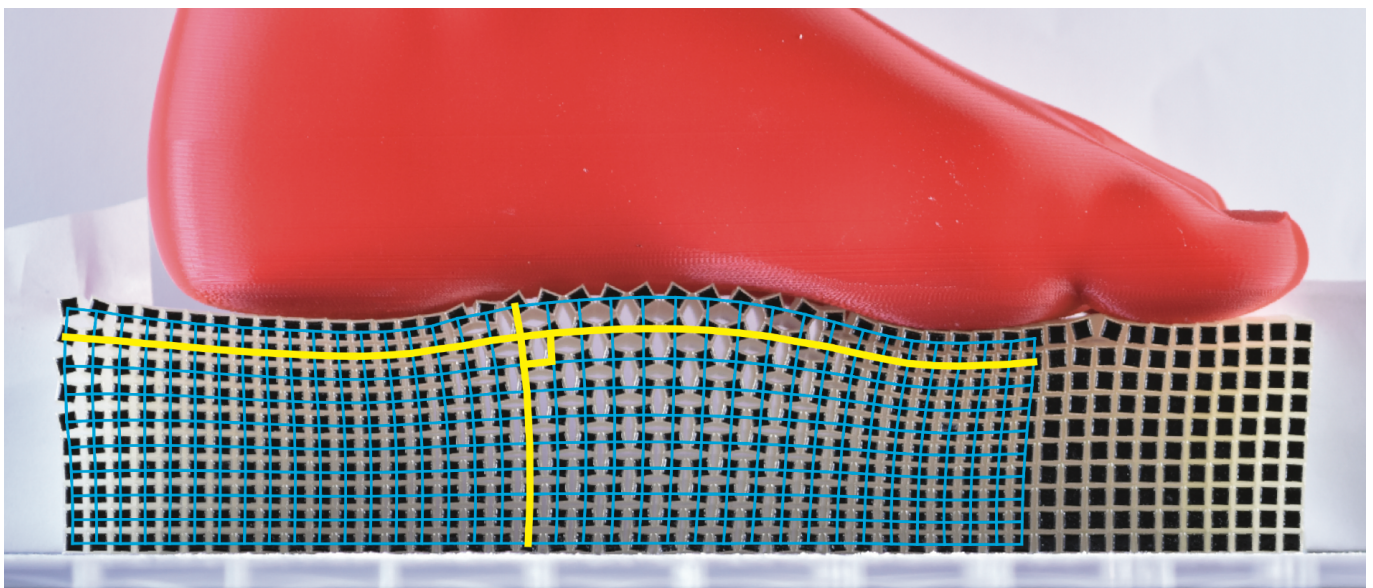


# Nieuw marionettenspel

**Recent onderzoek laat zien hoe in het laboratorium ontworpen metamaterialen als marionetten kunnen worden aangestuurd. Door de materialen alleen aan de buitenkant aan te raken, kunnen de onderzoekers nauwkeurig vervormingen van het gehele materiaal voorspellen en uitvoeren.**



**Afbeelding 1. Rotating Squares.** Het 'Rotating Squares'-metamateriaal vervormt conform: het blauwe rooster van rechte hoeken blijft ook na vervorming door een voetvormig object rechte hoeken vertonen. Afbeelding: C. Coulais et al.

De kunst van het marionettenspel is om zó aan touwtjes en stokjes te trekken en duwen dat een marionet op een gecoördineerde manier beweegt. De taak van de marionettenspeler is niet heel anders dan die van een natuurkundige, ingenieur of materiaalwetenschapper, die allemaal input-krachten willen omvormen in bepaalde bewegingen. Als marionettenspelers hun poppen aan het dansen brengen hebben ze echter wel een voordeel ten opzichte van natuurkundigen: ze kunnen gebruikmaken van hun aangeleerde intuïtie en expertise – in plaats van wiskunde – om het trekken en duwen in *real time* te coördineren.

Voor de natuurkundige is het voorspellen van de uitgesproken (of in meer technische termen: *niet-lineaire*) vervormingen van elastische voorwerpen een lastig spel, waarin de voortgang

maar langzaam gaat. Exacte recepten voor het kiezen van het juiste duwen en trekken dat leidt tot de gewenste vervorming – de dans van de marionet – zijn zeldzaam. Dat is precies wat het ‘marionettenspel’ dat bereikt wordt in het artikel “Conformal Elasticity of Mechanical Metamaterials” zo bijzonder maakt. In het artikel bestuderen natuurkundigen Corentin Coullais (Universiteit van Amsterdam), Martin van Hecke (AMOLF en Universiteit Leiden), en Michael Czajkowski en D. Zeb Rocklin (Georgia Tech, VS) een veel onderzocht exotisch elastisch materiaal. Ze ontdekken een intuïtieve meetkundige beschrijving van de uitgesproken, niet-lineaire ‘zachte’ vervormingen, en laten zien hoe ze elk van die vervormingen kunnen activeren met behulp van minimale input.

