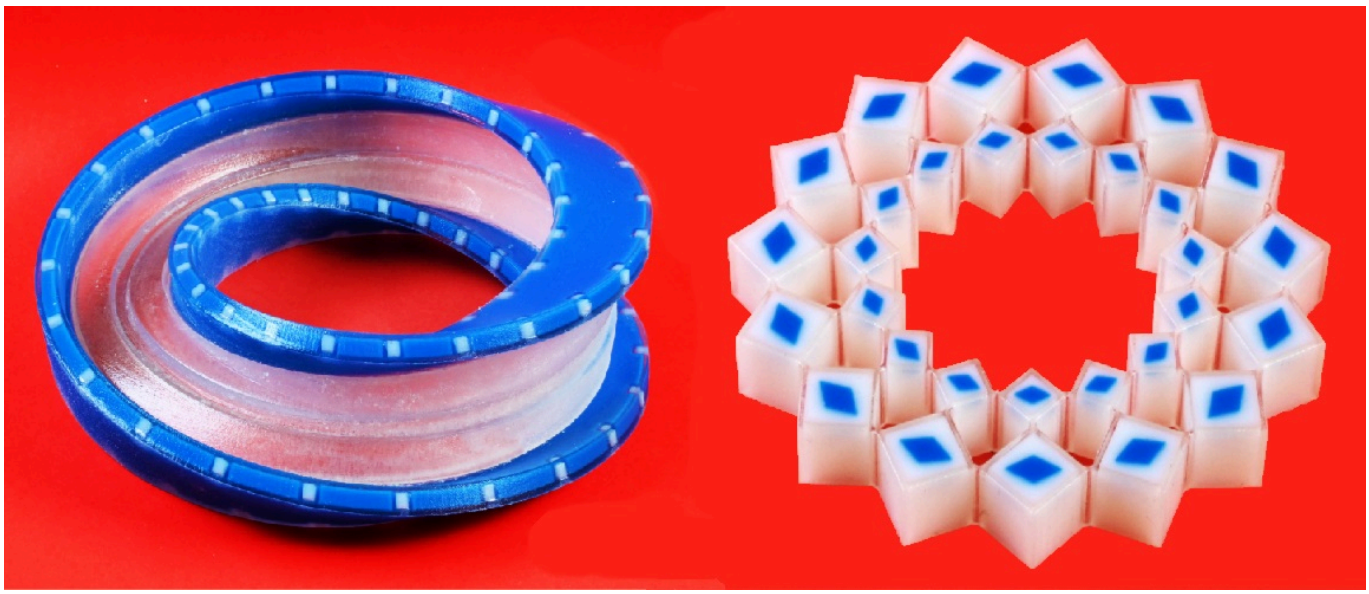
Materialen met een mechanisch geheugen

Onderzoekers hebben ontdekt hoe ze vervormbare materialen kunnen ontwerpen die altijd een punt of lijn hebben waar het materiaal niet vervormt onder druk, en die zelfs een vorm van mechanisch geheugen hebben. De resultaten zijn nuttig voor robotica en mechanische computers, en dezelfde ontwerpprincipes kunnen zelfs worden gebruikt voor quantumcomputers.



Afbeelding 1. Materialen met een geheugen. Een 3D-geprinte möbiusband (links) en oneven metaring (rechts). Dit zijn allebei niet-oriënteerbare objecten, waardoor ze altijd tenminste één punt langs de ring hebben die zich niet vervormt. Foto's: Xiaofei Guo.

De uitkomsten betekenen een doorbraak op het gebied van metamaterialen: ontworpen materialen waarvan het gedrag meer wordt bepaald door hun structuur dan door hun chemische samenstelling. In hun zoektocht om een metamateriaal met mechanisch geheugen te maken, realiseerden de natuurkundigen Xiaofei Guo, Marcelo Guzmán, David

Carpentier, Denis Bartolo en Corentin Coulais van het UvA-Institute of Physics en ENS de Lyon zich dat het ontwerp ‘gefrustreerd’ moet zijn, en dat deze frustratie overeenkomt met een nieuw soort orde, die ze niet-oriënteerbare orde noemen.

Natuurkunde met een twist

Een eenvoudig voorbeeld van een niet-oriënteerbaar object is een möbiusband, die gemaakt kan worden door een strook materiaal te nemen, er een halve draai aan te geven en de uiteinden aan elkaar te lijmen. Je kunt dit thuis proberen met een strook papier. Als je het oppervlak van een möbiusband met je vinger volgt, zul je merken dat je vinger, zodra je terugkeert naar je startpunt, zich aan de andere kant van het papier bevindt.

