

2014•2015  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: energie*

## Masterproef

Zelfkalibratie van laserscannerpose en odometrieparameters voor mobiele robots met magnetische wiel-encoders

Promotor :  
dr. ir. Eric DEMEESTER  
dr. ir. Johan BAETEN

Pieter Gijsen , Gertjan Janssen

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie*

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2014•2015  
Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen  
*master in de industriële wetenschappen: energie*

## Masterproef

Zelfkalibratie van laserscannerpose en  
odometrieparameters voor mobiele robots met magnetische  
wiel-encoders

Promotor :  
dr. ir. Eric DEMEESTER  
dr. ir. Johan BAETEN

Pieter Gijsen , Gertjan Janssen

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: energie*

# Woord vooraf

Als masterstudenten sluiten wij onze opleiding Industrieel Ingenieur aan de UHasselt – KU Leuven af met deze masterproef. Deze thesis werd door ons afgewerkt in het onderzoekscentrum ACRO te Diepenbeek. Onze docent, later ook onze promotor, dr. ir. Demeester Eric wakkerde onze interesse voor deze thesis aan. Onze thesis werkt verder op een reeds afgelopen onderzoeksproject waar onze promotor deel van uitmaakte. Dit project werd uitgevoerd onder de naam RADHAR FP7 (Robotic ADaptation to Humans Adapting to Robots).

In onze vriendenkring vonden we een extra motivatie voor het kiezen van dit onderwerp. We kennen een jongen met een lichamelijke beperking. Door aangeboren spierdystrofie, verzwakking van spieren, zit hij in een rolstoel. Omdat deze ziekte progressief verloopt, wordt het besturen van zijn elektrische rolstoel steeds moeilijker. Nochtans is het zelfstandig kunnen deelnemen aan sociale activiteiten afhankelijk van het zelf kunnen besturen van zijn rolstoel. Dit project kan zijn leven gemakkelijker maken maar ook dat van andere rolstoel-afhankelijke personen. Daarbij lag het volledig in de lijn van onze afstudeerrichting, industrieel ingenieur energie/automatisatie.

Tijdens het uitwerken van deze thesis konden we steeds rekenen op de hulp van een aantal personen. Via deze weg willen we deze mensen extra bedanken. Allereerst zijn we onze promotor dr. ir. Demeester Eric zeer dankbaar. Hij stond ons steeds bij met advies en ervaring op het gebied van robotica. Ook willen we dr. Lievens Jeroen bedanken voor het taalkundig advies. Eveneens bedanken we dr. ir. Deferme Wim en ing. Coenegracht Luc voor de tijd die zij vrijmaakten om onze vragen te beantwoorden. We danken ook ACRO en hun medewerkers die ons bijstonden met raad en voor het verkrijgen van materieel waarmee onze testopstellingen gebouwd konden worden. Verder willen we ook de school en docenten bedanken die ons de kennis bijbrachten waardoor het uitvoeren van deze masterproef mogelijk werd. Tot slot zouden we graag onze ouders bedanken voor de mogelijkheden die ze ons gegeven hebben, voor hun hulp en hun onvoorwaardelijke steun.



# Inhoudsopgave

<b>Woord vooraf.....</b>	<b>1</b>
<b>Lijst van tabellen.....</b>	<b>7</b>
<b>Lijst van figuren.....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>13</b>
<b>Abstract in English.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Inleiding.....</b>	<b>17</b>
1.1    Situering.....	17
1.2    Probleemstelling.....	18
1.3    Doelstellingen.....	20
1.4    Methode.....	20
<b>2 Literatuurstudie.....</b>	<b>23</b>
2.1    Absolute of incrementele encoders.....	23
2.2    Contactloze encoders.....	24
2.2.1    Magnetische encoders.....	24
2.2.2    Optische encoder.....	25
2.3    Soorten uitgangssignalen.....	26
2.3.1    Analoog signaal.....	27
2.3.2    Digitaal signaal.....	28
2.4    Encodernauwkeurigheid en -resolutie.....	29
2.5    Encoders uitlezen.....	29
2.5.1    Kwadratuur decodering.....	30
2.5.2    Aansluitingen van encoder.....	32
2.5.3    Data-acquisitie.....	32
<b>3 Analyse van ruis op de encoders.....</b>	<b>35</b>
3.1    Fout op de hoek per omwenteling.....	37
3.2    Analyse in Matlab met kleinste-kwadratenmethode.....	37
3.3    Testopstelling.....	42
3.4    Analyse in Matlab: vergelijking met optische encoder.....	43
3.5    Mogelijke foutbronnen.....	45

3.5.1	De ideale situatie .....	46
3.5.2	Niet-uniforme verdeling .....	46
3.5.3	Mechanische afkomst .....	47
3.5.4	DAQ-kaart .....	49
3.5.5	Signaal uitgang symmetrie .....	50
3.5.6	Magnetische hysteresis .....	52
3.5.7	Interpolatiefout .....	52
3.5.8	Drift .....	53
3.5.9	Referentiepuls .....	53
3.5.10	Grootte van de fout .....	54
3.5.11	Encodervoeding- en omgeving .....	55
3.5.12	Elektromagnetische invloed .....	56
3.5.13	Hardware en software vertragingen .....	57
3.5.14	Plaatsing encoder .....	60
3.6	Mogelijke oplossingen .....	64
3.6.1	Meerdere encoders .....	64
3.6.2	Foutentabel .....	64
3.6.3	Filter .....	67
<b>4</b>	<b>Laserscanner .....</b>	<b>73</b>
4.1	Methode .....	73
4.2	Opbouw scan .....	73
<b>5</b>	<b>Kalibratie .....</b>	<b>75</b>
5.1	Odometrie fouten .....	75
5.2	Alternatieve methode .....	76
5.3	Gebruikte kalibratieprocedure .....	76
5.3.1	Kalibratie algoritme .....	77
5.3.2	Scan matcher .....	77
5.4	Experimenten .....	78
5.4.1	Verschillende parcours .....	78
5.4.2	Invloed filter .....	81
5.4.3	Invloed patiënt .....	88
5.4.4	Invloed ondergrond .....	88
5.4.5	Positiewijziging laserscanner .....	89
5.4.6	Extra controle resultaten .....	92

<b>6 Conclusie.....</b>	<b>95</b>
<b>Literatuurlijst.....</b>	<b>97</b>
<b>Bijlage.....</b>	<b>99</b>





# Lijst van tabellen

Tabel 1 Opbouw van dataset encodermeting .....	37
Tabel 2 Datasheet MDFK10G [10] .....	55
Tabel 3 Voorbeeld foutentabel.....	64
Tabel 4 Gemeten parameters.....	78
Tabel 5 Kalibratieparameters na samenvoeging file8, file9 en file10.....	79
Tabel 6 Resultaten metingen.....	80
Tabel 7 Kalibratieparameters file21 zonder filter en met filter .....	81
Tabel 8 Kalibratieparameters file20 en file24.....	88
Tabel 9 Kalibratieparameters file21 en file22.....	89
Tabel 10 Kalibratieparameters file21 en file17.....	90
Tabel 11 Kalibratieparameters file18 en file19.....	91



# Lijst van figuren

Figuur 1	Overzicht van onderdelen op de ter beschikking gestelde rolstoel.....	18
Figuur 2	Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 100 Hz. ....	19
Figuur 3	Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 50 Hz. ....	20
Figuur 4	Bevestiging van magnetische encoder en magneetring op de aandrijfjas.....	23
Figuur 5	Magneto-resistive sensorelektronica van één signaal [4].....	25
Figuur 6	Een magneetsensor en magneetring [5].....	25
Figuur 7	Verschillende schijven: a) incrementeel, b) absolute Gray code, c) absolute binaire code .....	26
Figuur 8	Sin/cos signalen met een index puls [7] .....	27
Figuur 9	Interpolatie van een sinusgolf door een comparator [8] .....	28
Figuur 10	Digitale encoder uitgangssignalen met een indexpuls [7] .....	28
Figuur 11	Encoders met X1 meting [9].....	30
Figuur 12	Encoders met X2 meting [9].....	31
Figuur 13	Encoders met X4 meting [9].....	31
Figuur 14	Incrementele encoder pinout Baumer MDFK 10 [10].....	32
Figuur 15	Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 200 Hz. ....	36
Figuur 16	Twee mogelijke fundamenteën van de kleinste-kwadratenmethode [12] .....	38
Figuur 17	Fout op de magnetische encoderhoek voor een volledige omwenteling, gemeten ten opzichte van de werkelijke (gefitte) hoek .....	40
Figuur 18	Histogram van de fout (via kleinste-kwadratenmethode) op de hoek – magnetische encoder .....	41
Figuur 19	Gemiddelde fout (via kleinste-kwadratenmethode) op de hoek – magnetische encoder .....	42
Figuur 20	Ontworpen testopstelling om magnetische encoder en optische encoder te vergelijken .....	42
Figuur 21	Programmatie van de optische encoder .....	43
Figuur 22	Gemiddelde fout op de hoek (via kleinste-kwadratenmethode) - optische encoder ..	44
Figuur 23	Histogram van de fout (via kleinste-kwadratenmethode) op de hoek - optische encoder .....	44
Figuur 24	De fout op de hoek (magnetische encoder) ten opzichte van de optische encoder....	45
Figuur 25	drie typische foutbronnen van een incrementele encoder [14] .....	45
Figuur 26	Visualisatie van de encoderring polen met ijzervijzel .....	46
Figuur 27	Visualisatie van magnetische polen [15] .....	47
Figuur 28	Verduidelijking plaats- en vormtoleranties [16].....	48
Figuur 29	Gevoeligheid van de magneetsensor voor installatiefouten [14].....	49
Figuur 30	Voorbeeld drempelwaarde.....	49

Figuur 31 Voorbeeld verschil uitleestijd ideaal en huidig signaal .....	50
Figuur 32 Weergave jitter gebied op encodersignaal .....	50
Figuur 33 Verschil ideaal signaal en encodersignaal bij constante snelheidssturing .....	51
Figuur 34 Encodermeting constante snelheid .....	51
Figuur 35 Magnetische hysteresis lus [18].....	52
Figuur 36 Baumer datasheet MDFK10G: magneet rotor met referentie magneet [10].....	53
Figuur 37 Afgelegde afstand $x$ van het wiel .....	54
Figuur 38 Rotatie hoek $\theta$ van rolstoel ten opzichte van stilstaand wiel.....	54
Figuur 39 DC-DC convertor bij hoge snelheid .....	55
Figuur 40 Encodersignalen bij rolstoelvoeding en externe voeding .....	56
Figuur 41 a) Externe opstelling van encoder b) Externe opstelling meting van CHA encoder c) Rolstoel opstelling meting van CHA encoder.....	57
Figuur 42 De soorten vertragingen met hun bijhorende timing [19].....	58
Figuur 43 Snelheid meting met een bemonsteringsfrequentie naar de DAQ-kaart van 1 ms. ....	59
Figuur 44 Snelheid meting met een bemonsteringsfrequentie naar de DAQ-kaart van 5 ms. ....	59
Figuur 45 Typische incrementele encoder fouten [11] .....	60
Figuur 46 Datasheet Baumer plaats toleranties MDFK10G [10].....	61
Figuur 47 Grote axiale wijziging op de linkse encoder.....	62
Figuur 48 Werkafstand tussen linkse sensor en ring vergroot .....	63
Figuur 49 Linkse encodersensor onder verkeerde hoek geplaatst.....	63
Figuur 50 Fout op de hoek (blauw) gemiddelde fout op de hoek (groen) t.o.v. de optische.....	65
Figuur 51 Resulterende fout na gebruik van fouten tabel. ....	65
Figuur 52 Histogram fout op de hoek van magnetische encoder t.o.v. optische encoder .....	66
Figuur 53 Histogram fout op de hoek van magnetische encoder na toepassing correctietabel...	66
Figuur 54 Frequentie domein van de hoek.....	68
Figuur 55 Hoek van de encoder in de tijd .....	69
Figuur 56 Overzicht van parameters voor filter in het frequentiedomein .....	69
Figuur 57 Nulpunt polen diagram (3 polen, 3 nulpunten).....	70
Figuur 58 Bode plot ontworpen filter.....	70
Figuur 59 Frequentie respons van a) de originele en gefilterde hoek en b) de afgeleide hoek en de afgeleide gefilterde hoek. ....	71
Figuur 60 Frequentie respons van originele hoek afgetrokken met de gefilterde hoek .....	71
Figuur 61 snelheid berekend met originele hoek (blauw) en gefilterde hoek (rood) .....	72
Figuur 62 Doorsnede laserscanner [26] .....	73
Figuur 63 Faseverschuiving uitgezonden en weerkaatste lichtstraal [26].....	73
Figuur 64 Gezichtsveld laserscanner [25] .....	74
Figuur 65 Meetparameters gezichtsveld laserscanner [25] .....	74
Figuur 66 Roto-translatie [29].....	77
Figuur 67 testparcours (refter).....	79
Figuur 68 testparcours 2 (gang) .....	79
Figuur 69 Hoek van odometrie vs. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1.....	82
Figuur 70 Hoek van odometrie vs. fout t.o.v. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1 ....	82
Figuur 71 Verschil tussen $x$ en $y$ waarde – iteratie 1 .....	83
Figuur 72 Histogram fouten op $x$ –iteratie 1 .....	83
Figuur 73 Histogram fouten op $y$ – iteratie 1 .....	84
Figuur 74 Hoek van odometrie vs. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1.....	84

Figuur 75 Hoek van odometrie vs. fout t.o.v. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 2 .....	85
Figuur 76 Verschil tussen x en y waarde – iteratie 2 .....	85
Figuur 77 Histogram fouten op x (boven) en op y (onder) - iteratie 3 .....	86
Figuur 78 Vergelijking tussen a) iteratie 1 en b) iteratie 3 bij 5% verwerping .....	87
Figuur 79 Positiewijziging laserscanner in x-richting met 4 cm.....	89
Figuur 80 Hoekwijziging van laserscanner met 15° .....	90
Figuur 81 Verplaatsing laserscanner naar overkant .....	91
Figuur 82 Meting file17, de laserscan metingen (in het rood), de X links boven stelt de rolstoel voor. ....	92
Figuur 83 Afmetingen bij een rechthoek, file14 .....	93



# Abstract

Binnen het RADHAR-project (Robotic ADaptation to Humans Adapting to Robots) ontwikkelde men een autonome rolstoel. Voor nauwkeurige kaartopbouw en positieschatting van de rolstoel in de kaart is kennis nodig van de odometrieparameters (wieldiameters en afstand tussen de wielen). Ook dient de positie en oriëntatie van de laserscanner in het lokale robotassenstelsel gekend te zijn. Dit gebeurt tot op heden op een manuele, tijdrovende en onnauwkeurige manier.

In deze masterproef wordt daarom een automatische kalibratiemethode voor de parameters uitgewerkt die geen interactie van de gebruiker vereist. Om dit te realiseren moeten de encoderwaarden zo nauwkeurig mogelijk zijn. De magnetische encoders bevatten echter een systematische fout die er voor zorgt dat de afgeleide van dit signaal erg groot wordt. Het onderzoeken van deze fout zal het uitwerken van de kalibratiemethode voorafgaan. Dit gebeurt door het simuleren en analyseren van de sinusoidale fout in Matlab.

Er wordt een laagdoorlaatfilter uitgewerkt in de programmeertaal C++. Hierdoor kan de implementatie van de filter in de bestaande software eenvoudig gebeuren. De uitgewerkte automatische kalibratie kan de zes parameters, nodig voor odometrie en pose van de laserscanner, ten opzichte van de rolstoel bepalen. De parameters worden automatisch bepaald zonder interactie van de gebruiker en binnen de grenzen van het manueel opmeten. Door het automatisch kalibreren van de parameters zal het toepassen van dit autonoom systeem op andere rolstoelen eenvoudiger worden.





# Abstract in English

Within their research RADHAR developed an autonomic differential-drive wheelchair. The knowledge of odometry parameters (wheel diameters and distance between the wheels) is necessary for correct map building and position estimation of the wheelchair in the map. Similarly, the position and orientation of the laser scanner in the local robot coordinate frame must be known. To this day, this calibration took place in a manual, time-consuming and inaccurate way.

For this purpose an automatic calibration method for the parameters, that no user interaction require, is developed in this master's thesis. In order to realize this the encoder values have to be as accurate as possible. The magnetic encoders however, contain a systematic error which causes the derivative of this signal to become very large. The study of this error will precede the development of the automatic calibration method. Matlab will be used to simulate and analyze the sinusoidal error.

A low-pass filter will be translated into the programming language C++. Due to this translation, the filter can be implemented in the used software more easily. The automatic calibration can determine the six necessary parameters for odometry and the pose of the laser scanner in relation to the wheelchair. The parameters will be automatically determined, without interaction of the user and within the limits of manually measurement. Because of the automatic calibration of the parameters, the adaptation of this autonomic system on other wheelchairs is simplified.



# 1 Inleiding

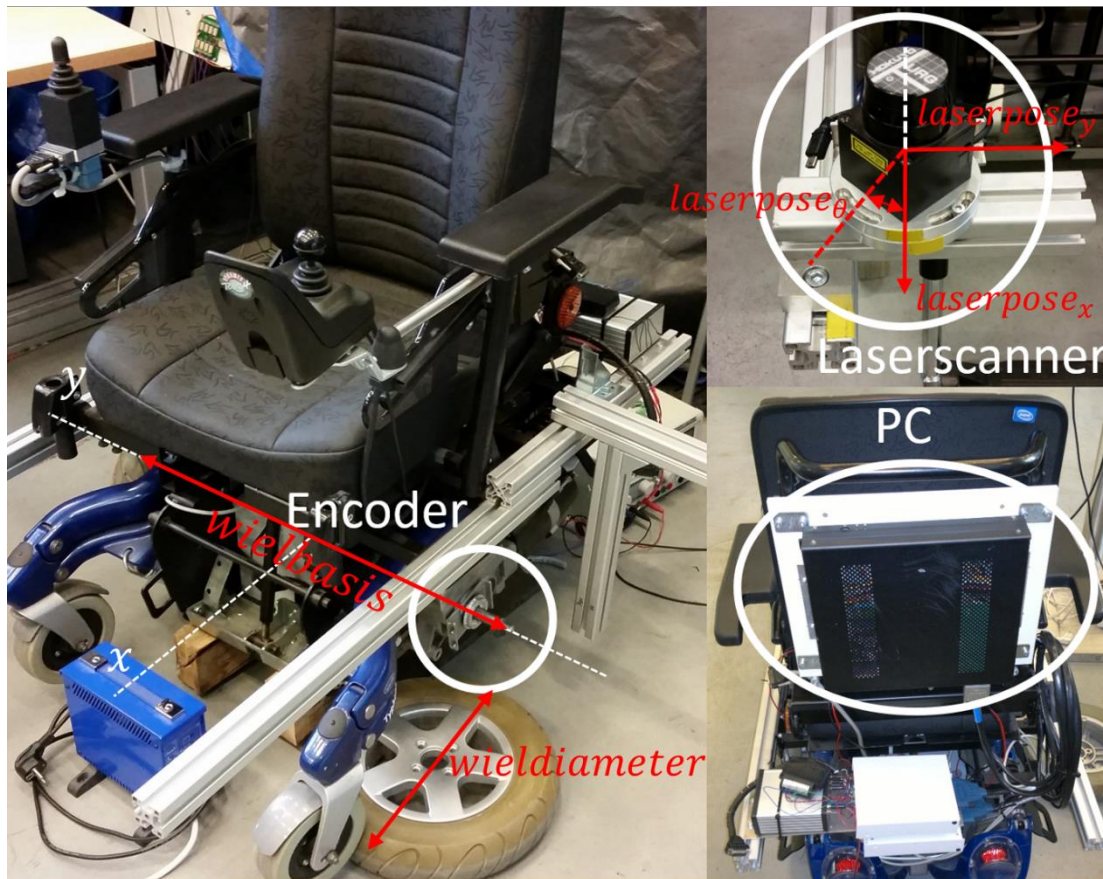
Deze masterthesis werkt verder met een reeds ontworpen autonome rolstoel. Deze rolstoel werd samengesteld tijdens het Robotic ADaptation to Humans Adapting to Robots (RADHAR) project. Het kalibreren van de parameters van deze rolstoel gebeurt momenteel door middel van een omslachtige procedure. Deze masterthesis zal hiervoor een alternatief zoeken. Zo kunnen mensen zonder technische achtergrondkennis ook een bestaande rolstoel van sensoren voorzien en gebruikmaken van het ontworpen systeem van RADHAR [1].

In deze inleiding wordt het onderzoeksopzet van deze masterthesis gekaderd. Vervolgens worden de gebruikte magnetische wiel-encoders toegelicht. De gebruikte wiel-encodermetingen moeten voor het volledige systeem voldoende accuraat zijn. Met behulp van een literatuurstudie werd onderzocht naar de oorsprong van mogelijke fouten en op welke manier ze te elimineren zijn. Tijdens het testen wordt de fout op de encodermetingen gekarakteriseerd en worden enkele methodes tot verbetering voorgesteld. Tot slot komt de zelfkalibratieprocedure aan bod. Deze gebeurt automatisch zonder initiële parameters of interactie van de gebruiker.

## 1.1 Situering

Deze masterproef vindt plaats in het AutomatiseringsCentrum Research en Opleiding (ACRO). Dit is een onderzoeksgroep die samenwerkt met de KULeuven/UC Leuven-Limburg [2]. Met meer dan 20 jaar ervaring binnen de automatiseringswereld is ACRO de ideale opdrachtgever voor onze masterproef. Hun activiteiten liggen in de lijn van onze afstudeerrichting Automatisering. De Vision & Robotics afdeling van ACRO volgt voortdurend de evoluties op in computervisie en robotica en implementeert geïntegreerde robot- en visiesystemen in uiteenlopende projecten. Uit deze projecten kregen wij de masterproef '*Zelfkalibratie van laserscannerpose en odometrieparameters voor mobiele robots met magnetische wiel-encoders*' toegewezen.

Ouderen en mindervaliden vertegenwoordigen een voortdurend groeiend segment van de wereldbevolking. Een aanzienlijk deel van deze bevolkingsgroep ondervindt mobiliteitsproblemen, ondanks het gebruik van bestaande hulpmiddelen zoals rolstoelen en looprekken. Zelfs met bestaande elektrische rolstoelen is navigatie niet evident, bijvoorbeeld omwille van de relatieve grootte van de rolstoelen ten opzichte van de doorgangen in typische binnenshuis omgevingen. Om rolstoelnavigatie te vereenvoudigen, werd in het RADHAR-project een commercieel beschikbaar rolstoelplatform aangepast. Het platform werd uitgerust met magnetische encoders op de aangedreven wielen, een laserscanner, een computer en een interface naar de rolstoel waarmee de computer de rolstoel kan aansturen (Figuur 1). Het doel van deze masterproef bestaat erin methodes te evalueren en te verbeteren om de sensor- en rolstoelparameters gemakkelijk, snel, nauwkeurig en indien mogelijk online te kalibreren. Tot op heden werden deze parameters op een manuele, tijdrovende en onnauwkeurige manier bepaald.



Figuur 1 Overzicht van onderdelen op de ter beschikking gestelde rolstoel

## 1.2 Probleemstelling

Bij het autonoom laten rijden van een rolstoel is het onontbeerlijk dat de gemeten rolstoelpositie en oriëntaties ten opzichte van een gekende kaart nauwkeurig zijn. Op basis hiervan wordt een pad gepland en obstakels vermeden. Om de kaartopbouw, lokalisatie en robotsturing zo precies mogelijk te maken, dienen alle gebruikte sensoren en actuatoren nauwkeurig te worden gekalibreerd. Deze kalibratie houdt in:

- het accuraat modelleren van individuele sensoren;
- het bepalen van de sensorpose<sup>1</sup> in het lokale robotassenstelsel;
- het bepalen van het kinematisch model van de rolstoel (wieldiameters en wielbasis<sup>2</sup>);
- het bepalen van het dynamisch model van de rolstoel (o.a. instelbare versnellingen en vertragingen, maximale snelheden, omvorming van spanningen naar snelheden);
- het bepalen van de geometrische vorm van de rolstoel (om paden te plannen).

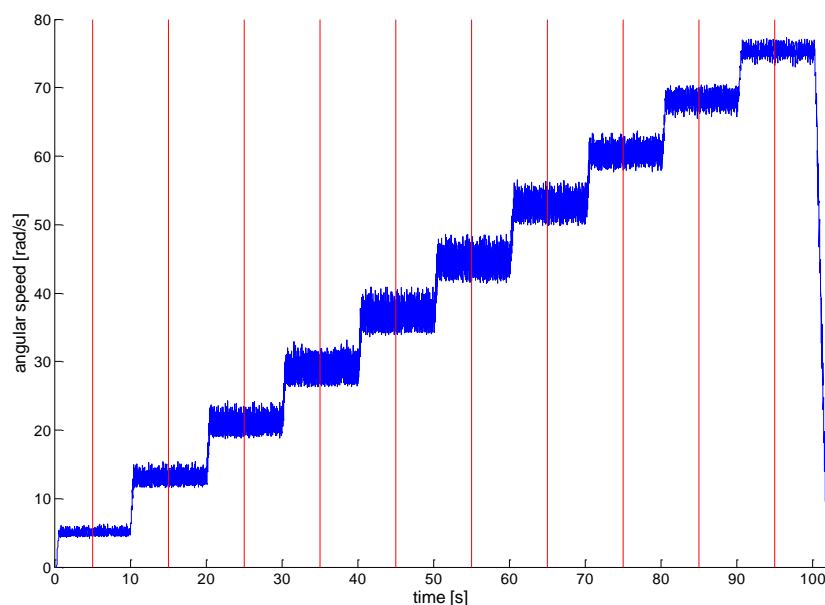
Deze kalibratieprocedure gebeurt liefst op een autonome manier zonder verdere menselijke input.

<sup>1</sup> Pose: de combinatie van positie en oriëntatie

<sup>2</sup> Wielbasis: de afstand tussen de wielen

In het Europees project RADHAR werd reeds een eerste versie ontwikkeld voor autonome navigatie. Daarbij zijn de volgende problemen opgedoken, die in deze masterproef aan bod zullen komen:

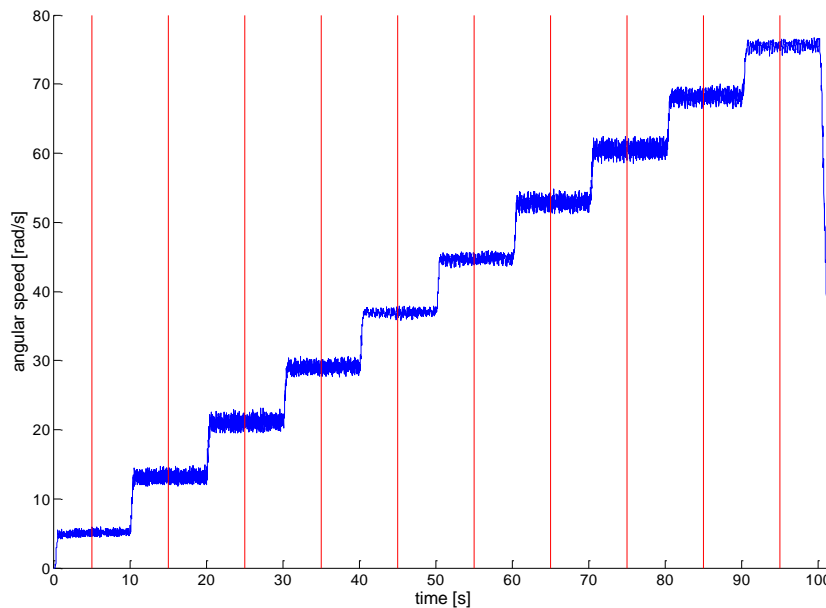
- Er is een aanzienlijke ruis aanwezig op de geschatte wielsnelheden, bekomen uit eindige differentie van de encoder-gegevens. Hierdoor worden de positie en snelheid van de robot niet accuraat berekend. Deze ruis is afhankelijk van de bemonsteringsfrequentie en van de rotatiesnelheid van de wielen, zoals weergegeven in Figuur 2 en Figuur 3. De ruis stijgt bij toenemende rotatiesnelheid, maar kan ook weer dalen. Dit ruisniveau heeft een negatieve invloed op de navigatienauwkeurigheid.
- Kalibratie van de sensoren is complex en gebeurt momenteel grotendeels handmatig, zeker wat betreft de bepaling van de pose van de laserscanner alsook de odometrieparameters<sup>3</sup>. Dit neemt veel tijd in beslag voor technische medewerkers en geeft niet de gewenste nauwkeurigheid. Bij elke aanpassing aan de rolstoel, bv. door een ergotherapeut, zoals een herpositionering van sensoren moeten de nodige parameters opnieuw worden opgemeten. Indien dit door een ergotherapeut gebeurt, zou het handig zijn indien de kalibratieprocedure na deze aanpassingen volledig automatisch verloopt.
- Binnen het RADHAR-project is er niet nagegaan of externe factoren (bv. omgeving en/of rolstoelgebruiker) een invloed hebben op de gebruikte parameters (bv. de bepaalde wieldiameters). Doordat dit niet onderzocht is, kunnen er onregelmatigheden optreden bij de lokalisatie van de rolstoel. Deze onregelmatigheden kunnen de rolstoelgebruiker in een gevaarlijke situatie brengen. Mogelijk kan de kalibratie enige fout wegwerken.



Figuur 2 Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 100 Hz

---

<sup>3</sup> Odometrie: gebruik van wielsensoren om een positie inschatting van de robot te maken in de tijd



Figuur 3 Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 50 Hz

## 1.3 Doelstellingen

Het is belangrijk dat de kalibratiemethode eenvoudig is voor de ergotherapeut die de rolstoelpatiënt begeleidt. Er wordt bottom-up gewerkt om de gewenste eenvoud (plaatsing van de sensoren) en accuraatheid van de metingen (van laserscanner en odometrie) te bekomen. Op deze manier kan uiteindelijk een veilige autonome navigatie bereikt worden.

Deze rolstoel beschikt niet over een automatische kalibratie van de sensoren. Hiervoor dient een procedure uitgewerkt te worden waarbij de kalibratie eenvoudig en nauwkeurig verloopt. Hiermee kan de therapeut, bij het kiezen van een individuele rolstoel, de encoders en laserscanner zelf monteren zonder uitgebreide technische kennis.

Samengevat zijn de doelstellingen de volgende:

- onderzoeken naar de oorzaak van de ruis op de encoderdata en verbeteren van signalen;
- uitwerken automatische kalibratieprocedure voor zes parameters.

## 1.4 Methode

Voor een nauwkeurige autonome navigatie moet de fout op elk onderdeel zo klein mogelijk zijn. Hiervoor wordt er bottom-up gewerkt. Alvorens sensorsignalen te gebruiken voor lokalisatie en robotsturing, worden systematische fouten bepaald en weggewerkt en wordt de onzekerheid op de signalen bepaald.

Bij het onderzoeken naar de oorzaak van de ruis op de encodergegevens wordt er eerst een oplisting gemaakt van mogelijke ruisoorzaken. Bovendien wordt een literatuurstudie uitgevoerd naar typische problemen bij het gebruik van magnetische encoders. Met een

oscilloscoop controleren we de correcte werking van de encoder. Er wordt een testopstelling gebouwd waarmee de magnetische encoderdata vergeleken kunnen worden met data van een optische encoder.

Indien er geen systematische fout gevonden wordt, wordt er een filter ontwikkeld in Matlab. Met encoderdata wordt getest welk type filter de ruis het beste wegwerkt. Hiervan wordt een implementatie in C++ gemaakt. Deze kan dan eenvoudig geïmplementeerd worden in het bestaand encoderprogramma. Een correctietabel zal opgesteld worden indien de fout van systematische aard is.

Voor het kalibreren van de sensoren binnen het robotassenstelsel wordt er een nieuwe methode gezocht. Hierbij zijn de wioldiameters en de wielbasis semi-automatisch of automatisch bepaald. Bestaande automatische kalibratie algoritmes worden gebruikt om de pose van de 2D-laserscanner ten opzichte van het robotassenstelsel nauwkeurig in te schatten.



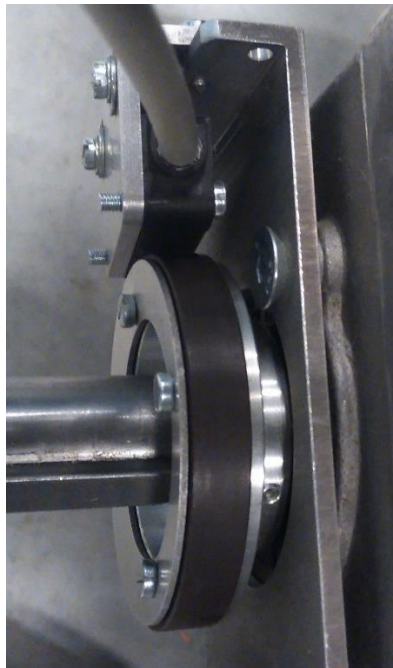


## 2 Literatuurstudie

In deze literatuurstudie wordt de werking van de gebruikte encodersystemen beschreven en vergeleken met andere mogelijke systemen. Hierbij worden de begrippen toegelicht die later in de thesis gebruikt worden.

Afhankelijk van de toepassing kunnen encodersystemen verschillende taken volbrengen. Eén van de meest gebruikte taken is het toelaten van positionering en snelheidsregeling van een aangedreven systeem. De encoder plaatst men op een as of op de geleiding. Wanneer er een rotatie van de as optreedt, zullen er pulsen gegenereerd worden. Deze beweging wordt opgemerkt door het lezen van een gecodeerde schijf of een bewegende lineaire schaal. Typische lineaire toepassingen zijn het opmeten van verplaatsingen bij een CNC-frees. Rotatie encoders kan men terug vinden op wielen/motoren om een indicatie te verkrijgen van de snelheid of verplaatsing.

Deze rolstoel heeft één magnetische encoder gemonteerd op elk van zijn aandrijfwielen. Hierdoor kan men deze beweging nauwkeurig volgen. Meer specifiek zijn deze encoders van Baumer ([www.baumer.com](http://www.baumer.com)) met type nummer MDFK10G8124-N64. De werking van de optische- en magnetische encoder wordt in dit hoofdstuk beschreven.



Figuur 4 Bevestiging van magnetische encoder en magneetring op de aandrijfjas.

### 2.1 Absolute of incrementele encoders

Bij incrementele encoders gaat de positie informatie verloren bij spanningsverlies. Ze verliezen de werkelijke mechanische positie. Het systeem zal hierdoor opnieuw naar een initieel gekende toestand moeten terugkeren. De meeste incrementele encoders produceren één index of

referentiepulss. Hierdoor is het mogelijk om te bepalen wanneer de encoder één omwenteling heeft gemaakt. Na spanningsverlies wordt dus een referentiestand gevonden.

Absolute encoders kennen na een spanningsverlies nog altijd hun exacte positie. Door hun complexere ontwerp zijn ze duurder in aankoop dan hun incrementele tegenhangers. Ze zijn beter geschikt voor cruciale applicaties waar positie informatie te allen tijde behouden moet blijven.

## 2.2 Contactloze encoders

Contactloze encoders maken gebruik van een fysisch verschijnsel waarbij geen rechtstreeks contact noodzakelijk is. Dit type encoders gebruikt meestal magnetische en optische sensoren. Deze encoders hebben over het algemeen een hogere resolutie ten opzichte van contactencoders. Deze laatste worden niet beschreven omdat ze niet relevant zijn voor dit onderzoek.

### 2.2.1 Magnetische encoders

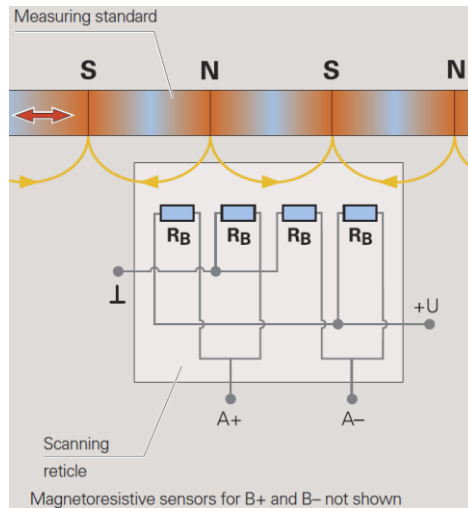
Magnetische encoders bepalen de positiewijziging aan de hand van een verandering in het magnetisch veld. Ze zijn ontwikkeld om contactencoders te vervangen.

De magnetische encoder heeft een schijf en een sensorelement. Op de schijf zijn permanente magneten aangebracht. Aan de hand van de nodige resolutie worden de polen op de gecodeerde schijf geplaatst. Bij het roteren van de as of het transleren van de schaal zal de flux wijzigen (toenemen en afnemen). De sensor zal deze verandering in het magnetisch veld waarnemen. Hierdoor genereert hij een overeenstemmend digitaal signaal. Wanneer de leeskop boven een gemagnetiseerd gebied staat, zal er een logische 1 aan de uitgang verschijnen. Indien de leeskop niet boven een gemagnetiseerd gebied staat, zal er logische 0 aan de uitgang zichtbaar zijn.

Er bestaan drie types magnetische sensoren:

- De variabele-reluctantie rotatie sensor bestaat uit een spoel die gewikkeld is rondom een permanente magneet. Wanneer er een poolpaar beweegt voorbij deze sensor zal er een piekspanning opgewekt worden. Deze sensoren zijn goedkoop, betrouwbaar en robuust.
- De Hall-effect sensor werkt op de methode waarbij een stroomgeleidende plaat geplaatst wordt in een magnetisch veld. Hierbij zal er een potentiaal verschil ontstaan op de breedte van deze plaat. Deze is proportioneel aan de veldsterkte van het veld en de stroom.
- De magnetoresistive sensor werkt op het principe dat de elektrische weerstand van het meetelement wijzigt afhankelijk van de sterkte van het aangelegde magnetisch veld.

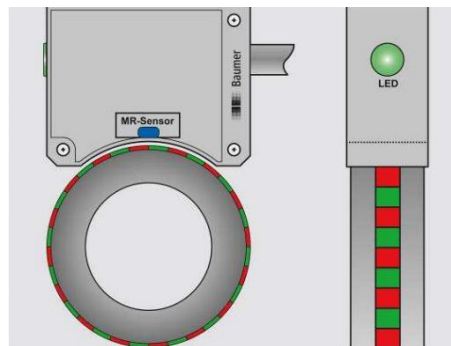
De op deze rolstoel gebruikte encoders zijn van het magnetoresistive sensortype. Hiervan kan u in Figuur 5 Figuur 1 de schematische opbouw zien. Aangezien deze sensorelektronica verwerkt zit in de behuizing van de encoder zijn hier geen wijzigingen mogelijk. Voor meer achtergrondinformatie over de werking van magnetische encoders kan u een artikel van M. Ikeda en H. Kaku bestuderen [3].



Figuur 5 Magnetoresistive sensorelektronica van één signaal [4]

De resolutie is beperkt tot de grootte van de magneet. Hoe groter de magneet, hoe fijner de verdeling van de rotatie mogelijk is. Een mogelijke magnetische verdeling is zichtbaar in Figuur 6. De tegenwerking van aangrenzende polen op het spoor maken het complex om een goede schijf/ring/lat te produceren. Magnetische encoders hebben een hoge levensduur aangezien er geen fysisch contact is tussen de sensor en de schijf. De metingen kunnen beïnvloed worden in een gebied waar hoge magnetische omgevingsstraling is.

Magnetische encoders verbruiken minder vermogen in tegenstelling tot hun optische variant. Ze kunnen echter niet tippen aan de resolutie van een optische encoder. Dit is te wijten aan de niet-lineariteiten van een magnetisch veld.



Figuur 6 Een magneetsensor en magneetring [5]

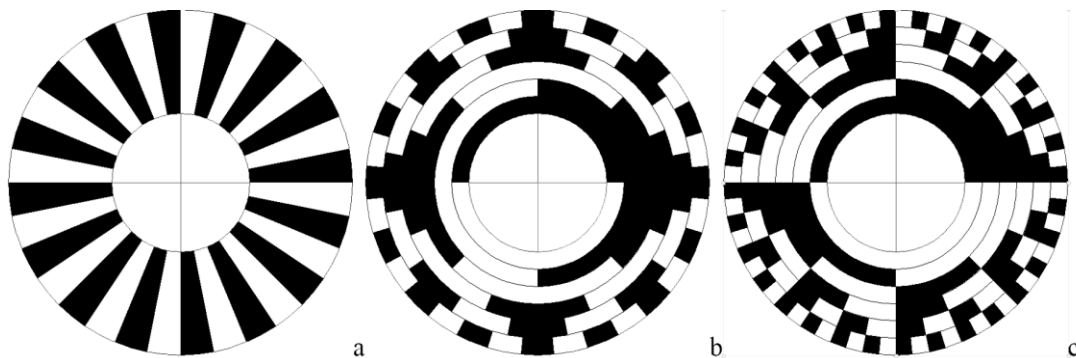
## 2.2.2 Optische encoder

Een optische encoder zal een positiewijziging door middel van licht opmerken. Optische encoders detecteren licht dat schijnt door een schijf. Het systeem bestaat dus uit drie onderdelen: een lichtbron, een encoderschijf en een lichtsensor. De schijf heeft zowel transparante als niet-transparante lijnen. De lichtbron staat aan één zijde van de schijf en de lichtsensor aan de andere zijde. De lichtbron laat licht invallen op de encoderschijf. Indien er licht doorgelaten wordt, zal dit gedetecteerd worden door de lichtsensor. Deze detectie resulteert in een uitgang van de encoder met een hoog signaalniveau. Wanneer het licht niet opvangen wordt, omdat het geblokkeerd wordt door een niet-transparante lijn, zal er een laag signaal aan

de uitgang zijn. Wanneer het patroon op de schijf gekend is, kan de afgelegde afstand bepaald worden. Tijdens het schrijven behalen de optische encoders de hoogst haalbare resolutie en tevens kunnen ze efficiënt werken op hoge snelheden. Nochtans is een optische encoder minder bestand tegen trillingen en een vochtig werkveld.

