

DELFT, UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

BACHELOR EINDPROJECT (BEP)

EE3L11

Zebro Drive System

Auteurs:

Hans Keur, 4223292

Roel Mouris, 4243404

Begeleiders:

Dr. Ir. Chris Verhoeven

Maneesh Kumar Verma

15 juli 2015



Inhoudsopgave

1	Introductie	3
1.1	Projectdoel	4
1.2	Structuur	4
1.3	Dankbetuiging	4
2	Keuze van de aandrijving	5
3	Pootsimulatie	6
3.1	Krachten op poot ($\alpha \leq \frac{\pi}{2}$)	6
3.2	Krachten op poot ($\alpha > \frac{\pi}{2}$)	8
3.3	Zwaartekrachtwerking op de poten	8
3.4	Het elektrisch domein	10
3.5	Resultaten	12
3.6	Conclusie	13
3.7	Discussie	13
4	De Motor	15
4.1	Brushed versus brushless DC	15
4.2	Gekozen motor	16
4.3	Transmissietype	16
4.4	Gekozen transmissie	17
5	Motor Controller	18
5.1	Eisen	18
5.2	Ontwerpmogelijkheden	18
5.3	Hardware	18
5.3.1	Taken	18
5.3.2	Keuze microcontroller	19
5.3.3	Schakelschema	20
5.3.4	Printontwerp	21
5.4	Software	22
6	Motorbehuizing	23
7	Algoritmebeschrijving	24
8	Communicatie tussen motormodules en BPU	25
8.1	Communicatieprotocol	25
8.2	Communicatiesnelheid	25
9	Testplan aandrijving	27
9.1	Testbasis	27
9.2	Wat wordt getest?	27
9.3	Wat wordt niet getest?	27
9.4	Aanpak	27
9.5	Testgevallen	27
9.6	Slagingscriteria	29
9.7	Testproducten	29
9.8	Testomgeving	29
9.9	Randvoorwaarden	30
9.10	Schattingen	30
9.11	Risico's	30

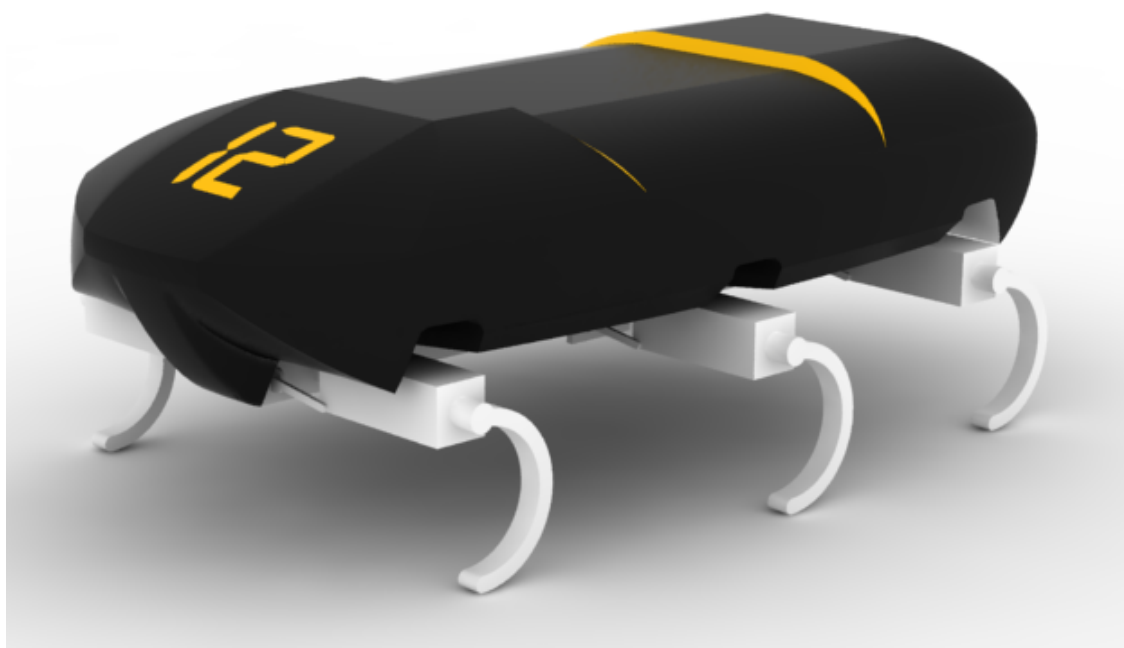
10 Testplan driver	31
10.1 Testbasis	31
10.2 Wat wordt getest?	31
10.3 Wat wordt niet getest?	31
10.4 Aanpak	31
10.5 Testgevallen	32
10.6 Slagingscriteria	33
10.7 Testproducten	34
10.8 Testomgeving	34
10.9 Randvoorwaarden	34
10.10 Schattingen	34
10.11 Risico's	35
11 Toekomst	36
11.1 Motoren met wormwieloverbrenging	36
11.2 Andere poten	36
11.3 Controlesysteem uitbreiden	36
A Lijst van gebruikte afkortingen	37
B Flowchart van scheduler op BPU	37
C Flowchart van driver	38

EUROPEAN ROVER CHALLENGE 2015

1 Introductie

Dit jaar wordt er in Polen een Europese rover wedstrijd gehouden: de European Rover Challenge (ERC) 2015¹. Voor deze wedstrijd dient een Mars rover equivalent gebouwd te worden die verschillende taken kan uitvoeren, zoals het nemen van grondmonsters, het vervoeren daarvan en het instellen en in werking stellen van een reactor. Vanuit het Robotics Institute van de TU Delft is een multi-disciplinair team bereid gevonden om deze uitdaging aan te gaan. In dit document wordt de aandrijving van de robot beschreven.

De naam van de Mars rover waar dit team aan werkt is 'Zebro Explorer' (zie figuur 1). Zebro staat voor Zesbenige robot. De Zebro Explorer is gebaseerd op het Zebro project[18] aan de TU Delft, wat op zijn beurt is gebaseerd op het RHex platform[3]. Dit RHex platform is een robotprogramma dat is bedacht en gefinancierd door het DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), een agentschap van de Verenigde Staten van Amerika dat nieuwe technologieën ontwikkelt voor militaire doeleinden[5]. Dit programma is bedacht om de wiskundige theorieën van dynamische systemen over te brengen op de bewegingen van dieren en aan de andere kant juist inspiratie uit het dierenleven te gebruiken om betere robots te kunnen maken. Er hebben in totaal zes universiteiten meegewerkt aan het ontwikkelen van allerlei dynamische systemen voor de robot. Zo kan RHex inmiddels onder andere traplopen[9], hellingen beklimmen tot 45 graden[1], op twee poten lopen[20], zwemmen[4], rennen[23] en springen[2].



Figuur 1: Een illustratie van het huidige ontwerp van de Zebro Explorer (18 juni 2015).

¹www.roverchallenge.eu

De ontwikkelingen bij het Zebro project aan de TU Delft zijn er vooral op gericht om de poten zo goed mogelijk te laten samenwerken. Zo hebben zij bijvoorbeeld een algoritme ontwikkeld dat de poten synchroniseert, zodat een constante versnelling gerealiseerd kan worden[12].

1.1 Projectdoel

Het hoofddoel van dit projectonderdeel is om een werkend aandrijfsysteem te maken. Dit is nodig om de robot voort te bewegen met voldoende kracht en snelheid. Om een goed aandrijfsysteem te maken zal een motor gekozen moeten worden en daar moet een bijbehorende motorbesturing voor komen, zowel een elektronisch circuit als de regelsoftware. Het algoritme stuurt de poten aan. Een extra doel is om de robot zoveel mogelijk modulair te maken, zodat in opvolgende jaren niet het hele systeem opnieuw ontworpen hoeft te worden. De motormodules moeten bijvoorbeeld makkelijk verwisseld kunnen worden.

1.2 Structuur

Allereerst wordt een overzicht gegeven van de verschillende aandrijftypes die overwogen zijn om te gebruiken (sectie 2). Er is een computersimulatie gemaakt (sectie 3) om de gekozen aandrijving te simuleren, zodanig dat aan de hand daarvan de benodigde koppel en snelheid te bepalen is voor de motoren (sectie 4). De beschrijving van de daarbij ontworpen motor controller is te vinden in sectie 5, welke aangestuurd wordt middels een speciaal algoritme (zie sectie 7). Vervolgens wordt een toelichting gegeven over de data die over en weer gaat tussen de motormodules en de Backbone Processing Unit (BPU). Om de motoren met aansturing tezamen te testen, is een testplan opgesteld (zie secties 9 en 10). Ter afsluiting worden in sectie 11 suggesties gegeven voor toekomstige Zebro's.

1.3 Dankbetuiging

Bij deze willen wij ook graag onze studentbegeleider Maneesh Kumar Verma en docentbegeleider Chris Verhoeven bedanken voor de begeleiding tijdens het project, alsook Marco Spirito en Jorge Martinez voor de feedback op ons verslag.

2 Keuze van de aandrijving

Er zijn verschillende keuzes te maken voor de manier van aandrijven van de robot. Het makkelijkste zou zijn om wielen te gebruiken. Dan zouden echter veel meer obstakels ontweken moeten worden waar met poten overheen te lopen is. Met RHex is bewezen dat dit soort robot over obstakels kan komen die ongeveer tweemaal zo hoog zijn als de poot[3]. Wielen kunnen over obstakels heen die niet hoger zijn dan de straal van het wiel. Voor rupsbanden geldt dit in principe ook, al is het mogelijk om met verschillende configuraties over hogere obstakels te komen[16]. Rupsbanden bestaan daarnaast uit meer en grotere onderdelen, waardoor er meer kapot kan gaan en het gewicht ook hoger is. Wielen zijn al volledig uitontwikkeld en bovendien gebruiken al de andere teams bij de wedstrijd ook wielen. Poten zijn nog niet uitontwikkeld en vormen dus een mooi onderzoekproject. Het bekijken van de mogelijkheden van poten zou kunnen leiden tot nieuwe inzichten en ontwikkelingen. Dit is de voornaamste reden om de poten te kiezen. Zoals in de inleiding genoemd is zijn er gerelateerde projecten waarover publicaties verschenen zijn die goed bruikbaar zijn voor de Zebro. Het inslaan van deze weg leidt tot nieuwe ontdekkingen, wat weer kan leiden tot nieuwe inzichten. Ook zijn eenvoud van het ontwerp en het lage gewicht voordelen van deze vorm van aandrijving. Het gebruik van poten lijkt dus de beste oplossing. Zie voor verdere informatie in de literatuurstudie[14].

Voor dit project zijn twee soorten poten in overweging genomen. C-vormige poten, zoals ook bij de RHex en het Zebro project te zien zijn en als tweede optie poten volgens het Strandbeest mechanisme[15]. Binnen het project werd het idee van het gebruik van het Strandbeest al uitgewerkt, maar omdat dit mechanisme een moeilijke constructie heeft en er nog maar weinig tijd is voordat de wedstrijd begint, is er gekozen om deze poten als optie te laten om eventueel in de toekomst te gebruiken. Dit jaar zal dus gebruik gemaakt worden van C-vormige poten, omdat het onderzoek dat gedaan is aan het Zebro project en de RHex te gebruiken is, zoals een loopalgoritme.

Vanwege een verbeterde stabiliteit is gekozen voor zes poten en niet voor vier. Deze worden zo aangestuurd dat er altijd minstens drie poten op de grond staan. Op deze manier is er geen complex controle systeem nodig om de robot op zijn poten te houden. Meer dan zes poten zou zorgen voor verder verbeterde stabiliteit, maar zou ook het gewicht verhogen.

