

Recent werd aan het departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven een innovatieve methode ontwikkeld om industriële machines trillingsarmer te laten lopen. Deze methode combineert een oude techniek – balanceren met tegengewichten – met vernieuwende inzichten rond numerieke optimalisatie. In een door het IWT ondersteund samenwerkingsverband met Picanol N.V. werd deze methode succesvol toegepast op de nieuwste generatie grijperweefmachines. Met weefsnelheden tot 750 inslagen per minuut zijn deze gebalanceerde machines op dit ogenblik de snelste in hun soort.

**B. Demeulenaere, D. Coemelck,  
J. Hemelsoen, E. Aertbeliën,  
M. Verschuure, K. Roelstraete,  
J. Swevers, J. De Schutter**



## Optimaal balanceren voor weven aan onvergelykbare snelheden

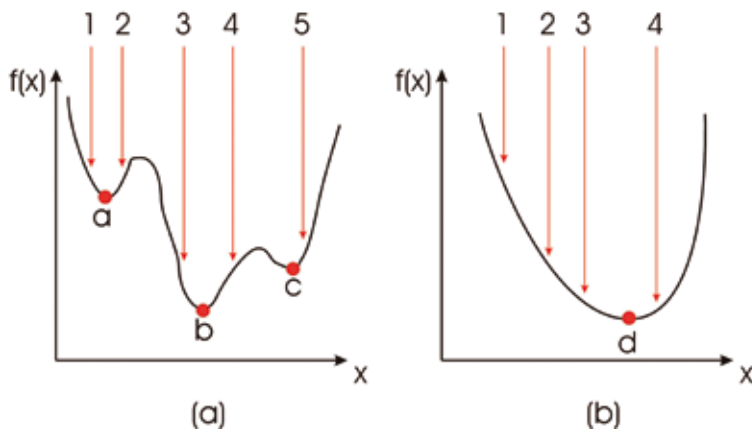
**A**ls eigenaar van een wagen hebt u vast al gemerkt dat het vervangen van een band stevast gepaard gaat met een balanceertest, waarbij tegengewichten op de velg bevestigd worden. Als deze test niet behoorlijk uitgevoerd wordt, veroorzaakt het ongebalanceerde wiel bij bepaalde snelheden vervelende trillingen in het stuur. Ook voor meer complexe, roterende mechanische systemen zoals sneldraaiende turbines vormt balanceren met tegengewichten een essentieel onderdeel van het ontwerpproces.

Daarentegen zijn voor het balanceren van machines met naast roterende ook heen-en-weer bewegende onderdelen enkel vuistregels en richtlijnen beschikbaar voor eenvoudige gevallen [1], (zie kaderstuk Balanceren voor dummies). Voor meer complexe machines leidt de afwezigheid van dergelijke richtlijnen ertoe dat balanceren vaak niet eens overwogen wordt. Nochtans raadt de Duitse machinebouwrichtlijn [1] balanceren sterk

aan wanneer de versnellingen van de kritisch belaste onderdelen hoger liggen dan 10 g. Veel moderne industriële machines halen deze drempelwaarde moeiteloos, net als verbrandingsmotoren, waarin tegengewichten bevestigd op de krukas een groot deel van de onbalanskrachten veroorzaakt door de zuigers compenseren.

### Innovatieve balanceremethode

Het vinden van de optimale vorm en plaatsing van tegengewichten vormt, zelfs voor eenvoudige machines, een complexe ontwerptaak waarvoor computerondersteunde numerieke optimalisatie aangewezen is (zie kaderstuk Balanceren voor dummies). De aanwezigheid van lokale optima (zie kaderstuk Convex or not convex) geeft echter vaak aanleiding tot suboptimale oplossingen, zelfs wanneer krachtige computers uren of dagen berekeningen uitvoeren.