Wanneer een encoder op lage temperatuur werkt en er een snelle wijziging van temperatuur optreedt, zal er condensvorming ontstaan op alle encodervlakken. Het optisch gecodeerde wiel zal onleesbaar zijn en hierdoor foute of gemiste signalen doorgeven aan de uitgang. In een toepassingsgebied waarin de temperatuur snel varieert zal men de magnetische variant gebruiken. In een vochtige omgeving werkt een magnetische encoder betrouwbaarder dan een optische encoder.

De gebruikte optische encoder (Sick DFS60B) in deze thesis werkt op een gelijkaardig principe. Hij gebruikt een unieke nikkel gecodeerde schijf waardoor de fragiliteit afneemt bij dezelfde nauwkeurigheid [6]. Om het programmeren van de encoder mogelijk te maken is er intern een module die de resolutie herschaalt naar de gewenste waardes. Op deze manier kan men elke resolutie bekomen binnen het bereik van 1 tot 10 000 lijnen per omwenteling.



Figuur 7 Verschillende schijven: a) incrementeel, b) absolute Gray code, c) absolute binaire code

## 2.3 Soorten uitgangssignalen

De keuze van het uitgangssignaal hangt af van de DAQ-kaart/IC die gebruikt wordt. Er zijn twee soorten signalen: de analoge en de digitale. Optische encoders genereren een impuls afhankelijk van de gecodeerde schijf. Magnetische encoders genereren een signaal afhankelijk van het magnetisch veld. Meestal zijn er meerdere sensorelementen die onder een mechanische hoek geplaatst worden waardoor er tegelijkertijd twee signalen gegenereerd worden.

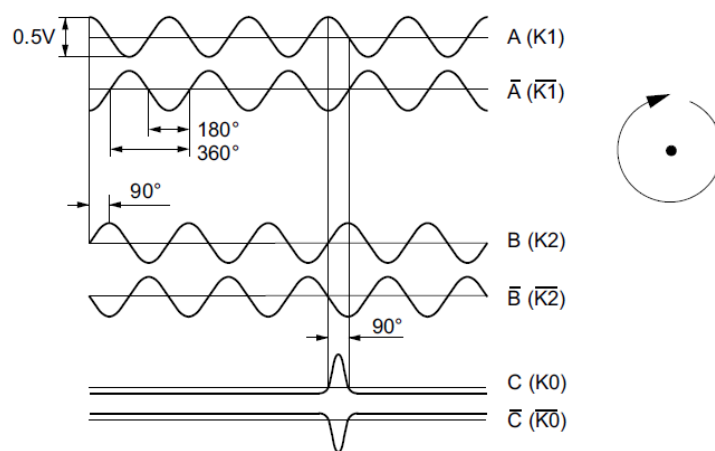
Over het algemeen hebben incrementele encoders twee kanalen en een extra index kanaal. Het inverteren van het signaal resulteert in zes kanalen. Om deze kanalen te genereren zijn er twee scanelementen aangebracht in de encoder. Het conditioneren van het signaal resulteert in twee kwadratuur signalen (A en B) die  $90^\circ$  uit fase liggen. Deze faseverschuiving gebruikt men voor het bepalen van de draairichting. Signaal A en B hebben een unieke relatie. Indien signaal A voorijlt op signaal B zal de motor in voorwaartse zin draaien. Wanneer signaal A na-ijlt op signaal B zal de motor achterwaarts draaien. De nul(zero/index)-puls (één puls per omwenteling) wordt opgenomen door een derde scanelement en zal zichtbaar zijn op signaal C.

We noemen dit ook wel het referentiekanaal (Z) [7]. In een datasheet is dit als volgt genoteerd: Output signals A 90° B, 0 (3- channel).

### 2.3.1 Analooq signaal

Analooq encoders hebben zowel een sinus als een cosinus uitgangssignaal. Beide signalen zijn ook hier 90° ten opzichte van elkaar verschoven.

De uitgang van de gebruikte sensor in een encoder zal een analooq sinusgolf zijn. Deze sinusgolf is opgesteld uit het stijgen en dalen van de gemeten spanning, doordat de magnetische sensor het toe- en afnemen van het magnetisch veld opmerkt. De periode van deze golf komt overeen met de duur van 360 elektrische graden<sup>4</sup>. De analooq signalen opgemerkt door de magnetische sensor zullen omgevormd worden naar digitale signalen.

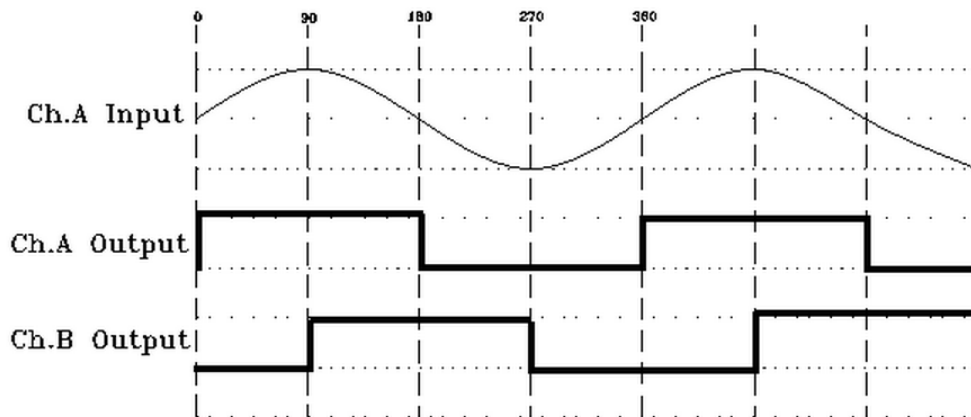


Figuur 8 Sin/cos signalen met een index puls [7]

De sinusgolven van kanaal A gaan door een comparator (Schmitt trigger) welke een serie van aan/uit standen genereert. Dit komt overeen met een blokvolfsignaal die in fase ligt met de originele sinusgolf. Hoe hoger de snelheid van de verplaatsing hoe kleiner de periode. De blokvolven zullen zich dan ook sneller na elkaar opvolgen. Voor kanaal B en kanaal Z is dit gelijkaardig. Een aan/uit stand wordt gegenereerd op basis van de hoek van elke sinusgolf binnen een periode. Elk component van de blokvolfs stelt een bepaalde positie van de encoder voor. Indien de sinusgolf afwijkt van een theoretische sinusgolf treedt er een interpolatiefout op.

<sup>4</sup> Eén elektrische cyclus zal gegenereerd worden per polenpaar per omwenteling. Elke mechanische graad komt overeen met een equivalent aantal elektrische graden.

$$\begin{aligned} & \text{Aantal elektrische graden in een hoek} \\ &= \frac{\text{aantal polen}}{2} \cdot (\text{aantal mechanische graden in die hoek}) \end{aligned}$$



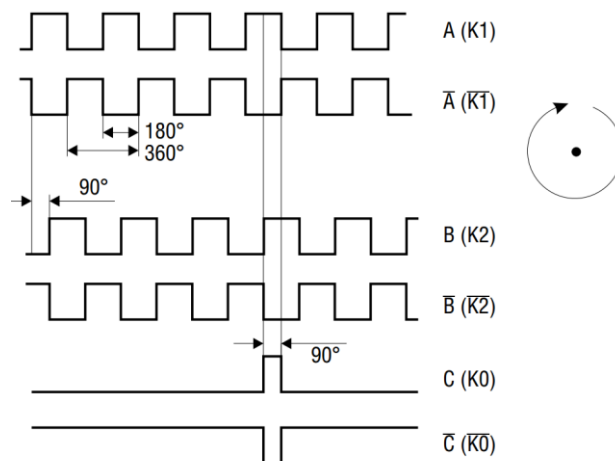
Figuur 9 Interpolatie van een sinusgolf door een comparator [8]

In de huidige encoders wordt van interpolatie gebruik gemaakt om een hogere resolutie te behalen. Op deze manier is het niet nodig om de schijf/ring van de encoder te vergroten om zo meer poolparen te verkrijgen en bijgevolg een hogere resolutie.

### 2.3.2 Digitaal signaal

De digitale signalen, die vele encoders als uitgang hebben, zijn oorspronkelijk afkomstig van een interpolatie van de sinus en cosinus signalen. Hierdoor is het mogelijk de schaalverdeling te kiezen en een hogere resolutie te behalen. De uitgang van deze signalen zijn meestal kwadratuur blokgolven.

De drie kanalen (A, B en Z) zijn voorgesteld in de volgende figuur voor de in deze thesis toegepaste encoders.



Figuur 10 Digitale encoder uitgangssignalen met een indexpuls [7]

## 2.4 Encodernauwkeurigheid en -resolutie

De encoder geeft informatie over de positie of de snelheid van het systeem waarop hij geplaatst is. Deze informatie voldoet aan een bepaalde nauwkeurigheid die bepaald wordt door de precisie van de code die op de schijf/ring geplaatst is. Nauwkeurigheid wordt gedefinieerd als het verschil tussen de actuele positie en de verwachte positie. Het is de som van alle storingen van elk afzonderlijk component. Als voorbeeld nemen we een incrementele encoder met 1000 lijnen per omwenteling en een encoder met 10 000 lijnen per omwenteling. De 10 000 lijnen encoder deelt de omwenteling op in kleinere stapjes.

De meeste optische/magnetische encoders specificeren hun resolutie als *pulses per revolution* (PPR) of *lines per revolution* (LPR). De PPR-waarde vertelt ons hoeveel elektrische pulsen (0 of 1) er zullen zijn per rotatie. Een 12-bit encoder zal 4096 pulsen ( $2^{12}$ ) genereren per omwenteling. Het gebruik van *counts per revolution* (CPR) om het aantal pulsen per omwenteling weer te geven kan voor verwarring zorgen. Dit wordt gebruikt door sommige fabrikanten. Er zijn twee kanalen (A en B) met  $90^\circ$  fase verschuiving en elke puls heeft twee flanken (een dalende en een stijgende flank). Het aantal flanken zal dus vier maal hoger zijn dan de PPR-waarde.

Afkortingen:

- PPR, P/R, C/T = Pulses per revolution;
- LPR, L/R = Lines per revolution ( same as PPR);
- CPR = Counts per revolution (encoderresolutie na 4X decoding).

Een voorbeeld van waardes in een datasheet:

PPR/LPR: 2000

CPR: 8000 (4xPPR)

Actual position control resolution: 8000 steps per revolution.

## 2.5 Encoders uitlezen

De gebruikte encoders in deze thesis worden hier besproken. Dit is een combinatie van een magneetsensor en een magneetrotor van Baumer.

De encodersensor is van het type: B3008170 MDFK 10 Gegentakt sensor (MDFK 10G8124/N64). In combinatie met encoderring: B3012110 MDFK 10 Magnetring 64 pole: (MRAP X64/056X048).

Enkele kenmerken van deze encoder:

- magneetsensor met rotor,
- maximum resolutie van 16384 stappen,
- uitgangssignalen A  $90^\circ$  B of A  $90^\circ$  B + N,
- uitgang circuit: push-pull en RS422,
- contactloos, wrijvingsvrij leessysteem.

In bijlage A kan u de datasheet van deze encoder terugvinden.

De encoder MDFK10 is geplaatst in combinatie met een 64 polen magneetring. Er wordt gebruik gemaakt van de (met deze combinatie mogelijk) hoogste resolutie. Bij 64 polen en een 64X interpolatie van de analoge signalen, van de encodersensor, worden 4096 pulsen per omwenteling verkregen.

$$Resolutie(PPR) = 64 \text{ polen} \cdot 64X_{interpolatie} = 4096 \text{ pulsen per omwenteling}$$

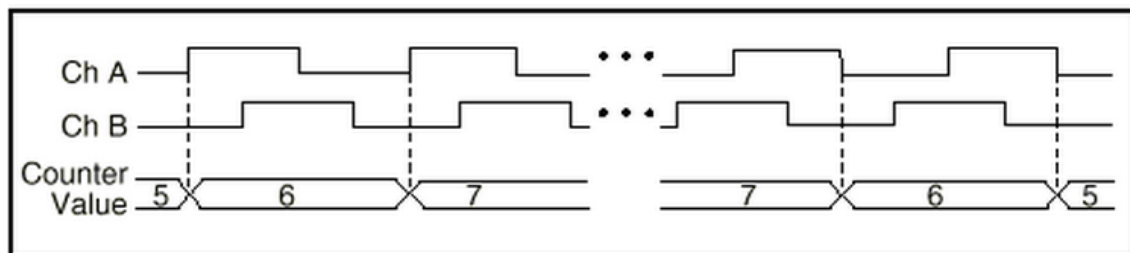
Om een encoder uit te lezen heeft men een elektronische teller nodig. Afhankelijk van zijn ingang zal een basisteller bij een stijgende flank aan de ingang een waarde omhoog tellen. Elke flank van het signaal (A of B kanaal) zal de teller verhogen of verlagen met een waarde. Het tellen van de waardes is mogelijk met een IC, die de pulsen kan tellen, of via een data acquisitie kaart (DAQ-kaart<sup>5</sup>).

In het onderzoeksproject RADHAR werd gekozen voor een kaart van National Instruments.

## 2.5.1 Kwadratuur decodering

De flanken worden geteld door de DAQ-kaart. Nu zal bepaald moeten worden op welke manier deze informatie wordt omgezet naar een positie. Er bestaan drie verschillende werkingsprincipes van een encoder, namelijk X1, X2 en X4. Bij de X4-modus monitort men op de stijgende en dalende flank van beide kanalen. Op deze manier zal men meer flanken kunnen tellen per omwenteling.

In Figuur 11 is een kwadratuurcyclus weergegeven met het bijhorende increment en decrement voor X1-encoding. Wanneer kanaal A voorijlt op kanaal B verhoogt de teller. Deze verhoging gebeurt op de stijgende flank van kanaal A. Bij een voorijlend kanaal B zal de teller afnemen bij een dalende flank.

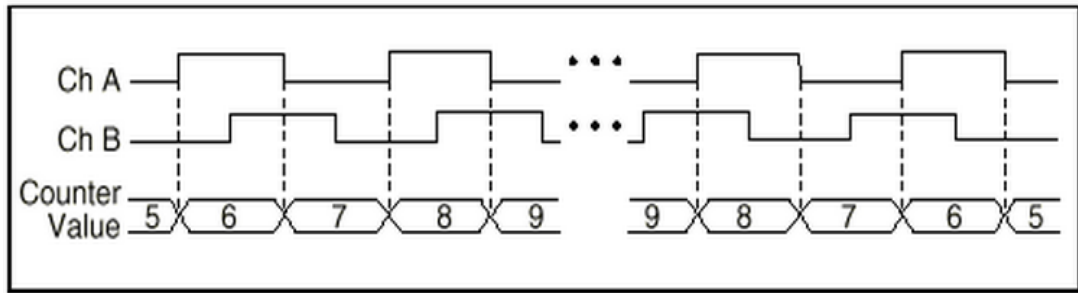


Figuur 11 Encoders met X1 meting [9]

Wanneer men gebruik maakt van X2-encoding zal de teller op elke flank van het voorijlende signaal de teller verhogen of verlagen. Wanneer signaal A voorijlt, ziet men in de volgende figuur dat er twee flanken gedetecteerd worden. De teller zal na één cyclus verhoogd zijn met twee.

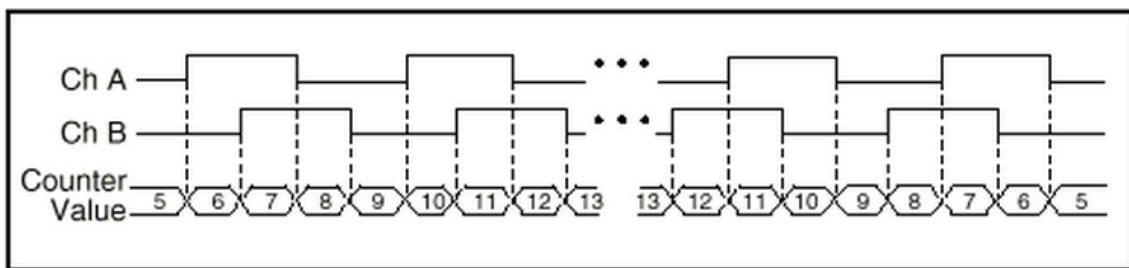
<sup>5</sup> DAQ-kaart: data acquisitie kaart, het verzamelen van gegevens





Figuur 12 Encoders met X2 meting [9]

Bij het decoderen in modus X4 zal er op elke flank van beide signalen geteld worden. De teller zal verhogen of verlagen afhankelijk van het kanaal dat voorijlt.



Figuur 13 Encoders met X4 meting [9]

De encoder in deze thesis is uitgelezen met X4-decodering. Het aantal pulsen wordt geteld door de counter. Hoeveel stappen er bekomen worden met de encoder en magneetting van dit project, wordt als volgt berekend:

$$\text{aantal stappen/omwenteling} = 64 \text{ polen} \cdot 64x_{\text{interpolatie}} \cdot X4_{\text{decodering}} = 16384 \frac{\text{stappen}}{\text{omwenteling}}$$

Deze waarde komt overeen met de maximale resolutie zoals vermeld in de datasheet. Het omzetten van deze pulsen naar een positie gebeurt via een simpele formule.

$$\text{Rotatieve positie: } (^{\circ}) = \frac{\text{aantal encoder pulsen}}{\text{decodering}_{\text{type}} \cdot N} \cdot 360^{\circ}$$

met  $N$  het aantal pulsen gegeneerd per omwenteling

De encoder, gebruikt in deze thesis, heeft 16384 pulsen per omwenteling. Hij wordt uitgelezen met X4-decodering. Deze waardes ingevuld in de formule voor radialen geeft:

$$\text{Rotatieve positie: } (\text{rad}) = \frac{\text{aantal encoder pulsen}}{4 \cdot 16384} \cdot 2\pi$$

Deze formule werd correct toegepast in het onderzoek van RADHAR. Zoals we in de onderstaande functie kunnen zien, zal ook hier enkel de hoek in radialen doorgegeven worden. Voor het uitlezen van de encoders met de DAQ-kaart werd gebruik gemaakt van de Comedi-

bibliotheek<sup>6</sup>. Na het controleren van de code werd er geen directe programmeerfout gevonden. Deze thesis gaat ervan uit dat er geen enkele fout werd gemaakt in het implementeren van de encoderruitlezing.

```
bool NidaqCard::readEncoder(unsigned int subdevice, double& angle, unsigned int
resolution, unsigned int channel, unsigned int range, unsigned int aref) {
    unsigned int data;
    bool result =
stateCheck(comedi_data_read(m_daqCard, subdevice, channel, range, aref, &data));

    angle = (double)(int)data*2*M_PI/(double)resolution;

    return result;
};
```

Code: C++ code van RADHAR project

## 2.5.2 Aansluitingen van encoder

Een encoder heeft meestal vijf signaaldraden die verbonden worden met de teller. Afhankelijk van het merk van de encoder zal de kleurcode veranderen. In Figuur 14 zijn de aansluitingen van de in deze thesis gebruikte encoder weergegeven.

Push-pull A 90° B, N (3-channel)		
cable color		signals
brown	BN	+Vs
white	WH	0 V
green	GN	CHA
yellow	YE	CHB
pink	PK	CHN
cable data PUR 5 x 0.14 mm <sup>2</sup> , shielded		

Figuur 14 Incrementele encoder pinout Baumer MDFK 10 [10]

De pulsen van kanaal A, kanaal B en de indexpuls moeten uitgelezen worden. Deze uitlezing gebeurt met een computer met behulp van een data acquisitie kaart/module.

## 2.5.3 Data-acquisitie

Data-acquisitie is het proces van elektrische of fysische verschijnselen meten met een op computer-gebaseerde hardware. De gebruikte DAQ-kaart in dit project is een National Instruments NI PCI 6229 en een connectiekaart SCB68. Dit is een kaart die gebruikt kan worden om kwadratuur encoders uit te lezen.

De rolstoel heeft een maximale snelheid van 15 km/h . Aan de hand van deze snelheid ( $v$ ) kan berekend worden wat de minimale bemonsteringsfrequentie (samplefrequentie) van de DAQ-

<sup>6</sup> Comedi-project ontwikkelt open-source drivers, tools en bibliotheken voor data acquisitie <http://www.comedi.org/>

kaart moet zijn om alle pulsen te kunnen registreren. De maximale snelheid van de rolstoel is omgerekend  $4,17 \text{ m/s}$ . De manueel opgemeten straal ( $r$ ) van de wielen is  $0,17 \text{ m}$ . Dit geeft als hoeksnelheid:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{4,17 \text{ [m/s]}}{0,17 \text{ [m]}} = 24,53 \text{ [rad/s]}.$$

Elke encoder heeft een kanaal A en een kanaal B. Deze twee kanalen worden gebruikt om in kwadratuur uit te lezen (op elk kanaal de stijgende en dalende flank monitoren). Aangezien er twee encoders zijn, worden er vier signalen ingelezen. De encoders hebben een resolutie van 4096 pulsen per omwenteling. Aangezien de maximale hoeksnelheid gelijk is aan  $24,53 \text{ [rad/s]}$  kan er berekend worden hoeveel omwentelingen [ $omw$ ] er per seconde zullen zijn.

$$\frac{24,53 \text{ [rad/s]}}{2 \cdot \pi} = 3,9 \text{ [omw/s]}$$

Uit het maximaal aantal omwentelingen per seconde kan het maximaal aantal samples per seconden ( $S/s$ ) berekend worden

$$3,9 \left[ \frac{omw}{s} \right] \cdot 4096 \left[ \frac{pulsen}{omw} \right] \cdot 2 \text{ [flanken]} = 32 \left[ \frac{kS}{s} \right] \text{ per kanaal.}$$

Dit resulteert bij één encoder in een totaal van  $64 \text{ [kS/s]}$ . De DAQ-kaart die in het systeem gebruikt wordt, gaat tot  $250 \text{ [kS/s]}$  wat ruim voldoende is voor deze toepassing.



### 3 Analyse van ruis op de encoders

Dit hoofdstuk behandelt het testen en het zoeken naar mogelijke oorzaken betreffende de fouten op de magnetische encoders. Eerst en vooral wordt de fout gekarakteriseerd als een sinusoïdale fout. Hierna wordt onderzocht welke foutbronnen hier een oorzaak van kunnen zijn. Tot slot worden drie mogelijke oplossingen voorgesteld om de fout op te vangen. Hieruit wordt de implementatie van een digitale Chebyshev filter gekozen voor het systeem dat voorhanden is.

De encoderinformatie dient als input voor de odometrie, de kaartopbouw en het volgen van trajecten. Daarom moeten de metingen nauwkeurig zijn. In het algemeen zijn sensoren onderhevig aan twee types fouten, systematische fouten en niet-systematische fouten.

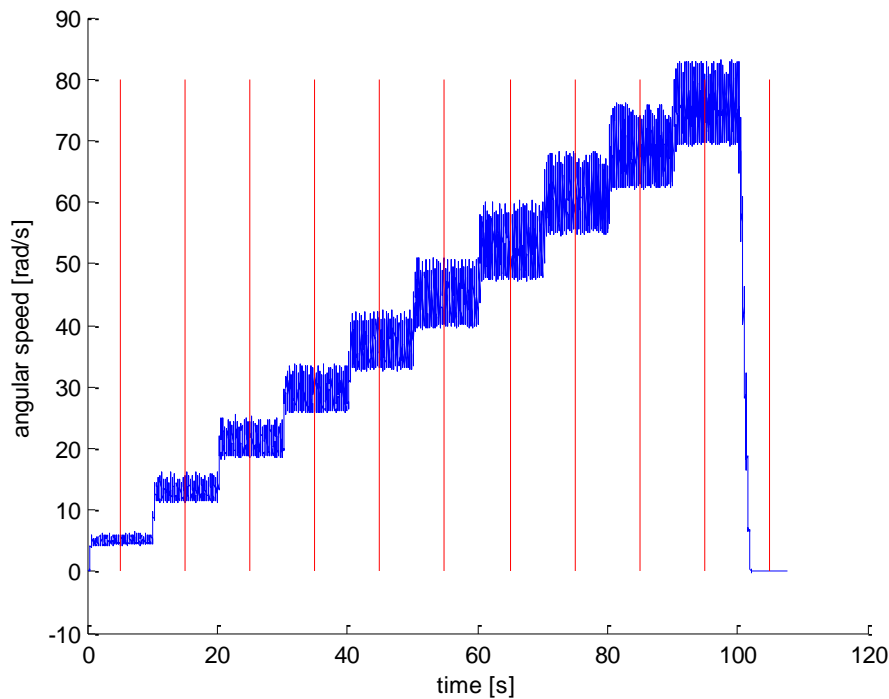
1. Systematische fouten zijn niet te wijten aan een toeval maar ontstaan door een onnauwkeurigheid. Elke steekproef zal dus in bepaalde mate een systematische fout bevatten. Het is wederkerend wat het mogelijk maakt om de fout op te vangen. Het zoeken naar de oorzaak van de systematische fout is niet vanzelfsprekend aangezien het niet altijd mogelijk is om goede gegevens te verzamelen. Door het niet constant aansturen van de motoren (zoals in deze masterproef) zal de snelheidsfluctuatie zichtbaar zijn in de metingen. Mogelijke systematische fouten zijn: niet correcte kalibratie van toestellen, digitaliseringsfouten (discretisatie en kwantisatiefout) van het signaal en stochastische drift van de meting. Een voorbeeld van een systematische fout is het correct aflezen van de meetlat, maar dat de gradatie verkeerd is. Het wegfilteren is niet direct mogelijk aangezien er een fout is in de meetmethode.
2. Niet-systematische fouten treden toevallig op en zijn niet repeteerbaar. Het simuleren en onderzoeken van dergelijke fouten is moeilijk en tijdrovend aangezien ze niet tijds- en plaatsafhankelijk zijn. Een voorbeeld van een niet-systematische fout is het optreden van wielslip tijdens een meting, dit zal voor een piek in de meting zorgen. Deze uitschieters kunnen in een dataset verwijderd worden. Dit wordt verder besproken in *hoofdstuk 5.4.2*.

Mogelijke systematische en niet-systematische foutbronnen bij een encoder zijn:

- een niet precies verdeelde encoding (target errors),
- signaalfouten van de sensor in offset en/of amplitude (sensor error),
- sin/cos fase fouten door verkeerde uitlijning (placement errors),
- signaalfouten door verkeerde of niet correcte signaalconditionering (signal conditioning error),
- interpolatiefout in de signaalconditionering (interpolation error),
- uitgang jitter (jitter error). [4], [11]

Aangezien er niet rechtstreeks gebruik gemaakt kon worden van de uitlezing via het systeem werd verder gewerkt op data van het vorige onderzoek. De encodersignalen zal men gebruiken om de snelheid van de rolstoel te bepalen. Door de hoekverplaatsing af te leiden naar de tijd zal de fout nog meer zichtbaar worden. Op onderstaande figuur kan men een testmeting zien. Voor deze meting wordt elke tien seconden de snelheid van het rolstoelwiel verhoogd. Vervolgens werd de snelheid tien seconden constant gehouden. Deze meting werd uitgevoerd van stilstand

tot de hoogst mogelijke snelheid, waarbij de rolstoel geen contact met de ondergrond heeft. Hier is duidelijk een bepaalde ruis aanwezig op de metingen.



Figuur 15 Snelheidsschatting op basis van encodermetingen voor verschillende wielsnelheden bij een bemonsteringsfrequentie van het hoeksignaal (afkomstig uit de data-acquisitiekaart) op 200 Hz.

De snelheid van de rolstoel wordt in Matlab berekend aan de hand van volgende code. Hierin zijn “anglesLeft” en “anglesRight” de overeenkomende tellerwaarden afkomstig van de DAQ-kaart. Hieruit kan men concluderen dat een fout op de hoek (tellerwaarden) zal resulteren in een aanzienlijke fout op het snelheidssignaal. De eerstvolgende controles en testen zullen bijgevolg uitgaan van het meest oorspronkelijke signaal dat gebruikt kan worden. De hoek (anglesLeft, anglesRight) is afkomstig van de DAQ-kaart.

```
speeds = zeros(nrData-1,2);
for i = 2:nrData,
    speeds(i,1) = (anglesLeft(i)-anglesLeft(i-1))/(times(i)-times(i-1));
    speeds(i,2) = (anglesRight(i)-anglesRight(i-1))/(times(i)-times(i-1));
end
```

In formule vorm wordt dit geschreven als:

$$\omega_k = \frac{\theta_{k+1} - \theta_k}{t_{k+1} - t_k},$$

met  $\omega_k$  de geschatte hoeksnelheid op tijdstip  $k$ ,  $\theta_{k+1}$  de hoek op tijdstip  $k + 1$ ,  $t_{k+1}$  het tijdstip overeenkomend met meting  $k + 1$ .

## 3.1 Fout op de hoek per omwenteling

Om later de mogelijke foutbronnen te kunnen definiëren wordt in dit hoofdstuk de fout beschreven. De draaisnelheid lijkt invloed te hebben op de encodersignalen. Om deze reden werd er gezocht naar een mogelijke fout per omwenteling. Deze fout is mogelijk systematisch en zal bij elke omwenteling dezelfde zijn. Om deze fout te beschrijven wordt er gebruik gemaakt van twee verschillende toenaderingen. Enerzijds van de kleinste kwadratenmethode (*hoofdstuk 3.2*) en anderzijds van een extra optische encoder (*hoofdstuk 3.4*). De data bevat de hoek in radialen van de linker- en rechterencoder, alsook het tijdstip wanneer deze meting genomen werd. Van de linker- en rechtertijdsmeting wordt het gemiddelde genomen zodat er steeds met één tijd gewerkt kan worden. Een voorbeeld van een dergelijk dataset kan u in volgende tabel zien.

Tabel 1 Opbouw van dataset encodermeting

anglesLeft [rad]	anglesRight [rad]	timeLeft [s]	timeRight [s]
<b>0,45712627</b>	0,53842726	1342701683,94435	1342701683,94436
<b>0,47706803</b>	0,56297095	1342701683,94941	1342701683,94942
<b>0,49700978</b>	0,58904862	1342701683,95447	1342701683,95449
<b>0,51541754</b>	0,61359232	1342701683,95953	1342701683,95955
<b>0,53535929</b>	0,63813601	1342701683,96460	1342701683,96462
<b>0,55530105</b>	0,66421368	1342701683,96966	1342701683,96967

Voor het zichtbaar maken van een hoek per omwenteling zal men de data moeten opsplitsen. Een omwenteling bevat 360 graden of  $2 \cdot \pi$ , de bijhorende data wordt opgeslagen in een array. Hiervoor werd gebruik gemaakt van Matlab.

```
% select all data between cAngle (current angle) and nAngle (new
angle)
nAngle = i*2*pi;
cAngle = (i-1)*2*pi;
ind1 = find(anglesLeft >= cAngle);
ind2 = find(anglesLeft <= nAngle);
if (~isempty(ind1))
    angles = anglesLeft(ind1(1):ind2(end));
    timesA = times(ind1(1):ind2(end));
```

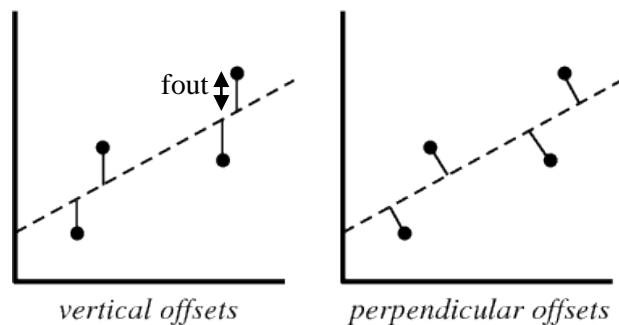
De vectoren “angles” en “timesA” benaderen nu samen één omwenteling van de encoder. Hieruit zal getracht worden een eventuele systematische fout op de magnetische encodersignalen te bepalen.

## 3.2 Analyse in Matlab met kleinste-kwadratenmethode

Om een vergelijking te doen tussen de magnetische encodersignalen wordt een referentiesignaal opgebouwd. Deze referentie wordt geconstrueerd onder de vorm van een gefitte lijn door de data, deze geldt dan als “exacte” hoek.

Dit fitten gebeurt met de kleinste-kwadratenmethode. De fout zal dan bestaan uit de afstand tussen de gefitte lijn en het bijhorende meetpunt van de dataset. De kleinste-kwadratenmethode wordt gebruikt om door een verzameling puntenparen een zo goed mogelijke curve te fitten. De naam “kleinste kwadraten” komt van de manier van definiëren wat de best gefitte curve is, namelijk aan de hand van het minimaliseren van de som van de kwadratische afwijkingen.

Weisstein [12] beschrijft twee methoden. Er kan gekozen worden om de fitting te baseren op enerzijds een verticale offset of anderzijds een rechthoekige offset zoals te zien in de onderstaande figuur. In dit onderzoek wordt de fitting gebaseerd op de verticale offset. Dit zorgt ervoor dat de fout op de hoek meteen afgelezen kan worden. De verticale kleinste kwadraten fitting wordt dus gedaan door het vinden van de som van de kwadraten van de verticale afwijkingen  $R^2$  van een set van  $n$  data punten van een functie  $f$ .



Figuur 16 Twee mogelijke fundamente van de kleinste-kwadratenmethode [12]

$$R^2 \equiv \sum [y_i - f(x_i, a_1, a_2, \dots, a_n)]^2$$

De bedoeling is deze verticale afwijkingen te minimaliseren zodat de gefitte curve de best passende is. De voorwaarde opdat  $R^2$  minimaal is:

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a_i} = 0$$

Voor  $i = 1, \dots, n$ . Voor een lineaire fitting die in dit onderzoek toegepast wordt, geeft dit:

$$f(a, b) = a + bx,$$

Dus:

$$R^2(a, b) \equiv \sum_{i=1}^n [y_i - (a + b x_i)]^2$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + b x_i)] = 0$$

$$\frac{\partial(R^2)}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + b x_i)] x_i = 0.$$

Dit leidt tot volgende vergelijkingen:



$$na + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i$$

De meest eenvoudige vorm om de som van de kwadraten te beschrijven is dezelfde als die bij de implementatie in Matlab gebruikt wordt:

$$\begin{aligned} \text{SS}_{xx} &= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - n \bar{x}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SS}_{yy} &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \\ &= \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - n \bar{y}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SS}_{xy} &= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \\ &= \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - n \bar{x} \bar{y}, \end{aligned}$$

Die ook geschreven worden als:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{\text{SS}_{xx}}{n} \\ \sigma_y^2 &= \frac{\text{SS}_{yy}}{n} \\ \text{cov}(x, y) &= \frac{\text{SS}_{xy}}{n}. \end{aligned}$$

De regressiecoëfficiënt  $b$  kan dan geschreven worden als:

$$b = \frac{\text{SS}_{xy}}{\text{SS}_{xx}},$$

en  $a$  is gegeven in termen van  $b$  als:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}.$$

Nemen we  $\hat{y}_i$  de verticale coördinaat van de best gefitte curve met x-coördinaat  $x_i$ , dan kunnen we de functie van de curve schrijven als:

$$\hat{y}_i = a + bx_i.$$

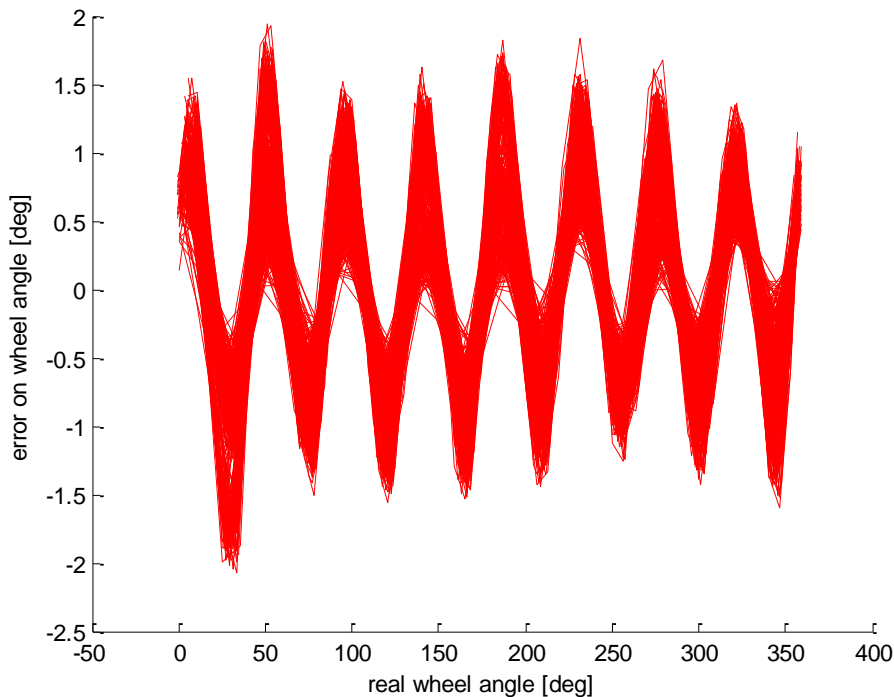
De fout tussen het actuele punt  $y_i$  en het gefitte punt is gegeven door:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i.$$

De manier waarop dit geïmplementeerd werd in Matlab kan u hieronder terugvinden. Deze werd uiteindelijk gebruikt in het volledige programma om de fout op de hoek per omwenteling zichtbaar te maken.

```
% least squares line fit:
x = timesA;
y = angles;
n = length(timesA);
Sxx = sum(x.^2) - n*mean(x)^2;
Syy = sum(y.^2) - n*mean(y)^2;
Sxy = sum(x.*y) - n*mean(x)*mean(y);
b = Sxy / Sxx;
a = mean(y) - b*mean(x);
errorA = angles;
realA = angles;
t0 = (cAngle-a)/b;
for j = 1:length(errorA),
    errorA(j) = angles(j) - (a+b*x(j));
    realA(j) = b*(x(j)-t0);
end
```

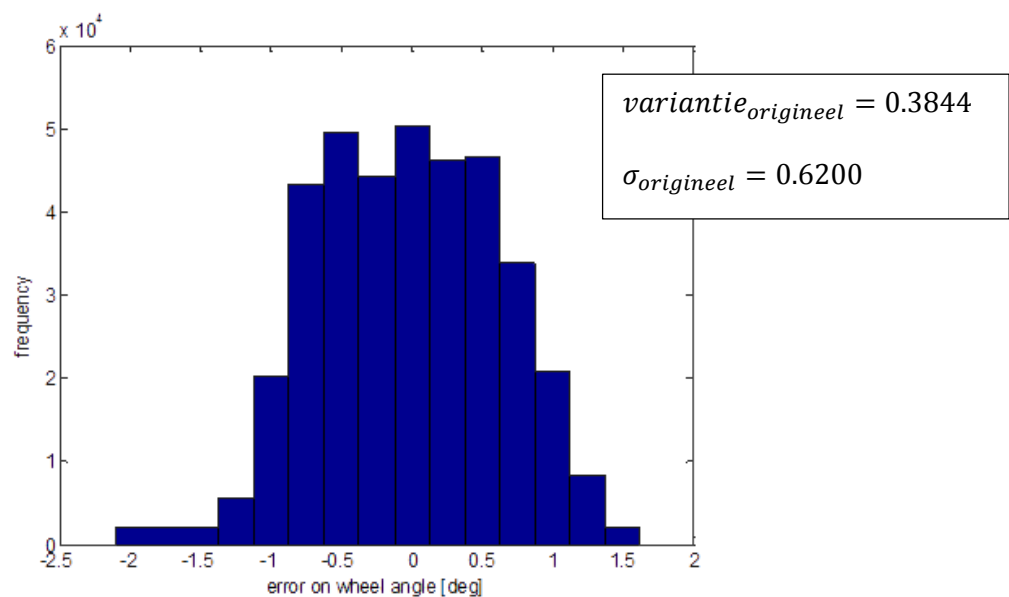
Deze methode veronderstelt dat de wielsnelheid gedurende een beperkte tijd constant is en schat deze m.b.v. een kleinste-kwadratenmethode. Deze constante snelheid wordt gebruikt als “exacte” snelheid waarmee de magnetische encodermetingen dan kunnen vergeleken worden. De fout bestaat uit de afstand tussen de gefitte lijn en het bijhorende meetpunt van de dataset (encodermeting). Het visueel voorstellen van de fout van deze omwentelingen geeft Figuur 17. Hieruit blijkt dat de fout op de hoek een bepaald patroon volgt. We zien hier duidelijk enkele wederkerende sinusoidale vormen. Ook bij andere meetdata werd dit zichtbaar.



