

形状保持・書き換えが可能な面状物体の設計と制御に関する検討

Proposal of design and control of planar objects for repetitive deformation and shape freezing

久保木 仁美, 笥 康明

Hitomi KUBOKI, Yasuaki KAKEHI

東京大学 大学院情報学環・学際情報学府

The Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

【要約】

近年デジタルファブ리케이션研究の射程は、動きや変化を伴う物体の造形やインタラクションの創出へとさらなる広がりを見せている。造形後の形状変化を可能とする手段として、環境要因に応じて形や体積を変化させる素材を物体に埋め込むという方法がある。これらは物体の表面や内部に自然に機能を埋め込むという点で有効であるが、変化が1度きり、また、繰り返し変形を保つためには外的刺激を加え続ける必要があるなど、制約が多い。そこで本研究では、複数の外的刺激を用いることにより、形状の繰り返し変化を可能とし、さらに変形後、その形状を外的刺激がない状態でも保持できるアクチュエータを提案する。本稿では、構造、製造方法、動作の種類、アプリケーションシナリオの詳細を示す。

キーワード: 形状変化, 形状保持, インフレータブル, テクスチャ

【Abstract】

In recent years, the range of digital fabrication research has expanded further to creation of objects and interactions that involves the movement and deformation after fabrication. To enable the "after-deformation", there is a method which embeds active materials whose dimensions and volume change according to environmental factors. The method is effective as the functions are naturally implemented on the surface or inside of the objects. However, there are some restrictions on the repetition of movements. Some objects can change the shape only once, and others need continuous external stimuli for repeated deformations. Therefore, this study proposes an actuator that can repeatedly change the shape by using multiple external stimuli, and can hold the shape after deformation even in the absence of external stimuli. The details of the structure, manufacturing method, operation type, and application scenario are also shown.

Keywords: Shape Changing, Shape Retention, Inflatable, texture

1. はじめに

デジタルファブ리케이션技術の発展によって、外形のみならず複雑な内部構造や特性の表現、あるいは複数の素材を用いた造形などが可能になってきた。その中でも、4D プリンティングなどと呼ばれるように、出力後に用途や状況に応じてさらなる形状変化を許容する物体の造形に注目が集まっている [1]。温度や湿度など周囲の環境の変化に応じて、ものの表面や内部に配された素材が変形を起こす。これらは、物体の中に機械的・電気的な仕掛けを埋め込む必要がないため軽量であったり物体の柔らかさやしなやかさを保つことができたり、かつ複雑な造形が自律的に組み上がるというメリットを活かして、製造過程の縮小や小さく折りたたむことによる可搬性の向上などの応用領域が探索されている。

課題として考えるのは、従来の環境応答型の手法は、一度変形したら元に戻ることがないという一方向的な変化のみに留まるものが多い。必要な時に必要な形状に変形させ、また元に戻して運搬するなど、形状の復元が可能になればその用途は広がるだろう。また、変形のバリエーションについても課題が挙げられる。従来の手法の多くは、初期形状とターゲットとなる形状を決める

のみで、その途中の段階の形状を細かく指定することは難しい。必要に応じて変形の程度を制御することができれば、ものや身体に合わせた変形などがよりスムーズに行えるのではないかと考える。

以上の背景から本稿では環境の温度に応答して形状が変化するものの製造手法の中でも特に、変形途中で必要に応じて変形を止めその形状を保持できる機能、また変形後に形状を元に戻してさらなる書き換えができる機能を有する物体とその変形について提案を行う。

以下はまず関連研究と本研究の位置づけについてまとめ、提案、設計、実装、そしてアプリケーションシナリオについて述べていく。



図 1. 変形前(左)と提案手法を用いて保持したオブジェクト(右)

2. 関連研究

熱や水分、光などといった外的刺激によって、造形時に素材へプログラムした通りに形状が変化する技術、これらの動作は大きく2種類に分類することができる。

一つ目は、変化の動きが1度きりのものである。A-line[2]では、素材にポリ乳酸樹脂を使用しており、デスクトップ3Dプリンタにて出力される。造形物は熱を加えることで内部応力が働き、出力時に設計した形状へと変形する。また、Totems[3]は、メラニンを封入して作られており、太陽光などの紫外線によって、見た目の色が変化する。いずれも動作は一回きりであり、A-line については温めた状態で人の手によって元の形に戻す必要がある。

