

質感の変化・取り替え可能な形状ディスプレイの基礎検討

今村 知美^{1,a)} 寛 康明^{2,b)}

概要：物理的なピクセル群を制御して立体形状を表現する形状ディスプレイでは、形状変化に加えて色や質感の変化を両立するためには、別種の制御対象を扱わなければならない、装置が大型化することや、配線や制御が複雑化するという問題があった。そこで本研究では、リニアアクチュエータ2本に対して取り付ける、駆動力を持たないモジュールを用いることで、他の機構を追加することなく、リニアアクチュエータ群のみを駆動源として、形状変化と色やテクスチャなどの質感の提示を同時に行う形状ディスプレイを提案する。簡易に取り付け・変更可能なモジュールを複数種類用意することで、手軽に任意の質感を表現することが可能な形状ディスプレイのデザインツールキットとしての実装を目指し、本稿では、数種類のモジュールによるプロトタイプについて報告する。

1. はじめに

実素材の特性やその変化を活用したディスプレイは、物理空間において立体的な情報表現やマルチモーダルなインタラクションが可能であるとして、研究や作品表現、空間デザインなどの各面から注目を集めている。HCI 分野では、形状ディスプレイ (Shape Display) や形状変化インタフェース (Shape-Changing Interfaces) と呼ばれ、研究が盛んに行われている。その中で Alexander らは、形状変化インタフェース研究の Ground Challenge として、ツールキット開発により実装の障壁を下げることや、色などの形状以外の情報を装置を複雑化・大規模化させることなく付与することを課題として挙げている [1]。

形状ディスプレイを実現する駆動方法として、二次元平面状に並べられたピンアレイを上下動させて、形状表現を行う手法があり、inFORM [2] や Lumen [3] が代表例として挙げられる。これらの装置では、形状のみならずそれぞれの色も動的に制御することに取り組んでいる。具体的に inFORM では、上部のプロジェクタからの映像投影によって色を加える。Lumen では形状記憶合金による垂直方向の動きと LED によって物理的な形状・動きと発光を独立に制御する。こうした例は、実体ならではのマルチモーダルな表現を可能にする一方で、装置の大規模化や照明条件の制約、形状以外の制御対象が増えることによるシステムの複雑化などの課題があった。プロジェクタや LED を用

いずに、形状と色を同時に制御するアプローチとして、異なる色の膜を重ねて選択的に膨張させることで各ピクセルの大きさや色を同時に変化させる COLORISE [4] や、各面が色で塗り分けられた複数のロボットが転がることで、ピクセルの位置と色を変える Rolling Pixels [5] が挙げられる。これらは、環境の制約やシステムの複雑化といった問題を一部解決することに成功しているが、表現できる形状や色には限りがあった。

これらに対して本研究では、形状を制御するアクチュエータの動きを利用して色やテクスチャなどの「質感」を合わせて制御する手法を提案する。関連する取り組みとして、メディアアート分野において多く提案されてきたキネティックインスタレーション作品の手法を参照する。代表的な作品として多数の木片にモータを取り付けて機械的に動作する鏡を実現した Daniel Rozin の Wooden Mirror [6] をはじめとする Mechanical Mirrors を挙げる。これらの多くは素材を二次元的に配置するものであるが、本研究では 2.5 次元的な形状変化と取り付けた素材の状態変化による色彩・質感変化を両立した表現の実現を目指す。

もう一つの本研究のねらいとして、既存のピンアレイ型形状ディスプレイに対して、ピン先端にモジュールを取り付けることで着せ替えるように手軽に質感表現を付与する工夫がある。関連研究として、ピンアレイ群に対して、ピンアレイの上下動によって駆動される受動的なモジュール群を取り付けることで、単純な上下動に止まらない動きやインタラクションに拡張させる TRANS-DOCK [7] がある。これに対して本研究では、リニアアクチュエータの上下動を活かして質感の変化・付与可能なモジュールを提案・

