

In de verdediging

| In defence



Formation control in the port-Hamiltonian framework

Ewoud Vos

Alle Nederlanders willen graag droge voeten houden, iets wat de ruim 17.000 km aan Nederlandse dijken moet garanderen. Over de samenstelling en staat van die dijken is echter weinig bekend. Menselijke inspecteurs zien veel, maar kunnen maar moeilijk bepalen of een dijk van binnen nog goed is. Robots met de juiste sensoren kunnen dat wel. Het proefschrift *Formation control in the port-Hamiltonian framework*, dat Ewoud Vos op 20 februari 2015 met succes verdedigde aan de Rijksuniversiteit Groningen, richt zich op het gebruik van een (groot) aantal robots die als team de samenstelling van dijken in kaart brengt. De ideeën zijn overigens vrij universeel; ze kunnen bijvoorbeeld ook gebruikt worden om satellieten in formatie te laten vliegen.

Onderzoekers aan de Universiteit Twente hielden zich bezig met het robotontwerp, terwijl Vos onder begeleiding van zijn promotoren prof.dr.ir. Jacquélien Scherpen en prof.dr. Arjan van der Schaft werkte aan nieuwe algoritmes om de robots samen te laten werken. Deze algoritmes zorgen ervoor dat de robots in het team op de juiste afstand van elkaar komen te staan, anders gezegd: dat de robots een *formatie* vormen. De algoritmes zijn gebaseerd op het idee om virtuele veren en dempers tussen de robots te plaatsen: wanneer robots te dicht bij elkaar staan, drukken veren ze uit elkaar; wanneer robots te ver uit elkaar staan, trekken veren ze naar elkaar toe. De virtuele dempers kunnen gebruikt worden om de bewegingen van de robots, of algemener *agenten*, gladder te laten verlopen. Deze ideeën zijn overigens vrij universeel; ze kunnen bijvoorbeeld ook gebruikt worden om satellieten in formatie te laten vliegen.

Zijn werk spreekt mensen aan, mits goed gebracht natuurlijk — “Good scientists do not make good teachers” is Vos’ favoriete stelling bij zijn proefschrift. Vos heeft heel goede herinneringen aan een presentatie die hij over zijn onderzoek mocht geven voor de Museum Jeugduniversiteit. Het publiek was een groep van meer dan honderd kinderen en de interactie en het enthousiasme waren ongekend.

Poortsystemen

De wiskunde zit hem hierbij in de modelbouw en de bijbehorende analyse. De dynamica van de agenten en virtuele veren wordt gemodelleerd door differentiaalvergelijkingen. Deze dynamica past in het zogenaamde *poort-Hamiltonse kader*, waarin klassieke Hamiltoniaanse dynamica, op poorten gebaseerd modelleren en systeem- en regeltechniek bij elkaar komen. Systeem- en regeltechniek richt zich op het gedrag van dynamische systemen en de controle of beïnvloeding van dit gedrag met behulp van regelaars (feedback, feedforward). Bekende voorbeelden van regeltechniek zijn cruise control en een thermostaat.

In de modellen van Vos wordt iedere robot gemodelleerd als een los Hamiltoniaans subsysteem, en zijn de componenten onderling verbonden via zogenaamde vermogenspoorten. De vermogenspoorten modelleren hoe energie wordt uitgewisseld tussen de verschillende

Pas gepromoveerden brengen hun werk onder de aandacht. Heeft u tips voor deze rubriek of bent u zelf pas gepromoveerd? Laat het weten aan onze redacteur.

Redacteur: Geertje Hek
la Voie-du-Coin 7
1218 Grand-Saconnex
Zwitserland
verdediging@nieuwarchief.nl

componenten, en worden tevens gebruikt voor de beïnvloeding van de robots. Ze bestaan uit twee poortvariabelen: een input-vector u en een output-vector y , waarvan het product $u^T y$ gelijk is aan het via de poort toegevoegde vermogen. Voor een individuele lopende robot bestaat de input-vector u bijvoorbeeld uit twee krachten op het massamiddelpunt en het koppel rond dat middelpunt en de output-vector y uit de bijbehorende resulterende snelheidscomponenten en de hoeksnelheid. De dynamica van zo'n robot wordt dan gegeven door

$$\begin{aligned}\frac{dq}{dt} &= \frac{\partial H}{\partial p}(p, q), \\ \frac{dp}{dt} &= -\frac{\partial H}{\partial q}(p, q) - D \frac{\partial H}{\partial p}(p, q) + u, \\ y &= \frac{\partial H}{\partial p}.\end{aligned}$$

Hierbij is $p \in \mathbb{R}^3$ de positie van het massamiddelpunt en $q \in \mathbb{R}^3$ de impuls. De term $-D \frac{\partial H}{\partial p}$ is een wrijvingsterm met een diagonale dissipatiematrix D met wrijvingscoëfficiënten op de diagonaal.

