

Dynamisch geregeld

Citation for published version (APA):

Nijmeijer, H. (2003). *Dynamisch geregeld*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2003

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TU/e

technische universiteit eindhoven

Intreerede
31 oktober 2003

prof.dr. H. Nijmeijer

dynamisch geregeld

/ faculteit werktuigbouwkunde

Intreerede

Uitgesproken op 31 oktober 2003
aan de Technische Universiteit Eindhoven

dynamisch geregeld

prof.dr. H. Nijmeijer

Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Ik moet bekennen, dat ik er bij de voorbereiding van deze oratie achter gekomen ben, dat ik me niet geheel gehouden heb aan de afspraak dat de intreedere binnen twee jaar na de benoeming wordt uitgesproken. Mijn benoeming als deeltijdhoogleraar aan de TU/e is ingegaan op 1 september 1997. Sinds 1 mei 2000 ben ik als voltijds hoogleraar werkzaam aan deze universiteit. Kortom, de periode van twee jaar heb ik dan ook ruimschoots tweemaal overschreden. Maar vandaag wil ik u dan toch het een en ander vertellen over mijn visie op het onderzoek en onderwijs rond mijn vakgebied. Mijn vakgebied Dynamics and Control, in het Nederlands Dynamica en Regelen, vindt u terug in de titel van deze rede. Ik heb geprobeerd om de presentatie van vandaag geregeld dynamisch te laten overkomen.

Onderzoek in Dynamics and Control

Het vakgebied van Dynamica en Regelen is zeer breed. In essentie gaat het om het terrein waar de mechanische modelvorming, de analyse en het regelen elkaar ontmoeten. Ik zal niet proberen om een uitgebreidere beschrijving te geven van wat dit vakgebied allemaal omvat of zou kunnen omvatten. Liever concentreer ik me op een aantal van de deelgebieden binnen het vakgebied, waarop ik samen met mijn groep actief ben. De hier gegeven omschrijving van Dynamica en Regelen is nog steeds zo algemeen dat die, naar ik vermoed, nog weinig verduidelijkt. Ik zal daarom het vakgebied beschrijven door een aantal onderzoeksthema's te bespreken, waaraan in de sectie Dynamics and Control gewerkt wordt. De volgende onderwerpen zullen achtereenvolgens aan de orde komen: de niet-lineaire dynamica, de niet-lineaire regeltechniek, synchronisatie van systemen, de voertuigdynamica, geluid en trillingen, optimalisatie en computer aided engineering.

De niet-lineaire dynamica

Volgens het woordenboek houdt de dynamica zich bezig met de leer der bewegingsverschijnselen en dus zal de niet-lineaire dynamica zich wel richten op de leer van de niet-lineaire bewegingsverschijnselen, maar ik ben bang dat ik hiermee de goedwillende buitenstaander nog niet erg veel duidelijk heb gemaakt. De basis van de dynamica ligt ongetwijfeld in de wet van Newton, die weergegeven wordt door

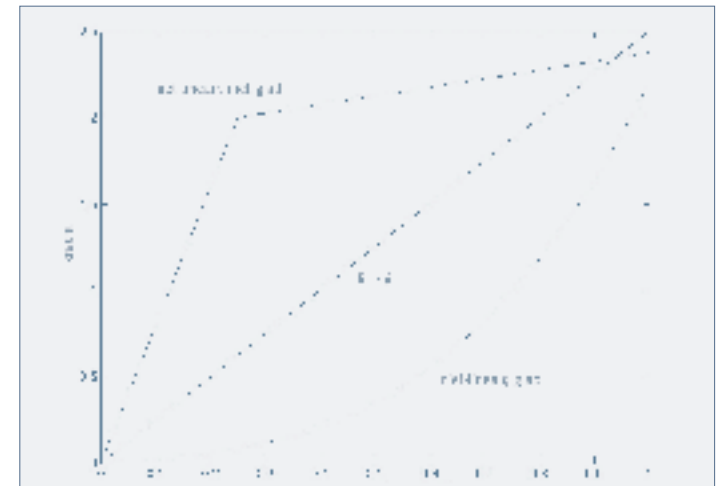
$$F=ma \quad (1)$$

Dit is de enige wiskundige formule die ik vandaag zal presenteren; ik wil hierbij dan ook wat langer stilstaan. In bovenstaande vergelijking is F de kracht, m de massa en a de versnelling van een object. Dat kan een toltje zijn, een balletje aan een veer, of een veel gecompliceerdere mechanische constructie, zoals een auto of cd-speler. De essentie van de wet van Newton is, dat de beweging van het toltje of kogeltje er volledig door wordt beschreven. Immers, door de versnelling a te integreren naar de tijd krijgen we de snelheid v , en door nogmaals te integreren kunnen we de positie of plaats x van het object op ieder tijdstip bepalen.

Overigens moet hierbij wel opgemerkt worden, dat ook de beginsnelheid en -positie hiervoor bekend moeten zijn. Om met bovenstaande vergelijking te kunnen rekenen, moeten we de kracht F op ieder tijdstip kennen. Afhankelijk van het specifieke mechanische systeem kan de kracht F bepaald worden, of in theorie in ieder geval berekend worden. Als voorbeelden hiervan kunt u denken aan de veerkracht, de dempingskracht of de centrifugaalkracht, maar ook aan de wrijvingskracht, waarbij afhankelijk van het systeem de kracht F af kan hangen van de positie x en/of de snelheid v . Als de kracht F afhangt van positie en snelheid, wordt de vergelijking (1) een tweede-orde-differentiaalvergelijking, waarbij de plaats x in principe op elk tijdstip uitgerekend kan worden. Veel mechanische systemen laten zich bij benadering beschrijven als een lineair systeem.

figuur 1

De kracht F als functie van de verplaatsing/snelheid



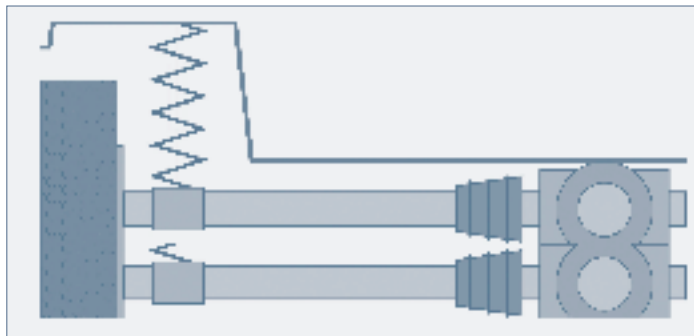
In dat geval is de kracht een lineaire functie van de positie x en de snelheid v . Met andere woorden, F is te schrijven als de som van kx en dv , waarbij k en d bepaalde constanten zijn. Grafisch betekent dit, zie figuur 1, dat F weergegeven als functie van x , respectievelijk v , eruit ziet als een rechte lijn. Op een soortgelijke manier is F een niet-lineaire functie van x , respectievelijk v , als er een niet-rechthoekig verband bestaat tussen x , respectievelijk v , en F .

Een illustratief voorbeeld van een lineaire kracht F vormt de vering van een autowiel, zie figuur 2.

