

Intelligente regeltechniek voor nieuwe generatie mechatronica

Citation for published version (APA):

Bolder, J. J., Boeren, F. A. J., & Oomen, T. A. E. (2014). Intelligente regeltechniek voor nieuwe generatie mechatronica. *Aandrijftechniek*, 2014(December), 22-24.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2014

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.

Intelligente regeltechniek voor nieuwe generatie mechatronica

[tekst en illustraties] Joost Bolder, Frank Boeren, Tom Oomen, Technische Universiteit Eindhoven

Intelligenter aansturing is essentieel om toekomstige mechatronische systemen aan de steeds strenger wordende nauwkeurigheds- en snelheidseisen te laten voldoen. Recente doorbraken op regeltechnisch gebied door intensieve samenwerking tussen academia en research- en developmentafdelingen maken het mogelijk om aan deze toekomstige producteisen te voldoen. De recente installatie van een hightech flatbed printer van Océ bij de Control Systems Technology groep en de oprichting van het High Tech Systems Center moeten de ontwikkeling van een systematische en industrieel toepasbare aanpak voor intelligente aansturing voor mechatronische systemen mogelijk maken.

De Control Systems Technology groep van de Faculteit Werktuigbouwkunde aan de TU Eindhoven ontwikkelt geavanceerde en intelligente aansturingen voor mechatronische systemen. Samenwerking met industriële partners is essentieel om ontwikkelde technieken te valideren op mechatronische systemen. In dit kader is

we de belangrijkste ontwikkelingen welke het mogelijk maken om intelligence regeltechniek in te zetten als belangrijke 'enabler' van hightech mechatronica. Traditioneel worden mechatronische systemen aangestuurd door zowel feedback als feedforward regelaars. Op het vlak van feedback zijn PID regelaars een veel toe-

gepaste technologie in industriële toepassingen. De populariteit van PID regelaars komt voornamelijk doordat de prestaties van de gesloten lus robuust zijn ten opzichte van veranderingen in het systeem. Daarnaast is het tunen van deze regelaars zeer intuïtief door het gebruik van vuistregels. Er kan een significante verkleining

Doel: verbeteren van de prestaties

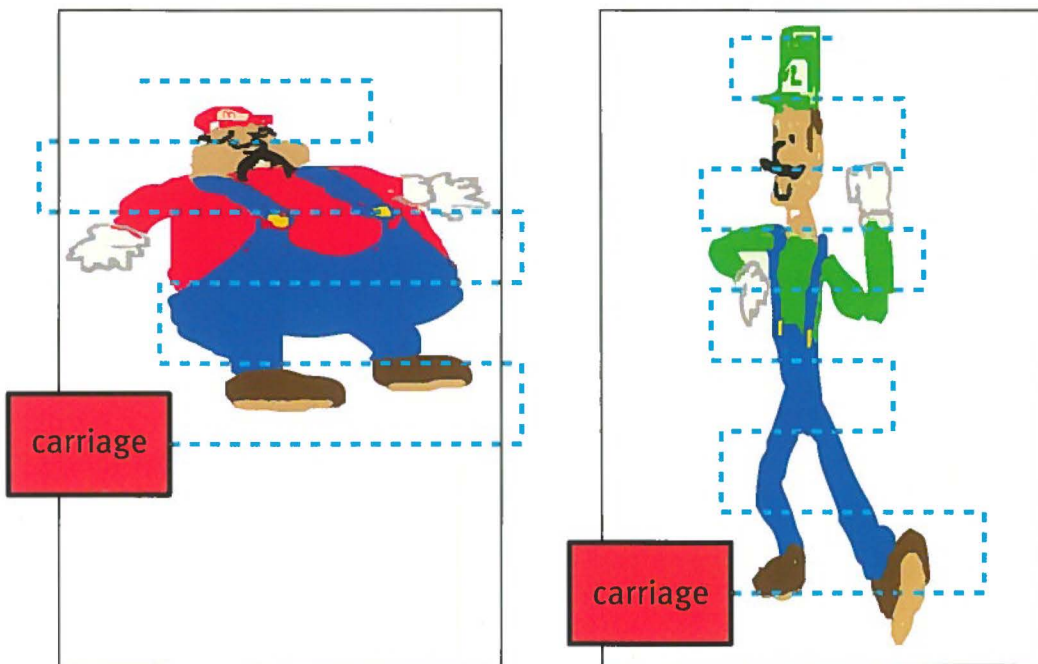
eind september 2014 een hightech flatbed printer geïnstalleerd van Océ. Het doel is om verder onderzoek uit te voeren, gericht op het verbeteren van de prestaties van toekomstige generatie mechatronica in het geheel. In deze bijdrage schetsen