Figuur 17 Fout op de magnetische encoderhoek voor een volledige omwenteling, gemeten ten opzichte van de werkelijke (gefite) hoek

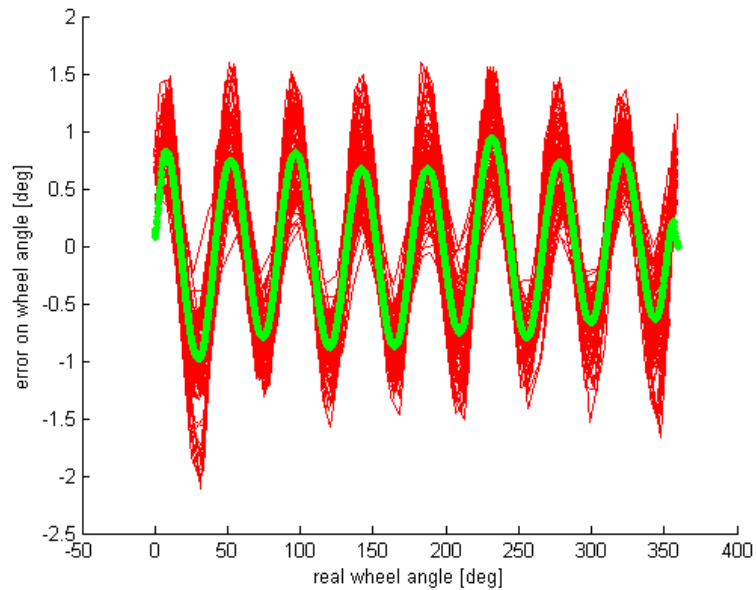
Zoals bij elke meting zal er een bepaalde fout aanwezig zijn tussen de werkelijke waarde en de gemeten waarde. Aangezien er van een constante snelheid wordt uitgegaan, zal de hoek van de magnetische encoder afgetrokken met de gefitte lijn idealiter gelijk zijn aan nul. De verdeling van deze fout ten opzichte van de ideale waarde kan weergegeven worden in een histogram. Dit is een visuele weergave van de in klassen verdeelde fout. Het stelt de frequentieverdeling voor in deze klassen, zie volgende figuur.

Uitgaande van de centrale limietstelling kan aangenomen worden dat alle fouten normaal verdeeld zijn. Het gemiddelde (de verwachte waarde) van de fouten bevindt zich in het centrum van deze verdeling. De standaarddeviatie geeft aan hoe breed de verdeling is en toont hoeveel variatie er in de fout is. In een ideaal geval is deze standaarddeviatie een lage waarde, wat betekent dat de fouten dicht bij het gemiddelde liggen. Door middel van het histogram kunnen we vermelden dat de fout redelijk verspreid is over verschillende klassen. De fout is op enkele momenten klein en op andere momenten groot. [13]



Figuur 18 Histogram van de fout (via kleinste-kwadratenmethode) op de hoek – magnetische encoder

Wanneer er van alle fouten per omwenteling een gemiddelde gemaakt wordt, kan de fout op het signaal van de encoder geïdentificeerd worden als deze gemiddelde. Op Figuur 19 is dit gemiddelde voorgesteld door de groene lijn.



Figuur 19 Gemiddelde fout (via kleinste-kwadradenmethode) op de hoek – magnetische encoder

Het grote probleem van deze opstelling is dat de motoren geen constante snelheid kunnen uitsturen. Hierdoor gaat de fluctuatie van de snelheid ook zichtbaar zijn in de fout. Om dit probleem te verhelpen worden er in *hoofdstuk 3.4* metingen gedaan met een extra optische encoder.

### 3.3 Testopstelling

Een testopstelling werd ontworpen uit ITEM-profielen om de kwaliteit van de gebruikte magnetische encoder te vergelijken met een optische encoder. Op deze manier is het mogelijk fouten uit te sluiten. Figuur 20 toont de ontworpen opstelling. Deze werd gemonteerd aan beide zijden van de rolstoel.



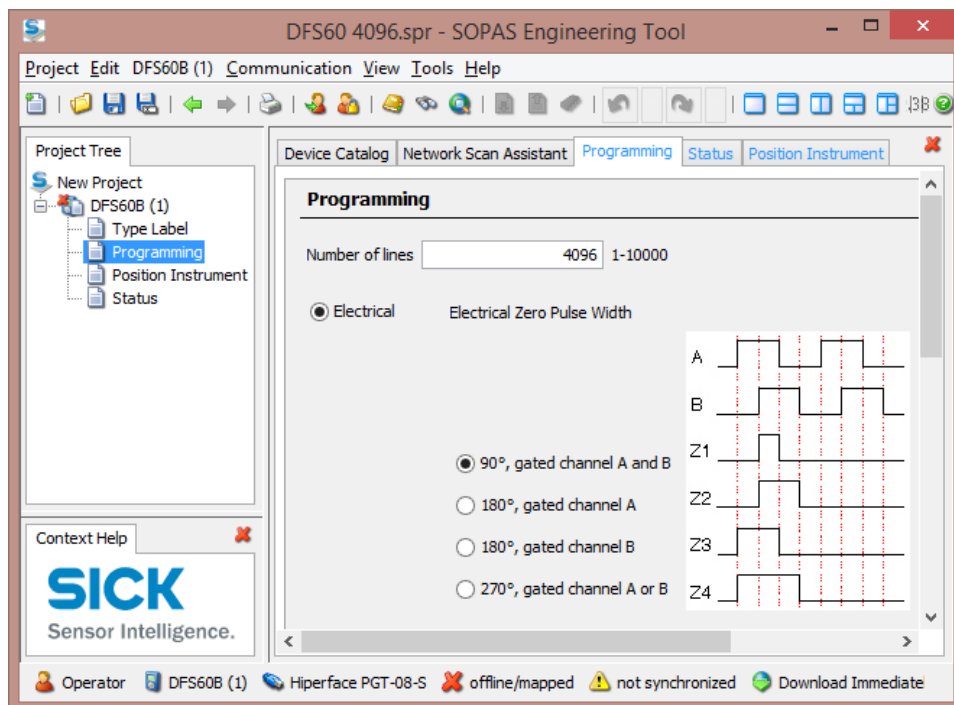
Figuur 20 Ontworpen testopstelling om magnetische encoder en optische encoder te vergelijken

Met deze opstelling vergelijken we volgende encoders:

- magnetische encoder: Baumer MDFK 10G8124/N64,
- optische encoder: SICK/STEGMANN DFS60.

De datasheet van de optische encoder kan u terugvinden in bijlage A. Deze encoder is programmeerbaar waardoor zijn resolutie instelbaar is tussen 0 en 10 000 lijnen per omwenteling.

Met een programmeermodule en de software “SOPAS Engineering Tool”<sup>7</sup> werd de encoder ingesteld op 4096 lijnen per omwenteling. Het fase verschil tussen de A en B signalen werd ingesteld op 90 graden. Dit komt overeen met de kenmerken van de magnetische encoder in deze thesis. De encodersignalen werden op dezelfde manier en met dezelfde DAQ-kaart ingelezen als de magnetische encoder. Op deze manier kan men verzekeren dat er geen verschillen in meting optreden door verschillende meetsystemen door elkaar te gebruiken.



Figuur 21 Programmatie van de optische encoder

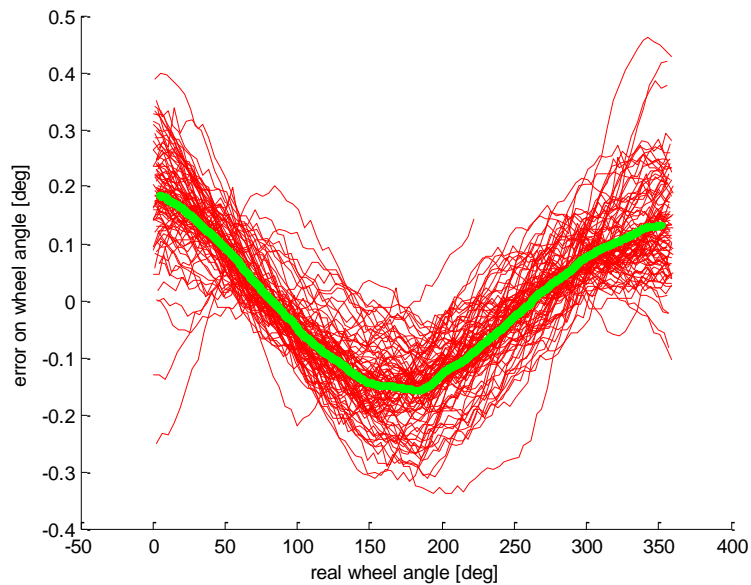
### 3.4 Analyse in Matlab: vergelijking met optische encoder

In het vorig hoofdstuk werd reeds vermeld dat de snelheidsfluctuaties van de motoren voor ongewenste metingen zullen zorgen. Aangezien men een referentie nodig heeft voor het bepalen van de juiste hoek werd gebruik gemaakt van een optische encoder met bijhorende testopstelling en correcte instellingen. Figuur 22 geeft de fout op de hoek weer in het geval van een optische encoder met de kleinste-kwadratenmethode. Uit deze figuur kan men afleiden dat de gemiddelde fout slechts een maximale afwijking heeft van  $0.2^\circ$ . Het bijhorende histogram

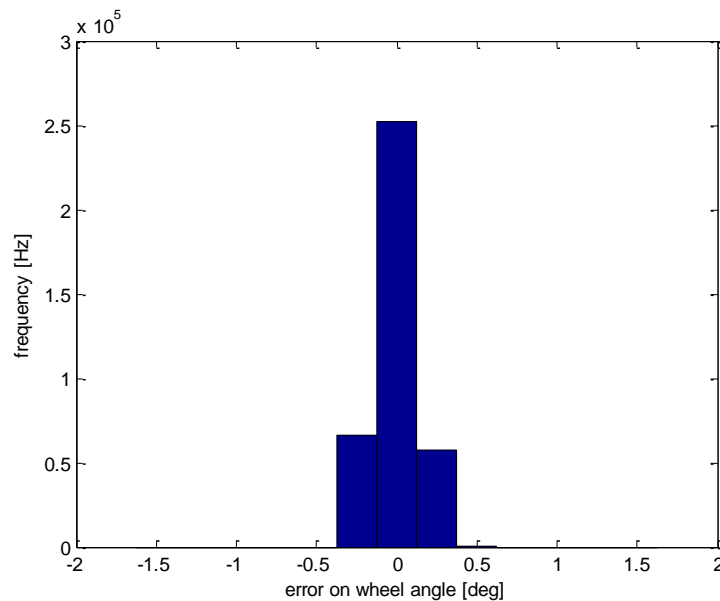
<sup>7</sup> SOPAS is een configuratie programma voor sensoren van het merk SICK ([www.sick.com](http://www.sick.com))

(Figuur 23) geeft ook aan dat de fout op de hoek van de optische encoder hoofdzakelijk 0 is. Deze hoek wordt aangenomen als “exact” en geldt vanaf hier als de referentie. Toch is er ook hier een duidelijke patroon zichtbaar. Dit wijst er waarschijnlijk op dat de motoren geen constante snelheid uitsturen.

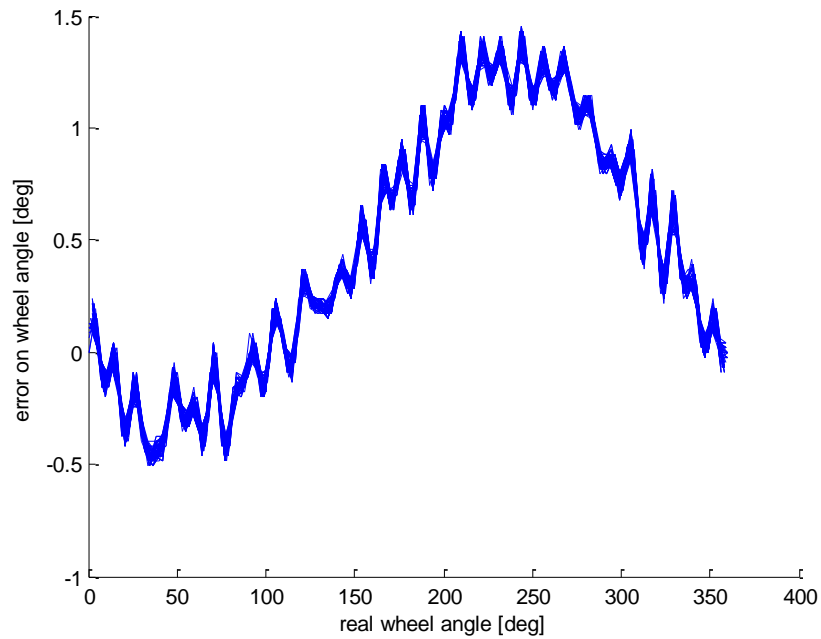
Om dit ongewenste fenomeen weg te werken zal er een andere procedure gebruikt worden. De fout wordt niet meer bepaald door de kleinste-kwadratenmethode, maar door de gemeten hoek van de magnetische encoder af te trekken met de hoek gemeten door de optische encoder. De metingen van de optische encoder en de magnetische encoder worden tegelijkertijd en op dezelfde as opgemeten. Doordat ze beiden dezelfde snelheidsfluctuatie ondervinden, zal deze niet zichtbaar zijn in de meting. De fout geconstrueerd met deze methode is zichtbaar in Figuur 24.



Figuur 22 Gemiddelde fout op de hoek (via kleinste-kwadratenmethode) - optische encoder



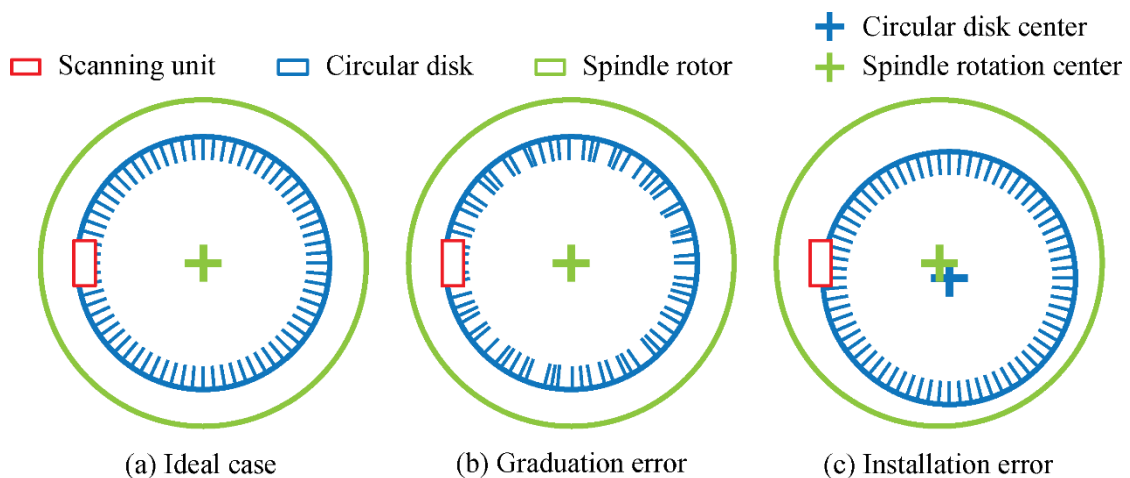
Figuur 23 Histogram van de fout (via kleinste-kwadratenmethode) op de hoek - optische encoder



Figuur 24 De fout op de hoek (magnetische encoder) ten opzichte van de optische encoder

### 3.5 Mogelijke foutbronnen

Elke incrementele encoderopstelling wordt gekenmerkt door twee typische onderdelen. Enerzijds een ring waarop we een verdeling terugvinden, anderzijds een sensor die de verdeling kan lezen. De ring heeft periodische markeringen en is gemonteerd op de as waarin men geïnteresseerd is. Een ring kan bestaan uit een schijf met openingen bij een optische encoder. Bij een magneet encoder zal deze ring bestaan uit verschillende magneetpolen. Men kan enkele fouten toewijzen aan het gebruik van hogere interpolatie elektronica voor het verkrijgen van een hogere resolutie. Deze fouten zullen een hogere harmonische verstoring veroorzaken. Bovendien heeft elk encodersysteem last van drie repeterende foutbronnen, namelijk: de excentrische montering van de encoderring, de niet-uniform verdeelde polen/openingen en de radiale verplaatsing van de gemeten as zoals (Figuur 25) [14].



Figuur 25 drie typische foutbronnen van een incrementele encoder [14]

### 3.5.1 De ideale situatie

In een ideale situatie is de verdeling over de volledige ring of schijf overal even groot en is de encoderring goed gemonteerd op de as. De grootte van de verdeling kan men bepalen door de volgende formule,  $\Delta = \frac{1}{N} \text{omwenteling}(360^\circ)$ , hierbij is N het aantal verdelingen van de ring/schijf. De afgelegde hoek kan men eenvoudig bepalen door het aantal gevonden verdelingen door de sensor te vermenigvuldigen met de verdelingsgrootte. De hoek is dan  $\theta = k \cdot \Delta$  [°] [14]. Omdat de opstelling niet theoretisch wordt voorgesteld, doen er zich foutbronnen voor.

### 3.5.2 Niet-uniforme verdeling

Indien men een encoderring heeft welke niet-uniform verdeeld is, zal er een fout optreden. Deze fout is onvermijdbaar vanwege productiebeperkingen.

Een eerste oorzaak van een niet-uniforme verdeling is de complexiteit om verschillende poolparen/openingen te voorzien op een gelijke verdeling. De ene verdeling ligt net iets verder uit elkaar dan een andere. Bijgevolg zal er bij elke encoder een bepaalde specifieke fout zijn, die altijd afwijkend is van een andere encoder. Twee encoders met eenzelfde typenummer en specificatie zijn dus niet identiek aan elkaar. De hieruit volgende fout zal dus repeterend van aard zijn. Met behulp van ijzervijzel werden de polen op de ring visueel zichtbaar gemaakt om te bevestigen dat de ring het opgegeven aantal polen bevat (zie Figuur 26).



Figuur 26 Visualisatie van de encoderring polen met ijzervijzel

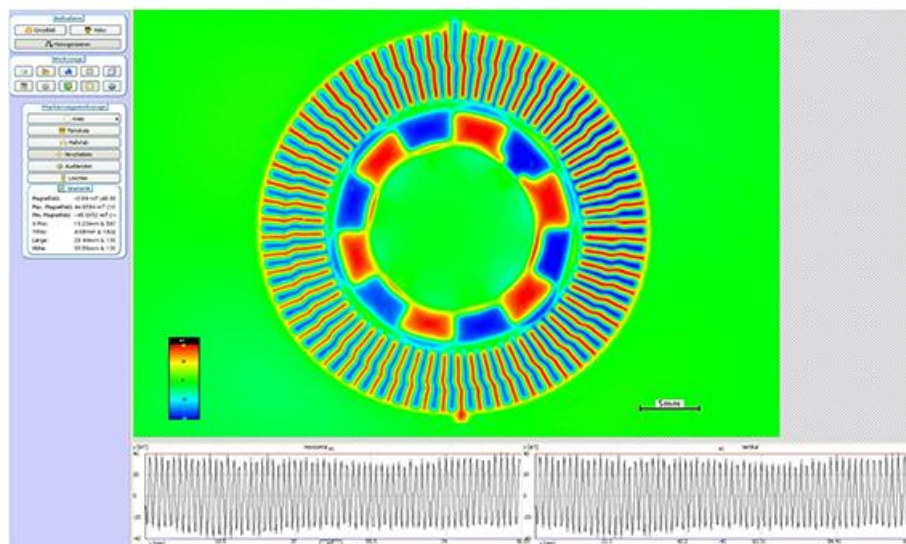
Volgens RENISHAW is het essentieel om een nauwkeurige schaalverdeling te gebruiken indien men nauwkeurige metingen verwacht. Deze schaal zal lineair verdeeld moeten worden op een cirkel met een constante straal tot het rotatiepunt. De mogelijke verdelingsfout is afhankelijk van de gebruikte productiemethode. Meestal hebben deze een verdelingsperiode van 400  $\mu\text{m}$ , omdat kleinere periodes moeilijker te produceren zijn [11].

Een mogelijke tweede oorzaak van een niet-uniforme verdeling kan afkomstig zijn van demagnetisatie van de encoderring. De kans bestaat er in dat enkele polen hun magnetisatie gedeeltelijk verliezen. De magnetische eigenschappen van een magneet kan door trillingen, te hoge temperatuur, een sterke slag of demagnetisatie door een ander magneetveld sterk afnemen.



De Weis-gebieden<sup>8</sup> zijn daardoor niet meer geordend en er zal er geen duidelijke Noord- of Zuidpool zichtbaar zijn. Het effect van gedeeltelijke demagnetisatie zal zich uiten in de amplitude van het gemeten signaal. Aangezien we enkel de sensorsignalen na signaalconditionering kunnen zien, is het onmogelijk dit na te gaan zonder specifieke apparatuur. In een encoder opstelling, zoals bij deze rolstoel, is demagnetisatie mogelijk door een te vaste montage van de ring op een niet vlakke ondergrond. De verdeling van de polen zal hierdoor niet meer uniform zijn en er zal een extra fout opduiken.

Indien men in het bezit is van specifieke apparatuur is het mogelijk de perioden van de polen zichtbaar te maken. Enkele bedrijven produceren meetapparatuur om een magnetisch veld te lezen en te visualiseren. De visualisatie gebeurt aan de hand van computersoftware (<http://www.magneticmeasurements.com>). In Figuur 27 kan u een encoderring zien waarvan men de polen heeft gevisualiseerd. Op deze manier zou men dus imperfecties kunnen controleren en verifiëren. Aangezien deze studies prijzig zijn voor ons onderzoek werd hier niet verder op ingegaan. Toch mag men niet vergeten dat imperfecties een significante fout veroorzaken op het uiteindelijke signaal.



Figuur 27 Visualisatie van magnetische polen [15]

### 3.5.3 Mechanische afkomst

Door het niet correct installeren van de ring/schijf zal een andere fout zichtbaar worden in de metingen. Ook deze fout zal repeterend van aard zijn en zal bij elke omwenteling zichtbaar zijn. De meest voorkomende fout is een excentrische montering van de ring/schijf of de excentriciteit van de as waar de ring op gemonteerd is. Aangezien deze afwijking gelezen wordt door de encodersensor gedurende een omwenteling van de as zal deze een sinusoïdale fout veroorzaken.

Radiale slag kunnen we het beste voorstellen als een fietswiel waarvan de as niet in het center (midden) geplaatst is. Hierdoor zal men naar boven en naar onder bewegen tijdens het fietsen. Deze bewegingen vinden we ook terug in de encodermetingen. Aangezien de encoderring

<sup>8</sup> Gemagnetiseerde gebieden met een bepaalde richting binnen een kristalrooster van een magnetisch materiaal

afwisselend dichter en verder bij de sensor komt, zal een afwijkende amplitude zichtbaar zijn met eventueel een sinusoidaal verloop. Op de rolstoel kan een excentrische montering toegewezen worden aan het ontwerp van de encoderhouder en de encoderring.

Het is ook mogelijk dat er een excentrische fout op de as van de reductor is. Dit kan te wijten zijn aan een niet nauwkeurige bevestiging van de lager in het huis of een niet perfecte cilindervorm van de lager [4].

We kunnen deze concentrische afwijking toewijzen aan twee mogelijke foutbronnen:

- een concentrische fout op de magneetringhouder door een onnauwkeurige productie,
- een concentrische fout welke afkomstig is van de as uit de reductor.

Hogere mechanische plaats- en vormtoleranties zouden dit ontwerp kunnen verbeteren. Aangezien er geen technische fiches voorhanden zijn van de rolstoel en de encoderhouder is er niet nagegaan of aan de voorwaarden voldaan werd. In de volgende figuur is zichtbaar welke plaats- en vormtoleranties zeker belangrijk zijn bij het ontwerp van een encoderringhouder en de as. Bij de keuze van de encoder kan men bij twee grote fabrikanten van encoders, HEIDEHAIN en RENISHAW, grafieken terugvinden met een indicatie van de mogelijke meetfouten in functie van de excentriciteit.

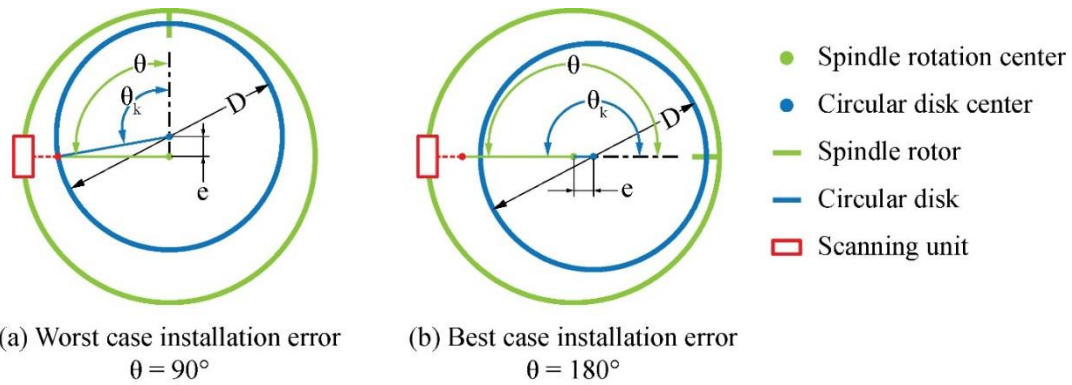
	<b>Radiale slag</b>		
	<b>Concentriciteit en coaxialiteit</b>		
	<b>Cilindriciteit (cilindervorm)</b>		

Figuur 28 Verduidelijking plaats- en vormtoleranties [16]

De sensor is het meest gevoelig voor fouten waarbij de afwijking parallel is aan de leesrichting van de sensor. Hij zal minder gevoelig zijn voor de fout waarbij de ring dichter en verder van de leeskop zal komen. De fout zal afhankelijk zijn van de rotatiesnelheid van de as en is sinusvormig [14].

De fout kan voorgesteld worden met volgende formule:

$$\theta = error \cdot \frac{\sin \theta}{\frac{1}{2} \cdot diameter} [rad], error = excentriciteit$$



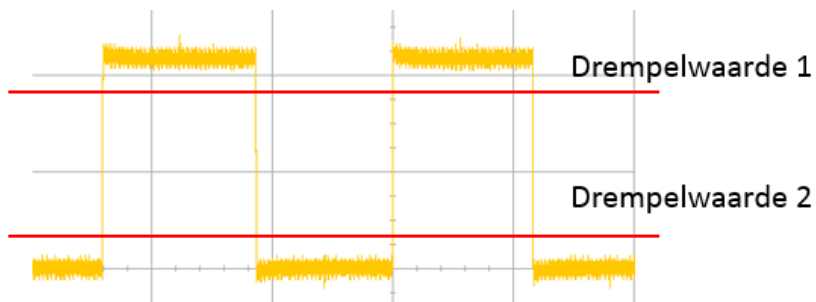
Figuur 29 Gevoeligheid van de magneetsensor voor installatiefouten [14]

Volgens RENISHAW is de fout, afkomstig van excentriciteit, voor 60% verantwoordelijk voor de totale fout op een signaal [11]. Dit foutenpercentage kan men doen afnemen door een correcte montage van de encoderring. Hierover kan u meer informatie vinden in *hoofdstuk 3.5.14*.

De optische encoder zal van deze installatiefout weinig tot geen last van hebben. De encoderschijf is gemonteerd op de as van de encoder met een hoge nauwkeurigheid. De as van de encoder en de as van de reductiekast is verbonden met een flexibele koppeling. Deze is in staat om in bepaalde mate de radiale slag van de as op te vangen. Hierdoor is deze niet meer of minder zichtbaar voor de sensor.

### 3.5.4 DAQ-kaart

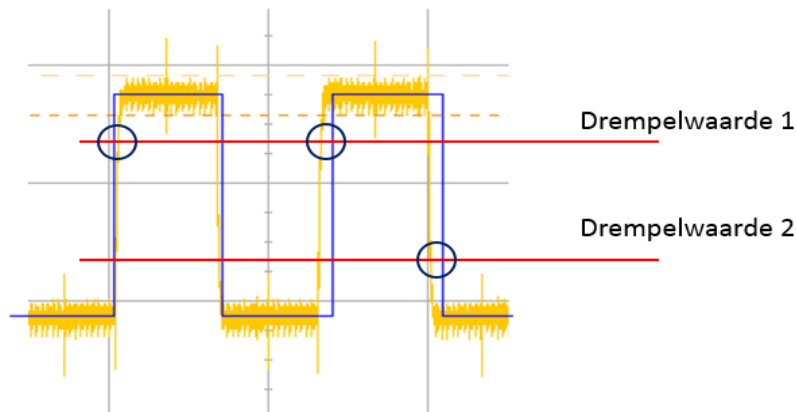
De mogelijkheid bestaat dat de flanken van de encodersignalen niet perfect verticaal staan of verschoven zijn. Dit zal invloed hebben op de meting met de DAQ-kaart. De DAQ-kaart gaat een drempelwaarde instellen waarvoor hij het signaal als hoog of laag gaat aanzien. In Figuur 30 zien we een encodersignaal met drempelwaardes. Wanneer het signaal boven drempelwaarde 1 gaat zal de DAQ-kaart het signaal zien als hoog. Indien het signaal onder drempelwaarde 2 gaat, zal het signaal als laag bekeken worden. Tussen deze twee drempelwaardes zal het signaal voor de DAQ-kaart geen waarde hebben.



Figuur 30 Voorbeeld drempelwaarde

In volgende figuur wordt het signaal van een encoder (geel) weergegeven tijdens opname aan constante snelheid. Samen met dit signaal wordt een ideale blokgolf (blauw) weergegeven. Het wordt meteen duidelijk dat wanneer de blokgolf afkomstig van de encoder (geel) afwijkt van de ideale blokgolf (blauw) de DAQ-kaart het signaal op verkeerde tijdstippen als hoog of laag zal

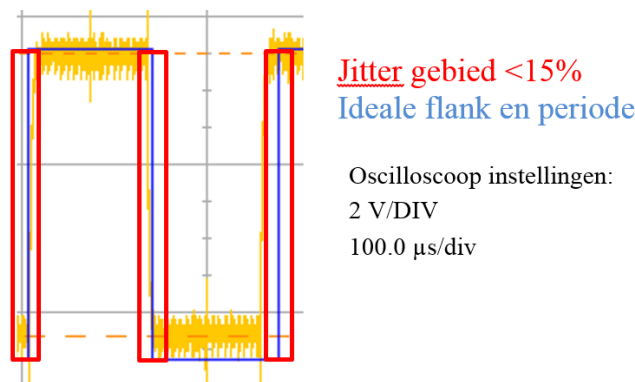
zien. We stellen vast dat het rechtse deel van het signaal van de encoder eerder drempelwaarde 1 bereikt dan het ideale signaal. Dit betekent dat de DAQ-kaart het ideale signaal een bepaalde tijd eerder als hoog zal aanzien dan het ideale signaal. Dit is nefast voor het uiteindelijke signaal omdat er een constante hoekverdraaiing verwacht wordt, aangezien er aan constante snelheid gereden wordt. De hoek wordt berekend uit het aantal pulsen in een bepaalde tijdspanne (de sampletijd). Wanneer de pulsen nu te laat of te vroeg geteld worden, zullen er te veel of te weinig pulsen in deze tijdspanne zitten. Dit zorgt dan voor een andere hoek op dit tijdstip dan er werkelijk zou moeten zijn. Hierdoor zal er een fluctuatie merkbaar zijn op het hoeksignaal.



Figuur 31 Voorbeeld verschil uitleestijd ideaal en huidig signaal

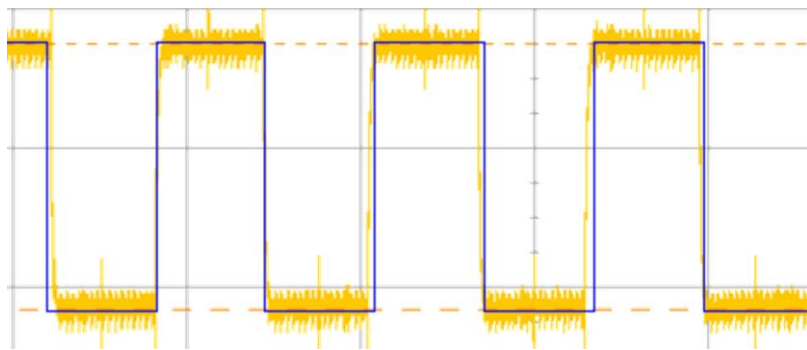
### 3.5.5 Signaal uitgang symmetrie

Idealiter zou de aan- en uit puls van de encoder 180 elektrische graden verschoven zijn. We laten daarom enkele periodes zien die opgenomen zijn met de oscilloscoop. We zien dat de periodes in de meting bij constante snelheid niet overal gelijk zijn. De blauwe aantekening laat zien hoe een ideaal signaal er uit zou moeten zien. We zien een klein verschil in de pulsbreedte. Deze kan te wijten zijn aan signaal jitter. Jitter is zichtbaar als het op en neer bewegen (schudden) van de blokgolf. Jitter is de variatie in periodebreedte ten opzichte van een aangrenzende periode. In de datasheet is aangegeven dat het fenomeen kleiner is dan 15%.



Figuur 32 Weergave jitter gebied op encodersignaal

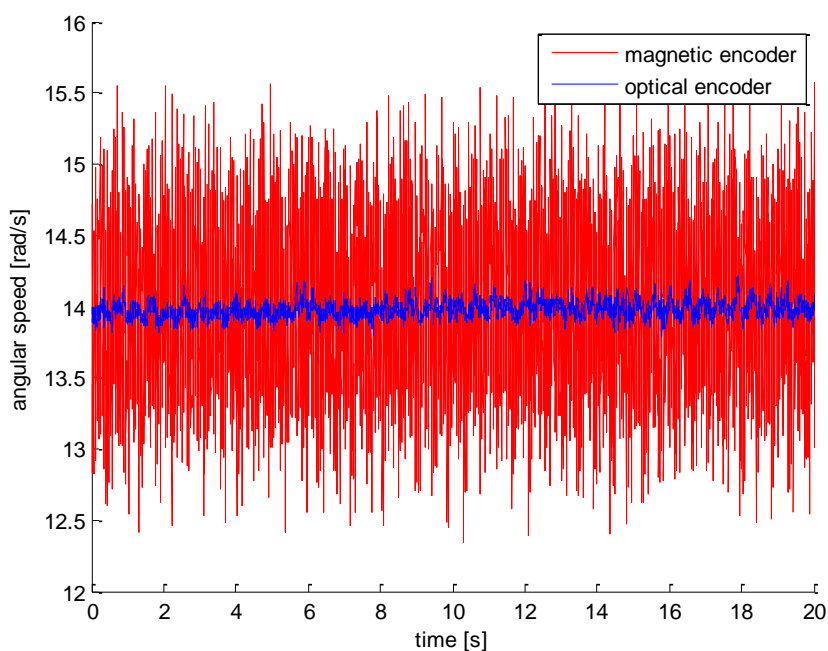
Op onderstaande figuur zien we dat over meerdere periodes de signalen afwijken van een ideaal signaal. De pulsen variëren in breedte. Een ideale encoder zou deze afwijking niet hebben. Elke periode zou even groot moeten zijn. We zien ook hier opnieuw het ideaal signaal in het blauw.



Figuur 33 Verschil ideaal signaal en encodersignaal bij constante snelheidssturing

Signaal jitter kan afkomstig zijn vanuit het productieproces van een encoder. Hoe finer en hoe beter deze productie, hoe lager het jitter percentage is. Een tweede mogelijkheid kan zijn dat jitter voortkomt uit een mechanische afwijking door een concentrische as/houder waar de encoderring op gemonteerd wordt. Deze mechanische afwijking zorgt ervoor dat de sterkte van het gemeten magnetische veld varieert. De variatie zal constant zijn over de volledige omwenteling. Deze zal resulteren in een fout die elke omwenteling terugkeert. Als laatste mogelijkheid kunnen we dit gedrag toewijzen aan niet constante sturing van de motoren. De motoren en uiteindelijk de wielen draaien niet constant aan dezelfde snelheid. Doordat de snelheid van de wielen niet constant is, zullen ook de encodermetingen beïnvloed worden.

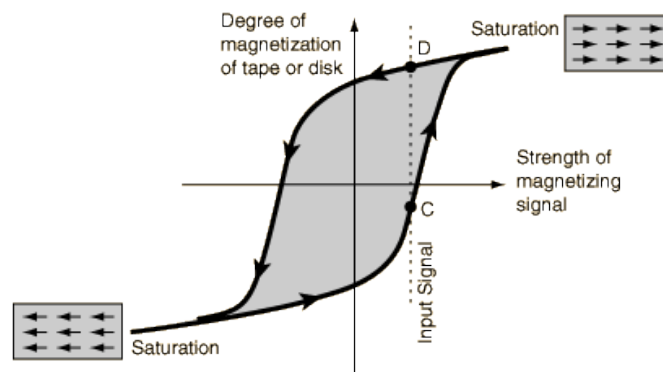
Met deze testopstelling is zichtbaar dat de optische encoder een veel beter signaal levert in de uiteindelijke snelheidswaarden. Figuur 34 geeft het snelheidssignaal weer van een meting aan constante snelheid. Deze werd berekend met de data afkomstig van de magnetische encoder en met de data van de optische encoder.



Figuur 34 Encodermeting constante snelheid

### 3.5.6 Magnetische hysteresis

Hysterisch kan men terug vinden in zowat elke sensor, de nodige waarde om de uitgang als hoog te zien is afhankelijk van de huidige waarde (meting) en van de vorige metingen. Wanneer de magneetsensor dus van de ene naar andere toestand overgaat, zal hij anders reageren. Wanneer de magneet dichterbij de sensor komt zal deze op een bepaald moment een uitgang geven. Op dit moment is het magnetisch veld sterk genoeg voor de elektronica. Op het moment dat de magnetische pool verder weg beweegt van de sensor zal het veld verzwakken. De sensor zal de uitgang laag maken. Hysteresis is het verschil aan de uitgang voor dezelfde meting en afhankelijk van het traject gevold door de sensor. Wanneer een magnetisch veld aangelegd wordt aan de sensor zullen de Weiss-gebieden van het magnetiseerbaar metaal in de sensor zich gaan richten zoals het aangelegde veld. Eenmaal het veld verwijderd wordt zal het metaal gemagnetiseerd blijven. Deze magnetisatie kan enkel teniet gedaan worden door een tegenwerkend magnetisch veld [17]. Magnetische hysteresis wordt voorgesteld als een lus zoals te zien in Figuur 35.



Figuur 35 Magnetische hysteresis lus [18]

Er zijn enkele factoren die de hysteresis van een sensor beïnvloeden:

- Het type magnetisch materiaal gebruikt om te sensor te exciteren. Er zijn verscheidende magnetische materialen waaruit magneten worden gemaakt. Hierdoor kan het mogelijk zijn dat de encoderringen onderling niet gelijk zijn. Een vergelijking tussen twee verschillende encoderringen zou dus niet correct zijn.
- Afstand tussen magnetische sensor en de encoderring. Het verschil in afstand tussen de magnetische sensor en het sensor element heeft invloed op de hysteresis curve.
- Temperatuur beïnvloedt de sterkte van het magnetisch veld. Echter is dit één van de kleinste invloed factoren.
- De grootte van de magneet bepaald een soort hysteresis gedrag.

### 3.5.7 Interpolatiefout

Om een zeer nauwkeurige meting te doen met een 4X interpolatie methode zullen de A en B kanalen van de sensor zeer goed moeten zijn, zowel in amplitude als in fase. Hoe groter de afwijking onderling, hoe groter de interpolatiefout. De fout is dus afhankelijk van de

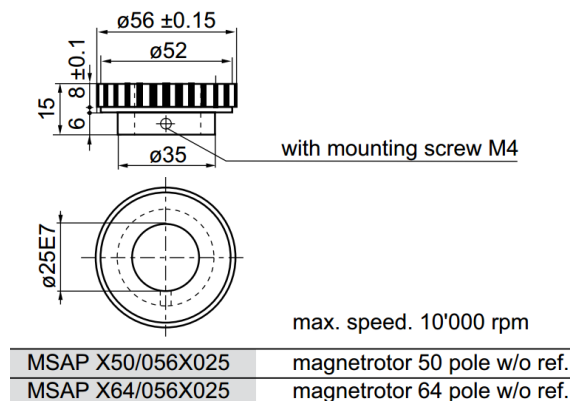
meetmethode en de manier waarop men de signalen zal interpoleren. De interpolatie methodes van encoders berusten zich op de doorgang van het signaal door nul. Indien men hoger dan 4X interpolatie gaat, zullen er ook doorgangen moeten gemaakt worden op plaatsen waar het signaal een bepaald spanningsniveau heeft. Kortom, deze hogere interpolatie technieken zijn veel gevoeliger aan spanningsvariaties. Deze rolstoel gebruikt encoders met een 4X interpolatie techniek. De interpolatiefout zal uiteindelijk resulteren in enkele hoogfrequente signaalfouten. Deze fout is bepaald door de imperfecties van de interpolatie elektronica. Aangezien deze elektronica in ons huis van de encoder verwerkt zit, kan hier geen aanpassing of verbetering gedaan worden.