Bij de niet-lineaire dynamica valt de kracht F niet meer op zo'n eenvoudige lineaire wijze te schrijven, maar hangt deze op een gecompliceerdere, niet-lineaire manier af van de positie x en snelheid v . Het opmerkelijke is, dat (bijna) alle mechanische systemen in zekere mate niet-lineair zijn. Alleen, we kunnen vaak de bewegingen van het systeem voldoende nauwkeurig beschrijven met verwaarlozing van de niet-lineaire termen. U kunt hierbij denken aan de wrijvingkrachten of de luchtweerstand die een mechanisch systeem ondervindt.

figuur 2

de vering van een autowiel



Ik heb in de beschrijving van lineaire dynamica al een paar maal de omschrijving 'bij benadering' gebruikt. Dit is een van kernbegrippen uit de (toegepaste) dynamica. Hoe goed kunnen we de dynamica van een robotsysteem beschrijven door (1)? Deze vraag is op meerdere manieren van belang. Het vereist eigenlijk aandacht voor drie dingen. We moeten

- een goed model zoals beschreven in (1) kunnen bepalen, dus inclusief de bijbehorende krachten F
- goede numerieke/wiskundige berekeningen en simulaties aan de hand van het model kunnen uitvoeren
- het model experimenteel kunnen valideren

Als u hierover nadenkt, zult u ontdekken dat de gewenste precisie zowel bij de modelvorming, als bij de simulaties en bij het experimenteren aan de orde komen. De hedendaagse technologie vraagt in al haar toepassingen een steeds grotere precisie. Om daaraan tegemoet te komen, is het dus zaak om zowel bij het modelleren, als bij het simuleren en bij het

experimenteren naar toenemende nauwkeurigheid te streven. Waar het vandaag nog volstaat om een nauwkeurigheid van bijvoorbeeld 1 mm te halen, zal over een paar jaar gevraagd worden naar 0.1 mm. Het zal duidelijk zijn dat de vraag hoe goed een lineaire of niet-lineaire dynamische beschrijving is, afhangt van de meetbare resultaten aan de hand van enerzijds het model en anderzijds het experiment. Het oude paradigma van Simon Stevin, 'Menghen der Spiegheling ende Daet', doet hierbij eens te meer opgeld.

figuur 3

Simon Stevin

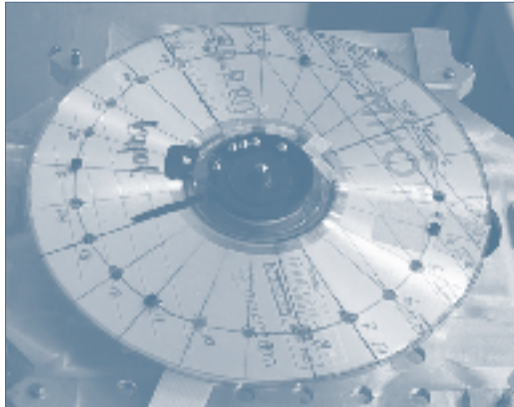


Simon Stevin leefde van 1548 tot 1620 en was leermeester van stadhouder Maurits op allerlei gebieden, zoals vestingbouw en wiskunde. Voor een beknopt portret van Stevin, zie [7]. Voor Stevin was de combinatie van de theorie, 'De Spiegheling', en de praktijk, 'De Daet', van essentieel belang. Dit motto misstaat de hedendaagse werktuigbouwer en student werktuigbouwkunde bepaald niet! Uit wat ik hiervoor gezegd heb, blijkt dat in toenemende mate het niet meer volstaat om een benaderende lineaire beschrijving van een dynamisch fenomeen te gebruiken. Ook de niet-lineariteiten moeten worden meegenomen in de modellering, de analyse en de simulaties.

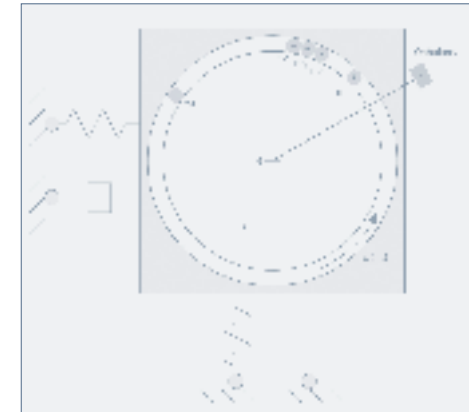
Ik wil hiervan een voorbeeld behandelen, namelijk de Automatic Balancing Unit, kortweg de ABU. De ABU is ontworpen als een mechanisme dat een eventuele massa-onbalans op een cd-schijfje in een cd-speler automatisch moet compenseren. Het ziet er als volgt uit:

figuur 4

Automatic Balancing Unit



In de figuur ziet u een aantal metalen kogeltjes, die in een ringvormige gleuf mee kunnen draaien met de ronddraaiende cd. Vanwege het snelle ronddraaien van de cd veroorzaakt een onbalans op de cd mogelijk trillingen, die van invloed zijn op het goed functioneren van de cd-speler. Het idee van de ABU is nu, dat de kogeltjes, die vrij met de cd rond kunnen draaien, zich zó positioneren dat ze de onbalans op de cd zullen compenseren, zie figuur 5.



Automatic Balancing Unit schematisch

figuur 5

Inderdaad, dit is een mooi principe, maar werkt het ook?

De hiervoor getoonde figuren zijn afkomstig van een door Philips Optical Storage ontwikkelde testopstelling van een ABU, die onder-tussen in het DCT laboratorium staat. Het DCT laboratorium is het labo-ratorium van de Dynamics and Control Technology-groep, die gevormd wordt door de sectie Control Systems Technology van collega professor Maarten Steinbuch en de Dynamics and Control-sectie. Aanvankelijk in samenwerking met Philips Optical Storage, en later alleen, hebben we geprobeerd de dynamica van de ABU te analyseren. Het model dat de beweging van de kogeltjes beschrijft – mits ze niet botsen – is in feite gebaseerd op Newtons beschrijving, met dien verstande dat we ook de wrijvingskracht die de kogeltjes in de gleuf ondervinden, moeten mee modelleren. Immers, zonder deze wrijvingskracht komen de kogeltjes niet tot rust ten opzichte van de draaiende cd, en kan er ook geen sprake zijn van het succesvol compenseren van de onbalans.