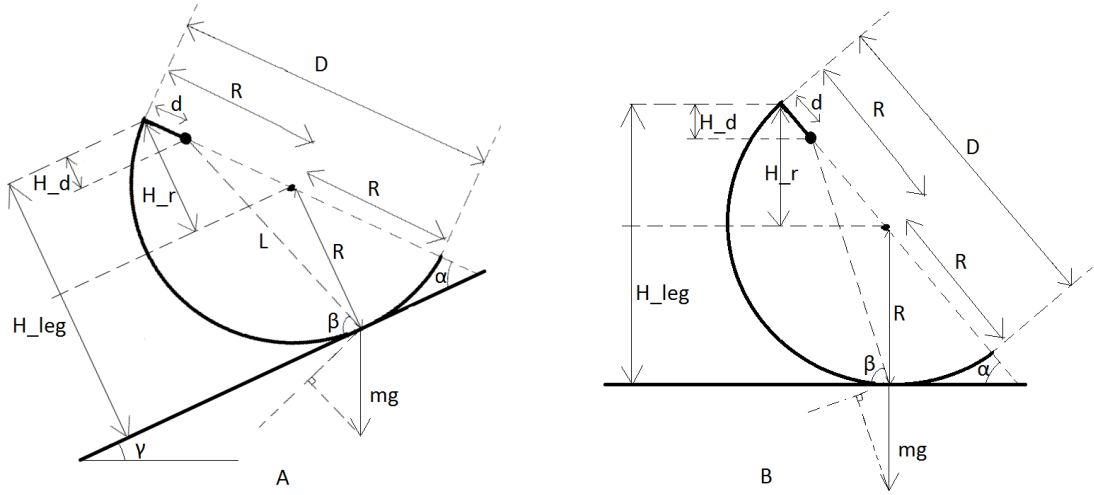
3 Pootsimulatie

In MATLAB is een simulatie gemaakt van het gedrag van de motor tijdens het lopen van de Zebro. Hieruit is de motorsnelheid te bepalen en de gemiddelde en maximale koppel die de motor dient te leveren. Ook kan het verbruikte elektrische vermogen worden berekend en daarmee de minimale batterijgrootte. Er zijn instelbare robotspecificaties gebruikt zoals pootlengte, gewicht van de Zebro en de staplengte. De rotatiesnelheid wordt berekend uit de stapgrootte, de afstand die afgelegd moet worden en de tijd die beschikbaar is om die afstand af te leggen. De stapgrootte hangt af van de pootgrootte en hoe ver de Zebro door zijn poten zakt. Bij de simulaties is er vanuit gegaan dat de poten oneindig stijf zijn en dus geen elasticiteit of veerkracht hebben. De verticale bewegingen van het chassis zijn niet meegenomen in de simulatie.

Voor het berekenen van de koppel die de motor moet leveren worden verschillende situaties onderscheiden. Wanneer de poot op de grond terecht komt, dat is op het gekromde deel van de poot, dan is de zogenoemde armlengte die de koppel bepaalt afhankelijk van de hoek die de poot maakt met de grond (situatie 1). Dit geldt totdat de poot haaks staat ten opzichte van de robot. Daarna is de armlengte gelijk aan $D - d$ (situatie 2).

3.1 Krachten op poot ($\alpha \leq \frac{\pi}{2}$)

De krachten op de poten wanneer deze neerkomen op de grond zijn bepaald aan de hand van de schetsen in figuur 2. De hoek α is de hoek die de poot maakt met de grond. In situatie 1 komt de poot op de grond terecht ($\alpha = \alpha_{hg}$) en draait totdat de poot loodrecht op de grond staat ($\alpha = \frac{\pi}{2}$).



Figuur 2: Schematische weergave van de C-vormige poot op een helling die een hoek γ maakt met de horizon (A) en zonder helling ($\gamma = 0$) (B).

Er geldt voor de hoogte (ten opzichte van de grond of helling) van een van de uiteinden van de poot bij het draaipunt [m]:

$$H_{leg} = R(1 + \sin \alpha) \quad (1)$$

$$H_d = d \sin \alpha \quad (2)$$

De afstand H [m] tussen de grond en het draaipunt wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} H &= H_{leg} - H_d \\ &= R + (R - d) \sin \alpha \\ &= L \sin \beta \end{aligned} \quad (3)$$

De kracht op de poot F_{t1} [N] loodrecht op de arm is gelijk aan:

$$\begin{aligned} F_{t1} &= m_c g \cos(\beta - \gamma) \\ &= mg \frac{R - d}{3L} \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

waar m_c de massa is die één poot moet dragen [kg], m is massa van de robot [kg] en g de gemiddelde gravitatieversnelling op aarde ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Omdat drie poten tegelijk op de grond zijn, is de massa die één poot draagt (ongeveer) $\frac{1}{3}$ van de totale massa. Met vergelijking 4 is β uit te drukken in α , maar L moet ook uitgedrukt worden in α . Eenvoudiger is om het volgende te gebruiken:

$$L \cos \beta = (R - d) \cos \alpha = \frac{H}{\tan \beta} \quad (5)$$

Door vergelijkingen 3 en 5 samen te nemen en β [rad] te elimineren, verkrijgt men:

$$\beta = \arctan \left[\frac{R}{(R - d) \cos \alpha} + \tan \alpha \right] \quad (6)$$

De armlengte L [m] is met de stelling van Pythagoras te berekenen als:

$$\begin{aligned} L &= \sqrt{(R - d)^2 \cos^2 \alpha + H^2} \\ &= \sqrt{(R - d)^2 \cos^2 \alpha + [R + (R - d) \sin \alpha]^2} \\ &= \sqrt{(R - d)^2 + R^2 + 2R(R - d) \sin \alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

De koppel τ_1 [Nm] is gelijk aan:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= |\mathbf{L} \times \mathbf{F}_{t1}| \\ &= \frac{1}{3} mg L \cos(\beta - \gamma) \end{aligned} \quad (8)$$

Door vergelijkingen 6 en 7 te substitueren in vergelijking 8 wordt de resulterende koppel (τ_1):

$$\tau_1 = \frac{1}{3} mg \sqrt{(R - d)^2 + R^2 + 2R(R - d) \sin \alpha} \cos \left\{ \arctan \left[\frac{R}{(R - d) \cos \alpha} + \tan \alpha \right] - \gamma \right\} \quad (9)$$

Verschillende speciale gevallen zullen aangestipt worden. Indien $d = 0$, dan wordt de vergelijking:

$$\tau_1 = \frac{1}{3} mg R \sqrt{2(1 + \sin \alpha)} \cos \left[\arctan \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \tan \alpha \right) - \gamma \right] \quad (10)$$

Indien γ gelijk is aan 0, dan vereenvoudigt deze vergelijking tot:

$$\tau_1 = \frac{1}{3} mg (R - d) \cos(\alpha) \quad (11)$$

Indien geldt dat de poot loodrecht op de Zebro staat, dan is $\alpha = \frac{\pi}{2}$ rad en geldt in vergelijking 8 dat $L = R - d$ en $\beta = \alpha = \frac{\pi}{2}$ rad, dus vereenvoudigt vergelijking 9 tot het volgende:

$$\tau_1 = \frac{1}{3} mg (D - d) \cos(\alpha - \gamma) \quad (12)$$

3.2 Krachten op poot ($\alpha > \frac{\pi}{2}$)

Wanneer de hoek van de poot ten opzichte van de grond groter wordt dan $\frac{\pi}{2}$ rad (situatie 2), dan is de armlengte L gelijk aan $D - d$. De hoogte H_{leg} [m] (zie figuur 2) is:

$$H_{leg} = D \sin \alpha \quad (13)$$

Door vergelijking 2 van 13 af te trekken, verkrijgt men de afstand H tot het draaipunt [m]:

$$H = H_{leg} - H_d = (D - d) \sin \alpha \quad (14)$$

De kracht F_{t2} [N] op de poot loodrecht op de arm is gelijk aan:

$$F_{t2} = \frac{1}{3} mg \cos(\alpha - \gamma) \quad (15)$$

De resulterende koppel τ_2 [Nm] is dan:

$$\begin{aligned} \tau_2 &= |(\mathbf{D} - \mathbf{d}) \times \mathbf{F}_{t2}| \\ &= \frac{1}{3} mg(D - d) \cos(\alpha - \gamma) \end{aligned} \quad (16)$$

3.3 Zwaartekrachtwerking op de poten

De robotpoten hebben een zekere massa. Die massa is bij benadering gelijk aan:

$$m_{leg} = \rho V \quad (17)$$

waar m_{leg} de massa van de poot is [kg], ρ de materiaaldichtheid (kg/m^3) en V het volume van de poot (m^3). Wanneer men er vanuit gaat dat de poot de vorm heeft van een ideale cirkelboog en bestaat uit één uniform materiaal, dan geldt het volgende voor het volume van de poot:

$$V = w \frac{\pi}{2} [R^2 - (R - t)^2] = wt \frac{\pi}{2} (D - t) \quad (18)$$

waar R de straal [m] en D de diameter [m] is van de cirkelboog (zie figuur 2), t is de pootdikte [m] en w is de pootbreedte [m]. Hierbij is de massa van het bevestigingsstukje van de poot met het draaipunt niet meegenomen. Door vergelijking 18 te substitueren in 17, wordt de massa van de poot:

$$m_{leg} = \rho wt \frac{\pi}{2} (D - t) \quad (19)$$

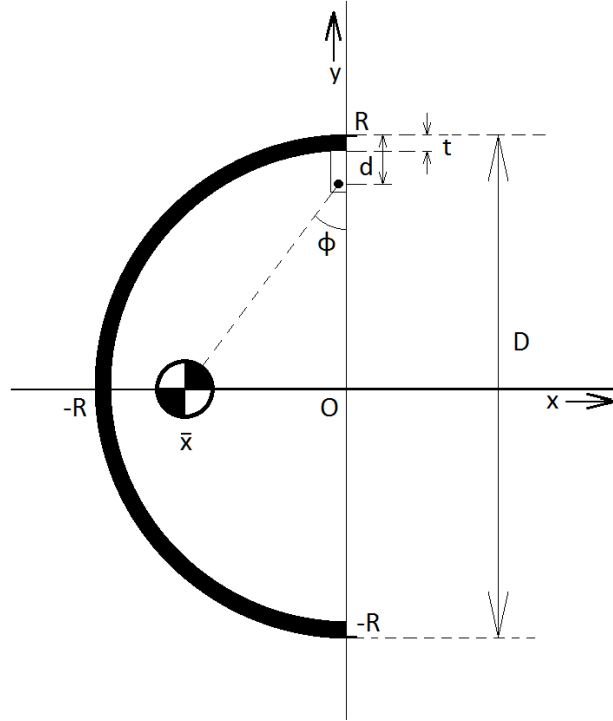
De poot zal gemaakt worden van koolstof composiet, wat een dichtheid heeft van ongeveer $1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ [8]. De afmetingen voor de poot die gebruikt zijn in de simulatie zijn weergegeven in tabel 1.

Deze pootafmetingen resulteren in een pootmassa van $m_{leg} = 114g$. Om de pootmassa mee te nemen in de berekening voor de vereiste koppel van de motor, is het nodig om het massamiddelpunt te berekenen van de poot. Vanwege de symmetrie van de poot geldt voor de y-coördinaat van het massamiddelpunt $\bar{y} = 0$. Voor de x-coördinaat $\bar{x}$ [m] geldt:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{A} \int x dA \\ &= \frac{1}{\pi [R^2 - (R - t)^2]} \int_{\theta=\pi/2}^{3/2\pi} \int_{r=R-t}^R \cos(\theta) r^2 dr d\theta \\ &= -\frac{4}{3\pi} \frac{R^3 - (R - t)^3}{R^2 - (R - t)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

Variabele	Waarde
D [cm]	30
R [cm]	15
t [mm]	10
w [mm]	16
d [mm]	15

Tabel 1: De pootafmetingen, zie voor de symbolen figuur 2.



Figuur 3: Een schets van de poot met het massamiddelpunt en een symbolische weergave van de afmetingen.

N.B. $x = r \cos \theta$. A is hier de oppervlakte van de zijkant van de poot waar tegenaan gekeken wordt in de figuur. Deze uitdrukking is te herschrijven tot:

$$\bar{x} = -\frac{4}{3\pi} \frac{3R^2 - 3Rt + t^2}{2R - t} \quad (21)$$

De vereiste koppel τ_g ten gevolge van de zwaartekracht is gelijk aan:

$$\tau_g = |\mathbf{r} \times \mathbf{F}| = m_{leg} g (D - d) \cos(\phi) \cos(\alpha + \phi) \quad (22)$$

waar de hoek ϕ (zie figuur 3) gelijk is aan:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\bar{x}}{R - d}\right) \quad (23)$$

$$= \arctan\left[\frac{4}{3\pi} \frac{3R^2 + 3Rt - t^2}{(2R - t)(R - d)}\right] \quad (24)$$

De vergelijkingen 9, 16 en 22 geven voor de totale koppel:

$$\tau = \begin{cases} \tau_1 + \tau_g & \text{als } \alpha_{hg} \leq \alpha < \pi/2 \\ \tau_2 + \tau_g & \text{als } \pi/2 \leq \alpha \leq \alpha_{lg} \\ \tau_g & \text{anders} \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{1}{3}mg(R-d) \cos \alpha + m_{leg}g(D-d) \cos(\phi) \cos(\alpha + \phi) & \text{als } \alpha_{hg} \leq \alpha < \frac{\pi}{2} \\ g(D-d) \left[\frac{1}{3}m \cos \alpha + m_{leg} \cos(\phi) \cos(\alpha + \phi) \right] & \text{als } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \alpha_{lg} \\ m_{leg}g(D-d) \cos(\phi) \cos(\alpha + \phi) & \text{anders} \end{cases} \quad (25)$$

3.4 Het elektrisch domein

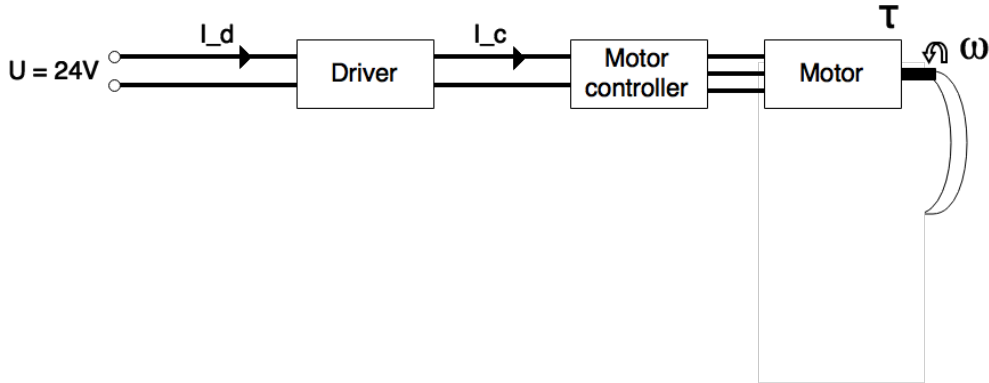
De driver houdt het totale stroomverbruik van de motormodule en motor bij. Deze stroom kan een indicatie geven van de omstandigheden waarin de poot zich verkeert, bijvoorbeeld of deze stilstaat. Het vereiste uitgangsvermogen (P) van de motor is gelijk aan:

$$P_{m,out} = \tau\omega \quad (26)$$

Hierin is τ de vereiste motor koppel [Nm] en ω de hoeksnelheid van de motor [rad/s]. Het geleverde vermogen aan de driver is gelijk aan:

$$P_{d,in} = UI_d \quad (27)$$

waar U de voedingsspanning is van de motor driver en I_d is de stroom die naar de driver gaat (zie figuur 4) [A].



