

# Dribbel: lopende robot van 10 kg op zestien penlites

*De dynamisch lopende robot Dribbel is een '2D-biped': hij kan niet naar de zijkanten toe omvallen omdat vier benen op een rij worden gebruikt (vergelijkbaar met iemand die op krukken loopt). Dit is gedaan om alleen de voorwaartse loopbeweging te kunnen bestuderen, zonder daarbij direct de complexe 3D-stabilisering te hoeven oplossen. Het uiteindelijke doel is een zo robuust en energiezuinig mogelijke loopbeweging te realiseren. Dit artikel behandelt vooral de praktische kant van het werken aan de robot Dribbel: de ontwerpstrategie, de bouw van de mechanica, de elektronica en de software.*

• *Edwin Dertien en Stefano Stramigioli* •

**D**ynamisch lopen wil zeggen dat de bewegingen van de robot voornamelijk voortvloeien uit zijn eigen dynamica. Actuatoren en regeltechniek komen eigenlijk pas in tweede instantie aan bod. De internationale term voor dit type onderzoek is 'Dynamic Walking'. Volgens passief dynamisch lopen moet het systeem uit zichzelf (passief) al de goede beweging maken. De menselijke loopbeweging kan voor een groot deel als een slingerbeweging worden opgevat. Het uitgangspunt voor de dynamisch lopende robots is dus over het algemeen een eenvoudige mechanische slinger. Het uiteindelijke doel is een zo robuust en energiezuinig mogelijke loopbeweging te realiseren. Dit vakgebied staat tegenover het overwegend Japanse onderzoek naar lopende robots (zoals Honda's ASIMO), waarbij alle vrijheidsgraden met conventionele, niet bepaald energiezuinige, regeltechniek worden bestuurd.

## Advanced Robotics in Twente

Het onderzoek naar Advanced Robotics, zoals de lopende robot Dribbel, wordt uitgevoerd onder leiding van prof.dr.ir. Stefano Stramigioli en onder de vlag van het onderzoeksinstituut IMPACT van de Universiteit Twente. Binnen de vakgroep Control Engineering (Meet- en Regeltechniek) van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica werken op dit moment vijf AIO's aan uiteenlopende projecten die te maken hebben met robotica. Er wordt gewerkt aan 'grasping & manipulation' voor orderpicking, 'haptic feedback' voor medische robots, robotsystemen voor autonome pijpleiding-inspectie, micromanipulators voor microscopisch onderzoek en een aantal mobiele platforms, waaronder de lopende robots.

### Dynamic Walking

Het idee van passieve slingers die een loopbeweging uitvoeren, voert terug op patenten van speelgoedjes uit 1888. Het onderzoek naar Dynamic Walking is in 1990 (nieuw leven ingeblazen door de Canadese onderzoeker Tad McGeer [1]). De passieve constructies van McGeer kunnen op een hellend vlak naar beneden lopen, zonder dat daar extra motoren of regeltechniek voor nodig zijn. In de afgelopen jaren zijn een aantal robots gebouwd die wel van aandrijving en regeltechniek gebruikmaken en die zijn afgeleid van de volledig passieve ‘helling-lopers’. Dribbel is een van die systemen; zie Figuur 1.

Door gebruik te maken van een motor in de heup is het niet nodig dat de robot van een helling loopt; hij kan op een vlakke vloer lopen. De rest van de robot (knieën, voeten) is nog steeds passief.



Figuur 1. Het huidige ontwerp van de robot Dribbel.

### Simulatie

Bij het ontwerp van de robot is zeer uitgebreid gebruik gemaakt van computersimulaties. Allereerst zijn er simpele modellen gemaakt om een geschikte gewichtsverdeling voor de robot te vinden. Het formaat van de robot is grofweg op menselijke schaal gekozen: de robot is 1 meter hoog en heeft geen bovenlichaam. Het gewicht bedraagt ongeveer 10 kg, waarvan het grootste gedeelte in de heup zit. Uit deze eerste simulaties is het benodigde koppel voor de motor in de heup afgeleid. Korte pieken van ongeveer 10 Nm zijn nodig om het ene been voor het andere te slingeren.