De dynamica van de ABU is kenmerkend voor een hele klasse van systemen. De optredende wrijvingkracht is niet alleen niet-lineair maar is bovendien ook niet-glad. In wiskundiger bewoordingen betekent dit, dat de wrijvingskracht niet meer opgevat kan worden als een mooie continue – glad verlopende – functie van de rotatiesnelheid. In een grafische weergave zoals in figuur 1 vertoont de kracht als functie van de rotatiesnelheid een knik. Dergelijke niet-gladde mechanische systemen komen zeer veel voor; niet alleen wrijving is een oorzaak van dergelijke



discontinuïteiten, maar ook botsingen, contact en constraints geven aanleiding tot mogelijke niet-gladde dynamische verschijnselen. Zulke niet-gladde systemen vormen een zwaartepunt binnen het onderzoek van de sectie. Naast de moeilijkheid van het goed modelleren van dergelijke fenomenen, is de analyse van dergelijke systemen buitengewoon uitdagend, maar ook lastig. Met name de parameterafhankelijkheid van de dynamica van zulke systemen is in het algemeen zeer complex en geeft aanleiding tot een uitgebreid scala aan bifurcaties, zie [12]. In het voorbeeld van de ABU betekent dit, dat afhankelijk van de hoeksnelheid van de ABU de onbalans wel of niet gecompenseerd wordt. We kunnen naar verwachting nog jaren in deze richting verder onderzoek doen. Het moge duidelijk zijn, dat hierbij wat mij betreft nadrukkelijk Stevins paradigma van 'Spiegeling ende Daet', hoewel lastig in theorie en experiment, overeind blijft. Juist voor niet-gladde systemen is het cruciaal om de deels nog te ontwikkelen theorie en experimenten in samenhang te ontwikkelen.

De niet-lineaire regeltechniek

In het voorgaande heb ik laten zien, dat de dynamica zich bezighoudt met het modelleren en analyseren van mechanische systemen. Voor mij inherent hieraan verbonden is de regeltechniek, waarbij de vraag centraal staat hoe het systeem op een gewenste of optimale manier geregeld kan worden. Een van de oudere bekende voorbeelden van een regelsysteem is de regeling van een stoommachine, zoals die door James Watt is ontwikkeld in 1763.

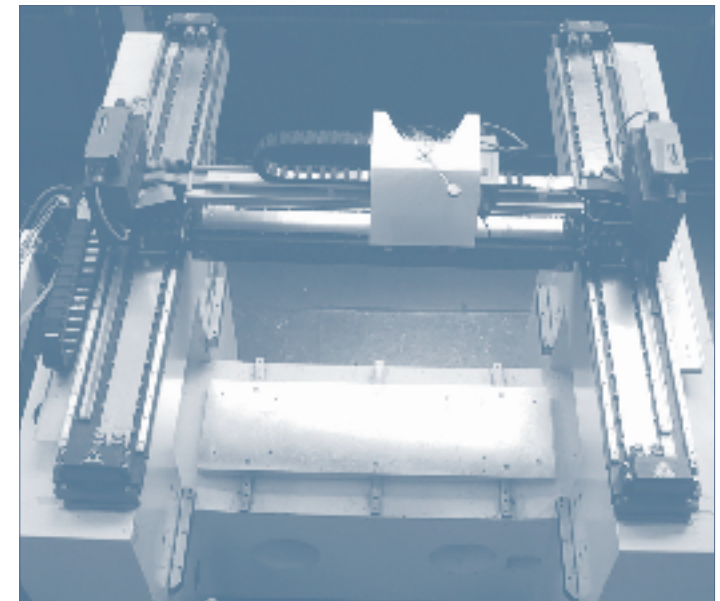
Tegenwoordig valt de regeltechniek niet weg te denken uit ons dagelijks leven. Denk aan de thermostaatregeling in woningen, het afspelen van een cd-speler, de ABS-regeling in een auto, enz. Veel van de in de industrie gebruikte regelaars zijn PID-regelaars. Hierbij staat de P voor proportioneel, I voor integrerend en D voor differentiërend, de acties waarmee het systeem correcties uitvoert op basis van het gemeten verschil van een uitgangsgrootheid en zijn gewenste waarde. Juist in een mechanische context valt het zeer goed te verklaren, dat een PID-regelaar goed bruikbaar is voor het regelen van systemen beschreven door een tweede-orde-dynamica als in vergelijking (1), waarbij we een externe kracht op het systeem kunnen uitoefenen.

Ik heb eerder al duidelijk gemaakt, dat bijna alle mechanische systemen in zekere mate niet-lineair gedrag vertonen. Vaak kunnen de niet-lineaire effecten uitstekend gecompenseerd worden middels een lineaire

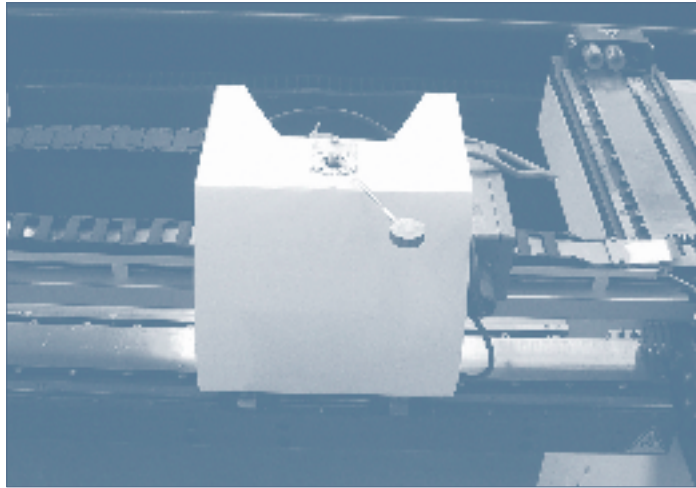
PID-regelaar. Met de toenemende vraag naar nauwkeurigheid wordt echter de uitdaging groter om ook niet-lineaire regelaars te ontwikkelen. Daarnaast is er een grote klasse van mechanische dynamische systemen die inherent niet-lineair zijn en die niet met lineaire technieken te regelen zijn. Ik denk hierbij met name aan de zogenoemde 'under-actuated' systemen; dat zijn systemen waarbij het aantal vrijheidsgraden groter is dan het aantal actuatoren. Zie bijgaande figuren 6 en 7 voor een illustratie van een systeem van drie vrijheidsgraden en twee actuatoren.

figuur 6

H-brug



roterende arm op de
H-brug



figuur 7

U ziet hier de H-brug, een servo-systeem voor het plaatsen van componenten op chips. De opstelling is afkomstig van het Philips Center for Industrial Technology en staat in het DCT laboratorium. Door een vrij-draaiende roterende arm op de opstelling te monteren, hebben we een ondergeactueerd systeem gekregen, dat gebruikt kan worden voor het uittesten van geavanceerde regelstrategieën (zie [1]). De drie lineaire motoren kunnen gebruikt worden voor de zijwaartse en voorwaartse verplaatsingen. De roterende arm wordt niet rechtstreeks aangedreven. Hoewel de opstelling op deze manier wat kunstmatig mag lijken, vertoont deze grote overeenkomsten met een schip dat aangedreven wordt door twee voorwaartse aandrijfmotoren. Het dynamische model voor de H-brug met extra roterende arm is een samenstelling van een drietal gekoppelde vergelijkingen als in (1), waarbij echter voor de rotatie van de arm geen externe kracht aanwezig is. Het regelen van de positie en snelheid van het eindpunt van de ronddraaiende arm is een typisch voorbeeld van een niet-lineair regelprobleem. Elke lineaire regelstrategie die gebaseerd is op de linearisatie van het mechanische model is gedoemd te falen; het is een essentieel niet-lineair probleem!

In theorie is er een aantal niet-lineaire positierelators beschikbaar voor het hier weergegeven mechanische systeem. De experimentele resultaten laten echter nog veel te wensen over. Enerzijds wordt dit bemoeilijkt door onnauwkeurigheden in het model en door de wrijving

in de lagering van de ronddraaiende arm. Anderzijds veroorzaakt de al genoemde inherente niet-lineariteit grote problemen in een dergelijk regelprobleem.