Een marionet is typisch zacht, natuurkundig gezien, omdat zo’n pop dankzij scharnieren, kogelgewrichten, zacht textiel en siliconen heel flexibele ledematen heeft. Die beweeglijkheid zorgt ervoor dat de marionettenspeler zijn of haar werk kan doen: zonder die flexibiliteit kan de pop niet dansen. Het ontwerpen van marionetten lijkt daardoor veel op het werk van een onderzoeker naar mechanische metamaterialen. Metamaterialen – materialen die niet in de natuur aangetroffen worden, maar die in het laboratorium worden gemaakt – zijn ook afhankelijk van scharnieren, gaten, vouwen en andere flexibele ingrediënten, waarmee ze een scala aan tegenintuïtieve natuurkunde kunnen tentoonspreiden. De diverse en onverwachte mogelijkheden van metamaterialen zijn gedurende de afgelopen tien jaar van intensief onderzoek geleidelijk aan het licht gekomen. Veel van het nieuwe gedrag komt voort uit de ontwikkeling van ‘auxetische’ materialen, materialen die de neiging hebben om in alle richtingen te *krimpen* als ze samengeperst worden, en dus niet in een bepaalde richting juist weer uitstulpen zoals we gewend zijn. Het zogeheten “Rotating Squares”-metamateriaal – zie de animatie hieronder – in een van de meest gangbare en intuïtieve voorbeelden van zulk gedrag. Hoewel het Rotating Squares-materiaal al een veel bestudeerd metamateriaal is, ontdekken onderzoekers nog altijd geheel nieuwe en krachtige fysica ervan.

De nieuwe resultaten die nu behaald zijn, zijn gebaseerd op de observatie dat maximaal auxetische materialen zoals het Rotating Squares-materiaal op een *conforme* manier vervormen. Conforme vervorming betekent, eenvoudig gezegd, dat elke hoek die je op een materiaal tekent er voor en na de vervorming exact hetzelfde uitziet. Dat lijkt een wat saaie observatie, maar voor wiskundigen kan de conforme eigenschap enorm nuttig zijn bij het bestuderen en beschrijven van het gedrag van een materiaal. Om die reden toonden de

onderzoekers nauwkeurig aan dat de vervormingen als gevolg van een serie willekeurige ‘belastingen’ van het materiaal, waaronder die van de voet in de bovenste afbeelding, tot op hoge precisie de conforme eigenschap hebben.

Dit inzicht leidt tot diverse theoretische stappen voorwaarts in de beschrijving van het materiaal. Het eindproduct van die stappen voorwaarts was een recept om een willekeurige conforme vervorming van het hele materiaal te kunnen kiezen en terug te rekenen naar hoe die vervorming veroorzaakt kan worden door het manipuleren van veren in de rand. Die veren zijn de ‘touwtjes’ waaraan de marionettenspeler trekt om de pop de beïnvloeden, en door de lengtes van de veren variabel te kiezen kan de gehele vorm van het materiaal gekozen worden uit een oneindig scala aan mogelijkheden.

**Afbeelding 2. Manipulaties aan de rand. Gemanipuleerde veren aan de rand van het Rotating Squares-metamateriaal kunnen gebruikt worden om een reeks vervormingen van het object tot stand te brengen.**

**Animatie: C. Coulais et al.**

De gecontroleerde vervorming wordt nog beperkt door de essentie van conforme vervormingen – de enig toegestane – en door de bewegingen die de Rotating Squares-structuur vanuit zijn begintoestand kan maken. Het gevolg is dat het vierkante blok dat de onderzoekers manipuleren nog niet erg lijkt op een echte marionet. De verwachting is echter dat deze ideeën ook werken voor een veel bredere klasse van mechanische materialen, zoals het *Kagome*-voorbeeld in de afbeelding hieronder. Zoals daar te zien kunnen zulke materialen veel drastischere en interessantere vervormingen vertonen.



**Afbeelding 3. Het Kagome-materiaal.** Een conforme vervorming van het Kagome-metamateriaal laat zien dat er drastisch verschillende mogelijkheden zijn. Afbeelding: C. Coulais et al.

De sprong naar meer levensechte ‘poppen’ lijkt niet ver weg, aangezien metamaterialen al zijn uitgebreid met manipuleerbare oppervlakken en allerlei nieuwe grijpers en handen, wat zelfs heeft geleid tot een elastische worm die door een serie ogen van naalden heen kan bewegen. Ontwikkelingen als deze zullen essentieel zijn in pogingen om zachte microscopische robots te ontwikkelen die van buitenaf aangestuurd kunnen worden, met bijvoorbeeld als doel om door een lichaam te kruipen en daar niet-invasieve operaties uit te voeren.

**Afbeelding 4. Rotating Squares in actie.**Een opname van de vervorming van het Rotating Squares-materiaal.  
Video: C. Coulais et al.

## Publicatie

[Conformal elasticity of mechanism-based metamaterials](#), Michael Czajkowski, Corentin Coulais, Martin van Hecke en D. Zeb Rocklin. Nature Communications 13, article 211 (2022).