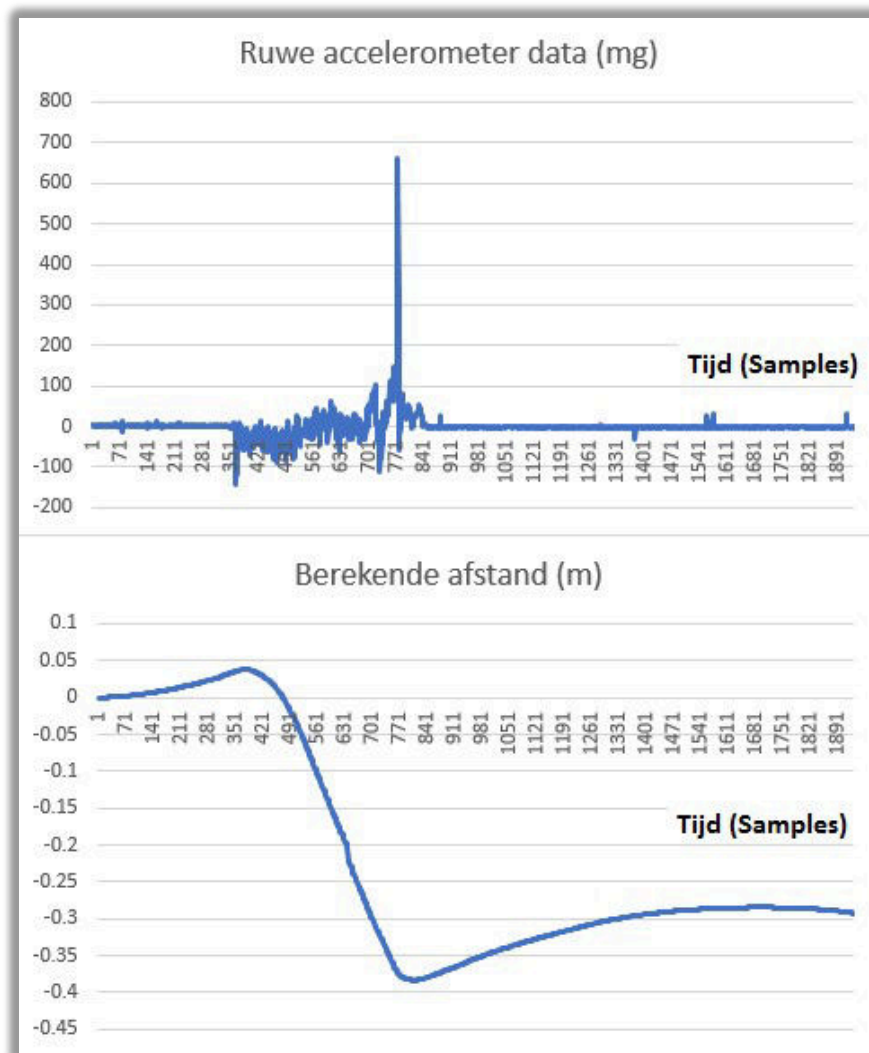
6.1.1.1 Test A1: Van punt A naar B

De eerste test is een meting van 10 seconden waarbij de sensor van punt A naar B gaat.

Vanaf sample 351 is de verplaatsing gestart. De afstand was bij deze sample al ongeveer 0,05m. Bij sample 841 is de verplaatsing gestopt. De afstand hier is -0,4m, dus de gemeten afstand bedraagt 0,45m, wat in de praktijk eigenlijk 0,6m is.

Als er geen beweging is denkt de sensor toch dat hij verplaatst. Dit komt door de offset die constant aanwezig is.

Conclusie: er is een grote afwijking op de afstand. Want na de beweging is de berekende afstand -0,4m en na de totale meting van 10 seconden is de afstand -0,3m.



Figuur 18 Test A1: Van punt A naar B

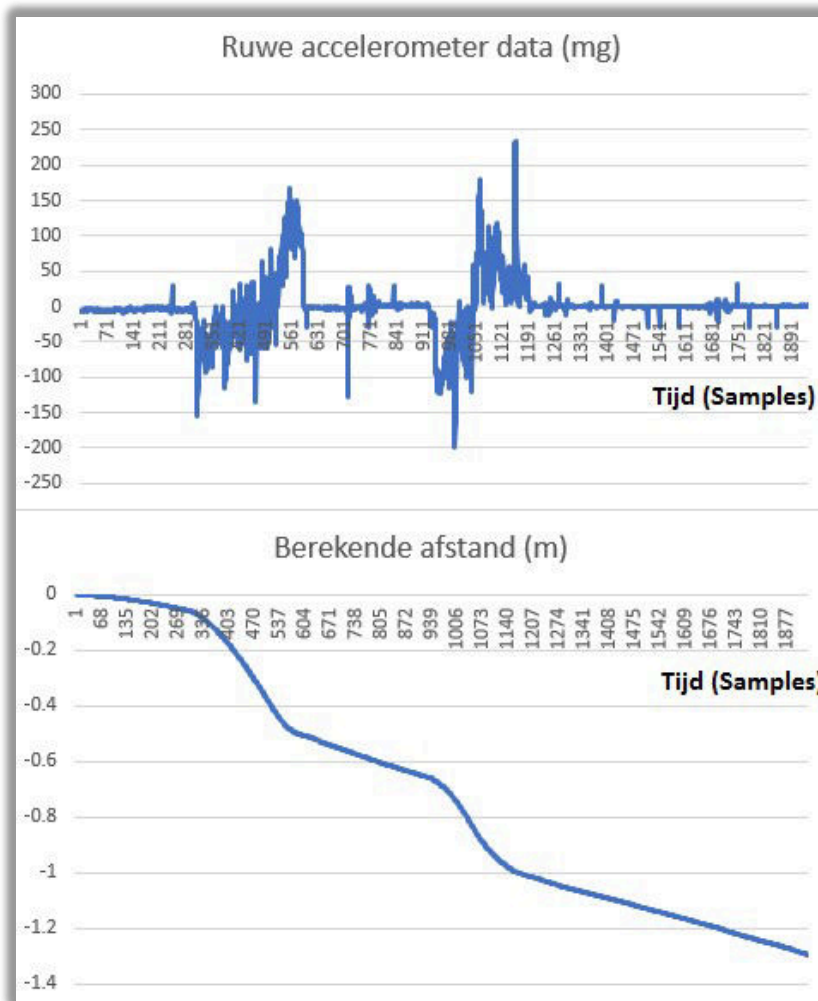
6.1.1.2 Test A2: Van A naar B met tussenstop

Test A1 is herhaald maar in de helft (0,3m) is er een tussenstop gemaakt.

De dubbele verplaatsing is zowel op de eerste als de tweede grafiek te zien.

De sensor staat op drie momenten stil. In het begin, in het midden en op het einde en toch verplaatst de sensor zich in de negatieve richting. De offset is dit keer dus negatief.

Conclusie: bij deze test is de afwijking ook duidelijk te zien. De tussenstop die normaal op 0,3m ligt is in de grafiek op 0,5m. Het einde van de totale meting (10 seconden) ligt op 1,3m in plaats van 0,6m.



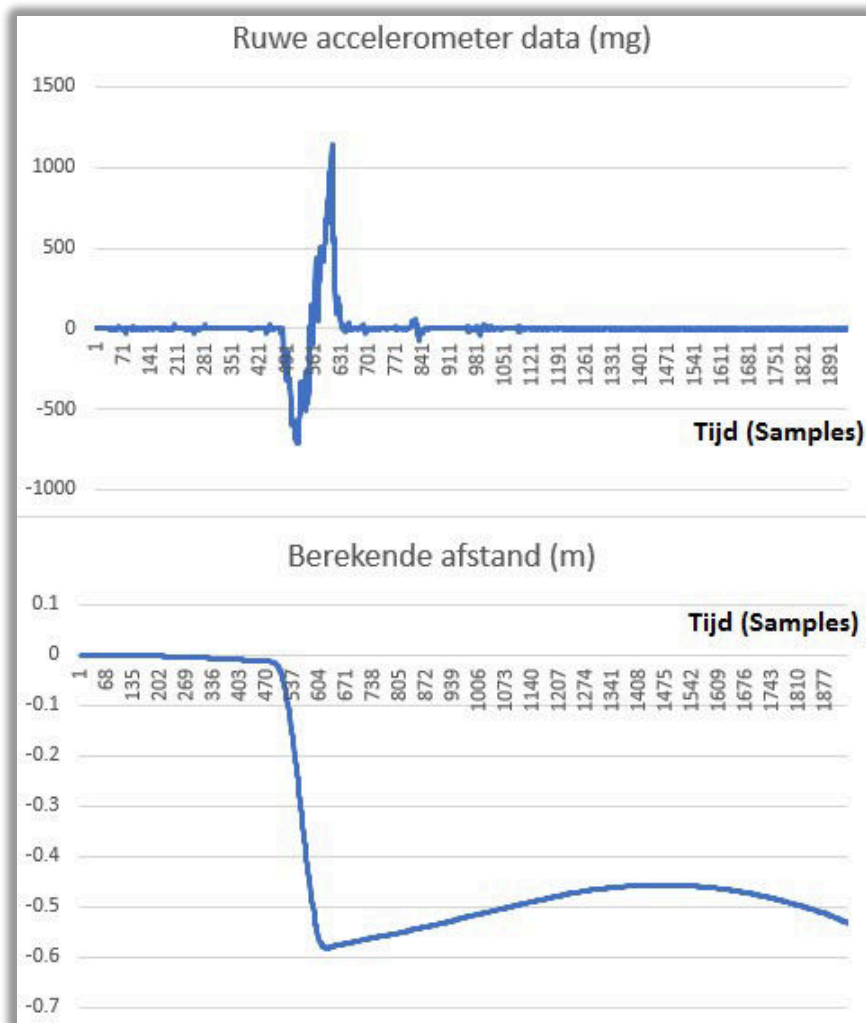
Figuur 19 Test A2: Van punt A naar B tussenstop

6.1.1.3 Test A3: Van A naar B met hogere snelheid

Test A1 is herhaald maar de snelheid van punt A naar B is sneller. Hierdoor is het makkelijker om de snelheid met de zelfde versnelling te laten versnellen waardoor de ruwe data mooier is.

In de tweede grafiek vallen twee dingen direct op. Vanaf de verplaatsing tot het einde van de verplaatsing is de berekende afstand 0,6m. Dit is dus goed. Maar, ook is duidelijk te zien dat voor de sensor effectief verplaatst, de berekende afstand rond de 0m blijft. De offset is dus zo goed als nul. Na de verplaatsing is er wel een offset waardoor de berekende afstand niet op 0,6m blijft.

Conclusie: de hogere snelheid geeft mooiere ruwe data. De verplaatsing van 0,6m is duidelijk te zien.



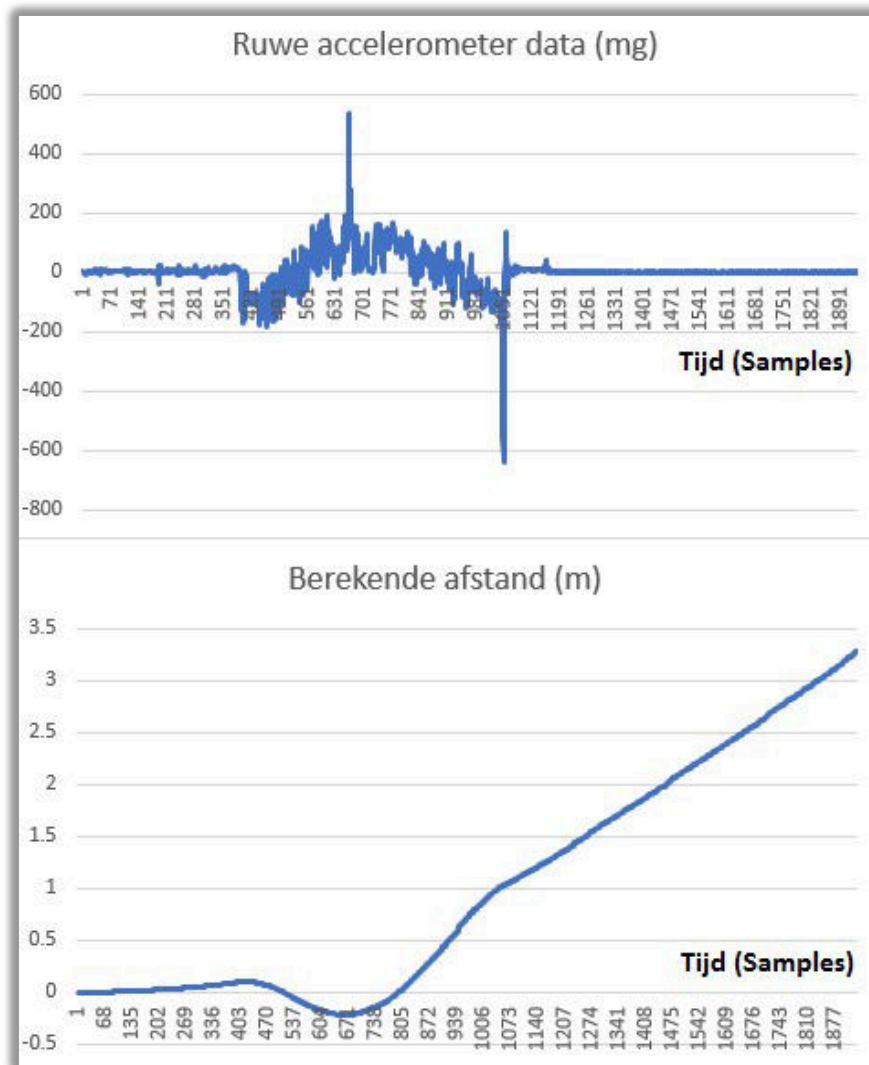
Figuur 20 Test A3: Van A naar B met hogere snelheid

6.1.1.4 Test A4: Van punt A naar B en terug

Bij deze test is er van punt A naar B gegaan en direct terug. Doordat er direct terug gegaan is van B naar A zijn er geen twee pieken te zien bij de ruwe data. De positieve ruwe data is het afremmen en het terugkeren.

Er is duidelijk te zien dat de afstand oploopt en erna terug afloopt. De accelerometer meet duidelijk dat er terug van punt B naar A is gegaan. Maar het eindpunt ligt niet op 0m dus er zijn nog steeds afwijkingen. De offset is dit keer heel groot want na 10 seconden denkt de sensor 3,3m verplaatst te zijn.

Conclusie: de accelerometer meet het verschil tussen positieve afstanden en negatieve afstanden.



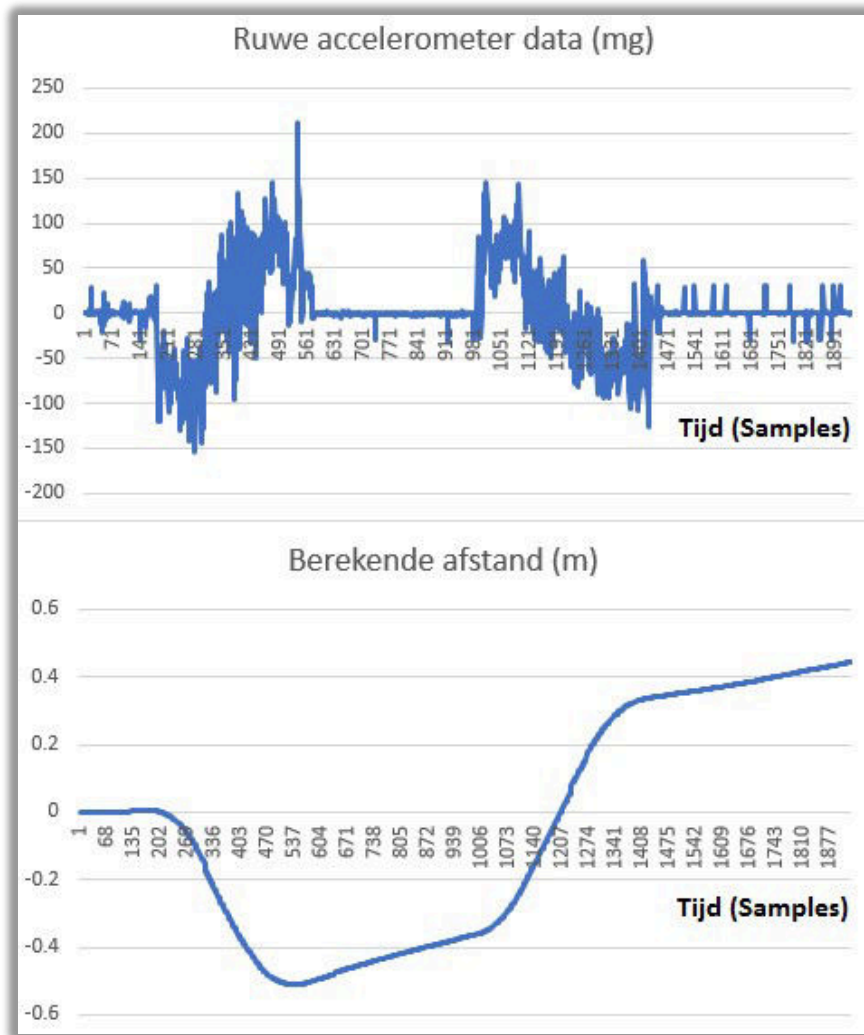
Figuur 21 Test A4: Van punt A naar B en terug

6.1.1.5 Test A5: Van punt A naar B en terug met tussenstop

Test A4 is hier herhaald maar er is een tussenpauze bij punt B geweest waardoor er twee pieken te zien zijn bij de ruwe data.

Ook al stond de accelerometer stil bij punt B toch bleef de afstand niet gelijk.

Conclusie: de accelerometer meet duidelijk het verschil tussen een positieve en een negatieve versnelling.

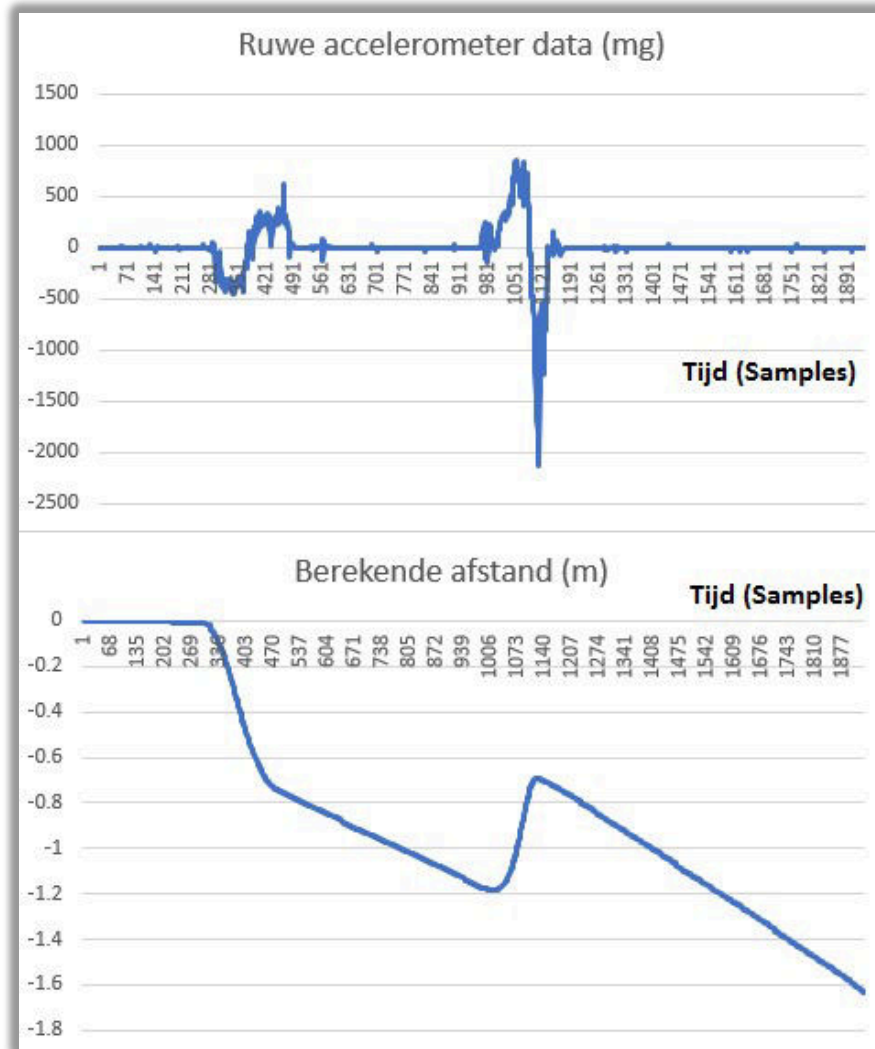


Figuur 22 Test A5: Van punt A naar B en terug met tussenstop

6.1.1.6 Test A6: Van punt A naar B met hogere snelheid

Test A4 is hier opnieuw herhaald maar de snelheid is hoger. Die pieken van de ruwe data zijn duidelijker te zien.