Het voorbeeld van de ondergeactueerde H-brug raakt aan de kern van de lineaire en niet-lineaire regeltechniek. Naast de vraag of er een lineaire of niet-lineaire regelaar ontworpen kan worden die een gewenste positie of traject kan volgen, is de ‘performance’ van essentieel belang. De performance, of in goed Nederlands ‘de prestatie’ van een geregeld systeem, lineair of niet-lineair, is in de praktijk allesbepalend. De prestatie van een systeem laat zich, zeker voor niet-lineaire systemen, niet eenvoudig in een paar woorden vatten. Wellicht is één van de grootste uitdagingen voor de niet-lineaire regeltechniek wel het ontwikkelen van op prestatie gebaseerde regelstrategieën. Voor een volledige appreciatie van de niet-lineaire regeltechniek zal daarbij, in navolging van Stevin, de koppeling van theorie en experiment opnieuw een grote uitdaging vormen. Voor lineaire systemen heeft het jaren geduurd voordat een prestatiegericht regelaarontwerp tot ontwikkeling is gekomen. Het niet-lineaire probleem is zodanig lastig, dat het oplossen hiervan nog jaren van intensief onderzoek zal vergen. Het ligt voor de hand om eerst de performance voor bepaalde klassen van niet-lineaire mechanische systemen te behandelen. In hoeverre hierbij concepten als mechanische energie en vermogen wel of niet van belang zijn, moet daarbij nog blijken.

Zoals hiervoor al betoogd, vertonen sommige mechanische systemen in zekere mate niet-gladde dynamische verschijnselen. Eén van de uitdagingen waar ik de komende tijd zeker verder aan zal gaan werken, is het regelen van dergelijke niet-gladde systemen en algemener, het regelen van hybride systemen. Hybride systemen zijn systemen waarbij het systeem zich in verschillende ‘modes’ kan bevinden, zie [11]. Het regelen van dergelijke systemen is binnen de regeltechniek momenteel een van de meest uitdagende vragen. Maar niet alleen binnen de regeltechniek vormen hybride systemen een prominent onderzoeksgebied.

In ‘embedded dynamical systems’ wordt de integratie van de mechanica, de elektrotechniek en de informatica (software) nagestreefd om te komen tot een zo goed mogelijk functionerend apparaat. Een buitengewoon interessant en inspirerend voorbeeld hiervan is het Boderc-project waarin zes promovendi in samenwerking met diverse andere onderzoekers uit het bedrijfsleven proberen na te denken over de



printer van de toekomst. Het team van aio's is gemêleerd, het telt twee afgestudeerde elektrotechnici, twee werktuigbouwkundigen en twee informatici.

Het project, dat vorig jaar is gestart, wordt gesponsord door Senter en vindt plaats onder de paraplu van het ESI, het Embedded Systems Institute dat gevestigd is op de TU/e. Ik verwacht dat er rond 'embedded dynamical systems' de komende tijd nog veel meer onderzoek gedaan moet worden. Daarbij zal veel praktische en theoretische kennis nodig zijn van niet-gladde en schakelende mechanische systemen.

Synchronisatie en coördinatie van mechanische systemen

De officiële definitie van synchronisatie is de overeenkomst in tijd van zekere processen. Ik wil u een wellicht wat discutabel voorbeeld niet onthouden. Enige jaren geleden besteedde de wetenschapsbijlage van een landelijk verschijnend dagblad aandacht aan het synchronisatieverschijnsel zoals zich dat in een vrouwenklooster zou manifesteren. Naar verluidt, zou de menstruatie van de nonnen zich gelijktijdig voordoen. Een goede verklaring ontbrak in het artikel. Een week later verscheen een ingezonden brief met een reactie van een kloosterlinge, dat naar eigen ervaring de beweringen uit het artikel onjuist zijn. Uiteraard zal ik hier niet verder op dit voorbeeld ingaan; het is overigens ondertussen onderwerp van uitgebreide studie geworden, zoals ook geldt voor vele andere onderwerpen met betrekking tot biologische klokken. Een prachtig overzicht wordt gegeven in het boek 'SYNC' van Steven Strogatz [4].

Er is een groot aantal buitengewoon interessante observaties rond de synchronisatie van systemen bekend. De oudste wetenschappelijk gedocumenteerde beschrijving van synchronisatie van slingeruurwerken gaat terug naar een van de grootste en wellicht onbekendste Nederlandse wetenschappers uit de 17de eeuw, Christiaan Huygens.

Christiaan Huygens leefde van 1629 tot 1695. Hij was een vooraanstaand lid van de Franse 'Académie des Sciences'. Hij is beroemd geworden onder andere door zijn werk over het slingeruurwerk, de optica en de theorie over de voortplanting van licht, zie bijvoorbeeld [7, 4].



Christiaan Huygens

figuur 8

In zijn aantekeningen uit 1670 beschrijft Christiaan Huygens een experiment waarbij twee slingeruurwerken opgehangen worden aan een balk die rust op een tweetal stoelen. De waarneming is, dat de twee (maritieme) klokken na korte tijd synchroon zullen gaan bewegen, al dan niet in tegengestelde fase. De uitleg van Huygens is, zeker voor die tijd, buitengewoon opmerkelijk. De synchronisatie van de slingeruurwerken wordt veroorzaakt door de balk waaraan de twee klokken zijn opgehangen, zie figuur 9.

figuur 9

Klokken opgehangen
aan een balk



Het is bijzonder dat Huygens deze verklaring gaf op een moment dat de dynamische beschrijving van een slinger met een differentiaalvergelijking nog niet (volledig) bestond. Newton was immers de grondlegger van de differentiaalrekening die in zijn beroemde 'Principia' (1687) gepubliceerd werd. Ook nu is er voor zover bekend nog geen sluitende wiskundige beschrijving van het synchronisatiefenomeen zoals Huygens dat beschreef; een vereenvoudigde beschrijving van dit probleem is te vinden in [3].