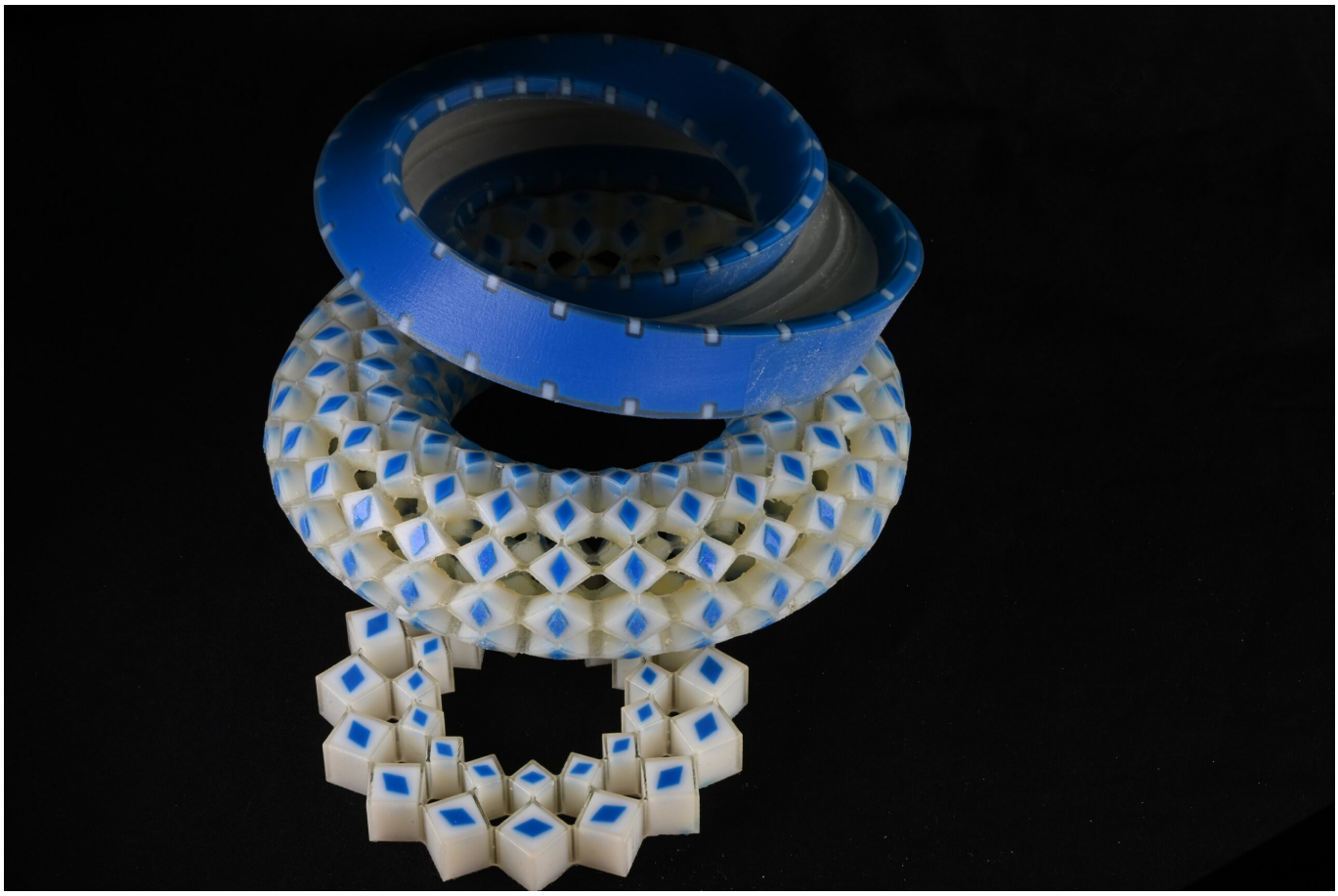
Een möbiusband is niet-oriënteerbaar omdat er geen enkele manier is om de twee zijden van de strook op een consistente manier te labelen; de draai maakt het hele oppervlak tot één geheel. Dit in tegenstelling tot een eenvoudige cilinder (een strook waarvan de uiteinden aan elkaar zijn gelijmd zonder draai), die een duidelijk binnen- en buitenoppervlak heeft.