二つ目は、繰り返しの変形を許容するものである。例えば HygroSkin[4]では、素材に水分によって膨張する素材と変化しない素材を貼り合わせて作られている。これにより、湿度による開閉動作を実現している。この動作は、繰り返し動作することが可能であるが、その動きは周囲の環境に依存しており、変形を保つには水分を与え続けることが必要になる。

上記で述べたように、環境が変わることによる形状変化の動作には制限があるものが多い。変形を許容するために、変形中あるいは変形後に、その形状を固定することができれば、精度の高いインタラクションや目的・ユーザーにあわせた形の書き換えが可能となる。これは機械的制御を用いる点で筆者らの研究とは異なるが、xSlate[6]では、リニアアクチュエータで構成された可変フレームと空気圧によって硬軟が変化する粒子ジャミングを用い、硬度制御可能な可変インターフェースを提案している。ジャミングで面を柔らかくすることで機械的変形を可能にし、面の硬度を上げることで変形後の素材の強度を担保し形状の保持を可能にするという点で考え方が近い。

今回提案する筆者らの研究では電気や人の手を必要としない、繰り返し変形可能かつ、変形後に外的刺激を取り払っても形状を保つことができるという点が特徴である。変形のトリガーが異なり、2種類のマテリアルを形状変化と固定に用いることにより、変化後の形状を保持と繰り返しの変形を実現する。

3. 提案

上述の通り、今回提案するものは以下の2つの機能を満たす。一つは、変形途中でその変化を止め、以降外部からの刺激を与え続けることなく形状を保持することができる機能である。二つ目は、変形を元に戻し、かつ繰り返しの変形を可能にする機能である。これを、素材自体に機械的・電氣的な加工や部品の埋め込みをすることなく実現する。

基本構造として、平面の素材に対してパウチを組み合わせる。具体的には変形を担う部分と形状の固定を担う部分の二種類のパウチを配置する。変形部分は、内部

に外的刺激をあたえることによって膨張し、刺激を取り払うことによって変形が元に戻る素材を内包する。また固定部分には、外的刺激により柔らかくなり、刺激を取り払うことによって硬くなる素材を内包する。

変形をさせる際には、一旦固定を解除し、変形部分を膨張させることによって形状の変化が可能になる。その後、再び固定することによって、違う形、サーフェスとして形状を書き換えて使用することができる。

図3に、変形用パウチに用いる素材(素材1)と固定用パウチに入れる素材(素材2)の特性の関係をまとめる。素材1および素材2は、温度によって気液あるいは固液相変化を起こす。本手法では素材1の沸点と素材2の融点の違いを利用する。図2のように、素材1と素材2の状態の組み合わせにより、周囲の温度に応じて3つのステートに分けることができる。State1は、素材1が液体かつ素材2が固体の状態。State2は、素材1が液体かつ素材2が液体の状態。State3は、素材1が液体かつ素材2が気体の状態である。図3は温度遷移に伴う状態の変化を示したものである。State3の時、素材2が液体であることと素材1が液体から沸騰し膨張することでパウチの変形が起こる。また、State2のとき、大気圧がないやつより大きくなり変形が元に戻る。このState3へ変形させている状態から、急速にState1へ状態を移すと、素材1が液化する前に素材2が固化することによって変形を止め、その形状を保持することができる。変形の途中でもその形状を保つことができる。

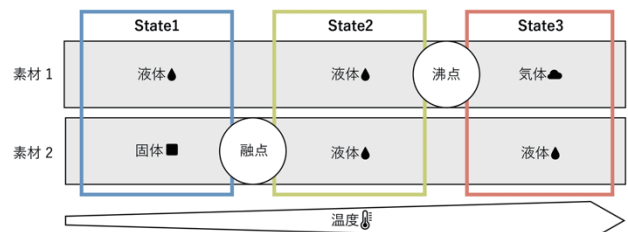


図2. 素材と温度変化

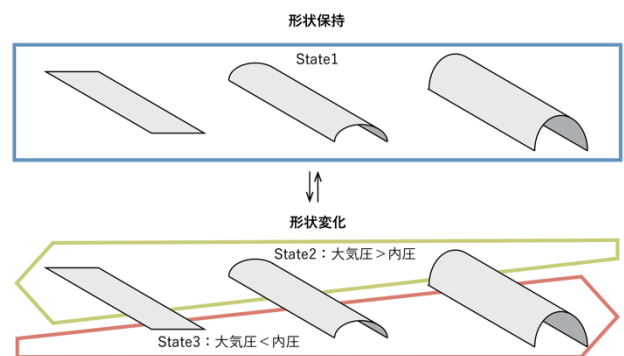


図3. 各 State の状態遷移の様子

(上段は素材2が液化して変形可能な状態、下段は素材2が固化してそれ以上の変形ができず形状を保持する状態)