### 3.5.8 Drift

Drift is het ongecontroleerd en onnodig veranderen van de uitgangswaarde van een sensor. Wanneer de meetwaarde constant is, zal er toch een wijziging zichtbaar zijn in de uitgang. Dit kan optreden door degradatie van het sensormateriaal, mechanische instabiliteit of een vreemd gedrag van de sensor op een temperatuur. De fout is systematisch en kan dan ook vermeden worden. De encoders werden getest bij stilstand en werden gedurende lange tijd uitgelezen. Deze meting toonde aan dat de uitgang constant bleef bij een niet-geëxciteerde ingang. Hierdoor kunnen we concluderen dat er geen drift op de metingen zit.

### 3.5.9 Referentiepuls

In het RADHAR-project werd de index/Z-puls niet gedetecteerd. Na onderzoek bleek dat de encoderringhouder zelf geproduceerd was en geen referentiemagneet bevatte. De encoder heeft namelijk drie magneto-resistive sensoren. Hiervan zijn twee sensoren voorzien voor kanaal A en B, een derde sensor meet aan de zijkant de referentiemagneet. De Z-puls kan gebruikt worden om de teller van de DAQ-kaart terug op nul te zetten na voltooiing van een omwenteling. Hierdoor kunnen extra controles toegevoegd worden om na te gaan of de encoder metingen heeft overgeslaan. Op een afgewerkt product wordt er best gebruik gemaakt van deze Z-puls. De magneetrotor met referentiemagneet voor de encoder in deze thesis heeft het volgende typenummer: Baumer MSAP Z64/066X025.



Figuur 36 Baumer datasheet MDFK10G: magneet rotor met referentie magneet [10]

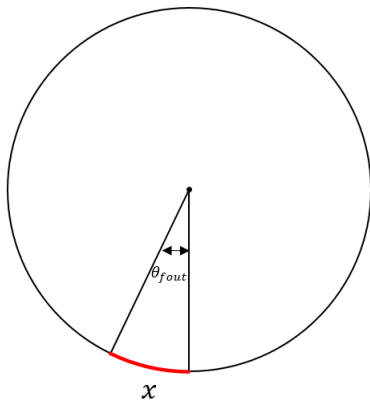
### 3.5.10 Grootte van de fout

De maximale fout op het encodersignaal is  $1,5^\circ$ . We gaan na welk effect deze fout heeft op het systeem wanneer er enkele meters gereden wordt. Neem als voorbeeld Figuur 37. Wanneer de rolstoel tijdens het draaien een andere hoek maakt dan de beoogde hoek, kan dit grote gevolgen hebben voor de locatie waar hij zal uitkomen. Neem aan dat de maximale fout van  $1,5^\circ$  juist optreedt bij een draaibeweging waarbij één wiel stil staat. Het andere wiel zal op dat moment  $1,5^\circ$  te ver gedraaid zijn. De verplaatste hoek, ten opzichte van het andere wiel van de rolstoel, zal dus wijzigen. Met behulp van de afgelegde afstand (booglengte) kan men deze hoek bepalen. De afgelegde afstand komt overeen met de booglengte van een cirkel met de wielbasis<sup>9</sup> als straal. De hoek stelt het aantal graden voor dat de rolstoel verkeerd staat. Zie Figuur 38.

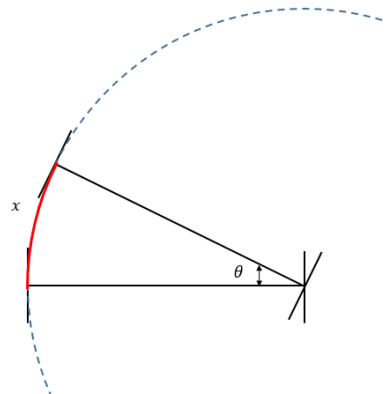
$$x = r_{wiel} \cdot \theta_{fout} = \text{wielbasis} \cdot \theta$$

$$\theta = \frac{x}{\text{wielbasis}} = \frac{r_{wiel} \cdot \theta_{fout}}{\text{wielbasis}}$$

$$\theta = \frac{0,17 \text{ [m]} \cdot 1,5 \text{ [}^\circ\text{]}}{0,6 \text{ [m]}} = 0,425 \text{ [}^\circ\text{]}$$



Figuur 37 Afgelegde afstand  $x$  van het wiel



Figuur 38 Rotatie hoek  $\theta$  van rolstoel ten opzichte van stilstaand wiel

De rolstoel gaat er van uit dat hij de juiste draaibeweging heeft uitgevoerd terwijl hij eigenlijk  $0,425^\circ$  afwijkt. Wanneer er nu vanuit deze draaibeweging  $1 \text{ m}$  rechtdoor gereden wordt, zal de rolstoel op  $0,00742 \text{ m}$  van het doel uitkomen. Wanneer de afstand vergroot, vergroot de fout.

$$x = 1 \text{ [m]} \cdot \tan(0,425 \text{ [}^\circ\text{]}) = 0,00742 \text{ [m]}$$

De fout lijkt op het eerste zicht niet groot. Echter, wanneer de snelheid berekend wordt, na afleiding in de tijd, zal er een significante fout zichtbaar worden. Eveneens zal deze fout invloed hebben op het resultaat bij het bepalen van de nodige robotparameters. Deze fout moet geëlimineerd of verkleind worden.

<sup>9</sup> Wielbasis is de afstand tussen de twee aandrijfwielen in [m]



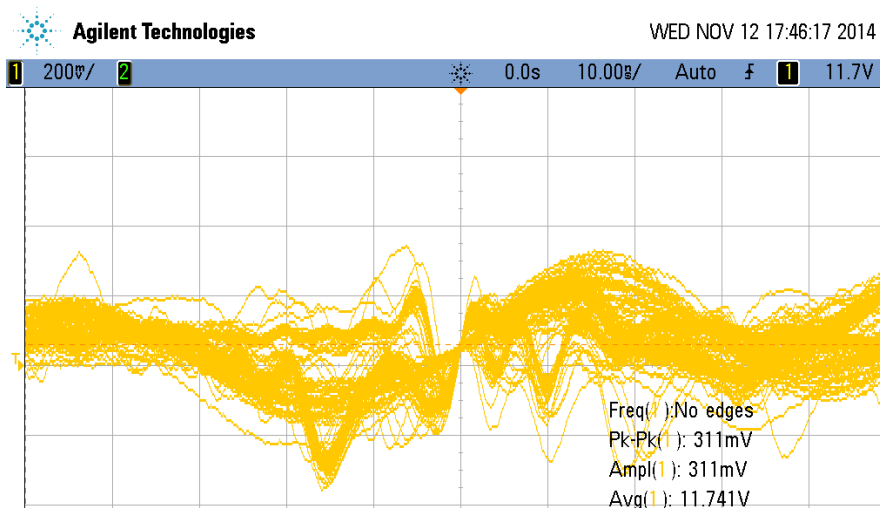
### 3.5.11 Encodervoeding- en omgeving

Om een goede werking van de encoder te verkrijgen moet men deze aansluiten op een gestabiliseerde voeding. Uit de datasheet van Baumer MDFK10G kan gehaald worden dat de voeding aan volgende eisen moet voldoen:

Tabel 2 Datasheet MDFK10G [10]

Voltage supply	8...30 VDC
Voltagedrop	<2 VDC (i=20 mA)
Circuit current max.	50 mA
Output circuit	Puh-pull short-circuit proof
Reverse polarity protection	Yes, to GND
Operating temperature	-25..+85 °C
	cable data PUR 5 x 0.14 mm <sup>2</sup> , shielded

Binnen het RADHAR-project werd gekozen om de lagere voedingsspanningen te leveren via een DC-DC converter. Deze DC-DC converter zal de voeding van de rolstoel (24 V) naar 12V brengen. Hierdoor verkrijgt men een stabiele voeding om geen of weinig invloed te ondervinden van andere verbruikers. De oscilloscoop geeft een duidelijker beeld over hoe constant deze voeding is. De gebruikte instellingen zijn 200 mV/div en 10 ns/div en de rolstoelmotoren draaien op hun hoogste snelheid. Hier zien we duidelijk een soort sinusvormig verloop op de voedingspanning. De piek tot piekspanning is 311 mV, dit betekent dat we een niet constante voeding hebben. Maar omwille van de zeer kleine tijdschaal en de zeer hoge frequentie zal dit uiteindelijk weinig invloed hebben op de meetgegevens van de encoder.



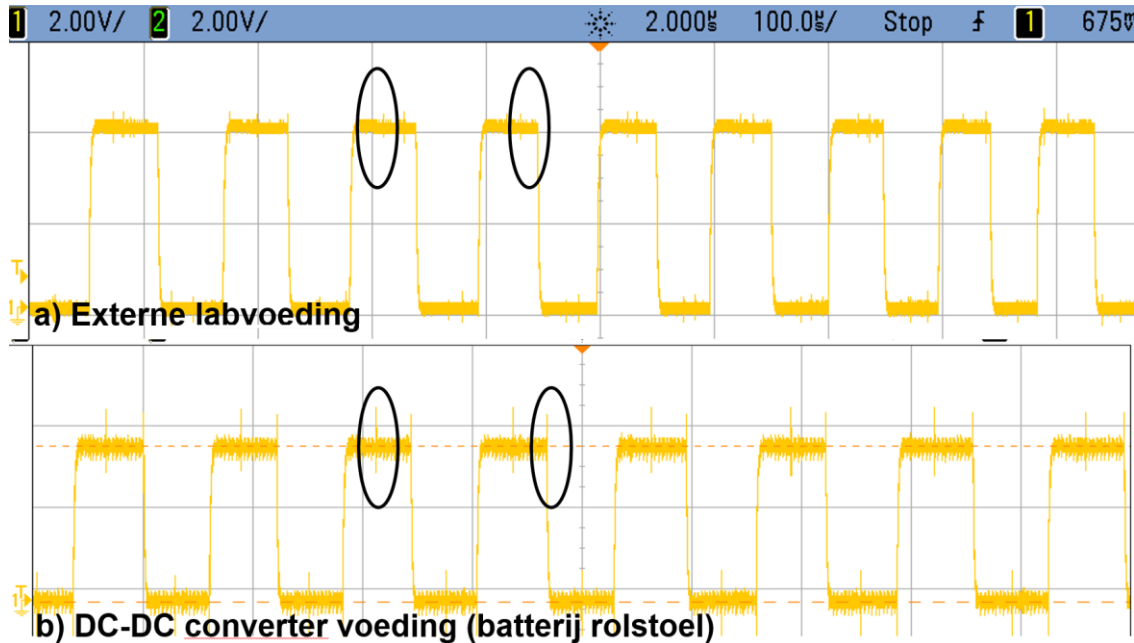
Figuur 39 DC-DC convertor bij hoge snelheid

Om te bevestigen dat de voeding geen invloed heeft op de meting werden de encoders gevoed met een externe gestabiliseerde voeding (LABVOEDING). Deze is van hogere kwaliteit en zal dus een zuiverder DC-sigitaal leveren. We merken op dat er twee kleine pieken zichtbaar zijn bij het gebruik van de DC-DC-converter. Deze pieken doen zich voor op de plaatsen waar het tweede kanaal van een lage- naar hoge toestand gaat of omgekeerd. Bij de labvoeding merken

we deze pieken niet op. Aangezien de DAQ-kaart op flanken reageert, zullen we dus weinig hinder ondervinden van de pieken. De pieken zijn niet groot genoeg voor de DAQ-kaart om deze als flank te kunnen zien.

De flanken van de blokgolf zijn steiler bij de labvoeding. Mogelijk zal de DAQ-kaart bij DC-DC-converter voeding de flanken later zien als in de ideale situatie. Dit fenomeen werd eerder besproken in *hoofdstuk 3.5.4*.

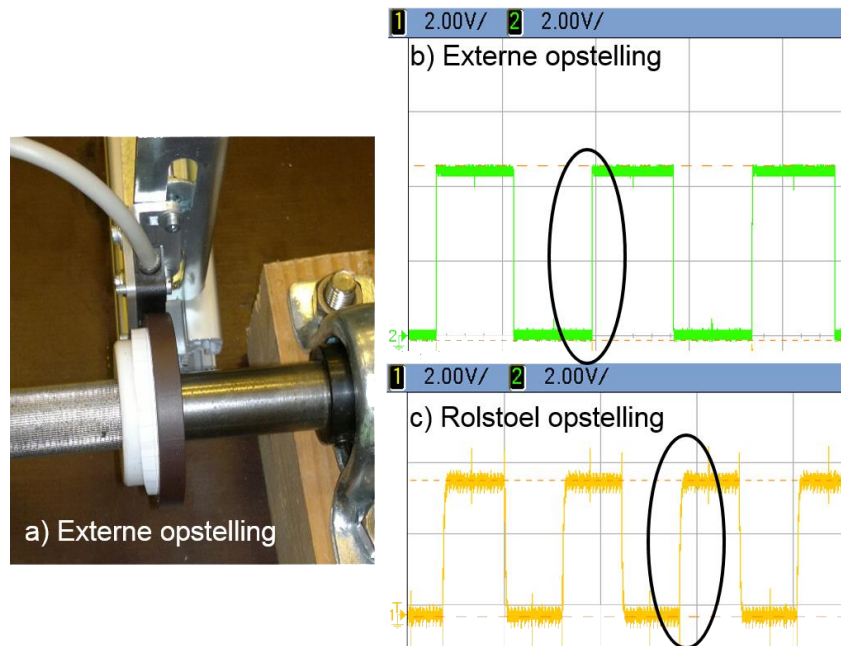
Na het vergelijken van de encodersignalen bij labvoeding en de DC-DC- converter kan men concluderen dat de voeding van goede kwaliteit is en de meting niet of weinig beïnvloed.



Figuur 40 Encodersignalen bij rolstoelvoeding en externe voeding

### 3.5.12 Elektromagnetische invloed

Aangezien de encoders geplaatst worden in een omgeving dicht bij de motoren, is er mogelijk een elektromagnetische storing van de motoren op deze signalen. Daarom werd een opstelling gemaakt waar de encoder vrij kan draaien, weg van mogelijke storingsbronnen. De encoders zijn in beide gevallen correct aangesloten en ook de shielding werd correct uitgevoerd. In de figuur ziet men de vergelijking van het signaal op de rolstoel en de externe opstelling. We zien steilere flanken en minder ruis op de blokgolf bij de externe opstelling. De encoders hebben dus wel degelijk last van een elektromagnetische storingsbron. Mogelijk beïnvloed deze de meting van de magnetoresistive sensoren en zorgt voor een afwijkende meting.



Figuur 41 a) Externe opstelling van encoder b) Externe opstelling meting van CHA encoder c) Rolstoel opstelling meting van CHA encoder

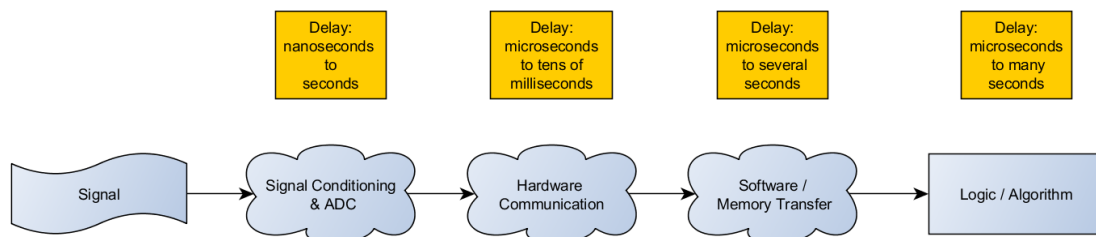
### 3.5.13 Hardware en software vertragingen

Indien men spreekt over de snelheid van een systeem kan dit in twee onderdelen opgedeeld worden. Hoe snel moeten de samples genomen worden en hoe snel moet het resultaat beschikbaar zijn na een sample. De snelheid van het nemen van een sample zal zich vertalen in de doorvoer van het systeem. Hoe sneller er data vergaard moet worden, hoe meer data er zal doorgevoerd worden naar de verwerkingseenheid. De vertraging (latency) van de componenten zal bepalen hoe snel deze informatie beschikbaar is. Latency is de totale tijd nodig om een verwerking te doen, uitgedrukt in seconden. Doorvoer is de snelheid waarmee de verwerkingseenheid signalen/ingangen kan verwerken en wordt aangeduid in samples per seconde (S/s).

Zoals bij elk proces gebeurt het doorgeven van een signaal aan de software of algoritme niet onmiddellijk. Er is altijd een bepaalde vertraging tussen het meten van een signaal en de reactie in de software. Vertragingen kan men opdelen in drie grote groepen [19]:

- Signaal conditionering zal het fysische signaal omvormen naar een digitaal bruikbaar signaal. Hierbij maakt men gebruik van analoog naar digitaal converters die gelimiteerd zijn aan een bepaalde maximumsnelheid. Mogelijk wordt er ook een filter toegepast op het signaal, wat ook zorgt voor vertraging.
- Hardware communicatie omvat het proces dat nodig is om signaal van de signaalverwerking eenheid door te brengen naar de verwerkingseenheid. Een mogelijke verwerkingseenheid is bijvoorbeeld een PC, een PLC of een FPGA. De gebruikte bus om de data te versturen, vertraagt ook het systeem.
- De software taken die uitgevoerd moeten worden zorgen voor een grote vertraging. Bijvoorbeeld het verplaatsen van data naar de correcte geheugenbank die het programma kan uitlezen. Software zal bepalen hoe snel de verwerking gebeurt. Enkele

minder doordachte operaties in de verwerking leiden tot een grote vertraging. Upgraden van de verwerkingseenheid met een snellere processor en snellere lees- en schrijfacties zal het totale systeem versnellen.



Figuur 42 De soorten vertragingen met hun bijhorende timing [19]

De software die gebruikt wordt in het onderzoek van RADHAR werkt op een Linux distributie. Net zoals elk ander besturingssysteem heeft het last van jitter. Jitter in een besturingssysteem is de variatie van de “latency/vertraging” in de tijd. Normale besturingssystemen zoals Windows voorzien een bepaalde processortijd voor elk programma. Elk programma wordt dus gelijk behandeld en krijgt geen voorkeursbehandeling op de processor. Aangezien het besturingssysteem de verschillende processen allemaal eerlijk probeert af te handelen, beperkt het gebruik van bepaalde besturingssystemen zich voor real-time metingen en verwerkingen.

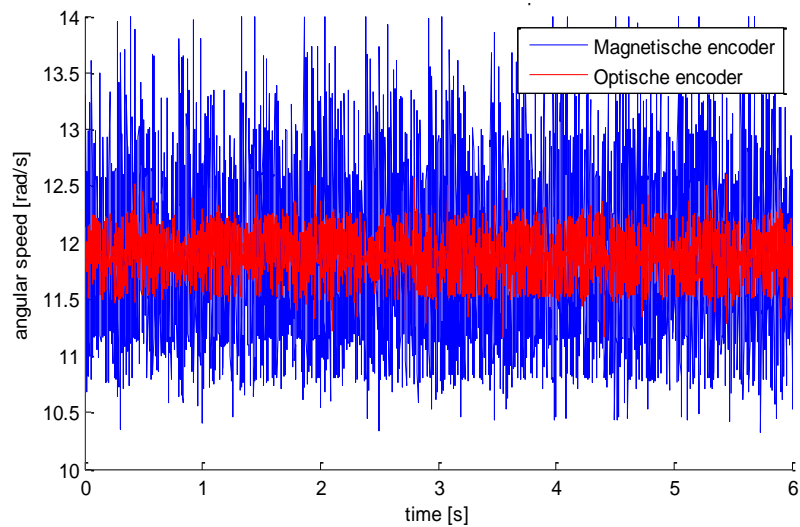
De mogelijkheid bestaat dat door jitter in tijd de verwerking van encodermetingen niet correct gebeurt. De software vraagt op een bepaalde sample tijd aan de DAQ-kaart wat de waarde is van zijn teller. Op dat moment zal hij reageren en de waarde terugsturen. De DAQ-kaart is snel genoeg en kan elke tellerwaarde zien. Er is dus tweemaal een variatie in tijd mogelijk bij de meting. Door deze vertragingen zijn de waardes die men uitleest dus eigenlijk niet meer geldig. De tijd tussen het opvragen en het ontvangen van informatie zorgt voor een bepaalde onzekerheid. De tijd dat de informatie onderweg is tussen de DAQ-kaart en de verwerking (over de bus) zal dus niet constant zijn. In werkelijkheid is de teller van de encoderpulsen al enkele stappen verder vooraleer de verwerking gedaan wordt. De variatie in jitter kan dus mogelijk een effect hebben op de metingen al is dit moeilijk te controleren aangezien er geen ander platform beschikbaar is op ACRO.

Volgens Deen B. (2007) is er ook een vertraging in de comedi-bibliotheek die gebruikt wordt voor het inlezen van de DAQ-kaart in de software. Hij merkte een vertraging op bij het gebruik van de lees- en schrijfacties via de comedi-bibliotheek. Extra testen die hij deed, bij het onderzoeken van de vertraging, toonden aan dat er ook tijd-onzekerheid was op de real-time klok van de computer. Deze onzekerheid, samen met de vertraging van de comedi-bibliotheek, resulteerde in jitter in het systeem [20].

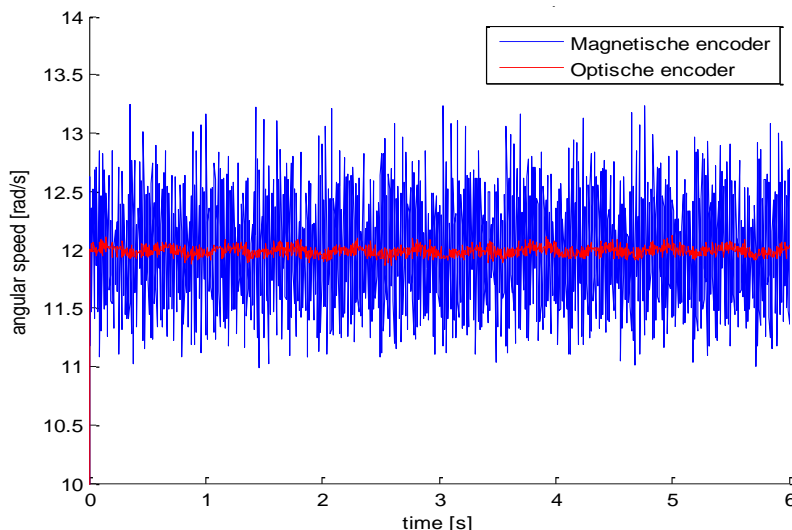
Er werden twee testen uitgevoerd op het systeem van RADHAR om te verifiëren of het gebruikte softwareplatform mogelijk last had van de vertragingen die Deen B.(2007) onderzocht. De twee metingen gebeurden bij een constante en gelijke snelheid. De bemonsteringsfrequentie, waarmee de informatie aan de DAQ-kaart (de tellerwaarden) wordt opgevraagd, is in het ene geval 5 ms. en in het andere geval 1 ms.. We zien dus duidelijk dat er grote vertragingen zijn in het systeem. De grafieken bevatten meer ruis in het geval van een hogere bemonsteringsfrequentie. Sample frequentie heeft dus wel degelijk invloed op de kwaliteit van de meting die door de software geïnterpreteerd moet worden. Een krachtigere

computer of real-time proces zou hier minder last van hebben. Dit aangezien de huidige, verouderde, verwerkingseenheid ook nog andere threads, zoals de laserscanner en het hoofdprogramma moet afhandelen. Een snellere processor zal mogelijk al een deel van het probleem kunnen oplossen.

Bij hoge sample frequentie van 1 ms. heeft de tijdonzekerheid de grootste invloed. De grote ruis is de oorzaak van de vertragingen bij het uitlezen van de DAQ-kaart tellerwaarde. Deze vertragingen zien we minder of niet indien we de sample frequentie verlagen naar een lagere waarde. Een lagere waarde betekent dat de computer meer tijd heeft om de meting op te vragen en terug te sturen alvorens er een nieuwe aanvraag komt. In dit geval heeft de snelheidsfluctuatie van de motoren en andere ruisfactoren de grootste invloed. Toch zien we nog altijd een zeer groot verschil tussen de magnetische en optische encoder.



Figuur 43 Snelheid meting met een bemonsteringsfrequentie naar de DAQ-kaart van 1 ms.



Figuur 44 Snelheid meting met een bemonsteringsfrequentie naar de DAQ-kaart van 5 ms

### 3.5.14 Plaatsing encoder

Er is gebleken dat de montage van het type encoder gebruikt in dit systeem een grote invloed heeft. Bij een verkeerde montage zijn er grote afwijkingen op de metingen zichtbaar. Volgens [11] zijn de installatiefouten een van de grootste oorzaken van een incorrecte meting. Men spreekt van “installed error”. Hierbij geven zij ook een waarde indien men twee magnetische sensoren gebruikt. De fout wordt daardoor dus duidelijk kleiner. Onder “graduation error” behoren de fouten afkomstig van het produceren van het signaal van een niet-uniform verdeelde magneetring. Interpolatiefouten door niet-lineariteiten geven een cyclische fout, in de lectuur spreekt men dan van “sub-divisional error” of SDE. De “system error” is de “graduation error” samen met de SDE. De “installed error” bevat de fouten afkomstig van de montage.

RESR	± μm	± arc seconds on 200 mm
Graduation error	0.5	1.0
System error	0.53	1.1
Typical installed error (1 readhead)	2.5	5.2
Typical installed error (2 readheads)	1.0	2.1

Figuur 45 Typische incrementele encoder fouten [11]

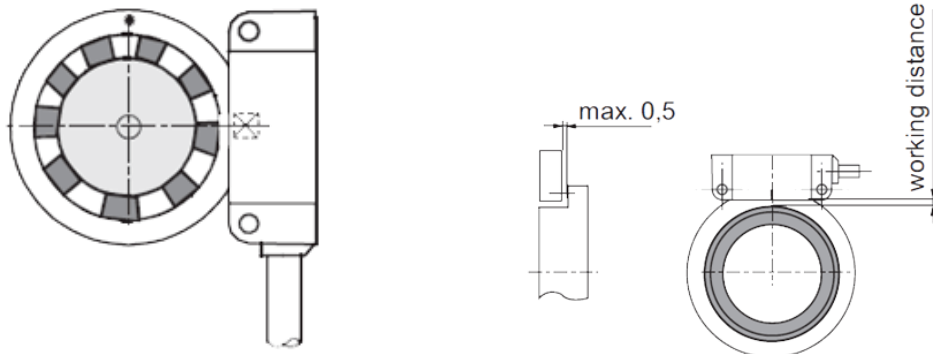
Aangezien deze montage invloed heeft op de metingen staat in de datasheet van de encoder in detail uitgelegd hoe de montage moet gebeuren.

Figuur 46 a) toont aan dat wanneer men de centerlijn van de encoder sensor perfect aligneert, de twee kanalen een fase verschuiving van 90° hebben. Kanaal A zal op deze manier voorrijlen op kanaal B wanneer de as met de klok mee draait. Bij het tegen de klok in draaien zal kanaal B voorrijlen.

Figuur 46 b) geeft een maximale werkingsafstand van 0,5 mm. Dit voorschrift is in dit systeem niet van toepassing omdat er reeds gewerkt werd met zelf ontworpen houders. Meestal worden houders van de fabrikant gebruikt. Deze bevatten een kleine referentiemagneet die zich in de houder bevindt. A.d.h.v. deze referentiemagneet zal de referentiepulss (of Z-puls) geactiveerd worden. Deze puls komt éénmaal per omwenteling voor en zal dus een idee geven wanneer een omwenteling is afgelopen. Om dit optimaal te laten werken, mag er een maximale werkafstand van 0,5 mm zijn.

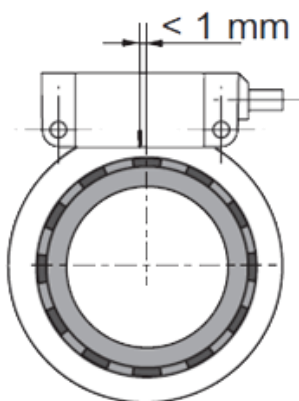
Figuur 46 c) schrijft voor dat de encoder axiaal net in het midden t.o.v. de encoderring gepositioneerd dient te zijn. Deze uitlijning is op de huidige rolstoel moeilijk in te stellen. De encoderhouder maakt het mogelijk om de hoek en de uitlijning van de sensor te wijzigen. Een beter ontwerp, waarin de encoderring en de sensor vast gemonteerd staan, zou betere resultaten geven. Ook zal daardoor de installatie eenvoudiger zijn. Op deze manier kan er wel met een bepaalde zekerheid gewerkt worden. Deze houders zijn onder verschillende vormen beschikbaar bij fabrikanten van magnetische encoders.

Figuur 46 d) de parallelle uitlijning van de encodersensor en de encoderring heeft invloed op de metingen. Indien er een kleine hoekverplaatsing is tussen de encodersensor en de encoderring zullen kanaal A en B niet meer  $90^\circ$  fase verschuiving hebben. Dit aangezien de tweede sensor het signaal eerder zal kunnen terugzien. Dit heeft ook invloed op de amplitude. Deze zal het grootste zijn wanneer de ring en sensor parallel en in het midden van de ring zijn uitgevoerd. De korte zijde van de ring mag een afwijking van  $3^\circ$  hebben en in de lengterichting van de sensor mag er maximaal een afwijking zijn van  $3^\circ$  ten opzichte van de ring.

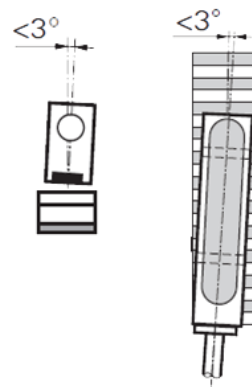


a) Mounting , CHA is leading CHB by  $90^\circ$  when rotating CW

b) Working distance



c) Axial misalignment



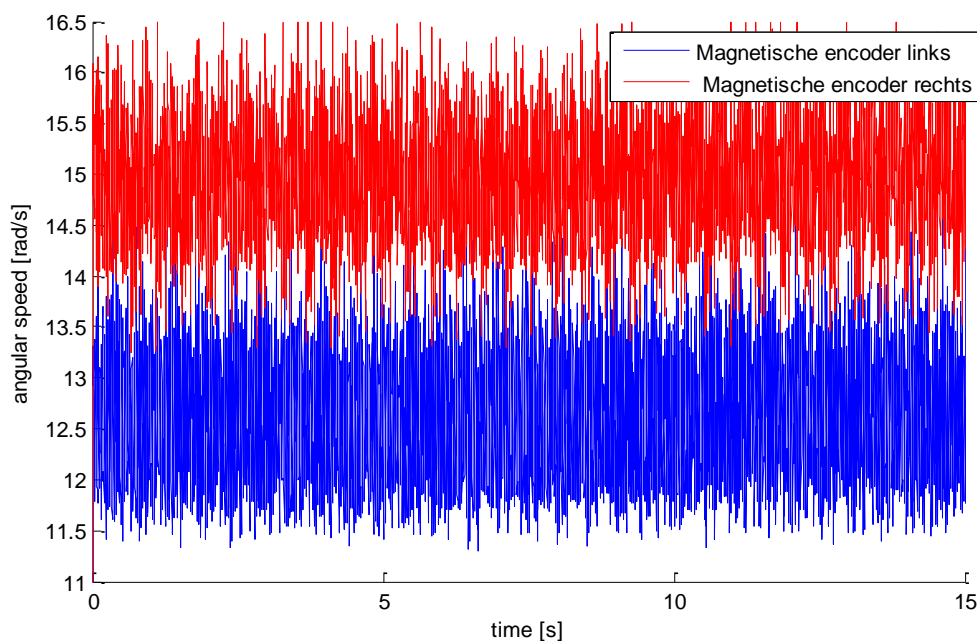
d) Angular misalignment

Figuur 46 Datasheet Baumer plaats toleranties MDFK10G [10]

De uitlijning van de encoderring heeft ook een invloed. Wanneer een encoderring niet goed is uitgelijnd zal die er als een ellips uitzien wanneer er axiaal op gekeken wordt. Dit wil zeggen dat de baan die de encoderring beschrijft telkens per omwenteling korter en verder bij de encoder ligt. Dit probleem werd in *hoofdstuk 3.5.3* verduidelijkt. Bij het ontwerp en montage van de encoderring moet men nauwkeurig de plaats- en vormtoleranties volgen. Indien dit niet gebeurt, zal er tijdens het meten een terugkerende fout optreden. Aangezien deze voorschriften niet in de datasheet vermeld zijn, zoals bij Baumer, moet men zelf nauwkeurige toleranties opleggen.

De best mogelijke plaatsing werd door trial-en-error bereikt. Tijdens het positioneren van de encoders werd er een minimum- en maximumsnelheid weergegeven. Dit verschil moet zo klein mogelijk zijn. Door het beter positioneren wordt het verschil kleiner. Dit is echter niet de methode die de fabrikanten voorschrijven. Zij gebruiken dure apparatuur om de encoder met behulp van de nodige metingen uit te lijnen. Bijvoorbeeld bij Heidehain ([www.heidehain.de](http://www.heidehain.de)) kan men het toestel PWM9 aanschaffen dat de nodige metingen kan doen voor incrementele encoders. Hierbij zal ook de kwaliteit van metingen getoond worden. Dergelijke apparatuur samen met een goede houder voor sensor en ring zou het eenvoudiger maken om de uitlijning correct te doen.

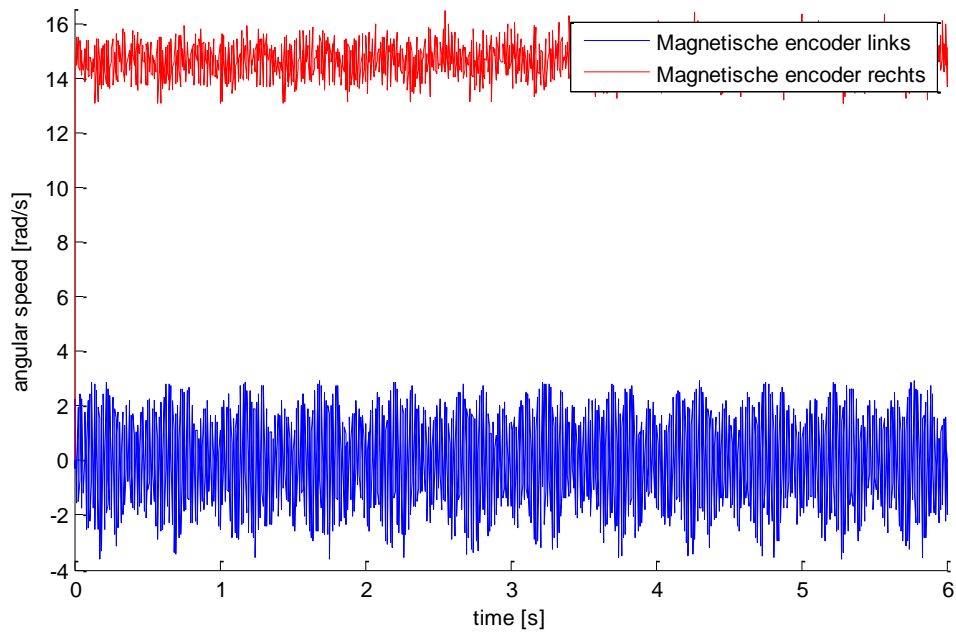
In onderstaande figuren is duidelijk zichtbaar dat bij een bemonsteringsfrequentie van 5 ms. de uitlijnfouten een invloed hebben op de meting. Er werden enkele metingen gedaan waarin we telkens één waarde wijzigden. Deze meting vergeleken we dan met de andere magnetische encoder die zo goed mogelijk gemonteerd stond. Hieruit konden we de invloed nagaan van één enkele parameter. De wijzigingen werden altijd gedaan aan de linkse magnetische encoder. Op de figuren is de omwentelingsnelheid van de wielen te zien. Een axiale afwijking geeft een te lage waarde op het snelheidssignaal. We zien dat de software hierdoor een te lage snelheid zal berekenen. Een kleine afwijking zal dus grote invloed hebben op het uiteindelijke snelheidssignaal.



Figuur 47 Grote axiale wijziging op de linkse encoder

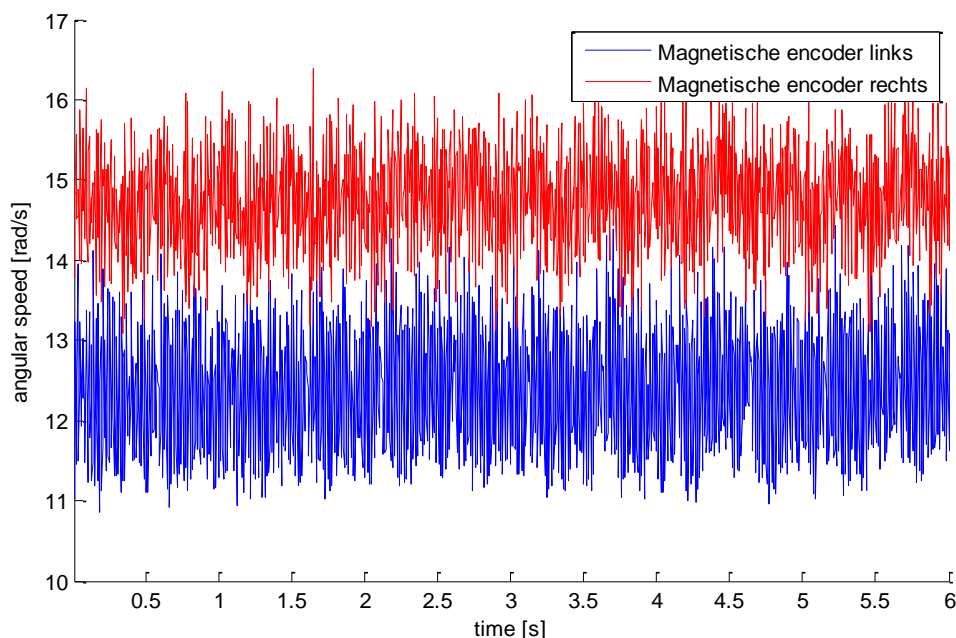
De werkafstand van de encoder tot de magneetring moet 1 mm zijn. Wanneer deze werkafstand van de encoder vergroot werd, met ongeveer 2 mm, werd zichtbaar dat de encodermetingen sterk wijzigden. De encoder kon uiteindelijk geen enkele waarde meer meten. De linkse magneet encoder geeft dan ook een snelheidswaarde van ongeveer 0 rad/s. De afstand van de sensor tot de ring wijzigt bij een mogelijke excentrische montage van de ring. Hierdoor zal er ook een wijziging zichtbaar zijn.





Figuur 48 Werkafstand tussen linkse sensor en ring vergroot

Wanneer de linkse encoder onder een verkeerde hoek geplaatst wordt, ziet men opnieuw een wijziging in de snelheden. De snelheden liggen opnieuw lager dan de correctere gemonteerde encoder. De wijziging is een gevolg van het uit fase liggen van het A en B kanaal en waarschijnlijk ook van een amplitude verschil. De signaalconditionering van de encoder maakt hier dus een verkeerde inschatting en geeft uiteindelijk een verkeerd incrementeel signaal door.



Figuur 49 Linkse encodersensor onder verkeerde hoek geplaatst

## 3.6 Mogelijke oplossingen

.De problemen die worden veroorzaakt door het niet juist positioneren van de encoderring t.o.v. de encoder zijn gekende fenomenen. Excentrisch gemonteerde magneetringen veroorzaken storingen in de meting [21]. Ook een niet-uniforme verdeling van de magneetring zorgt voor extra storingen [14]. Deze werden al eerder aangehaald in *hoofdstuk 3.5*. Hoofdzakelijk zijn er drie manieren om deze problemen op te lossen. Enerzijds kan er gebruik gemaakt worden van meerdere encoders per encoderring. Anderzijds kan er gebruik gemaakt worden van een foutentabel.

### 3.6.1 Meerdere encoders

Door gebruik te maken van meerdere encoders is het mogelijk de storingen te verminderen. Door het plaatsen van vier sensoren die  $90^\circ$  van elkaar verschoven zijn, is het mogelijk een gedeelte van de harmonische te elimineren. Hierdoor zal de precisie van de hoekmeting stijgen, aangezien de hogere harmonische verwijderd worden door de berekeningen. Deze hogere harmonische bezitten geen nuttige informatie. Ook andere fabrikanten stellen voor om meerdere encodersensoren te gebruiken voor hoekmetingen. Zij gebruiken meestal twee encodersensors samen met een ring. Een extern toestel wordt gebruikt om de metingen samen te voegen en te verwerken naar één enkel signaal. De metingen worden hierdoor positief beïnvloed [21]. Meerdere encodersensors zal resulteren in een hogere kostprijs, wat niet wenselijk is.