¹ 東京大学 大学院学際情報学府

² 東京大学 大学院情報学環

^{a)} imamura@xlab.iii.u-tokyo.ac.jp

^{b)} kakehi@iii.u-tokyo.ac.jp

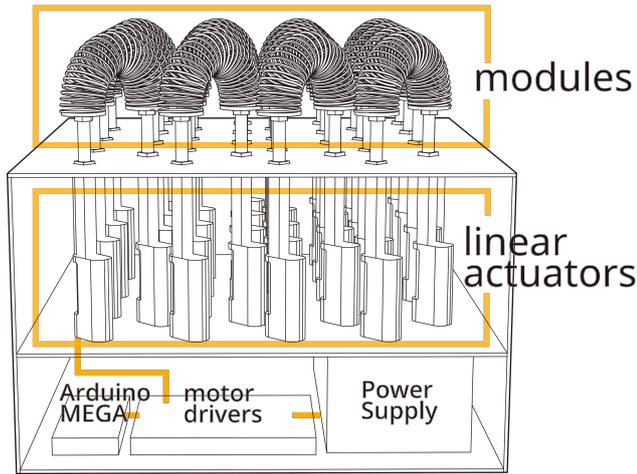


図 1 システム概要図

設計する。

2. 提案手法

2.1 手法の概要

図 1 にシステムの概要を示す。本提案手法は、2次元的に並べられたリニアアクチュエータ群による形状ディスプレイを基盤とする。システムは、アクチュエータの先端に取り付けるモジュール、およびアクチュエータを駆動するための制御部からなる。

今回はモジュールの基本形状として、スプリング形状に着目した。各モジュールは垂直に立てた2本のアクチュエータにまたがるようにアーチ状に取り付け、それを1モジュール単位としてピクセル状に並べる。図 2 のようにそれぞれの高さによって、全体として形状表現を行うと同時に、2本の高さの差の違いによって、各ピクセルで色や質感の変化を提示することができる。

ここで、リニアアクチュエータの制御のみで形状変化と色や質感の変化両立していることから、システムの複雑さを増すことなく、形状ディスプレイの表現の幅を広げることが可能になる。また、取り付けるモジュールを交換することで、それぞれのピクセルで提示する色や素材感を変化させることができる。

2.2 モジュール設計

スプリングがアーチを描くように両端をアクチュエータに固定し駆動することで、1対のアクチュエータの相対高さの変化によって、スプリングの中でのアーチの頂点になる位置が変わる。このとき、あらかじめ異なる色や質感・形状をスプリング上にマッピングしたモジュールを用いることで、スプリングの中でどの層がアーチの上部に来るかに応じて各ピクセルの質感が変化する。本稿では、各モジュールで変化するパラメータは一つに限定したが、例えば色の変化と断面形状の変化を同時に行うモジュールなど、複数要素を組み合わせたモジュールを用いてより複雑

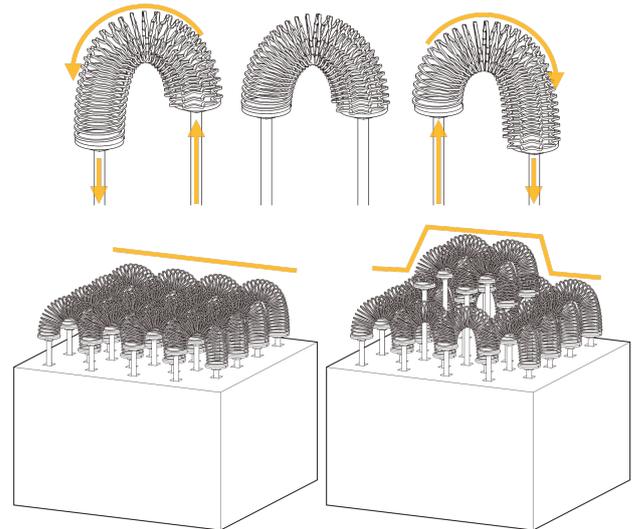


図 2 各ピクセルの変化（上）と形状変化（下）

表 1 実装したモジュールの寸法

	線幅 (mm)	線高さ (mm)	巻数
(a) 色	2	1	61
(b) 表面質感	2	1.25	45
(c) 断面形状	2	1.4	50
(d) 線密度	2	1.4	40

な変化を生み出すこともできる。また、駆動する速さや加速度に応じてスプリング特有の振動や揺らぎの表現が生まれる。

図 3 に実装したモジュールの例を示す。それぞれのモジュールの詳細を次に述べる。直径は全て 35mm を基本としている。その他の寸法については表 1 にまとめた。