De Hamiltoniaan $H(p, q)$ is gelijk aan de totale energie die is opgeslagen in het systeem en het systeem blijkt hiermee zoals het hoort te voldoen aan de wet van behoud van energie:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{\partial^T H}{\partial p} D \frac{\partial H}{\partial p} + u^T y,$$

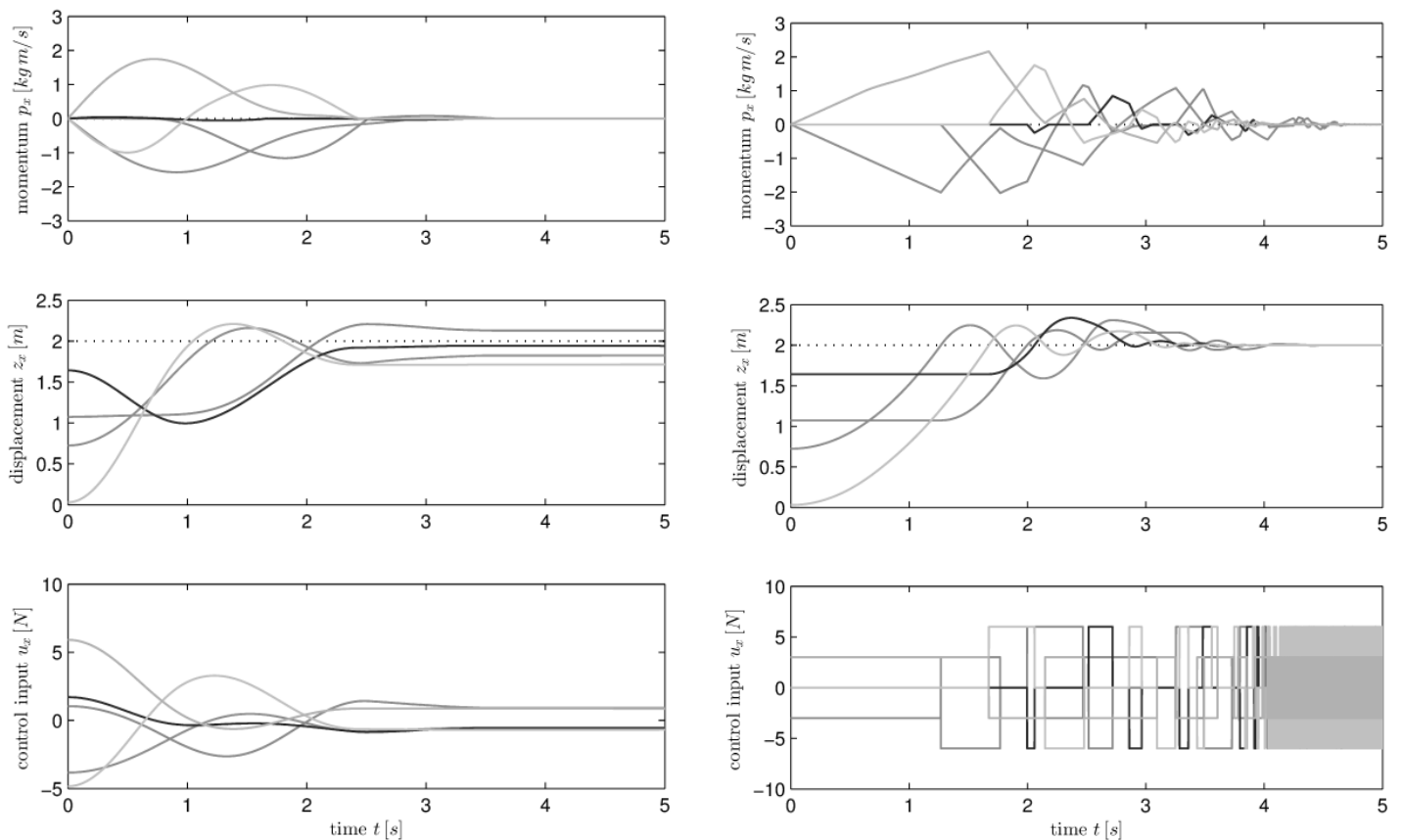
ofwel, de verandering in energie is gelijk aan het toegevoegde vermogen min het gedissipeerde vermogen. Voor de mechanische systemen waar Vos naar kijkt is de Hamiltoniaan altijd de som van de kinetische en de potentiële energie.

Als verschillende robots worden gegroepeerd en onderling op de juiste afstand worden gebracht of gehouden door middel van virtuele veertjes, wordt het model als volgt aangepast. Aan de Hamiltoniaan van iedere robot wordt een term toegevoegd die de (virtuele) veerenergie voorstelt en die de koppeling met buurrobots regelt. Bovendien wordt er gebruik gemaakt van een zogenaamde Dirac-structuur, die modelleert hoe de verschillende poorten met elkaar verbonden zijn. Uit de Dirac-structuur is de topologie van het gemodelleerde systeem af te leiden: hoe zijn de verschillende componenten verbonden? Een parallelle demper en veer hebben bijvoorbeeld een andere Dirac-structuur dan een demper en veer in serie.