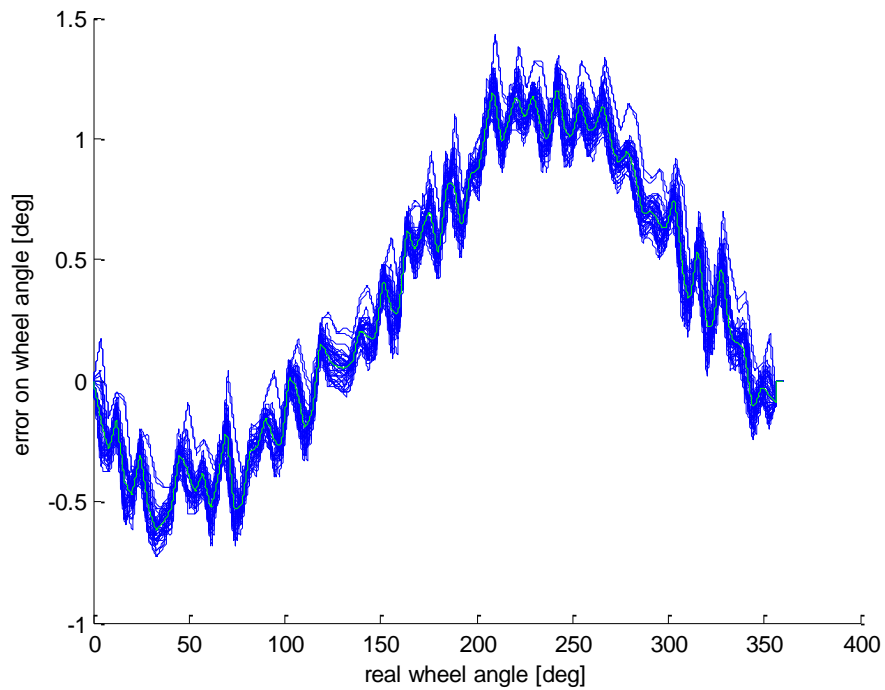
### 3.6.2 Foutentabel

Het gebruik van een foutentabel kan zeer nuttig zijn bij een fout die elke omwenteling terugkeert. Het complexe deel om dit toe te passen op het gebruikte systeem is de foutentabel perfect met het signaal te synchroniseren. De meerwaarde voor het gebruik van een foutentabel werd getest a.d.h.v. een simulatie in Matlab.

Er wordt tegelijkertijd een meting gedaan met de magnetische encoder en de optische encoder op dezelfde as. Deze signalen worden, zoals eerder vermeld, van elkaar afgetrokken om de fout op de hoek van de magnetische encoder weer te geven. Eerst wordt er een gemiddelde berekend van de fout. Dit resulteert zich in de groene lijn in Figuur 50. Dit gemiddelde is geïnterpoleerd naar een curve met 16384 punten. Dit is ook het aantal flanken dat de DAQ-kaart zal tellen over één volledige omwenteling. Hierdoor kan later de foutentabel eenvoudig geïmplementeerd worden. Er hoeft enkel nagegaan te worden aan welke puls men zit bij het tellen. Met deze positie kan men gaan kijken in de foutentabel en deze waarde van het signaal aftrekken.

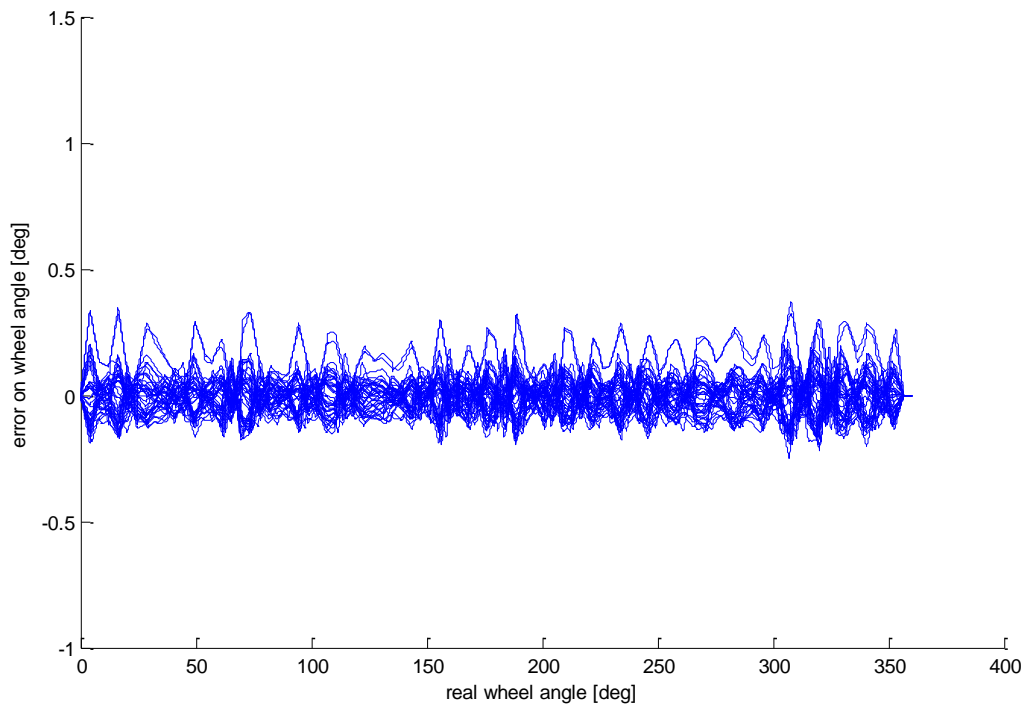
Tabel 3 Voorbeeld foutentabel

<i>Hoek<sub>gemeten</sub></i> (°)	<i>Correctie</i> (°)	<i>Hoek</i> (°)
10,2	0,2	$10,2 - 0,2 = 10$
13,5	0,5	$13,5 - 0,5 = 13$
14,8	-0,2	$14,8 - (-0,2) = 15$
...		

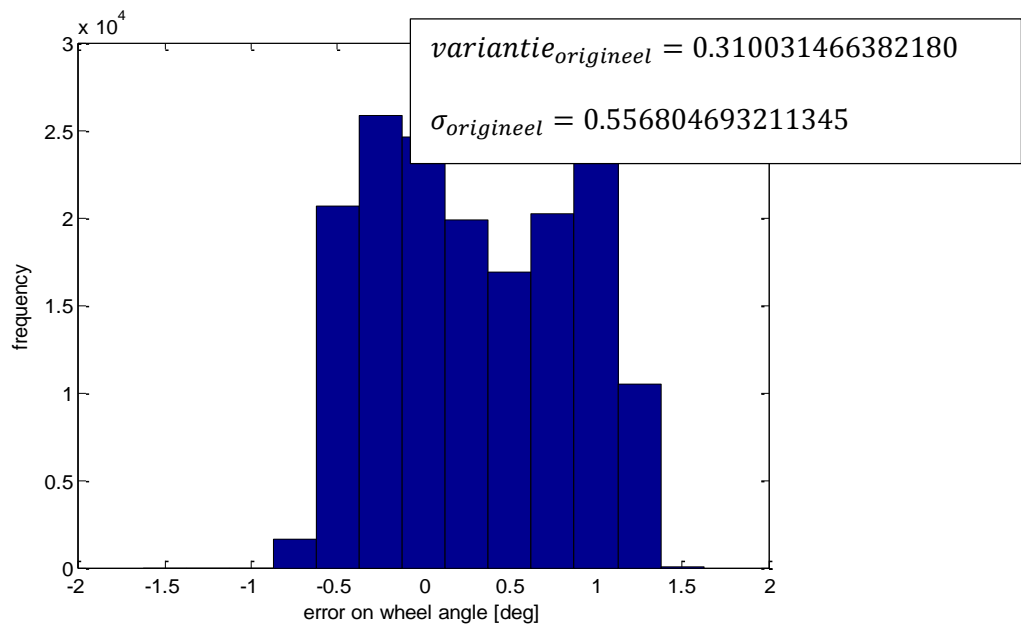


Figuur 50 Fout op de hoek (blauw) gemiddelde fout op de hoek (groen) t.o.v. de optische

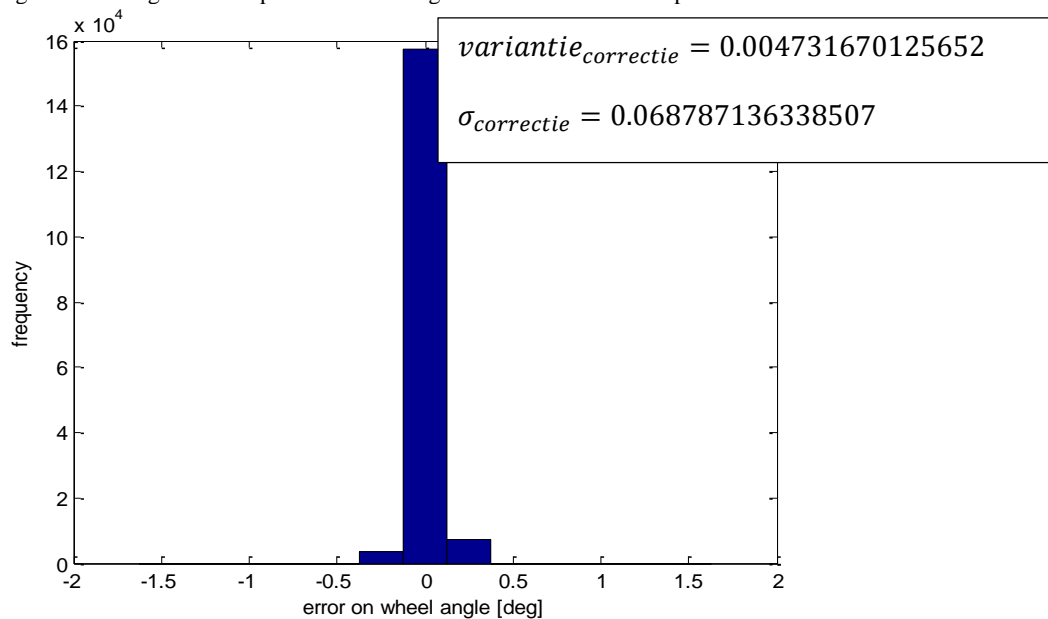
Bij het weergeven van de meting per omwenteling en de foutentabel aftrekken van het signaal, wordt Figuur 51 bekomen. Deze verbetering zal resulteren in een beter histogram (Figuur 52 en Figuur 53).



Figuur 51 Resulterende fout na gebruik van fouten tabel



Figuur 52 Histogram fout op de hoek van magnetische encoder t.o.v. optische encoder



Figuur 53 Histogram fout op de hoek van magnetische encoder na toepassing correctietabel

Het probleem om deze methode te implementeren in het systeem is om de foutentabel uit te lijnen met het ingelezen signaal. Wanneer de PC met de software uitgeschakeld wordt, is er geen controle meer over waar de encoderring zich bevindt t.o.v. de encoder. Wanneer op dat moment de positie van de wielen gewijzigd wordt, is dit voor de PC niet te achterhalen. De foutentabel is op dat moment niet meer gesynchroniseerd. Dit zou opgelost kunnen worden door de referentiepulss van de encoder te gebruiken. Op die manier zou, na het opstarten van de PC, de foutentabel gebruikt kunnen worden vanaf het moment dat de referentiepulss gegeven wordt. Een investering in de juiste houder met referentiemagneet is aan te raden. Indien men investeert in een absolute encoder is het mogelijk om deze tabel nog eenvoudiger te implementeren. Deze encoder weet namelijk op elk moment waar de as zich bevindt in de omwenteling.

### 3.6.3 Filter

Om het signaal te verbeteren zal er gebruik gemaakt worden van een digitale filter. Een laagdoorlaat filter maakt het mogelijk om enkel de nodige frequenties door te laten, waarop een zuiverder signaal verkregen wordt. Op de theorie van de filters wordt in deze thesis niet ingegaan. Er wordt verwacht dat een simpel filterontwerp resulteert in een beter signaal, zonder hiervoor een diepgaande studie te hoeven doen naar de frequenties [22].

Filters veranderen de amplitude en de fase van een bepaalde frequentieband die gekozen wordt. Er zijn vier grote basisfilters. Een laagdoorlaatfilter zal enkel de lagere frequenties van een signaal doorgeven. Een hoogdoorlaatfilter doet dit voor de hogere frequenties. Een banddoorlaatfilter maakt het mogelijk voor de gebruiker om een bepaalde frequentieband door te laten. Bandsperfilters kunnen gebruikt worden om bepaalde frequenties te onderdrukken. De frequentieresponsen voor al deze filters zijn niet optimaal.

Bij digitale signaalverwerking zijn er twee mogelijke benaderingen voor het ontwerp van een filter, namelijk de *finite impulse response* (FIR) en de *infinite impulse response* (IIR), waarbij de respons op een ingangsimpuls bij de ene eindig is en bij de andere oneindig. Er valt op te merken dat een IIR-filter niet altijd stabiel is maar wel betere prestaties levert dan een FIR-filter bij gelijkblijvende orde [22].

In deze thesis werd een IIR-filter ontworpen aangezien deze eenvoudiger te implementeren is. Een FIR-filter zal niet onstabiel worden. Echter een IIR-filter draagt de voorkeur omdat deze minder geheugen en processorkracht vraagt. Eveneens heeft deze filter minder impact op de vertraging van hetingangssignaal hetgeen een invloed heeft op de stabiliteit van het verdere programma [22].

#### 3.6.3.1 Filterkeuze

Er zijn vier bruikbare filtertypes: de Butterworth, de Chebyshev, de Elliptic en de Bessel filter.

De Butterworth filter heeft een vlakke doorlaatband met lage roll-off<sup>10</sup> factor.

Chebyshev filters worden gekenmerkt door een doorlaatbandrimpel bij type één Chebyshev. Een type twee Chebyshev heeft een rimpel in de sperband. De Chebyshev heeft een betere roll-off factor in vergelijking met de Butterworth.

Elliptic filters hebben in de doorlaat- en in de sperband een bepaalde rimpel en daardoor de steilste roll-off factor.

Bessel filters kenmerken zich door een minder steile roll-off factor. Zij hebben het voordeel dat elke frequentie met eenzelfde tijd vertraagd wordt. Dit noemt men in de specifieke literatuur *group delay*.

Jammer genoeg is er geen filter die alle voordelen bundelt. Er is geen filter met een lineaire faserespons, een vlakke doorlaatband en tevens een steile roll-off factor. Later zal er geoordeeld worden welke filter het signaal het meest verbetert.

---

<sup>10</sup> Roll-off is de steilheid van de overgang tussen de doorlaatband en de stopband

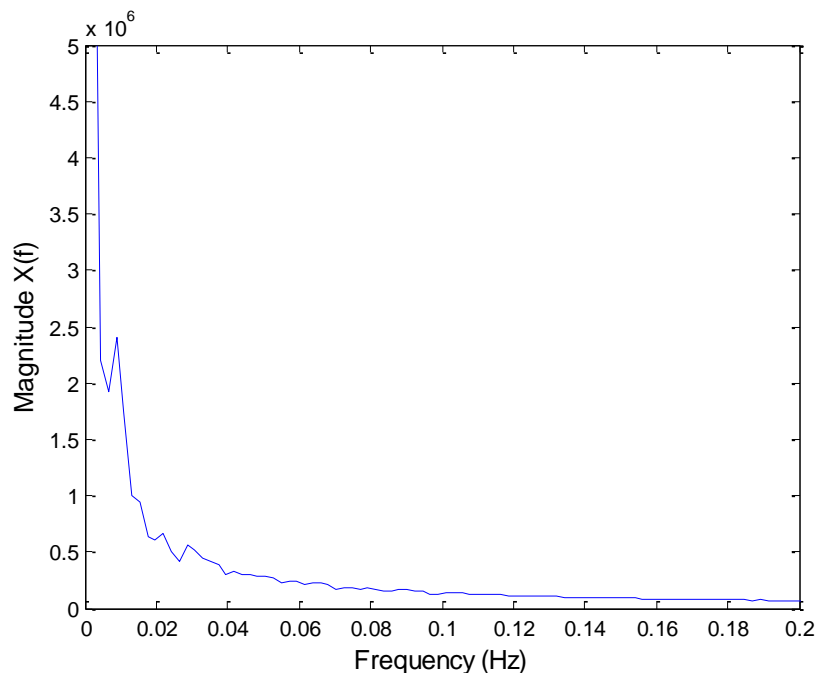
### 3.6.3.2 FFT-analyse

Aan de hand van een FFT-analyse kan men stoorfrequenties terugvinden. Deze analyse gebeurt op de dataset afkomstig van de rolstoel. Omdat een FFT-analyse altijd uitgevoerd wordt aan de bron van het signaal zal ook hier een analyse gedaan worden. Dit gebeurt met de hoek afkomstig van de encoders. Zo wordt er een beeld verkregen van de hoek in het frequentiedomein waarmee bepaald kan worden welke frequenties een storende invloed hebben.

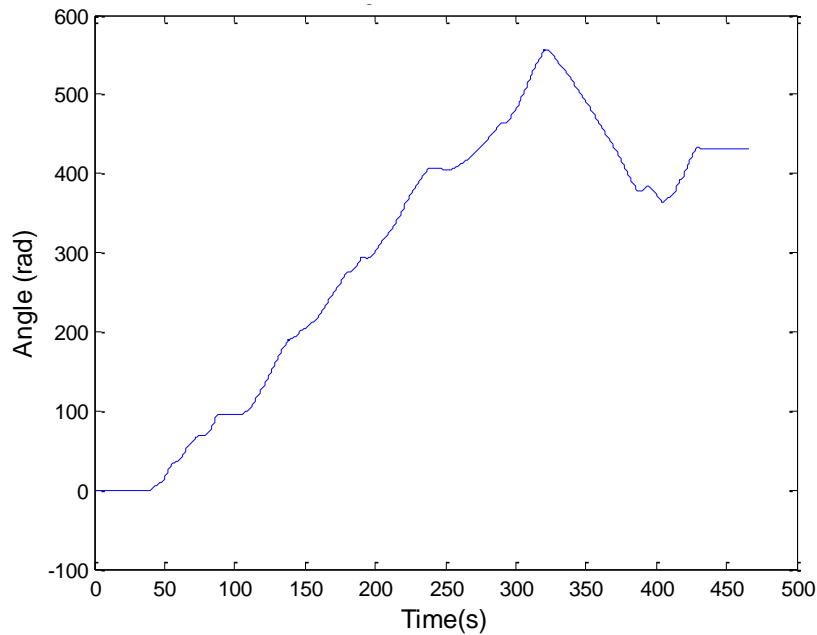
In Figuur 54 is duidelijk zichtbaar hoe groot de magnitude van de 0 Hz component is. De magnitude is niet gelijk aan de amplitude van een signaal. De amplitude is de waarde hoever een punt van nul ligt. Deze kan positief of negatief zijn. De magnitude geeft weer hoe ver de waarde van nul ligt, ongeacht de richting. De magnitude is altijd positief en geeft een waarde weer die proportioneel is met de amplitude, afhankelijk van de gebruikte instellingen voor de FFT-analyse.

De magnitude op 0 Hz is zeer groot. Dit kan betekenen dat er weinig variatie in het signaal zit. Indien dit het geval is, zal er een hoge DC-offset zijn. Op Figuur 55 duidelijk dat er weinig variatie in het signaal zit waar de FFT-analyse op gebeurt.

Opmerkelijk is dat ongeacht de zeer grote DC-component op dit signaal, er een groot effect is op het afgeleide (snelheid) signaal. De hogere frequenties hebben dus een grote invloed op het signaal. Om toch een bepaalde hoeveelheid van deze frequenties weg te filteren, zal er gebruik gemaakt worden van een laagdoorlaatfilter.



Figuur 54 Frequentie domein van de hoek

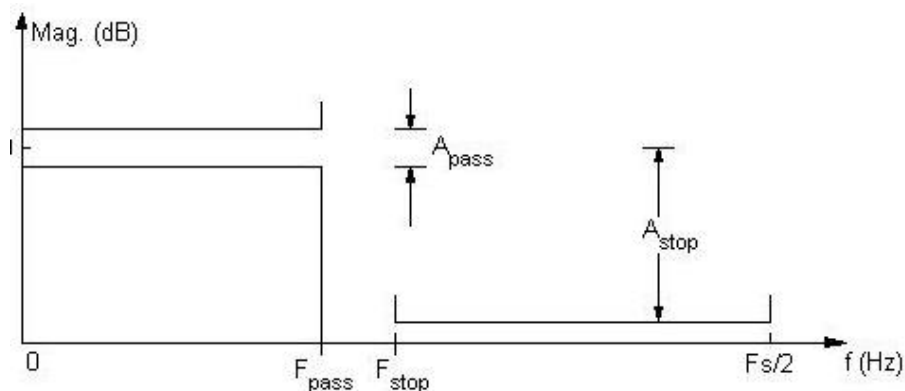


Figuur 55 Hoek van de encoder in de tijd

Om hogere frequentiestoringen te vermijden, wordt er gebruik gemaakt van een Chebyshev filter. Deze zal geen rimpel hebben in de stopband, maar wel in de doorlaatband. Met behulp van de *filter design tool* werd deze filter ontworpen in Matlab.

Voor het selecteren van de doorlaatbandfrequentie werd gekozen voor 0.5 Hz. Dit aangezien hier de meest fundamentele frequenties van het signaal worden doorgelaten. De hogere frequenties zullen dan weggefilterd worden. Als stopband werd gekozen voor 10 Hz. Hierdoor zal de roll-off minder steil zijn. Frequenties boven 10 Hz zullen volledig onderdrukt worden.

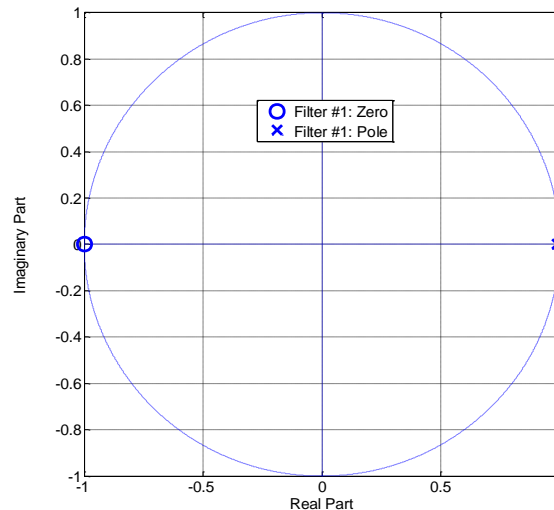
De rimpel toegelaten in de doorlaatband zal een negatieve invloed hebben op de metingen. Een hogere rimpel zal een steilere roll-off hebben. Er zal dus een compromis gekozen moeten worden, want de Chebyshev impulsrespons is zeer afhankelijk van deze waarden. Er werd gekozen voor een rimpel in de doorlaatband van 1 dB. Voor de demping in de stopband werd gekozen voor een *attenuation coëfficiënt* van 60 dB. Dit resulteert in een sterke demping van de stopband. Dit geeft volgende parameters:  $F_{pass} = 0,1 \text{ Hz}$ ,  $F_{stop} = 1 \text{ Hz}$ ,  $A_{pass} = 1 \text{ dB}$  en  $A_{stop} = 60 \text{ dB}$  zoals weergegeven in Figuur 56.



Figuur 56 Overzicht van parameters voor filter in het frequentiedomein

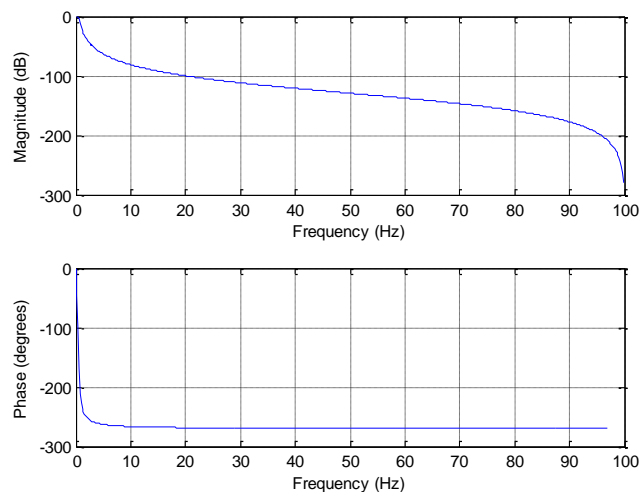
### 3.6.3.3 Verificatie van de filter

De nulpunten en polen van de filter zullen gevolgen hebben voor het Bode-diagram. De filter is stabiel wanneer alle polen binnen de eenheidscirkel liggen. Met behulp van Matlab is het eenvoudig om het nulpunten-polen-diagram van de filter weer te geven. Op de figuur is zichtbaar dat de polen binnen de eenheidscirkel vallen. Volgens Matlab is deze filter van orde drie en zijn deze parameters hierbij ook stabiel.



Figuur 57 Nulpunt polen diagram (3 polen, 3 nulpunten)

Door middel van een Bode-diagram kan de verhouding van de amplitude tussen de in- en uitgang verkregen worden, alsook de faseverschuiving van de in- en uitgang in functie van de frequentie [23]. We zien dat de fase op de doorlaatfrequenties gelijk is aan  $0^\circ$ . Eenmaal in de stopband zien we dat het signaal gedempt wordt en dat ook de fase ( $-270^\circ$ ) hoek een maximale vertraging krijgt bij hogere frequenties.



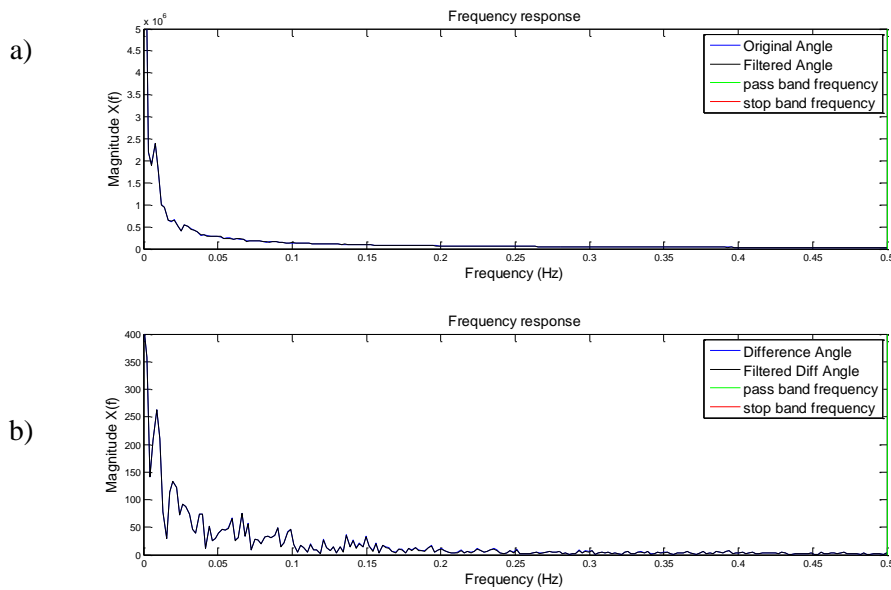
Figuur 58 Bode plot ontworpen filter

### 3.6.3.4 FFT-analyse na filter

In Figuur 59 is in a) de frequentierespons zichtbaar van het originele signaal en het gefilterde signaal. Het verschil lijkt hier niet waarneembaar door de grote waarden. De doorlaatfrequentie is afgebeeld in het groen, de stopbandfrequentie is niet zichtbaar aangezien deze op 1 Hz ligt.

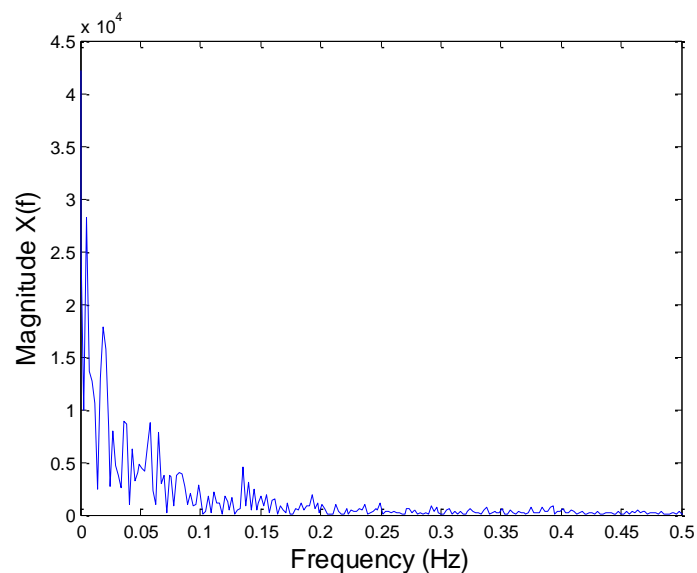


Indien het signaal afgeleid wordt, kan men een verschil opmerken in beide signalen. Het zwarte signaal in Figuur 59 b) ligt lager dan het originele afgeleide signaal. Dit geeft weer dat de filter wel degelijk invloed heeft op de waarden.



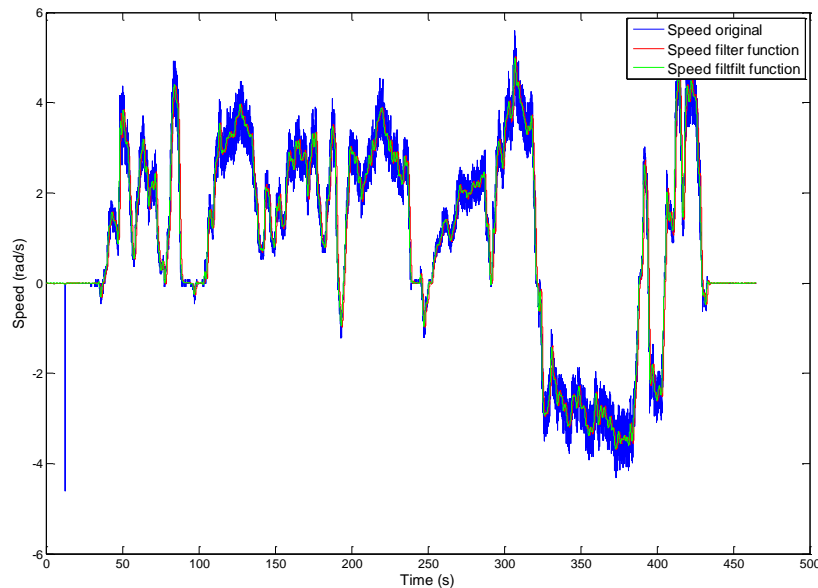
Figuur 59 Frequentie respons van a) de originele en gefilterde hoek en b) de afgeleide hoek en de afgeleide gefilterde hoek.

Om het beeld beter zichtbaar te maken zijn de gefilterde en originele afgeleiden van elkaar afgetrokken. Hierdoor is het verschil merkbaar en valt meteen op dat er wel degelijk frequenties achterwege gelaten worden.



Figuur 60 Frequentie respons van originele hoek afgetrokken met de gefilterde hoek

De bijhorende Matlab code is in bijlage D terug te vinden. Om te kijken of deze filter wel degelijk werkt, wordt de berekende snelheid met de originele en de gefilterde hoek weergegeven in volgende figuur. Het verloop van de snelheid is meer gelijkmatig en zal dus minder ruis bevatten, dit zal het gehele systeem positief beïnvloeden.



Figuur 61 snelheid berekend met originele hoek (blauw) en gefilterde hoek (rood)

### 3.6.3.5 C++ Implementatie

Aangezien het besturingssysteem van de rolstoel in C++ geschreven is, werd deze filter ook uitgewerkt in dezelfde code. Met behulp van Matlab konden de filtercoëfficiënten bepaald worden.

Afhankelijk van hoe snel deze filter in werkelijkheid moet zijn, kan gekozen worden om gebruik te maken van de filfilt functie van Matlab. Deze zal een voorwaartse en achterwaartse filtering doen van de data. Dit zal er voor zorgen dat het signaal niet verschoven wordt door een grote fase verschuiving. Het nadeel hiervan is dat er meer verwerkingstijd nodig is. Dit is nadelig in een real-time systeem. Daarom werd gekozen om de filterfunctie uit te werken. Beiden functies kunnen teruggevonden worden in de bijlage.

De zogenaamde numerator en denominator van de filter werd berekend in Matlab. Deze waarden werden opgeslagen en geven goede resultaten bij 200 Hz. Mogelijk kan later ook deze functie in C++ verwerkt worden. Met behulp van deze parameters zal de implementatie in C++ dezelfde filtering doen als Matlab. Op deze manier verkrijgt men hetzelfde resultaat. Hiervoor werd dan ook de filterfunctie van Matlab op dezelfde manier geïmplementeerd.

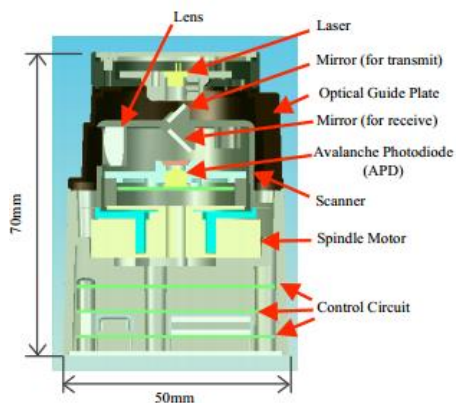
Het is mogelijk met behulp van Matlab Coder een C++ code te generen van een m-file [24]. Dit werd gedaan voor beide filtermethoden. Volgens Proakis J. geeft dit een minder snelle verwerking en werd gekozen om de filtermethode van Matlab zelf te implementeren [22]. Deze code kan teruggevonden worden in bijlage. Met de code kan de filter snel geïmplementeerd worden in de bestaande rolstoelsoftware.

## 4 Laserscanner

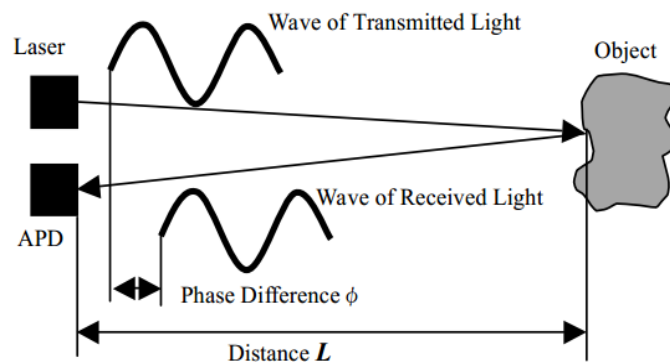
Als laserscanner wordt een Hokuyo URG-04LX-UG01 gebruikt. Deze scanner werkt met infrarood licht met een golflengte van 785 nm. De scanner heeft een werkingsgebied van 240° met een maximale afstand van 4000 mm. De Hokuyo URG-04LX-UG01 is een op maat gemaakte scanner voor het gebruik in robottoepassingen. De scanner is energiezuinig, klein en compact wat hem ook licht in gewicht maakt. De werking van de scanner is gebaseerd op de berekening van het verschil in fase tussen de metingen en wordt hieronder verder toegelicht.

### 4.1 Methode

De laser zendt een lichtstraal uit die op een object weerkaatst en hierna opgevangen wordt door de fotodiode. De afstand tot het object wordt gemeten door het verschil in fase tussen de uitgaande en de inkomende lichtstraal (zie Figuur 63) [25]. Voor meer info over de juiste formules die deze methode gebruikt, refereren we naar [26].



Figuur 62 Doorsnede laserscanner [26]

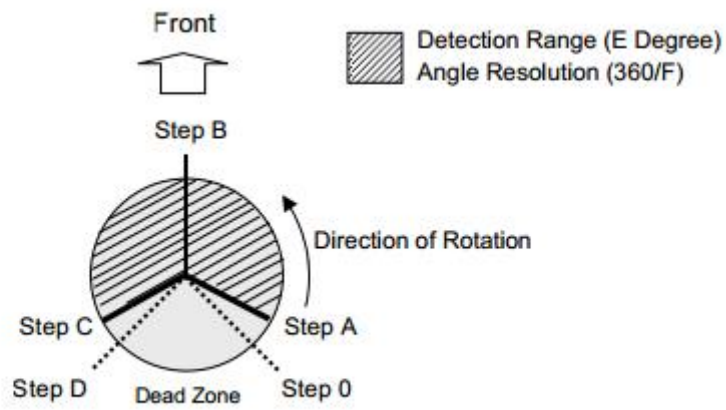


Figuur 63 Faseverschuiving uitgezonden en weerkaatste lichtstraal [26]

### 4.2 Opbouw scan

Onderstaande figuur geeft een idee van het werkingsgebied van de scanner. Het gearceerde gedeelte is het werkingsgebied van de scanner. Step 0 is het eerste meetpunt, vanaf hier gaat het scannen verder naar step A wat de initiële meetstap is. Vanaf hier begint het effectieve meten. Van step A gaat het scannen verder naar step B, dit wordt de sensor front step genoemd en is de positie recht voor de scanner. Hierna komt step C wat het eindpunt van de te detecteren omgeving is. Step D is het laatste meetpunt.

Uit de tabel blijkt dat er vanaf de initiële meetstap (step A) t.e.m. step C 682 stappen zitten. Het is de informatie uit deze 682 stappen waarmee gewerkt zal worden. De hoekresolutie is gelijk aan  $360^\circ/1024$  wat gelijk is aan  $0,3515625^\circ$ . Aangezien er vanaf de initiële stap tot step C 682 stappen zijn, wil dit zeggen dat het meetbare bereik gelijk is aan  $682 \cdot \frac{360^\circ}{1024} = 239,765625^\circ$ .



Figuur 64 Gezichtsveld laserscanner [25]

		URG-04LX	UBG-05LX-F01	UHG-08LX	UTM-30LX	L
Step 0	First Measurement Point	0	0	0	0	0
Step A	Initial measurement Step of Detection Range	44	44	0	0	0
Step B	Sensor Front Step	384	384	384	540	5
Step C	End point of Detection Range	725	725	768	1080	1
Step D	Last Measurement Point	768	768	768	1080	1
E	Detection Range	239.77	239.77	270.35	270.25	2
F	Slit Division	1024	1024	1024	1440	1

Figuur 65 Meetparameters gezichtsveld laserscanner [25]

# 5 Kalibratie

Er wordt verondersteld dat deze kalibratie volledig automatisch gebeurt zonder enige actie van de gebruiker. Na plaatsing van de encoders en de laserscanner dient er enkel rondgereden te worden met de rolstoel. Het systeem zal tijdens het rondrijden metingen uitvoeren. Deze metingen worden opgeslagen in logfiles die naderhand door het kalibratie algoritme zullen verwerkt worden. Als resultaat worden de rolstoelparameters en de wielbasis, samen met beide wieldiameters, verkregen. Ook zal de positie van de laserscanner t.o.v. de robotpose dan gekend zijn.

In dit hoofdstuk wordt eerst en vooral besproken wat er verstaan wordt onder odometrie fouten. Tevens wordt een gekende alternatieve methode overwogen. Door de complexiteit van deze methode wordt een andere procedure gekozen, waarvan het gebruikte kalibratie algoritme verduidelijkt wordt. Tot slot zal met behulp van bepaalde experimenten de nauwkeurigheid geverifieerd worden.

## 5.1 Odometrie fouten

Odometrie wordt in vele robots gebruikt om de positiewijziging van de robot in te schatten in de tijd. De frequentie aan welke deze metingen moeten gebeuren zijn afhankelijk van de nauwkeurigheid van het gehele odometrie-systeem. De fouten die op deze metingen voor komen, worden veroorzaakt door twee dominante factoren, een onzekerheid op de wielbasis en ongelijke wieldiameters. Aangezien deze fouten vrij constant zijn over de tijd, spreken we van een systematische fout. De accuraatheid van het odometrie-systeem kan dus verhoogd worden door een kalibratie.

De odometrie gaat ervan uit dat de wielomwenteling omgezet kan worden in een lineaire verplaatsing. Deze verplaatsing is relatief ten opzichte van de ondergrond. Oorzaken voor deze fouten kunnen we terugvinden in twee verschillende categorieën, de systematische en de niet-systematische fout. De systematische fouten zijn afkomstig van de ontwikkeling van de rolstoel. Het is niet mogelijk om wielen te produceren met dezelfde wieldiameters. Eveneens, wanneer men rubberen wielen belast, zullen deze niet overal gelijk samengedrukt worden. Dit zal resulteren in een extra fout op de wieldiameter omdat het wiel geen perfecte cirkel meer is. Een draaibeweging rondom zijn as zal afwijken van het ideale pad aangezien beide wielen niet met gelijke snelheid draaien. Dergelijke fouten zijn vooral zichtbaar in een rechte beweging. Na een bepaalde tijd zal men zien dat de robot naar links of rechts zal afwijken. Dit is slechts één van de mogelijke oorzaken. Borenstein J. [27] heeft het in zijn kalibratiemethode over de volgende potentiële fouten:

1. Systematische fouten:
  - a. ongelijke wieldiameters,
  - b. afwijking van beide wieldiameters t.o.v. nominale diameters,
  - c. uitlijnfouten op wielen,
  - d. een onzekerheid op de effectieve wielbasis,

- e. beperkte wiel-encoder resolutie,
- f. beperkte wiel-encoder sample frequentie.

2. Niet-systematische fouten:

- a. navigatie over ongelijke ondergrond,
- b. navigatie over onverwachte objecten,
- c. wielslip veroorzaakt door:
  - i. gladde ondergrond,
  - ii. rotatiebeweging,
  - iii. externe kracht door een botsing,
  - iv. interne krachten ten gevolge van zwenkwielen,
  - v. geen puntcontact met de ondergrond veroorzaakt door rubberen wielen.