Figuur 4: Dit is een overzicht van de motormodule. Deze bestaat uit de motor met de poot (rechts), die aangestuurd wordt door de driver (links) en motor controller (midden).

De stroom I_d zal ongeveer gelijk zijn aan I_c , omdat het vermogensverbruik van de driver veel lager is dan die van de motoren. De stroom I_c kan gemeten worden (door de microcontroller). De netto efficiëntie η van de motor controller en de motor met transmissie is:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{c,in}} \\ &= \frac{\tau_{leg}\omega_{leg}}{UI_c} \\ &= \frac{\pi\tau_{leg}N_{rpm}}{30UI_d} \end{aligned} \quad (28)$$

Hier is N_{rpm} de rotatiesnelheid van de poot, gemeten in rotaties per minuut [rpm]. Voor een brushless direct current (BLDC) motor geldt voor de spanning U_m over de motor [V]:

$$U_m = \delta U = I_m R + U_{EMF} \quad (29)$$

dus

$$I_m = \frac{\delta U - U_{EMF}}{R} \quad (30)$$

waar δ [dimensieloos] lineair afhankelijk is van de snelheid en ligt in het interval $[0, 1]$. $\delta = 1$ betekent dat de motor moet draaien op de maximumsnelheid en bij $\delta = 0$ staat de motor stil. U is de ingangsspanning van de driver [V] en R is de interne weerstand van de motor [Ω]. U_{EMF} is de back-electromotive force (back-EMF) [V]:

$$\begin{aligned} U_{EMF} &= K_\omega \omega_m \\ &= \frac{\sqrt{2}}{1000} K_i N_{rpm} i \end{aligned} \quad (31)$$

waar K_ω de back-EMF constante is van de motor [V/rad] en K_i ook [Vrms/kRPM]. De root mean square (rms) i is de overbrengingsverhouding van de transmissie van de motor [dimensieloos]. Substitutie van vergelijking 31 in 30 geeft:

$$I_m = \frac{1000\delta U - \sqrt{2}K_i N_{rpm} i}{1000R} \quad (32)$$

De resulterende koppel op de poot τ_{leg} [Nm] wordt gegeven door:

$$\tau_{leg} = K_t I_m i \quad (33)$$

waar K_t de motor koppel constante is [Nm/A]. Substitutie van deze vergelijking in vergelijking 28 geeft:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{out}}{P_{c,in}} \\ &= \frac{\tau_{leg} \omega_{leg}}{\delta U I_m} \\ &= \frac{K_t \omega_{leg}}{\delta U} \\ &= \frac{\pi N_{rpm}}{30\delta U} \end{aligned} \quad (34)$$

Het verloren vermogen dat omgezet wordt in warmte wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de interne weerstand R van de motor. Die verliezen [W] zijn gelijk aan:

$$\begin{aligned} P_{loss} &= I_m^2 R \\ &= \frac{1}{R} \left(\delta U - \frac{\sqrt{2}K_i N_{rpm}}{1000} i \right)^2 \end{aligned} \quad (35)$$

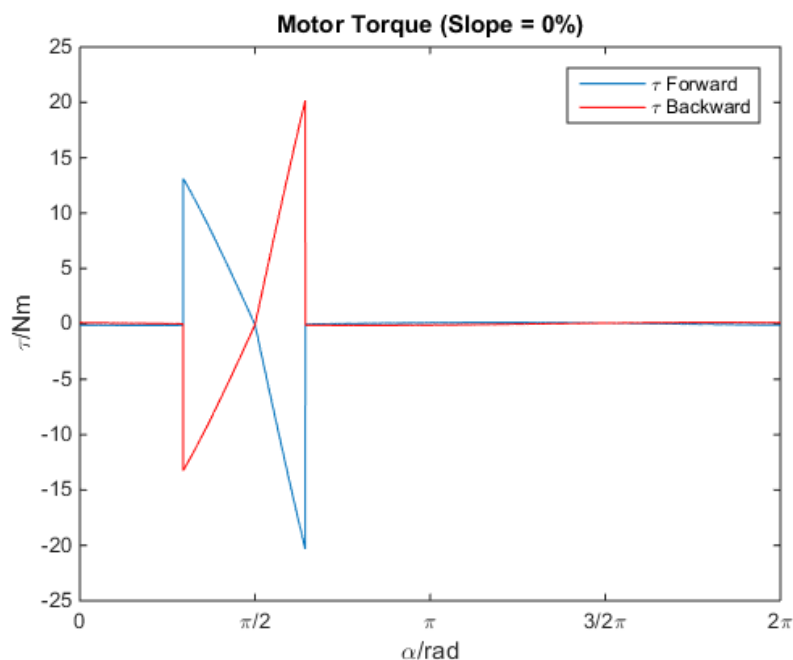
Het stilstaan van de motor dient gedetecteerd te worden door de motor driver. Dit kan waargenomen worden aan de hand van de signalen van de Hall-sensoren.

Omdat het stroomverbruik van de driver voor de motor controller veel kleiner is dan die van de motor, kan deze verwaarloosd worden. Er geldt $I_d \approx I_m$. Indien de motor stil staat, is de stroom gelijk aan:

$$I_m = \delta \frac{U}{R} \quad (36)$$

3.5 Resultaten

Een grafiek van de resultaten voor de vereiste koppel is weergegeven in figuur 5. Hier is de motor-koppel uitgezet tegen de hoek die de poot maakt ten opzichte van de horizon. De sinusvormige lijn rond 0 wordt veroorzaakt door de massa van de poot, als de poot omhoog draait moet de motor meer koppel leveren dan wanneer die omlaag draait. Een piek is te zien op het moment dat de poot de grond raakt en neemt af tot 0, dat is wanneer de poot zich recht onder de robot bevindt ($\alpha = \pi/2$). Bij het verder draaien van de poot (nadat hij recht onder de robot heeft gestaan), zal de robot vanzelf naar beneden zakken door zijn eigen massa en daardoor verder naar voren bewegen. Daar is dus weinig koppel voor nodig; de koppel is ongeveer gelijk aan de koppel om de krachten door de back-EMF tegen te werken.

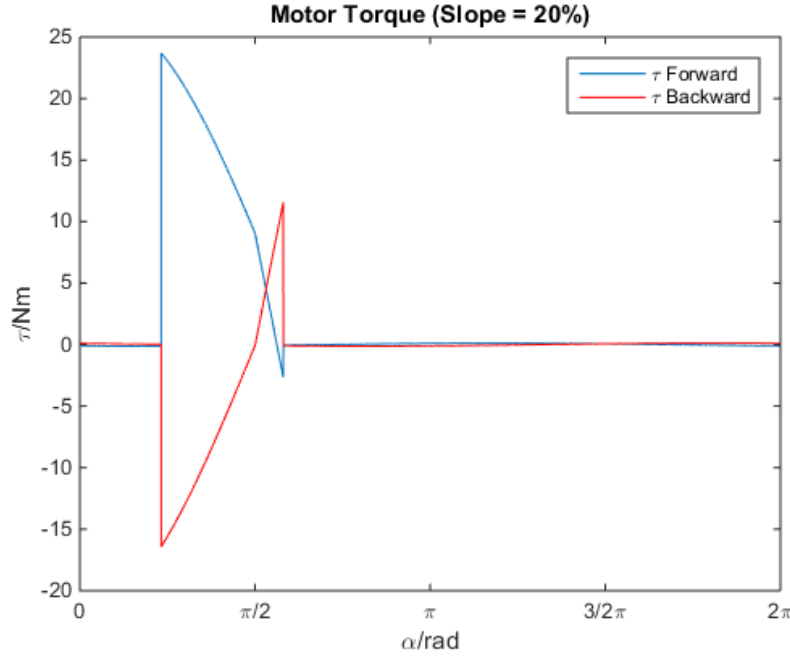


Figuur 5: De motorkoppel op vlak terrein als functie van de hoek die de poot maakt ten opzichte van de horizon. Indien de poten naar voren gericht zijn, dan geldt $\alpha = 0$. Indien de poten van de Zebro naar beneden gericht zijn (loodrecht op de grond), geldt $\alpha = \frac{1}{2}\pi$. Wanneer de poot naar voren draait, geldt de blauwe grafiek en moet gelezen worden van links naar rechts bij voortschrijdende tijd. Wanneer de poot achterwaarts draait, geldt de rode grafiek en loopt van rechts naar links over de tijd. Bij deze simulatie zijn de pootafmetingen uit tabel 1 gebruikt.

Het wedstrijdterrein kan licht golvend zijn en is speciaal gemaakt voor de wedstrijd. De Zebro moet over stenen of kleine obstakels kunnen lopen. Daarom wordt de Zebro zo ontworpen dat hij een helling van maximaal 20% kan beklimmen. In figuur 6 is een soortgelijke grafiek weergegeven als in figuur 5, maar hierbij wordt er vanuit gegaan dat de Zebro een helling van 20% recht op of af loopt.

Uit deze resultaten blijkt dat de gemiddelde absolute koppel 4,5 Nm is en maximaal 21 Nm indien de Zebro op vlak terrein loopt. In de simulatie is een constante rotatiesnelheid genomen voor de periode dat de poot in de lucht is en een vaste rotatiesnelheid wanneer de poot contact maakt met de grond. De gemiddelde rotatiesnelheid van de motor is gelijk aan 108 rpm en maximaal 179 rpm wanneer de poot door de lucht gaat. De loopsnelheid is dan 4,0 km/h.

Bij een helling van 20% is de gemiddelde absolute koppel 7,6 Nm en de maximale koppel is



Figuur 6: De motorkoppel wanneer de Zebro op een helling van 20% loopt, als functie van de hoek die de poot maakt ten opzichte van de parallel aan de helling. Indien de poten naar voren gericht zijn, dan geldt $\alpha = 0$. Indien de poten van de Zebro naar beneden gericht zijn (loodrecht op de grond), geldt $\alpha = \frac{1}{2}\pi$. Wanneer de poot naar voren draait, geldt de blauwe grafiek en moet gelezen worden van links naar rechts bij voortschrijdende tijd. Wanneer de poot achterwaarts draait, geldt de rode grafiek en loopt van rechts naar links over de tijd. Bij deze simulatie zijn de pootafmetingen uit tabel 1 gebruikt.

25,8 Nm. De rotatiesnelheden op de grond en in de lucht zijn daarbij gelijk gehouden met die in de vorige situatie (vlakke grond). De (horizontale) snelheid ligt dan op 3,9 m/s.

In de praktijk is het wellicht beter om de koppel meer gelijk te houden over de periode dat de poot op de grond staat. Dan is de motorstroom ook gelijkmatiger over dat tijdsinterval.

3.6 Conclusie

Bij een loopsnelheid van 4,0 km/h is de Zebro in staat om de maximale afstand van 1000 m af te leggen in 15 minuten. Wanneer het terrein veel reliëf bevat, dan zou de Zebro 30 seconden langer lopen over een afstand van 1000 m, aangenomen dat hij evenveel vermogen kan leveren aan het eind van de rit als aan het begin. Om dat te bereiken moet de motor een nominale koppel hebben van ten minste 7,6 Nm en een maximale koppel van ongeveer 26 Nm. De nominale rotatiesnelheid moet circa 108 rpm zijn en de maximaal snelheid rond de 180 rpm.

