



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Programmable mechanical metamaterials

Florijn, H.C.B.

Citation

Florijn, H. C. B. (2016, November 29). *Programmable mechanical metamaterials*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/44475>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/44475>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/44437> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Florijn, H.C.B.

Title: Programmable mechanical metamaterials

Issue Date: 2016-11-29

Samenvatting

Hoofdstuk 1

Metamaterialen zijn nauwkeurig ontworpen materialen met eigenschappen die niet of nauwelijks gerealiseerd kunnen worden met natuurlijke materialen. Zij danken hun bijzondere eigenschappen aan kleine, vaak repeterende, elementjes op de microschaal. Door deze elementjes op de juiste manier aan elkaar te koppelen kan het collectief, het metamateriaal, op de macroschaal bijzondere eigenschappen vertonen. Metamaterialen werden voor het eerst uitvoerig beschreven in de optica. Door een aantal superkleine elementjes, die een heel speciale wisselwerking hebben met lichtgolven, aan elkaar te koppelen kan een materiaal ontwikkeld worden dat licht op een bijzondere manier afbuigt. Dit kan resulteren in diverse fabelachtige toepassingen, zoals perfecte lenzen en onzichtbaarheidsmantels!

Het idee om de structuur/vorm op de microschaal zo te ontwerpen dat er uitzonderlijk gedrag op de macroschaal te voorschijn komt is breder toepasbaar dan alleen in de optica. Bij mechanische metamaterialen wordt de substructuur zo ontworpen dat er bijzonder gedrag aan het licht komt wanneer je eraan trekt of erop duwt. Een voorbeeld hiervan zijn materialen met een negatieve dwarscontractie. In tegenstelling tot een normaal materiaal (b.v. een elastiekje) dat smaller wordt als je eraan trekt, worden materialen met een negatieve dwarscontractie juist breder als je eraan trekt. Een belangrijke beperking, tot nu toe, van metamaterialen is dat er voor iedere functionaliteit een afzonderlijk materiaal/structuur ontwor-

pen moet worden. In dit proefschrift wordt een strategie beschreven zodat deze beperking komt te vervallen.

Hoofdstuk 2

Het programmeerbaar metamateriaal dat in dit proefschrift beschreven wordt is gemaakt van siliconen-rubber, dat elastisch blijft onder grote vervormingen, met daarin een patroon van cilindrische gaten op een vierkant rooster (zie figuur 2.3). De diameter van de gaten is alternerend in grootte, we noemen dat biholair. Wanneer er in de verticale richting op dit patroon gedrukt wordt dan veranderen de cilindrische gaten in elliptische gaten, waarvan de langste as van het grootste gat horizontaal staat en de langste as van het kleine gat verticaal staat. Deze oriëntatie van het patroon noemen we verticaal- of y-gepolariseerd. Als er in de horizontale richting op het patroon gedrukt wordt dan veranderen de ronde gaten ook in ellipsvormige gaten, maar nu met de langste as van het grote gat in de verticale richting en de langste as van het kleine elliptische gat in de horizontale richting. Deze oriëntatie van het patroon noemen we horizontaal- of x-gepolariseerd. Kortom, afhankelijk van de richting van samendrukken zijn er twee verschillende oriëntaties van het gatenpatroon.

Door in twee verschillende richtingen op het metamateriaal te drukken ontstaat er competitie tussen beide configuraties, hetgeen leidt tot bijzonder en programmeerbaar mechanisch gedrag. In de horizontale richting wordt er op het materiaal gedrukt m.b.v. plastic klemmetjes. Het materiaal begint dus in de horizontaal gepolariseerde oriëntatie. Vervolgens meten we de kracht die nodig is om het materiaal in de verticale richting in te duwen. Afhankelijk van de hoeveelheid horizontale inklemming registreren we vier verschillende krachtencurves. (i) Een monotone krachtencurve waarbij het patroon langzaam van oriëntatie verandert. (ii) Een niet-monotone krachtencurve met een gebied waarbij de kracht afneemt als er meer ingedrukt wordt op het moment dat het patroon (iets sneller) van oriëntatie verandert. (iii) Een krachtencurve waarbij er een groot verschil is tussen de curves voor indrukken en weer loslaten van het materiaal (hysterese). Het patroon verandert razendsnel van oriëntatie, op verschillende plekken in de krachtencurve voor indrukken en loslaten, wat resulteert in grote sprongen in het krachtsignaal. (iv) Een tweede monotone krachtencurve maar nu verandert het patroon niet van oriën-