Na deze eerste simulaties is de mechanica van de robot ontworpen in SolidWorks, terwijl tegelijkertijd de simulatiemodellen up-to-date werden gehouden met de nieuwste waarden voor massa's, beschikbaar vermogen, beschikbare sensor nauwkeurigheid, etc. De simulaties zijn gedaan met het pakket 20-sim [2], dat ook binnen de vakgroep CE wordt ontwikkeld. Dit pakket gebruikt naast gangbare blokdiagrammen ook bondgraafnotatie, waardoor de focus ligt op het maken van kloppende, power-continue modellen.

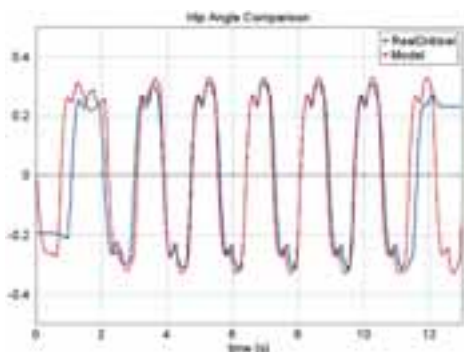
Voor het modelleren van de mechanica in 3D is de nieuwe ‘3D mechanics Toolbox’ gebruikt. Hiermee kan middels een intuïtieve ‘drag&drop’ interface een volledig model (zie Figuur 2) van een mechanisch systeem worden gebouwd. De interface is enigszins vergelijkbaar met hoe in een 3D CAD-omgeving wordt gewerkt. In de simulatie-omgeving wordt de vermogensinteractie en dynamica gekoppeld aan dit kinematisch model. Onder water wordt ‘screw theory’ [3] gebruikt voor het genereren van de dynamische vergelijkingen.



Figuur 2. Afbeelding van het 3D simulatiemodel in de 20-sim 3D mechanics editor

Het uiteindelijke model is gebruikt voor het testen van regelalgoritmes, het toevoegen van extra gewicht door batterijen, maar ook van de effecten van ander materiaal op de voetzolen. Nadat het mechanische prototype was gebouwd, is het simulatiemodel verder verfijnd met gegenereerde meetdata.

Voor toekomstige experimenten is nu een zeer nauwkeurig simulatiemodel beschikbaar. Figuur 3 laat de heuphoek van de robot zelf en die van het simulatiemodel tijdens een test-loop zien. Inmiddels zijn aan het simulatiemodel ook voeten met geactueerde enkels toegevoegd. Deze worden op moment van dit schrijven gebouwd en de robot kan er hopelijk in mei 2007 mee lopen.



Figuur 3. Heuphoek tijdens een korte loopafstand in zowel simulatie als meting aan de echte robot.

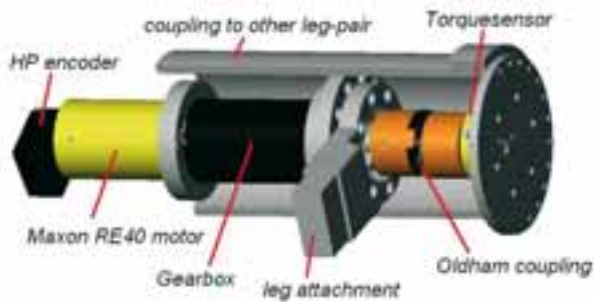
### Besturing

Voor de heupmotor in zowel de simulatieomgeving als de echte robot is een eenvoudige PD-controller gebruikt. Het setpoint voor de controller wordt gespiegeld zodra de voorste voeten de grond raken. Deze eenvoudige regelstrategie is al bij meerdere aangedreven 'passieve' lopers gebruikt.[4][5]. Door het setpoint en de versterking van de regelaar te veranderen, kan de loopbeweging worden beïnvloed. De versterking van de regelaar is erg 'slap' ingesteld: het been dat naar voren gestuwd wordt door de motor haalt het setpoint, maar valt eigenlijk direct weer terug door de zwaartekracht. De heuphoek waarmee de voorste benen de grond raken is dus ook kleiner dan het gegeven setpoint. Bij aanvang van de zwaaibeweging kan de versterking worden gezien als de veerconstante van een passieve veer die tussen beide benen zit.