Wielslip zal zorgen dat het systeem verwacht dat er een grotere rotatie/beweging is gebeurd, maar in vergelijking met de werkelijkheid is er geen rotatie/beweging merkbaar. De onzekerheid op de wielbasis is ook van invloed op de kalibratie.

Een mogelijke manier om deze odometrie fouten te verlagen, is het toevoegen van een extra set sensoren. Een gyroscoop<sup>11</sup> en een versnellingsmeter<sup>12</sup> kunnen voor een verlaging zorgen. De lineaire verplaatsing zal opgemerkt worden door de versnellingsmeter en de rotatie door de gyroscoop. Het samenvoegen van deze metingen met de odometrie en de laserscanner resulteert in een robuuster systeem. Wielslip en vreemde veranderingen in de odometrie kunnen dan direct verworpen worden.

## 5.2 Alternatieve methode

Voor het kalibreren van de parameters van de rolstoel gaan de meeste methodes ervan uit dat één van beide sensoren correct gekalibreerd is. Hierdoor zijn deze methodes beperkt. De UMBmark- methode beschrijft een kalibratieprocedure aan de hand van het afwijken van een bepaald voorgeprogrammeerd traject [27]. Aan de hand van deze afwijkingen is het mogelijk de parameters te bepalen. Met de UMBmark-methode worden goede resultaten behaald. Ook zijn er meer fouten mogelijk aangezien er specifieke trajecten gevolgd moeten worden. Echter, deze methode is vrij complex voor de gebruiker in tegenstelling tot de in deze thesis toegepaste kalibratiemethode. Deze methode wordt in volgende hoofdstuk verduidelijkt.

## 5.3 Gebruikte kalibratieprocedure

Er is gebruik gemaakt van een bestaande kalibratieprocedure [28]. Deze procedure past het best bij het ter beschikking gestelde systeem. Deze procedure gaat uit van de wielverplaatsing en de metingen van een laserscanner. Voor het overige zijn er geen extra sensoren nodig wat ervoor zorgt dat het systeem simpel en compact blijft.

---

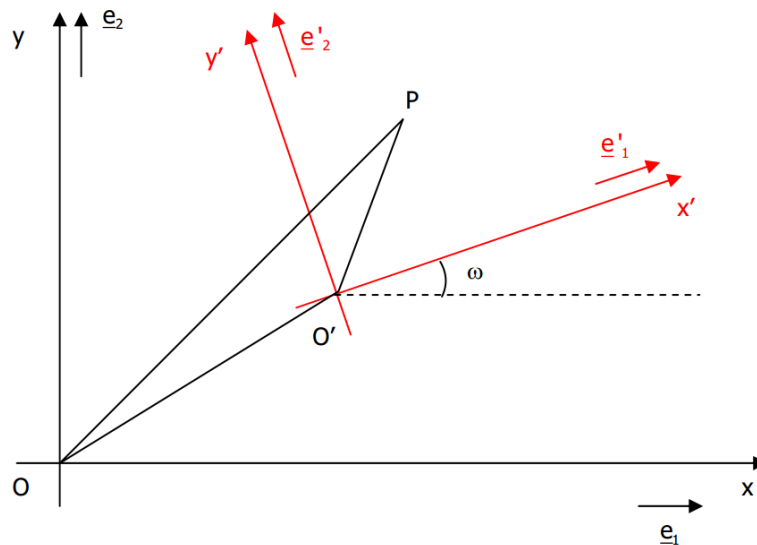
<sup>11</sup> Een gyroscoop gebruikt de aardversnelling om een idee te geven van de rotatie rondom een gekozen as

<sup>12</sup> Een versnellingsmeter wordt gebruikt om de versnelling te bepalen in een bepaalde richting

### 5.3.1 Kalibratie algoritme

De kalibratiemethode gaat uit van een robot aangedreven door twee wielen, waarmee de gebruikte rolstoel vergeleken kan worden. De zwenkwielen zullen geen invloed hebben in dit model omdat zij niets aandrijven. Het robotmodel wordt gekarakteriseerd door drie parameters, namelijk de wielbasis en de diameters van de beide wielen. De pose van de laserscanner t.o.v. het robotmodel wordt geschat, dit wordt beschreven door de drie parameters  $(l_x, l_y, l_\theta)$ . Het systeem gaat ervan uit dat de laserscanner horizontaal is opgesteld. Zoniet moet er een extra tilt-sensor geplaatst worden. De kalibratiemethode gaat uit van de roto-translaties, berekend door het robotmodel en door de scan matcher (CSM). Roto-translatie is de verplaatsing van een gekend punt  $O$  naar een volgend punt  $O'$  met inbegrip van de gemaakte rotatie en translatie (zie Figuur 66). Wanneer de robot een roto-translatie uitvoert, wordt deze berekend met de encoders en de scan matcher. Deze twee zouden overeen moeten komen maar in realiteit zal hier een beperkte fout waarneembaar zijn.

De absolute snelheden  $v$  (*translatie*) en  $\omega$  (*rotatie*) zijn afhankelijk van de wielsnelheden. Deze worden bekomen na een lineaire transformatie die afhankelijk is van de odometrieparameters zoals de wielbasis en -diameters. Deze transformatie wordt achteraf via de kleinste kwadratenmethode bepaald. Wanneer de transformatie gekend is, zijn ook de odometrieparameters gekend. Hiermee kan een inschatting gedaan worden van de laserscanner pose.



Figuur 66 Roto-translatie [29]

### 5.3.2 Scan matcher

De *C(anonical) Scan Matcher (CSM)* is een volledige C-implementatie van een *snelle Iterative Closest Point (ICP)* methode en is geoptimaliseerd voor het koppelen van verschillende scans van een laserscanner (<http://censi.mit.edu/software/csm/>). De scan matcher zal de roto-translatie bepalen, berekend met alleen de laserscannermetingen. Dit is een software pakket die in de kalibratieprocedure als een black-box gebruikt zal worden.

## 5.4 Experimenten

Voor het verifiëren van de kalibratiemethode zullen er verscheidene testen uitgevoerd worden. Eerst wordt in verschillende omgevingen rondgereden om een acceptabel parcours te bepalen. Naderhand wordt de laserscanner in verschillende posities op de rolstoel gemonteerd en wordt een parcours afgelegd. Hierna kan er gecontroleerd worden of er steeds een correcte kalibratie is gebeurd. De kalibratie wordt geverifieerd met onderstaande parameters die handmatig opgemeten werden.

Tabel 4 Gemeten parameters

$Wielbasis [m]$	0,610
$wieldiameter_{links} [m]$	0,340
$wieldiameter_{rechts} [m]$	0,345
$Scannerpose_x [m]$	0,600
$Scannerpose_y [m]$	0,255
$Scannerpose_\theta [^\circ]$	36

### 5.4.1 Verschillende parcours

De scannerpose kan tijdens de metingen verschillen van de gemeten laserscannerpose. Dit is te wijten aan de herpositionering van de laserscanner. Hierover meer in het *hoofdstuk 5.4.5*.

De metingen die gebeurden in een gesloten ruimte zoals bij file20, file21, file 23 en file24 gaven telkens een goede kalibratie. Deze metingen gebeurden steeds in een gesloten ruimte waarbij veel kleine en grote bochten links- en rechtsom gemaakt werden. De goede datafiles zijn deze in blauw gemarkeerd in *Tabel 6 Resultaten metingen* op pagina 80. Deze datafiles bevatten de metingen die tot een aanvaardbare kalibratie leidde. Uit deze metingen wordt duidelijk dat het aantal samples belangrijk is voor een goede kalibratie. Bij een stijgend aantal samples dalen de onzekerheden op de uitkomsten.

Er is geen kalibratie mogelijk bij onvoldoende betrouwbare metingen. Dit doet zich voor wanneer er hoofdzakelijk rechtdoor gereden wordt, de objecten verder dan de reikwijdte ( $\pm 4000 \text{ mm}$ ) van de scanner staan en er zich wielslip voordoet. Het systeem zal data verwijderen wanneer er veel ongeldige regels in de logfile zijn. Bij ongeldige metingen is er feedback onder de vorm van *singular data synchronizer failed* (zie Bijlage E: resultaten experimenten, file1). De ongeldige experimenten zijn weggelaten uit *Tabel 6 Resultaten metingen* op pagina 80.

Het komt ook voor dat het systeem een kalibratie uitvoert terwijl de data totaal verwerpelijk is. Dit treedt op bij scan matcher-fouten boven de  $10 \text{ mm}$  en onzekerheden op wielbasis en laserscannerpose boven de  $2 \text{ mm}$ . Bij een kalibratie met deze uitkomsten dient de kalibratie verworpen te worden. Zo heeft file16 bijvoorbeeld veel samples omdat deze meting gebeurde tijdens het rijden van gebouw B naar het Technologicentrum. Onderweg zijn er veel open ruimtes waardoor veel metingen ongeldig zijn. Logfiles waarmee een slechte kalibratie uitgevoerd worden, hoeven niet meteen verwijderd te worden. Het is mogelijk om meerdere



logfiles samen door de kalibratie te halen. Zo werden er drie metingen uitgevoerd in het elektronicalokaal van ACRO. De metingen bestaan uit:

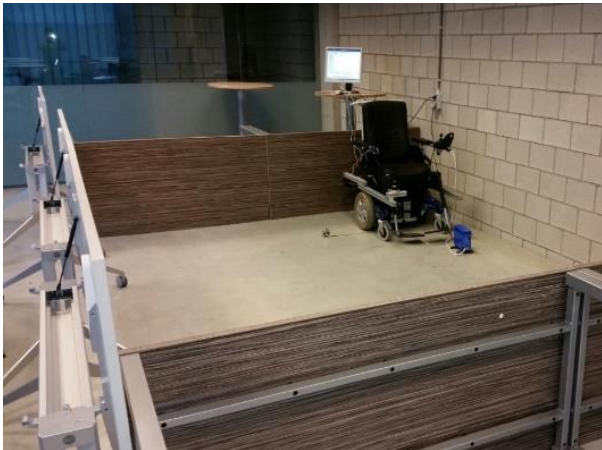
- file8: grote cirkels,
- file9: enkel rotatie rondom verticale as,
- file10: willekeurige meting.

File8 en file10 zijn goede metingen waar een juiste kalibratie mogelijk is. Hierbij zijn de onzekerheden van de kalibratie en de fouten van de scan matcher binnen aanvaardbare zones (zie Bijlage E: resultaten experimenten). File9 is daarentegen te verwerpen. Door deze drie files samen te kalibreren, wordt er een aanvaardbaar resultaat behaald.

Tabel 5 Kalibratieparameters na samenvoeging file8, file9 en file10

<i>Wielbasis [m]</i>	0,6111
<i>wieldiameter<sub>links</sub> [m]</i>	-0,3343
<i>wieldiameter<sub>rechts</sub> [m]</i>	-0,3433
<i>Scannerpose<sub>x</sub> [m]</i>	-0,5832
<i>Scannerpose<sub>y</sub> [m]</i>	0,2491
<i>Scannerpose<sub>θ</sub> [°]</i>	130,31

Er kan geconcludeerd worden dat een goede kalibratie gebeurt wanneer in gesloten ruimtes voldoende bochten en volledige rotaties gemaakt worden. Hoe meer muren de scanner kan herkennen, hoe beter de data. De metingen moeten ook voldoende samples bevatten. Hoe meer samples de kalibratieprocedure kan verwerken, hoe beter de resultaten zijn. Het systeem zal ongediende samples zelf verwijderen om zo een nauwkeurige meting te verkrijgen.



Figuur 67 testparcours (refter)



Figuur 68 testparcours 2 (gang)

Tabel 6 Resultaten metingen

	Wielbasis [m]	Diameter <sub>L</sub> [m]	Diameter <sub>R</sub> [m]	Pose <sub>x</sub> [m]	Pose <sub>y</sub> [m]	Pose <sub>θ</sub> [rad]	Pose <sub>θ</sub> [°]	# Samples
file4_1	0,529240	0,298356	0,304413	0,545836	-0,259942	-0,639937	-36,665689	894
file4_2	0,555635	0,318402	0,324372	0,569094	-0,215843	-0,634881	-36,376002	850
file5_1	0,556692	0,302085	0,303633	0,571876	-0,300059	-0,648314	-37,145656	460
file5_2	0,456806	0,247567	0,249969	0,587336	-0,369633	-0,618816	-35,455545	493
file6_1	0,377616	0,208531	0,211334	0,523303	-0,187701	-0,860763	-49,318087	3495
file6_2	0,397362	0,218751	0,221375	0,436884	-0,259379	-0,880708	-50,460851	2843
file6_3	0,496023	-0,272914	-0,279357	-0,547596	0,114664	2,257820	129,363557	5408
file8	0,610791	-0,335308	-0,343344	-0,568793	0,238938	2,274640	130,327272	1587
file9	0,633128	-0,319138	-0,387821	-0,603422	0,255190	2,316480	132,724527	1191
file10	0,609109	-0,333842	-0,344119	-0,577318	0,242567	2,276610	130,440145	2245
file13	0,134523	0,074587	0,075846	0,547879	-0,040097	-0,880867	-50,469961	2052
file15	0,376749	-0,207311	-0,211773	-0,404026	0,067525	2,283050	130,809129	4999
file16	0,366489	-0,201208	-0,205643	-0,481143	0,161495	2,246650	128,723563	8961
file17	0,622354	0,344438	0,347275	0,575348	-0,250785	-0,895366	-51,300693	6866
file18	0,625942	0,344974	0,347146	0,579772	-0,255192	-0,895045	-51,282301	5622
file19	0,635289	-0,343261	-0,354371	-0,600651	0,258241	2,249120	128,865084	7447
file20	0,617839	0,342620	0,346760	0,550098	-0,258158	-0,626756	-35,910474	11909
file21	0,622257	0,345003	0,347835	0,581623	-0,253778	-0,611184	-35,018264	19496
file22	0,621448	0,344962	0,347705	0,543730	-0,252968	-0,628529	-36,012059	10444
file23	0,598063	0,342015	0,345909	0,577947	-0,255525	-0,638644	-36,591606	4670
file24	0,608295	0,337431	0,342670	0,580062	-0,250037	-0,631571	-36,186353	5443
file25	0,482085	0,266483	0,270555	0,560567	-0,275626	-0,660581	-37,848503	2997

## 5.4.2 Invloed filter

Het gebruik van een filter op de encodermetingen werd gecontroleerd door dezelfde data gefilterd en ongefilderd in te voeren in de kalibratieprocedure. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een goede dataset met een nauwkeurige kalibratie.

Tabel 7 Kalibratieparameters file21 zonder filter en met filter

File21	Zonder filter	Met filter
<i>Wielbasis</i> [m]	0,6223	0,6217
<i>wieldiameter</i> <sub>links</sub> [m]	0,3450	0,3453
<i>wieldiameter</i> <sub>rechts</sub> [m]	0,3478	0,3482
<i>Scannerpose</i> <sub>x</sub> [m]	0,5816	0,5816
<i>Scannerpose</i> <sub>y</sub> [m]	-0,2538	-0,2538
<i>Scannerpose</i> <sub>θ</sub> [°]	-35,02	-35,01

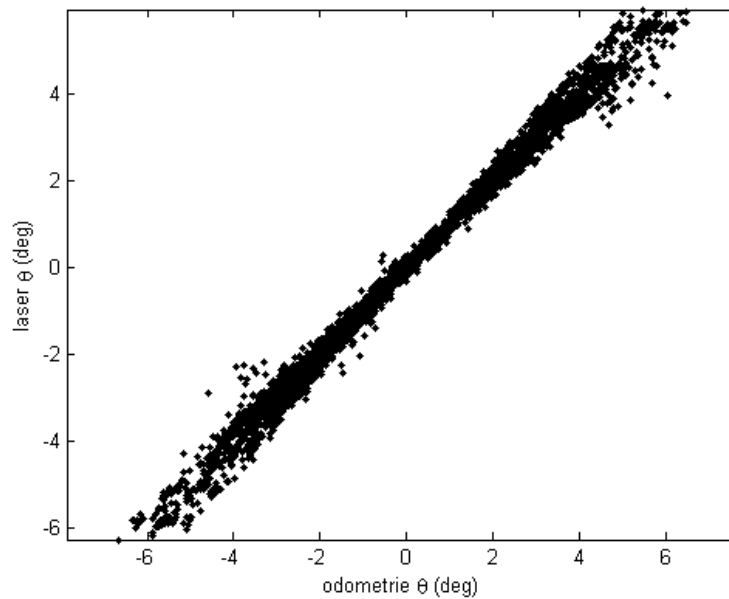
Deze vergelijking maakt duidelijk dat het gebruik van een filter een geringe invloed heeft op de kalibratie. Wanneer de onzekerheden bekeken worden, gaan deze met filter lager liggen dan zonder filter. Dit verschil is het duidelijkst merkbaar bij korte metingen. Bij lange metingen (bv. 19000 samples) is dit verschil minder merkbaar, aangezien deze, na kalibratie, kleinere onzekerheden heeft. De kalibratiemethode beschikt al over een laagdoorlaatfilter. Deze filter wordt toegepast in de functie `jsonDecimate` (zie code `calibrationMaster` in bijlage). De ontworpen filter (*hoofdstuk 3.6.3* op pagina 67) heeft hierdoor weinig invloed.

Om wielslip en ongeldige metingen te verwijderen, gebruikt de kalibratie een andere methode. Driemaal na elkaar zullen de uitschieters in de dataset verwijderd worden. Deze waardes kan men in het programma wijzigen, 5% gaf het beste resultaat in de gebruikte opstelling. Het is mogelijk dat deze aangepast moeten worden indien een andere robot gebruikt wordt. Om te verifiëren of deze methode werkt, wordt er gecontroleerd of de uitschieters verwijderd zijn. Zie figuren.

De scan matcher zal op basis van de laserscans een odometrie opbouwen. Hiermee kan bepaald worden hoeveel de robot verplaatst en gedraaid is. De vergelijking met de odometrie, afkomstig van de encoders, zal een beeld geven hoe goed de scan matcher werkt. Deze werking is afhankelijk van de gebruikte laserscanner. Hoe meer deze afwijkende resultaten geeft, hoe meer de odometriehoek (bepaald door de lasermetingen) zal afwijken. Doordat het verwijderen van de uitschieters meermaals gebeurt, zal er een verschil merkbaar zijn tussen de eerste en de laatste iteratie. Voor het weergeven van deze methode werd file24 gebruikt.

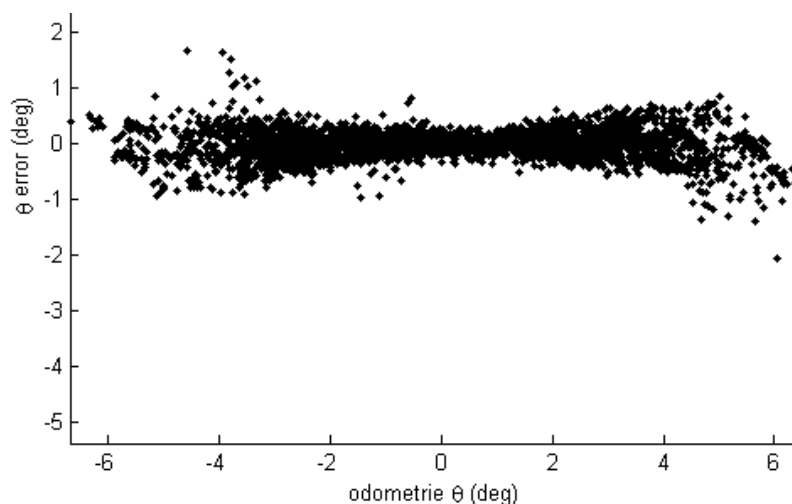
De hoek berekend door de scan matcher wordt vergeleken met de hoek afkomstig van de odometrie van de wielencoders (Figuur 69). Aangezien beide hoeken evenveel moeten wijzigen, wordt hier een rechte door de oorsprong verwacht. Op de x-as is de hoek afkomstig van de odometrie te zien, op de y-as de hoek van de scan matcher. Dit geeft inderdaad een uitkomst onder een hoek van 45°. Indien deze hoek van 45° afwijkt, kan men concluderen dat de laserscanner een bepaald ruisniveau heeft en veel onnauwkeurige metingen geeft. Onnauwkeurige metingen zijn daarom niet altijd ongeldig. Er zijn wel enkele uitschieters die

afwijken. Deze moeten in de laatste iteratie verwijderd zijn. Er kan dus geconcludeerd worden dat de hoek afkomstig van de odometrie in dezelfde orde wijzigt.



Figuur 69 Hoek van odometrie vs. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1

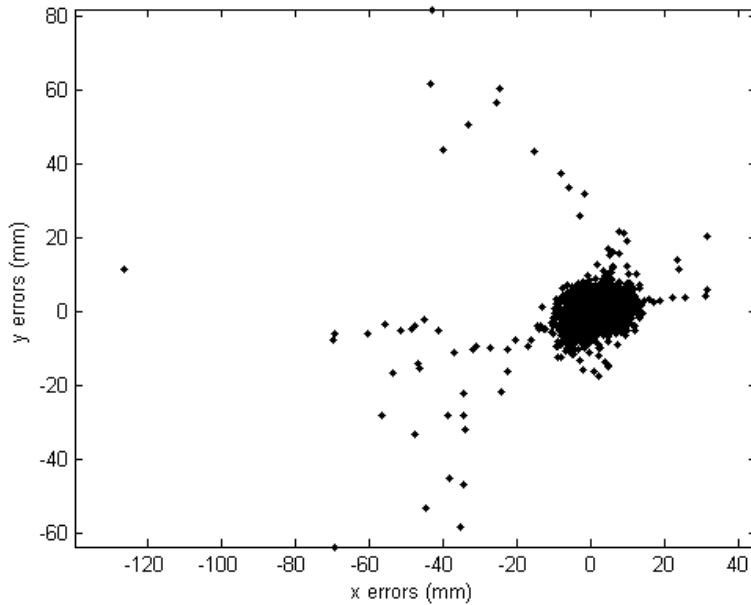
Figuur 70 geeft weer dat de odometrie hoek wijzigt tussen  $[-5,5]$ . De fouten op de hoek, berekend door de scan matcher aan de hand van de lasermetingen, hebben een afwijking die ligt tussen  $[-1,1]$ . Idealiter zou dit een horizontale rechte moeten voorstellen. Een horizontale rechte zou betekenen dat er geen afwijkingen zijn tussen de hoek van de odometrie en de hoek afkomstig van de laser. Deze afwijkingen tussen  $[-1,1]$  verklaren waarom het beeld in Figuur 69 geen ideale rechte is.



Figuur 70 Hoek van odometrie vs. fout t.o.v. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1

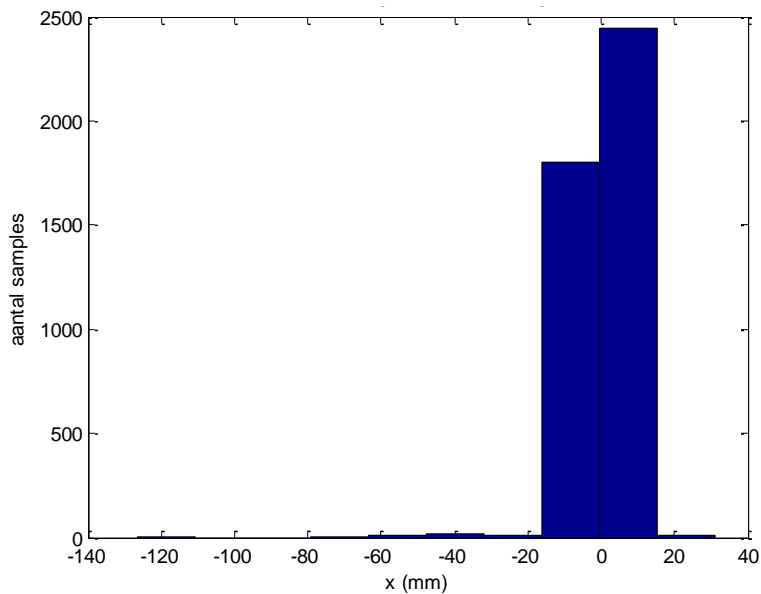
De weergave van de fouten van de x- en y-positie van de odometrie van de wielencoders samen met deze van de odometrie opgebouwd met de laserscanner, toont hoe de fouten verdeeld zijn (Figuur 71). Deze vergelijking geeft weer hoe groot de afwijkingen tussen deze twee methodes zijn. De fouten op de x-positie bevinden zich in het interval  $[-140,40]$ . Deze op de y-positie

bevinden zich in het interval  $[-60,80]$ . Ook hier zou een ideaal beeld een punt voorstellen in de oorsprong. Een punt in de oorsprong zou weergeven dat de fout op de x en de y-waardes niet afwijken ten opzichte van de odometrie data van de encoders. Dit is echter enkel mogelijk in een theoretische voorstelling.

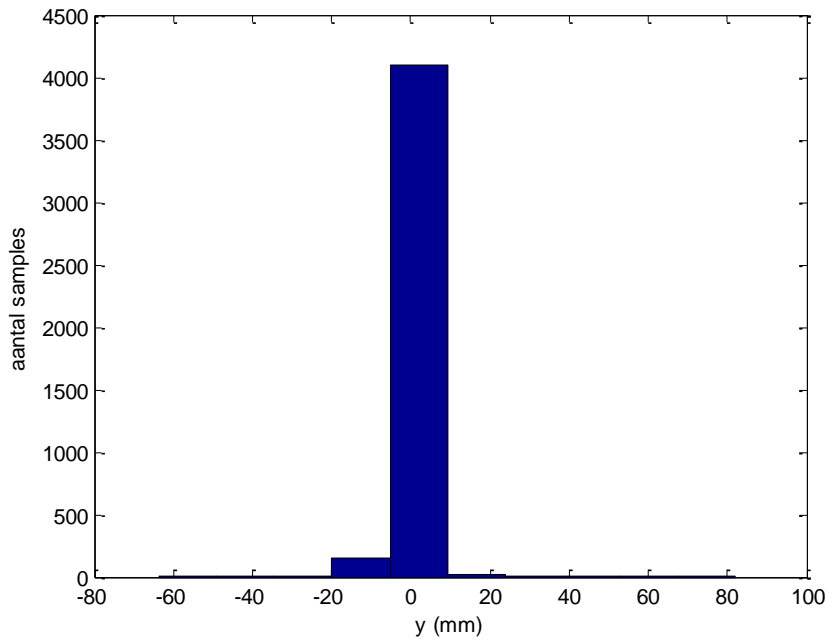


Figuur 71 Verschil tussen x en y waarde – iteratie 1

Deze waardes kunnen we ook in histogram tonen. Zo kan op een andere manier bekeken worden hoe de fouten verdeeld zijn. Er worden grote afwijkingen verwacht aangezien deze het gevolg zijn van de manier waarop de scan gemaakt is. De afwijkingen zijn sensorafhankelijk. Bij de eerste iteratie is het duidelijk dat de fouten verdeeld zijn met grote afwijkingen. Er zijn enkele uitschieters die fouten vertonen groter dan -12 mm.

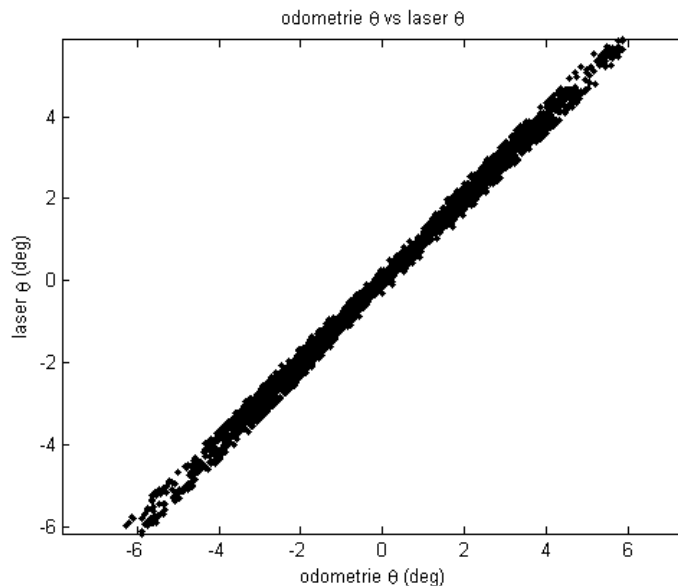


Figuur 72 Histogram fouten op x – iteratie 1



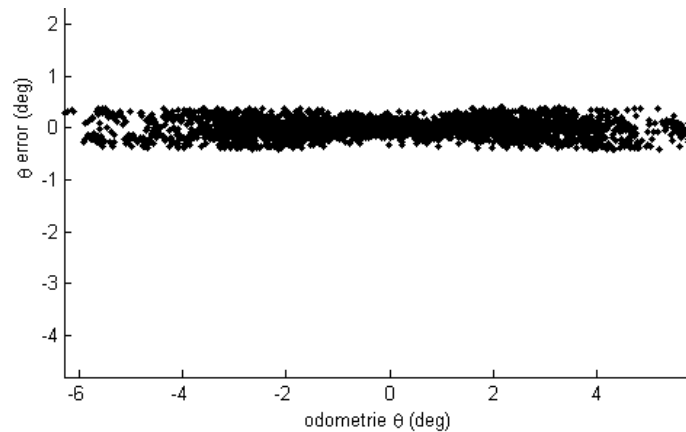
Figuur 73 Histogram fouten op y – iteratie 1

De afwijkende waarden worden weggelaten bij de meting. De instelling voor het verwerpen van uitschieters werd, zoals eerder vermeld, vastgelegd op 5%. In onderstaande figuren kan men zien dat er minder afwijkende resultaten zijn na de derde iteratie. De hoek berekend door de scan matcher vergeleken met de hoek afkomstig van de odometrie van de wiel-encoders geeft een betere rechte door de oorsprong.



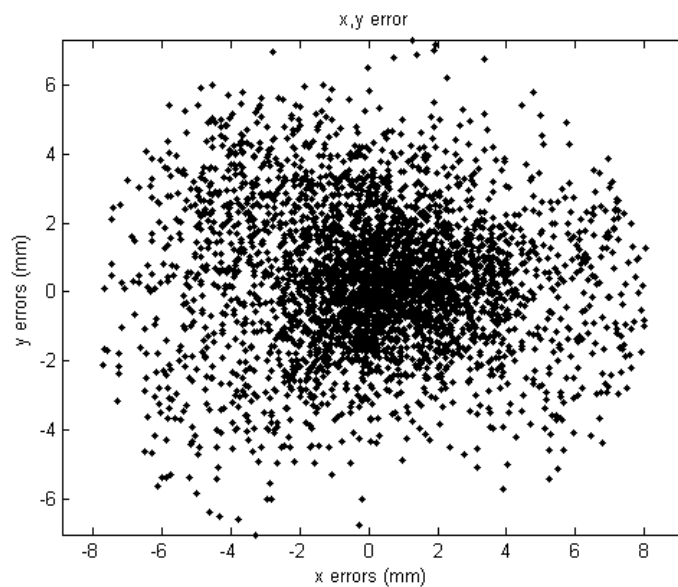
Figuur 74 Hoek van odometrie vs. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 1

De fouten op de hoek berekend door de scan matcher aan de hand van de lasermetingen heeft in geval van 1 iteratie een afwijking die ligt tussen  $[-1,1]$ . Bij de derde iteratie is deze afwijking afgenomen tot  $[-0.5,0.5]$ . Deze waarden komen dicht bij een horizontale rechte. Het percentage (5%) waarmee de verwerpingen gebeurt, heeft invloed op de fouten.



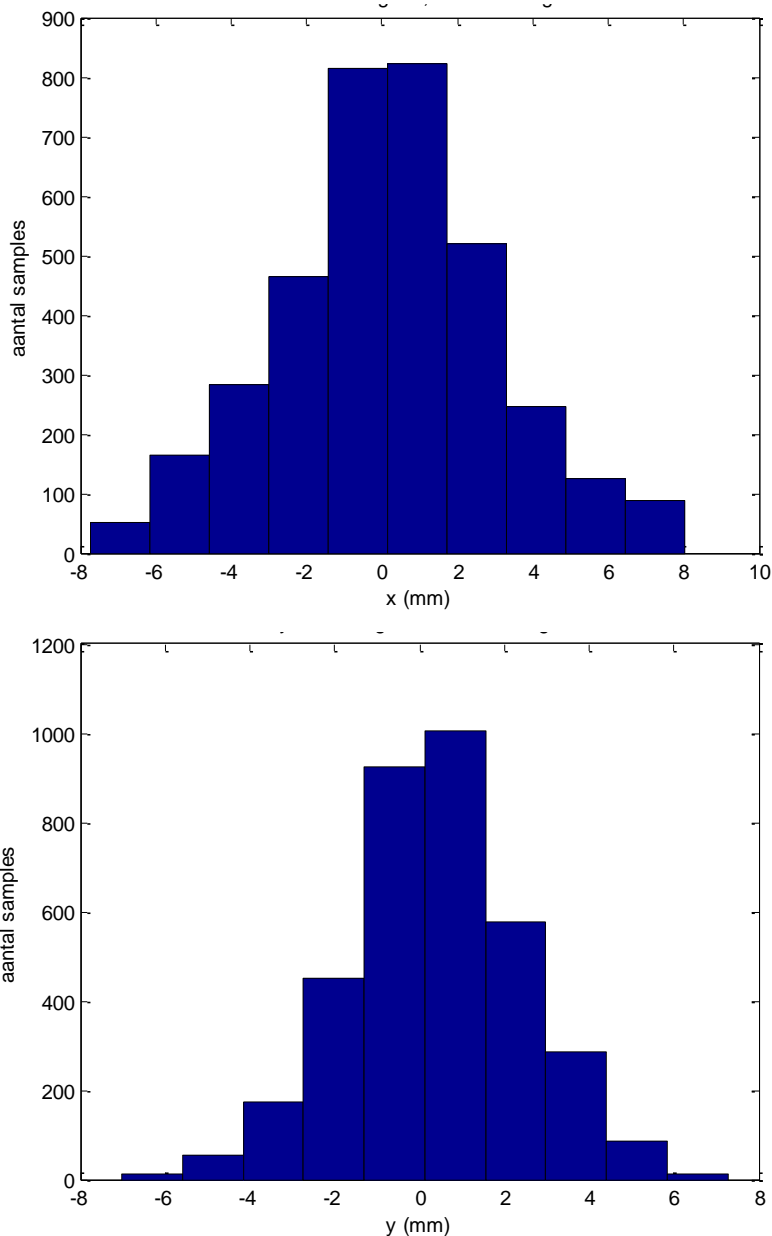
Figuur 75 Hoek van odometrie vs. fout t.o.v. hoek afkomstig van scan matcher – iteratie 2

Het weergeven van de fouten op de x en y van de odometrie van de wiel-encoders en van de odometrie opgebouwd met de laserscanner toont ook een verbetering. Bij de eerste iteratie bevonden de fouten op de x-waarde zich in het interval  $[-140,40]$  en op de y-waarde in het interval  $[-60,80]$ . Na de derde iteratie zijn deze fouten afgenomen. De fouten liggen nu op de x-waarde verdeeld in het interval  $[-8,8]$ . Op de y-waarde zijn de fouten verdeeld in het interval  $[-6,6]$ .



Figuur 76 Verschil tussen x en y waarde – iteratie 2

Wanneer de histogrammen worden vergeleken is duidelijk dat na een derde iteratie de fouten verdeeld zijn volgens een normale verdeling. De verdeling is hier zichtbaar als gevolg van de scan matcher-fouten. De verdeling is dus symmetrisch geconcentreerd rondom nul. Dit betekent dat de afwijkingen positief of negatief kunnen zijn. Deze verdeling is in de orde van enkele millimeters.

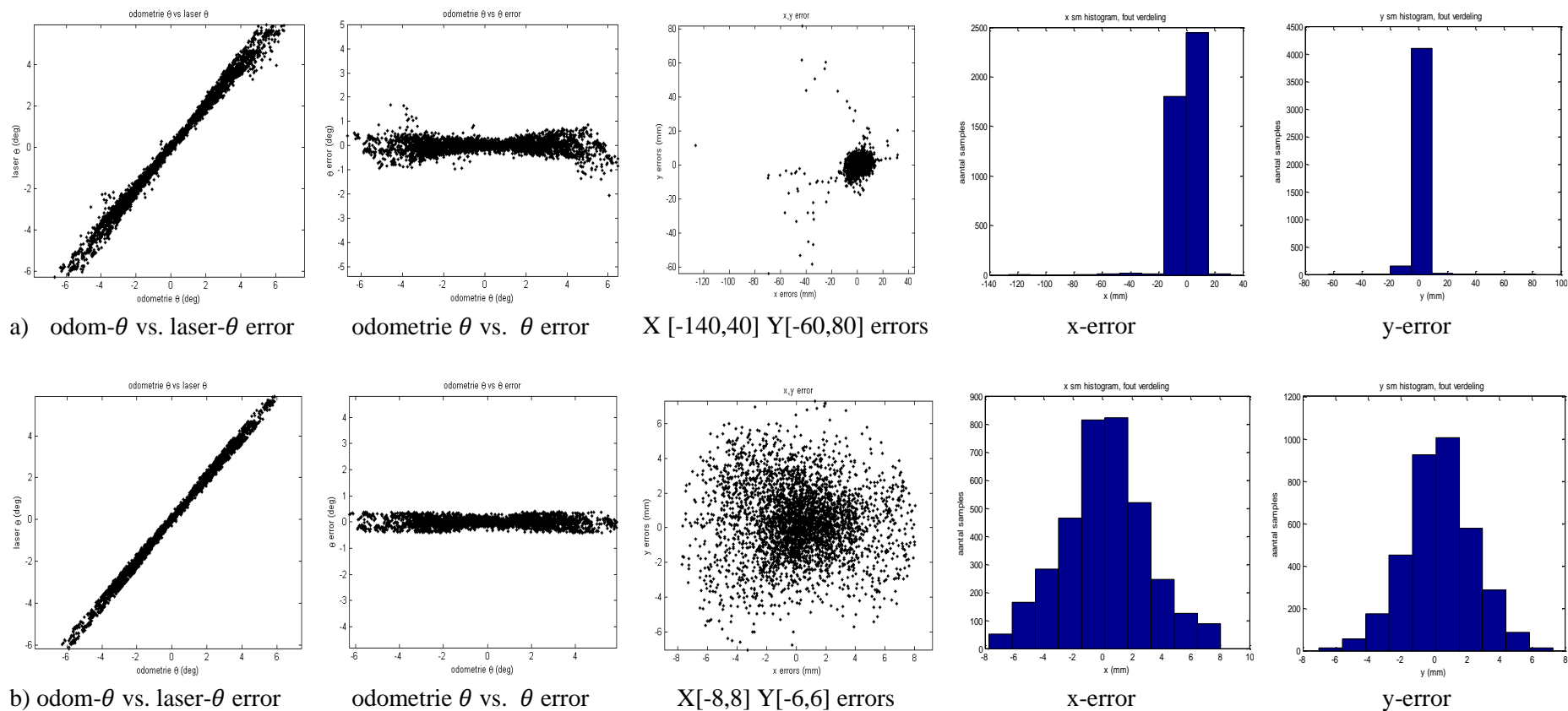


Figuur 77 Histogram fouten op x (boven) en op y (onder) - iteratie 3

Een afwijking tussen de odometrie van de laserscanner en deze van de encoders is te verklaren door enkele eerder aangehaalde oorzaken. Wielslip, verkeerde wielbasis en ongelijke wioldiameters zullen resulteren in een odometrie berekening die afwijkt van het reële verloop. Dit onderstreept opnieuw het belang van de parameters bepaald door de kalibratie. Door meerdere malen de uitschieters te verwijderen, zullen er betere resultaten worden verkregen. In de kalibratie worden de uitschieters driemaal verwijderd. De kalibratie is gebeurd met weinig extreme uitschieters waardoor de accuraatheid van deze methode hoger ligt dan zonder het verwijderen van uitschieters. Een overzicht van de eerder vermelde figuren is op volgende pagina terug te vinden.



Het vergelijken van deze eerste iteratie met de laatste iteratie toont de verbetering.



Figuur 78 Vergelijking tussen a) iteratie 1 en b) iteratie 3 bij 5% verwerping

### 5.4.3 Invloed patiënt

Er wordt verwacht dat de wioldiameters wijzigen naargelang het gewicht van de patiënt. Dit werd gecontroleerd door een meting (file23) te doen waar de rolstoel handmatig voortgeduwd werd. Een volgende meting (file24) werd dan gedaan met een persoon in de rolstoel. Het verschil tussen deze metingen is nihil. Dit is te wijten aan het gebruik van volle banden bij deze rolstoel. Er wordt verwacht dat bij gebruik van luchtbanden de diameters wel zullen wijzigen. Eveneens zal een bandenspanningsverlies een invloed hebben op deze diameter. De banden zullen vervolgens ingedrukt worden door het gewicht van de patiënt waardoor de wioldiameter voor het aansturen van de robot wijzigt.