Guo en haar collega’s realiseerden zich dat deze niet-oriënteerbaarheid een sterke invloed heeft op hoe een object of metamateriaal reageert op duwen of knijpen. Als je een cilinder en een möbiusband op een plat oppervlak plaatst en ze van bovenaf naar beneden drukt, zul je zien dat de zijkanten van de cilinder allemaal naar buiten (of naar binnen) uitpuilen, terwijl de zijkanten van de möbiusband dat niet kunnen. In plaats daarvan zorgt de niet-oriënteerbaarheid van de laatste ervoor dat er altijd een punt langs de band is waar die niet vervormt onder druk.

Het nut van frustratie

Dit gedrag reikt veel verder dan möbiusbanden. ‘We ontdekten dat het gedrag van niet-oriënteerbare objecten zoals möbiusbanden ons in staat stelt om materialen te beschrijven die gefrustreerd zijn. Ze willen van nature geordend zijn, maar iets in hun structuur verbiedt de orde om het hele systeem te omvatten en dwingt het geordende patroon om op één punt of lijn in de ruimte te verdwijnen. Er is geen manier om van dat verdwijnpunt af te komen zonder de structuur te snijden, dus het moet er hoe dan ook zijn, legt Coulais, hoofd van het Machine Materials Laboratory aan de Universiteit van Amsterdam, uit.

Het onderzoeksteam ontwierp en 3D-printte hun eigen mechanische metamateriaalstructuren die hetzelfde gefrustreerde en niet-oriënteerbare gedrag vertonen als möbiusbanden. Hun ontwerpen zijn gebaseerd op ringen van vierkanten die verbonden zijn met scharnieren op hun hoeken. Onder druk zullen naburige vierkanten in tegengestelde richtingen draaien, zodat hun randen dichter bij elkaar komen. De tegengestelde rotatie van buren maakt de respons van het systeem vergelijkbaar met de antiferromagnetische ordening die je ook in sommige magnetische materialen aantreft.



Afbeelding 2. Möbiusband en metaringen. Een 3D-geprinte möbiusband (boven) en oneven metaringen (midden en onder). Dit zijn allemaal niet-oriënteerbare objecten, waardoor ze altijd tenminste één punt langs de ring hebben die zich niet vervormt. Foto's: Xiaofei Guo.

Ringen die bestaan uit een oneven aantal vierkanten zijn gefrustreerd, omdat het onmogelijk is alle aangrenzende vierkanten in tegengestelde richtingen te draaien. Samengeknepen oneven ringen vertonen daarom een niet-oriënteerbare orde, waarbij de rotatiehoek op één punt langs de ring naar nul moet gaan.

Omdat dit een kenmerk is van de algehele vorm van het materiaal, is het een robuuste topologische eigenschap. Door meerdere metaringen aan elkaar te koppelen, is het zelfs mogelijk om het gedrag van hoger-dimensionale topologische objecten (zoals een Kleinfles) na te bootsen

Mechanisch geheugen

Het hebben van een noodzakelijke punt of lijn zonder vervorming is de sleutel om materialen een mechanisch geheugen te geven. In plaats van het van alle kanten indrukken van een metamateriaalring, kun je de ring ook op verschillende punten indrukken. Daarbij bepaalt de volgorde waarin je op verschillende punten drukt waar het punt of de lijn zonder vervorming terechtkomt.

Dit is een vorm van informatieopslag. Het kan zelfs gebruikt worden om sommige soorten logische poorten – de basis van ieder computeralgoritme – uit te voeren. Een simpele metamateriaalring kan daarmee functioneren als een mechanische computer.

Naast mechanica suggereren de resultaten van de studie dat ook niet-oriënteerbaarheid een robuust ontwerpprincipe zou kunnen zijn voor metamaterialen die informatie op verschillende schalen effectief kunnen opslaan – op uiteenlopende gebieden als colloïdale wetenschap, fotonica, magnetisme en atoomfysica. Het zou zelfs nuttig kunnen zijn voor nieuwe soorten quantumcomputers.

Coulais concludeert: ‘Hierna willen we de robuustheid van de verdwijnende vervormingen benutten voor robotica. We denken dat de verdwijnende vervormingen kunnen worden gebruikt om robotarmen en -wielen te maken met voorspelbare buig- en voortbewegingsmechanismen.’

Publicatie

Non-orientable order and non-commutative response in frustrated metamaterials, Xiaofei Guo, Marcelo Guzmán, David Carpentier, Denis Bartolo, en Corentin Coulais. Nature 2023.