Het produkt van deze veerconstante en het gegeven setpoint is een maat voor het koppel waarmee het been van achter naar voor wordt geslingerd. Om met een elektromotor ook een puur passief mechaniek te kunnen emuleren, is het nodig dat de motor met vertraging ook aan de last-kant vrij kan bewegen wanneer de motor niet aan staat (back-driveability). Hoewel een vertraging met zeer goede efficiëntie wordt gebruikt, wordt toch enige weerstand onderhouden. Deze kan worden weggeregeld middels een koppelsensor die tussen de uitgaande as van de vertraging en de robotbenen is geplaatst. Met een 0-koppel regeling gedraagt de combinatie van motor en vertraging zich als een extra massa aan een van de benen, zonder de demping van de vertraging. Deze koppelsturing maakt het ook mogelijk om ander gedrag, bijvoorbeeld het plaatsen van een extra veer tussen de benen, te emuleren.

### Mechanica

De heup is het belangrijkste gewricht in de robot, omdat het het enige is dat wordt bestuurd. De knieën en de enkels zijn passieve scharnieren. De heup is ontworpen rondom de belangrijkste actuator, een Maxon RE40 150 Watt gelijkstroommotor met een 1:73 vertering. Het mechanisch ontwerp van de heup bestaat uit twee concentrische aluminiumbuizen die gelagerd om elkaar draaien. De binnenbenen zijn aan de buitenste buis bevestigd, de buitenbenen aan de binnenbuis die langer is dan de buitenste buis. In de binnenbuis is de motor geplaatst. Via een Oldham-koppeling en de genoemde koppelsensor (zie Figuur 4) oefent de motor een kracht uit tussen beide benen. Er is voor de buisconstructie gekozen omdat dit de best bekende stijfheid per massa-eenheid biedt en een zeer interessante vorm oplevert. Uiteindelijk zijn zowel de aandrijfmotor, de motorversterker en de batterijen geplaatst in een buis van 6 cm doorsnee met een lengte van 54 cm. De benen bestaan uit rechthoekige aluminiumprofielen die middels koppelstukken aan de heupbuizen geschroefd kunnen worden. Alle gewrichten zijn modulair uitgevoerd en kunnen eenvoudig worden verwisseld of vervangen. Tot op heden zijn twee soorten voeten getest: de eerste voeten waren klein en hadden een platte zool voorzien van een dun laagje anti-sliprubber. Daarna is een tweede set voeten gemaakt van dik rubber. Uit simulatie en analyse bleek dat extra vering in de voeten voor een efficiëntere en meer robuuste loopbeweging zorgt. De montage van een set halve stuitballen onder de robot kon deze simulatie verifiëren [6].



Figuur 4. SolidWorks tekening van de aandrijving

Voor de knieën is een vergrendelingsmechaniek ontwikkeld; zie Figuur 5. Hoewel de knieën zelf niet actief worden bewogen, is het nodig dat deze worden vergrendeld zodra het gewicht van de robot gedragen moet worden. Het eerste ontwerp bestond uit een mechanisme waarbij een spoel de vergrendelingspin terugtrok op het moment dat de knie moest buigen. Dit systeem bleek echter zeer onbetrouwbaar, zodat de keuze uiteindelijk viel op een systeem met deurvergrendelingsmagneten. Hoewel deze oplossing niet bepaald energie-efficiënt is (tijdens lopen gaat ongeveer 70% van de energie in de knieën zitten) is het een betrouwbaar mechaniek en een grote verbetering ten opzichte van het voorgaande.