- (a) 色 ポリ塩化ビニル製の、既製品のスリンキー（ベル玩菓製）を用いた。表面の色が赤、水色、緑、黄色と、グラデーションで変化している。アクチュエータを動かしてアーチの中の頂点を変化させていくことで、モジュールの見せ方を変えるだけで、ピクセルの色が連続的に変化していくことを狙っている。
- (b) 表面光沢 表面の質感が、ストーン調からメタリック調に変化していく。FDM 式 3D プリンタ（Creality 社 Ender3-Pro）によって、PLA フィラメントをスプリング形状に造形した後、グレーのストーン調スプレーとシルバーのラッカースプレーをグラデーションになるように塗布した。これにより、表面質感の滑らかさ、粗さの変化と、光の反射率が変化することを意図している。
- (c) 断面形状 スプリング全体の断面形状が、星形から円形に変化していく。全体の長さのうち両端 2/5 がそれぞれ星形断面、円形断面、間の 1/5 で徐々に形状が変化していくように設計した。具体的には星形は、24° ごとに凹凸を繰り返すように設計されており、層ごと

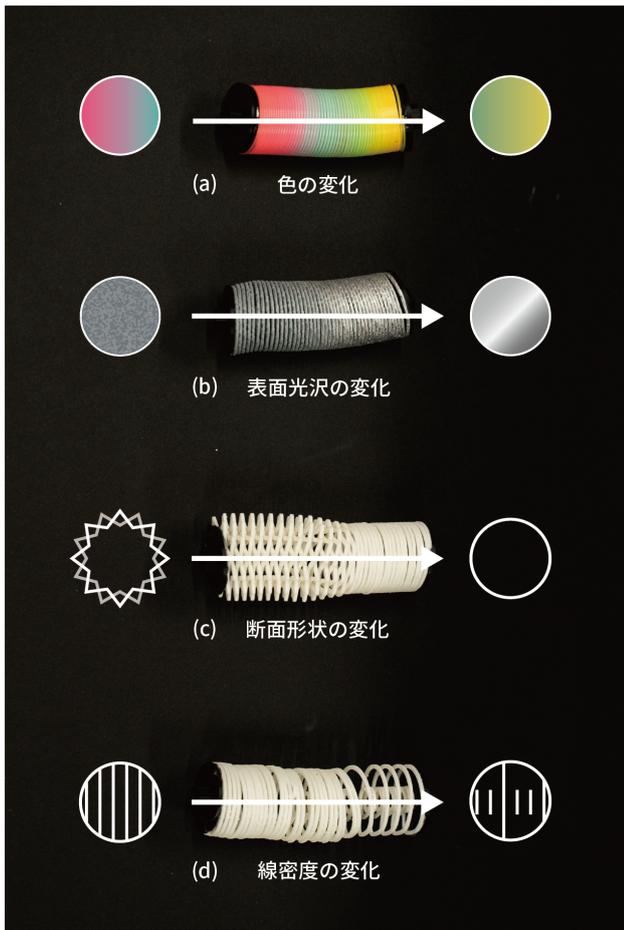


図 3 実装したモジュール

に凹凸が互い違いになっている。凹凸の寸法は4mmで、凸部分では中心から21.5mm、凹部分では13.5mmの距離に先端が配置されている。アーチ状になった時に、星形ではギザギザした粗い質感を表現し、円形では滑らかな表面になることで、(b)とは別のアプローチで表面の滑らかさ、粗さをコントロールすることを目指している。また、凹凸の数や長さによっても変化を持たせることができる。

(d) 線密度 スプリングの径が小さい層を部分的に作っている。全体の長さの1/3では通常のスプリングと同様に、間の1/3では3層中1層の直径が1/3に、反対側の1/3では3層中2層の直径が1/3になるように設計した。これにより、線密度が高く密な表面から、線密度が低く疎な表面への変形を狙っている。(c)(d)は光造形方式の3Dプリンタ(Formlabs社Form3)で造形した。

2.3 取り替え可能なアタッチメント

スプリングをアクチュエータに取り付けるためのアタッチメントを図4に示す。これは上下2つのパーツに分かれており、下パーツはアクチュエータ先端のネジ穴に固定され、上パーツはスプリングの底面と天面に接着される。そ

