

令和元年6月20日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19980

研究課題名(和文) デジタルファブリケーションで実現する質感表現を目的としたメタマテリアルの開発

研究課題名(英文) Development of mechanical metamaterial for controlling a texture deformation using digital fabrication technique

研究代表者

青砥 隆仁 (Aoto, Takahito)

筑波大学・図書館情報メディア系・研究員

研究者番号：00785462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：物質の幾何学的な変形に応じて光学的な特性である色を自在に変化させることが可能な新しいメタマテリアル構造を提案した。提案する構造は、物体内部は中空のパイプ構造をしており、大域的には平板がパイプによって支えられた構造をしている。力学的外力により、中空のパイプがサブミリメートルスケールで変化し、空間的に広がることによってセンチメートルオーダーで見た際に平板の色が変化して見える。色の変化は中空パイプの形状と弾性係数によってコントロール可能である。これにより外部から電気や光など能動的なエネルギーを必要としない受動的な力学的センサが構築可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋や家などの土木構造物が損傷を受けた場合、発生場所と損傷程度を早期に的確に知ることは重要な課題である。本研究成果は、電気や光などの計測用エネルギーの供給なしに、構造物の損傷程度を知るためのセンサとして可動する。また、従来の点計測ではなく部位毎に変形度合いが色によって表現されているため、変形量の面計測が可能であるといった特長を持つ。また提案するセンサを構築する際には3Dプリンタなどのデジタルファブリケーション機器を用いることで容易に製作可能である。

研究成果の概要(英文)：We proposed a novel metamaterial structure that can change the color freely according to the geometrical deformation of the material. In the proposed structure, the inside of the object is locally a hollow pipe structure, and the macro-structure is a flat plate structure supported by the pipe. The external force makes the structure of hollow pipe change on a submillimeter scale, and the color of the flat plate is changed corresponding to the pipe deformation. The degree of color deformation can be controlled by the shape and elasticity of the hollow pipe. As a result, it is possible to create a passive mechanical metamaterial sensor that does not require to supply active energy such as electricity or light.

研究分野：コンピュータグラフィクス

キーワード：質感 デジタルファブリケーション メタマテリアル コンピュータグラフィクス

1. 研究開始当初の背景

橋や家などの土木構造物が損傷を受けた場合、発生場所と損傷程度を早期に的確に知ることは重要な課題である。これまで、電気を必要とする歪みゲージや光ファイバを用いた歪みセンサが提案され、発生場所と損傷程度を計測する方法が提案されてきたが、計測時に外部からの計測用エネルギー（電気や光）を必要とするといった問題や、面計測をするためにはセンサを大量に設置しなければならないという問題、計測用装置を内部に埋没させる必要があるといった問題が存在した。そのため、計測時に計測用エネルギーを必要とせず、面計測が可能であり、計測対象に貼るだけで損傷の発生場所と損傷程度を知ることができるセンサを開発する必要があった。一方、自然界を見てみると、タコの体色変化に代表されるように μm - mm 単位というマクロな構造を工夫することで、物体表面で起きる光学的な振る舞いをコントロール可能な生物が存在する。そこで本研究課題では、体色変化する生物の構造を参考にし、物質の幾何学的な変形に応じて光学的な特性である質感を変化させることが可能なメタマテリアルを作成することを製作する技術を確認することを目的とした。建築構造分野やマテリアルサイエンスの分野で発達してきた弾性メタマテリアルを製作する技術と、コンピュータグラフィックスの分野において発達してきた光学的なシミュレーション技術が発達してきたという背景も本研究課題を考える上で重要な要素であった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、物質の幾何学的な変形に応じて光学的な特性である質感を自在に変化させることが可能なメタマテリアルを作製することである。本研究課題の特徴は構造色に代表されるミクロな構造を工夫することで物体表面の色をコントロールする技術と異なり、 μm - mm 単位というマクロな構造を工夫することで、物体表面で起きる光学的な振る舞いをコントロールすることを目的としている点である。具体的には、タコの体色変化に代表されるように、内部の構造を自由に変形させることによって、物体の色を自由に変化可能な構造を探索する（図1参照）。また探索する構造は、化学的な手法で製造されるものではなく近年発達が著しいデジタルファブリケーション技術を用いて製作を行えるようにする。これにより直接的に変形に応じた狙った質感を持つ物質を容易に出力可能にすることで、製造難度が低い手法を模索する。具体的には、図1上に示すように、複数の層構造で構成されており、応力が与えられた際、変形する方向がプログラミングされた方向に動くことによって、図1下に示すように、構造が変化することで各層の見える割合が変化し、それにより物質の光学的な質感を動的に変化させることが可能なメタマテリアルの製作を目的とした。