### 5.4.4 Invloed ondergrond

Bij metingen op verschillende ondergronden is er een verschil in wielbasis merkbaar. Dit verschil is groter dan  $0,01m$  en overschrijdt de onzekerheid van de kalibratie. File24 werd opgenomen in de gang van het technologiecentrum. Deze ondergrond is gepolierde beton die geleverd werd. File20 werd opgenomen in de refter van het technologiecentrum waar de ondergrond uit niet-geverfde gepolierde beton bestaat. De variatie van wielbasis, afhankelijk van de ondergrond, werd reeds opgemerkt in het onderzoek van Martinelli A. [30].

Tabel 8 Kalibratieparameters file20 en file24

	Ondergrond 1 (file20)	Ondergrond 2 (file24)
<i>Wielbasis [m]</i>	0,6178	0,6083
<i>wioldiameter<sub>links</sub> [m]</i>	0,3426	0,3374
<i>wioldiameter<sub>rechts</sub> [m]</i>	0,3468	0,3427
<i>Scannerpose<sub>x</sub> [m]</i>	0,5501	0,5816
<i>Scannerpose<sub>y</sub> [m]</i>	-0,2582	-0,2500
<i>Scannerpose<sub>θ</sub> [°]</i>	-35,91	-36,19

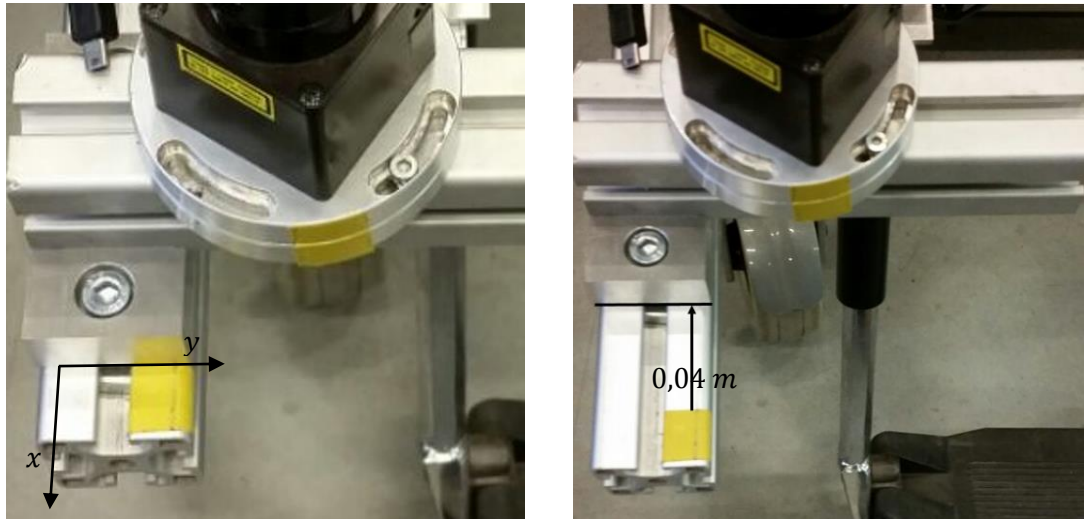
Echter zal deze fluctuatie in wielbasis van ondergeschikt belang zijn. De verhouding tussen de wioldiameters ( $E_d$ ) en de wielbasis ( $E_b$ ) wordt beter. De ideale verhouding is 1. Verhouding  $E_d$  heeft enkel effect op een rechte beweging,  $E_b$  heeft enkel invloed bij het roteren [27].

$$E_d = \frac{D_r}{D_L} \text{ met } D_r \text{ en } D_L \text{ die diameters van de wielen}$$

$$E_b = \frac{b_s}{b_g} \text{ met } b_s \text{ de geschatte basis en } b_g \text{ de werkelijke basis}$$

## 5.4.5 Positiewijziging laserscanner

De kalibratie dient de pose van de laserscanner te kunnen berekenen in verschillende posities. De laserscanner plaatsen is een secure taak. De afmetingen tot de wielbasis zijn niet eenvoudig te meten bij een rolstoel. Aangezien men op zoek gaat naar een kalibratieprocedure, waar de scanner willekeurig gepositioneerd wordt, zal ook deze wijziging correct bepaald moeten worden. Om dit te controleren wordt de laserscanner over een gekende afstand verplaatst.



Figuur 79 Positiewijziging laserscanner in x-richting met 4 cm

De laserscanner wordt 0,04 m in de x-richting verplaatst. Wanneer er dan opnieuw metingen uitgevoerd worden, wordt verwacht dat de laserpose veranderd is met 0,04 m in de x-richting.

Tabel 9 Kalibratieparameters file21 en file22

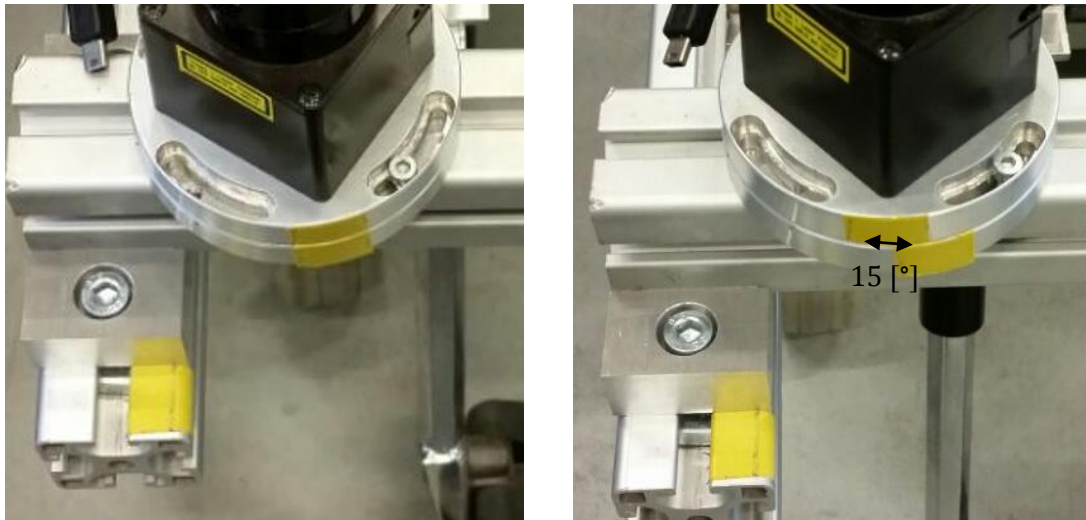
	Oorspronkelijk (file21)	Na verplaatsing (file22)
<i>Wielbasis</i> [m]	0,6223	0,6214
<i>wieldiameter<sub>links</sub></i> [m]	0,3450	0,3450
<i>wieldiameter<sub>rechts</sub></i> [m]	0,3478	0,3477
<i>Scannerpose<sub>x</sub></i> [m]	0,5816	0,5437
<i>Scannerpose<sub>y</sub></i> [m]	-0,2538	-0,2530
<i>Scannerpose<sub>θ</sub></i> [°]	-35,02	-36,01

Het vergelijken van *Scannerpose<sub>x</sub>* voor en na de verplaatsing geeft:

$$0,5816 [m] - 0,5437 [m] = 0,0379 [m].$$

De kleine fout van 0.0021 m t.o.v. de 0,04 m verplaatsing kan te wijten zijn aan de fout tijdens het meten en de onzekerheid op de kalibratie. Het verschil in hoekpositie van de laserscanner is groter dan de onzekerheid van de kalibratie. Dit is te wijten aan de gebruikte constructie met ITEM-profielen. Hierdoor is het mogelijk dat tijdens het herbevestigen de laserscanner een extra hoek meekrijgt. Ondanks de onzekerheden wordt verondersteld dat de kalibratie correct gebeurt bij wijziging van de positie van de laserscanner.

Bij een bijkomende testopstelling werd de hoek van de laserscanner verdraaid met 15° zoals op onderstaande figuur zichtbaar is.



Figuur 80 Hoekwijziging van laserscanner met 15°

Tabel 10 Kalibratieparameters file21 en file17

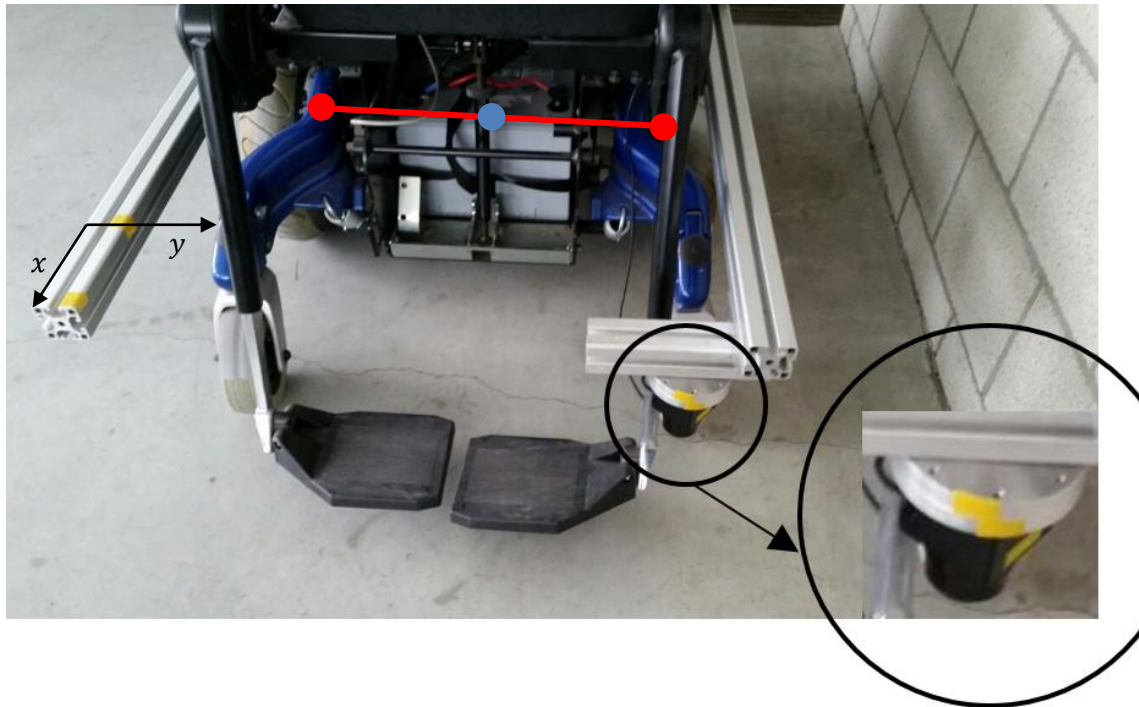
	Oorspronkelijk (file21)	Na verplaatsing (file17)
<i>Wielbasis</i> [m]	0,6223	0,6224
<i>wieldiameter</i> <sub>links</sub> [m]	0,3450	0,3444
<i>wieldiameter</i> <sub>rechts</sub> [m]	0,3478	0,3473
<i>Scannerpose</i> <sub>x</sub> [m]	0,5816	0,5753
<i>Scannerpose</i> <sub>y</sub> [m]	-0,2538	-0,2508
<i>Scannerpose</i> <sub>θ</sub> [°]	-35,02	-51,30

Het vergelijken van *Scannerpose*<sub>θ</sub> voor- en na de verplaatsing geeft:

$$-35,02 [°] - (-51,30 [°]) = 16,28 [°].$$

Er is een afwijking van 1,28° tussen de verplaatsing gemeten door de kalibratie en de handmatig opgemeten verplaatsing. Deze afwijking is te wijten aan de onzekerheid van de kalibratie en de meetfout tijdens het herpositioneren.

Bij de volgende testopstelling werd de volledige houder, waar de laserscanner op bevestigd is, verplaatst. Deze werd omgekeerd aan de onderkant van het ITEM-profiel aan de andere zijde geplaatst. De hoekverdraaiing uit vorige testopstelling bleef behouden (zie Figuur 81).



Figuur 81 Verplaatsing laserscanner naar overkant

Tabel 11 Kalibratieparameters file18 en file19

	Oorspronkelijk (file18)	Na verplaatsing (file19)
<i>Wielbasis</i> [m]	0,6259	0,6353
<i>wieldiameter</i> <sub>links</sub> [m]	0,3450	-0,3433
<i>wieldiameter</i> <sub>rechts</sub> [m]	0,3471	-0,3544
<i>Scannerpose</i> <sub>x</sub> [m]	0,5798	-0,6007
<i>Scannerpose</i> <sub>y</sub> [m]	-0,2552	0,2582
<i>Scannerpose</i> <sub>θ</sub> [°]	-51,28	128,87

Het vergelijken van *Scannerpose*<sub>θ</sub> voor- en na de verplaatsing geeft:

$$128,87 [^\circ] - (-51,28 [^\circ]) = 180,15 [^\circ].$$

De verdraaiing van 180 graden is te verwachten. Door het omkeren van de laserscanner verdraait zijn gezichtsveld immers 180 graden.

De scannerpose is bekeken t.o.v. het midden van de wielbasis van de rolstoel (zie Figuur 81 blauwe bol). Merk op dat de *Scannerpose*<sub>y</sub> logischerwijs van teken wisselt. Buiten het wisselen van teken is er ook een bepaald waardeverschil. Dit is te wijten aan de opbouw van de ITEM-profielen op de rolstoel. De rolstoel is hierdoor niet perfect symmetrisch. Dit zorgt ervoor dat de waarde van de meting bij de plaatsing van de laserscanner aan de linker- en rechterzijde van de rolstoel niet volledig overeenkomen.

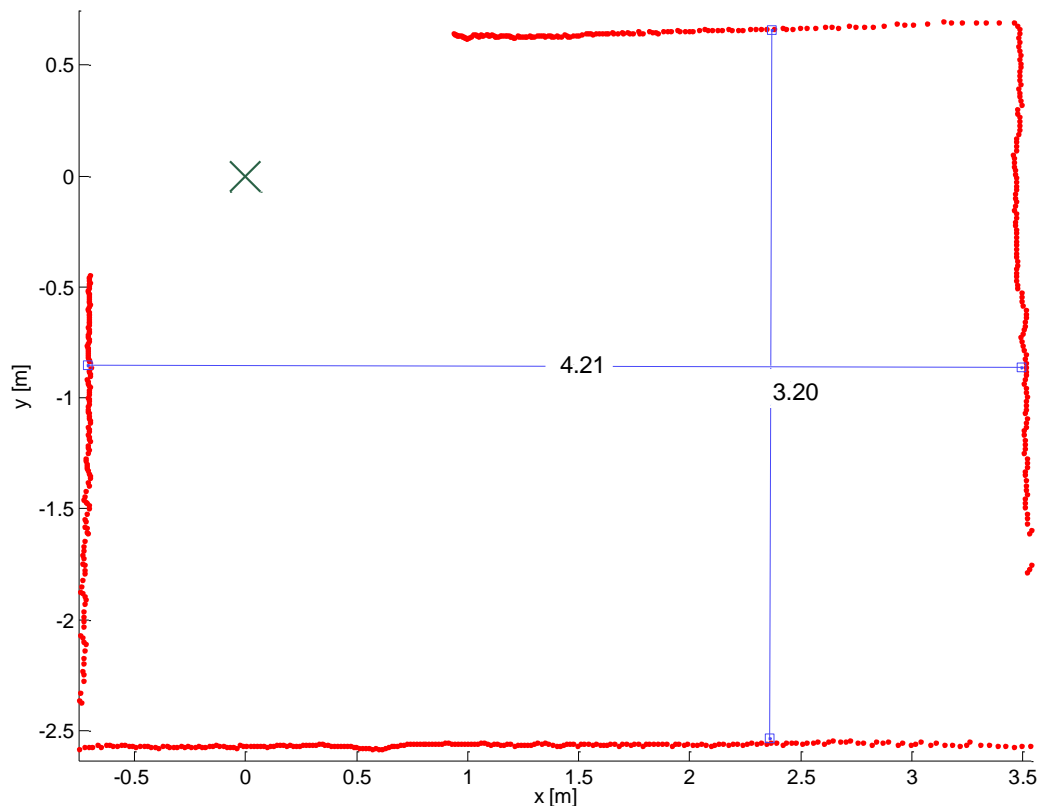
Het verschil tussen de waarden van *Scannerpose*<sub>x</sub> is te verwaarlozen. Hier is immers bij de verplaatsing geen rekening mee gehouden. Wel verandert deze waarde ook van teken wat niet

verwacht wordt. Dit treedt eveneens op bij de wieldiameters. Dit is normaal daar er verwacht wordt dat de laserscanner tegen de wijzers van de klok in zal scannen. Door de laserscanner ondersteboven te plaatsen zullen de scans volgens de wijzers van de klok gebeuren uit het oogpunt van de rolstoel.

### 5.4.6 Extra controle resultaten

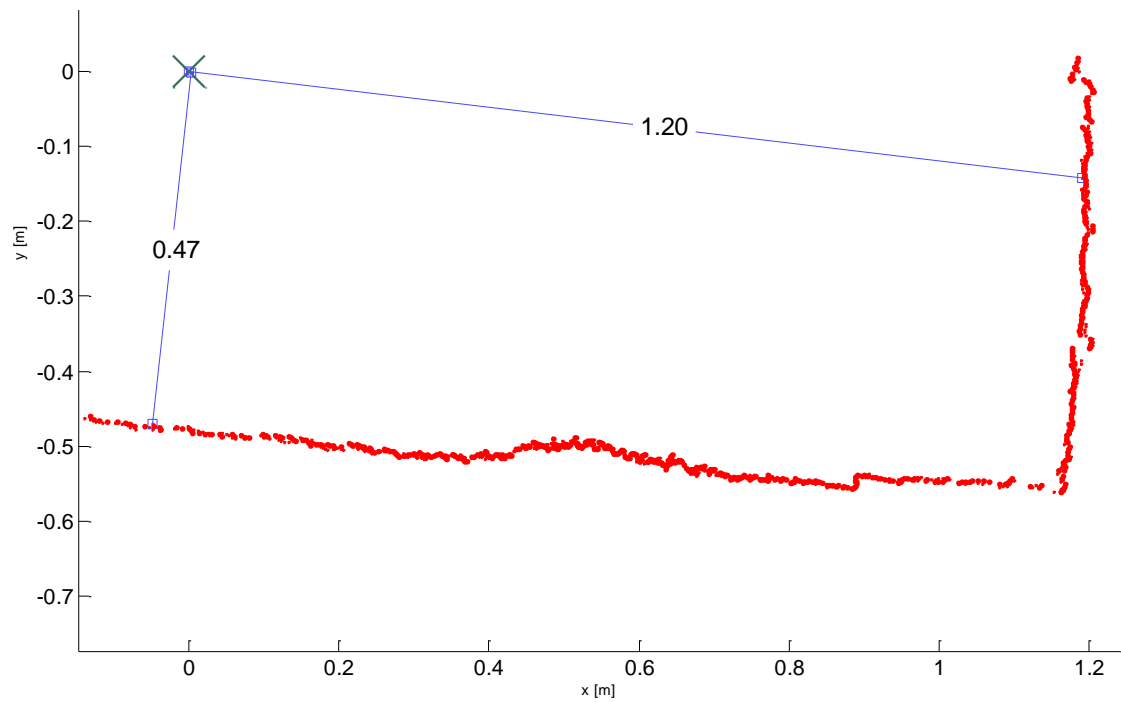
Indien we de afmetingen van het testparcours opmeten, kunnen we controleren of ook deze metingen correct doorgevoerd worden in het programma. Hierdoor kunnen we controleren of de laserscanner correct werkt en of de parameters, bepaald door kalibratie, correct zijn. We gebruiken hiervoor een visualisatieprogramma voor de laserscans. Deze zal de scans weergeven in een figuur met behulp van Matlab.

Een eerste opstelling is een rechthoek met afmetingen zoals weergegeven in Figuur 82. De afmetingen van de rechthoek werden gemeten met een rolmeter. De rechthoek heeft een lange zijde van 4,15 m en een korte zijde van 3,23 m. We zien dat deze afmetingen verrassend goed overeenkomen met de gemeten waarden van de laserscanner. De afwijkingen kunnen verklaard worden door de onnauwkeurigheid van de laserscanner. Deze heeft volgens de datasheet (zie bijlage) een nauwkeurigheid van 3% op de meting in het bereik 1,000 m tot 4,095 m. Dit betekent dat op een lengte van 4,15 m de afwijking  $1\% \cdot 4,15 \text{ m} = 0,0415 \text{ m}$  bedraagt. Dit toont aan dat de werking van de laserscanner en de kalibratie correct gebeuren.



Figuur 82 Meting file17, de laserscan metingen (in het rood), de X links boven stelt de rolstoel voor

Bij een tweede opstelling is de rolstoel in een hoek van ongeveer  $90^\circ$  geplaatst. We meten de afstanden van de wielbasis tot de muur aan de hand van een rolmeter. Ook hier gaan we verifiëren of de metingen overeenkomen met de werkelijkheid. De laserscanner zal dichterbij de muur staan aangezien de scanner aan de voorkant gemonteerd is. De afstand van de laserscanner tot de muur komt overeen met 62.5 m. De afstand van de muur tot de wielbasis komt overeen met een gemeten lengte van 121.5 m. We zien dus dat de afmetingen overeenkomen met de lengte zichtbaar in de Figuur 83. Dit bewijst opnieuw dat de transformatie correct gebeurt. Er kan dus worden aangenomen dat de parameters in de kalibratie correct bepaald zijn. Ook kan hieruit worden opgemaakt dat metingen met deze vrij-goedkope scanner redelijk goede resultaten geeft.



Figuur 83 Afmetingen bij een rechthoek, file14





## 6 Conclusie

Meetfouten bij encodermetingen zijn niet altijd afkomstig van de encoder zelf. Het is een combinatie van meerdere factoren. Deze masterproef heeft aangetoond dat de encodermetingen, het type gebruikt in deze thesis, verbeterd kunnen worden aan de hand van volgende opties:

- meerdere leeskoppen;
- een uniform verdeelde magneetring;
- betere positionering leeskop t.o.v. magneetring;
- magneetrotor met referentiemagneet;
- implementatie digitale filter;
- optimalisering van software en hardware om interne vertragingen te verminderen.

De investering in deze verbeteringen zal budgetafhankelijk zijn. In het huidige systeem werd gekozen voor de implementatie van een digitale filter.

Er kan geconcludeerd worden dat de precisie van de kalibratie binnen de grenzen ligt van wat er ook mogelijk is bij het handmatig opmeten. Dit betekent dat de zelfkalibratie de taak van het handmatig opmeten kan en mag vervangen. De plaatsing van de sensoren op de rolstoel is hierdoor eenvoudiger. De kalibratiemethode kan gebeuren zonder invloed van de gebruiker. Hierdoor zal de techniker die de sensoren plaatst geen rekening moeten houden met plaats- en vormtoleranties. Indien er zeer lange datasets worden opgenomen en indien de rolstoel weet dat hij in een goede omgeving zit, kan de berekening van parameters op regelmatige basis gebeuren. Op deze manier kan er te allen tijde gebruik gemaakt worden van up-to-date parameters. Dit zal er voor zorgen dat ook bij wielslijtage of bandenspanningsverlies of bij het toe- en/of afnemen van het gewicht van de patiënt, de rolstoel over de correcte gegevens beschikt.

In een toekomstig onderzoek zal een kosten-batenanalyse uitwijzen welke investeringen voor de encoders aangewezen zijn in de verdere toepassing van dit project. Eveneens zal de kalibratiemethode geïmplementeerd moeten worden in het complete systeem van de autonome rolstoel.



# Literatuurlijst

- [1] “RADHAR,” 2013. [Online]. Available: <https://www.radhar.eu/>. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [2] “ACRO.” [Online]. Available: <http://www.acro.be/NL/home.php?id=401>. [Accessed: 05-Nov-2014].
- [3] M. Ikeda and H. Kaku, “MR sensor for magnetic encoder,” ... *Japan, IEEE Transl. J.*, vol. 7, no. September, pp. 705–713, 1992.
- [4] Heidenhain, “Angle encoders Without Integral Bearing,” 2014. [Online]. Available: [http://www.heidenhain.de/de\\_EN/php/documentation-information/brochures/popup/media/media/file/view/file-0351/file.pdf#page=](http://www.heidenhain.de/de_EN/php/documentation-information/brochures/popup/media/media/file/view/file-0351/file.pdf#page=). [Accessed: 01-Dec-2014].
- [5] Baumer, “What are the benefits of bearingless encoders?,” 2012. [Online]. Available: [http://www.baumer.com/fileadmin/user\\_upload/international/Services/Download/Fachartikel/EN/Bearingless\\_Encoder\\_EN.pdf](http://www.baumer.com/fileadmin/user_upload/international/Services/Download/Fachartikel/EN/Bearingless_Encoder_EN.pdf). [Accessed: 07-Jan-2015].
- [6] “Choosing a code wheel: A detailed look at how encoders work - PC/104 and Small Form Factors.” [Online]. Available: <http://smallformfactors.opensystemsmidia.com/article-id/?3039=>. [Accessed: 15-Jan-2015].
- [7] SEW-EURODRIVE, “SEW-Encoder Systems / Drive Engineering – Practical Implementation,” 2010. [Online]. Available: <http://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16742028.pdf>. [Accessed: 22-Dec-2014].
- [8] EPC, “A New Approach to Interpolated High Resolution Encoders.” [Online]. Available: <http://www.encoder.com/article-1.html>. [Accessed: 14-Dec-2014].
- [9] “Encoder Types - National Instruments,” 2010. [Online]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/FDFA1FB36C8DD235862574F7006D8E3C>. [Accessed: 14-Dec-2014].
- [10] Baumer, “Encoders without bearing Combination of sensor / magnet rotor,” 2012. .
- [11] RENISHAW, “White paper: The accuracy of angle encoders: Angle encoders, accuracy, RESR, RESM, SiGNUM,” 2009. [Online]. Available: <http://resources.renishaw.com/en/details/white-paper-the-accuracy-of-angle-encoders--24170>.
- [12] E. W. Weisstein, “Least Squares Fitting.” [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/LeastSquaresFitting.html>. [Accessed: 23-Dec-2014].
- [13] S. Smith, “Chapter 2: Statistics; Probability and Noise,” in *The scientist and engineer’s guide to digital signal processing*, vol. 3, 1997, p. 626.
- [14] R. J. Graetz, “On-axis Self-calibration of Angle Measurement Errors in Precision Rotary Encoders,” no. February, p. 139, 2011.

- [15] “MagneticEye - Encoder ring.” [Online]. Available: [http://www.magneticmeasurements.com/Bilder/fullsize/Santos\\_1.jpg](http://www.magneticmeasurements.com/Bilder/fullsize/Santos_1.jpg). [Accessed: 07-Jan-2015].
- [16] W. De Clippeleer, *Tabellenboek voor metaaltechniek*, 5th ed. PLANTYN, 1994, p. 322.
- [17] Newport, “Motion control tutorial.” [Online]. Available: <http://www.me.metu.edu.tr/courses/me551/protected/Newport - Motion control tutorial.pdf>. [Accessed: 08-Jan-2015].
- [18] R. Nave, “Hysteresis in magnetic materials.” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/hyst.html#c3>. [Accessed: 08-Jan-2015].
- [19] “Make it Faster: More Throughput or Less Latency? - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/14990/en/>. [Accessed: 07-Jan-2015].
- [20] B. Deen, “Ct-i/o linkdriver with comedi,” University of Twente, 2007.
- [21] S.-T. Wu, J.-Y. Chen, and S.-H. Wu, “A Rotary Encoder With an Eccentrically Mounted Ring Magnet,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 8, pp. 1907–1915, Aug. 2014.
- [22] J.G. Proakis, *Digital signal processing using MATLAB*, 2nd ed., vol. 17, no. 2. Pearson Prentice Hall, 2007, p. 605.
- [23] “Signalen en systemen in de discrete tijd,” 2000. [Online]. Available: <http://www.sps.ele.tue.nl/members/m.j.bastiaans/courses/dsb1.pdf>. [Accessed: 01-Jan-2015].
- [24] “MATLAB Coder - MathWorks Benelux.” [Online]. Available: <http://nl.mathworks.com/products/matlab-coder/>. [Accessed: 13-Jan-2015].
- [25] Hokuyo, “Communication Protocol Specification For SCIP2.0 Standard.” [Online]. Available: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/pdf/URG SCIP20.pdf>. [Accessed: 20-Dec-2014].
- [26] H. Kawata, a. Ohya, S. Yuta, W. Santosh, and T. Mori, “Development of ultra-small lightweight optical range sensor system,” *2005 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 1078–1083, 2005.
- [27] J. Borenstein, “Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 12, no. 6, pp. 869–880, 1996.
- [28] A. Censi, L. Marchionni, and G. Oriolo, “Simultaneous maximum-likelihood calibration of odometry and sensor parameters,” *Robot. Autom. ....*, pp. 2098–2103, May 2008.
- [29] Laboratorio di Geomatica, “Roto-translations,” 2009. [Online]. Available: [http://geomatica.como.polimi.it/corsi/def\\_monitoring/roto-translationsb.pdf](http://geomatica.como.polimi.it/corsi/def_monitoring/roto-translationsb.pdf). [Accessed: 13-Jan-2015].
- [30] A. Martinelli, “Local Decomposition and Observability Properties for Automatic Calibration in Mobile Robotics,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4182–4188, 2009.

# Bijlage

Bijlage A: Datasheet Baumer magnetische encoders .....	101
Bijlage B: Datasheet Hokuyo laserscanner .....	105
Bijlage C: Filter implementatie in C++ .....	109
Bijlage D: Structuur DVD .....	112
Bijlage E: Uitvoeren van experimenten.....	113
Bijlage F: Resultaten experimenten .....	119



# Bijlage A: Datasheet Baumer magnetische encoders

## Encoders without bearing Combination of sensor / magnet rotor Resolution max. 4096 ppr

### MDFK 10



MDFK 10

#### Features

- Magnetic sensor with rotor
- Resolution max. 16384 steps
- Output signals A 90° B or A 90° B +N
- Output circuits: push-pull and RS422
- Non-contact, wear-free sensing system
- High resistant to dirt, vibrations

#### Technical data - electrical ratings

Consumption w/o load	≤30 mA
Resolution (steps/turn)	1024...4096
Reference signal	Zero pulse, width 90°
Output frequency	≤1 MHz
System accuracy	±0.5 °
Jitter	≤15 %
Interpolation	32-fold, 64-fold

#### MDFK 10G

Voltage supply	8...30 VDC
Reverse polarity protection	Yes, to GND
Output signals	A 90° B, 0
Output circuit	Push-pull short-circuit proof
Circuit current max.	50 mA
Voltage drop	<2 VDC (I=20 mA)

#### MDFK 10T

Voltage supply	5 VDC ±5 %
Reverse polarity protection	No
Output signals	A 90° B, N + inverted
Output circuit	RS422
Circuit current max.	RS422 specific
Voltage drop	RS422 specific

#### Technical data - mechanical design

Dimensions W x H x L	15 x 10 x 40 mm
Protection DIN EN 60529	IP 67
Working distance max.	0.6 mm
Starting torque	0.5 Nm
Material	Housing: PA6
Operating temperature	-25...+85 °C
Relative humidity	95 %
Resistance	DIN EN 60068-2-6 Vibration 20 g, 10-2000 Hz DIN EN 60068-2-27 Shock 100 g, 6 ms
Weight approx.	105 g
Connection	Cable 2 m

# Encoders without bearing

## Combination of sensor / magnet rotor

### Resolution max. 4096 ppr

MDFK 10

#### Part number

Push-pull

RS422

MDFK 10G8124/

MDFK 10T8105/

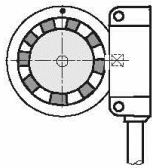
Interpolation  
N32 32-fold  
N64 64-fold

Interpolation  
N32 32-fold  
N64 64-fold

#### Selection of sensor / magnet rotor

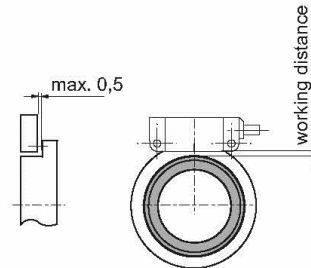
required pulse per turn	sensor-interpolation	poles per magnetring/rotor
1024	32-fold	32
1600	32-fold	50
2048	64-fold	32
3200	64-fold	50
4096	64-fold	64
other pulses on request		

#### Mounting and direction of travel

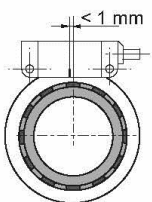


CHA is leading CHB by 90° when rotating CW.

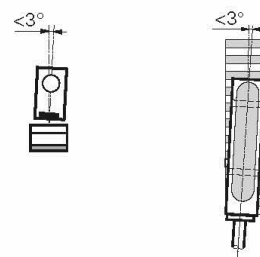
#### Working distance



#### Axial misalignment



#### Angular misalignment





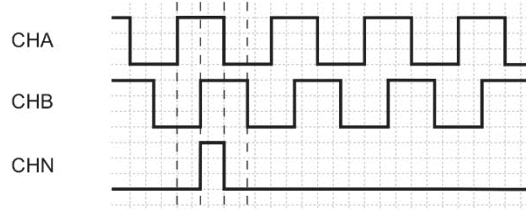
# Encoders without bearing

Combination of sensor / magnet rotor  
Resolution max. 4096 ppr

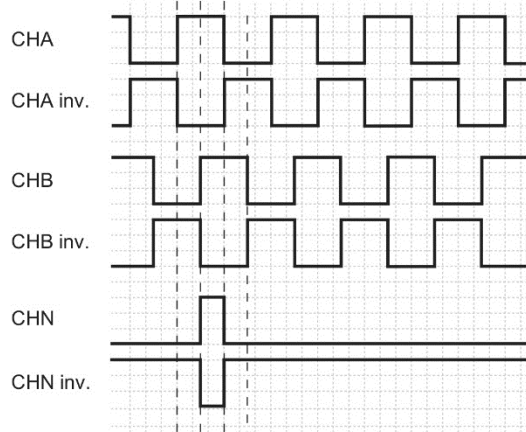
## MDFK 10

### Output signals

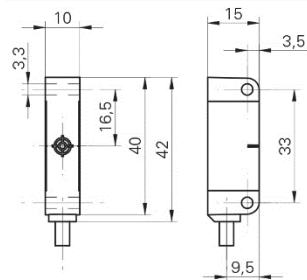
#### Push-pull



#### RS422



### Dimensions



### Terminal assignment

#### Push-pull A 90° B, N (3-channel)

cable color		signals
brown	BN	+Vs
white	WH	0 V
green	GN	CHA
yellow	YE	CHB
pink	PK	CHN

cable data PUR 5 x 0.14 mm<sup>2</sup>, shielded

#### RS422 A 90° B, N + inv. (3-channel)

cable color		signals
brown	BN	+Vs
green	GN	CHA
red	RD	CHA inv.
yellow	YE	CHB
blue	BU	CHB inv.
pink	PK	CHN
gray	GY	CHN inv.
white	WH	0 V

cable data PUR 8 x 0.14 mm<sup>2</sup>, shielded

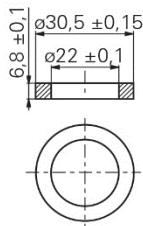
# Encoders without bearing

## Combination of sensor / magnet rotor

### Resolution max. 4096 ppr

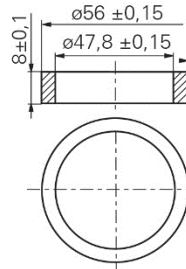
MDFK 10

#### Ring magnets



max. speed 20'000 rpm

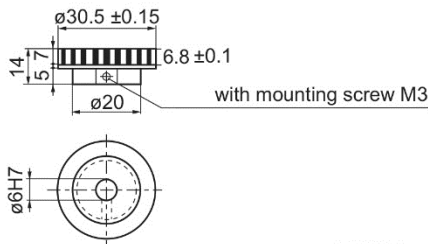
MRAP X32/031X022	magnetring 32 pole
MRAP X36/031X022	magnetring 36 pole



max. speed 10'000 rpm

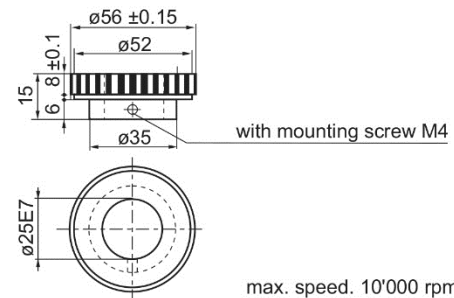
MRAP X50/056X048	magnetring 50 pole
MRAP X64/056X048	magnetring 64 pole

#### Magnet rotors without reference magnet



max. speed 20'000 rpm

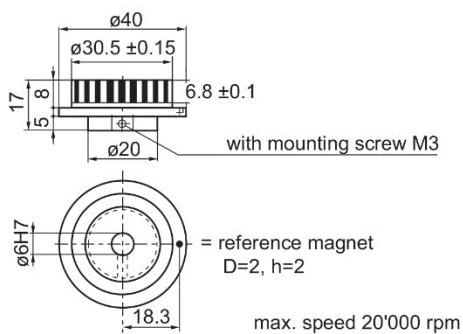
MSAP X32/031X006	magnetrotor 32 pole w/o ref.
MSAP X36/031X006	magnetrotor 36 pole w/o ref.



max. speed. 10'000 rpm

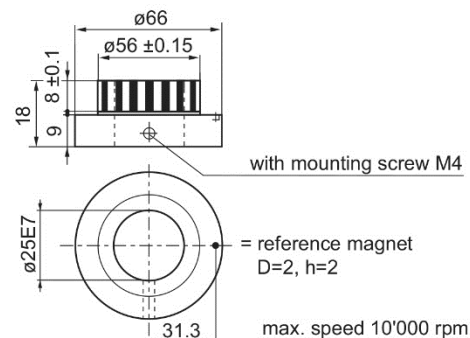
MSAP X50/056X025	magnetrotor 50 pole w/o ref.
MSAP X64/056X025	magnetrotor 64 pole w/o ref.

#### Magnet rotors with reference magnet



max. speed 20'000 rpm

MSAP Z32/040X006	magnetrotor 32 pole with ref.
MSAP Z36/040X006	magnetrotor 36 pole with ref.



max. speed 10'000 rpm

MSAP Z50/066X025	magnetrotor 50 pole with ref.
MSAP Z64/066X025	magnetrotor 64 pole with ref.

## Bijlage B: Datasheet Hokuyo laserscanner

Date: 2009.8.20

**Scanning Laser Range Finder**  
**URG-04LX-UG01**  
**(Simple-URG)**  
  
**Specifications**

Symbol	Amended Reason			Pages	Date	Corrector	Amendment No
Approved by	Checked by	Drawn by	Designed by	Title	Scanning Laser Range Finder URG-04LX-UG01		
MORI	MAEDA	YAMAMOTO	MORI		<b>Specifications</b>		
			Drawing No.	C-42-3635		1/4	

1. General

URG-04LX-UG01 is a laser sensor for area scanning. The light source of the sensor is infrared laser of wavelength 785nm with laser class 1 safety. Scan area is 240° semicircle with maximum radius 4000mm. Pitch angle is 0.36° and sensor outputs the distance measured at every point (683 steps). Laser beam diameter is less than 20mm at 2000mm with maximum divergence 40mm at 4000mm.

Principle of distance measurement is based on calculation of the phase difference, due to which it is possible to obtain stable measurement with minimum influence from object's color and reflectance.

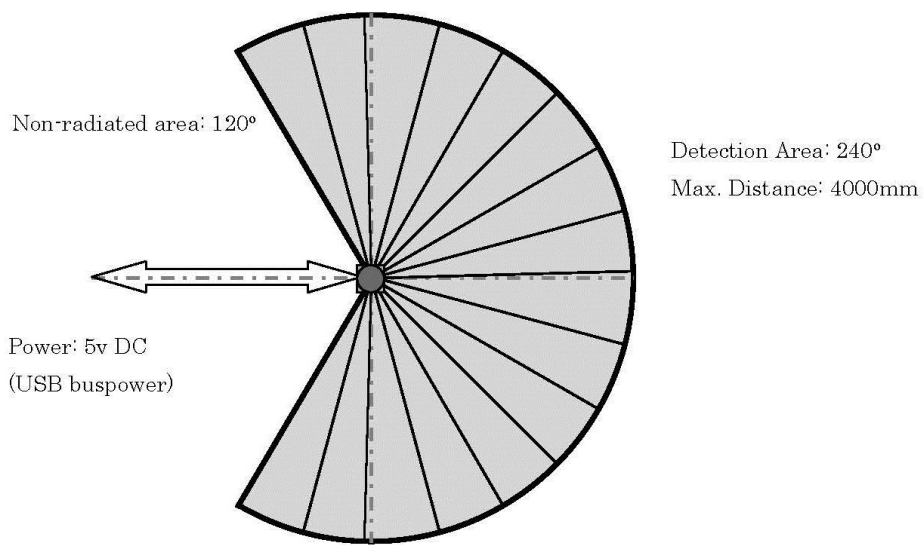


Figure 1

Note

Figure 1 shows the detectable area for white Kent sheet (70mm×70mm). Detection distance may vary with size and object.

2. Important Notice

- This sensor is designed for indoor use only.
- This sensor is not a safety device/tool
- This sensor is not for use in military applications
- Read specifications carefully before use.