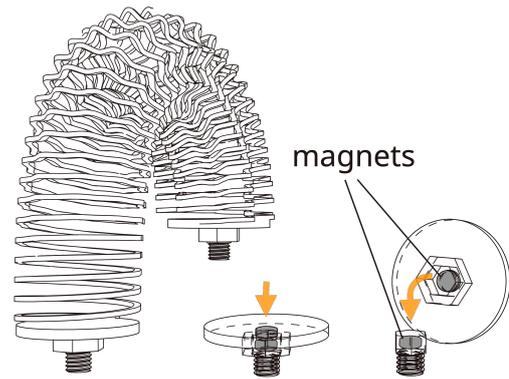


図 4 取り替え可能なアタッチメント

れぞれ磁石が埋め込まれているため、簡単に付け外しできる。また、はめ込む部分は六角形になっており、動作中にねじれることを防止している。

モジュールを容易に取り付け・変更可能にすることで、専門知識がなくても所望の質感を表現する形状ディスプレイのデザインキットとして扱えるようになることを目指している。

3. 実装

前章で提案した実体ディスプレイの実装をおこなった。リニアアクチュエータにはActuonix社のP16-100-22-12-Pを、制御にはArduinoMegaと、モータードライバにTB6612(東芝)を使用した。

まず、モジュールを交換することにより付与する質感が変化することを検証するために、図3に示した4種類のモジュールで、2本のアクチュエータ高さの違いによる、正面と斜めの2方向からの単体のモジュールの見え方の変化を観察した。結果を図5に示した。アクチュエータ中心間の距離は45mmに固定し、左のアクチュエータに対する右のアクチュエータの高さが-70mm, 0mm, +70mmの3条件ずつ、カメラの輝度設定等は変えずに撮影した。

(a)については、アーチ部分の色が、赤、水色、緑、黄色へと連続的に変化していく様子が観察できた。-70mmと+70mmでは両端の高さの差が大きくややアーチ形状が崩れたため、今後は、既製品以外に形状・色を設計することで適した寸法や動き、色彩変化の設計に取り組む。

(b)では、-70mmではストーン調部分がアーチ上部を形成しているため左からの照明に対する反射光成分が少なく、+70mmではメタリック調部分が頂点にきているので反射光成分が多く観察された。

(c)では、星形断面による粗くギザギザした表面から、円形断面による滑らかな表面への遷移が見られた。一方で、断面の形状が変わったことで、アーチ形状になったときに、(a)(b)のような全て円形断面のモジュールと比較して、傾いたりねじれが発生しやすいなどやや不安定な様子も見られた。

(d)では、線密度の高い表面から、間の径が小さく、外側に現れる線密度が低い表面への変化が観察できた。(c)と同様に、断面形状が一律でないため、アーチを維持する際の不安定さがありさらなる工夫が必要である。

図 6 図 7 に、制作した形状ディスプレイの全体像を示した。本稿では、32 本のリニアアクチュエータと 16 個のモジュールを用いている。図 6 では色が変化するモジュールを、図 7 では断面が変化するモジュールを 2 種類装着している。群として見ると、単体で見られたピクセルの変化がより強調されている。また、アクチュエータや制御部を収める箱は、黒色のアクリルで制作した。天面にはツヤがあり反射の起きやすい質感の素材を採用したため、上部のモジュールが天面に映ることでより視覚的な効果を増幅する効果が期待される。

4. おわりに

本研究では、スプリング形状に着目したモジュールを用いた、立体的な形状変化と各ピクセルの色や質感の変化を両立する形状ディスプレイを提案した。

2 本のリニアアクチュエータに一つのモジュールを取り付け、その高さによって立体形状を、高さの差によってピクセルの変化を表現することで、1 種類のアクチュエータの制御だけで、2 種類の表現を可能にした。

今後は、スプリング以外の形状も含めて、狙った質感を表現するためのモジュールの探索を続けるとともに、インタラクションの付与や、ツールキットとしての実装にも取り組む。また、今回はモジュール単体の見え方の違いを記録したが、今後は群としての見え方、または動かし方による印象の変化の検証や、定量的な評価も行い、求める質感からモジュール形状を設計できる手法の開発を目指す。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の支援を受けた。また、制御装置の実装に多大な協力をいただいた渡辺啓介氏に感謝する。

