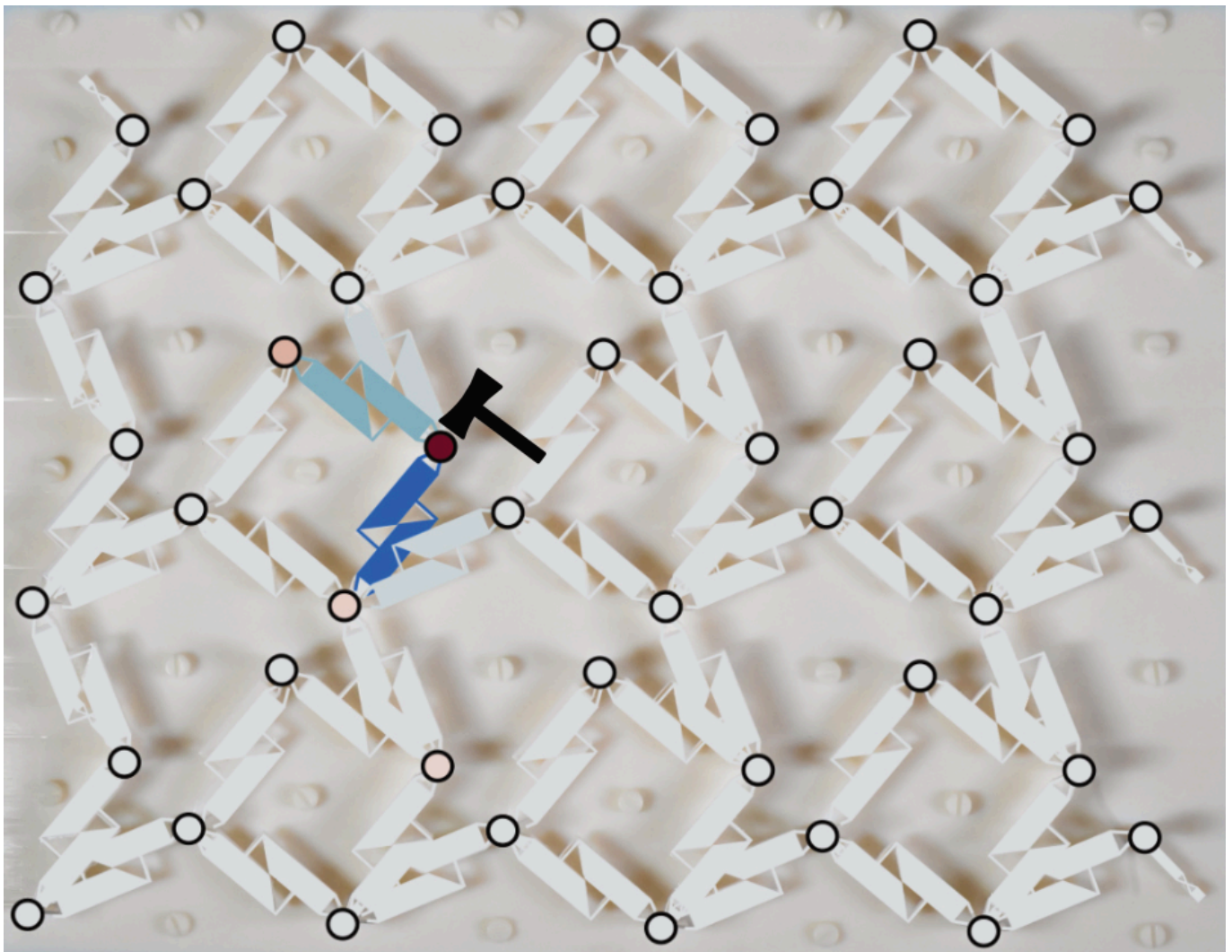


Topologie, van wiskunde tot experiment

Topologie, van oorsprong een tak van de wiskunde, is een hoeksteen van de moderne natuurkunde geworden. Dit komt door de opmerkelijke - en vooral betrouwbare - eigenschappen die topologie aan een materiaal of systeem kan verlenen. Helaas is het identificeren van topologische systemen, evenals het ontwerpen van nieuwe, over het algemeen een moeizaam proces waarbij een exacte overeenkomst gevonden moet worden tussen het fysieke systeem en een wiskundig model.



Afbeelding 1. Een topologisch metamateriaal.

Onderzoekers presenteren nu een modelvrije methode voor het identificeren van topologie, waardoor de ontdekking van nieuwe topologische materialen met een zuiver experimentele benadering mogelijk wordt gemaakt.

Topologie: van wis- naar natuurkunde

Topologie omvat de eigenschappen van een systeem die niet kunnen worden gewijzigd door een 'geleidelijke vervorming'. Zoals je misschien uit deze nogal formele en abstracte beschrijving kunt opmaken, stamt de topologie uit de wiskunde. De afgelopen decennia hebben natuurkundigen echter aangetoond dat de wiskunde die ten grondslag ligt aan de topologie zeer reële gevolgen kan hebben. Topologische effecten zijn te vinden in een breed scala aan fysische systemen, van individuele elektronen tot grootschalige oceaanstromingen.