Samenwerking met industrie

De samenwerking tussen Océ en de Control Systems Technology groep van de TU Eindhoven is een voorbeeld van de sterke connectie die bestaat tussen de industrie en de universiteit op het gebied van mechatronica. Het hier beschreven onderzoek is het resultaat van een aantal promotietrajecten onder begeleiding van promotoren prof. Maarten Steinbuch en prof. Okko Bosgra, waarin intensief wordt samengewerkt met mechatronische bedrijven zoals Philips, ASML, Océ en NXP. Het resultaat is een cultuur waarin academisch onderzoek naar regeltechniek direct geïmplementeerd en gevalideerd wordt op mechatronische systemen in een industriële omgeving.



De opstelling van de Océ Arizona flatbed printer in het CST Motion Laboratorium van de Control Systems Technology groep aan de TU Eindhoven



Afb. 1. Het traject voor de carriage wordt tijdsoptimaal uitgerekend

van de volgfout, typisch een factor tien, worden behaald door ook een feedforward regelaar te implementeren. De werkingsprincipes van beide regelaars worden verder toegelicht in het kader Feedforward tunen.

Iterative learning control

Mechatronische systemen moeten vaak herhalende taken uitvoeren. Door te leren van de gemaakte volgfout tijdens deze taken, kan de volgfout met een factor tien worden verbeterd ten opzichte van een

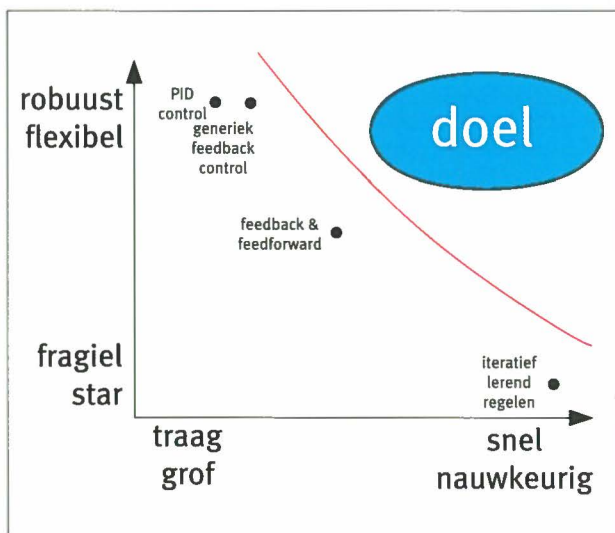
gecombineerd feedback/feedforward ontwerp. Dit is het basisidee achter iteratief lerend regelen oftewel Iterative Learning Control (ILC).

Het eerste idee achter ILC is reeds gedocumenteerd in een patent uit 1967 door Murray Garden. In de wetenschappelijke

wereld is het eerste artikel 'Bettering operation of robots by learning' pas verschenen in 1984. Sindsdien wordt intensief onderzoek gedaan naar nieuwe ILC technieken en zijn er veel succesvolle implementaties van ILC gedocumenteerd in de literatuur. In tegenstelling tot standaard feedforward is ILC in staat de benodigde servokracht f te leren, zonder kennis te hebben van de taak of verstoringen (zie kader Feedforward tunen). Hiervoor benut ILC het feit dat de taak bij iedere herhaling exact hetzelfde is.

Direct implementeren en valideren

Indien de taak niet exact hetzelfde is maar kleine variaties vertoont, kan ILC er echter toe leiden dat de volgfouten van het systeem drastisch verslechteren. Dergelijke gelijkwaardige, maar niet exact identieke taken, komen veelvuldig voor in mechatronische systemen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan een printtaak zoals weergegeven in **afb. 1**: doordat de te printen afbeelding niet overal even breed is, is de taaklengte verschillend. Deze fragiliteit en inflexibiliteit voor veranderingen in de omgeving of taak heeft een brede industriële implementatie van ILC sterk beperkt.