Sinds Huygens' observatie van de synchrone beweging van slingeruurwerken, zijn er veel andere voorbeelden beschreven. Synchronisatie is de laatste jaren meer en meer onder de aandacht gekomen binnen de biologie en de fysica. Dit is ook het geval binnen de regeltechniek. Ook daarvan wil ik een voorbeeld schetsen, zoals we dat in de afgelopen tijd binnen de Dynamics and Control-groep hebben kunnen ontwikkelen

(zie met name het proefschrift [2]). Synchronisatie of coördinatie van robotsystemen is een potentieel belangrijk onderwerp. Het gaat hierbij om de vraag hoe meerdere (identieke) robots gezamenlijk een taak kunnen uitvoeren, wat voor dit moment neer komt op de vraag hoe twee (of meer) robots een identieke voorgeschreven beweging kunnen uitvoeren. Het belang van een dergelijke vraagstelling ligt in het feit dat coördinerende robots lichter in gewicht en uitvoering kunnen zijn. In het geval we aan mobiele robots of autonoom geleide voertuigen (AGV's) denken, kan men hierbij denken aan 'platooning', het in formatie laten rijden van de mobiele robots, maar dit laat zich wellicht in de toekomst uitbreiden naar (personen-) voertuigen. Nog recentere voorbeelden komen we tegen bij het positioneren van satellieten en het formatievaren van zeeschepen. In het promotieonderzoek van Alejandro Rodriguez hebben we het synchronisatieprobleem voor volledig geacteerde robots opgelost. Uitgaande van uitsluitend positie-metingen is de theorie ontwikkeld om de robots gezamenlijk een gewenst traject te laten volgen. Daarbij is met name ook rekening gehouden met mogelijke verstoringen die de robots kunnen ondervinden door nadrukkelijk de robots ook te laten reageren op elkaars beweging. Dit is succesvol uitgevoerd op een tweetal robots in het DCT laboratorium, zie figuur 10.

figuur 10

pizza-robots



Het onderzoek naar geregelde synchronisatie in mechanische systemen is relatief nieuw en vormt een potentieel rijk onderzoeksterrein. Gezien de ervaringen die we tot nu toe hebben opgedaan, verwacht ik dit onderzoek de komende jaren verder uit te bouwen. Er zijn nog veel uitdagende vragen rond het thema coördinatie, waarvan ik in ieder geval de

synchronisatie van voertuigen wil noemen. De vraagstelling rond de synchronisatie van achtereenvolgens mobiele robots, AGV's en auto's heeft een aantal gemeenschappelijke vragen in zich, en er is ook daarom een logische volgorde in de tijd en in complexiteit. Op dit moment doen we in diverse stages en afstudeerprojecten ervaring op rond het regelen van mobiele wagentjes. Het is slechts een kwestie van tijd of we kunnen met deze ervaring ook AGV's binnen een laboratoriumomgeving laten rijden. In dit verband verwacht ik veel van de samenwerking met de afdeling van TNO-Automotive en met het nieuwe Vehil laboratorium in Helmond, waarmee we een aantal projecten op dit gebied hopen op te starten.

figuur 11

Vehil lab





In samenwerking met het Department of Engineering Cybernetics van de Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in Trondheim zal de komende tijd ook het synchroniseren van scheepsbewegingen aandacht krijgen. De eerste samenwerking op dit gebied ziet er zeer veelbelovend uit. De verwachting is, dat daar de komende jaren ook experimentele resultaten mee bereikt kunnen worden. Een belangrijke motivatie voor dit onderzoek is het veilig laten varen en afmeren van zeeschepen in havens.

Voertuigdynamica

Voertuigdynamica vormt een van de nieuwste activiteiten binnen de groep Dynamics and Control. In het kader van de track Automotive Engineering Science Master, waarover ik straks iets meer zal zeggen, wordt vanuit de sectie Dynamics and Control onderwijs en onderzoek verzorgd op het gebied van de voertuigdynamica. Hoewel deze track nog maar kort bestaat, lijkt er voldoende belangstelling voor, zowel van potentiële afstudeerders als vanuit de automotive industrie. Het betekent ook, dat binnen de sectie hard gewerkt moet worden om ook op dit gebied goed onderzoek van de grond te krijgen.

De Technische Universiteit Delft heeft haar activiteiten op het gebied van de voertuigdynamica recentelijk grotendeels afgestoten. Met de van de Technische Universiteit Delft overgenomen bandentestfaciliteiten zullen we zeker een aantal onderzoeksactiviteiten rond band-dynamica opstarten. Onder andere gaat het hierbij om een zogenaamde flatplank-tester waarmee diverse krachten op een rijdende band gemeten kunnen worden.

figuur 12

flatplank



Dit onderzoek vindt plaats in samenwerking met de reeds eerder genoemde afdeling TNO-Automotive. In het bijzonder dr.ir. Igo Besselink speelt hierbij een belangrijke rol. Binnen de voertuigdynamica vormen de band en in het bijzonder het wiel-wegcontact een essentieel onderdeel van de totale dynamica. Het wiel-wegcontact is een van de moeilijkere onderdelen van de dynamische beschrijving voor de beweging van een auto. Met name het modelleren van slip is hierbij een moeilijk aspect. Een gebleken bruikbaar empirisch model is de zogenoemde 'Magic Formula' die rond 1987 ontwikkeld is door professor H.B. Pacejka en E. Bakker, zie [10]. In dit slip-model moet een aantal parameters experimenteel voor een band bepaald worden. In dit verband is de flatplank-tester van belang. De 'Magic Formula' is echter niet de ideale beschrijving voor slijpkrachten en voor bepaalde manoeuvres van een auto kan het model mogelijk verbeterd worden door in Stevens stijl, experimentele data met de theorie te combineren. Ook is een fysisch gemotiveerde manier van modelleren naast de 'Magic Formula' heel gewenst. Ik verwacht dat de sectie op dit terrein iets kan gaan betekenen. Daarnaast wil ik opmerken, dat deze vragen rond de band-dynamica ook van belang zullen zijn voor een betere begripsvorming van band-weggeluid, een onderwerp waar ik straks nog kort op terugkom.

De geregelde coördinatie van voertuigen heb ik reeds eerder aangeduid als een onderzoeksgebied waarop we de komende jaren actief zullen zijn. Meer algemeen voorzie ik, met de toename van diverse besturings-systemen binnen de auto, dat de vraag naar coördinerende regelaars tussen de verschillende deelsystemen binnen de auto aan belang zal toenemen.

Trillingen en geluid

Tot de basiskennis van elke werktuigbouwkundige behoort het vak 'Mechanische Trillingen'. Het gaat daarbij onder andere om de vraag welke responsie verkregen wordt als we het tweede-orde-systeem (τ) onder wisselende begincondities beschouwen. Ook kunnen we een externe periodieke kracht aan F toevoegen en ons afvragen hoe de responsie er dan uit gaat zien. Een voorbeeld hiervan is de vering in een auto die met constante snelheid over een regelmatig golvend wegdek rijdt.

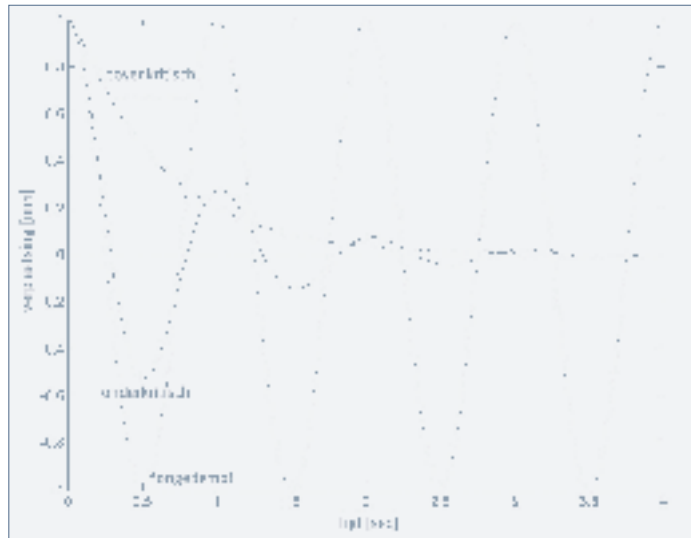
De vraag in dit geval is in hoeverre de autovering in staat is om de on-effenheden in het wegdek op te vangen. Iets wiskundiger laat deze vraag



zich vertalen naar de beschrijving van de oplossing van de differentiaalvergelijking (1). Als we de verticale verplaatsing x (ook wel responsie genoemd) tekenen als functie van de tijd, kunnen we, zonder externe krachten te beschouwen, te maken hebben met verschillende mogelijkheden.