Conclusie: geen extra toevoeging op de berekende afstand.

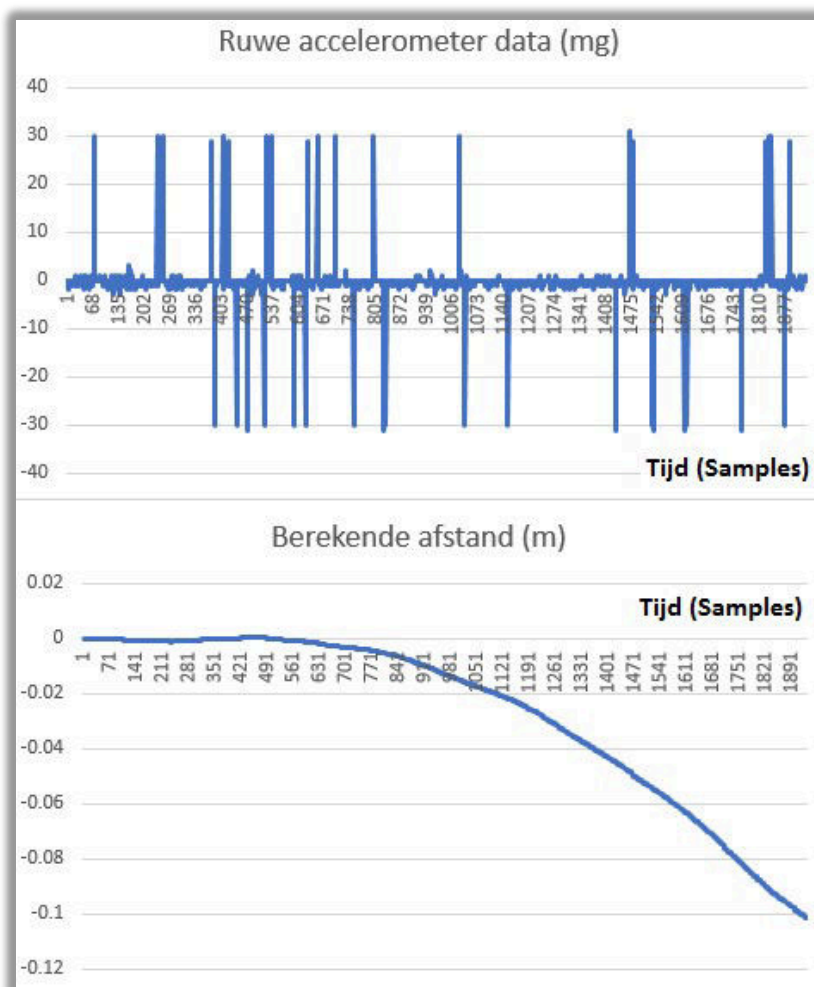


Figuur 23 Test A6: Van punt A naar B met hogere snelheid

6.1.1.7 Test A7: 10 seconden niets doen.

Bij deze test is er onderzocht wat de sensor doet indien deze niet beweegt. Bij de ruwe data is te zien dat de waardes niet op 0mg blijven. Om de zoveel tijd is er een piek van 30mg of -30mg. Maar tussen deze pieken bevindt zich ook een kleine offset. Na 10 seconden is de afwijking 0,1m. Deze afstand is afhankelijk van de offset die niet constant (bij elke testopstelling/meting) hetzelfde is. Ook de offset tijdens dezelfde meting is niet constant waardoor er niet zomaar één waarde kan gecorrigeerd worden.

Conclusie: indien de sensor niet beweegt verandert de afstand nog aanzienlijk. Dit komt door afwijkingen van de sensor, door een offset of doordat de sensor toch niet helemaal waterpas ligt waardoor de aantrekkingskracht van de aarde meespeelt (een soort extra offset).



Figuur 24 Test A7: 10 seconden niets doen

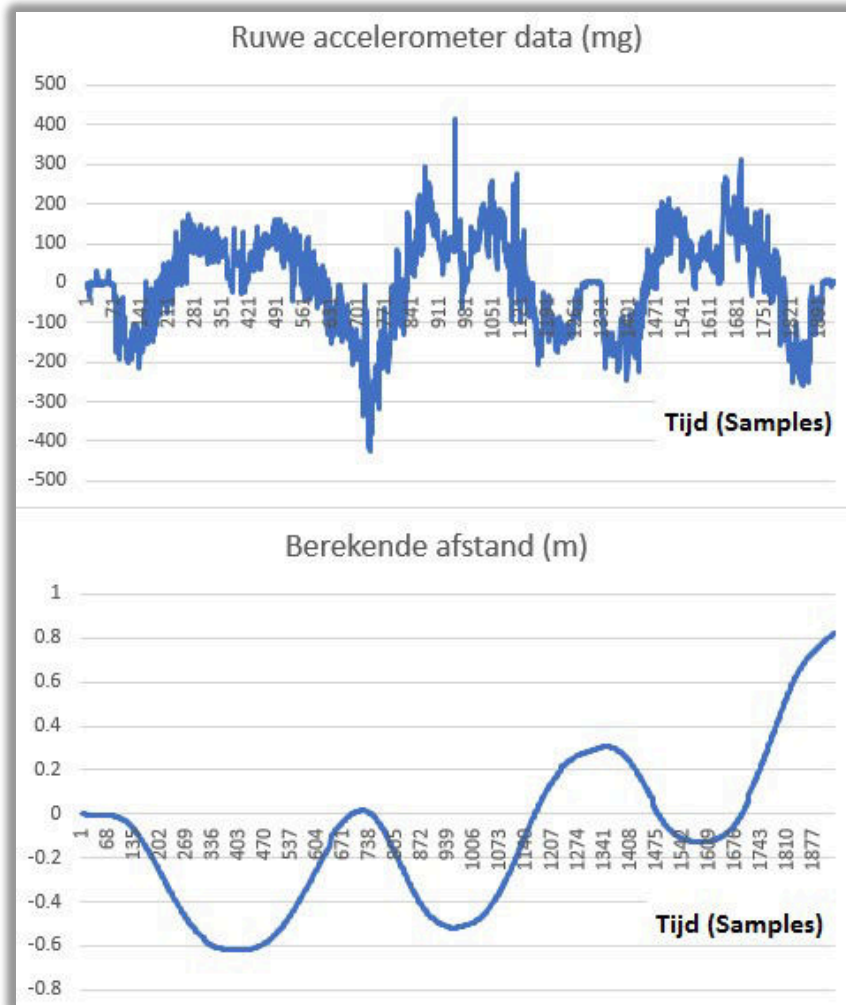
6.1.1.8 Test A8: 3 maal van A naar B en terug

Hier is getest wat de sensor doet indien hij drie maal van punt A naar B gaat en terug.

Bij de eerste heen en weergaande beweging is de afstand goed berekend. Zowel bij het aankomen bij B is de afstand 0,6m en bij het terug aankomen bij A is de afstand 0m.

Na deze meting begint de afstand af te wijken naar de positieve richting. De offset is opnieuw het probleem. Want de bewegingen zijn duidelijk zichtbaar.

Conclusie: geen extra toevoeging.

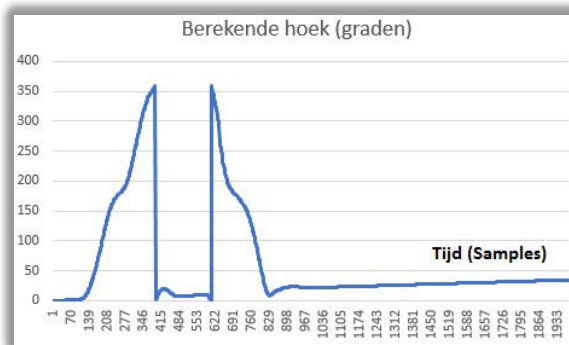


Figuur 25 Test A8: 3 maal van A naar B en terug.

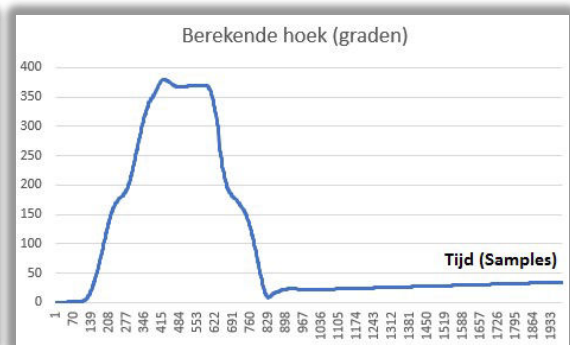
6.1.2 Gyroscop

Voor de hoekverandering te bepalen moet de ruwe data van de gyroscop één maal geïntegreerd worden, waarna de waardes opgeteld dienen te worden.

Indien er een hoekverdraaiing van 361° is komt dit overeen met 1° . Voor verdere berekeningen wordt er ook een range ingesteld van 0° tot 360° . Waardoor 361° ook effectief 1° wordt. Bij de volgende test scenario's is hier geen rekening mee gehouden want dan zou het moeilijker zijn om de data te onderzoeken. Onderstaande twee grafieken beschikken over dezelfde data, bij de eerste grafiek is er een range van 0° tot 360° ingesteld, bij de tweede grafiek is er geen range ingesteld.



Figuur 26 Berekende hoek met range



Figuur 27 Berekende hoek zonder range

In de volgende punten worden een deel testen gedaan met de gyroscop en de gemeten waardes.

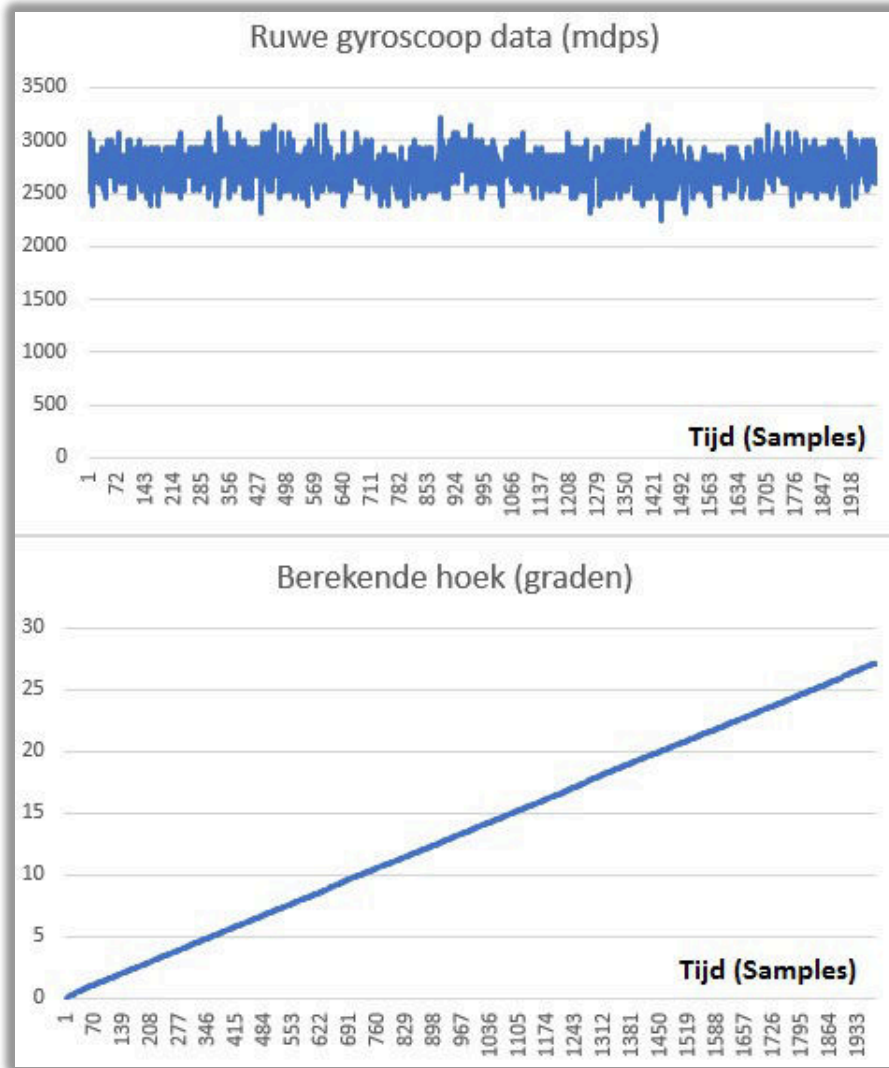
Bij elke test worden twee grafieken weergegeven. De eerste figuur (bovenste) is de data die uit de gyroscop komt en de tweede figuur (onderste) is de berekende hoek. De tijd die gebruikt is voor de data te meten is 10 seconden.

6.1.2.1 Test G1: 10 seconden niets doen.

Bij deze test is gekeken naar wat er gebeurt indien de sensor stil ligt. Hier is te zien dat de sensor denkt te draaien maar niet zo is.

Na 10 seconden is de berekende hoek ongeveer 27°, in theorie zou dit 0° moeten zijn.

Conclusie: ook bij de gyroscoop speelt de offset (drift) een grote rol.

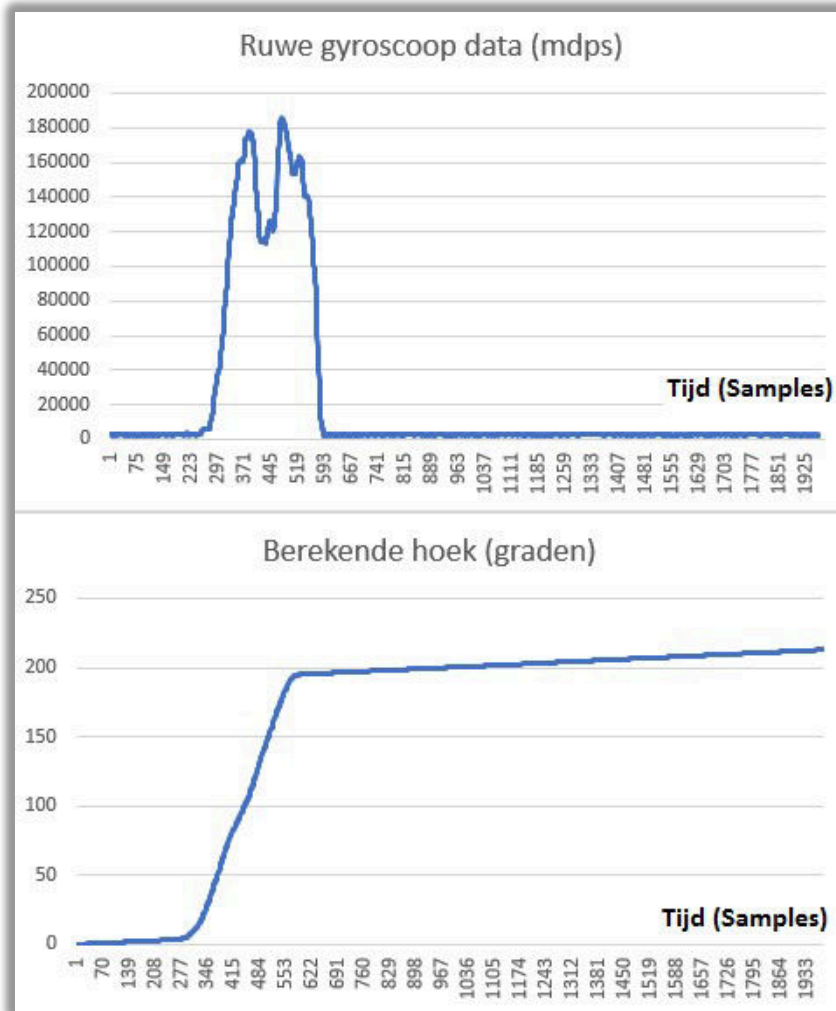


Figuur 28 Test G1: 10 seconden niets doen

6.1.2.2 Test G2: 0° naar 180°

Bij deze test wordt er van 0° gestart en geëindigd op 180°.

Conclusie: de hoekverdraaiing en de drift zijn duidelijk te zien.

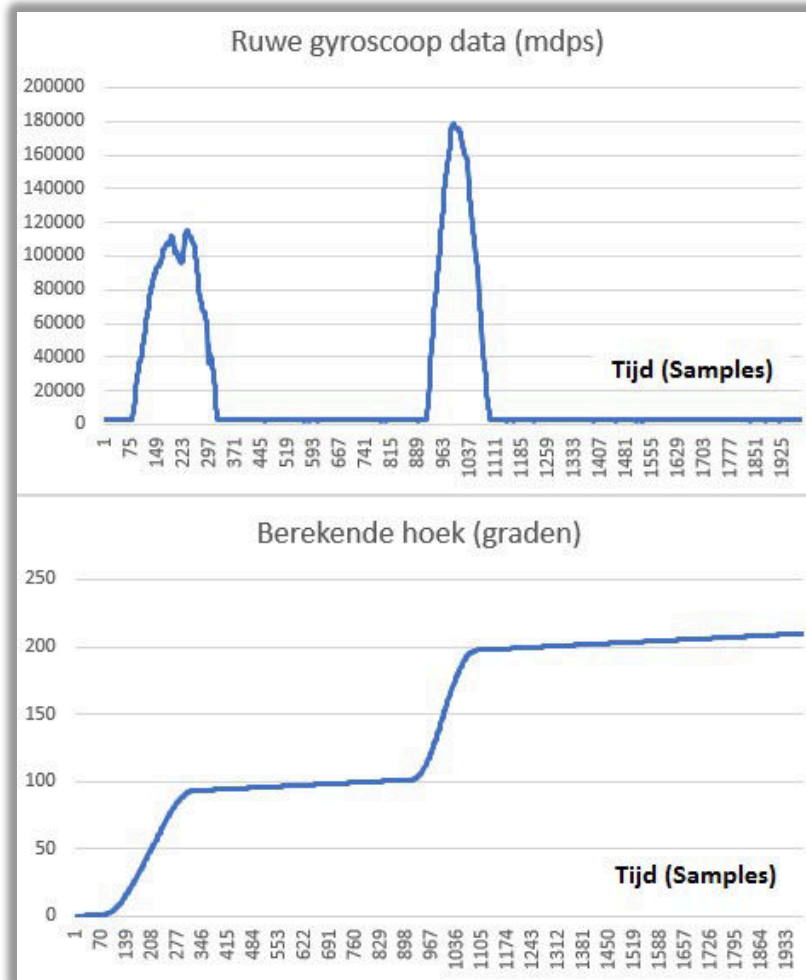


Figuur 29 Test G2: 0° naar 180°

6.1.2.3 Test G3: 0° naar 180° met tussenstop

Tijdens de hoekverdraaiing is er na 90° een tussenstop gemaakt.