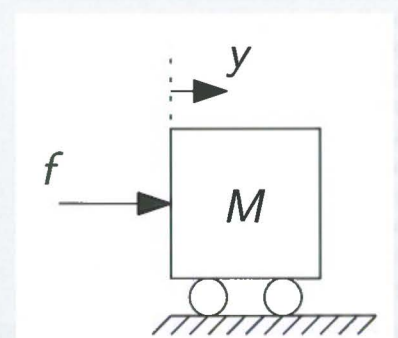
Afb. 2. Bij de keuze van regelstrategie lijkt er altijd een trade-off op te treden tussen flexibiliteit en prestatie

Feedforward tunen

Feedback regelaars reageren op een servofout. Een gevolg hiervan is dat er pas corrigerende actie wordt ondernomen als er eenmaal al een fout bestaat. Met feedforward wordt geanticipeerd op verstoringen uit de toekomst. Als de baan die een systeem moet afleggen vlak van tevoren bekend is, kan deze kennis gebruikt worden om de volgfouten significant te verkleinen.

Stel dat de massa M een traject r moet volgen. De wet van Newton $F = M \cdot a$ dicteert dat de benodigde servokracht gelijk moet zijn aan de versnelling benodigd voor traject r . Het tunen van de feedforward regelaar betekent in dit voorbeeld het vinden van de massa M , omdat het traject r immers al bekend is. Deze feedforward kracht wordt uitgerekend en toegevoegd aan de regelspanning van de feedback regelaar. Is de feedforward kracht perfect, dan hoeft de feedback regelaar niets te doen. In de praktijk zijn er altijd onvoorspelbare verstoringen en onbekende dynamische effecten die ervoor zorgen dat naast een goed getunde feedforward altijd een feedbackregelaar noodzakelijk is.

Bovenstaand voorbeeld betreft een eenvoudig systeem met slechts één ingang en één uitgang. Het tunen van feedforward voor systemen met meerdere assen zoals de Arizona flatbed printer is veel complexer. In het algemeen wordt dit veroorzaakt doordat een enkele actuator op meerdere sensoren invloed heeft.



De relatie tussen de flexibiliteit en nauwkeurigheid van de klassieke regeltechnieken en ILC zijn aangegeven in **afb. 2**. Er is een duidelijke afweging tussen robuust en traag, en fragiel en nauwkeurig. Een kleinere volgfout lijkt noodzakelijkerwijs gepaard te gaan met een grotere gevoeligheid voor verandering in de omgeving of taak.

Intelligent feedforward

Het onderzoek naar regeltechniek voor motion systemen in de Control Systems Technology groep heeft als doel om de trade-off curve te doorbreken en op te schuiven: intelligente feedforward technieken om te kunnen voldoen aan de toekomstige eisen van flexibiliteit en performance. Dit moet leiden tot een intelligent regeltechnisch framework voor de nieuwe generatie mechatronische systemen.

Het doel is om technieken te ontwikkelen waarbij een kleine volgfout samen gaat met flexibiliteit voor veranderingen in de taak. Door de uitstekende samenwerking met hightech industrieën en het opzetten van het High Tech Systems Center worden de ontwikkelde algoritmen direct geïmplementeerd en gevalideerd op industriële systemen.

Op dit moment worden er in dit samenwerkingsverband naar de volgende aspecten onderzoek gedaan.

Multivariabele systemen

Zoals aangeduid in het kader Feedforward tunen, is het ontwerpen van zowel feedback als feedforward regelaars voor multivariabele (meerassige) systemen een stuk complexer dan systemen met slechts één ingang en uitgang.

Positie-afhankelijke effecten

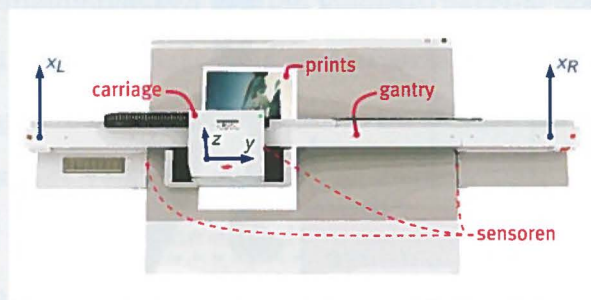
Wrijvingseffecten, verandering van massa-traagheidseigenschappen veranderen het dynamisch gedrag van het systeem.