**Figuur 1: Optimalisatieproblemen met doelfunctie  $f(x)$  die niet-convex (a) of convex (b) is. Voor het niet-convexe probleem vindt een gradiëntgebaseerde methode een optimum in het punt a (startpunten 1 en 2), het punt b (startpunten 3 en 4) of het punt c (startpunt 5). Voor het convexe probleem wordt het optimum d gevonden onafhankelijk van het gekozen startpunt.**

Onderzoekers van de K.U.Leuven hebben echter een techniek ontwikkeld die het vinden van het globale optimum wel garandeert en dit in rekentijden van slechts enkele seconden. Deze doorbraak is mogelijk dankzij een transformatie van de ontwerpvariabelen die het oorspronkelijk niet-convexe optimalisatieprobleem convex maakt [2], (zie kaderstuk Niet-convex: en dan?). In tegenstelling tot bestaande methodes, is deze nieuwe techniek toepasbaar op machines van willekeurige complexiteit, omdat ze niet gebaseerd is op het handmatig afleiden van de bewegingsvergelijkingen. Het volstaat, zoals de meeste machinebouwers nu al doen, over een (commerciële) software te beschikken die de krachten en momenten in het bestudeerde mechanisme kan berekenen.

### Balanceren van grijperweefmachines

Naar aanleiding van voorlopige onderzoeksresultaten rond het balanceren van tweedimensionale mechanismen werd in 2005 een samenwerking opgestart tussen het departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven,

### Balanceren voor dummies

Bij balanceren wordt bijzondere aandacht geschonken aan de volgende krachten: (i) de onbalanskracht en het onbalansmoment, d.w.z., de resulterende kracht en het resulterende moment die het mechanisme op zijn ondersteunende structuur uitoefent en (ii) het aandrijfkoppel, d.w.z. het moment nodig om het mechanisme op zijn gewenste toerental aan te drijven. Minimaliseren van de onbalanskracht en het onbalansmoment vormt een methode om trillingen van de ondersteunende structuur bij de bron aan te pakken, terwijl het aandrijfkoppel liefst zo klein mogelijk gehouden wordt om de grootte van de aandrijvende motor en/of het vliegwiel te beperken, evenals de excitatie van torsietrillingen.

Voor een vlak mechanisme met  $n$  bewegende onderdelen is volledige eliminatie van de onbalanskracht theoretisch mogelijk met  $(n+1)/2$  tegengewichten, op voorwaarde dat alle verbindingen tussen de onderdelen door draaiparen gerealiseerd worden. Nadelen van deze aanpak zijn echter dat (i) de massa van de tegengewichten kan oplopen tot 100 à 200% van de oorspronkelijke massa van het mechanisme, en (ii) het onbalansmoment en het aandrijfkoppel onaanvaardbaar sterk kunnen toenemen.

Het vinden van een goed evenwicht tussen het minimaliseren van de verschillende krachten en momenten, rekening houdend met beperkingen op de totale massa van de tegengewichten, kost en beschikbare ruimte, vormt een complexe taak. Voor een eenvoudig vierstangenmechanisme dient een ontwerper voor een balancerprobleem in zijn eenvoudigste vorm (het vinden van de optimale grootte en plaatsing van tegengewichten met een cilindrische vorm) al gauw een tiental ontwerpvariabelen te bepalen. Een typische ingenieursaanpak, en vrijwel het enige realistisch haalbare alternatief om met deze complexiteit om te gaan, is het inzetten van computerondersteunde numerieke optimalisatie.