Conclusie: de tussenstop en de drift zijn duidelijk te zien.

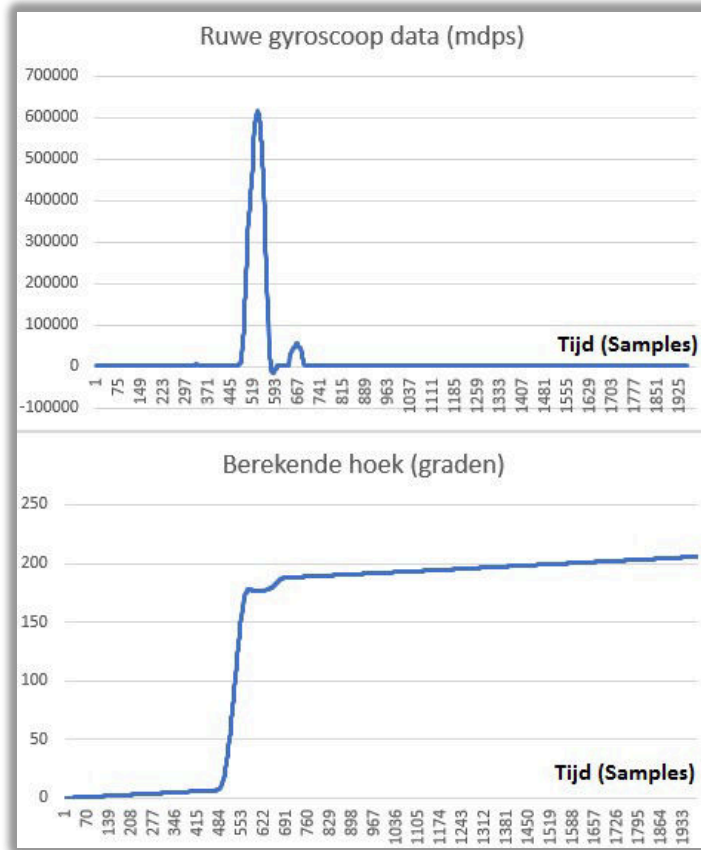


Figuur 30 Test G3: 0° naar 180 met tussenstop

6.1.2.4 Test G4: 0° naar 180° met hogere snelheid

Test G1 is hier herhaald maar de snelheid is hoger.

Conclusie: geen extra toevoeging.

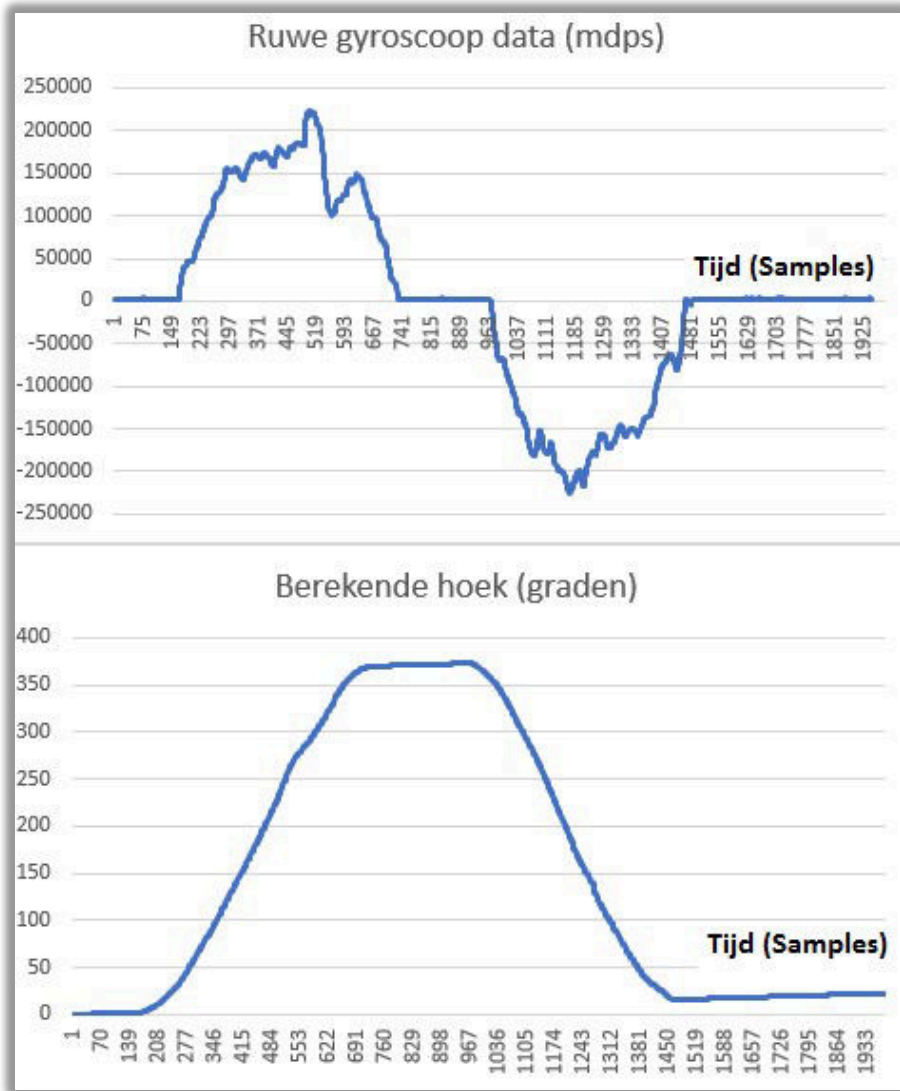


Figuur 31 Test G4: 0° naar 180° met hogere snelheid

6.1.2.5 Test G5: 0° naar 360° en terug

Bij deze test wordt de sensor helemaal om zijn eigen as gedraaid (360°) en dan weer helemaal terug.

Conclusie: de heengaande rotatie en terug is duidelijk te zien maar het begin- en eindpunt liggen niet op dezelfde plek.

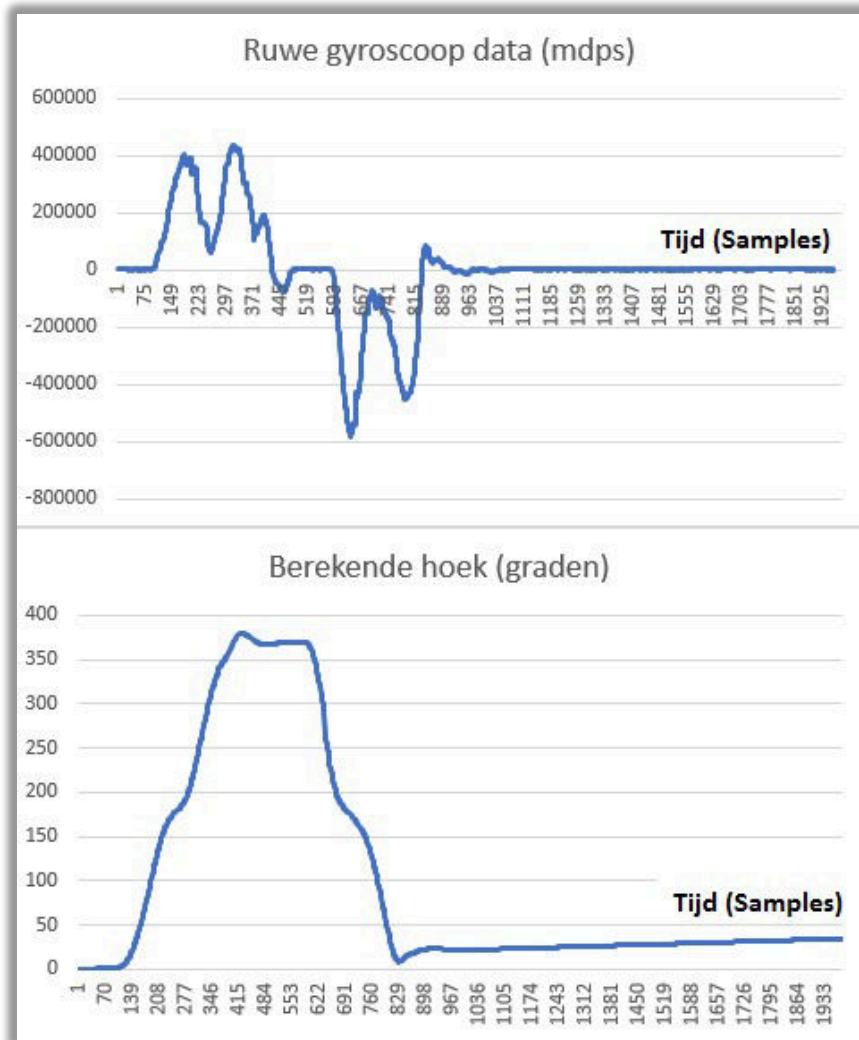


Figuur 32 Test G5: 0° naar 360° en terug

6.1.2.6 Test G6: 0° naar 360° en terug met hogere snelheid.

Test G5 is hier herhaald maar de snelheid is hoger.

Conclusie: geen extra toevoeging.



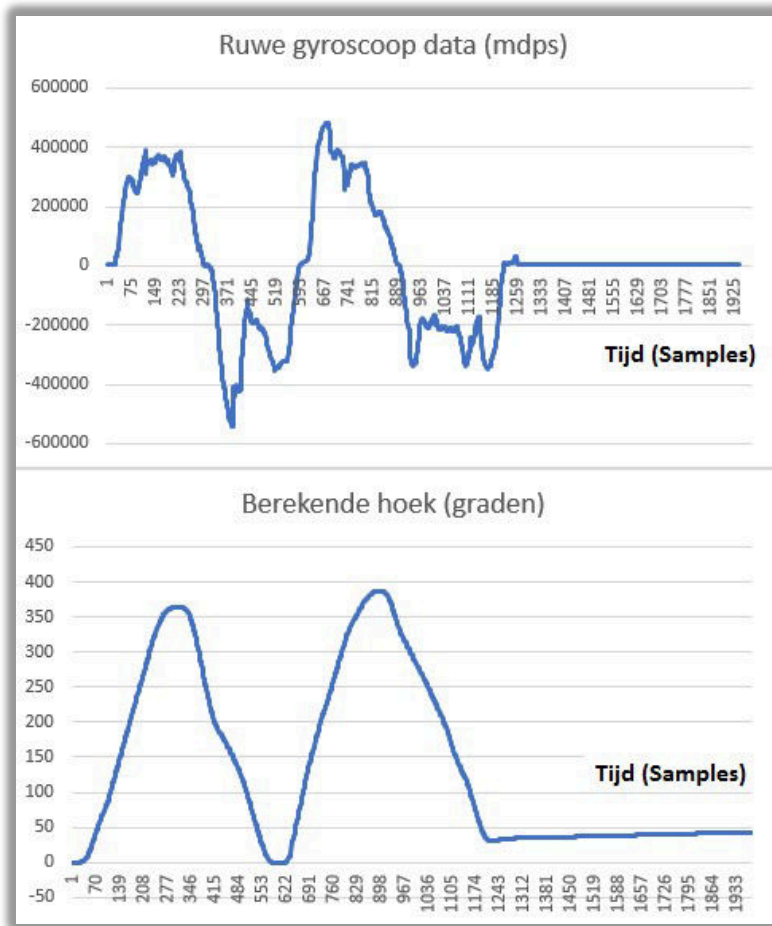
Figuur 33 Test G6: 0° naar 360° en terug met hogere snelheid

6.1.2.7 Test G7: 2 maal 0° naar 360° en terug.

Test G5 is twee maal herhaald.

Bij de eerste keer volledig ronddraaien en terug is de eindhoek ook 0°. Dit is goed. Bij de tweede keer is dit ongeveer 40° en de top ligt iets hoger dan 360°. Door het feit dat de hoek, wanneer de sensor stopt, op 40° ligt en niet ongeveer rond de 0° kan het uitgesloten worden dat er in de praktijk niet precies 360° gedraaid is (dit zou maximum enkele graden verschil kunnen zijn). Ook de eindhoek ligt op 50° dus drift is het probleem.

Conclusie: afhankelijk hoe de sensor draait, de drift speelt altijd een rol.



Figuur 34 Test G7: 2 maal 0° naar 360° en terug

6.1.3 Conclusie

De conclusie van de vorige testen zijn zeer duidelijk. Zowel bij de accelerometer als bij de gyroscoop is de offset het probleem.

De offset moet dus eruit gefilterd worden. De offset bevindt zich over de hele data. De offset eruit filteren lijkt makkelijk maar is hier niet doordat de offset niet overal constant is.

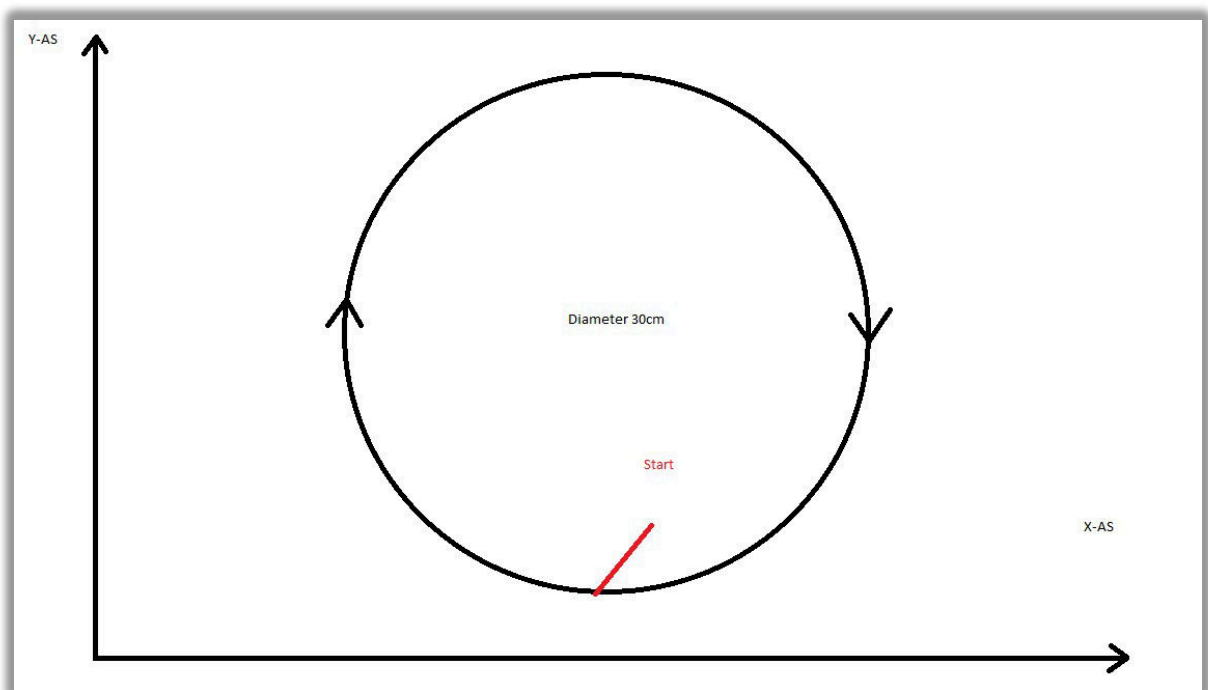
1. De offset is niet overal constant waardoor het gemiddelde overal aftrekken geen perfecte oplossing is. Dit is wel beter dan helemaal niks doen.
2. Bij het versnellen en vertragen van één beweging zou de oppervlakte zowel boven als onder de grafiek van de versnelling en de vertraging hetzelfde zijn, maar dit is niet het geval door afwijkingen van de sensor.

6.1.4 Offset eruit filteren (accelerometer)

In dit gedeelte wordt bewezen dat de offset eruit filteren niet zo eenvoudig is als het lijkt.

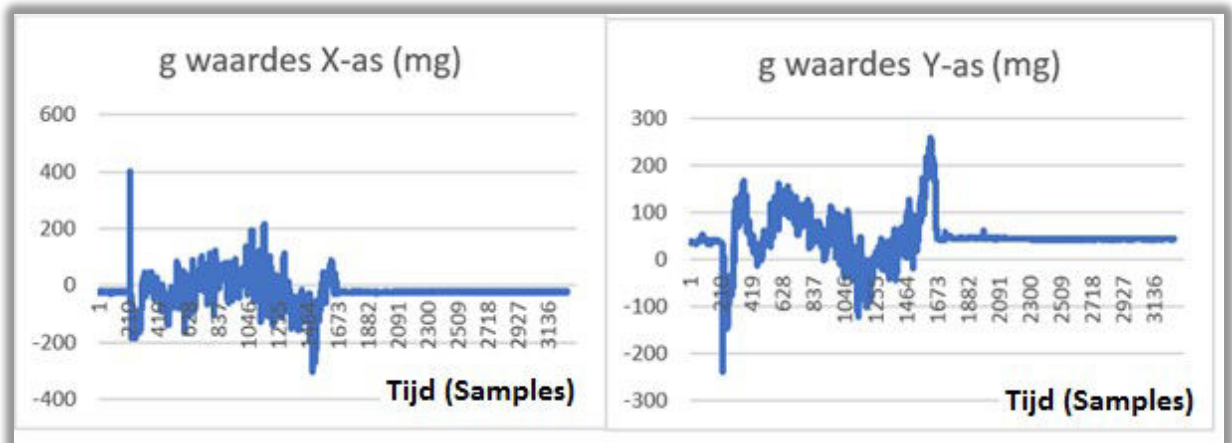
Met de accelerometer is een cirkel op een 2D-vlak gevormd. Tijdens deze testen wordt de sensor niet gedraaid om zijn eigen as (de gyroscoop meet dus niets).

Figuur 35 geeft een beeld weer hoe de cirkel getekend is. De cirkel is van onderaan gestart en met de klok mee gedraaid.



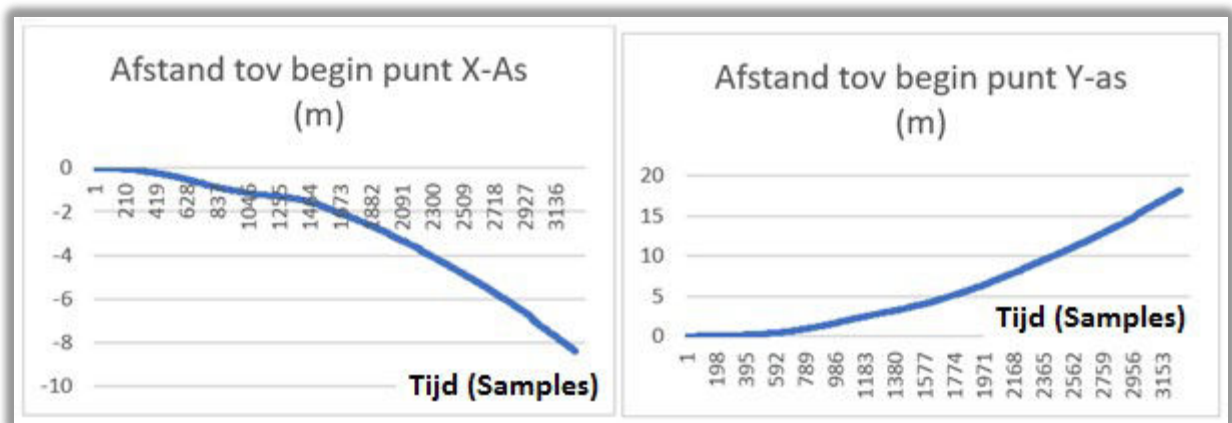
Figuur 35 Afgelegde cirkel

De gemeten data van de accelerometer wordt in volgende twee grafieken weergegeven. In totaal zijn er 3274 samples genomen op 10 seconden. Op de grafiek van de Y-as is de positieve offset duidelijk zichtbaar. Bij de X-as is er een kleine negatieve offset.