tatie maar blijft horizontaal gepolariseerd. Deze verschillende programmeerbare curves zijn ook waargenomen in numerieke simulaties en in een simpel theoretisch model.

Hoofdstuk 3

In hoofdstuk 3 wordt dieper ingegaan op het theoretische model. Het model bestaat uit een verzameling van rechthoeken die aan de hoekpunten gekoppeld zijn (zie figuren 3.1 en 3.2). Dit simpele model vertoont dezelfde twee patroonsveranderingen als functie van richting van samendrukken als waargenomen in het rubberen materiaal. Door ook mechanische veertjes toe te voegen aan het model kan een kracht als functie van samendrukken in de verticale richting worden uitgerekend voor verschillende mate van compressie in de horizontale richting. Aan de hand van dit versimpelde beeld kunnen de overgangen tussen de vier verschillende mechanische regimes begrepen worden door de verschillende stabiele en instabiele paden uit te rekenen die het model volgt. Deze verschillende mechanische regimes kunnen ook op geometrische wijze geconstrueerd en begrepen worden door een tekening te maken van het pad dat het model volgt zonder dat er krachten op werken en dit te combineren met paden die het model volgt wanneer er wel krachten op werken.

Hoofdstuk 4

Het mechanische gedrag van het materiaal is, naast de hoeveelheid inklemming, ook sterk afhankelijk van de (dimensieloze) verhouding (biholariteit) tussen de diameters van de twee naburige gaten en de afstand tussen deze gaten, preciezer de minimale (dimensieloze) dikte van het materiaal tussen twee naburige gaten. In hoofdstuk 4 worden m.b.v. numerieke simulaties deze twee parameters op systematische wijze gevarieerd. We zien verschillende trends voor de biholariteit en de dikte. Voor grote biholariteit (een groot verschil tussen de diameters van de grote en kleine gaten) kunnen de kleine gaten bijna genegeerd worden en vindt er geen competitie meer plaats tussen de twee richtingen van compressie. Voor hele kleine biholariteit zijn de gaten vrijwel van dezelfde grootte en ook hier is er geen competitie meer tussen de twee richtingen van samendrukken. Wanneer de afstand, en dus de dikte van het materiaal, tussen twee naburige gaten

klein gemaakt wordt, gaat het gedrag van het metamateriaal steeds meer lijken op het gedrag van het simpele model zoals beschreven in hoofdstuk 3. Het gebied van programmeerbaar mechanisch gedrag is klein en is al zichtbaar voor hele kleine vervormingen. Voor een hele grote afstand (en dus grote dikte van het materiaal) tussen twee naburige gaten ‘voelen’ de gaten elkaars aanwezigheid niet meer en vindt er geen interessant mechanisch programmeerbaar gedrag meer plaats. Het optimum bevindt zich dus ergens in het midden.

Hoofdstuk 5

In het laatste hoofdstuk wordt naast de programmeerbaarheid met de hoeveelheid inklemming ook geprogrammeerd met de precieze locatie van horizontale compressie. Het lokale gedrag van het materiaal is sterk verschillend wanneer een klem wordt geplaatst op een rij uitkomend in een groot of een klein gat. Dit zorgt ervoor dat ook het globale mechanische gedrag sterk verschilt. Daarnaast zien we voor grote systemen van gaatjes domeinen met verschillende oriëntaties in het materiaal. De locatie van deze domeinen en hoe ze veranderen als functie van verticale compressie is ook sterk te beïnvloeden met de posities van de klemmetjes; dit noemen we ‘barcode’ programmeerbaarheid.