3.7 Discussie

Bij het gegeven model voor de koppel (25) wordt er vanuit gegaan dat het chassis van de Zebro niet beweegt. Stel dat de Zebro over een vlak terrein loopt. In werkelijkheid zal de Zebro in neerwaartse richting bewegen op het moment dat de poten op de grond terecht komen. Dat zorgt

ervoor dat de motoren een grotere koppel moeten leveren om de Zebro voort te bewegen. Bij het verder draaien van de poten zal het chassis langzaamaan omhoog bewegen en daarna zal het weer in neerwaartse richting bewegen, totdat andere poten het weer overnemen. Deze routine herhaalt zich. Deze verticale bewegingen zorgen voor zekere verticale acceleraties, die resulteren in veranderende waarden voor de benodigde koppel.

Ook doordat de Zebro een massa-veersysteem zal zijn, zijn de krachten en de vereiste koppel in werkelijkheid anders. De motormodules zijn middels een veersysteem aan het chassis bevestigd. Wanneer de poten neerkomen op de grond, dan beweegt het chassis omlaag en zullen de motormodules omhoog bewegen. Dat resulteert in een kracht die het chassis omhoog wil bewegen, totdat de poten recht onder de Zebro staan. Vervolgens zullen de motormodules neerwaarts bewegen, wat zorgt voor een kracht die het chassis omlaag wil bewegen. Zo zal het chassis een oscillerende beweging maken. Dit systeem zorgt ervoor dat de benodigde koppel egalere grafiek dan bijvoorbeeld in figuur 5 te zien is. Aangenomen wordt dat bovengenoemde aspecten zorgen voor een maximale afwijking van 10% van de simulatieresultaten.

Wanneer de Zebro loopt met een bepaalde snelheid, dan zal het verbruikte vermogen ook constant moeten zijn. Omdat de hoeksnelheid constant verondersteld is wanneer de poten op de grond staan, geldt dat de gemiddelde koppel over een cycle gemiddeld dezelfde waarde moet blijven, ook al ziet de grafiek er anders uit. Door de rotatiesnelheid te variëren over een cycle, verandert ook de vereiste koppel op bepaalde momenten en kan de grafiek bijvoorbeeld vlakker gemaakt worden. De gemiddelde vereiste koppel is dus het meest betrouwbare resultaat van deze simulatie.

De poten zijn in de simulatie oneindig stijf verondersteld, terwijl deze in het echt een beetje doorveren en daardoor de koppel verdelen over de tijd dat de poot op de grond is. Hierdoor is de gemiddelde koppel hetzelfde, maar zal de piekkoppel iets lager zijn.

Tijdens het lopen zal de accuspanning dalen. Dat beperkt ook het maximale vermogen dat de motoren kunnen leveren. Daardoor zal de robot langer doen over 1000 m dan 15 minuten. Het inzakken van de accuspanning zal voor zowel de koppel als de snelheid nadelige gevolgen hebben, omdat deze twee grootheden aan elkaar gerelateerd zijn. Dit alles moet in de praktijk nog getest worden. Omdat het noodzakelijk is dat de Zebro te allen tijde genoeg kracht moet kunnen leveren om op zijn poten blijven, kan ervoor gekozen worden om de loopsnelheid te verlagen. Omdat het gewenst is om zeker 10 minuten aan de opdrachten te kunnen besteden, blijven er 20 minuten over om de maximale afstand van 1000 m af te leggen. Dat betekent dat de gemiddelde snelheid niet lager mag zijn dan 3,0 km/h.

4 De Motor

Met de simulatieresultaten (zie secties 3.5 - 3.6) is een bruikbare motor te kiezen. Omdat in de Zebro gebruik wordt gemaakt van accu's voor de voeding, ligt het voor de hand om een DC-motor te gebruiken. Dan is er de keuze tussen verschillende motoren. De bruikbare motortypes zijn geborstelde DC-motoren en borstelloze DC-motoren. Hieronder volgt een afweging tussen beide types (sectie 4.1) met de keuze die gedaan is (sectie 4.2). Aan de hand van de motorspecificaties van de gevonden motor kan de juiste transmissie gezocht worden (secties 4.3 - 4.4).

4.1 Brushed versus brushless DC

Het lag vanwege de eenvoudige aansturing voor de hand om (BDC) motoren te gebruiken. BDC motoren zijn op veel punten vergelijkbaar met brushless DC (BLDC) motoren, er zijn echter ook verschillen. BLDC motoren hebben een lineaire snelheid-koppel verhouding, terwijl BDC motoren bij een hogere koppel last hebben van de weerstand van de borstels, waardoor de hoeveelheid koppel meer daalt dan bij BLDC-motoren. Bij een lagere koppel hebben BDC motoren ook een lineaire snelheid-koppel verhouding. De afwezigheid van borstels brengt daarnaast voordelen als een ongeveer 10% betere efficiëntie en minder slijtage. [13] Een vergelijking tussen BDC en BLDC motoren is gemaakt in tabel 2.

	BDC motor	BLDC motor
Voordelen	Goedkoper	Kleiner
	Vervangbare borstels	Efficiënt
	Eenvoudige en goedkope besturing	Betere warmtedissipatie door behuizing
	Geen controller nodig voor vaste snelheden	Lineaire snelheid-koppel verhouding
	Bruikbaar in extreme omgevingen vanwege ontbrekende regelelektronica	Duurzaam; heeft geen koolborstels
Nadelen	Minder koppel bij hogere snelheden vanwege frictie	Controller moet de motor draaiend houden
	Periodiek onderhoud vereist	Besturing is complex en duur
	Matige warmtedissipatie	Duurder
	Grotere rotor inertia	

Tabel 2: Voor- en nadelen van brushed DC (BDC) en brushless DC (BLDC) motoren.[24]

Aanvankelijk was er gekozen voor een geborstelde motor, vooral vanwege de eenvoudigere aansturing. De massa kwam neer op ongeveer 2kg per motor. De maximale massa van de robot mag slechts 50 kg zijn. Om het aandeel van de motoren in de totale massa van de robot te beperken, is gezocht naar lichtere motoren. Over het algemeen geldt: hoe lager de massa van de motor, hoe lager de geleverde koppel is. Er zijn verschillende opties om genoeg te nemen met motoren die minder koppel kunnen leveren:

- Het gebruik van kortere poten;
- Het verminderen van de massa van de robot;
- Het vergroten van de staplengte.

Over de massa van de robot kon niet onderhandeld worden, die is al zo laag mogelijk. In de andere twee gevallen moest de rotatiesnelheid van de poten omhoog. Er moest dus een optimum gevonden worden tussen de rotatiesnelheid en de vereiste motorkoppel. De beste motor heeft een laag gewicht (1 - 1.5 kg), een hoog koppel (ca. 10 Nm nominaal) en gemiddelde rotatiesnelheid (ca. 200 rpm). Daarnaast moet ook de grootte in het oog gehouden worden; de maximale

lengte voor de motoren is 170 mm en de maximale diameter is 80 mm, maar hoe kleiner, hoe beter.

Na verder gezocht te hebben is er gekozen voor een BLDC-motor. De voordelen - laag gewicht, hogere efficiëntie en de kleinere afmetingen - zijn groter dan het nadeel van een complexere besturing en een hogere prijs.

4.2 Gekozen motor

De gekozen motor voldoet aan de specificaties die uit de simulatie zijn gekomen. Een samenvatting van de getoetste specificaties staan in tabel 3.

Motor specificatie	Waarde
Spanning [V]	24
Nominaal koppel [Nm]	9,4
Maximaal koppel [Nm]	28,2
Nominaal toerental [rpm]	175
Maximaal toerental, zonder load [rpm]	225
Gewicht [kg]	1.17
Afmetingen ($l \times b \times h$) [mm]	$151 \times 60 \times 60$
Overbrengingsverhouding	1:20

Tabel 3: De specificaties van de gekozen motor (Nanotec DB59L024035-A) met overbrenging (Nanotec GPLE40-2S-20-F56)[21].

4.3 Transmissietype

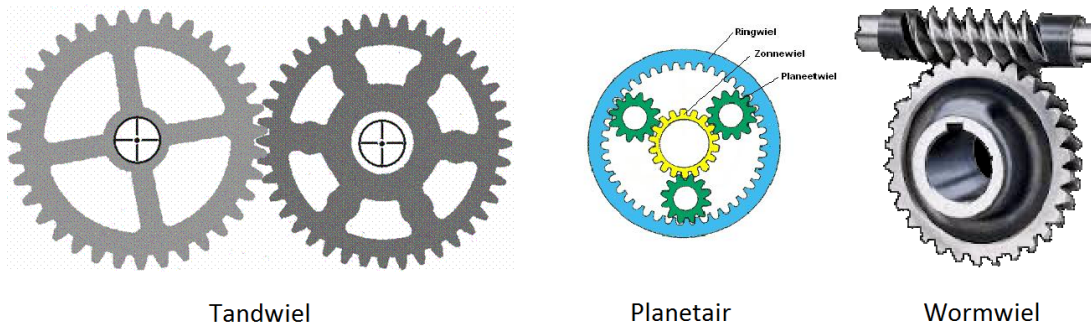
Er zijn drie verschillende soorten overbrengingen op de markt, zie figuur 7:

1. Tandwieloverbrenging
2. Planetaire overbrenging
3. Wormwieloverbrenging

Een *tandwieloverbrenging* is goedkoper dan de andere twee opties, maar nadelen zijn dat de koppel niet zo hoog kan zijn en dat de uitgaande as niet in het midden zit. Al kan dit laatste ook voordelen hebben.

Een *planetaire overbrenging* heeft als voordeel dat het een veel hoger koppel kan leveren dan een tandwieloverbrenging. Daarnaast kan deze overbrenging kleiner gebouwd worden, omdat de tandwielen in elkaar zitten. Een nadeel is dat het rendement lager is dan bij een gewone tandwieloverbrenging.

Een *wormwieloverbrenging* heeft als voordeel dat de uitgaande as niet kan draaien als de motor uit staat, hierdoor zou de robot kunnen staan zonder stroom door de motoren te laten lopen. Het probleem is echter dat bij deze overbrengingen de motoren een hoek van 90 graden maken met de as, waardoor de ruimte om motoren te plaatsen een stuk kleiner wordt vanwege de vorm van het Zebro chassis.



Figuur 7: Afbeeldingen van een tandwiel-[10], planetaire-[25] en een wormwieloverbrenging[6].

4.4 Gekozen transmissie

Voor de uiteindelijk gekozen motor zijn enkel planetaire overbrengingen beschikbaar. Er was al een voorkeur voor deze transmissie, omdat tandwieloverbrengingen de vereiste koppel niet aankunnen en de plaatsing van de motoren moeilijk wordt als er wordt gekozen voor een wormwieloverbrenging. Er is gekozen voor een 1:20 ratio, zodat zowel de koppel als de rotatiesnelheid aan de vereiste specificaties voldoen.

5 Motor Controller

Voor de aansturing van de brushless DC-motoren is regelelektronica nodig. Dit hoofdstuk beschrijft de hiervoor gekozen elektronica.

5.1 Eisen

De motor controller dient te voldoen aan ten minste de volgende eisen:

- De motor controller dient de motoren te regelen via een ingangssignaal dat de snelheid representeert (zie verder sectie 8);
- De motor controller beschikt over een stroommeter om zijn stroomverbruik bij te houden;
- De communicatie met de BPU geschiedt middels het Inter-Integrated Circuit (I²C) protocol over de backbone;
- De motor controller dient de status bij te houden van de motor, te weten de positie, het stroomverbruik, de motortemperatuur en of de motor vastzit.

5.2 Ontwerpmogelijkheden

Voor het ontwerp van de motor driver zijn er de volgende mogelijkheden:

1. Het plaatsen van de microcontroller en drive MOSFET's op één printplaat (PCB);
2. Het kopen van een kant-en-klare motorbesturing op basis van de in de motor ingebouwde Hall-sensoren en daarbij een print met een microcontroller maken.

Er is gekozen om de laatste optie te gebruiken, omdat het aansturen van BLDC-motoren complex is. Door het gebruik van kant-en-klare motoraansturing (motor controller) wordt werk bespaard op het ontwikkelen van de software achter de aansturing alsook het zoeken naar de beste transistoren om de motoren mee aan te sturen. Daarnaast zou een groot gedeelte van de print geschikt moeten zijn voor hoge vermogens, wat het ontwerpen van het bordje moeilijker maakt.

Daarnaast zorgt het loskoppelen van het microcontrollerbord (driver) en de motor controller voor een verbeterde modulariteit. Als men een andere motor wil gebruiken hoeft alleen de controller vervangen te worden en kan de software op de driver iets herschreven worden. Deze hoeft dan niet opnieuw ontworpen te worden.