Verschil tussen prestatie en gemeten variabelen

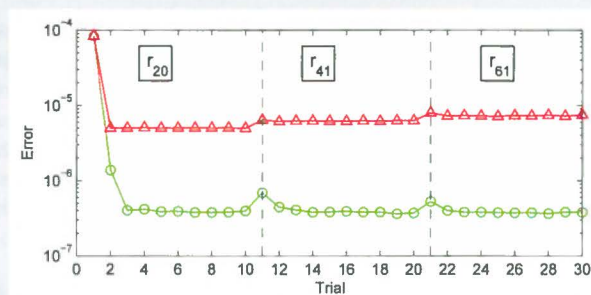
Vaak bepalen de gemeten variabelen niet direct de prestatie van het systeem. In het

Intelligente multivariabele feedforward voor de Arizona gantry

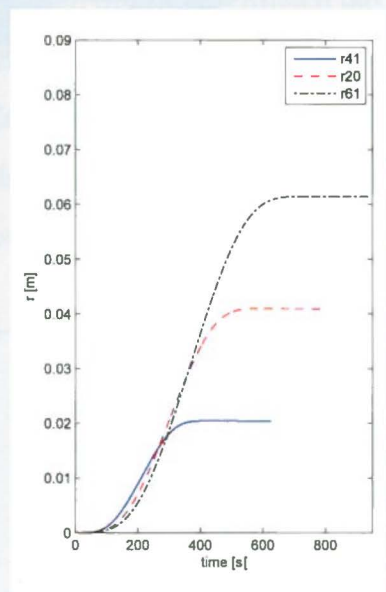
De productiviteit van een printer (geprint medium in m^2 per tijdseenheid) bepaalt grotendeels de waarde van een printer. Tijdens het printen beweegt het carriage van links naar rechts en vice versa, waarbij tussen iedere passage de gantry een stap opschuift, zie **afb. 3** voor een bovenaanzicht van de Arizona. In deze toepassing zijn de stap-tijden van de gantry geminimaliseerd met behulp van nieuw ontwikkelde lerende technieken voor multivariabele systemen. Drie representatieve referenties voor de gantry zijn weergegeven in **afb. 4**. **Afb. 5** laat de volgfout zien voor iedere herhaling van de referentie. Deze is een factor tien verminderd met de multivariabele techniek (groen) ten opzichte van standaardtechniek (rood). Het belangrijkste resultaat is dat de prestatie blijft gewaarborgd bij het wisselen tussen referenties r_{20} , r_{41} en r_{61} .



Afb. 3. Boven-aanzicht van de Arizona printer. De vrijheidsgraden en sensoren zijn aangegeven



Afb. 5. Volgfout per herhaling van de referentie: rood (oud, regelen op enkele as), groen (nieuw, multivariabel). Bij iedere herhaling van de referentie worden de feedforward parameters geoptimaliseerd. Bij het wisselen van de referentie blijft de prestatie gewaarborgd



Afb. 4. De drie verschillende referenties die zijn gebruikt voor de stapbeweging van de gantry

geval van de Arizona printer zitten de sensoren op een andere locatie dan waar de positienauwkeurigheid het belangrijkste is: dat is waar er op dat moment wordt geprint. In Inferential Control wordt dit onderscheid ex-

Leren van gemaakte volgfout

plicit gemaakt. Oplossingen zijn het toevoegen van sensoren zoals gebruik maken van vision, of het gebruik van modellen waarmee de prestatie kan worden voorspeld met de meetdata van de sensoren. **Robuustheid voor onbekende dynamische effecten**

Veel lerende regelaars gebruiken een model van het systeem om convergentie van het leerproces te garanderen. Het kan zijn dat een voldoende accuraat model niet beschikbaar is, of te kostbaar om te identificeren. Momenteel wordt ondermeer gewerkt aan modelvrije aanpakken, waarbij het model in de ILC wordt vervangen door het doen van extra experimenten. Deze regelaars zijn inherent robuust tegen onbekende dynamische effecten, omdat ze geen model van het systeem bevatten. **AI**

Inl.: TU Eindhoven, Control Systems Technology groep, tel.: (040) 247 27 96, www.tue.nl/universiteit/faculteiten/werktuigbouwkunde

Courses Mechatronics Academy

In een vernieuwde cursus 'Iterative Learning Control' van Mechatronics Academy gaan de auteurs samen met collega-experts in op recente ontwikkelingen in advanced feedforward en iterative learning control. Daarnaast worden de behandelde theoretische concepten door de deelnemers experimenteel toegepast op praktische systemen. Standaardconcepten zoals beschreven in het kader 'Feedforward tunen' worden in de basis cursus 'Motion control tuning' behandeld.

Inl.: Mechatronics Academy, www.mechatronics-academy.nl/