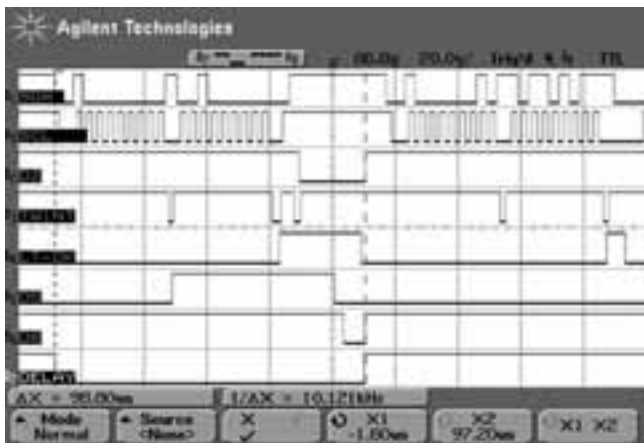
Figuur 5. Het huidige mechaniek met de magneten (links) en het oude mechaniek met de vergrendelingspin.

## Elektronica

Het elektronisch systeem verzorgt het meten, sturen en regelen van de robot. Op de robot wordt een modulair gedistribueerd regelnetwerk gebruikt, enerzijds om de hoeveelheid kabels te verminderen, anderzijds om vervanging en toevoeging van extra modules en vrijheidsgraden te faciliteren. Elk gewricht heeft een print met microcontroller om de encoders (HP5540 series) en bijvoorbeeld de voetschakelaars in te lezen, of de knievergrendeling aan te sturen; zie Figuur 6. De prints zijn met elkaar verbonden door een TWI-bus (two-wire interface, ook bekend als Philips' I<sup>2</sup>C bus). Op deze manier zijn er slechts vier draden nodig die alle modules op de robot met elkaar verbinden. Over de bus worden met 100 Hz alle data van de robot door de hoofdcontroller verzameld. Het dataverkeer zelf gaat met 400 kHz; zie Figuur 7.



Figuur 6. Print op de knie. Deze print leest de encoder in, bestuurt de knievergrendeling en is verbonden met de TWI-bus door de vier gekleurde draden.



Figuur 7. TWI-data op oscilloscoop.

Op de prints zijn Atmel ATmega8 RISC microcontrollers gebruikt. Deze kleine microcontrollers voeren bijna 16 MIPS uit bij 16 MHz. Benodigde registers en hardware voor de TWI-bus zijn al in de chip aanwezig. De encoders in de knieën en de voeten worden gesampled op 40 kHz en quadratuur gedecodeerd. De maximale resolutie van de gebruikte encoder is 500 ppr. In quadratuur levert dit 2000 ppr, wat overeenkomt met een hoekresolutie van  $0,18^\circ$ . Hoeksnelheden worden in de microcontroller zelf berekend. De software is geschreven in C, met de compiler van CodeVision. De TWI-libraries van de GNU-GCC port voor AVR (WinAVR) zijn aangepast voor gebruik binnen CodeVision. Op moment van dit schrijven wordt alle software omgeschreven naar WinAVR (GNU-GCCAVR).