5.3 Hardware

De Zebro Motor Driver (ZeMoD) zal worden uitgerust met een microcontroller. Deze houdt de motorstatus bij en verzendt dit naar de BPU op de backbone. Om de stroom naar de motor controller te bewaken wordt een stroommeting gedaan. Dit geschiedt met een shunt weerstand. De kleine spanningsval over deze weerstand wordt versterkt met een operational amplifier, waarna de versterkte spanning wordt aangeboden op een analoge ingang van de microcontroller.

5.3.1 Taken

De microcontroller dient het volgende uit te voeren:

- Het uitlezen van een temperatuursensor die gemonteerd zit op of bij de motor (1 analoge ingang vereist);
- Het meten van de spanning over een shunt weerstand, die gevolg is van de motorstroom (1 analoge ingang vereist);
- Het aansturen van de gekozen motor controller (1 analoge of pulsbreedte gemoduleerde (PWM) uitgang vereist en 2 digitale uitgangen);
- Het reageren op de inkomende commando's via I²C (I²C interface vereist, dus 2 general purpose inputs/outputs (GPIO's));
- Het bepalen of de motor vast zit aan de hand van de motorstroom en pootpositie;
- Het besluiten om de motor te stoppen indien de motor vastzit of de motortemperatuur teveel oploopt;
- Het updaten/doorgeven van de motorstatus, -temperatuur, -stroom en positie naar de BPU via I²C.

5.3.2 Keuze microcontroller

De keuze voor de microcontroller is gevallen op de Kinetis MKL05Z32VLC4 CORTEX-M0+. Er is gekozen voor deze microcontroller omdat:

1. deze ruim aan de gestelde eisen voldoet (zie tabel 4);
2. hij veel mogelijkheden biedt, en omdat
3. hij een goede prijs/kwaliteit verhouding heeft.

Om de vereiste taken uit te voeren is niet veel rekenkracht vereist. Voor het programmeren van de microcontroller kan CodeWarrior Development Studio (CDS) gebruikt worden. Bij het compilen van de code wordt de benodigde geheugengrootte weergegeven. Voor testcode bleek de benodigde grootte van het flashgeheugen 16 kB te zijn, de constant data 1,5 kB en 1 kB globale of statische variabelen (totaal 18 kB). Gezien de chip 32 kB flash geheugen heeft is zijn capaciteit ruim voldoende, ook als de code wat uitgebreid wordt. Het minimum aantal vereiste digitale GPIO's komt neer op 2 en de analoge ingangen op 3. De resolutie van de ADC is 12 bits, terwijl de gewenste resolutie 8 bits is. In het werkgeheugen wordt de motortemperatuur bijgehouden, de motorstroom, de pootpositie en de motorstatus. Dat betekent dat er geen hoge eisen zijn voor de grootte van het werkgeheugen (SRAM).

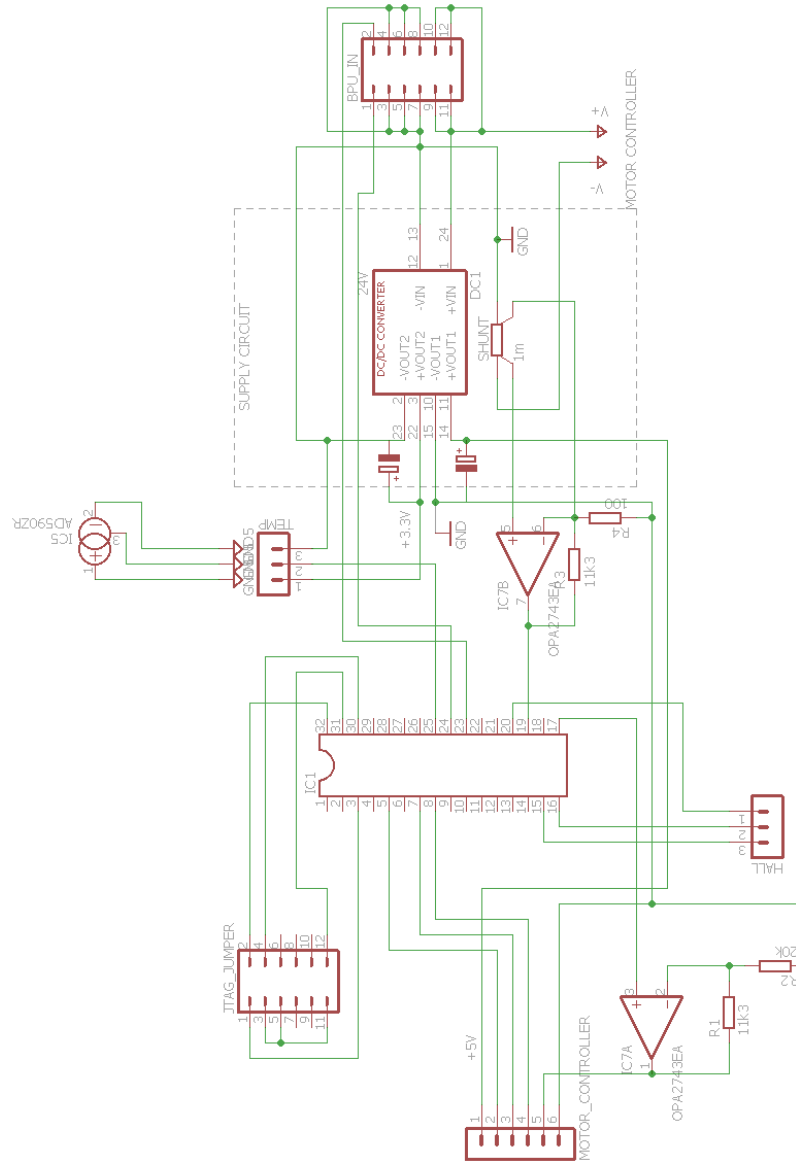
In tabel 4 zijn de minimale vereisten opgenomen voor de microcontroller op de motor controller en daarbij de specificaties van de gekozen microcontroller. Hieruit is op te maken dat de microcontroller zeker aan de eisen voldoet.

Beschrijving	Minimale vereisten	MKL05Z32VLC4
Maximale kloksnelheid [MHz]	8	48
Flash [kB]	16	32
SRAM [kB]	1	4
Aantal ADC kanalen	3	13
ADC resolutie [bits]	8	12
I ² C [Y/N]	Y	Y
Aantal GPIO's	5	28

Tabel 4: Rechtvaardiging van de gekozen microcontroller met de benodigde minimale eisen in de tweede kolom en de specificaties van de microcontroller in de derde kolom.

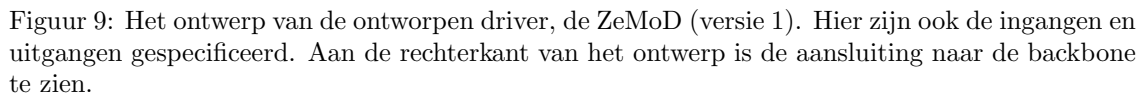
5.3.3 Schakelschema

Voor de ZeMoD is een schakelschema ontworpen, zie figuur 8.



Figuur 8: Het schakelschema van de ZeMoD driver. Onderaan staat van links naar rechts de JTAG connector en de connector voor de besturing van de motor controller. Iets daarboven (rechts) staat de aansluiting voor de Hall-sensoren van de BLDC-motor. Bovenaan staat het voedingscircuit dat 24 V omzet in +3,3V en 5V.

Bij het schakelschema is een printplaat ontworpen zoals te zien is in figuur 9. In de figuur is tevens te zien waar de in- en uitgangen voor dienen. Met de 'PROG' connector is de microcontroller te programmeren. Op de connector 'SENSOR 1' kan een extra sensor aangesloten worden. Deze sensor dient te werken met een spanning van 3,3 V en zijn uitgangssignaal kan zowel een digitaal als analoog signaal zijn. Op de connector 'TEMP' wordt de temperatuursensor aangesloten die op of bij de motor bevestigd wordt. Hiermee wordt de motortemperatuur bijgehouden. Met de 'BACKBONE' connector kan de motor driver op de backbone van de Zebro worden aangesloten. Rechtsonderaan is de 'MOTOR' aansluiting voor de voeding van de motor, welke verbonden wordt met de motor controller. De 'MOTOR CONTROLLER' aansluiting wordt direct aangesloten op de motor controller. Op de 'HALL' connector kunnen de Hall-sensoren van de motor aangesloten worden.



1. Ground;
2. Data;
3. +3,3 V.

1. +5 V;
2. Enable/disable;
3. Motorsnelheid terugkoppeling;
4. Vooruit/achteruit;
5. Snelheid;
6. Ground.

De Hall-sensoren van de motor worden als volgt aangesloten op de connector 'HALL':

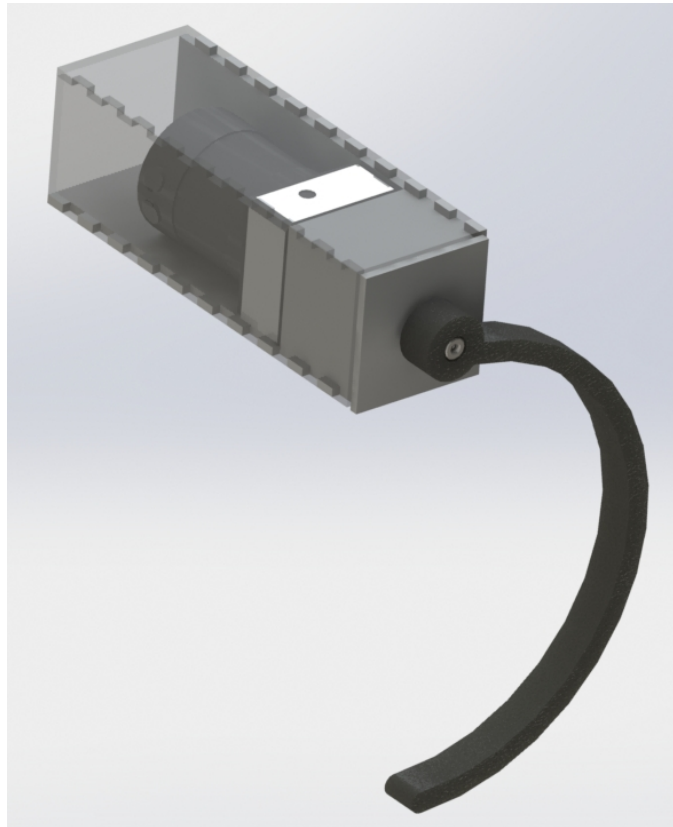
1. Hall-sensor A;
2. Hall-sensor B;
3. Hall-sensor C.

5.4 Software

De microcontroller van elke driver zal van software worden voorzien om de genoemde taken in sectie 5.3.1 te kunnen uitvoeren. De drivers krijgen commando's van de BPU, waar het algoritme wordt uitgevoerd dat de poten aanstuurt, zie hiervoor hoofdstuk 7.

6 Motorbehuizing

Er wordt een behuizing voor de motor gebouwd (zie figuur 10) die snel in en uit het chassis geklikt kan worden. In deze behuizing komt de motor, de temperatuursensor en de motoraansturingselektronica. De afmetingen van deze elektronica zijn kleiner dan de diameter van de motor en daarom is ervoor gekozen om deze printplaat achter de motor in de behuizing te stoppen in plaats van boven de motor. Daardoor kunnen de kabels korter gemaakt worden die naar de backbone lopen, wat minder storing veroorzaakt op de I²C lijnen. Vanwege de warmte die vrij zal komen zal de behuizing gekoeld worden.



Figuur 10: Een illustratie van een motormodule met poot. Deze kan in de Zebro geklikt worden en wordt elektrisch verbonden met de Zebro middels een connector aan de achterkant van de behuizing.

7 Algoritmebeschrijving

Het algoritme dat gebruikt zal gaan worden voor de uiteindelijke aansturing van de Zebro is een Max-Plus algoritme. Dit algoritme zorgt ervoor dat de poten met elkaar synchroniseren tijdens het lopen. Dit wordt gedaan door de tijd dat een poot in de lucht is even lang te maken als de tijd dat een poot op de grond is. Daarnaast zorgt het algoritme ervoor dat poten die op dezelfde plek zouden moeten zijn dat ook zijn. Wanneer uit metingen blijkt dat een van de poten sneller beweegt dan de andere, dan wordt die poot iets vertraagd en de andere poten iets versneld[19].

Max-Plus is een manier om snel de uitkomst te berekenen van de wortel van de som van twee kwadraten. In plaats van kwadraten en wortels gebruikt dit systeem voor een computer makkelijker uit te voeren commando's als vergelijken, vermenigvuldigen en optellen[7].

Andere mogelijkheden voor het algoritme moeten zijn om te lopen met minder poten als blijkt dat niet alle poten goed werken. Dat kan door een te hoge temperatuur of doordat de poot vast zit.

8 Communicatie tussen motormodules en BPU

De communicatie tussen de driver en de ruggengraat van de robot gebeurt via I²C. Hiervoor waren al datalijnen voor beschikbaar op de BPU en daarom is daarvoor gekozen.