参考文献

- [1] Alexander, J., Roudaut, A., Steimle, J., Hornbæk, K., Bruns Alonso, M., Follmer, S. and Merritt, T.: Grand challenges in shape-changing interface research, *Proceedings of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–14 (2018).
- [2] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A. and Ishii, H.: InFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 417–426 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502032 (2013).
- [3] Poupyrev, I., Nashida, T., Maruyama, S., Rekimoto, J. and Yamaji, Y.: Lumen: Interactive Visual and Shape Display for Calm Computing, *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '04, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 17 (on-

- line), DOI: 10.1145/1186155.1186173 (2004).
- [4] Fujii, J., Matsunobu, T. and Kakehi, Y.: COLORISE: Shape- and Color-Changing Pixels with Inflatable Elastomers and Interactions, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 199–204 (online), DOI: 10.1145/3173225.3173228 (2018).
- [5] Lee, Y., Kim, M. and Kim, H.: Rolling Pixels: Robotic Steinmetz Solids for Creating Physical Animations, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 557–564 (online), DOI: 10.1145/3374920.3374987 (2020).
- [6] Rozin, D.: Wooden mirror (1999). <http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>.
- [7] Nakagaki, K., Liu, Y. R., Nelson-Arzuaga, C. and Ishii, H.: TRANS-DOCK: Expanding the Interactivity of Pin-Based Shape Displays by Docking Mechanical Transducers, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 131–142 (online), DOI: 10.1145/3374920.3374933 (2020).