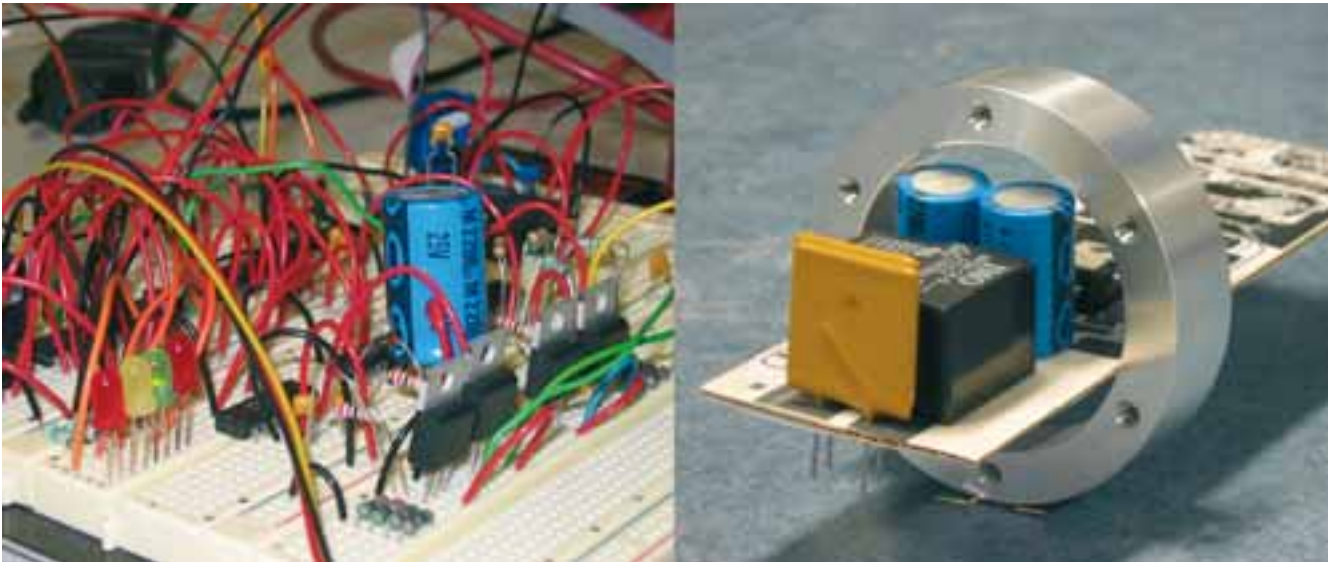
Elke print beschikt naast de TWI-bus over een viertal LED's voor statusinformatie en een RS-232 poort voor communicatie en foutdetectie. De motorversterker is aangesloten op dezelfde TWI-bus, ook weer met dezelfde ATmega8 als gebruikt in knieën en voeten. De brug zelf is een eigen ontwerp gebaseerd op de IR2110 driver chip. Beveiliging, temperatuur en stroombegrenzing worden gemonitord door de microcontroller. Een relais in de hoofdvoedingsleiding kan zonodig het vermogen naar de motor afsluiten. Ook zijn automatische zekeringen in de leiding opgenomen. Voor ruis- en storingsonderdrukking zijn overspanningsdiodes, grote condensatoren en een klein 'snubber'-netwerk gebruikt.

Bij de heupmotor wordt ook een HP5540-serie encoder als sensor gebruikt. Een PID-lus met een updatefrequentie van 1 kHz wordt door de gebruikte ATmega8 van de motorversterker uitgevoerd. Verstærkingsfactoren en setpoints worden vanuit de hoofdcontroller over de TWI-bus doorgegeven. Het was lastig om de motorversterker zodanig te ontwerpen dat hij achter de motor in de buis van 6 cm doorsnee geplaatst kon worden. Vooral vanwege de nodige koeling en grote onderdelen zoals condensatoren en relais. Eerst is dus een kartonnen versie van de printplaat gemaakt om het formaat te kunnen controleren; zie Figuur 8. Uiteindelijk is achter de motorversterker nog een accupack van 16 NiMh penlites geplaatst. Dit pack levert een spanning van minstens 19,2 V en biedt voldoende capaciteit om de robot, zelfs bij het hoge stroomverbruik van de knieën, een half uur te laten lopen.