8.1 Communicatieprotocol

In appendix B en C zijn twee flowcharts te zien die zijn opgesteld om globaal aan te geven wat de software op de backbone en de motor aansturing modules moet gaan doen. In deze flowcharts zijn ook de signalen die verzonden worden. Zoals te zien is stuurt de scheduler één byte naar alle drivers. Van de drivers komen drie bytes terug. In de byte naar de driver zijn vier bits gereserveerd voor het doorsturen van de snelheid van de motor, één bit is voor de richting, voor of achteruit. Daarnaast is er nog een bit voor het start/stop signaal, wat bij een snelheid van nul aangeeft of de robot moet staan of liggen en is er een bit voor reset als de motor oververhit is geweest en nu weer is afgekoeld. Er blijft dan één bit over dat niet gebruikt wordt.

De drie bytes die teruggestuurd worden bestaan uit de motorstroom, wat door acht bits gerepresenteerd wordt, de temperatuur, waarvoor zeven bits gebruikt worden. Eén bit geeft aan of de motor een probleem heeft, dit houdt in dat de motor oververhit is. Daarnaast zijn er zeven bits voor de positie van de poot en is er nog één bit dat aangeeft dat de poot vast zit.

8.2 Communicatiesnelheid

De maximale snelheid die de I²C-bus op de ruggengraat aankan is 1 Mbit/s[22], terwijl de maximale snelheid van de motoraansturing 400 kbit/s[11] is. Als de robot op maximale snelheid loopt zal de poot ongeveer twee rondjes per seconde draaien. Er moeten zes poten aangestuurd worden. Per motor zullen er per omwenteling ongeveer 9 bits/byte $\times$ 6 bytes = 54 bytes (432 bits) verzonden worden. Voor één verversing moeten dus 432 bits/omwenteling $\times$ 6 motoren $\times$ 2 omwentelingen per seconde = 5184 bits per seconde verstuurd worden.

Per keer dat de motoren van verse informatie worden voorzien zal er dus iets meer dan 5 kbit overgestuurd worden. Dit betekent dat de data in de BPU en de motormodules in theorie $400/5.184 = 77$ keer verversd kan worden per omwenteling van de poot. De motor heeft 3 hall sensoren, waarmee 6 verschillende standen te maken zijn. De hall sensoren veranderen dus elke 60 graden van waarde. De overbrengingsverhouding is 1:20. Dat resulteert in een resolutie van $60/20 = 3$ graden. Idealiter wordt na elke verandering van de sensorwaarden de nieuwe pootsnelheid berekend. Dit zou resulteren in het $360/3 = 120$ keer verversen omwenteling van een poot. Dat is dus niet haalbaar met de maximale communicatiesnelheid van de I²C interface.

Vanwege een zekere rekentijd om de nieuwe pootsnelheid te berekenen, zal de data nooit 120 keer per seconde verversd worden. voor het algoritme om te berekenen hoe snel elke poot moet draaien. De maximale verversingsfrequentie f [Hz] wordt

$$\begin{aligned} f_{update} &= \left(\frac{6N_{bpr}N_{rps}}{f_{I^2C}} + t_{computation} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{N_{bpr}N_{rpm}}{10f_{I^2C}} + t_{computation} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (37)$$

met

- f_{update} : de verversingsfrequentie, gemeten in het aantal verversingen per seconde [Hz];

- N_{bpr} : het aantal overgestuurde bits per rotatie van de poot [bits/rotatie];
- N_{rps} : het aantal rotaties per seconde van de poot [rps];
- N_{rpm} : het aantal rotaties per minuut van de poot [rpm];
- f_{I^2C} : de maximaal haalbare snelheid van de I²C-bus [bits/s];
- $t_{computation}$: de rekestijd om de nieuwe pootsnelheid te berekenen [s].

Het getal 6 in de teller van de eerste vergelijking is het aantal poten van de Zebro.

9 Testplan aandrijving

Dit testplan beschrijft het testen van de aandrijving van de robot. Het doel is om meer duidelijkheid te krijgen over de samenwerking van de motor controller en de motor en tot wat deze combinatie in staat is. Een beperking aan de testopstelling is dat er slechts één volledige aandrijving is, waardoor er geen combinaties kunnen worden getest.

9.1 Testbasis

De te testen motor is de Nanotec DB59L024035-A met overbrenging Nanotec GPLE40-2S-20-F56. Deze heeft een maximale koppel van 28 Nm, de maximale rotatiesnelheid is 225 rpm, de werkspanning is 24 V en de maximale stroom 28 A [21].

De motor controller die gebruikt wordt in deze test is de JYQD_V7.3E 20150108. Deze controller kan een maximaal vermogen van 500 W aan, bij een spanning tussen 12 en 36 V. Bij een stroom van 20 A zal de stroombeveiling de motor stoppen. De motorsnelheid is via dat bordje te regelen door middel van een ingangssignaal dat een spanning van 0 tot 5 V dient aan te nemen. De rotatiesnelheid is daarbij te variëren van 10 tot 100% van de maximumsnelheid, aldus de datasheet[17].

9.2 Wat wordt getest?

Bij deze test zal voornamelijk de motoraansturing in de gaten gehouden worden. Daarbij wordt gelet op de temperatuur van verschillende onderdelen op het bordje, zoals de MOSFET's. Ook zal de stroombeveiling en het draaien bij verschillende snelheden en de stromen getest worden. Daarnaast zal de motor getest worden. Daarbij zal de warmteontwikkeling gemeten worden.

9.3 Wat wordt niet getest?

Er wordt van uitgegaan dat de motor aan de opgegeven specificaties in de datasheet voldoet. Daarom wordt de motorefficiëntie niet getest.

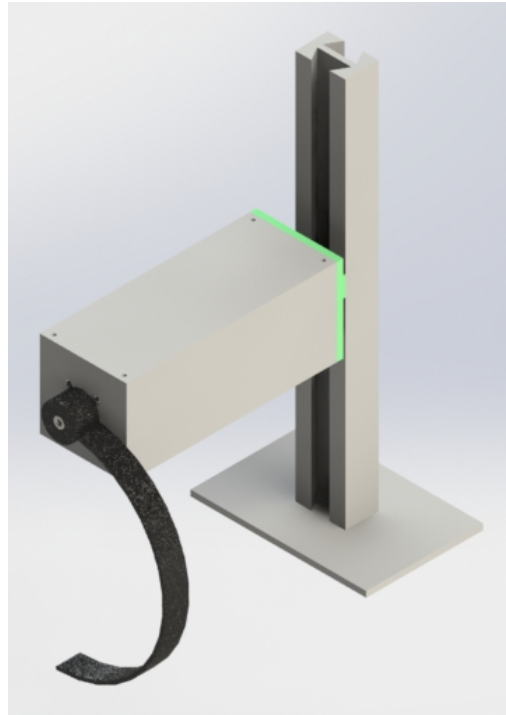
9.4 Aanpak

De motor zal met de behuizing in de testopstelling gezet worden, zoals aangegeven in figuur 11. De motor controller wordt aangesloten op de motor en aan de andere kant op twee voedingen, een op 24 V en een andere op een variabele spanningsbron tussen 0 en 5 V. Met een multimeter zal de stroom door de motor gemeten worden, hiervoor wordt de multimeter aangesloten tussen de 24 V voeding en de motor controller.

In figuur 12 is een overzicht gegeven hoe alle onderdelen op elkaar aangesloten worden.

9.5 Testgevallen

Er zullen zeven verschillende tests gaan plaatsvinden. Bij de eerste test moet de motor gaan draaien, om te controleren of de motor en de controller wel werken. Ook zal in deze test gekeken worden of de motor stil staat indien het signaal voor de snelheid gelijk is aan 0 V, of dat de motor



Figuur 11: Een indicatie van de testopstelling voor de motor module. De module is op en neer te bewegen en de kracht op de poot kan ingesteld worden met een veer.

dan langzaam draait. Dit staat niet duidelijk in de bijbehorende datasheet. Ook wordt door het signaal voor de richting op 0 V of 5 V aan te sluiten gecontroleerd of de draairichting verandert bij een andere stand van de schakelaar.

Tijdens de tweede test zal de spanning voor de snelheidsregeling tussen 0 en 5 V geregeld worden, hierdoor zou de motor op verschillende snelheden moeten gaan draaien.

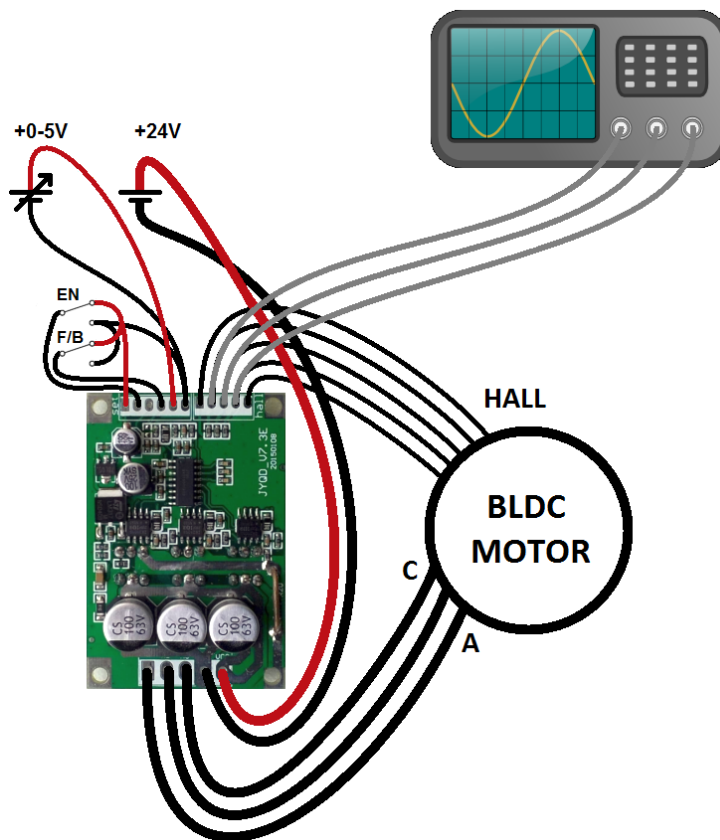
In de derde test zal de stroom gemeten worden tijdens het opstaan van de robot. De poot draait hierbij vooruit bij een druk van 50 N.

In de vierde test zal de stroom gemeten worden tijdens het opstaan van de robot, waarbij de poot achteruit draait. De druk op de poot is 50 N.

Test vijf bestaat ook uit het opstaan van de robot, bij een druk van 200 N. De poot draait vooruit.

De zesde test zal het opstaan van de robot zijn. De druk op de poot is 200 N en de poot draait achteruit.

In de zevende test zal de poot aan de motor recht op de grond gezet worden. Als in de eerste test is gebleken dat de motor controller de poot stil kan laten staan zal dat gebruikt worden om de poot stil te zetten, anders wordt de controller door middel van pulsen vooruit en achteruit gestuurd, zodat de poot ook min of meer blijft staan. De kracht op de poot zal dan opgevoerd worden. Daarbij zal de stroom gaan oplopen, omdat de motor meer kracht moet leveren om de poot op dezelfde plek te houden. Als de stroom 20 A nadert wordt de druk niet meer opgevoerd. Hierdoor is te bepalen hoe warm de poot wordt bij het staan en hoe goed de robot stil kan staan. Dit hangt af van de snelheid waarmee de motor controller corrigeert.



Figuur 12: Een overzicht van de test van de controller met daarop aangegeven hoe alle componenten op elkaar aangesloten worden. Met de schakelaar 'EN' wordt de motor controller in- of uitgeschakeld. Met de schakelaar 'F/B' is draairichting van de motor te regelen. De variabele spanningsbron zorgt voor het signaal dat de snelheid representeert, in een lineaire schaal van stilstand tot maximale snelheid.

9.6 Slagingscriteria

De motor en motor controller dienen te werken (test 1 - 2). Test drie tot en met zes zijn geslaagd als de poot een heel rondje kan draaien bij de gegeven druk. De zevende test is geslaagd als de stroombeveiliging de motor afschakelt bij een stroom van ongeveer 20 A.

9.7 Testproducten

De opgeleverde producten bij deze test zijn:

- Dit testplan;
- Verschillende testgevallen (zie sectie 9.5).

9.8 Testomgeving

De benodigde faciliteiten om de aandrijving te testen, zijn:

	Meting	Motorstroom [A]	Temperatuurverschil [K]	Opmerkingen
1	Draaien en stilstaan			
2	Draaien met variabele snelheid			
3	Opstaan met weinig druk, vooruit (zichzelf + 5kg)			
4	Opstaan met weinig druk, achteruit (zichzelf + 5kg)			
5	Opstaan met veel druk, vooruit (zichzelf + 20kg)			
6	Opstaan met veel druk, achteruit (zichzelf + 20kg)			
7	Staan, druk op de poot variëren			

Tabel 5: Het testplan voor het testen van de aandrijving. In de kolom motorstroom zal de maximaal gemeten stroom ingevuld worden. In de kolom voor het temperatuurverschil zal het verschil in temperatuur tussen het begin en het eind van de meting ingevuld worden. Als er iets gebeurt dat een vermelding waard is, kan dat in de laatste kolom ingevuld worden.