Figuur 36 Ruwe data accelerometer cirkel

Door bovenstaande data (figuur 36) twee maal te integreren wordt de afstand bepaald die te zien in figuur 37.



Figuur 37 Gemeten/berekende afstand

Op 10 seconden zou de sensor dus -8,5m op de X-as en 18m op de Y-as verplaatst zijn. Dit lijkt totaal niet op de cirkel die gemaakt is. Op 10 seconden zit de accelerometer er dus $\pm 20m$ naast.

Conclusie: de ruwe data moet gefilterd worden.

Onderstaande tabel geeft de gemiddelde mediaan weer van de X-en Y-as

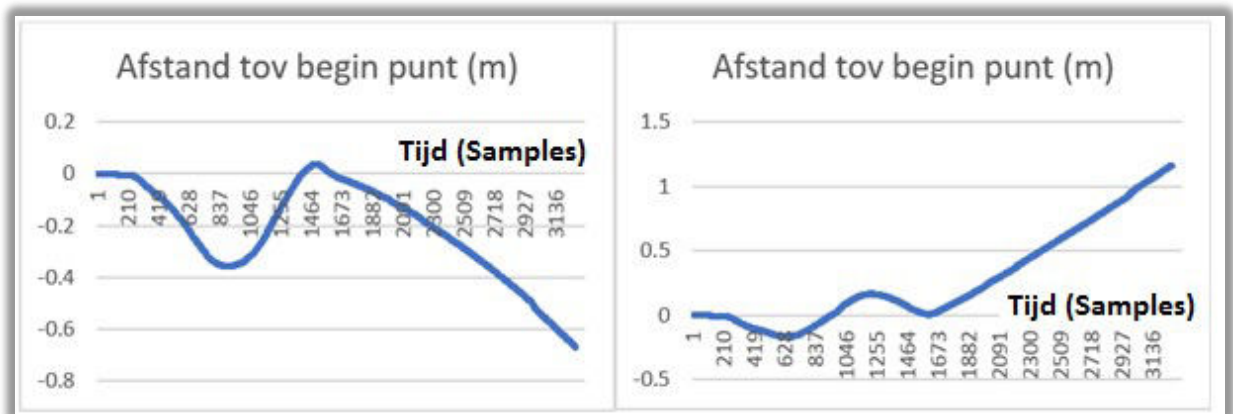
	X-as (mg)	Y-as (mg)
Gemiddelde	-22,09	46,33
Mediaan	-23	44

Tabel 7 Gegevens ruwe data

Bij de X-as is er dus een offset van ongeveer -22mg en bij de Y-as 46mg. Dit kan twee oorzaken hebben:

- 1) Afwijking van de sensor.
- 2) Dat de sensor onder een kleine hoek gedraaid is waardoor de aantrekkingskracht van de aarde hierop inspeelt.

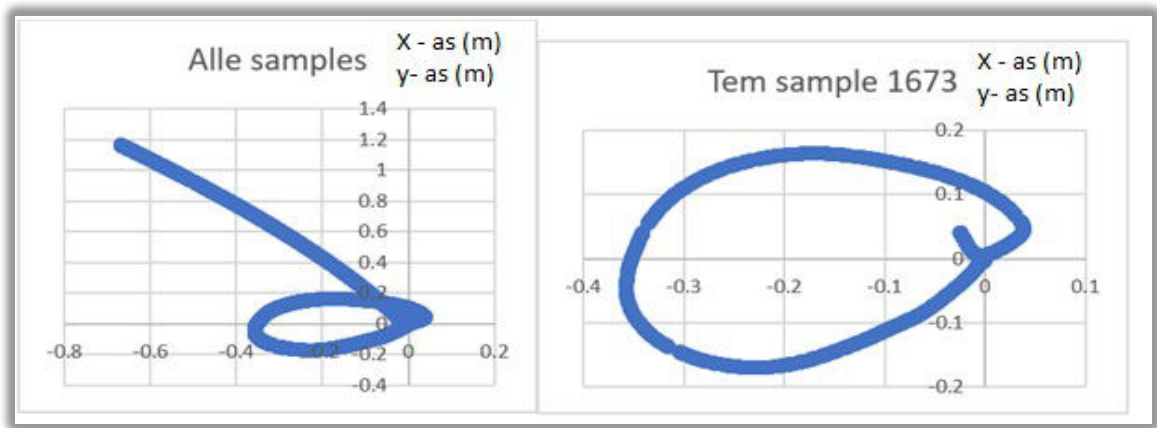
Indien er een correctie op deze waardes gedaan wordt van 19.5mg op de X-as en -43mg op de Y-as zien de grafieken van de afstanden er al totaal anders uit en kan er een vorm van de cirkel herkend worden. Hierdoor is duidelijk te zien dat op sample 1464 de cirkel volledig getekend was en dus terug op de begin positie stond. Na sample 1464 blijft de grafiek op of aflopen. Dit komt doordat de exacte offset er niet uitgehaald is.



Figuur 38 Berekende afstand na offset correctie

Bovenstaande grafieken zijn beter dan de grafieken van figuur 37. Vanaf sample 1673 was de cirkel volledig rond getekend en zien we dat er een afstand blijft afgelegd worden door errors.

Beide afstanden samenvoegen geeft volgende grafiek:



Figuur 39 Gemeten cirkel

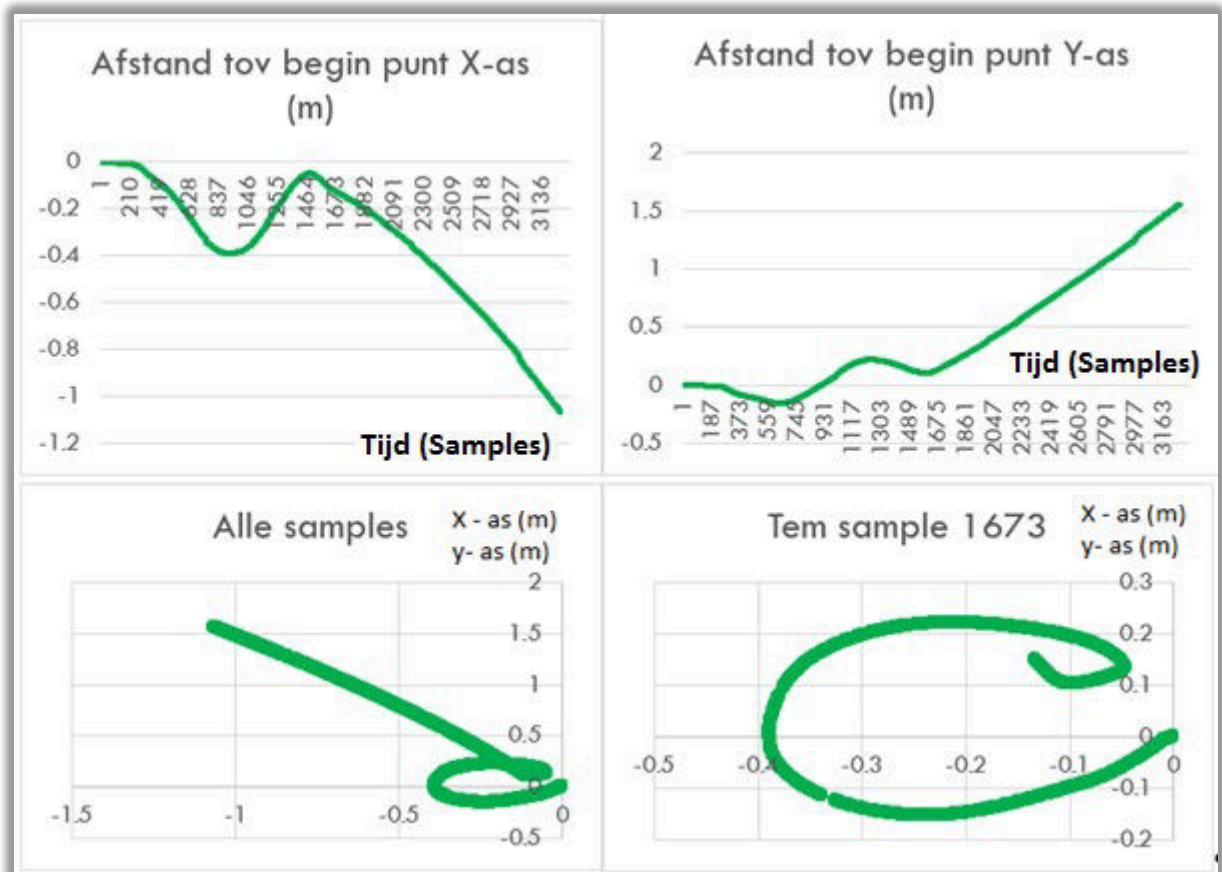
Hier wordt de getekende cirkel weergegeven. De afstanden in deze grafiek komen ongeveer overeen met de cirkel in werkelijkheid (diameter 30cm).

Conclusie: de offset is een belangrijke parameter die uit het signaal gefilterd moet worden.

Alle vorige grafieken/tekeningen worden opnieuw herrekend met een andere offset waardoor er bewezen wordt dan een verandering van de offset correctie van slechts 1mg ernstige gevolgen heeft.

De offset correctie wordt met 1mg veranderd.

Offset correctie X-as: 18,5mg. Offset correctie Y-as: -42mg.



Figuur 40 Herberekende grafieken na offset correctie

Conclusie:

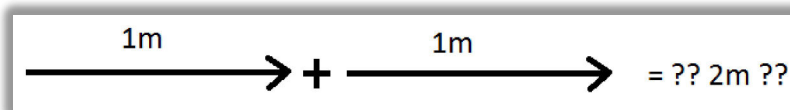
- Een verandering van de offset correctie van slechts 1mg heeft enorme gevolgen. Het verschil is duidelijk te zien bij de grafiek "Tem sample 1673" van figuur 39 en figuur 40.
- Er wordt nogmaals bewezen dat er met juiste data gewerkt moet worden. Ook al lijkt de afwijking klein op korte duur maar ze is enorm (exponentieel) op langere duur. Het onderzoek gaat over het bepalen van het traject van een skydiver hetgeen over enkele minuten gemeten/berekend dient te worden.

6.1.5 Accelerometer + Gyroscop

De accelerometer en gyroscop werden in vorige punten apart getest. Hieruit bleek dat de accelerometer en gyroscop beide afwijkingen vertonen. Wat er gebeurt indien de data van de accelerometer en gyroscop aan elkaar wordt toegevoegd, wordt uitgelegd in dit punt.

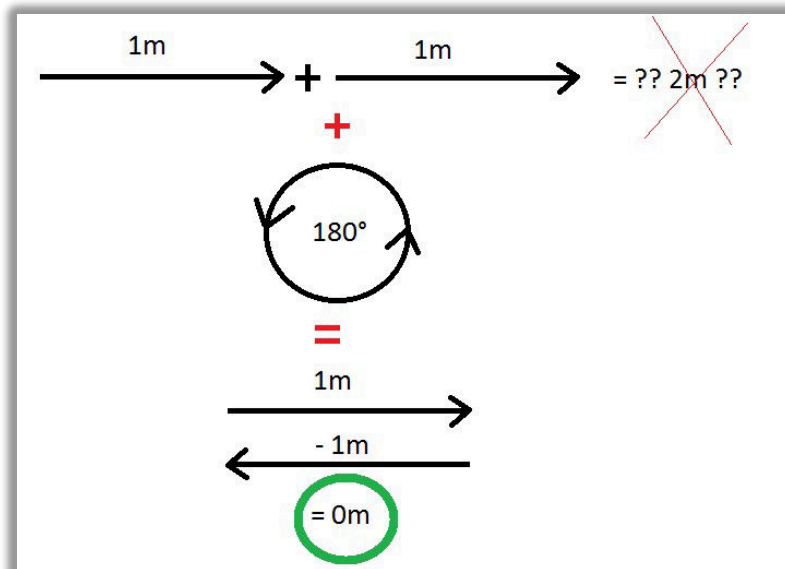
Indien de accelerometer en gyroscop aan elkaar toegevoegd worden, komen er problemen. Bij deze uitleg wordt er gedraaid om de Z-as die loodrecht op de aarde staat (yaw) waardoor de aantrekkingskracht van de aarde geen rol speelt.

Indien enkel de data van de accelerometer bekeken wordt (figuur 41) is het duidelijk dat de accelerometer twee maal 1m heeft afgelegd in dezelfde richting. Dus de afstand tussen het begin en eindpunt is 2m. Dit klopt niet, de accelerometer heeft goed gemeten maar voor de afstand tussen het begin en eindpunt te berekenen moet er rekening gehouden worden met de data van de gyroscop.



Figuur 41 Accelerometer afstanden

Tussen de twee metingen (samples) van de accelerometer is de sensor 180° om zijn eigen as gedraaid (gyroscop data). Indien hiermee rekening gehouden wordt zou het begin en eindpunt op de zelfde plaats liggen.



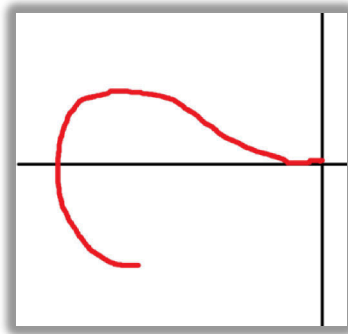
Figuur 42 Afstand bepalen door accelerometer en gyroscop

De hoekverdraaiingen en afgelegde afstanden die per sample gemeten worden zullen in werkelijkheid kleiner zijn dan de bovenstaande gebruikte waardes van 180° en 1m. Bovenstaande tekening is een voorstelling waar rekening mee gehouden moet worden.

6.1.5.1 Test XY 1: vraagteken

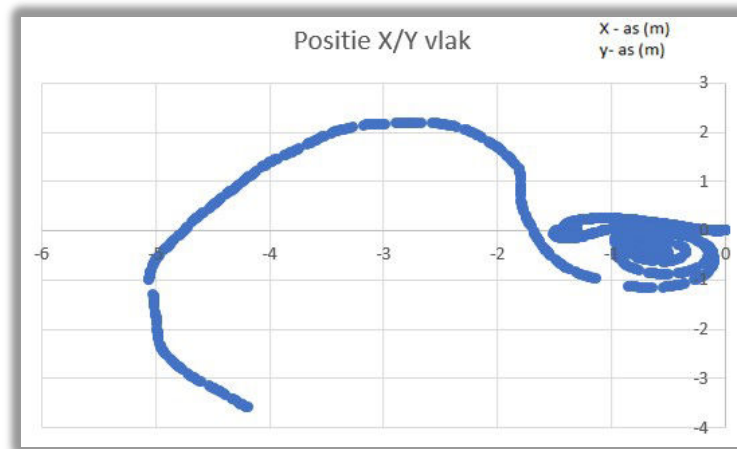
Bij deze test is enkel gekeken hoe goed de positie eruit ziet wanneer één as van de accelerometer en één as van de gyroscoop gecombineerd worden. Er wordt niet gekeken of de totale afstanden correct zijn.

In deze test is er een liggend vraagteken zonder punt gemaakt. De beweging ziet eruit als de volgende schets (rode lijn):



Figuur 43 Schets liggend vraagteken

De volgende grafiek bevat de vorm die berekend is aan de hand van de accelerometer en de gyroscoop. Eén as van de accelerometer geeft dus afstanden op twee assen afhankelijk van de hoek die gemeten is door de gyroscoop.



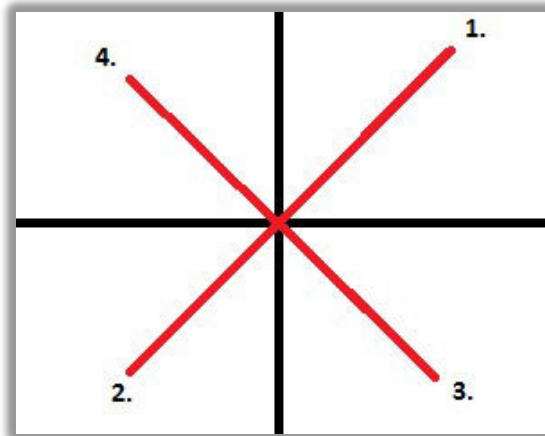
Figuur 44 Gemeten liggend vraagteken

Bovenstaande grafiek ziet er goed uit. De figuur lijkt op de bovenstaande schets en dus de test is geslaagd zonder rekening te houden met de afwijkingen (offset). Dus naar de grote blauwe stip in het midden wordt niet gekeken. De oorzaak hiervan is bekend, dit wordt veroorzaakt door de offset op de accelerometer en de gyroscoop.

6.1.5.2 Test XY 2: X tekenen

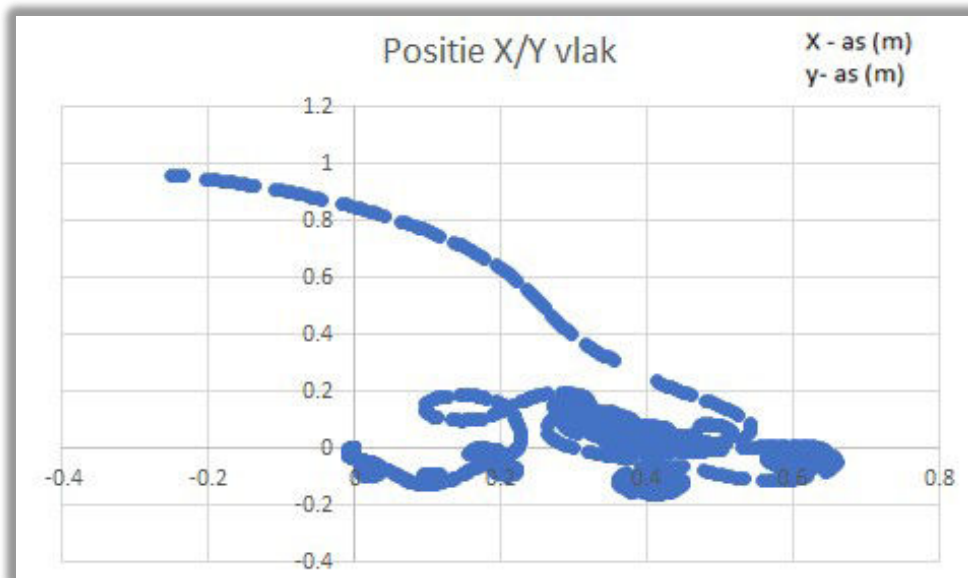
In deze test zijn er twee assen gebruikt van de accelerometer: de X-en Y-as. Bij deze test wordt er ook gedraaid rond de Z-as (yaw). Tijdens deze test is er een grote X gemaakt met het kruispunt in het midden, zie figuur 45. De volgorde hoe er bewogen werd is als volgt: middelpunt → 1 → Middelpunt → 2 → Middelpunt → 3 → Middelpunt → 4 → Middelpunt.

Tijdens de bewegingen van het middelpunt naar een hoek is de sensor om zijn eigen as gedraaid (veranderlijke beweging).



Figuur 45 Schets X figuur

Onderstaande figuur zijn de berekende XY afstanden. Deze grafiek lijkt dus totaal niet op de werkelijke X (figuur 45).