figuur 13

gedempte trillingen



De hier weergegeven figuur is nogal gestileerd; ze is verkregen door uit te gaan van de veronderstelling dat de kracht F lineair afhangt van de verticale verplaatsing en snelheid. Zodra de dynamica niet-lineair wordt of als er een periodieke externe kracht aan F toegevoegd wordt, kan ook de responsie essentieel van gedrag veranderen. Vanuit een mechanisch oogpunt is het veelal ongewenst, dat het systeem wordt opgeslingerd door de externe trillingen op het systeem. Het systeem wordt dan instabiel en dit is natuurlijk een ongewenst verschijnsel.

De bestudering van trillingen in mechanische systemen, en in het bijzonder trillingen en geluid, vormt een van de onderzoeksactiviteiten binnen de sectie Dynamics and Control. Mechanische trillingen en geluid zijn in veel opzichten met elkaar verbonden, soms op een gewenste manier, zoals in de muziek, maar veelal ongewenst, zoals

we op vele manieren tegenkomen bij gebruiksapparaten, auto's enz. Het hoofddoel van het onderzoek op dit gebied is het reduceren van de trillingen en het geluid in mechanische systemen. Het dempen van de mechanische trillingen en geluid kan op twee verschillende manieren benaderd worden. Enerzijds door het ontwikkelen van passieve methoden, dat wil zeggen: door in het ontwerp van het systeem trillingsonderdrukkende hulpmiddelen te gebruiken. Dit kan door het gebruiken van specifieke materialen, maar ook door het apparaat op een slimme manier te ontwerpen.

Een andere manier om geluid en trillingen in een mechanisch systeem te onderdrukken is door middel van actieve methoden, in het bijzonder regeltechnische methoden.

Ik heb u in het voorgaande iets laten zien rond trillingen en geluid binnen de dynamica. Binnen de sectie Dynamics and Control zullen we ook in de toekomst actief zijn op dit terrein. De deeltijdhoogleraren prof. dr.ir. Jan Verheij en prof. dr.ir. Bert Roozen zijn beiden werkzaam in dit gebied. Met de ontwikkelingen rond de voertuigdynamica zoals ik u die eerder heb geschetst, willen we, in samenwerking met een aantal geïnteresseerde partners, onderzoek initiëren naar banden en geluid. De aanwezige expertise op het gebied van zowel de voertuigdynamica als van de akoestiek en de aanwezigheid van een aantal experimentele faciliteiten vormen een goede voedingsbodem om op dit terrein iets te bereiken.

Optimalisatie, Computer Aided Engineering

Binnen het vakgebied van de dynamica is optimalisatie van oudsher een aandachtsgebied. Ook nu nog vormt de optimalisatie een – weliswaar bescheiden – onderdeel van de sectie. Optimalisatie is bij uitstek een onderwerp, dat een brug slaat tussen enerzijds de dynamica en modellering en anderzijds het ontwerpen van mechanische constructies. Het gaat daarbij om het ontwikkelen van efficiënte rekenmethodes, welke noodzakelijk zijn bij de rekenintensieve eindige-elementenmethode. Er zijn diverse praktische toepassingen bekend. Eén ervan, ondertussen bijna 20 jaar oud, wil ik u niet onthouden. Het betreft de ontwikkeling van de grote-terts-octaafklok door de vroegere vakgroep WFW, en meer in het bijzonder door dr.ir. Bert Schoofs.

figuur 14

grote-terts-octaafklok



In samenwerking met de Koninklijke Eijsbouts Klokkengieterij werd de vorm van een klok ontwikkeld met de frequentieverhoudingen 1-2-2, 5-3-4-6-8 ten opzichte van de grondtoon. Een replica van

een dergelijke klok bevindt zich nu nog in het DCT laboratorium. Het ontwerpen en het construeren is binnen de werktuigbouwkunde van wezenlijk belang en vereist een goede kennis van de bijbehorende computergeoriënteerde ontwerptools. Dit vakgebied wordt vaak aangeduid met Computer Aided Design (CAD) en Computer Aided Engineering (CAE). Het is van wezenlijk belang, dat elke werktuigbouwkundige met elementen uit CAD en CAE te maken heeft gehad gedurende zijn studie. Om echter in dit brede en uitdijende gebied adequaat onderwijs te geven is het nodig, dat dit gebied een duidelijk herkenbare plaats binnen de faculteit Werktuigbouwkunde inneemt. Dr.ir. Koo Rijkema zal vanuit de sectie Dynamics and Control samen met anderen niet alleen het onderwijs op het gebied van de CAE gestalte gaan geven, maar ook het daaraan gekoppelde onderzoek proberen op te zetten.



De studie Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven, of Mechanical Engineering zoals het nu in het Bachelor-Master-curriculum genoemd wordt, is bij uitstek een multidisciplinaire studie. De Bacheloropleiding Mechanical Engineering is een brede Bacheloropleiding.

Wetenschappelijk onderwijs en onderzoek horen onlosmakelijk met elkaar verbonden te zijn. De sectie Dynamics and Control is verantwoordelijk voor een aantal vakken uit het verplichte curriculum van de Bachelorstudie Mechanical Engineering zoals de eerstejaarsvakken Dynamica en Systeemanalyse, het tweedejaarsvak Mechanische Trillingen, en het derdejaars vak Multibody Dynamics. In de Masterfase wordt daarnaast een aantal gespecialiseerde keuzevakken aangeboden voor veelal een grote groep studenten.

Een van de uitdagingen, maar tegelijkertijd ook een van de bedreigingen, vormt de samenhang in het curriculum van de opleiding. Met de divisiegebonden Mastertracks is het zaak dat de opleiding niet zal uiteen vallen in volkomen gescheiden opleidingen. De divisies Computational and Engineering Mechanics (CEM), Thermo and Fluid Engineering (TFE) en Dynamical Systems Design (DSD), waartoe ook de sectie Dynamics and Control behoort, vormen een bruikbare interne verdeling van de activiteiten van de faculteit. De Automotive Engineering Science en Micro-Nanotechnology track zijn daarnaast divisieoverstijgend en kunnen bijdragen aan de wederzijdse samenhang in de opleiding.

Ook daarbuiten is het echter zaak om divisieoverstijgende afstudeer- en promotieprojecten te formuleren om ook in de Masterfase multidisciplinaire projecten mogelijk te maken.

Studenten vormen het belangrijkste kapitaal van iedere opleiding.

Een goede opleiding biedt de student een coherent aanbod vakken, met voldoende keuzevrijheid en uitdagingen. De in de afgelopen tijd ontwikkelde Bachelor- en Master-curricula kunnen gezien worden als een beperking van de keuzevrijheid in het kiezen van vakken.