1. 24 V spanningsbron;
2. Een instelbare spanningsbron met een minimaal bereik van 0 tot 5 V;
3. Een oscilloscoop;
4. Twee schakelaars;
5. Aansluitkabels.

9.9 Randvoorwaarden

Er zijn geen speciale randvoorwaarden.

9.10 Schattingen

Als de motor draait op maximale snelheid (ca. 4500 rpm) en zonder belasting, dan is de stroom naar verwachting kleiner dan 0.5 A. Als de poot aan de motor zit, dan zit er wel belasting aan en zal de stroom groter zijn.

9.11 Risico's

De risico's aan het testen van de motor en de motor controller zijn dat een van de twee kapot gaat door oververhitting of dat er door het snel draaien van de motor iets losschiet wat schade kan veroorzaken. De kwaliteit van de poten is niet bekend dus het dragen van een bril tijdens het testen is zeker aan te raden.

10 Testplan driver

Dit testplan beschrijft het testen van de ontworpen driver. Het doel is om te verifiëren of het ontwerp dat gemaakt is ook voldoet aan de eisen in sectie 5.1.

10.1 Testbasis

Het ontworpen PCB is ZEMOC, dit is de eerste versie van het ontwerp. De DC/DC converter is de ROHM BD93291EFJ-E2, deze zet een spanning tussen 8 en 26 V om in een 3.3 en een 5 V spanning. De weerstanden aan de kant van de shunt weerstand hebben waardes van 100 Ω en 11,3 k Ω , wat in de gebruikte configuratie zou moeten resulteren in een versterking van 114 keer. De weerstanden die de spanning van 3,3 naar 5 V moeten brengen zijn een 11.3 k Ω en 20 k Ω , wat een versterking van 1,77 keer zou moeten geven. De microcontroller op het bordje is de MKL05Z32VLC4 van Freescale semiconductor, dit is een cortex-m0+ processor.

10.2 Wat wordt getest?

Bij deze test wordt de correcte werking van de driver getest. Verschillende spanningen op het circuit worden gemeten. Daarnaast worden de spanningen van de in- en uitgangssignalen van de microcontroller gemeten.

10.3 Wat wordt niet getest?

De werking van de I²C interface wordt hierbij niet getest.

10.4 Aanpak

De beschreven tests in sectie 10.5 zijn op de volgende manier uit te voeren:

1. Meet de spanning over de twee buitenste pinnen van de temperatuursensor. Hierover zou een spanning van 3,3 V moeten staan.
2. Meet de spanning over pin nummer 1 en 6 () van de connector naar de motor controller, deze spanning zou 5 V moeten zijn.
3. Zet pin nummer 5 van de microcontroller hoog of laag en meet de spanning over pin nummer zes en twee (respectievelijk ground en enable). Deze spanning zou 0 of 3,3 V moeten zijn.
4. Zet pin nummer 8 van de microcontroller hoog of laag en meet de spanning over pin nummer zes en vier (respectievelijk ground en voorwaarts/achterwaarts). Deze spanning zou 0 of 3,3 V moeten zijn.
5. Zet pin 17 van de microcontroller op de hoogste spanning die hij kan geven (3,3 V) en meet de spanning over pin één en vijf van de connector naar de motor controller, waar een spanning van 5 V zou moeten staan. Zet daarna pin 17 op een lagere spanning of zelfs 0 V en meet dan weer de spanning over pin één en vijf van de connector naar de controller. Als ook de spanning gemeten wordt die de microcontroller als uitgang geeft kan daaruit de versterking bepaald worden.

6. Meet de spanning over de shunt weerstand door de multimeter aan te sluiten op de binnenste 2 pinnen van de shunt weerstand. Meet ook de spanning over de pin 19 van de microcontroller en de ground. Hieruit is de versterkingsfactor te berekenen.
7. Laat een Led branden indien de temperatuur hoger wordt dan een bepaalde ingestelde temperatuur. Door de werkelijke temperatuur te meten met een werkende thermometer kan nagegaan worden of de Led op het juiste moment is gaan branden en of de ingestelde temperatuur overeenkomt met de werkelijke temperatuur op het schakelmoment.
8. Laat een Led branden op het moment dat de spanning over de weerstand groter wordt dan een ingestelde waarde. Er kan nagegaan worden of de ingestelde spanning overeenkomt met de werkelijke spanning die gemeten kan worden met een multimeter.
9. Sluit een bron aan op de plus en min ingang voor de voeding van het bordje en een belasting (BLDC-motor) op de uitgang van het bordje. Laat de stroom langzaam oplopen en meet de temperatuur direct op de kanalen op de PCB. Als de temperatuur boven de 70 °C komt, wordt de maximale stroom opgeschreven en de voeding uitgezet. Als de temperatuur niet boven de 70 °C komt, maar de voeding wel al 30 A levert wordt de test ook gestopt.

In tabel 6 is een overzicht gegeven voor het testplan van de PCB.

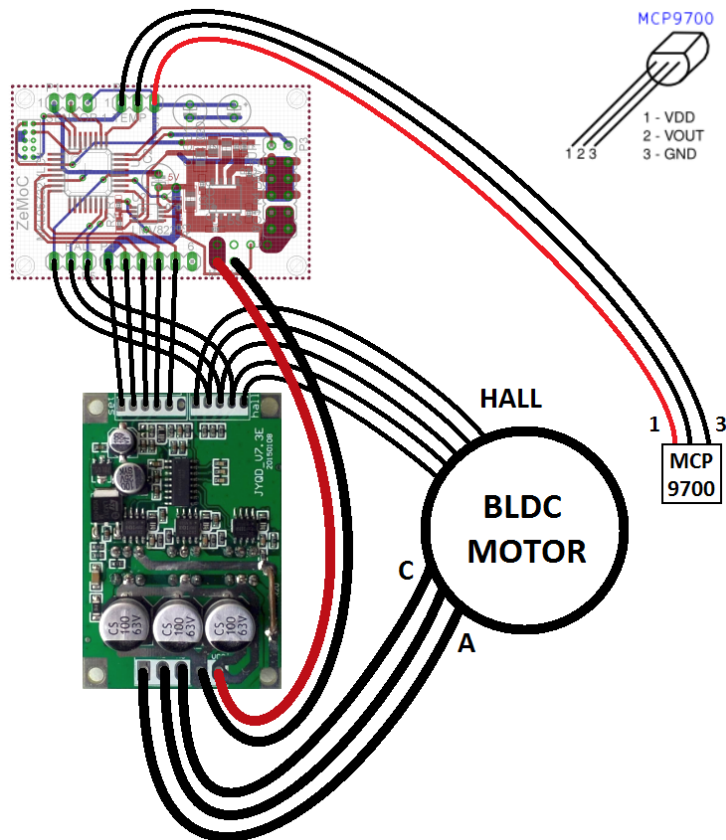
	Metten	Werkt	Opmerkingen
1	Verschillende spanningen (3,3 V en 5.0 V) uit het voedingscircuit		
2	Uitgangsspanning naar motor aansturing		
3	Hoge stromen door shunt weerstand (> 10 A), zonder dat het pcb kapot gaat		

Tabel 6: Het testplan voor het testen van de PCB.

In figuur 13 is een overzicht gegeven hoe alle onderdelen op elkaar aangesloten worden.

10.5 Testgevallen

1. De spanning naar de sensoren wordt gemeten;
2. De uitgangsspanning naar de motor controller wordt gemeten;
3. Het signaal om de motor controller in- en uit te schakelen wordt gemeten;
4. Het signaal om de draairichting van de motor te regelen wordt gemeten;
5. De uitgangsspanning van de microcontroller zal gemeten worden van het signaal om de motorsnelheid in te stellen. Door ook de versterkte spanning te meten, is de versterkingsfactor te bepalen;
6. De spanning over de shunt weerstand zal gemeten worden samen met de versterkte spanning, waardoor de versterkingsfactor te bepalen is;
7. Er wordt bepaald of de microcontroller in staat is om de temperatuursensor correct uit te lezen;
8. Er wordt bepaald of de microcontroller de versterkte spanning over de shunt weerstand correct meet;
9. Er wordt bepaald of de printplaat stromen aankan tot 30 A;



Figuur 13: Een overzicht van de test met daarop aangegeven hoe alle componenten op elkaar aangesloten worden.

10.6 Slagingscriteria

De tests zijn geslaagd in de volgende gevallen:

1. De spanningen die het voedingscircuit levert zijn 3,3 V en 5 V;
2. De uitgangsspanning naar de motor controller dient ongeveer 24 V te zijn;
3. Het signaal om de motor controller in- en uit te schakelen is 0 V of 3,3 V;
4. Het signaal om de draairichting van de motor te regelen kan de spanningen 0 V of 3,3 V aannemen;
5. De uitgangsspanning van de microcontroller van het signaal om de motorsnelheid in te stellen kan spanningen aannemen van 0 V tot 5 V. De versterkingsfactor is ongeveer 1,77.
6. De spanning over de shunt weerstand zal liggen tussen 0 V en 400 mV bij een stroom van 20 A. De versterkingsfactor dient ongeveer 114 te zijn.
7. De microcontroller dient de temperatuursensor correct uit te lezen;
8. De versterkte spanning over de shunt weerstand wordt correct gemeten;
9. De printplaat kan stromen tot 30 A aan;

10.7 Testproducten

De opgeleverde producten bij deze test zijn:

- Dit testplan;
- Verschillende testgevallen (zie sectie 10.5).

10.8 Testomgeving

De benodigde faciliteiten om de PCB te testen, zijn:

1. 24 V spanningsbron;
2. Een instelbare spanningsbron met een minimaal bereik van 0 tot 5 V;
3. Een multimeter;
4. Een weerstand die hoge stromen aan kan;
5. Aansluitkabels.

10.9 Randvoorwaarden

Er zijn geen randvoorwaarden.

10.10 Schattingen

De verwachtingen zijn als volgt:

1. Het subcircuit van de voeding op de print dient spanningen van 3,3 V en 5,0 V te geven;
2. De uitgangsspanning naar de motoraansturing dient 24 V te zijn, dus gelijk aan de ingangsspanning;
3. De microcontroller dient het signaal om de motor controller in- en uit te schakelen correct te geven (0 V of 3,3 V);
4. De microcontroller dient het signaal om de draairichting van de motor te regelen correct te geven (0 V of 3,3 V);
5. De microcontroller dient het signaal om de draaisnelheid van motor te regelen correct te geven (0 V - 3,3 V) en de operational amplifier moet het versterken naar een spanning tussen 0 en 5 V;
6. De operational amplifier dient de spanning die veroorzaakt wordt door de motorstroom door de shunt weerstand, te versterken met een versterkingsfactor van 114;
7. De operational amplifier dient de spanning die de microcontroller geeft tussen 0 en 3,3 V te versterken met een versterkingsfactor van 1,77;
8. De microcontroller dient de temperatuursensor correct uit te lezen;
9. De microcontroller dient de spanning die door de operational amplifier geleverd wordt ten gevolge van de spanningsval over de shunt weerstand correct te meten;
10. De printplaat moet stromen aankunnen tot 30 A;

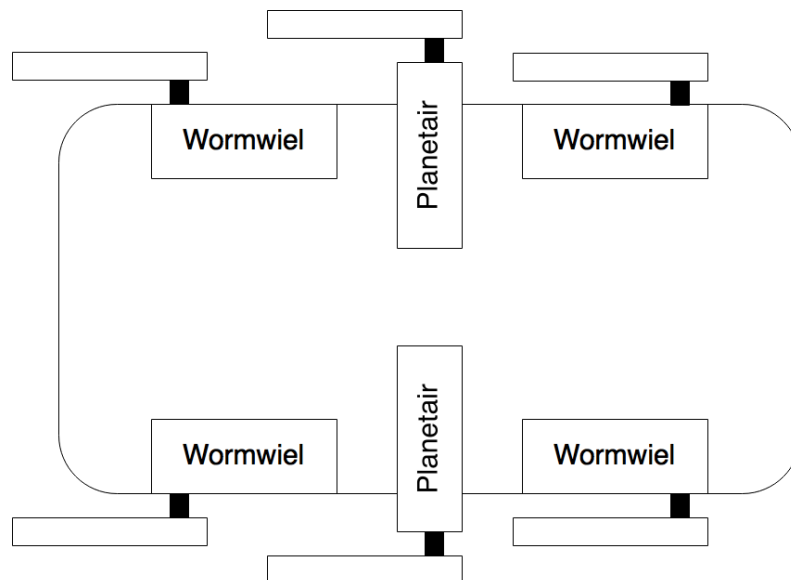
10.11 Risico's

Een risico van de hoge stromen door het bordje is dat er een spoor oververhit raakt en er voor zorgt dat het bordje smelt of vlam vat.