Figuur 46 Gemeten/berekende X

Conclusie: indien er moeilijkere tekeningen gemaakt worden is er niets uit de data te halen. Er zijn veel factoren die meespelen.

6.2 Rstudio

In excel werden er steeds dezelfde formules herhaald bij elke test. De ruwe data omgevormd naar afstand en erna vergeleken door middel van grafieken. Dit kost veel tijd, vooral de offset er uit filteren. Rstudio is gekozen om dit te vergemakkelijken.

De ruwe data wordt in het programma geladen, hieruit wordt de afstand automatisch berekend. Daarna start het gedeelte die de offset er automatisch uithaalt. De data wordt gecorrigeerd tot begin-en eindpunt op dezelfde plaats liggen. Dit is tevens een voorwaarde bij dit programma. Het begin en eindpunt moeten in praktijk op dezelfde plek liggen.

De code doet simpelweg de offset verhogen of verlagen tot het begin-en eindpunt op dezelfde plek liggen. Het is met de volgende punten opgebouwd:

- Een functie die uit de ruwe data de afstand berekend.
 - Met tussenstappen zoals toegevoegde snelheid, totale snelheid, toegevoegde afstand,...
- Een functie die de offset verhoogt of verlaagt naarmate het verschil in begin- en eindafstand. Deze functie start door het gemiddelde van de data af te trekken om tijd te besparen. Hierna wordt de offsetcorrectie verhoogt of verlaagt met 1mg, 0,1mg of 0,05mg afhankelijk van hoe dicht het begin- en eindpunt bij elkaar ligt (tijd besparend).
 - Wanneer de offset verhoogd of verlaagd is wordt de bovenstaande functie herhaald.

Het grote nadeel van het programma in Rstudio is dat het zeer traag is. Indien er data gedurende 10 seconden gemeten werd en hier de offset uit gefilterd wordt, duurde dit één minuut in Rstudio. Dit is veel te lang. Dit kan meerdere oorzaken hebben. Rstudio behandelt het csv-bestand niet goed waardoor het zeer lang duurt voor de data uit het csv-bestand te halen. Mogelijk is de code niet optimaal geschreven (dit is ook niet verder geoptimaliseerd omdat er gekozen is om verder te werken met Labview Communications).

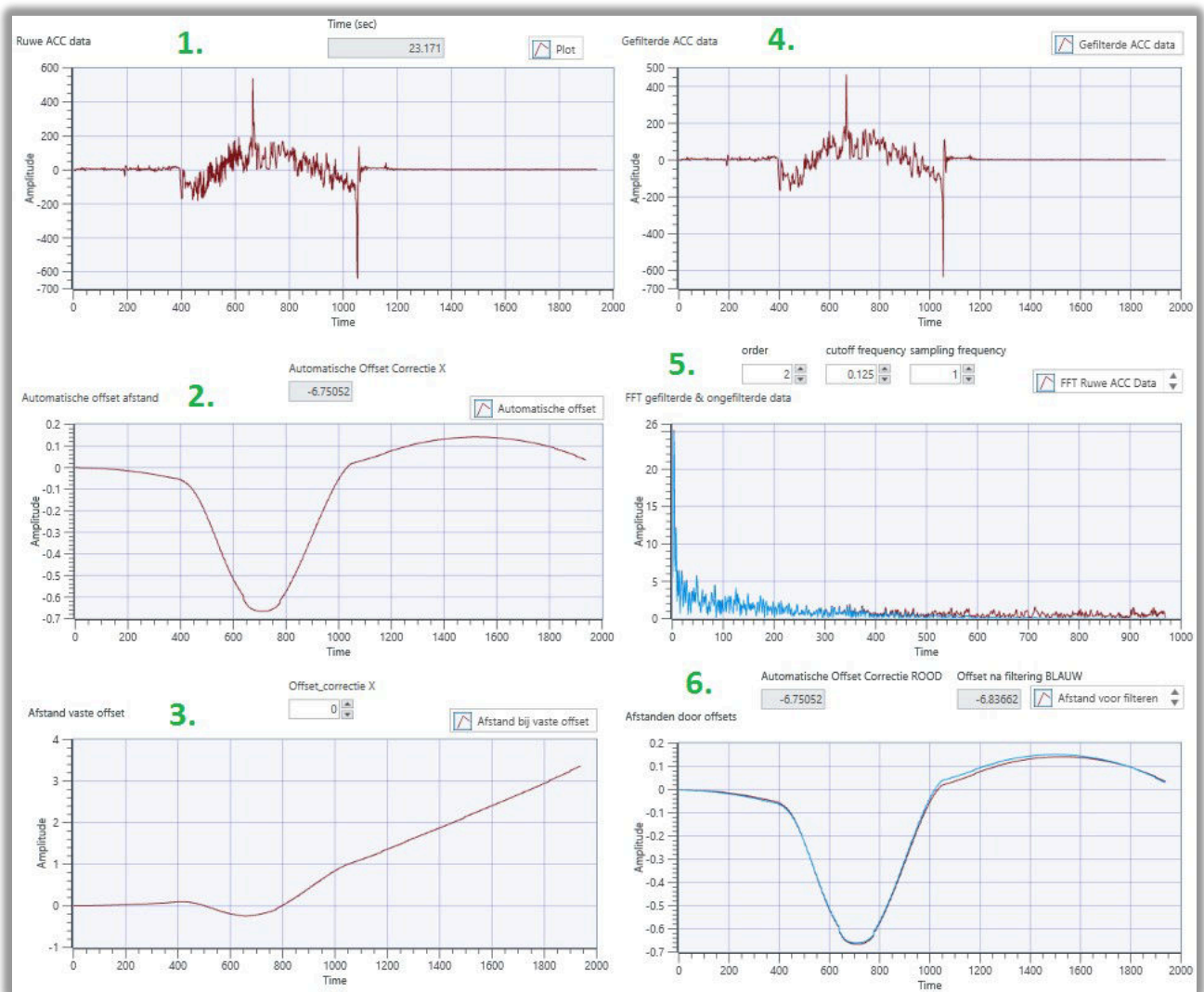
6.3 Labview Communications

Labview is gekozen als programma om voor de rest van het onderzoek te gebruiken. Labview Communications gaat in dit onderzoek voor verschillende toepassingen gebruikt worden, namelijk:

1. Ruwe data inlezen en weergeven.
2. Afstand berekenen en weergeven.
3. Offset automatisch eruit filteren en de nieuwe afstand weergeven.
4. FFT onderzoek.
5. Filteringen toepassen en de nieuwe afstand berekenen/weergeven.

Figuur 47 Labview 6 grafieken

Op het tabblad “panel” (grafisch gedeelte) van Labview Communications worden de volgende zes grafieken weergegeven. Elke grafiek heeft zijn eigen specialiteiten en aansturing. De volgende punten leggen uit wat elke grafiek voorstelt. Hierna worden er testcases opgebouwd die aan de hand van de zes grafieken uitgelegd worden. De uitleg van de grafieken staat op de volgende pagina.



1. Dit is de ruwe data van de accelerometer. Boven deze grafiek wordt de tijd weergegeven dat het programma nodig heeft om alles te berekenen (rond de nul tot vijf seconden).
2. Hier wordt de afstand doorheen de tijd weergegeven. Dit nadat de offset automatisch eruit gehaald is. De offset correctie die gebruikt is staat boven de grafiek.
3. Hier wordt de afstand weergegeven doorheen de tijd. Boven de grafiek kan er een offset correctie ingesteld worden. Indien deze nul is dan wordt de afstand berekend dat de sensor denkt verplaatst te zijn.
4. Dit is de gefilterde data van de accelerometer. De data wordt gefilterd aan de hand van een low-pass filter. Een low-pass filter wilt zeggen dat alle frequenties die hoger zijn dan de ingestelde frequentie eruit worden gefilterd.
5. Hier worden twee FFT's weergegeven. De rode is de FFT van de ruwe accelerometer data (grafiek 1). De blauwe is de FFT van de gefilterde data (grafiek 4).
Boven deze grafiek kunnen drie waardes ingesteld worden.
 - Order: hoe sterk is er gefilterd. Hoeveel keer is dezelfde filtertechniek achter elkaar uitgevoerd. Hoe hoger hoe beter de filtering. Maar hierdoor loopt het signaal achter en duurt het langer voordat alles berekend is.
 - Cutoff frequentie: dit is de frequentie waar de low-pass filter optreedt.
 - Sample rate: dit is de frequentie van de ruwe accelerometer data, 261Hz in dit geval.
6. Hier worden twee afstanden weergegeven. De rode lijn is dezelfde als die van grafiek 3. De blauwe lijn is de afstand die bekomen is door eerst de ruwe accelerometer data te filteren om hierna de afstand met een nieuwe offset correctie toe te passen.

Testcases (accelerometer)

In dit gedeelte worden twee testcases uitgewerkt. De testcases zijn opgebouwd uit verschillende punten. Doordat de eerste drie van de zes grafieken hetzelfde blijven gedurende de test worden deze in het begin geplaatst. Hierna worden ze niet meer herhaald. Hierna komen enkele tussenpunten waar steeds een andere cutoff frequentie ingesteld wordt. In deze tussenpunten worden de laatste drie grafieken weergegeven omdat deze steeds veranderen.

Informatie over de gemeten data:

- De tijd die gebruikt is voor de data te meten is standaard 10 seconden. Dit zal in de praktijk ongeveer 1880 samples zijn.
- Onderstaande testen zijn gebeurd met de LSM6DS0 van het multi-sensor board. De ingestelde ranges van de sensor zijn $\pm 4g$ en $\pm 2000dps$.
- Er wordt getest met twee punten, namelijk A en B. De afstand tussen A en B is 0,6m.

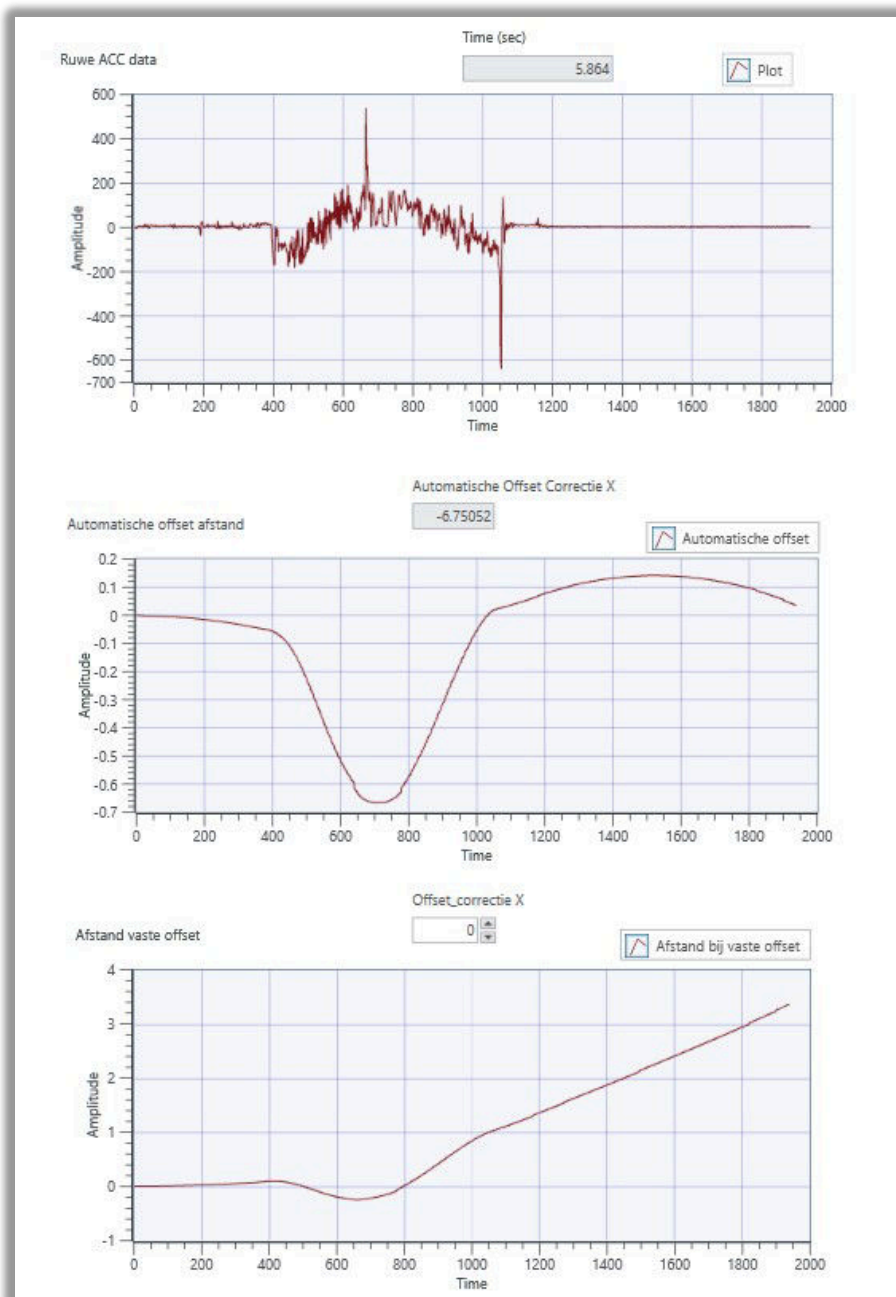
In punt 6.1 zijn reeds testcases gebeurd. De data van de testcases worden hier hergebruikt. Dit wordt aangegeven met de namen die reeds gebruikt werden. Bijvoorbeeld "Test A4: van punt A naar B en terug (6.1.1.4)".

Er zijn geen testcases ontworpen voor de gyroscoop. Waarom wordt duidelijk in de conclusie (punt 6.3.3).

6.3.1 Test A4: Van punt A naar B en terug

De data die gebruikt werd in punt 6.1.1.4 wordt hier gebruikt om de FFT te onderzoeken en filteringen op toe te passen. Hier wordt er bewogen van punt A naar B en direct (zonder pauze) terug.

Op de tweede grafiek is de heen en weergaande beweging duidelijk te zien. Ondanks de offset eruit gefilterd is zijn de afstanden niet exact. Dit komt doordat de offset doorheen de data niet constant blijft. De offset er automatisch uithalen is dus al een goed begin. Deze en de volgende testcases zijn bedoeld voor het FFT onderzoek. Hierdoor wordt er niet meer over de offsetcorrectie gesproken.



Figuur 48 Test A4: Van punt A naar B en terug

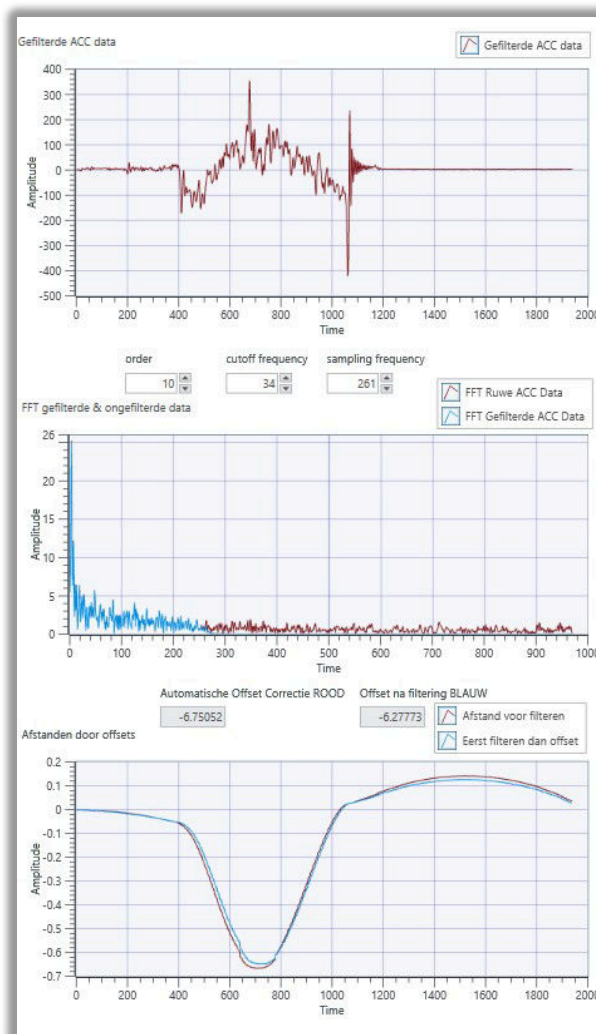
Cutoff frequentie 261Hz

De data is gesampeld aan een frequentie van 261Hz. Deze frequentie wordt tevens ingesteld als cutoff frequentie. Dit betekent dat er normaal gezien geen hogere frequenties kunnen voorkomen, want er kunnen geen frequenties gemeten worden die hoger zijn dan de gesampelde frequentie. Het beste is om de sample rate twee keer hoger te nemen dan de frequenties die gemeten dienen te worden.

De tweede grafiek geeft de FFT weer. Hieruit blijkt dat er toch frequenties voorkomen die hoger zijn dan de gesampelde frequentie. Deze frequenties hebben tegenover de lage frequenties wel een zeer lage amplitude.

Op de derde grafiek staan twee lijnen. Een rode en een blauwe. De rode is de afstandlijn voor het filteren en de blauwe is de afstandlijn na het filteren. Deze twee liggen zo goed als volledig over elkaar. Dit bewijst dat er geen signalen aanwezig zijn met een hogere frequentie dan 261Hz.

Conclusie: alle hogere frequenties eruit filteren geeft verandering op de afstand.



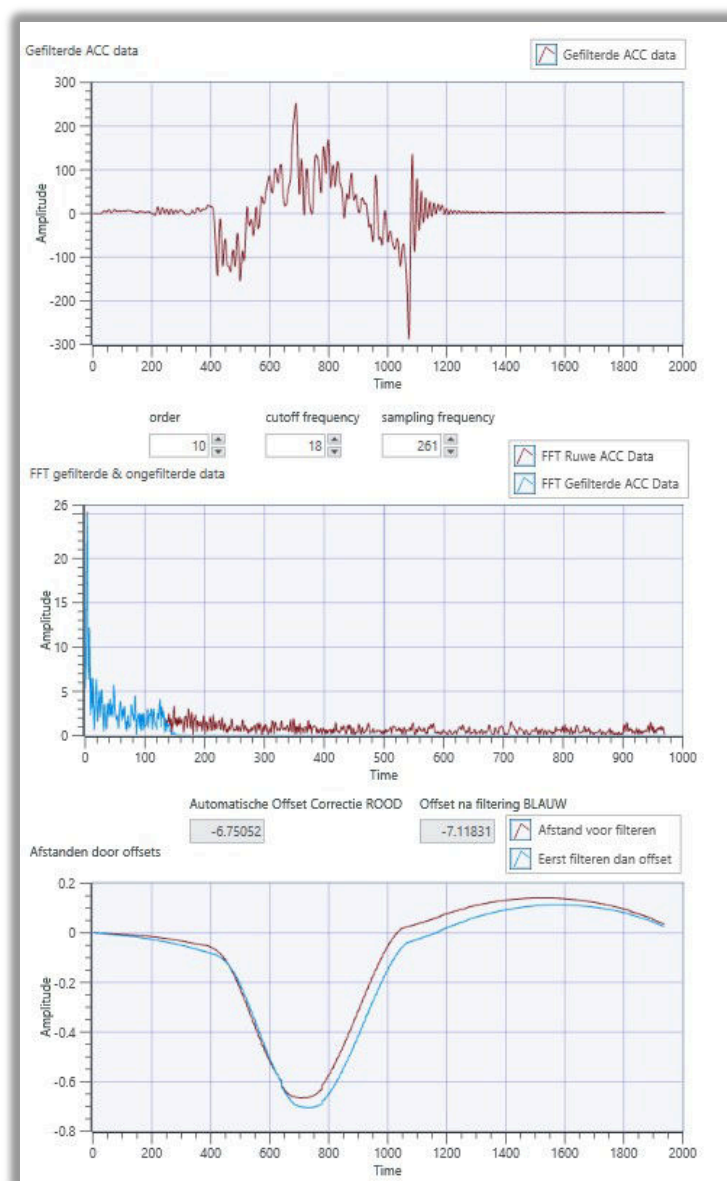
Figuur 49 Test A4: 261Hz cutoff frequentie

Cutoff frequentie 130Hz (sample rate/2)

Voor een goed signaal te meten moet de sample rate dubbel zo groot zijn dan de frequenties die voorkomen in het signaal. De sample rate is 261Hz dus in deze test worden alle frequenties hoger dan 130Hz eruit gefilterd.