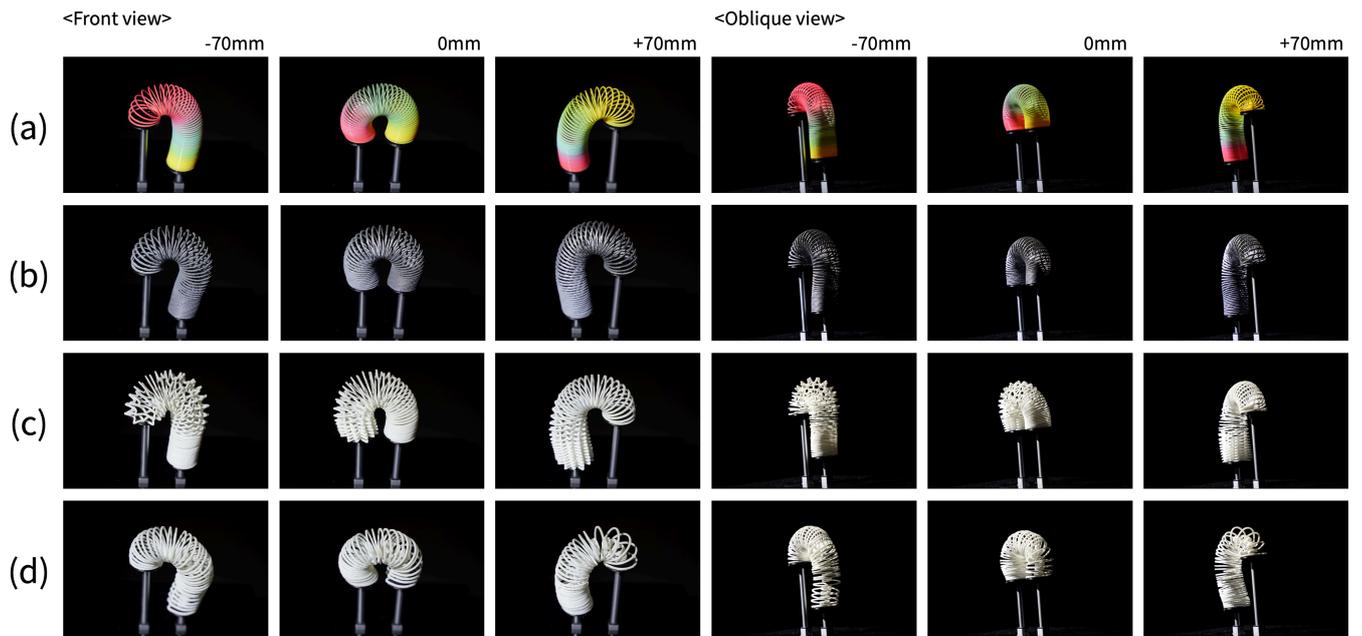


図 5 高さの違いによる見え方の変化

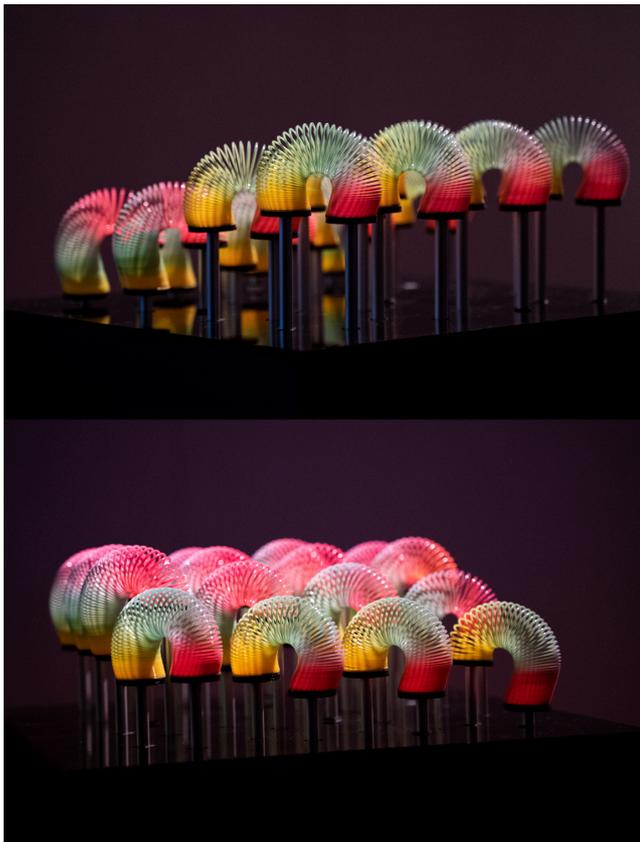


図 6 色変化モジュールを実装した形状ディスプレイ

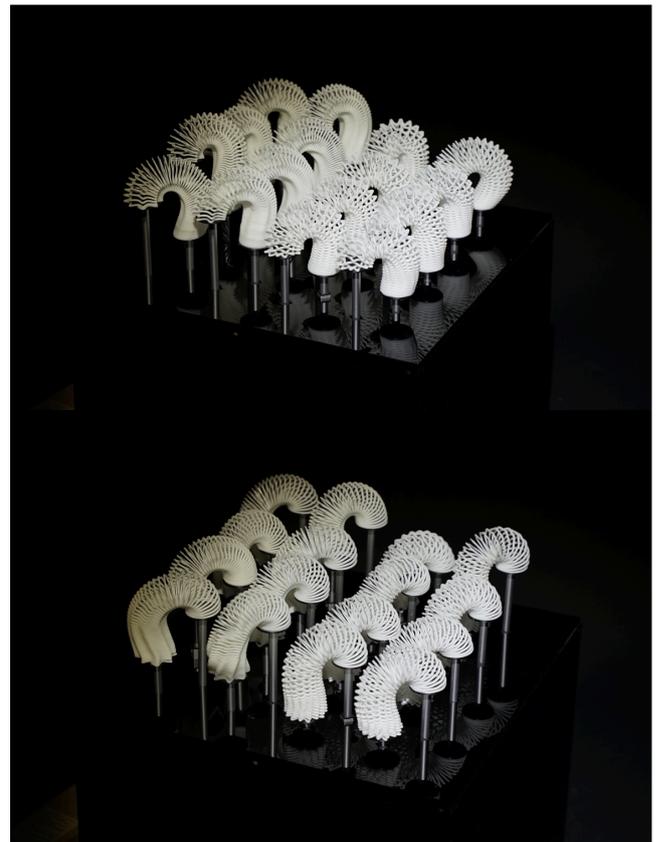


図 7 断面形状変化モジュールを実装した形状ディスプレイ