11 Toekomst

11.1 Motoren met wormwieloverbrenging

Een eventuele verbetering voor een toekomstig model robot zou een combinatie van motoren met wormwiel overbrenging en motoren met een planetaire overbrenging zijn. De vier hoekpoten van de Zebro zouden dan met wormwieloverbrenging bevestigd kunnen worden. Het voordeel hiervan is dat de robot stil zou kunnen staan zonder stroom te verbruiken. De motoren kunnen dan langs de rand van de robot naar het midden geplaatst worden. De middelste twee poten kunnen dan een planetaire overbrenging gebruiken waardoor er geen ruimtegebrek zou moeten ontstaan. Om dit idee te kunnen gebruiken zal de backbone opnieuw ontworpen moeten worden.



Figuur 14: Lay-out als er een combinatie van wormwiel en planetaire overbrengingen wordt gebruikt

11.2 Andere poten

Zoals al in het hoofdstuk over de aandrijftypes (2) is besproken is het mogelijk in volgende jaren ander soort poten te gebruiken die energie-efficiënter en sneller kunnen lopen. De meeste tijd zal dan zitten in het ontwerpen van een regelsysteem dat poten aanstuurt.

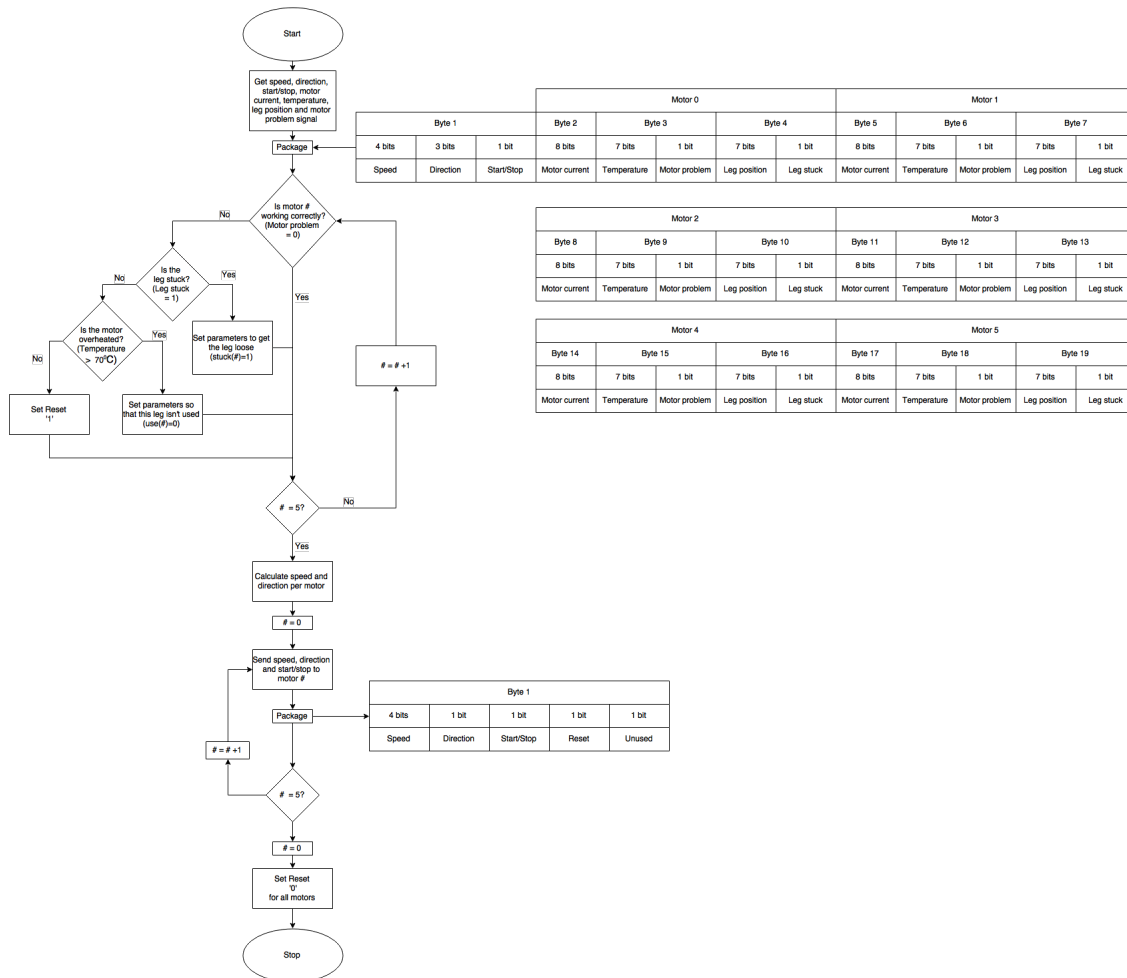
11.3 Controlesysteem uitbreiden

Het is ook mogelijk om de driversoftware zo aan te passen dat de robot ook kan springen. Ook zou de Zebro met andere pootconfiguraties kunnen lopen zodat hij bijvoorbeeld met zijn twee voorpoten zichzelf aan een object kan optrekken. Dat stelt de Zebro in staat om zich beter te redden in moeilijke situaties.

A Lijst van gebruikte afkortingen

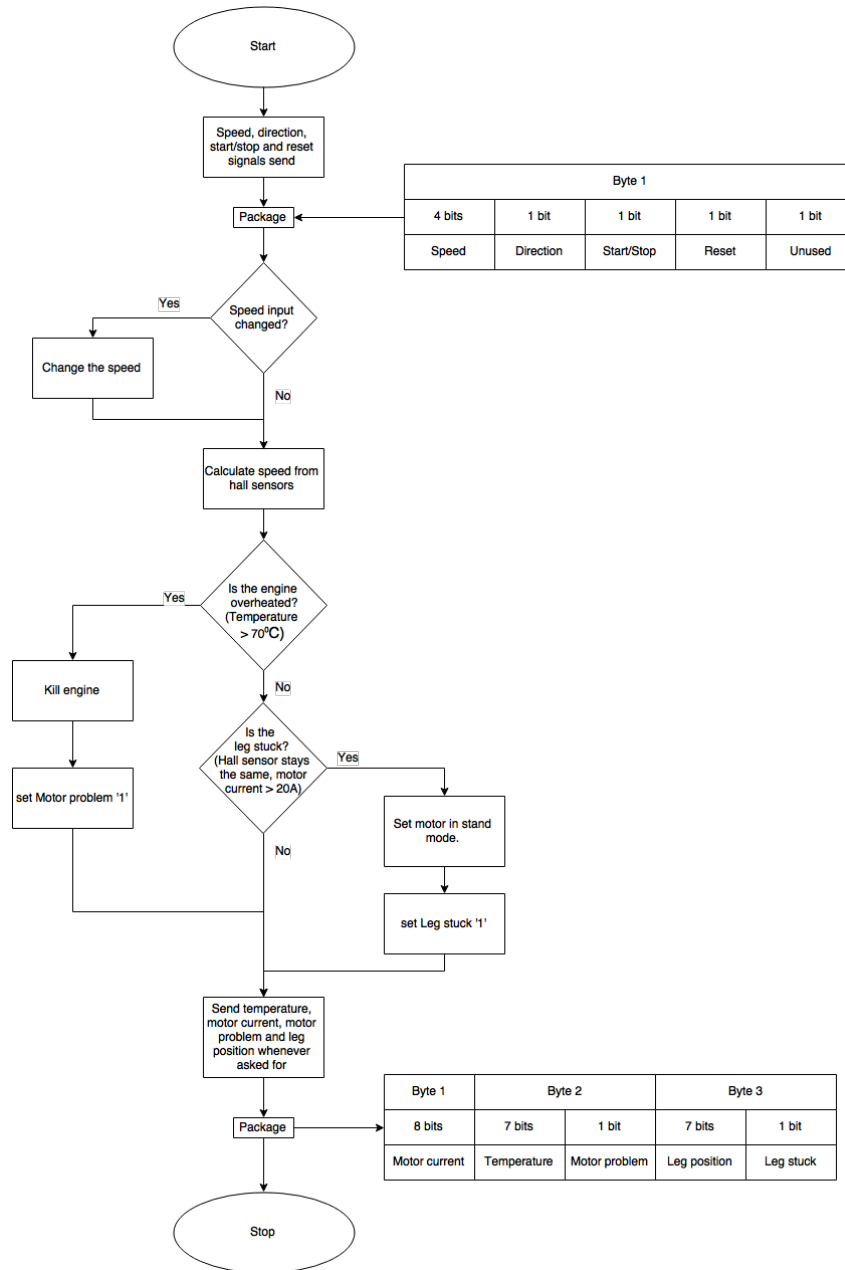
BDC	Brushed DC
BLDC	Brushless DC
BPU	Backbone processing unit
DC	Direct current
GPIO	General-purpose input/output
I ² C	Inter-Integrated Circuit
PCB	Printed circuit board
PWM	Pulse width modulation
rpm	Rotaties per minuut
rps	Rotaties per seconde
ZeMoD	Zebro motor driver

B Flowchart van scheduler op BPU



Figuur 15: Flowchart van de scheduler die uitgevoerd wordt op de BPU.

C Flowchart van driver



Figuur 16: Flowchart van de driver.

Referenties

- [1] Hill climbing. <http://www.rhex.web.tr/incline.mpg>, 2005.
- [2] Leaping. <http://www.rhex.web.tr/leaping.mpg>, 2005.
- [3] Summary of the rhex robot platform. <http://www.rhex.web.tr>, 2005.
- [4] Surface swimming. <http://www.rhex.web.tr/shelley.mpg>, 2005.
- [5] Defense advanced research projects agency. <http://www.darpa.mil>, 2015.
- [6] Bardahl. Wormwiel smeren. <http://www.bardahl.nl/producten/advies-industriele-smeermiddelen/faq-wormwielkasten-smeren/>.
- [7] Guy Cohen. Maxplus algebra. maxplus.org, 2000.
- [8] Clearwater Composites. Properties of carbon fiber. <http://www.clearwatercomposites.com/resources/Properties-of-carbon-fiber>, 2015.
- [9] F. Grimmering E. Z. Moore, D. Campbell and M. Buehler. Reliable stair climbing in the simple hexapod 'rhex'. In *Proceedings of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 3, pages 2222–2227, May 2002.
- [10] fbleus. Tandwieloverbrenging. <http://home.deds.nl/~fbleus/mechanismen/Paginas/Tandwieloverbrenging.htm>.
- [11] Freescale Semiconductor. *Kinetis KL05 32 KB Flash*, 3 2014. Rev. 4.
- [12] T.J.J. van den Boom B. De Schutter G.A.D. Lopes, B. Kersbergen and R. Babuska. Modeling and control of legged locomotion via switching max-plus models. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(3):652–665, June 2014.
- [13] Groschopp. Motor types: Speed vs. torque comparison. <http://www.groschopp.com/technical-resources/quick-reference-guides>, 2015.
- [14] Roel Mouris Hans Keur. Literature review zebro drive types. unpublished, Mei 2015.
- [15] Theo Jansen. Strandbeest. <http://www.strandbeest.com>.
- [16] L. Hardouin J.L. Paillat, P. Lucidarme. Variable geometry tracked vehicle (vgtv) prototype: conception, capability and problems.
- [17] JYQD. *Product information motor driver board*, 3 2015. Rev. 7.3.
- [18] Gabriel Lopes. Zebro - six legged robot. <http://robotics.tudelft.nl/?q=research/zebro-six-legged-robot>, 2011.
- [19] Gabriel AD Lopes, Bart Kersbergen, Bart De Schutter, Ton van den Boom, and Robert Babuška. Synchronization of a class of cyclic discrete-event systems describing legged locomotion. *Discrete Event Dynamic Systems*, pages 1–37, 2011.
- [20] M. Buehler N. Neville. Towards bipedal running of a six legged robot. In *Proceedings of the 12th Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems*, May 2003.
- [21] Nanotec. *Product catalog*. Feldkirch, Germany, 2015.
- [22] NXP Semiconductors. *LPC1769/68/67/66/65/64/63*, 6 2014. Rev. 9.5.

- [23] U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek. Design, modeling and preliminary control of a compliant hexapod robot. In *Proceedings of the IEEE International Conference On Robotics and Automation*, volume 3, pages 2589–96, San Francisco, CA, USA, April 2000.
- [24] SL-MTI. Brushless vs brushed motors. <http://www.dynetic.com/brushlessvsbrushed.htm>, 2002.
- [25] Wutputt. Automatische transmissie. <http://www.autoforum.be/showthread.php?18685-Versnellingsbakken-manueel-automaat-geautomatiseerd-koppelingen-koppelomvormer>, 2006.