Op de eerste grafiek is te zien dat na de grote negatieve piek, signalen voorkomen die steeds kleiner worden. Deze signalen ontstaan door de filter toe te passen en komen niet voor in de ruwe data.

Conclusie: door te filteren kunnen er signalen op de data ontstaan die er in werkelijkheid niet aanwezig zijn. De berekende afstand na het filteren en voor het filteren hebben nog steeds dezelfde vorm.



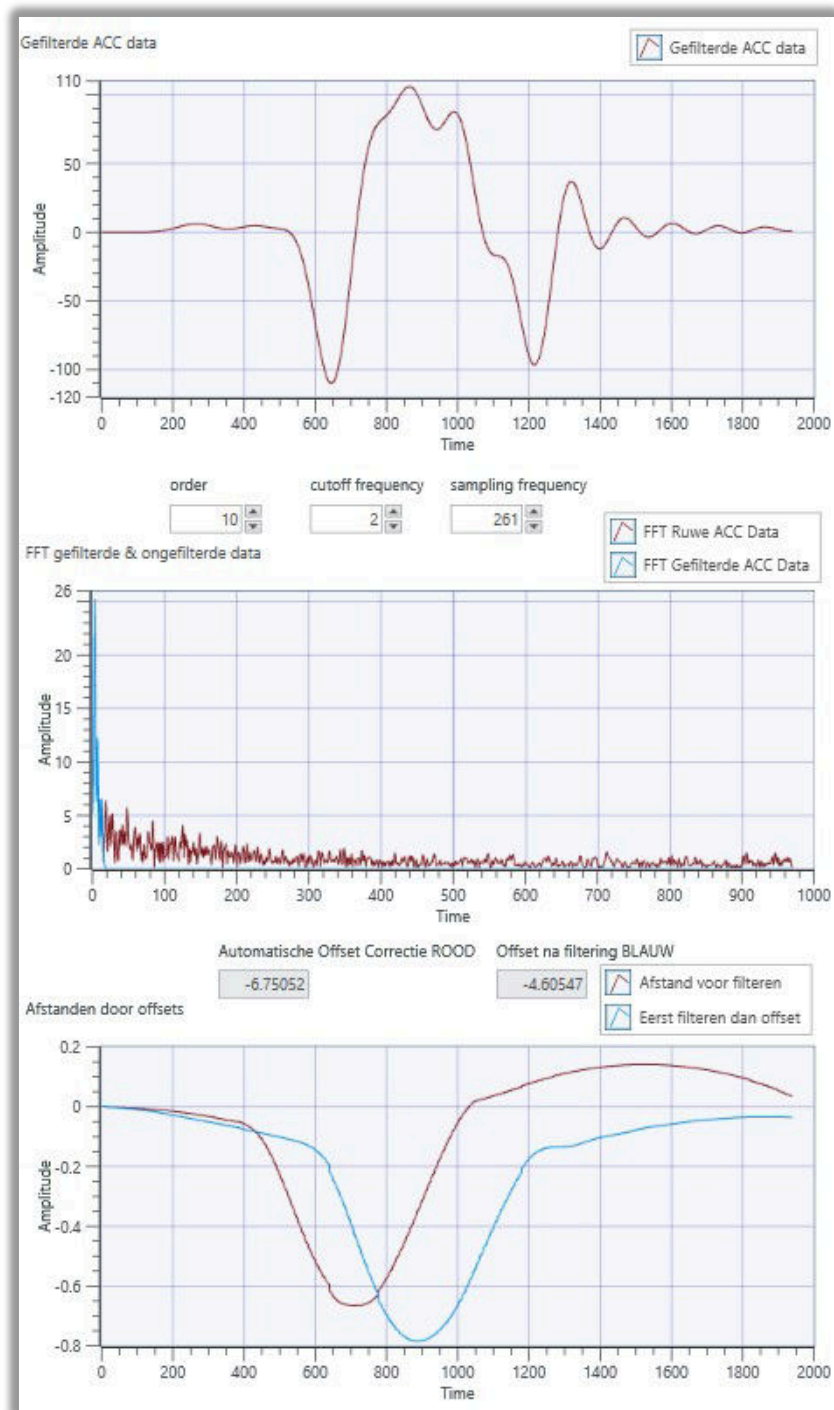
Figuur 50 Test A4: 130Hz cutoff frequentie

Cutoff frequentie 10Hz

De cutoff frequentie is verlaagd tot er een verschil te zien is op de blauwe lijn van grafiek 3.

Het verschil tussen de rode en de blauwe lijn is dat de blauwe naar linksonder verschoven is. Dit betekent dat het signaal vertraagd is in de tijd.

Conclusie: filteren van het signaal geeft een vertraging van het signaal.



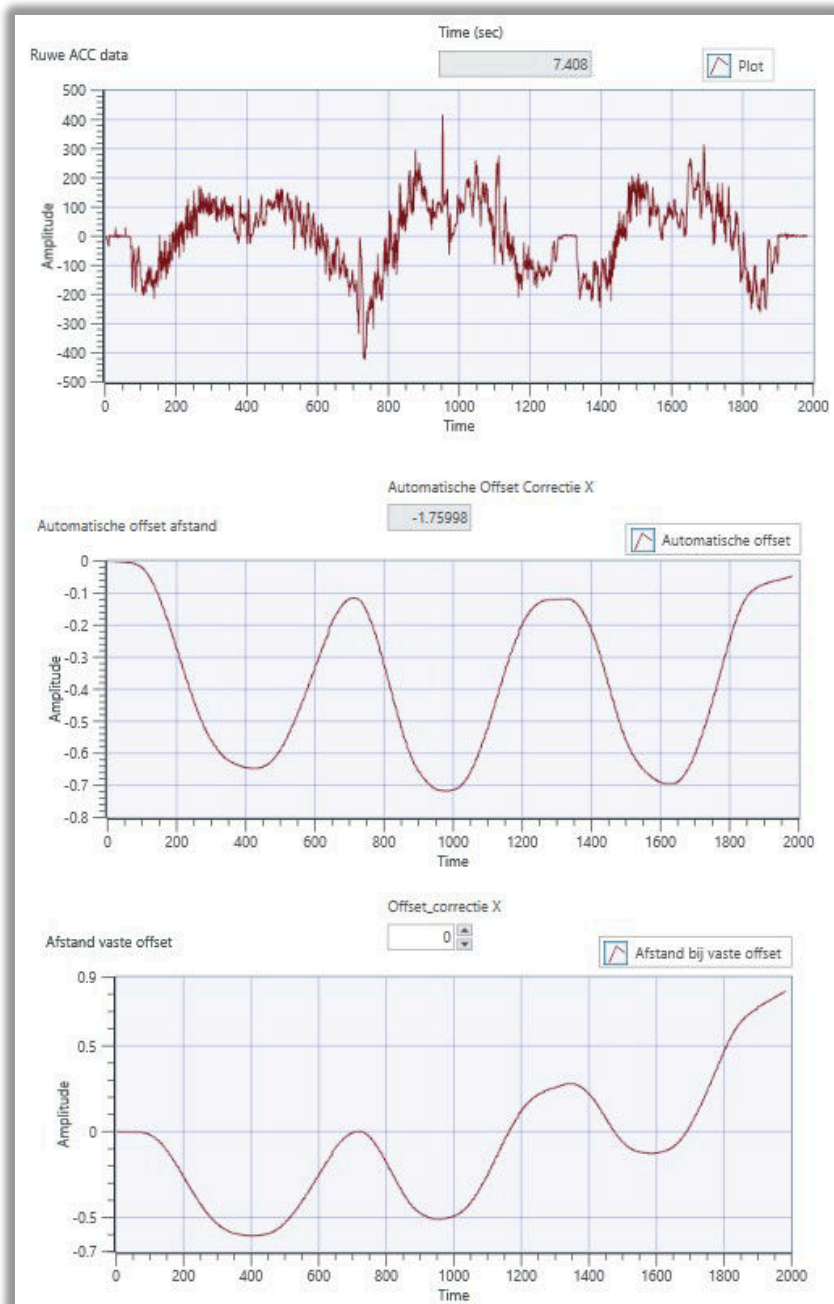
Figuur 51 Test A4: 10Hz cutoff frequentie

6.3.2 Test A8: 3 maal van punt A naar B en terug

In deze test is de sensor drie maal van punt A naar B verplaatst en terug. De data die gebruikt wordt is de data uit punt 6.1.1.8.

Grafiek 2 geeft de berekende afstand weer. Deze geeft reeds de bewegingen aan die gemaakt zijn. De drie heen en weergaande bewegingen van 0,6m zijn zichtbaar. De afstanden kloppen grotendeels en elke beweging heeft dezelfde vorm/afstand afgelegd.

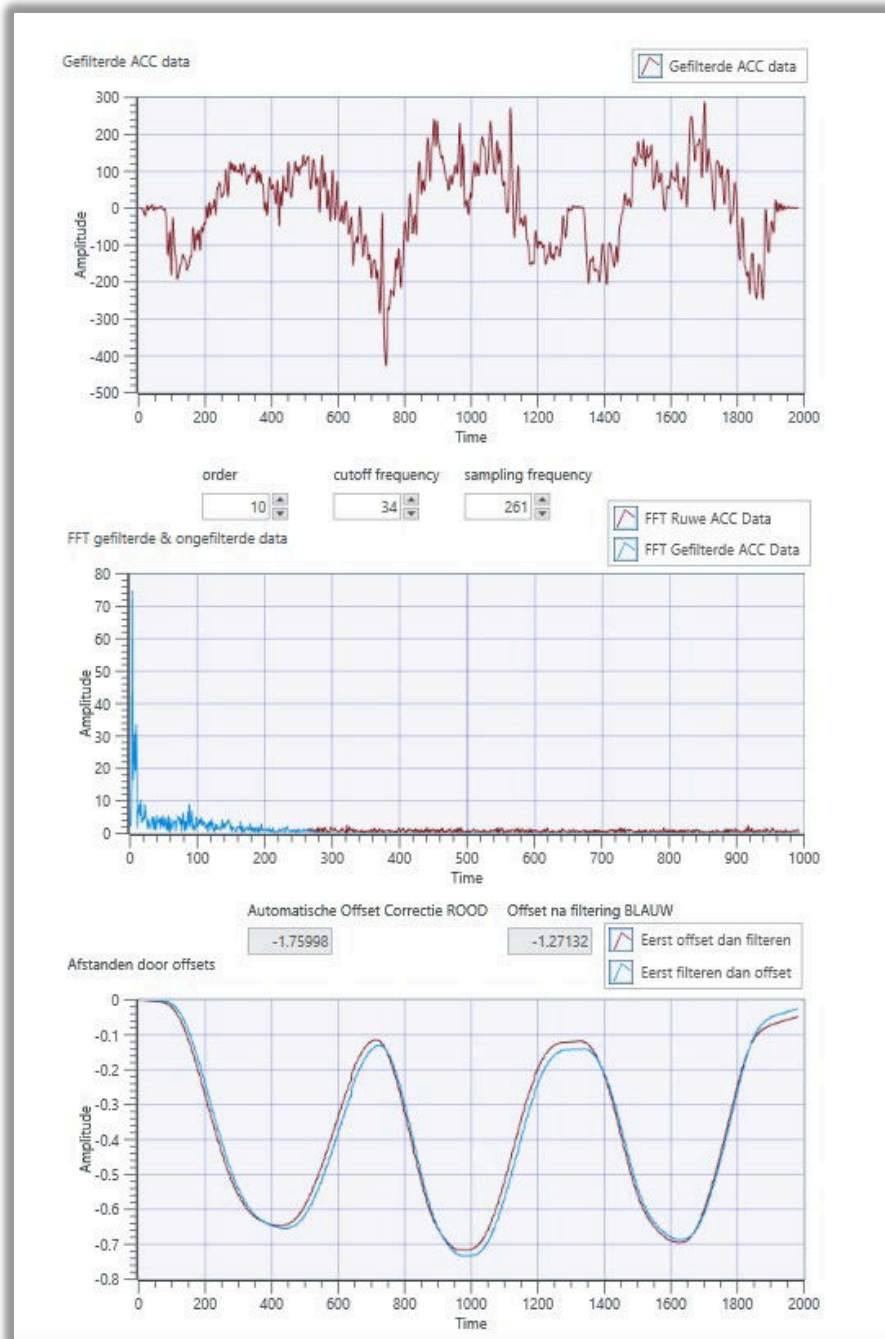
Toch wordt er onderzocht of dit verbeterd kan worden. De tweede grafiek ziet er wel goed uit maar zolang de afstanden niet op 0m en 0,6m liggen is het niet 100% in orde. De afstanden moeten zo nauwkeurig mogelijk gemaakt worden.



Figuur 52 Test A8: 3 maal van punt A naar B en terug

Cutoff frequentie 261Hz

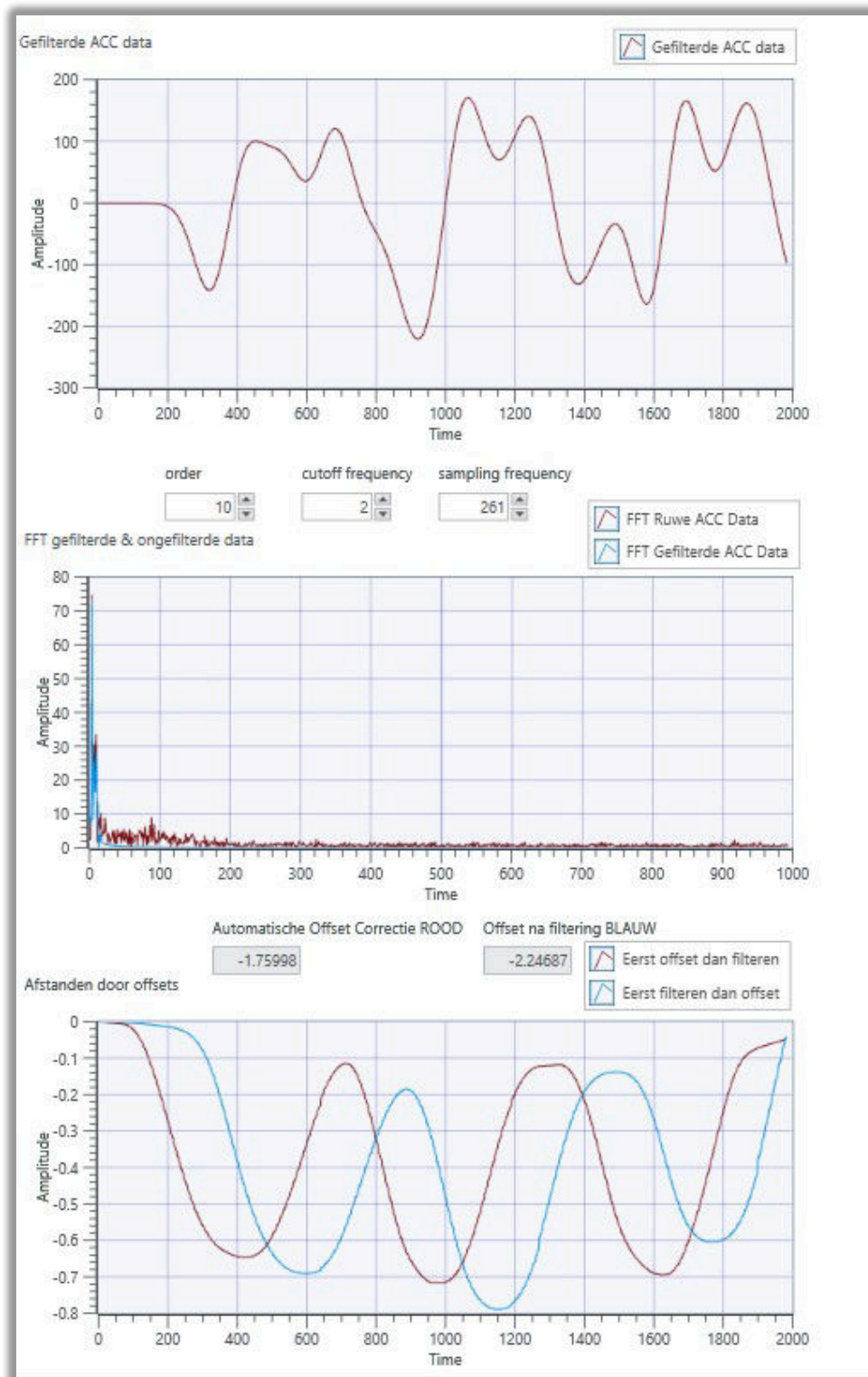
Conclusie: ook deze test bewijst dat filteren op 261Hz niet veel zin heeft, want de afstand wordt er niet beter op.



Figuur 53 Test A8: 261Hz cutoff frequentie

Cutoff frequentie 10Hz

Conclusie: het is duidelijk dat het filteren voor een vertraging zorgt op de data, dus ook op de afstand.

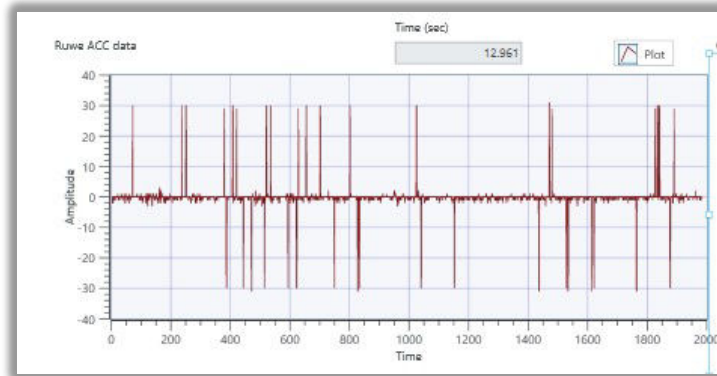


Figuur 54 Test A8: 10Hz cutoff frequentie

6.3.3 A7: 10 seconden niks doen

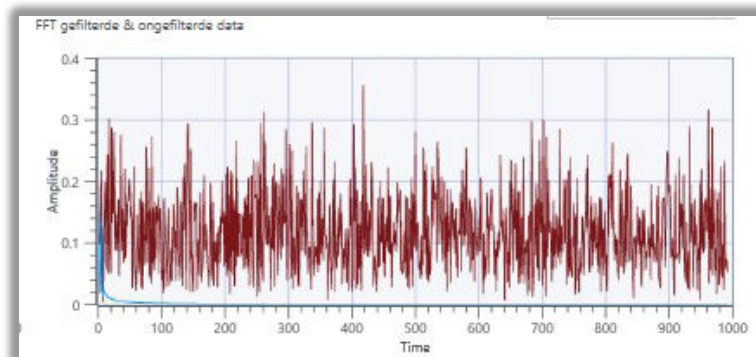
Voor deze test wordt de data van punt 6.1.1.7 hergebruikt. Dit is de data die gemeten wordt indien de sensor 10 seconden niets registreert. Deze test wordt gebruikt om te onderzoeken of de offsetcorrectie via een low-pass filter eruit gefilterd kan worden.