3. 研究の方法

以下の三つの課題に関して研究を行い、物質の幾何学的な変形に応じて光学的な特性である質感を自在に変化させることが可能なメタマテリアルの作製を目指した。

- 1) 質感と変形のモデル化 本研究課題は、物質の幾何学的な変形による光学的な特性の変化を対応付け、モデル化する必要がある。建築構造分野における従来研究が形状と変形の方向を入力とし、それを可能な構造を持った構造物を出力するのに対し、本研究課題は光学的な質感と表面形状の動きを入力とし、それを可能とする構造を出力する点で大きく異なる。これまでの既存の CAE ソフトでは単純な対応が困難であったため、変形量に依存して光学的な変化量をシミュレーション可能なソフトウェアおよびアルゴリズムの開発を行った。
- 2) デジタルファブリケーションに使用可能な材質の光学的特性の獲得・解析・アーカイブ化 本応募課題を達成するためには、反射・屈折・散乱などモノの表面で起こる光学的な現象をデジタル化・アーカイブ化する必要がある。そのため、物質の幾何学的な要素である構造だけでなく光学的な要素も包括的に考えシミュレーション実験を行った。
- 3) デジタルファブリケーション機器の性能を考慮した製作方法の確立 従来のコンピュータ

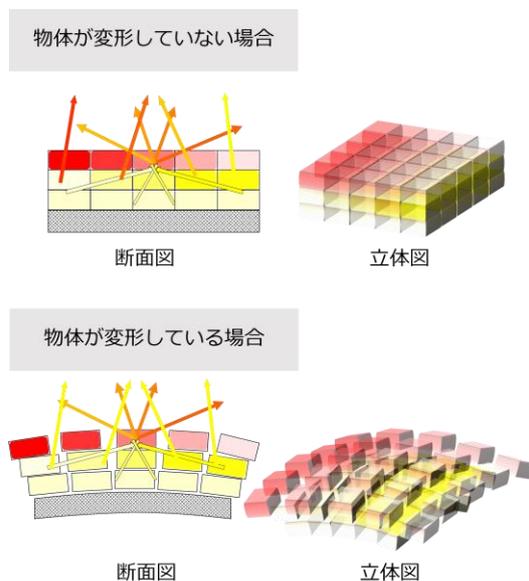


図1 構想時における予想図

を用いて物質の幾何学・光学的な要素をシミュレーションし、デジタルファブリケーション機器を用いて出力する研究はデジタルファブリケーション機器が理想的な性能を持っているという前提の中で研究が行われているため、実際に作製されたモノとコンピュータ上でシミュレーションされた結果に齟齬が生じる。そのため、デジタルファブリケーション機器の性能(例えば3Dプリンタのヘッドの繰り返し精度や印刷可能な材料の太さなど)を推定すべきパラメータとし製作を行った。

4. 研究成果

光学的な質感と幾何学的な形状・変型の関係をモデル化し、シミュレーション環境において質感の動的な変化を確認した。また、3Dプリンタを用い、実際にシミュレーションした構造を製作することで、外部より加えられた力に応じマイクロな構造が変化し、マクロには色が変化して見えることを確認した(図2)。