**Figuur 2: OptiMax grijperweefmachine.**

## Convex or not convex, that's the question

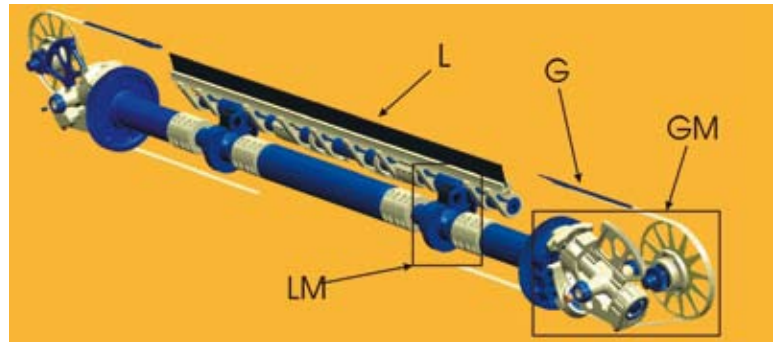
In een optimalisatieprobleem wordt gezocht naar de waarde van een bepaalde ontwerpvariabele  $x$  die een gegeven doelcriterium  $f(x)$  minimaliseert en aan bepaalde beperkingen moet voldoen. De meeste optimalisatieproblemen hebben geen analytische oplossing en dienen bijgevolg numeriek opgelost te worden. Hier wordt het onderscheid gemaakt tussen numerieke algoritmes die wel of niet gebaseerd zijn op het berekenen van gradiënten (afgeleiden).

De werking van gradiëntgebaseerde algoritmes is grafisch geïllustreerd in Fig. 1 en is te vergelijken met regen die zich, afhankelijk van de plaats waar die neervalt (d.w.z., afhankelijk van de numerieke waarde waarmee het algoritme geïnitieerd wordt), verzamelt in een welbepaald punt. De drie verschillende plaatsen a, b en c waar het water zich verzamelt in Fig. 1(a), zijn de drie lokale optima van het beschouwde probleem, waarvan b het globale optimum vormt. Het hoofdprobleem bij het numeriek oplossen van optimalisatieproblemen is dat de plaats noch het aantal van de lokale optima vooraf bekend zijn, zodat steeds een oplossing gevonden wordt die afhankelijk is van de gekozen startwaarde en zeer suboptimaal kan zijn, zoals het punt a in Fig. 1(a).

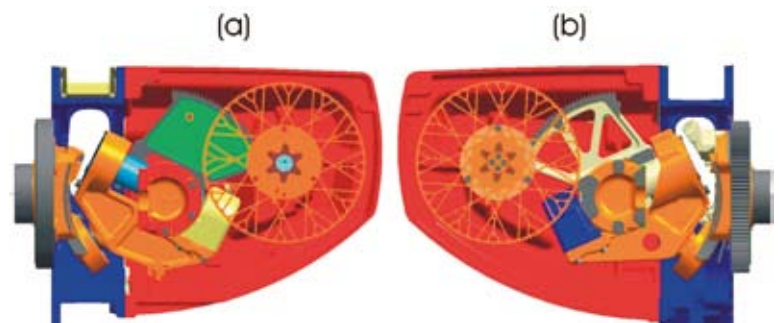
In Fig. 1(b) doet zich een andere en duidelijk veel gunstigere situatie voor: hier verzamelt de regen zich, onafhankelijk van de gekozen startwaarde, steeds op dezelfde plaats d die bijgevolg automatisch het globale optimum is. Een dergelijk probleem, met een uniek globaal optimum, is een convex probleem, terwijl het probleem van Fig. 1(a) niet-convex is. Het al dan niet convex zijn van een probleem wordt bepaald door de wiskundige eigenschappen van de functies die het doelcriterium en de beperkingen beschrijven. Deze eigenschappen kunnen vooraf geverifieerd worden.

Picanol N.V. en Flanders Mechatronics Technology Center, financieel ondersteund door een IWT O&O project. Als innovatiedoel formuleerde de projectaanvraag een vermindering met 30% van de dynamische krachten op de machinefundering, en dit voor de toen in ontwikkeling zijnde grijperweefmachine OptiMax (Fig. 2). Dit innovatiedoel beantwoordt aan een concrete nood om de dynamische belasting op de fundering van weverijen en de voortplanting van trillingen naar omliggende gebouwen te verminderen.

Na uitbreiding van de oorspronkelijke methode van twee- naar driedimensionale mechanismen, werd eerst het grijpermechanisme gebalanceerd. Dit driedimensionale vierstangenmechanisme vormt een van de drie hoofdbouwgroepen in een grijperweefmachine (naast het gaapvormingsmechanisme en het lademechanisme, zie Fig. 3) en veroorzaakt een zware dynamische belasting op de machinefundering.