Naast de cesuur na drie jaar met als afronding het Baccalaureaat, is de tweejarige Masteropleiding veel gespecialiseerder van aard. Eisen rond studeerbaarheid – de studie moet in nominale tijd afgerond kunnen

worden – hoe belangrijk ook, lijken soms haaks te staan op de invulling van het Bachelor- en Master-curriculum.

Het onderwijs op de middelbare school is de laatste jaren sterk aan discussie onderhevig. De vele veranderingen die soms haast ‘on-line’ plaatsvinden in het vwo lijken niet altijd ingegeven door kwaliteitsargumenten. Het zal niet onbekend zijn dat van vele kanten een zorg wordt uitgesproken rond de kennis van de bètavakken zoals met name wiskunde en natuurkunde. Naar mijn mening is deze zorg terecht. De aankomende student heeft naar het zich laat aanzien een kleinere, of vriendelijker gezegd, misschien wel andere ‘bètabagage’ dan een aantal jaren terug. Toch hoeft dat niet uitsluitend een probleem te zijn. De huidige student is natuurlijk niet dommer en heeft wel degelijk andere vaardigheden die in het verleden niet bij de aankomende studenten aanwezig waren. Mits goed uitgedaagd en gemotiveerd, en met voldoende begeleiding, hoeft het eindniveau van een studie als werktuigbouwkunde er niet onder te lijden. Wat meer en meer een probleem lijkt te vormen, is om de aankomende student in het eerste jaar college te geven. Wellicht vindt u het moeilijk om gedurende mijn rede uw aandacht niet te laten verslappen. Dat kan natuurlijk door mij komen of aan het onderwerp liggen. Maar uit ervaring kan ik u ook zeggen dat de eerstejaars student er moeite mee heeft om een college van 2 maal 45 minuten geconcentreerd te volgen; de zapp-cultuur is ook hier merkbaar! We zullen de beginnende student moeten leren studeren. Ik heb zojuist al gesproken over uitdaging en motivatie voor de studie werktuigbouwkunde en meer in het algemeen de technische studies. Ik ben ervan overtuigd dat die uitdagingen mede bepalend zijn voor het instandhouden of verbeteren van de instroom voor de studie werktuigbouwkunde. Als universiteit en faculteit zullen we meer dan ooit moeten proberen uit te dragen dat werktuigbouwkunde een uitdagende en boeiende studie is; je moet er hard voor werken, maar dan heb je aan het eind ook een diploma om trots op te zijn. Het bedrijfsleven kan daar mogelijk in helpen zoals enige tijd geleden nog in het nieuws is geweest, maar uiteindelijk zullen de universiteiten dit zelf ter hand moeten nemen.

De afgelopen jaren is de instroom voor de bètastudierichtingen en de technische studierichtingen duidelijk teruggelopen. Voor sommige studies is daarmee het bestaansminimum bereikt. Met name de ontwikkelingen rond de wiskunde zijn zorgwekkend te noemen. Als werktuigbouwkundige met een wiskundig scholing gaat deze ontwikkeling mij

Organisatie



uiteraard aan het hart. Zoals ik eerder al heb laten zien, worden binnen de onderzoeksactiviteiten van de sectie de modelvorming, de analyse en numerieke technieken van een mechanisch systeem met elkaar gecombineerd en vergeleken. In dat opzicht lijken deze activiteiten in belangrijke mate op die, welke binnen een wiskundeopleiding plaatsvinden. Wiskunde lijkt met name 'De Spiegeling' van Stevin wel omarmd te hebben maar niet 'De Daet'.

De maatschappelijke functie van de universiteit is een instelling te zijn voor wetenschappelijk onderwijs en fundamenteel onderzoek. Op deze criteria dient de universiteit beoordeeld te worden, en daaraan gekoppeld zijn dus de onderwijs- en onderzoeksprestaties van doorslaggevend belang. Visitaties en onderwijsbeoordelingen moeten zich richten op de kwaliteit van onderwijs en onderzoek.

Het lijkt geen uitgemaakte zaak dat goede prestaties overeenkomstig gehonoreerd worden door de overheid en maatschappij. Meer en meer worden de universiteiten in Nederland omgevormd tot gewone bedrijven met een (College van) Bestuur en een Raad van Toezicht. In het licht van de ontwikkelingen in de maatschappij is dit begrijpelijk, maar of de academies hiermee altijd gediend zijn, kan worden betwijfeld.

De middelen die de universiteiten tot hun beschikking hebben voor het verrichten van onderzoek zijn – te – beperkt. Om het onderzoek zoals ik dat eerder heb beschreven uit te kunnen voeren is het noodzakelijk om financiering van externe bronnen te benutten. We kunnen denken aan de overheid (NWO, STW, EU), maar ook derdegeldstroom-contracten zijn hierbij van levensbelang. Het zal duidelijk zijn dat deze fondswerwing een zeer tijdrovende zaak is, die bovendien weinig mogelijkheden biedt voor de ondersteuning van risicovol vernieuwend onderzoek. Ik voorzie op dat gebied een verschraling van het onderzoek in Nederland. Veranderingen in de onderwijsprofilering en onderzoeksplannen van de universiteiten volgen elkaar tegenwoordig steeds sneller op, en lijken in ieder geval eens per vier jaar plaats te vinden, of sneller, afhankelijk van de zittingsduur van een kabinet. Ik heb al aangegeven dat oscillerend gedrag karakteristiek is voor vele mechanische systemen. Het met regelmaat veranderen van de initiële conditie van zo'n systeem kan aanleiding geven tot instabiel gedrag. Het is te hopen dat dat niet het geval zal zijn bij de veranderingen binnen de universiteiten. Nederland heeft een drietal Technische Universiteiten, die naar het zich laat aanzien de komende tijd geacht worden met elkaar in overleg te treden om te komen tot afstemming met betrekking tot onderwijs en onderzoek. Dat is een goede zaak voor wat betreft grote investeringen in technische infrastructuur, maar ook voor wat betreft de onderwijs-

Dankwoord



en onderzoeksprofilering. Toch dreigt daarbij ook een gevaar. Een goede universitaire opleiding in een vakgebied vereist een brede basis en een te strakke verdeling van vakgebieden over de instellingen zal tot een ongewenste verschraling van de opleiding leiden.

Mijnheer de Rector, dames en heren, ik ben nagenoeg aan het einde van mijn rede gekomen die ik de titel Dynamisch geregeld heb gegeven. Ik hoop dat ik u in ieder geval iets heb laten zien van wat er zo opwindend is in de wereld van dynamica en regelen. Ik kan u verzekeren dat gelukkig die wereld ook geregeld dynamisch is.

Het is een goede gewoonte een oratie af te sluiten met enige dankwoorden en ik wil van die gewoonte niet afwijken. Als wetenschapper ben ik in mijn eerste studiejaren (wiskundig) gevormd door met name mijn afstudeerhoogleraar professor Floris Takens en promotor professor Jan Willems. De eerste heeft mij de beginselen van de dynamische systemen geleerd, terwijl Jan Willems mij op het spoor van de systeem- en regeltechniek heeft gebracht. Ik dank beiden voor de bijdrage die zij aan mijn academische vorming hebben geleverd.