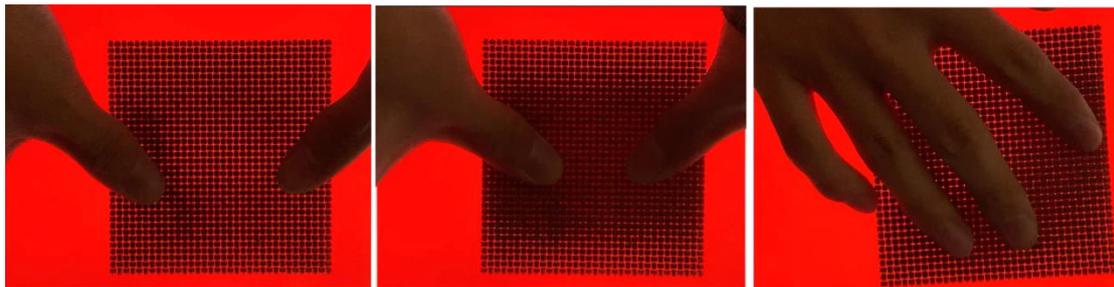


図 2 製作したメカニカルメタマテリアル. 左から力を加えていない状態. 力を二点に加えた状態. 三点に緩く力を加えた状態. 加えた力に応じて赤から黒に色が変化しているのが目視できる.

各マイクロなパーツは中空のパイプ構造をしており、力を加えていない状態から加えた状態までの色の変化はパイプの構造に依存する。各平板は上部が透明であり、下部とパイプに異なる色が着色されている。この二枚の平板の間隔は十分に狭く、マクロに見ると一枚の平板とみなせる程度の大きさとなっている。各パイプの構造は、以下の数式のように表現できる。

$$\frac{y^n}{a} + \frac{x^n}{b} = 1 \quad (0 < n < \infty)$$

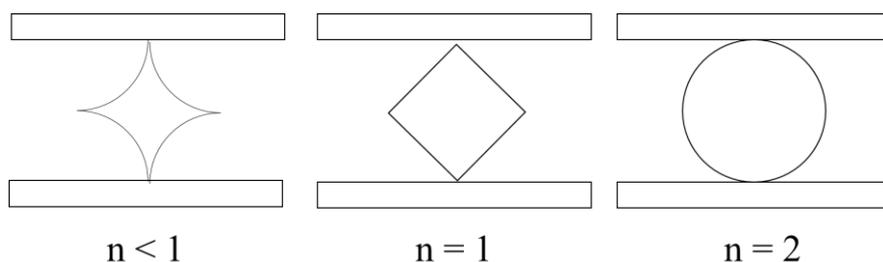


図 3 nを変化させた場合のパイプ構造の変化

ここで、nを変化させることでパイプの初期形状が変化する(図3)。パイプ構造は $n < 1$ の場合において凹状になり、 $n \geq 1$ において凸状になる。また、初期の形状が異なってはいるものの、物体真上方向から直交投影で見た場合においてパイプの見える割合はそれぞれ同面積となる。各パイプの構造が十分に小さい場合、マクロに見るとパイプの色と下部の色が平均化された色が見える。ただし、aとbは初期状態では1とし、平板とパイプの接点は点であるものと仮定する。

本形状に対して上から下に力を加えることでパイプ構造が変化し二枚の平板間の距離が短くなる。これに伴い、パイプが平面方向に広がるため、初期状態では見えていた下部領域がパイプによって隠され、最終的にはパイプによって全領域が充填されるようになる。そのため、