Figuur 3: Situering van grijper (G), lade (L), grijpermechanisme (GM) en lademechanisme (LM) binnen de OptiMax grijperweefmachine. Het gaapvormingsmechanisme wordt niet afgebeeld.



Figuur 4: Grijpermechanisme voor balanceren (a) en na balanceren (b).

In eerste instantie werd manueel het oorspronkelijke grijpermechanisme (Fig. 4(a)) zo licht mogelijk gemaakt. In een daarop volgende, geautomatiseerde balancerestap werd de verwijderde massa terug toegevoegd, maar dan op optimaal balancerende plaatsen. Het resultaat van dit proces is een gebalanceerd grijpermechanisme (Fig. 4(b)) dat 3% minder weegt als het ongebalanceerde mechanisme en een 71% lagere onbalanskracht combineert met een 21% lager onbalansmoment en een 7% lager aandrijfkoppel.

Ter experimentele validatie werd een prototype OptiMax weefmachine opgemeten voor en na balanceren. De resultaten waren spectaculair. Subjectief werd een veel rustiger gang van de machine vastgesteld. Daarnaast werd de totale onbalanskracht op de machinefundering gehalveerd bij 750 inslagen per minuut. Met andere woorden, het balanceren van het grijpermechanisme volstond al voor het ruimschoots behalen van de beoogde projectdoelstelling. Niet alleen draaien de OptiMax machines relatief gezien erg rustig, maar zijn ze met weefsnelheden tot 750 inslagen per minuut op dit ogenblik ook de snelste in hun soort.

Verder onderzoek richt zich o.a. op het bepalen van het balancerpotentieel voor het lademechanisme.

## Besluit

Balanceren is een oud principe waarvoor een innovatieve en generieke methode ontwikkeld is die toelaat willekeurig complexe machines trillingsarmer te laten lopen. Het industriële potentieel van deze academi-

## Niet-convex: en dan?

De standaardaanpak om met niet-convexe problemen om te gaan is het proberen van vele startwaarden voor gradiëntgebaseerde methodes of het inzetten van methodes die geen gebruik maken van gradiënten, zoals de populaire genetische algoritmes. Op dit ogenblik zijn een aantal succesvolle softwareproducten op de markt die toelaten op eenvoudige wijze deze optimalisatiestrategieën los te laten op industriële processen en ontwerpproblemen. Alhoewel deze producten duidelijk nuttig en vaak de enige optie zijn in een industriële context, dient de eindgebruiker zich goed te realiseren dat het eindresultaat doorgaans een lokaal optimum is met een onbekende graad van suboptimaliteit en waarvoor soms zeer lange rekentijden vereist zijn, zeker bij grote aantallen ontwerpvariabelen.

Een totaal andere manier om met niet-convexe problemen om te gaan bestaat erin het wiskundig probleem zo om te vormen dat het convex wordt. Als dat mogelijk is, krijgt de ontwerper heel wat zaken cadeau: de garantie op een

globaal optimum, bovenop algoritmes die het probleem in een paar seconden oplossen en vaak gratis op het Internet beschikbaar zijn. Een dergelijke benadering legt de nadruk, niet op het numeriek oplossen van het probleem, maar op het gepast, d.w.z., convex formuleren van het probleem.