De belangrijkste analyse richt zich op de stabiliteit van het netwerk, oftewel: convergeren de afstanden tussen de robots naar de gewenste afstand? Hierbij wordt gebruik gemaakt van de welbekende Lyapunovtheorie. In het voorbeeld van de lopende robot speelt de wrijvingsterm een cruciale rol in de stabiliteitsbewijzen. Wanneer die wrijving niet-lineair of niet-glad is, bijvoorbeeld bij Coulomb-wrijving zoals in de rechterkant van Figuur 1, ontstaan er uitdagingen en worden de stabiliteitsbewijzen lastig.

Interdisciplinair en internationaal

Vos had niet de meest voor de hand liggende vooropleiding voor hij aan zijn wiskundige onderzoek begon, namelijk technische bedrijfskunde. Volgens hem bepaalt de vooropleiding maar voor een (klein) deel het succes van promotieonderzoek. Veel belangrijker zijn een gezonde dosis motivatie en discipline. Vos: "Je hebt veel vrijheid om je interesses te volgen en krijgt de tijd om echt goed na te denken over problemen."



Figuur 1 Formatievorming met vijf agenten, die een onderlinge afstand van 2 meter moeten gaan aanhouden. In de linker figuur worden hiervoor continue virtuele veren gebruikt, in de rechter figuur discontinue virtuele veren.

Ik denk dat veel mensen geschikter zijn voor een promotieplek dan ze nu denken.” Hoewel hij dat nu zelf zegt, heeft ook hij last gehad van de typische promotiedip na twee jaar en daarbij zeker weleens getwijfeld of hij de eindstreep wel zou halen.

Vos' werk was erg interdisciplinair en hij was dan ook lid van twee vakgroepen, Discrete Technology & Production Automation (DTPA) en Systems, Control and Applied Analysis (SCAA), die deel uitmaken van twee verschillende onderzoeksinstituten. Vos roemt het internationale karakter van de groep waarin hij werkte, met collega's uit onder andere China, Iran, Noorwegen en Kroatië. Om meer cohesie in de groep te krijgen, heeft hij samen met een collega een wekelijkse groepsbespreking opgezet, waar naast een kleine wetenschappelijke presentatie ook ruimte was voor *social talk*.

Het mooiste resultaat

Vos' antwoord op de vraag “Wat is je mooiste resultaat?” bewijst dat het interdisciplinaire karakter van zijn werk belangrijk voor hem was. Het mooiste resultaat is volgens hem de modellering van formatievorming wanneer de agenten onderhevig zijn aan Coulomb wrijving. “De combinatie van een fysiek verschijnsel met duidelijke interpretatie en de rigoureuze wiskunde die we nodig hadden om de resultaten te bereiken spreken me erg aan. Daarnaast vind ik het een mooi resultaat omdat het is verkregen in samenwerking met nog weer een andere vakgroep, Smart Manufacturing Systems (SMS).” Bij viskeuze wrijving is de wrijvingskracht recht evenredig met de snelheid. Bij

Coulomb-wrijving is de wrijvingskracht echter constant en alleen afhankelijk van het teken van de snelheid. De wrijvingskracht is gegeven als $F_d = c \operatorname{sign}(v)$, met F_d de wrijvingskracht, c de wrijvingscoëfficiënt, v de snelheid en sign de Signum-functie. Gevolg hiervan is dat de agenten eerst een wrijvingsdrempel $\pm c$ moeten overwinnen voor ze in beweging komen.

Het effect hiervan op het vormen van formaties met virtuele veren is te zien in Figuur 1: bij gebruik van continue virtuele veren tussen de agenten is de veerkracht op een gegeven moment kleiner dan de Coulomb-wrijvingskracht. Dit betekent dat de agenten stil komen te staan, terwijl ze nog niet op de juiste afstand van elkaar staan. Zie de linker figuur. Daarom is in Vos' proefschrift een discontinue veer ontworpen die een constante veerkracht geeft die altijd iets groter is dan de Coulomb-wrijvingskracht. Dat kan natuurlijk makkelijk, omdat het om virtuele veren gaat. De veerkracht F_s is nu gegeven door $F_s = k \operatorname{sign}(z)$, met veerconstante k en relatieve afstand z tussen buurrobots. Daarmee wordt de formatie wel exact gevormd, al ontstaat er wel chattering (zeer snel schakelen tussen $+k$ en $-k$) bij de inputs; zie de rechter figuur.

De toekomst

Mooie resultaten, goede herinneringen, maar nu is het tijd voor wat anders. Vos is sinds 1 maart technisch professional bij DNV GL. De komende tijd gaat hij zich bezighouden met *smart energy*. Vast en zeker ook weer heel interdisciplinairwerk. 