Een concreet voorbeeld: op het gebied van de [quantummaterie](#) werd de topologie beroemd dankzij topologische isolatoren. Deze materialen geleiden geen elektriciteit door hun midden, maar elektronen bewegen vrij langs hun oppervlakken of randen. Deze oppervlaktegeleiding blijft bestaan, ongehinderd door materiële onvolkomenheden, zolang je niet iets drastisch doet zoals het veranderen van de hele atomaire structuur van het materiaal. Bovendien hebben stromen op de oppervlakken of randen van een topologische isolator een vaste richting (afhankelijk van de elektronenspin), bepaald door de topologische aard van de elektronische structuur.

Dergelijke topologische eigenschappen kunnen zeer nuttige toepassingen hebben, en topologie is een onderzoeksprioriteit van de materiaalkunde geworden. Naast het identificeren van topologische materialen in de natuur, richten parallelle onderzoeksinspanningen zich op het ontwerpen van synthetische topologische materialen. Topologische randtoestanden van mechanische structuren, bekend als 'metamaterialen', bieden ongeëvenaarde mogelijkheden voor golfgeleiding, detectie, rekenen en filtering.

Onpraktische wiskundige modellen

Onderzoek op dit gebied wordt vertraagd door het gebrek aan experimentele manieren om de topologische aard van een systeem te onderzoeken. De noodzaak om een wiskundig

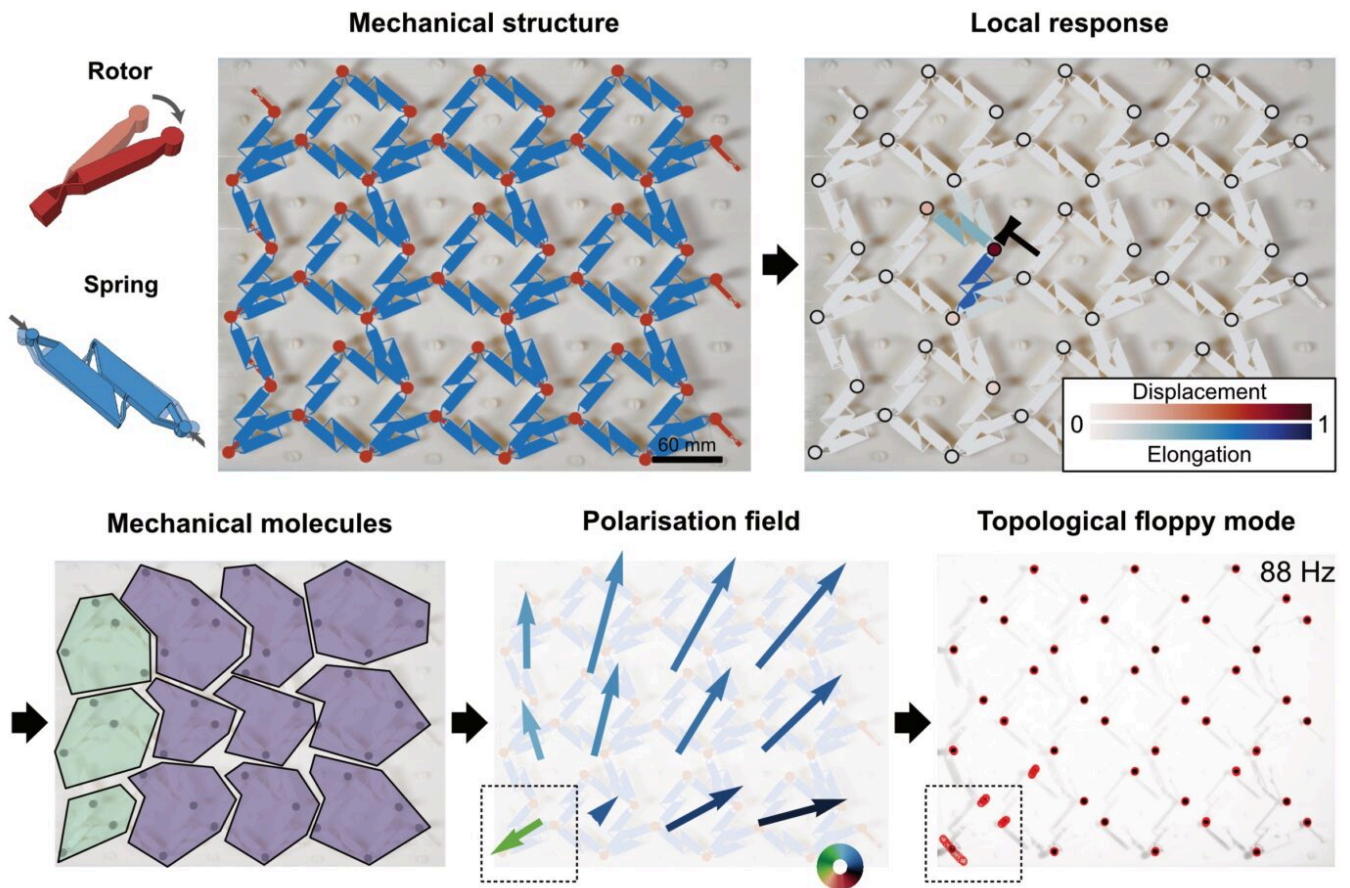
model te matchen met een fysiek systeem beperkt het onderzoek tot materialen waarvoor we al een theoretische beschrijving hebben, en vormt een knelpunt voor het identificeren en ontwerpen van topologische materialen. Om dit probleem aan te pakken, werkten Xiaofei Guo en Corentin Coulais van het [Machine Materials Laboratory](#) van de Universiteit van Amsterdam samen met Marcelo Guzmán, David Carpentier en Denis Bartolo van ENS Lyon.