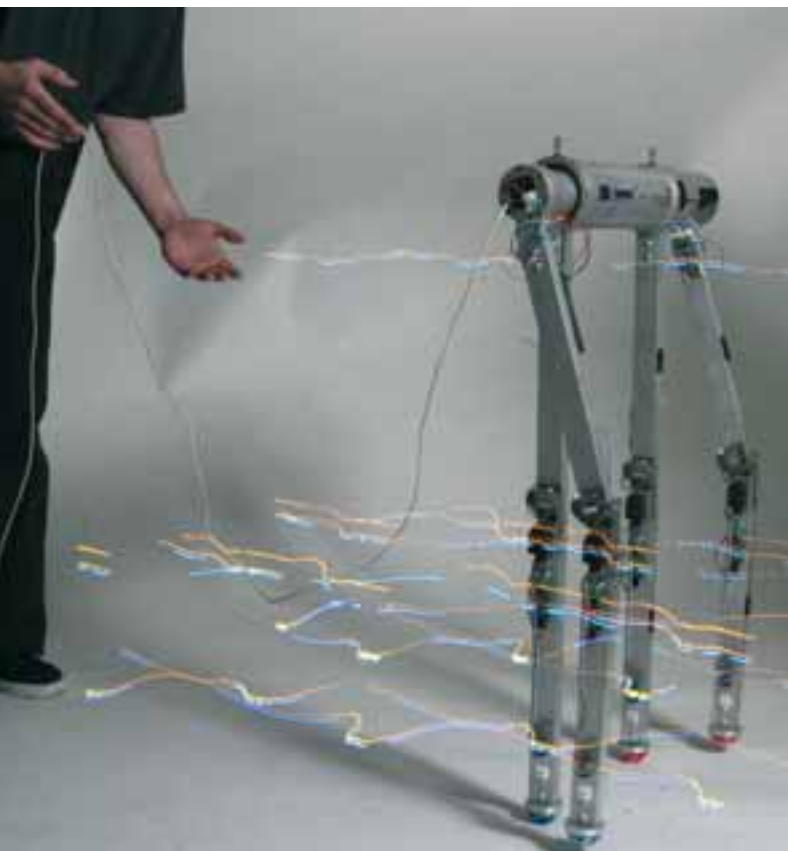
Naast de optische encoder voor hoekmeting is ook een koppelsensor in de heup geplaatst. Ook voor deze sensor is een signaalversterkerprint ontworpen die verbonden is met de TWI-bus. Ook kan het koppelsensorsysteem met een lokale SPI-bus direct met de motorversterker verbonden worden om een lokale koppel-sturingslus te sluiten. Voor de koppelsensorversterker is een geïntegreerde versterker van Maxim (MAX1452) gebruikt. De ATmega8 wordt gebruikt om de signalen van dit IC te interfaceren met de aanwezige 10bits A/D-converter; daarnaast wordt ook de programmering van de MAX1452 door de ATmega8 gedaan.

De laatste microcontroller op de robot (welke het totaal op elf microcontrollers op dezelfde bus brengt) is de hoofdcontroller, het 'brein' van de robot. Het loopalgoritme en interfacing van de robot met de simulatieomgeving worden door deze controller uitgevoerd. Op de hoofdcontroller is een ATmega128 gebruikt. Deze fungeert als TWI-bus master (alle andere modules zijn 'slaves' om communicatieproblemen te voorkomen). De hoofdcontroller verzamelt de data van alle slaves (motortoestand, alle hoeken en hoeksnelheden) en stuurt commando's naar de slaves (ontgrendelen van de knieën, de setpoints voor de heupmotor). Tussen de hoofdcontroller en een PC kan een seriële link worden gelegd, zodat op 100 Hz vanuit de PC in real time de status van de robot kan worden opgevraagd, voor het opslaan en analyseren van de loopbeweging, het gebruikte vermogen, etc. Het opslaan en analyseren van deze gegevens gebeurt ook weer in dezelfde 20-sim simulatieomgeving.





Figuur 8. (Werkende) insteekbord-versie van de 150W motorversterker en de kartonnen versie van de print.



### Experimenten

De robot loopt inmiddels bijna twee jaar rond. De meeste experimenten zijn gedaan in de (kleine) labruimte waar de robot rechte stukken van zo'n 10 meter kan lopen; zie Figuur 9. Voor de eerste tests werd gebruik gemaakt van een beveiligingskabel boven de robot. Na verloop van tijd werd het vertrouwen in de techniek wat groter, zodat de lijn in onbruik geraakte. Niet geheel terecht; de robot heeft inmiddels een paar stevige valpartijen ondergaan. Een criterium voor stabiliteit van een looprobot dat door ingewijden wel wordt gebruikt, is de afstand die de bouwer durft te nemen tot de robot terwijl deze aan het lopen is. Hoe dan ook, de robot heeft alle valpartijen overleefd, met geen ernstigere schade dan een gebroken encoderbehuizing.