Om niet-convexe problemen convex te maken is vaak een transformatie van de ontwerpvariabelen nodig, een proces dat te vergelijken is met een bekende methode om integralen analytisch op te lossen: door een gepaste transformatie van de onafhankelijke veranderlijke kan een complexe integraal soms gereduceerd worden tot een bekende, analytisch op te lossen integraal. Het vinden van een dergelijke, convex-makende transformatie vereist de door een niet helemaal onbekende Duits-Zwitser-Amerikaanse theoretische natuurkundige geciteerde mix van 99% transpiratie (een doorgedreven kennis van zowel optimalisatietheorie als de bestudeerde toepassing) en 1% inspiratie.

sche doorbraak is duidelijk aangetoond op basis van spectaculaire resultaten voor grijperweefmachines. Het feit dat fundamentele onderzoeksresultaten zo kort na hun publicatie in een wetenschappelijk vakblad zorgen voor een sterk verbeterd industrieel serieproduct toont duidelijk de meerwaarde aan van samenwerking tussen academici en een innovatief industrieel R&D team, evenals de relevantie van het IWT O&O model.

Het onderzoekswerk rond balanceren vormt op dit ogenblik het vlaggenschip van een onderzoekslijn rond toepassing van convexe optimalisatietechnieken op werktuigkundige problemen in het algemeen. Een gelijkaardige aanpak heeft recent geleid tot andere doorbraken in het domein van (i) dynamisch optimale trajecten voor nokken en servosystemen; (ii) tijds optimale trajecten voor industriële robots en (iii) ontwerp van repetitieve regelaars voor periodische, mechatronische systemen. Deze onderzoekslijn ([www.mech.kuleuven.be/~bdemeule](http://www.mech.kuleuven.be/~bdemeule)) kadert binnen het multidisciplinaire onderzoekscentrum OPTEC ([www.kuleuven.be/optec](http://www.kuleuven.be/optec)) van de K.U.Leuven waarin gewerkt wordt rond ingenieurstoepassingen van numerieke optimalisatie in het algemeen en convexe optimalisatie in het bijzonder.

Dit onderzoek wordt mee ondersteund door het IWT (project 040444) en het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (project G.0462.05; postdoctoraal mandaat B. Demeulenaere).

### Referenties:

- [1] VDI Richtlinie 2149, Getriebedynamik (Blatt 1: Starrkörper Mechanismen), 1999.
- [2] B. Demeulenaere, E. Aertbeliën, M. Verschuure, J. Swevers, J. De Schutter. Ultimate Limits for Counterweight Balancing of Crank-Rocker Four-Bar Linkages. ASME Journal of Mechanical Design, Vol.128(6):1272-1284, 2006.

### De auteurs

Bram DEMEULENAERE is postdoctoraal onderzoeker van het FWO-Vlaanderen, verbonden aan de Afdeling Productietechnieken, Machinebouw en Automatisering (PMA) van het Departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven, en sinds september 2007 Gastwissenschaftler aan het Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) van de Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (Duitsland).  
E-mail: [bram.demeulenaere@mech.kuleuven.be](mailto:bram.demeulenaere@mech.kuleuven.be).

Jan HEMELSOEN is FE-Engineer bij Picanol N.V.  
E-mail: [jhml@picanol.be](mailto:jhml@picanol.be)

Dimitri COEMELCK, Erwin AERTBELIËN en Myriam VERSCHUURE zijn onderzoekers aan de afdeling PMA van het departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven.  
E-mail: [dimitri.coemelck@mech.kuleuven.be](mailto:dimitri.coemelck@mech.kuleuven.be) ; [erwin.aertbelien@mech.kuleuven.be](mailto:erwin.aertbelien@mech.kuleuven.be) en [myriam.verschuure@mech.kuleuven.be](mailto:myriam.verschuure@mech.kuleuven.be)

Kristof ROELSTRAETE is R&D Manager bij Picanol N.V.  
E-mail: [krls@picanol.be](mailto:krls@picanol.be)

Jan SWEVERS is hoogleraar aan de afdeling PMA van het Departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven.  
E-mail: [jan.swevers@mech.kuleuven.be](mailto:jan.swevers@mech.kuleuven.be)

Joris DE SCHUTTER is gewoon hoogleraar aan de afdeling PMA en departementsvoorzitter van het Departement Werktuigkunde van de K.U.Leuven.  
E-mail: [joris.deschutter@mech.kuleuven.be](mailto:joris.deschutter@mech.kuleuven.be)