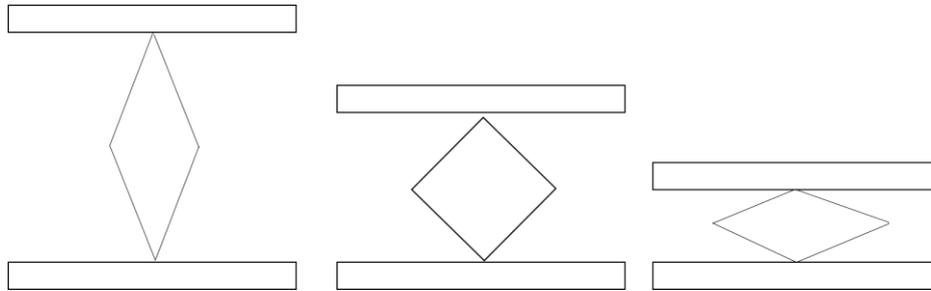


図 4 $n = 1$ の場合において平板間の距離を変化させた場合における断面イメージ図. 左：平板を引っ張った場合，中：初期形状，右：平板を押し込んだ場合.

本形状は平面に垂直方向の力に依存してパイプ形状が変化し、色を変化させることが可能となる。平板間の距離が変化した場合、前述の数式の a と b の項目が平板間の距離に依存して変化し、途中のパイプ形状が表現される。図 4 に $n = 1$ の場合において平板間の距離を変化させた場合の断面図を示す。平板間距離が変化した場合、パイプは周囲長を保ったまま変形する。そのため、 $n = 1$ の場合においては、内部のパイプ構造は菱形形状の縦横比が変化する形となる。

図 5 に $n = 1$ の場合における平板の距離を変化させた場合における混色の割合を示す。パイプの横方向の長さが混色の割合に直接かかわってくるため、平板の距離を変化させた場合において色の変化は非線形な曲線を描く。平板間の距離が 1 の時は、平板が引っ張られ、パイプが縦方向に直線状態になるまで引っ張られた状態である。一方、平板間の距離が 0 の場合は、パイプが横方向に直線状態となる場合である。また初期形状 ($a = 1, b = 1$) の場合において、パイプの占める割合が 59% 程度となっていることが確認できる。これは提案する構造が、周囲長の 1/2 と初期形状の水平方向の距離の比によって決定されるためである。図 5 に示したように、混色割合の変化度合いは n の数によって曲線を描くため、混色割合の度合いを変化させずに初期の混色割合を変化させるためには、図 4 の左や右に示すように、初期の形状を変化させて製作する必要がある。

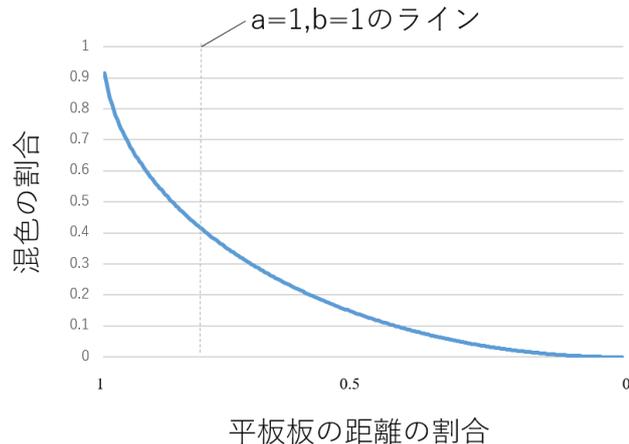


図 5 $n = 1$ の場合において平板間の距離を変化させた場合における混色度合い

図 2 に示すように、実際に 3D プリンタを用いて製作する場合においては、パイプ自身の弾性係数がパイプの材質・厚みによって決定されるため、パイプの厚みを適切に設定する必要がある。パイプの厚みが細いと自重によって初期形状が設定した状態から外れて変化し、すぐに摩耗して使えなくなってしまう。また、パイプの厚みが太いと初期形状は維持されるものの最終的にパイプ間の空白部分が充填されないという問題が生じるためである。加えて、製作時に用いる 3D プリンタの解像度や、材質に依存する。これらの問題に対応するため、シミュレーションによって予想される構造と実際に印刷したものとを差を計測し、材質・厚み・構造のパラメータを変化させることでシミュレーション通りの混色を実現する構造を製作可能にした。

5. 主な発表論文等
なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。