“Tot nu toe waren de meeste experimenten bedoeld om theorieën te bewijzen of als voorbeeld van theoretische voorspellingen”, zegt Guo. “We hebben een manier gevonden om topologisch beschermde zachte of kwetsbare plekken in onbekende mechanische metamaterialen te meten zonder de noodzaak van modellering. Onze aanpak maakt praktische verkenning en karakterisering van materiaaleigenschappen mogelijk zonder dat we ons hoeven te verdiepen in complexe theoretische kaders.”

Een metamateriaal porren

De onderzoekers demonstreerden hun methode met mechanische metamaterialen bestaande uit een netwerk van rotoren (stijve staven die kunnen draaien) verbonden door elastische veren. De topologie in deze systemen kan sommige delen van een dergelijk metamateriaal bijzonder slap of stijf maken. Bartolo: “We realiseerden ons dat het selectief lokaal bewegen van een materiaal ons alle benodigde informatie zou kunnen opleveren om zachte of kwetsbare plekken in de structuur bloot te leggen, zelfs in gebieden die verwijderd zijn van onze sondes. Op basis hiervan hebben we een zeer praktisch protocol ontwikkeld dat toepasbaar is op een breed scala aan materialen en metamaterialen.”

Door individuele rotoren in het metamateriaal een duw te geven en de resulterende verplaatsingen in het systeem te volgen, identificeerden de onderzoekers verschillende ‘mechanische moleculen’: groepen rotoren en veren die als een enkele eenheid bewegen. In analogie met elektrostatistische systemen bepaalden ze hierna effectieve ‘polarisatie’ van elk molecuul, berekend op basis van de bewegingen van de moleculen. De polarisatie zal plotseling van richting veranderen als er een topologisch slap of stijf punt aanwezig is, waardoor de inherente topologie gemakkelijk te identificeren is.



Afbeelding 2. Topologie bepalen. Een volledig experimentele methode voor het bepalen van het topologische karakter van een mechanisch metamateriaal. Het metamateriaal bestaat uit een netwerk van rotoren (roterende staven, rood) verbonden door elastische veren (blauw). Door een individuele rotor een duw te geven en de daaruit voortvloeiende beweging in het metamateriaal te meten, is het mogelijk ‘mechanische moleculen’ te identificeren die zich als één geheel gedragen. Door vervolgens de ‘polarisatie’ (een vectorgrootheid) van elk molecuul in kaart te brengen, kunnen topologische kenmerken van het metamateriaal gemakkelijk worden geïdentificeerd. Het beeld rechtsonder bevestigt de aanwezigheid van een topologische, vrij bewegende rotor op de hoek van het materiaal – zoals voorspeld door het polarisatieveld – door het hele metamateriaal te doen trillen.

De onderzoekers pasten hun methode toe op verschillende mechanische metamaterialen, waarvan sommige uit eerdere studies bekend waren als topologisch, terwijl andere nieuwe structuren waren zonder een bijbehorend wiskundig model. Hun resultaten tonen aan dat de experimenteel bepaalde polarisatie zeer effectief is in het aanwijzen van topologische kenmerken.

Deze modelvrije methode is niet alleen toepasbaar op mechanische systemen, maar zou ook kunnen worden toegepast op fotonische of akoestische structuren. Dit maakt topologie toegankelijk voor een breder scala aan natuurkundigen en ingenieurs, en zal het gemakkelijker maken om functionele materialen te construeren die voorbij laboratoriumdemonstraties gaan.

Publicatie

[*Model-free characterization of topological edge and corner states in mechanical networks*](#),

Marcelo Guzmán, Xiaofei Guo, Corentin Coulais, David Carpentier, and Denis Bartolo. PNAS 121 (4), e2305287121, 2024