Ik wil mijn studiegenoot, collega en vakbroeder professor Arjan van der Schaft bedanken. Onze wegen zijn in de jaren '80 en '90 grotendeels parallel verlopen, we hebben veel gezamenlijke onderzoek gedaan, maar ook veel met elkaar gefilosofeerd, en zelfs hardgelopen. Bij dit laatste heb ik je altijd eerbiedig voor laten gaan. Wellicht moeten we de komende jaren toch de Dutch Nonlinear Systems Group weer tot leven brengen.

Ik dank het College van Bestuur, het College van Decanen en het Bestuur van de faculteit Werktuigbouwkunde voor het getoonde vertrouwen mij te benoemen als voltijds hoogleraar. Een speciaal woord van dank wil ik richten tot collega professor Jan Kok, die indertijd het initiatief heeft genomen om mij als deeltijdhoogleraar naar Eindhoven te halen. Ik dank mijn collega professor Dick van Campen voor de loyale en constructieve steun waarmee ik de leerstoel een nieuwe invulling heb kunnen geven.

In de kleine 25 jaar dat ik wetenschappelijk actief ben geweest, heb ik met vele binnenlandse en buitenlandse collegae samengewerkt. Het aantal co-auteurs heb ik niet geprobeerd te tellen, ik zal ook niet proberen iemand van deze groep speciaal te noemen, maar ik dank ieder van mijn co-auteurs voor de meestal zeer plezierige samenwerking. Ik heb daar zeer veel van geleerd en ik hoop dat nog lang te blijven doen.



Verwijzingen

Ik heb u een schets gegeven van wat mijn motivatie en achtergrond is bij het onderzoek in de dynamica en het regelen. Het moge duidelijk zijn, dat ik dit onderzoek in het bijzonder verricht in samenwerking met de collegae van de sectie. Ik wil ieder van jullie daarvoor bedanken. In dit verband wil ik ook de zeer goede samenwerking met collega professor Maarten Steinbuch en zijn Control Systems Technology-sectie noemen. De Dynamics and Control-sectie is in de afgelopen jaren flink gegroeid en is met haar afstudeerders en promovendi een goed herkenbaar onderdeel van de faculteit Werktuigbouwkunde geworden. Ik verwacht dat we ook de komende tijd nog volop verder zullen werken aan het profiel van de sectie.

Het onderzoek waarover ik gesproken heb, wordt op verschillende manieren mede mogelijk gemaakt en gestimuleerd. Enerzijds natuurlijk door de universiteit en de faculteit, maar daarnaast wil ik ook de onderzoekscholen DISC, Dutch Institute of Systems and Control, en EM, Engineering Mechanics, noemen, waarbij ik betrokken ben.

Deze onderzoekscholen vormen de voedingsbodem voor het opleiden van de onderzoekers in mijn vakgebied.

Ik wil tenslotte mijn dank uitspreken aan de diverse instellingen en bedrijven die op enigerlei wijze het onderzoek binnen mijn sectie mede hebben mogelijk gemaakt, te weten TNO, Océ, Senter, Philips, STW, NWO, EU en anderen.

Ik wil besluiten met het bedanken van mijn naaste familie. Mijn vader en moeder hebben mij indertijd de mogelijkheid geboden een universitaire loopbaan te kiezen. Ik ben hen daar dankbaar voor en betreur het dat mijn vader deze dag niet heeft kunnen meemaken.

Als laatste bedank ik Marjolijn en Lianne. Jullie zijn de echte dynamica. Hopelijk kunnen we het ook in toekomst met elkaar goed regelen.

- 1 N.P.I. Aneke, Control of underactuated mechanical systems, Proefschrift, Faculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven, 2003.
- 2 A. Rodriguez-Angeles, Synchronization of mechanical systems, Proefschrift, Faculteit Werktuigbouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven, 2002.
- 3 A. Pogromsky, V.N. Belijkh & H. Nijmeijer, Controlled synchronization of pendula, CDC 2003.
- 4 S. Strogatz, SYNC, the emerging science of spontaneous order, Theta, New York, 2003.
- 5 I. Newton, The Principia, mathematical principles of natural philosophy; a new translation by B. Cohen and A. Whitman, University of California Press, Berkeley, 1999
- 6 J.L. Meriam & L.G. Kraige, Engineering Mechanics, Vol.2: Dynamics, 5-th edition, John Wiley, Hoboken, 2003.
- 7 A.J. Kox (red.), Van Stevin tot Lorentz, portretten van achttien Nederlandse natuurwetenschappers, Uitgeverij Bert Bakker, Amsterdam, 1990.
- 8 E.J. Dijksterhuis, De mechanisering van het wereldbeeld, Meulenhof, Amsterdam, derde druk, 1977.
- 9 B. Armstrong-Helouvy, P. Dupont & C. Canudas de Wit, A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction, Automatica vol.30, pp.1083-1138, 1994.
- 10 H.B. Pacejka, Tyre and vehicle dynamics, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- 11 IEEE Control Systems Magazine, Software, Complexity and Control, Special Issue, vol. 23, 2003.
- 12 R.I. Leine & H. Nijmeijer, Dynamics and bifurcations in non-smooth mechanical systems, in preparation, 2003.

Curriculum Vitae

Prof.dr. H. Nijmeijer is per 1 mei 2000 benoemd als hoogleraar Dynamics and Control aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven.

Henk Nijmeijer (1955) studeerde wiskunde aan de Rijksuniversiteit Groningen (RUG). Van 1980 tot 1983 was hij werkzaam op het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) in Amsterdam, waarna hij van 1983 tot 2000 verbonden was aan de faculteit Toegepaste Wiskunde van de Universiteit Twente. Hij promoveerde in 1983 aan de RUG op het proefschrift met de titel 'Nonlinear Multivariable Control: A Differential Geometric Approach'. Tijdens en na zijn promotie verrichtte hij onderzoek op het gebied van de niet-lineaire regeltechniek en haar toepassingen.

Vanaf 1997 was hij daarnaast verbonden aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven als deeltijd-hoogleraar 'Regelen van niet-lineaire mechanische systemen'.

Sinds mei 2000 is hij voltijds hoogleraar Dynamics and Control aan de faculteit Werktuigbouwkunde van de Technische Universiteit Eindhoven. Hij geeft leiding aan de Dynamics and Control-groep. Het onderzoek van de groep betreft de modellering, analyse en regeling van (niet-lineaire) mechanische systemen, waarbij inbegrepen mechanische voertuigen.

Henk Nijmeijer is in 2000 benoemd tot Fellow van de IEEE Control Systems Society 'For contributions to the theory and application of nonlinear system design'. Hij is editor van een groot aantal wetenschappelijke tijdschriften op het gebied van de toegepaste wiskunde, dynamica en regeltechniek.

Colofon

Productie:
Communicatie Service
Centrum TU/e

Fotografie:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Plaza Ontwerpers,
Eindhoven

Druk:
Drukkerij Lecturis,
Eindhoven

ISBN: 90-386-1133-1