Onderstaande figuur toont aan dat de offset niet constant is gedurende de hele periode. Om de zoveel tijd is er een grote piek. Tussen twee grote pieken is de offset ook niet constant.



Figuur 55 Test A7: ruwe accelerometer data

Onderstaande figuur is de FFT van bovenstaande figuur. Dit bewijst dat de offset niet via een low-pass filter eruit gefilterd kan worden. Want er is geen bepaalde frequentie die boven andere frequenties uitsteekt.



Figuur 56 FFT van testcase A7

6.3.4 Conclusie

Het is duidelijk dat het filteren (low-pass filter) niet veel zin heeft. Daarom is hier meer onderzoek naar gebeurd. Dit komt doordat in de sensor, zowel de accelerometer als de gyroscoop, een low-pass filter ingebouwd is. Hierdoor werd er in de testcases gefilterd op een gefilterd signaal. Dit heeft totaal geen zin tenzij de cutoff frequentie lager ingesteld wordt dan de frequentie die in de sensor zit.

De offset is niet constant doorheen het signaal maar verandert gedeeltelijk. Deze verandering is niet duidelijk te zien op de FFT waardoor deze niet gefilterd kan worden.

Een band-pass filter of high-pass filter zijn getest en afgekeurd. Dit wordt niet verder besproken.

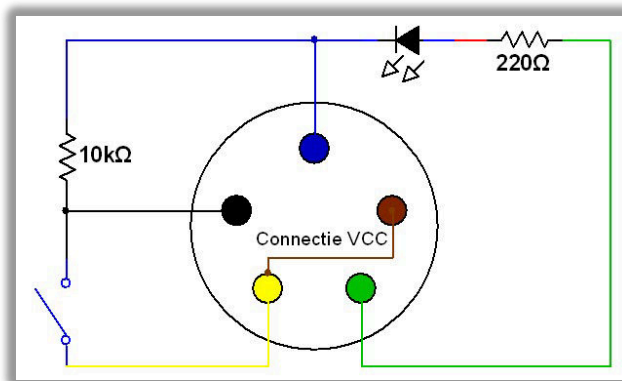
7 Logger (afgewerkte hardware)

De Nucleo, ontworpen PCB en een powerbank zijn in een behuizing geplaatst die verder de logger wordt genoemd. Dit is gedaan om een mooier afgewerkt product te krijgen, maar ook om testsprongen uit een vliegtuig te doen. Hiervoor moet de logger natuurlijk beschermd zijn.

Vanuit de behuizing loopt een kabel. Deze kabel dient voor drie zaken.

1. Voor het aansluiten van de VCC. Twee verbonden draden zorgen ervoor dat de VCC van het bordje geactiveerd wordt.
2. Voor het starten en stoppen van het opslaan van de data door middel van een schakelaar.
3. Om signalen te geven door middel van een led.

De connector van de kabel heeft vijf pinnen. De led, VCC connectie en drukknop worden als onderstaande figuur opgebouwd. Elke kabel heeft zijn eigen kleur. Dit is ook te zien in het schema (blauw, bruin, groen, geel en zwart).



Figuur 57 Schema connector

De logger ziet er als volgt uit.



Figuur 59 Bovenaanzicht logger



Figuur 58 Connector logger



Figuur 60 Logger

De logger heeft enkele testjumps uit een vliegtuig gedaan. Deze zijn telkens mislukt. Hierdoor is er gekozen om de logger op verschillende manieren de lucht in te gooien. Dit heeft als nut om te bekijken hoe de data reageert in vrije val. Onderstaande grafieken zijn de gemeten data van de accelerometer.

7.1 Worp 1

De eerste grafiek is de ruwe data van de accelerometer doorheen de tijd. De tweede grafiek is de ruwe data van de gyroscoop. De waardes op de Y-assen zijn niet in mg of dps, hiervoor moeten ze nog omgerekend worden.

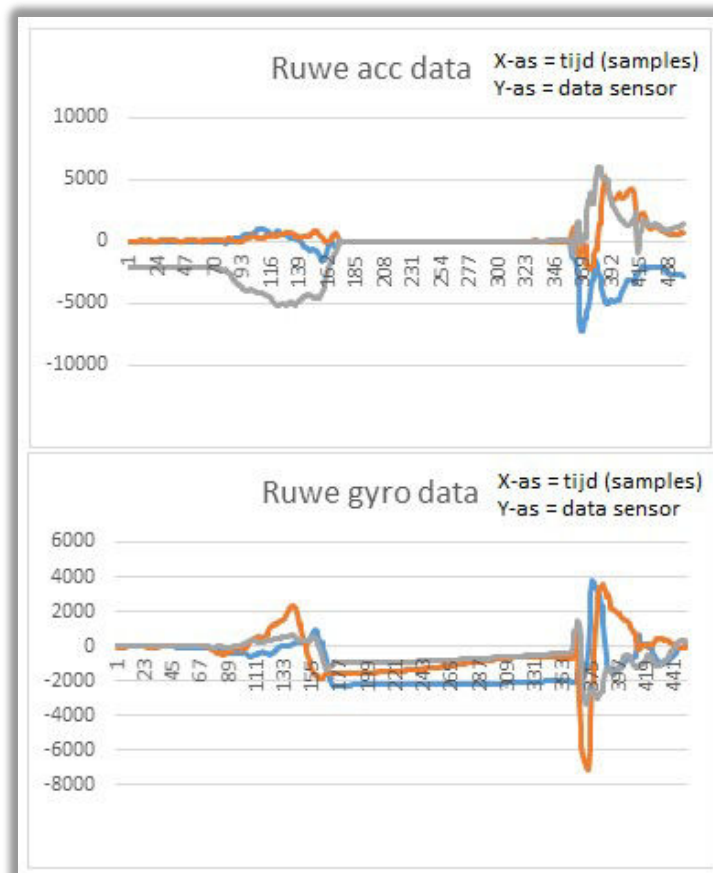
De logger is van een stilstaande beweging de lucht ingegooid en hierna op dezelfde hoogte terug opgevangen.

De data op de Y-as varieert tussen de -32767 en +32767. Deze data wordt omgevormd naar G-waardes of dps-waardes door de formule:

$$\frac{\text{Gemeten waarde}}{32767} \times \text{Ingestelde range}$$
$$\frac{-2000}{32767} \times 16g = -0,977g \text{ (aantrekkingskracht van de aarde)}$$

De grijze lijn (figuur 61, grafiek 1) meet standaard -2000. Dit komt overeen met de aantrekkingskracht van de aarde. Wanneer de logger in de lucht wordt gegooid zal deze waarde afnemen tot -5000. Wanneer de logger zijn hoogtepunt bereikt heeft zal deze starten met vallen en zijn alle acceleraties nul.

De tweede grafiek duidt aan dat tijdens de vrijeval de logger om zijn eigen as draaide. Dit gebeurde heel traag.



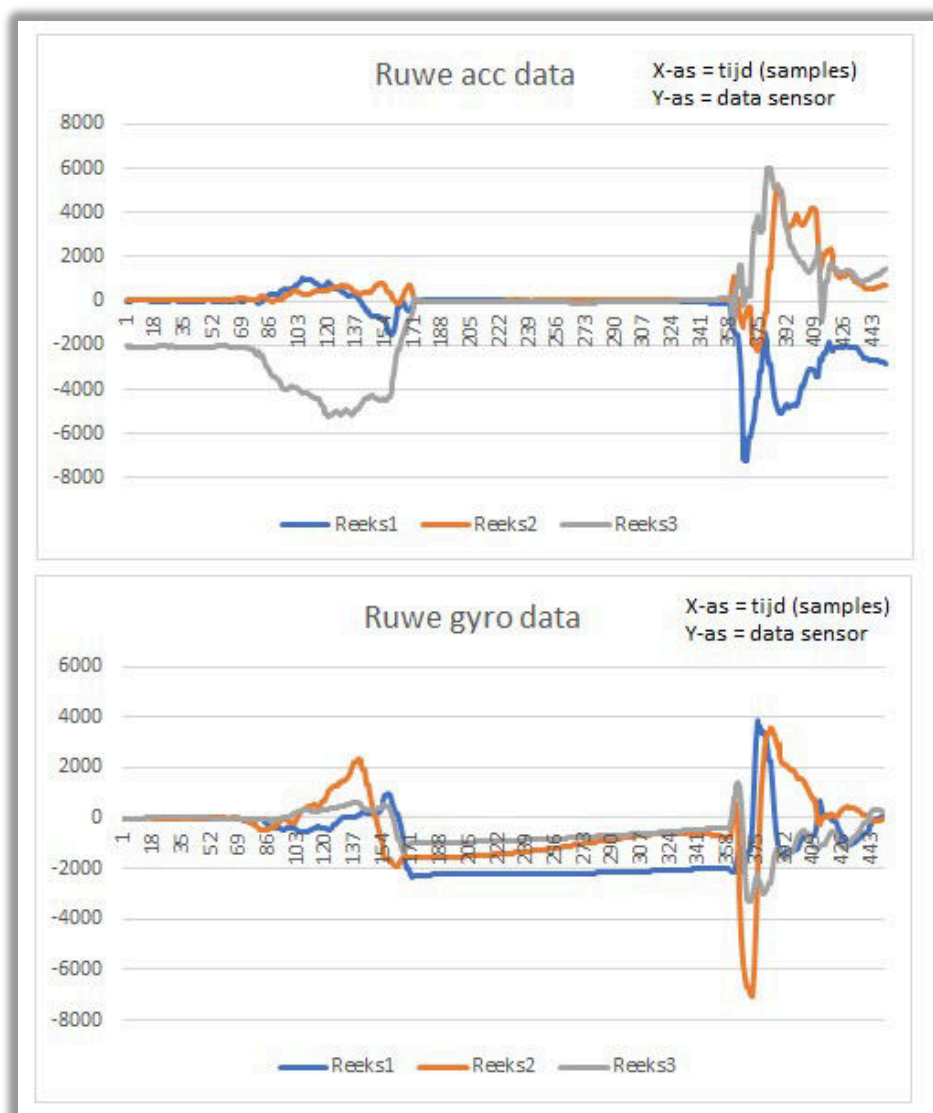
Figuur 61 Worp 1

7.2 Worp 2

De eerste grafiek is de ruwe data van de accelerometer doorheen de tijd. De tweede grafiek is de ruwe data van de gyroscoop. De waardes op de Y-assen zijn niet in mg of dps uitgedrukt, want hiervoor moeten ze nog omgerekend worden.

De logger wordt bij deze worp gegooid met een hoek van 45 graden. Hiermee heeft de logger ook kleine horizontale beweging. Wanneer er uit een vliegtuig gesprongen wordt komt dit ook voor. Want de springer heeft de snelheid van het vliegtuig.

Op de eerste grafiek is het nog duidelijk te zien dat alle waardes van de accelerometer nul worden indien de logger in vrije val is. In werkelijkheid zal de horizontale snelheid die de springer heeft door het vliegtuig snel afnemen waardoor er toch een deacceleratie plaatsvindt (dit kan niet bewezen worden doordat er geen testjumps beschikbaar zijn).



Figuur 62 Worp 2

8 Algemene Conclusie

Doorheen het onderzoek zijn de accelerometer en gyroscoop onderzocht. Deze twee sensoren kunnen niet weggelaten worden bij het meten van een 3D-traject. Het is belangrijk om te weten met welke parameters rekening moet worden gehouden en dat de data uit deze sensoren onbruikbaar is zonder een filter toe te passen. De offset en de aantrekkingskracht van de aarde zijn de twee grootste problemen bij het meten van het 3D-traject

Het meten van een 3D-traject van een skydiver is mogelijk maar er moet met zeer veel verschillende parameters rekening gehouden worden. Het 3D-traject van de skydiver is een van de moeilijkste 3D-trajecten die kunnen plaatsvinden. De snelheden zijn zowel zeer hoog als zeer laag, er is geen fixed area waar de skydiver zich in bevindt, de tijd waarover de meting gebeurt kan hoog oplopen,...

Met deze gedachtegang wordt dit onderzoek afrond en kan een nieuw en dieper onderzoek starten op het 3D-traject van een skydiver met de nadruk op het filteren van de data en de zwaartekracht van de aarde.

9 Bijlagen

Bijlage 1: onderzoek sensoren

De sensoren die in het groen zijn aangeduid zijn de gekozen sensoren waarmee verder gewerkt is.

Bijlage 2: ingestelde parameters van de processor (STM32CubeMx)

Alle ingestelde eigenschappen van de processor voor dit onderzoek.

10 Bibliografie

- [1] ST, „Datasheet LIS331HH,” 10 2009. [Online]. Available: http://be.farnell.com/stmicroelectronics/lis331hh/accelerometer-mems-3axis-16lga/dp/1838525?mckv=sfsjCZnTU_dc|pcrid|175432093837|kword|lis331hh|match|e|p|lid|&CMP=KNC-GBE-GEN-SKU-MDC&gclid=CjwKEAiAz4XFBRCW87vj6-28uFMSJAAHeGZbmCp1mu7vbpYRpkrmM8M-n7XFigajTNh.
- [2] ST, „Datasheet LSM6DS0,” 11 2014. [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/1878202.pdf?_ga=1.12959287.1654968829.1424168254.
- [3] Bosch, „Datasheet BMI160,” 10 02 2015. [Online]. Available: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMI160-DS000-07.pdf.
- [4] Invensense, „Invensense products motion tracking,” Invensense, [Online]. Available: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/>.
- [5] MBED, „NUCLEO-L476RG,” [Online].
- [6] MBED, „X-NUCLEO-IKS01A1 - Motion MEMS and Environmental Sensors,” [Online]. Available: <https://developer.mbed.org/components/X-NUCLEO-IKS01A1/>.
- [7] MBED, „NUCLEO-F411RE,” [Online]. Available: <https://developer.mbed.org/platforms/ST-Nucleo-F411RE/>.
- [8] ST, „Datasheet LIS3DH,” 12 2016. [Online]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/3c/ae/50/85/d6/b1/46/fe/CD00274221.pdf/files/CD00274221.pdf/jcr:content/translations/en.CD00274221.pdf>.
- [9] ST, „Datasheet LSM303AGR,” 09 2016. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/389/lsm303agr-954987.pdf>.
- [10] Freescale, „Datasheet FXAS21002C,” 2014-2015. [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/1941770.pdf?_ga=2.257061771.1057689783.1495529798-1654968829.1424168254.
- [11] ST, „Datasheet L3G4200D,” 12 2014. [Online]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/04/46/d6/00/be/d9/46/ae/CD00265057.pdf/files/CD00265057.pdf/jcr:content/translations/en.CD00265057.pdf>.

- [12] St, „Datasheet L3GD20H,” 03 2013. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/389/l3gd20h-954865.pdf>.
- [13] Invensense, „Datasheet ITG-3200,” [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/887152.pdf?_ga=2.35568737.1732857147.1495530184-1654968829.1424168254.
- [14] B. Sensortech, „datasheet BMG160,” 31 05 2013. [Online]. Available: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Bosch/BMG160.pdf>.
- [15] ST, „Datasheet I3G4250D,” 04 2015. [Online]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/b1/d1/62/1a/e6/44/2f/DM00168691.pdf/files/DM00168691.pdf/jcr:content/translations/en.DM00168691.pdf>.
- [16] ST, „Datasheet LIS2DH12,” [Online].
- [17] ST, „Datasheet LIS2DH12,” 12 2015. [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/2006544.pdf?_ga=2.230345564.1147620469.1495530737-1654968829.1424168254.
- [18] mCube, „Datasheet MC3635,” 2017. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/693/MC3635-Preliminary-Datasheet-APS-048-0044v1.4-1100395.pdf>.
- [19] NXP, „Datasheet MMA8451Q,” 05 2016. [Online]. Available: <http://www.mouser.com/ds/2/302/MMA8451Q-784063.pdf>.
- [20] A. Decives, „datasheet ADXL362,” [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/1870284.pdf?_ga=2.111504900.1888746490.1495530942-1654968829.1424168254.
- [21] A. Devices, „Datasheet ADXL343,” [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/2243358.pdf?_ga=2.261376845.1788857090.1495531151-1654968829.1424168254.
- [22] A. Devices, „Datasheet ADXL345-EP,” [Online]. Available: http://www.farnell.com/datasheets/1877606.pdf?_ga=2.73567376.306152456.1495531200-1654968829.1424168254.
- [23] B. Sensortech, „Datasheet BMA280,” 1 08 2014. [Online]. Available: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMA280-DS000-11_published.pdf.

- [24] Kionix, „Datasheet KXTJ3-1057,” 10 11 2016. [Online]. Available:
<http://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXTJ3-1057%20Specifications%20Rev%202.0.pdf>.
- [25] ST, „Datasheet LSM9DS1,” 03 2015. [Online]. Available:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/1e/3f/2a/d6/25/eb/48/46/DM00103319.pdf/files/DM00103319.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103319.pdf>.