Figuur 9. Dribbel tijdens een loopbeweging. De foto is gemaakt door in een donkere ruimte de sluitertijd lang open te zetten, waarbij één keer is geflitst. De lichtstrepen geven de positie in tijd en ruimte weer van de status- en indicatie-LED's op alle modules op de robot. De onderbrekingen in de patronen worden veroorzaakt door de knipperfrequentie van de LED's. De blauwe strepen geven de status van encoders weer, de gele het communicatiepatroon (100 Hz) weer.

De robot kan, terwijl hij slechts door een enkele motor bestuurd wordt, op verschillende snelheden verschillende soorten loopbewegingen uitvoeren. Wat energieverbruik betreft, het is mogelijk om met slechts 1,6 Watt motorvermogen te lopen. Dat maakt deze robot een stuk efficiënter dan bijvoorbeeld de Japanse robot ASIMO die meer in de orde van 100 W gebruikt. Om een eerlijke vergelijking te maken wordt efficiëntie bij robots uitgedrukt in de energiekosten om een bepaald gewicht over een bepaalde afstand te transporteren. Deze cmt-waarde [1] is met 0,06 laag, zelfs in vergelijking met andere, of passief dynamisch lopende, robots.

### Conclusie

Het beschreven ontwerptraject werkte goed. Het parallel werken met simulatie tijdens het ontwerpproces heeft een goed werkend prototype opgeleverd dat robuust genoeg is voor experimenteel labwerk. De simulatiemodellen zijn betrouwbaar genoeg om de effecten van toevoegingen zoals andere voeten of andere gewichtsverdeling te kunnen voorstellen.

### Auteursnoot

Stefano Stramigioli studeerde in Bologna en promoveerde in Delft op het gebied van analytische mechanica en robotica. In 2005 werd hij benoemd op de persoonlijke leerstoel van Advanced Robotics in de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente. Edwin Dertien is werkzaam als medewerker onderzoek bij de vakgroep Control Engineering in dezelfde faculteit. Zijn afstudeerproject [7] betrof het ontwerp en realisatie van de lopende robot Dribbel, waarvoor hij simulaties maakte en

een groot deel van de hardware en alle elektronica en software ontwierp.

Het ontwerp en de bouw van de robot was een groepsprestatie, onder begeleiding van Stefano Stramigioli. Niels Beekman, Gijs van Oort, Eddy Veltman en Vincent Duindam hebben een grote bijdrage geleverd aan het ontwerp en de simulaties.

### Bibliografie

- [1] T. McGeer, *Passive Dynamic Walking*, Int. J. Robotics Res., vol. 9, par. 10.3, p 72, 1990.
- [2] Controllab products, *20-sim, ver3.6*. [www.20sim.com](http://www.20sim.com), 2006.
- [3] S. Stramigioli and H. Bruyninckx, *Geometry and screw theory for robotics*, Tutorial during ICRA 2001, 2001.
- [4] M. Wisse and J. van Frankenhuyzen, *Design and construction of Mike; a 2D autonomous biped based on passive dynamic walking*, AMAM, 2003.
- [5] S. H. Collins and A. Ruina, *A bipedal walking robot with efficient and human-like gait*, 2005.
- [6] E. Veltman, *Foot shapes and ankle actuation for a walking robot*, MSc thesis, 002CE2006, May 2006.
- [7] E.C. Dertien, *Realisation of an energy-efficient walking robot*, MSc thesis, 022CE2005, June 2005.

### Informatie

[www.ce.utwente.nl](http://www.ce.utwente.nl)  
[e.c.dertien@utwente.nl](mailto:e.c.dertien@utwente.nl)