Title	URG-04LX-UG01 Specification	Drawing No	C-42-3635	2/4
-------	-----------------------------	------------	-----------	-----

### 3. Specifications

Product Name	Scanning Laser Range Finder
Model	URG-04LX-UG01
Light source	Semiconductor laser diode ( $\lambda=785\text{nm}$ ), Laser safety Class 1 (IEC60825-1)
Power source	5V DC $\pm 5\%$ (USB buspower)
Current consumption	500mA or less (Rush current 800mA)
Detection distance	20mm ~ 4000mm
Accuracy	Distance 20mm ~ 1000mm : $\pm 30\text{mm}^*$ Distance 20mm ~ 4000mm : $\pm 3\%$ of measurement*
Resolution	1 mm
Scan Angle	240°
Angular Resolution	0.36°
Scan Time	100msec/scan
Interface	USB Version 2.0 FS mode (12Mbps)
Ambient (Temperature/Humidity)	-10 ~ 50°C / 85% or less (without dew and frost)
Preservation temperature	-25 ~ 75°C
Ambient Light Resistance	10000Lx or less
Vibration Resistance	Double amplitude 1.5mm 10 ~ 55Hz, 2 hours each in X, Y and Z direction, and 98m/s <sup>2</sup> 55Hz ~ 150Hz in 2 minutes sweep, 1 hours each in X, Y and Z direction
Impact Resistance	196 m/s <sup>2</sup> , 10 times each in X, Y and Z direction
Protective Structure	Optics : IP64 Case : IP40
Insulation Resistance	10M $\Omega$ for DC 500Vmegger
Weight	Approx. 160 g
Case	Polycarbonate
External dimension (W×D×H)	50×50×70mm (Reference design sheet No.3502)

\*Under standard test conditions with white Kent sheet 70mm×70mm

### 4. Quality reference value

Operating Vibration resistance	19.6m/s <sup>2</sup> , 10Hz ~ 150Hz with 2 minutes sweep, 0.5 hours each in X, Y and Z direction
Operating Impact resistance	49 m/s <sup>2</sup> , 10 times each in X, Y and Z direction
Angular Speed	360 deg/s
Angular Acceleration	$\pi/2$ rad/s <sup>2</sup>
Life	5 years (Varies depending upon the operating conditions)
Sound level	25db or less (at 300mm)
FDA	This product complies with 21 CFR parts 1040.10 and 1040.11. (Accession Number 0521258-002)

Title	URG-04LX-UG01 Specification	Drawing No	C-42-3635	3/4
-------	-----------------------------	------------	-----------	-----

 **HOKUYO AUTOMATIC CO.,LTD.**

5. Interface

CN USB-mini (5 Pin)

Cable is not included. Use commercially available compatible unit.

Note:

Refer specifications number C-42-3320B for communication protocol (SCIP2.0).

6. Notice:

Supply voltage is DC 5Volts. Sensor will damage if high voltage is supplied.

USB buspower may not be sufficient during the start up of URG-04LX-UG01 in some PCs.  
Use the auxiliary cable supplied with the sensor to avoid the problem.

The maximum data step is 683 points. Sensor's angular resolution is  $0.3515625^\circ$  ( $360^\circ / 1024$  steps) and angular range is  $239.765625^\circ$  ( $(683-1) \times 360 / 1024$ )

Angular resolution can be specified form the host. Read communication protocol specification (No C-42-3320B) for details.

USB driver is communication device class (CDC) supported by standard operating system. The device is connected as a COM port with the same utility.

Plug and play function is not supported.

Title	URG-04LX-UG01 Specification	Drawing No	C-42-3635	4/4
-------	-----------------------------	------------	-----------	-----

## Bijlage C: Filter implementatie in C++

De filter besproken in deze thesis werd geïmplementeerd in C++. Deze code bevat functies om een file in te lezen en te verwerken, aangezien we het enkel op deze manier konden testen. De resultaten bekomen met deze code zijn identiek aan deze gerealiseerd door de functie 'filter' van Matlab. Op de DVD kan het volledige project teruggevonden worden.

```
//=====
// Name      : PGGJ_filter.cpp
// Author    : Gertjan Janssen Pieter Gijsen
// Version   : final
// Description : Inlezen van de encoderdata en verwerking door filter
//=====
#include <iostream> //cout
#include <fstream> //data reading
#include <iomanip>
#include <string>
#include <vector>
#include <sstream> //string stream
#include <math.h>
#include <time.h>
using namespace std;
struct dataEncoders {
    double a,b,c; //unknown value
    double angleOptisch; //angles left wheel encoder
    double angleMagnetisch; //angles right wheel encoder
    double timeL; //time left wheel encoder
    double timeR; //time right wheel encode
}
vector<dataEncoders> outputEncoderData, tempOutputV;
int length = 4;
std::vector<double> dbuffer,a, b;
unsigned int sizeA = a.size();
unsigned int sizeB = b.size();
std::vector<double> angle, tijd, y, z,snelheid;
std::vector<double> tijd,z,y,snelheid;
const char *path = "origineel/Rencoder-samplef-5-snelheid-3-achteruit.txt";
const char *pathOpslaan = "FilterOpSnelheid/Rencoder-samplef-5-snelheid-3-achteruit.txt";
const char *pathParamAFilter = "Param_A/ParamAfilter100Hz.txt";
const char *pathParamBFilter = "Param_B/ParamBfilter100Hz.txt";
/** Inlezen van wheelencoder file
Input = *path, zie constructor*/
void readEncoderDataFile() {
    ifstream dataFile; //inlezen van file
    dataFile.open(path); //openen file
    if (dataFile.is_open()) {
        string tempLine;
        vector<string> tempstr;
        while (getline(dataFile, tempLine, '\n')) { //reading by line
            stringstream ss(tempLine);
            string temp;
            while (getline(ss, temp, '\t')) { //reading tab by tab
delimit data
                istringstream iss(temp);
                dataEncoders newData; // fill in data to struct
                iss >> newData.a;
                iss >> newData.angleOptisch;iss >>
newData.angleMagnetisch;
            }
        }
    }
}
```

```

        iss >> newData.timeL;        iss >> newData.timeR;
        iss >> newData.b;iss >> newData.c;
        outputEncoderData.push_back(newData); // push new data
    (by struct) in vector
    }}dataFile.close();}}
    /**Inlezen van numerator van Filter
    Zie *pathParamAFilter*/
    void readParamAFilter() {ifstream dataFile; //inlezen van file
        dataFile.open(pathParamAFilter); //openen file
        if (dataFile.is_open()) {
            string templine;
            vector<string> tempstr;
            while (getline(dataFile, templine, '\n')) { //reading by line
                stringstream ss(templine);
                double newData; // fill in data to struct
                ss >> newData;
                a.push_back(newData); // push new data (by struct) in vector
            }}dataFile.close();}
    /**Inlezen van denominator van Filter
    Zie *pathParamBFilter*/
    void readParamBFilter() {ifstream dataFile; //inlezen van file
        dataFile.open(pathParamBFilter); //openen file
        if (dataFile.is_open()) {
            string templine;
            vector<string> tempstr;
            while (getline(dataFile, templine, '\n')) { //reading by line
                stringstream ss(templine);
                double newData; // fill in data to struct
                ss >> newData;
                b.push_back(newData); // push new data (by struct) in vector
            }} dataFile.close();}
    /**Zorgen dat tijd van de file op 0 begint. Overzichtelijker en leesbaarder*/
    void tijdWegdoen() {for (unsigned int i = 0; i < outputEncoderData.size(); i++) {
        outputEncoderData[i].timeL = outputEncoderData[i].timeL
            - outputEncoderData[0].timeL;
        cout << outputEncoderData[i].timeL << endl;    }}
    /**aanmaken gelijke input en output vector*/
    void initTempOutputEncoder() {size_t size = outputEncoderData.size();
        for (unsigned int idx = 0; idx < size; idx++) {
            dataEncoders newData; // fill in data to struct
            newData.angleOptisch = outputEncoderData[idx].angleOptisch;
            newData.angleMagnetisch = 0;
            newData.b = 0;
            newData.c = 0;
            newData.timeL = outputEncoderData[idx].timeL; //-
1342701901.95614505;
            newData.timeR = 0;
            newData.a = 0;
            tempOutputV.push_back(newData);}}
    /**Standaard paramters filter Mogelijk voor test. */
    void initFilter() { a[0] = 1.0;
        a[1] = -2.831326200951608; a[2] = 2.687020001486035; a[3] = -
0.854379753069797; b[0] = 0.000164255933078783; b[1] = 0.000492767799236349;
b[2] = 0.000492767799236349; b[3] = 0.000164255933078783; length = a.size();}
    /**Verwijderen van gefilterde file*/void clean_myfile()
    {std::remove("testData.txt");}
    /**Verwerkte filter data opslaan in txt file.
    File: angleMagnetisch,FilterAngle, TimeL, TimeR*/
    void opslaanInTextFile3() {
        //Opslaan in text file
        size_t size = angle.size();
        ofstream toTextFile;

```



```

toTextFile.open(pathOpslaan);
for (unsigned int i = 0; i < size - 1; i++) {
    toTextFile << i << std::setprecision(20) << "\t"
        << outputEncoderData[i].angleMagnetisch << "\t" <<
y[i]
        << "\t" << outputEncoderData[i].timeL << "\t"
        << outputEncoderData[i].timeR << endl;}
    std::cout << "opgeslagen";toTextFile.close();}
/**Verwerkte filter data opslaan in txt file.
File: angleMagnetisch,FilterAngle, TimeL, Timer*/
void Filter(double *B, double *A, double *X, size_t n, double *Y) {
    unsigned int i = 4; while (n > i) {
        Y[i] = B[0] * X[i] + B[1] * X[i - 1] + B[2] * X[i - 2] + B[3] * X[i
- 3]
        - A[0] * Y[i] - A[1] * Y[i - 1] - A[2] * Y[i - 2]
        - A[3] * Y[i - 3];
        i++;} return;}
/**Snelheid berekenen aan de hand van de encoder data*/
void calculateSpeed(double *Magn, double *tijd, double *speed, size_t n) {
    unsigned int i = 1;
    while (i < n) {
        speed[i] = (Magn[i] - Magn[i - 1]) / (tijd[i] - tijd[i - 1]);
        i++;} return;}
/**Main filter functie*/
int main() {clean_myfile();//Verwijderen file
    std::ofstream output(pathOpslaan, std::ios::binary | std::ios::trunc);
    readParamAFilter(); readParamBFilter();//inlezen param
    readEncoderDataFile(); initTempOutputEncoder(); //output aanmaken even
groot als input
    size_t size = outputEncoderData.size();//lengte van dataset
    cout << "Size of reading: " << size << endl;
    //Een array maken met enkel de hoeken achterelkaar. De vector angle is
gedefinieerd zodat hij global is.
    for (unsigned int idx = 0; idx < size; idx++) {
        double newAngle; double newTime; newAngle =
outputEncoderData[idx].angleMagnetisch;
        newTime = outputEncoderData[idx].timeL;
        //cout << "i "<<idx<< "hoek: "<<newAngle <<"hoek uit data:"<<
outputEncoderData[idx].angleOptisch<<endl;
        angle.push_back(newAngle); tijd.push_back(newTime);}
    //initFilter(); standaard param if needed.
    for (unsigned int i = 0; i < angle.size() + 1; i++) {
        y.push_back(0); z.push_back(0); snelheid.push_back(0);}
    //snelheid filteren
    calculateSpeed(&angle[0], &tijd[0], &snelheid[0], angle.size());
    Filter(&b[0], &a[0], &snelheid[0], angle.size(), &y[0]);
    opslaanInTextFile3(); //zodat op de plaats van de magnetische de snelheid
vd magnetische geplot w
    /* for (unsigned int i = 0; i < y.size()+1; i++) { cout <<
snelheid[i]<<endl; }*/
    return 0;}

```

## Bijlage D: Structuur DVD

De DVD heeft de volgende structuur:

- calibration-master
  - de kalibratiemethode van Censi A.; hierbij werden al enkele files gewijzigd voor een correcte implementatie voor deze rolstoel
- calibrationMatlab
  - de files voor de uitvoering van de experimenten, omgezet via matlab functies. De pg\_run.sh script bevat de C code voor uitvoering van de kalibratie methode
  - Matlab
    - Matlab implementatie en resultaten van de kalibratie
  - Logs
    - de nodige functies specifiek voor deze encoders: virifier, test\_json, synchronizer, solver2, solver, prepare\_robot\_log.rb en gsl\_jacobian\_test. Deze functies zijn het hart van de kalibratie.
- CSM
  - Scan matcher methode van Censi. A.
- Log-files-rolstoel
  - alle originele log-files afkomstig van de rolstoel. Bijgevoegd ook een document met informatie over de meting.
  - de Matlab functies voor transformeren en weergeven van de metingen.
- OverigeMatlabFiles
  - alle functies gebruikt bij opstellen van deze thesis en andere procedures, foutentabel, ...
- Filter
  - de code nodig voor het uitvoeren van de filter. Een Matlab- en C++ implementatie.

## Bijlage E: Uitvoeren van experimenten

Voor het uitvoeren van de experimenten is een Linux distributie nodig met de nodige pakketten. Voor deze thesis werd gebruikt gemaakt van Ubuntu 14.04. De volgende pakketten zijn nodig wanneer men de experimenten met nieuwe data/huidige data in de terminal wil uitvoeren:

- een aangepaste versie van CSM en Calibration Master van Andrea Censi,
- GSL,
- een script file.

Er werd gebruik gemaakt van “The C(anonical) Scan Matcher” en “Calibration” van Andrea Censi.

Voor het gebruik met de robot in deze thesis zijn enkele aanpassingen gebeurd in de code. Specifieke instellingen zijn gewijzigd door middel van trial-and-error om een zo goed mogelijk resultaat te behalen. Er is een wijziging nodig indien men een andere encoder gebruikt.

In deze korte handleiding kan u informatie terugvinden over het formaat van inlezen en hoe men het experiment kan herhalen. Sommige delen van de gebruikte code en sommige functies werden overgenomen uit Matlab files afkomstig van respectievelijk Demeester E. en Censi A. Wij danken hen voor hun hulp bij het maken van deze programma's. Deze programma's kan u terug vinden op de bijgevoegde DVD.

### Originele log file wiel-encoders afkomstig van de rolstoel

In het RADHAR-project werd een zelfgemaakte structuur voor de logfile opgesteld. De laserscanner en wiel-encoder metingen worden in een eigen formaat opgeslagen. Het formaat gebruikt voor de encoders ziet er uit als volgt:

Valid	left_angle (rad)	right_angle (rad)	time_left (s)	time_right (s)
1	1.82351966	78.91679212	4860.94375500	4860.94377000

Deze files zijn voor de experimenten in deze thesis al geconverteerd naar het gebruikte formaat voor kalibratie. Deze kan u terug vinden op de DVD. We gaan er van uit dat deze omzetting via Matlab niet meer nodig is indien de kalibratie wordt geïmplementeerd in een rolstoel. Het programma dat de log-file opslaat zal dit in een meer gestandaardiseerd formaat moeten doen zoals CARMEN.

Indien u deze files zelf wil omvormen, kan volgende procedure gevolgd worden:

Voer volgende Matlab file uit: **PG\_odometrieCARMEN.m**

Hiervoor zal u enkele instellingen moeten doorgeven. De eerste is de dataset welke u wil uitvoeren bv. file10. De tweede parameter bepaalt of u deze met de filter gaat uitvoeren of niet. Een voorbeeld voor het uitvoeren van file10: PG\_odometrieCarmen('file10',0)

Deze functie zal een file opslaan in de directory met de omgevormde file. Indien u wilt dat de odometrie ook wordt doorgegeven, zal u deze moeten aanzetten via een parameter in de functie.

Meer info kan u in de Matlab file terug vinden. De filterinstellingen kan u eveneens wijzigen in de overeenkomstige Matlab file.

### Formaat odometrie file voor input kalibratie

odom_x odom_y odom_theta left_ticks seconds microseconds right_ticks seconds microseconds
Vb: 0 0 0 0 5379 389992 0 5379 390030

- left\_ticks: de linkse encoder ticks
- seconds: seconden van de meting
- microseconds=microseconden van de meting
- right\_ticks: rechtste encoder ticks
- seconds: seconden van de meting
- microseconds: microseconden van de meting

Indien men gebruik maakt van log-files waarbij de wiel-encoder-informatie wordt uitgedrukt in de hoek, zal deze omgevormd moeten worden. De omvorming van hoek naar ticks gebeurt met de gegeven resolutie van de encoder. Deze staat ingesteld voor een encoder met 4096 pulsen per omwenteling. We vinden dus  $4 \times 4096 = 16384$  terug in de Matlab file. Een andere encoder zal een andere waarde vereisen. U wijzigt deze waarde in “**PG\_odometrieCarmen.m**”.

De odometrie wordt standaard niet doorgegeven en zal dan ook bij elke meting 0 zijn, omdat we in een simpele omgeving werken. Het doorgeven van de odometrie kan worden aangezet in de file.

### Originele log file Hokuyo laserscanner afkomstig van rolstoel

De laserscannermetingen worden in het volgende formaat bewaard:

Meting nr.	Reading(m)	Foutcode
40	1.4350000	1

De waarde achter de reading zal weergeven of het een goede of slechte meting is. Volgende foutcodes zijn mogelijk: OutOfRange = -56, WeakSignal = -45, InvalidADConversion = -17, InvalidMeas = -14, DeviceMalfunction = -13, ValidMeas = 1, GhostMeas = -99, Outlier = -199, ValidMeasGhost = 99, BoundaryMeas = -15, StrongReflection = -1, FrequentError = -2, ErrorCluster = -3, BlindSpot = -4, InsideRobotGeometry = -5, Blocked = -6.

Voor het omvormen van deze file voert u de volgende Matlab file uit:

### **GJ\_laserNaarLaserCensi.m**

Hiervoor zal u enkele instellingen moeten doorgeven. De eerste is de dataset welke u wil uitvoeren bv. file10. De tweede parameter bepaalt of u deze met de filter gaat uitvoeren of niet.

Een voorbeeld voor het uitvoeren van file10: GJ\_laserNaarLaserCensi ('file10',0)  
Deze functie zal een file opslaan in de directory met de omgevormde file. Indien u wilt dat de odometrie ook wordt doorgegeven zal u deze moeten aanzetten via een parameter in de functie. Meer info kan u in de Matlab file terugvinden.

### Formaat laserscanner file

Voor het gebruik van de laser-files in het kalibratieproces zal de log-file, afkomstig van de robot, omgevormd moeten worden. Het gebruikte formaat komt overeen met de log-files van "Robot Navigation Toolkit CARMEN".

```
FLASER num_readings [range_readings] x y theta odom_x odom_y odom_theta
```

Voor een Hokuyo URG-04LX-UG01 is de volgende informatie voldoende:

- num\_readings: het aantal meting gedaan door de scanner en in de log-file: 769,
- [range\_reading]: de array met de afstandmetingen van de scanner,
- laser pose: we geven geen pose van de laserscanner mee dus deze waardes zijn 0,
- robot pose: er wordt geen robotpose doorgegeven dus deze waarde is nul.

Tenslotte moeten de timestamps van de meting nog worden doorgegeven in het volgende formaat: 1468 hokuyo 845895. Hierbij staat het eerste getal voor het aantal seconden en het tweede getal voor het aantal microseconden. Afstanden die ongeldig zijn moeten omgezet worden in nul meter.

Een voorbeeld van deze file kan u op de bijgevoegde dvd terug vinden.

### Visualiseren van de meting

Voor het visualiseren kan u gebruik maken van de visualisatie file. Hierin werd code overgenomen van Demeester E. . Er werden kleine wijzigingen toegevoegd om er voor te zorgen dat de gekalibreerde parameters automatisch ingeladen worden van uit de juiste directory.

Het visualiseren van een meting kan met volgende functie: Visualize\_encoder\_laser.m  
Vervolgens moeten, net zoals bij de vorige m-files, de dataset en filterwaarde doorgegeven worden.

Vb. Visualize\_encoder\_laser('file10',1)

Let op: deze methode vereist dat er paramCalib.txt files in de directory staan die worden uitgelezen. Deze files kunnen gegeneerd worden via de kalibratieprocedure in Matlab.

### Kalibratie uitvoeren in de terminal

De kalibratie kan aan de hand van de omgezette logfiles uitgevoerd worden met een Linux-distributie. Hiervoor moet u enkel het script (pg\_run.sh) uitvoeren. Het nabootsen van een kalibratie kan als volgt:

Ga naar de folder “calibrationMatlab”

- Controleer of u het script kan terug vinden: “pg\_run.sh”  
Controleer of dit uitvoerbaar is via ‘eigenschappen’.



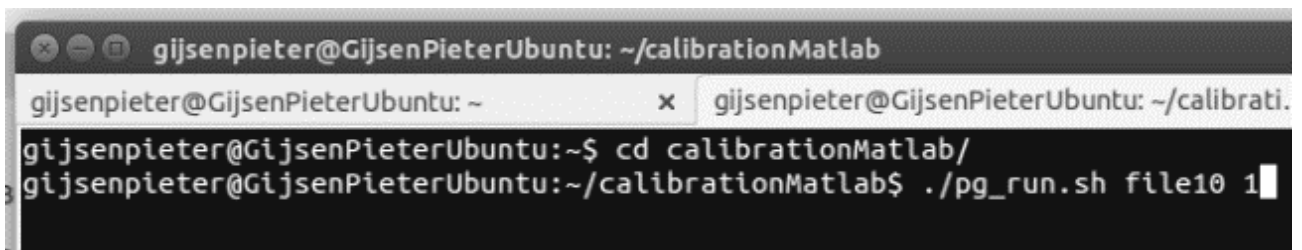
Open een terminal en ga naar de directory: (hier: Persoonlijke folder)

Ga via “cd” naar de directory waar het script staat.

- \$ cd calibrationMatlab/

Zorg dat u het bash-script kan uitvoeren in de terminal. Als parameters kan u twee variabelen doorgeven. Variablele 1 is de naam van de dataset. Er bestaan altijd twee gelijke files, die achteraan enkel wijzigen met de toevoeging van een L of een R (file10L.log en file10.R.log). Indien er geen twee files in dezelfde directory als het script staan, kan deze niet uitgevoerd worden. Deze log-files zijn de output van de eerder beschreven Matlab-functies (GJ\_laserNaarLaserCensi.m en PG\_odometrieCarmen.m).

De tweede variable die kan doorgegeven worden, zal enkel een “clear” methode uitvoeren van de huidige terminal. Vb. bij het uitvoeren van “./pg\_run.sh file10 1”, zal er een kalibratie van file10 gebeuren en de terminal zal *gecleared* worden



Indien u deze stappen succesvol heeft doorlopen, zal het script met de uitvoering starten. Het toont daarbij de volgende “echo” die laat zien wat er gebeurt. Het verschijnen van rode tekst, kan wijzen op een slechte meting of het niet-bestaan van een file.



## Kalibratie in Matlab

Het uitvoeren van een kalibratie in Matlab kan enkel indien u de “scan matcher” al heeft uitgevoerd in de terminal (`$sm2 -in -out -out_stats` functie). Indien u enkel een meting wil nabootsen, hoeft u niets te doen. Deze Matlab files verkregen wij via Censi A. Enkele wijzigingen hieraan waren nodig om deze Matlab-files een correcte kalibratie te laten uitvoeren. Zo moet u onder meer het aantal iteraties instellen, het percentage van uitschieters en de resolutie van de encoders. Deze wijzigingen/instellingen moeten overeenkomen met de instellingen van de script-file. Hieronder vindt u de volgende stappen:

- navigeer naar de folder `calibrationMatlab/matlab`
- start Matlab
- voer de volgende functie in:
  - o `PGGJ_run('file10')`
- er zal een kalibratie uitgevoerd worden van dataset ‘file10’
- er zal vervolgens een `paramCalib.txt` file gegenereerd worden
- de histogrammen en bijhorende figuren zullen gegenereerd worden
- de *workspace* zal opgeslagen worden

De `paramCalib.txt` file die gegenereerd wordt, is nodig voor een visualisatie van de meting. Deze bevat de pose van de laserscanner en de bijhorende wioldiameters en base.



## Bijlage F: Resultaten experimenten

De resultaten kunnen uitgebreid teruggevonden worden op bijgevoegde DVD. Deze bevat ook de uitgebreide log-files afkomstig van de encoders en de laserscanner van de rolstoel. De wijze van meten kan ook teruggevonden worden.

### file1

Matrix A is almost singular (condition number: 85.334679). Not very exciting data!

### file2

Matrix A is almost singular (condition number: 437.643213). Not very exciting data!

### file3

Matrix A is almost singular (condition number: 187.356582). Not very exciting data!

### file4\_1

Estimated sm errors (std dev): 8.23999 mm, 6.61787 mm, 0.127433 deg

Using sm errors (std dev): 8.23999 mm, 6.61787 mm, 0.127433 deg

Uncertainty r\_L = 1.75284 mm Uncertainty r\_R = 1.76819 mm

Uncertainty axle = 6.48089 mm Uncertainty l\_x = 12.2561 mm

Uncertainty l\_y = 14.12 mm Uncertainty l\_th = 0.634354 deg

output: { "axle": 0.52924, "l\_diam": 0.298356, "r\_diam": 0.304413, "l\_x": 0.545836, "l\_y": -0.259942, "l\_theta": -0.639937, "E\_d": 1.0203 }

### file4\_2

Estimated sm errors (std dev): 7.76861 mm, 5.2738 mm, 0.143393 deg

Using sm errors (std dev): 7.76861 mm, 5.2738 mm, 0.143393 deg

Uncertainty r\_L = 1.54487 mm Uncertainty r\_R = 1.55013 mm

Uncertainty axle = 5.77214 mm Uncertainty l\_x = 9.94107 mm

Uncertainty l\_y = 11.8529 mm Uncertainty l\_th = 0.502883 deg

output: { "axle": 0.555635, "l\_diam": 0.318402, "r\_diam": 0.324372, "l\_x": 0.569094, "l\_y": -0.215843, "l\_theta": -0.634881, "E\_d": 1.01875 }

### file5\_1

Estimated sm errors (std dev): 10.8939 mm, 9.17431 mm, 0.211245 deg

Using sm errors (std dev): 10.8939 mm, 9.17431 mm, 0.211245 deg

Uncertainty r\_L = 2.48459 mm Uncertainty r\_R = 2.44572 mm

Uncertainty axle = 9.48406 mm Uncertainty l\_x = 16.8256 mm

Uncertainty l\_y = 18.2382 mm Uncertainty l\_th = 0.90397 deg

output: { "axle": 0.556692, "l\_diam": 0.302085, "r\_diam": 0.303633, "l\_x": 0.571876, "l\_y": -0.300059, "l\_theta": -0.648314, "E\_d": 1.00512"

## file5\_2

Estimated sm errors (std dev): 13.4262 mm, 11.5719 mm, 0.176115 deg

Using sm errors (std dev): 13.4262 mm, 11.5719 mm, 0.176115 deg

Uncertainty r\_L = 3.88127 mm Uncertainty r\_R = 3.88179 mm

Uncertainty axle = 14.4324 mm Uncertainty l\_x = 32.3145 mm

Uncertainty l\_y = 32.9797 mm Uncertainty l\_th = 1.71693 deg

output: { "axle": 0.456806, "l\_diam": 0.247567, "r\_diam": 0.249969, "l\_x": 0.587336, "l\_y": -0.369633, "l\_theta": -0.618816, "E\_d": 1.0097"

## file6\_1

Estimated sm errors (std dev): 21.7405 mm, 25.6169 mm, 0.207472 deg

Using sm errors (std dev): 21.7405 mm, 25.6169 mm, 0.207472 deg

Uncertainty r\_L = 1.18712 mm Uncertainty r\_R = 1.20115 mm

Uncertainty axle = 4.36717 mm Uncertainty l\_x = 13.5832 mm

Uncertainty l\_y = 15.1225 mm Uncertainty l\_th = 0.637723 deg

output: { "axle": 0.377616, "l\_diam": 0.208531, "r\_diam": 0.211334, "l\_x": 0.523303, "l\_y": -0.187701, "l\_theta": -0.860763, "E\_d": 1.01344"

## file6\_2

Estimated sm errors (std dev): 23.2668 mm, 27.8845 mm, 0.202291 deg

Using sm errors (std dev): 23.2668 mm, 27.8845 mm, 0.202291 deg

Uncertainty r\_L = 1.25012 mm Uncertainty r\_R = 1.26274 mm

Uncertainty axle = 4.6206 mm Uncertainty l\_x = 15.893 mm

Uncertainty l\_y = 17.0574 mm Uncertainty l\_th = 0.63304 deg

output: { "axle": 0.397362, "l\_diam": 0.218751, "r\_diam": 0.221375, "l\_x": 0.436884, "l\_y": -0.259379, "l\_theta": -0.880708, "E\_d": 1.01199"

## file6\_3

Estimated sm errors (std dev): 19.5111 mm, 20.5028 mm, 0.202758 deg

Using sm errors (std dev): 19.5111 mm, 20.5028 mm, 0.202758 deg

Uncertainty r\_L = 1.081 mm Uncertainty r\_R = 1.10846 mm

Uncertainty axle = 3.99912 mm Uncertainty l\_x = 7.92416 mm

Uncertainty l\_y = 9.38992 mm Uncertainty l\_th = 0.45172 deg

output: { "axle": 0.496023, "l\_diam": -0.272914, "r\_diam": -0.279357, "l\_x": -0.547596, "l\_y": 0.114664, "l\_theta": 2.25782, "E\_d": 1.02361"

## file7

Matrix A is almost singular (condition number: 165.237928). Not very exciting data!

## file8

Estimated sm errors (std dev): 3.72 mm, 4.16214 mm, 0.19024 deg  
Using sm errors (std dev): 3.72 mm, 4.16214 mm, 0.19024 deg  
Uncertainty r\_L = 0.434396 mm Uncertainty r\_R = 0.487592 mm  
Uncertainty axle = 1.99358 mm Uncertainty l\_x = 2.63274 mm  
Uncertainty l\_y = 2.92678 mm Uncertainty l\_th = 0.162831 deg  
output: { "axle": 0.610791, "l\_diam": -0.335308, "r\_diam": -0.343344, "l\_x": -0.568793, "l\_y": 0.238938, "l\_theta": 2.27464, "E\_d": 1.02397"

## file9

Estimated sm errors (std dev): 2.57156 mm, 3.09586 mm, 0.268385 deg  
Using sm errors (std dev): 2.57156 mm, 3.09586 mm, 0.268385 deg  
Uncertainty r\_L = 3.43417 mm Uncertainty r\_R = 5.72359 mm  
Uncertainty axle = 15.201 mm Uncertainty l\_x = 6.43149 mm  
Uncertainty l\_y = 21.1346 mm Uncertainty l\_th = 1.71288 deg  
output: { "axle": 0.633128, "l\_diam": -0.319138, "r\_diam": -0.387821, "l\_x": -0.603422, "l\_y": 0.25519, "l\_theta": 2.31648, "E\_d": 1.21522"

## file10

Estimated sm errors (std dev): 4.81829 mm, 5.34455 mm, 0.22371 deg  
Using sm errors (std dev): 4.81829 mm, 5.34455 mm, 0.22371 deg  
Uncertainty r\_L = 0.497858 mm Uncertainty r\_R = 0.555372 mm  
Uncertainty axle = 2.11181 mm Uncertainty l\_x = 2.4716 mm  
Uncertainty l\_y = 2.98951 mm Uncertainty l\_th = 0.18527 deg  
output: { "axle": 0.609109, "l\_diam": -0.333842, "r\_diam": -0.344119, "l\_x": -0.577318, "l\_y": 0.242567, "l\_theta": 2.27661, "E\_d": 1.03078"

## file11

Matrix A is almost singular (condition number: 78.925005). Not very exciting data!

## file12

Matrix A is almost singular (condition number: 80.385819). Not very exciting data!

## file13

Estimated sm errors (std dev): 19.5173 mm, 21.5588 mm, 0.151159 deg  
Using sm errors (std dev): 19.5173 mm, 21.5588 mm, 0.151159 deg  
Uncertainty r\_L = 1.30662 mm Uncertainty r\_R = 1.32856 mm  
Uncertainty axle = 4.72367 mm Uncertainty l\_x = 18.688 mm  
Uncertainty l\_y = 26.7366 mm Uncertainty l\_th = 1.97475 deg  
output: { "axle": 0.134523, "l\_diam": 0.0745873, "r\_diam": 0.0758462, "l\_x": 0.547879, "l\_y": -0.0400969, "l\_theta": -0.880867, "E\_d": 1.01688"

## file14

Estimated sm errors (std dev): 28.6866 mm, 32.8789 mm, 0.337057 deg  
Using sm errors (std dev): 28.6866 mm, 32.8789 mm, 0.337057 deg  
Uncertainty r\_L = 5.07285 mm Uncertainty r\_R = 5.13298 mm  
Uncertainty axle = 20.9206 mm Uncertainty l\_x = 90.6941 mm  
Uncertainty l\_y = 109.169 mm Uncertainty l\_th = 6.06893 deg  
output: { "axle": 0.199169, "l\_diam": 0.0978559, "r\_diam": 0.0990229, "l\_x": 0.598118, "l\_y":  
-0.00897175, "l\_theta": -0.731955, "E\_d": 1.01193"

## file15

Estimated sm errors (std dev): 34.6378 mm, 40.7241 mm, 0.299139 deg  
Using sm errors (std dev): 34.6378 mm, 40.7241 mm, 0.299139 deg  
Uncertainty r\_L = 1.0896 mm Uncertainty r\_R = 1.11358 mm  
Uncertainty axle = 3.98672 mm Uncertainty l\_x = 8.90219 mm  
Uncertainty l\_y = 9.98589 mm Uncertainty l\_th = 0.589479 deg  
output: { "axle": 0.376749, "l\_diam": -0.207311, "r\_diam": -0.211773, "l\_x": -0.404026, "l\_y":  
0.0675245, "l\_theta": 2.28305, "E\_d": 1.02152"

## file16

Estimated sm errors (std dev): 39.1209 mm, 37.7942 mm, 0.357757 deg  
Using sm errors (std dev): 39.1209 mm, 37.7942 mm, 0.357757 deg  
Uncertainty r\_L = 1.04204 mm Uncertainty r\_R = 1.06667 mm  
Uncertainty axle = 3.82311 mm Uncertainty l\_x = 7.90745 mm  
Uncertainty l\_y = 9.12013 mm Uncertainty l\_th = 0.599903 deg  
output: { "axle": 0.366489, "l\_diam": -0.201208, "r\_diam": -0.205643, "l\_x": -0.481143, "l\_y":  
0.161495, "l\_theta": 2.24665, "E\_d": 1.02204"

## file17

Estimated sm errors (std dev): 3.05098 mm, 4.0011 mm, 0.244856 deg  
Using sm errors (std dev): 3.05098 mm, 4.0011 mm, 0.244856 deg  
Uncertainty r\_L = 0.161336 mm Uncertainty r\_R = 0.136458 mm  
Uncertainty axle = 0.74004 mm Uncertainty l\_x = 0.860507 mm  
Uncertainty l\_y = 0.978849 mm Uncertainty l\_th = 0.0531869 deg  
output: { "axle": 0.622354, "l\_diam": 0.344438, "r\_diam": 0.347275, "l\_x": 0.575348, "l\_y": -  
0.250785, "l\_theta": -0.895366, "E\_d": 1.00824"

## file18

Estimated sm errors (std dev): 2.93501 mm, 4.34824 mm, 0.248884 deg  
Using sm errors (std dev): 2.93501 mm, 4.34824 mm, 0.248884 deg  
Uncertainty r\_L = 0.239502 mm Uncertainty r\_R = 0.203315 mm  
Uncertainty axle = 1.03251 mm Uncertainty l\_x = 1.25472 mm  
Uncertainty l\_y = 1.34623 mm Uncertainty l\_th = 0.0772147 deg

output: { "axle": 0.625942, "l\_diam": 0.344974, "r\_diam": 0.347146, "l\_x": 0.579772, "l\_y": -0.255192, "l\_theta": -0.895045, "E\_d": 1.0063"

## file19

Estimated sm errors (std dev): 2.6643 mm, 3.53361 mm, 0.206749 deg

Using sm errors (std dev): 2.6643 mm, 3.53361 mm, 0.206749 deg

Uncertainty r\_L = 0.146697 mm Uncertainty r\_R = 0.179877 mm

Uncertainty axle = 0.775173 mm Uncertainty l\_x = 0.93913 mm

Uncertainty l\_y = 1.0267 mm Uncertainty l\_th = 0.0575309 deg

output: { "axle": 0.635289, "l\_diam": -0.343261, "r\_diam": -0.354371, "l\_x": -0.600651, "l\_y": 0.258241, "l\_theta": 2.24912, "E\_d": 1.03237"

## file20

Estimated sm errors (std dev): 2.28065 mm, 2.91659 mm, 0.193293 deg

Using sm errors (std dev): 2.28065 mm, 2.91659 mm, 0.193293 deg

Uncertainty r\_L = 0.130353 mm Uncertainty r\_R = 0.105394 mm

Uncertainty axle = 0.55876 mm Uncertainty l\_x = 0.657003 mm

Uncertainty l\_y = 0.704861 mm Uncertainty l\_th = 0.0458551 deg

output: { "axle": 0.617839, "l\_diam": 0.34262, "r\_diam": 0.34676, "l\_x": 0.550098, "l\_y": -0.258158, "l\_theta": -0.626756, "E\_d": 1.01208"

## file21

Estimated sm errors (std dev): 2.88339 mm, 3.34645 mm, 0.226113 deg

Using sm errors (std dev): 2.88339 mm, 3.34645 mm, 0.226113 deg

Uncertainty r\_L = 0.0936329 mm Uncertainty r\_R = 0.0765022 mm Uncertainty axle = 0.418313 mm Uncertainty l\_x = 0.481852 mm

Uncertainty l\_y = 0.546607 mm Uncertainty l\_th = 0.033097 deg

output: { "axle": 0.622257, "l\_diam": 0.345003, "r\_diam": 0.347835, "l\_x": 0.581623, "l\_y": -0.253778, "l\_theta": -0.611184, "E\_d": 1.00821"

## file22

Estimated sm errors (std dev): 2.86562 mm, 3.5002 mm, 0.215616 deg

Using sm errors (std dev): 2.86562 mm, 3.5002 mm, 0.215616 deg

Uncertainty r\_L = 0.126155 mm Uncertainty r\_R = 0.105237 mm

Uncertainty axle = 0.563359 mm Uncertainty l\_x = 0.697022 mm

Uncertainty l\_y = 0.729268 mm Uncertainty l\_th = 0.0439647 deg

output: { "axle": 0.621448, "l\_diam": 0.344962, "r\_diam": 0.347705, "l\_x": 0.54373, "l\_y": -0.252968, "l\_theta": -0.628529, "E\_d": 1.00795"

## file23

Estimated sm errors (std dev): 2.52429 mm, 2.95301 mm, 0.14548 deg

Using sm errors (std dev): 2.52429 mm, 2.95301 mm, 0.14548 deg

Uncertainty r\_L = 0.238934 mm Uncertainty r\_R = 0.213914 mm  
Uncertainty axle = 1.04577 mm Uncertainty l\_x = 1.66769 mm  
Uncertainty l\_y = 1.60328 mm Uncertainty l\_th = 0.0841296 deg  
output: { "axle": 0.598063, "l\_diam": 0.342015, "r\_diam": 0.345909, "l\_x": 0.577947, "l\_y": -  
0.255525, "l\_theta": -0.638644, "E\_d": 1.01139"

## file24

Estimated sm errors (std dev): 2.58437 mm, 2.98623 mm, 0.178207 deg  
Using sm errors (std dev): 2.58437 mm, 2.98623 mm, 0.178207 deg  
Uncertainty r\_L = 0.190946 mm Uncertainty r\_R = 0.164591 mm  
Uncertainty axle = 0.947808 mm Uncertainty l\_x = 1.19488 mm  
Uncertainty l\_y = 1.32327 mm Uncertainty l\_th = 0.0684996 deg  
output: { "axle": 0.608295, "l\_diam": 0.337431, "r\_diam": 0.34267, "l\_x": 0.580062, "l\_y": -  
0.250037, "l\_theta": -0.631571, "E\_d": 1.01552"

## file25

Estimated sm errors (std dev): 13.4092 mm, 10.6162 mm, 0.283545 deg  
Using sm errors (std dev): 13.4092 mm, 10.6162 mm, 0.283545 deg  
Uncertainty r\_L = 1.2654 mm Uncertainty r\_R = 1.25851 mm  
Uncertainty axle = 4.85084 mm Uncertainty l\_x = 9.29468 mm  
Uncertainty l\_y = 10.5414 mm Uncertainty l\_th = 0.518425 deg  
output: { "axle": 0.482085, "l\_diam": 0.266483, "r\_diam": 0.270555, "l\_x": 0.560567, "l\_y": -  
0.275626, "l\_theta": -0.660581, "E\_d": 1.01528"

## Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Zelfkalibratie van laserscannerpose en odometrieparameters voor mobiele robots met magnetische wiel-encoders**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-automatisering**

Jaar: **2015**

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,

**Gijsen, Pieter**

**Janssen, Gertjan**

Datum: **16/01/2015**