BIJLAGE 1: onderzoek sensoren

<u>Wat: accelerometer</u>	<u>Merk</u>	<u>Type</u>	<u>Acceleration Range</u>	<u>Sensitivity accelerometer</u>	<u>Offset accelerometer</u>	<u>Samples</u>	<u>Stroomverbruik</u>
Accelerometer [1]	ST	LIS2DH12TR	±2/4/8/16g	±16g → 12mg/digit	±2g →40mg	100/200/400/1433/ 1620/5376Hz	185µA
Accelerometer [2]	mCube	MC3635	±2/4/8/12/16g	8 g →4096LSB/g	ODR ≤ 400Hz → 40mg ODR => 400Hz → 150 mg	25/50/100/1300Hz	36µA
Accelerometer (Van de FRDM-SFUSION) [3]	NXP	MMA7455LR1	±2/4/6g	6g → 4096count/g	17mg	6,25/12,5/50/100/200/ 400/800Hz	165µA
Accelerometer & Gyroscop [4]	Bosch Sensortec	BMI160 Bosch	±2/4/8/16g	±16g → 2048LSB/g	±40mg	1600Hz ... 25/32Hz	950µA
Accelerometer [5]	ANALOG DEVICES	ADXL362BCCZ	±2/4/8/16g	±16g → 31,2mg/LSB	±40mg	100/800/1600/3200Hz	140µA
Accelerometer [6]	ANALOG DEVICES	ADXL343BCCZ	±2/4/8/16g	±16g → 31,2mg/LSB	±35mg	100/800Hz/1600Hz/ 3200Hz	140µA
Accelerometer [7]	ANALOG DEVICES	ADXL345TCCZ-EP	±2/4/8/16g	±16 g → 31,2mg/LSB	±40mg	100/800/1600/3200Hz	140µA
Gyroscop & Accelerometer [8]	Invensense	ICM-20601 (High speed motion analysis)	±4/8/16/32g	2048LSB/g - 1024LSB/g	±60mg	10/100/500/4000 Hz	390µA
Gyroscope & Accelerometer [8]	Invensense	IAM-20680 (Motion tacking)	±2/4/8/16g	2048LSB/g	Geen datasheet	Geen datasheet	Geen datasheet
Accelerometer [9]	Bosh sensortec	BMA280	±2/4/8/16g	525LSB/g	±50mg	8/16/31/63/125/250/ 500/2000Hz	130µA
Accelerometer [10]	Kionix	KXTJ3-1057	±2/4/8/16g	512counts/g	±25mg	25/50/100/400/1600	40µA – 160µ

<u>Wat: linear accelerometer</u>	<u>Merk</u>	<u>Type</u>	<u>Acceleration Range</u>	<u>Sensitivity accelerometer</u>	<u>Offset accelerometer</u>	<u>Samples</u>	<u>Stroom verbruik</u>
Linear accelerometer & Gyroscop & Magnetometer [11]	ST	LSM9DS1	±2/4/8/16g	±16 g → 0,732mg/LSB	±8g → ±90mg	14,9/59,5/119 238/476/952Hz	4,3mA
Accelerometer & Gyroscop (Nucleo 64 sensor schild) [12]	ST	LSM6DS0	±2/4/8/16g	±16g → 0,732mg/LSB	±8g → ±90mg	14,9/59,5/119/ 238/476/952Hz	4mA
Linear Accelerometer [13]	ST	lis331hh	±6/12/24g	±24g → 12mg/digit	±6g → ±70mg	50/100/400/1000Hz	250µA
Linear accelerometer (Farnell & Mouser niet meer geproduceerd) [14]	ST	LIS3DH	±2/4/8/16g	±16g → 12mg/digit	±2g → 40mg	1/10/25/50/100/200/ 400/1,25k/1,6k/5kHz	50Hz → 11µA
Linear accelerometer & Magnetometer [15]	ST	LSM303A (20/02/2017 geschatte verzend tijd)	±2/4/8/16g	±16g → 11,72mg/digit	(±7%)	1/10/25/50/100/200/ 400Hz	3,7µA → 75µA

<u>Wat: gyroscoop</u>	<u>Merk</u>	<u>Type</u>	<u>Angular rate</u>	<u>Sensitivity Gyroscope</u>	<u>Offset gyroscope</u>	<u>Samples</u>	<u>Stroom verbruik</u>
Linear accelerometer & Gyroscoop & Magnetometer [11]	ST	LSM9DS1	±245/500/2000dps	±2000dps → 70mdps/LSB	±2000dps → ±30dps	14,9/59,5/119/238/476/952Hz	4,3mA
Accelerometer & Gyroscoop (Nucleo 64 sensor schild) [12]	ST	LSM6DS0	±245/500/2000dps	±2000dps → 70mdps/LSB	±2000dps → ±30dps	14,9/59,5/119/238/476/952Hz	4mA
Gyroscoop (Van de FRDM-SFUSION) [16]	NXP	FXAS21000	±250/500/1000/2000dps	±2000dps → 62,5mdps/LSB	±2000dps → ±25dps	12,5 ... 800Hz	2,7mA
Gyroscoop [17]	ST	L3G4200D	±250/500/2000dps	±2000dps → ±70dps/LSB	±2000dps → ±75dps	100/200/400/800Hz	6,1mA
Gyroscoop [18]	ST	L3GD20H	±245/500/2000dps	±2000dps → ±70dps/LSB	±2000dps → ±25dps	11,9/23,7/ 47,3/94,7/ 189,4/ 378,8/757,6Hz	5mA
Gyroscoop & Accelerometer [4]	Bosch Sensortec	BMI160 Bosch	±125/250/500/1000/2000dps	±2000dps → 16,4LSB/dps	±10dps	25/32Hz ... 1600Hz	950µA
Gyroscoop [19]	Invensense	ITG-3200	±2000dps	14,375LSB/dps	±40dps	1024Hz / 8192Hz	100µA
Gyroscoop & Accelerometer [8]	Invensense	ICM-20601 (High speed motion analysis)	±500/1000/2000/4000dps	16,4 LBS/dps – 8,2LBS/dps	±5dps	10/100/500/8000 Hz	2.6mA (Enkel Gyroscoop)

Gyroscoop & Accelerometer [8]	Invensense	IAM-20680 (Motion tacking)	±250/ 500/1000/ 2000dps	16,4LSB/dps			
Gyroscoop [20]	Bosch Sensortec	BMG160	±125/250/ 500/1000/ 2000dps	262,4LSB/dps	±1dps	100/200/400/1000/ 2000Hz	5mA
Gyroscoop [17]	ST	I3G4250D	245/500/ 2000Hz	70mdps/digit	±75dps	105/208/420/840Hz	6,1mA

BIJLAGE 2: ingestelde parameters van de processor (STM32CubeMx)

1. Description

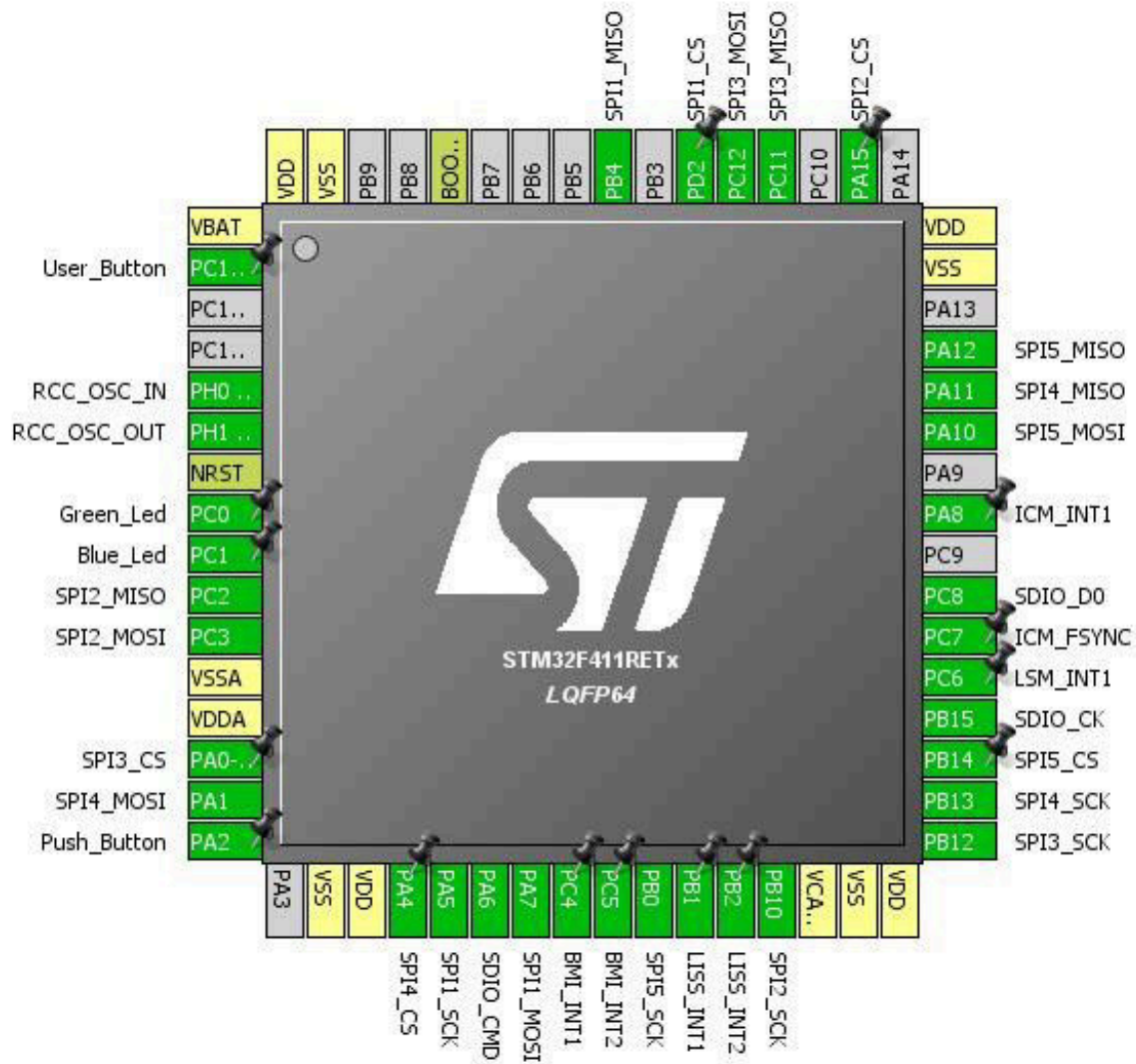
1.1. Project

Project Name	test_jumps
Board Name	test_jumps
Generated with:	STM32CubeMX 4.19.0
Date	06/01/2017

1.2. MCU

MCU Series	STM32F4
MCU Line	STM32F411
MCU name	STM32F411RETx
MCU Package	LQFP64
MCU Pin number	64

2. Pinout Configuration



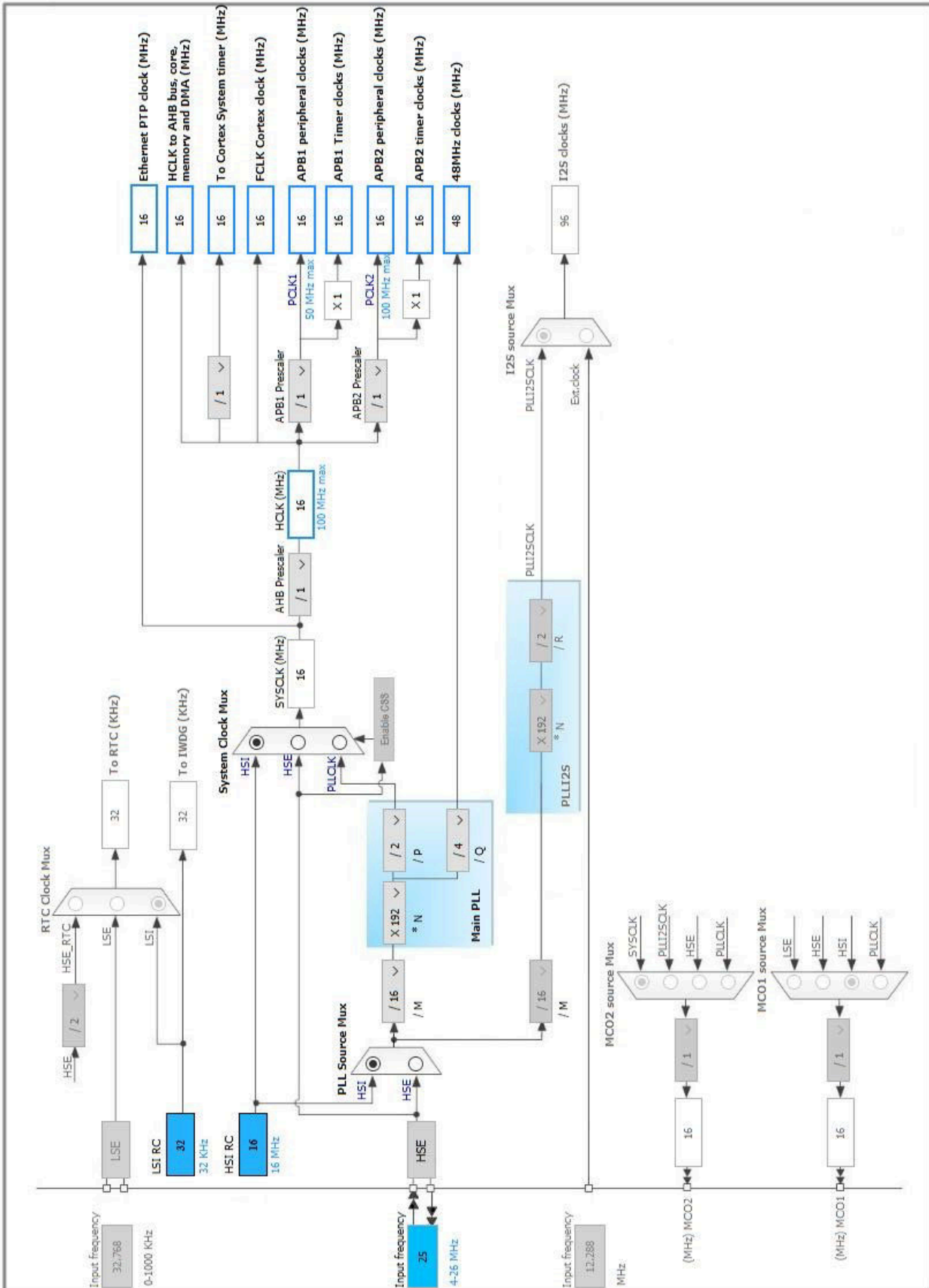
3. Pins Configuration

Pin Number LQFP64	Pin Name (function after reset)	Pin Type	Alternate Function(s)	Label
1	VBAT	Power		
2	PC13-ANTI_TAMP *	I/O	GPIO_Output	User_Button
5	PH0 - OSC_IN	I/O	RCC_OSC_IN	
6	PH1 - OSC_OUT	I/O	RCC_OSC_OUT	
7	NRST	Reset		
8	PC0 *	I/O	GPIO_Output	Green_Led
9	PC1 *	I/O	GPIO_Output	Blue_Led
10	PC2	I/O	SPI2_MISO	
11	PC3	I/O	SPI2_MOSI	
12	VSSA	Power		
13	VDDA	Power		
14	PA0-WKUP *	I/O	GPIO_Output	SPI3_CS
15	PA1	I/O	SPI4_MOSI	
16	PA2 *	I/O	GPIO_Input	Push_Button
18	VSS	Power		
19	VDD	Power		
20	PA4 *	I/O	GPIO_Output	SPI4_CS
21	PA5	I/O	SPI1_SCK	
22	PA6	I/O	SDIO_CMD	
23	PA7	I/O	SPI1_MOSI	
24	PC4 *	I/O	GPIO_Output	BMI_INT1
25	PC5 *	I/O	GPIO_Output	BMI_INT2
26	PB0	I/O	SPI5_SCK	
27	PB1 *	I/O	GPIO_Output	LISS_INT1
28	PB2 *	I/O	GPIO_Output	LISS_INT2
29	PB10	I/O	SPI2_SCK	
30	VCAP1	Power		
31	VSS	Power		
32	VDD	Power		
33	PB12	I/O	SPI3_SCK	
34	PB13	I/O	SPI4_SCK	
35	PB14 *	I/O	GPIO_Output	SPI5_CS
36	PB15	I/O	SDIO_CK	
37	PC6 *	I/O	GPIO_Output	LSM_INT1
38	PC7 *	I/O	GPIO_Output	ICM_FSYNC
39	PC8	I/O	SDIO_D0	

Pin Number LQFP64	Pin Name (function after reset)	Pin Type	Alternate Function(s)	Label
41	PA8 *	I/O	GPIO_Output	ICM_INT1
43	PA10	I/O	SPI5_MOSI	
44	PA11	I/O	SPI4_MISO	
45	PA12	I/O	SPI5_MISO	
47	VSS	Power		
48	VDD	Power		
50	PA15 *	I/O	GPIO_Output	SPI2_CS
52	PC11	I/O	SPI3_MISO	
53	PC12	I/O	SPI3_MOSI	
54	PD2 *	I/O	GPIO_Output	SPI1_CS
56	PB4	I/O	SPI1_MISO	
60	BOOT0	Boot		
63	VSS	Power		
64	VDD	Power		

* The pin is affected with an I/O function

4. Clock Tree Configuration



5. IPs and Middleware Configuration

5.1. RCC

High Speed Clock (HSE): Crystal/Ceramic Resonator

5.1.1. Parameter Settings:

System Parameters:

VDD voltage (V)	3.3
Instruction Cache	Enabled
Prefetch Buffer	Enabled
Data Cache	Enabled
Flash Latency(WS)	0 WS (1 CPU cycle)

RCC Parameters:

HSI Calibration Value	16
TIM Prescaler Selection	Disabled
HSE Startup Timeout Value (ms)	100
LSE Startup Timeout Value (ms)	5000

Power Parameters:

Power Regulator Voltage Scale	Power Regulator Voltage Scale 1
-------------------------------	---------------------------------

5.2. SDIO

Mode: SD 1 bit

5.2.1. Parameter Settings:

SDIO parameters:

SDIOCLK clock divide factor	0
-----------------------------	---

5.3. SPI1

Mode: Full-Duplex Master

5.3.1. Parameter Settings:

Basic Parameters:

Frame Format	Motorola
Data Size	8 Bits
First Bit	MSB First

Clock Parameters:

Prescaler (for Baud Rate)	2
Baud Rate	8.0 MBits/s *
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	1 Edge

Advanced Parameters:

CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

5.4. SPI2

Mode: Full-Duplex Master

5.4.1. Parameter Settings:

Basic Parameters:

Frame Format	Motorola
Data Size	8 Bits
First Bit	MSB First

Clock Parameters:

Prescaler (for Baud Rate)	2
Baud Rate	8.0 MBits/s *
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	1 Edge

Advanced Parameters:

CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

5.5. SPI3

Mode: Full-Duplex Master

5.5.1. Parameter Settings:

Basic Parameters:

Frame Format	Motorola
Data Size	8 Bits
First Bit	MSB First

Clock Parameters:

Prescaler (for Baud Rate)	2
Baud Rate	8.0 MBits/s *
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	1 Edge

Advanced Parameters:

CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

5.6. SPI4

Mode: Full-Duplex Master

5.6.1. Parameter Settings:

Basic Parameters:

Frame Format	Motorola
Data Size	8 Bits
First Bit	MSB First

Clock Parameters:

Prescaler (for Baud Rate)	2
Baud Rate	8.0 MBits/s *
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	1 Edge

Advanced Parameters:

CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

5.7. SPI5

Mode: Full-Duplex Master

5.7.1. Parameter Settings:

Basic Parameters:

Frame Format	Motorola
Data Size	8 Bits
First Bit	MSB First

Clock Parameters:

Prescaler (for Baud Rate)	2
Baud Rate	8.0 MBits/s *
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	1 Edge

Advanced Parameters:

CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

5.8. SYS

Timebase Source: SysTick

5.9. FATFS

mode: SD Card

5.9.1. Set Defines:

Version:

FATFS version	R0.11
---------------	-------

Function Parameters:

FS_TINY (Tiny mode)	Disabled
FS_READONLY (Read-only mode)	Disabled
FS_MINIMIZE (Minimization level)	Disabled
USE_STRFUNC (String functions)	Enabled with LF -> CRLF conversion
USE_FIND (Find functions)	Disabled
USE_MKFS (Make filesystem function)	Enabled
USE_FORWARD (Forward function)	Disabled
USE_LABEL (Volume label functions)	Disabled
USE_FASTSEEK (Fast seek function)	Enabled

Locale and Namespace Parameters:

CODE_PAGE (Code page on target)	Latin 1 (Windows)
USE_LFN (Use Long Filename)	Disabled

MAX_LFN (Max Long Filename)	255
LFN_UNICODE (Enable Unicode)	ANSI/OEM
STRF_ENCODE (Character encoding)	UTF-8
FS_RPATH (Relative Path)	Disabled

Physical Drive Parameters:

VOLUMES (Logical drives)	1
MAX_SS (Maximum Sector Size)	512
MIN_SS (Minimum Sector Size)	512
MULTI_PARTITION (Volume partitions feature)	Disabled
USE_TRIM (Erase feature)	Disabled
FS_NOFSINFO (Force full FAT scan)	0

System Parameters:

FS_NORTC (Timestamp feature)	Dynamic timestamp
NORTC_YEAR (Year for timestamp)	2015
NORTC_MON (Month for timestamp)	6
NORTC_MDAY (Day for timestamp)	4
WORD_ACCESS (Platform dependent access option)	Byte access
FS_REENRANT (Re-Entrancy)	Disabled
FS_TIMEOUT (Timeout ticks)	1000
SYNC_t (O/S sync object)	osSemaphoreId
FS_LOCK (Number of files opened simultaneously)	2

5.9.2. IPs instances:

SDIO/SDMMC:

SDIO instance	SDIO
---------------	------

* User modified value