4. 設計と実装

4.1 素材の選定

今回の検討では、変形用の素材1として3M Novec 7100、固定用の素材2としてパラフィンワックスを使用し

たしている. なお, Liquid Pouchi Motors[5]の内部には 3M Novec 7000 が使用されているが, 本提案においては, パラフィンワックスとの融点との兼ね合いにより 3M Novec 7100 を使用した. Novec は通常電子部品の洗浄に使う液体であり, 低毒性, 引火点なしと安全である. Novec 7100 は 61 度以上で液体から気体へと変化し, パラフィンワックスは 60 度以上で固体から液体へと変化する. 素材 1 と素材 2 の状態の組み合わせにより, 3 つのステートに分けることができる. State1 は, 素材 1 が液体かつ素材 2 が固体の状態. State2 は, 素材 1 が液体かつ素材 2 が液体の状態. State3 は, 素材 1 が液体かつ素材 2 が気体の状態である.

4.2 構造の設計

全体は 3 層のパウチで構成される. 1 つ目のパウチには, 形状保持の機能のために用いる. 2 つ目の真ん中のパウチは変形を担う. 3 つ目のレイヤーのパウチは空気を注入する. この 3 層のパウチを重ねたものを面状の素材として用いる. 詳細は以下に述べていく.

4.3 変形用パウチの検討

本提案の面状素材の設計とファブリケーションの方法として, 図 3 にその手順を示す. はじめに, 熱で融着する 3 枚のフィルムをヒートシーラーないしは, CNC 制御されたハンダゴテ[5]を使い, 接着する. これによりフィルムで覆われた 2 つの空間ができた状態になる. この一方に変化用の液体である Novec7100 を入れ, もう一方に固定用の液体であるパラフィンワックスを注射器にて注入する. その後, 液体を入れた箇所をヒートシーラーで閉じる.

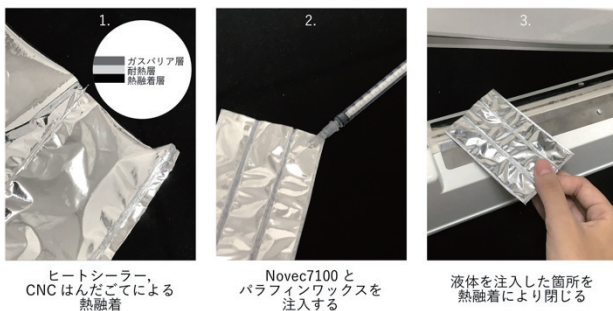


図 3. ファブリケーション手順

この際, [5]の先行研究にて, パウチに注入する Novec の量は以下の式で求めることができると報告されている. 求める液量を V_1 とし, 常温常圧の時, 絶対温度 $T=273K$, 動作に必要な空気圧 $P=1013 \times 10^2 + 100 \times 10^3 Pa$, $RT/P=22.4 \times 10$, Novec7100 の物性値である $M=200.0548g/mol$, 液体の密度 $\rho=1400kg/m^3$ と, パウチのサイズの横幅 $L_0=0.020m$, 縦幅 $D=0.060m$ を(1)の式に代入し, もとめられる液量は $98.10 \mu ml$ である.

$$V_1 = \frac{M P L_0^2 D}{\rho RT \pi} \times 10^{-3} \quad (1)$$

4.4 形状保持用パウチの検討

形状を保持するために, 60 度以下で固形になる油脂を使用している. 少ない量の油脂でより強固に形状を留めるためにガラスファイバーを用いた. 用いた手法としては, 含浸処理と呼ばれるものである. 含浸処理とは隙間のある構造物に樹脂を染み込ませて固める成形方法であり, この処理を施すことによって強度が高く軽量のものになる. 図 4 がガラスファイバーに油脂を浸透させた様子である.

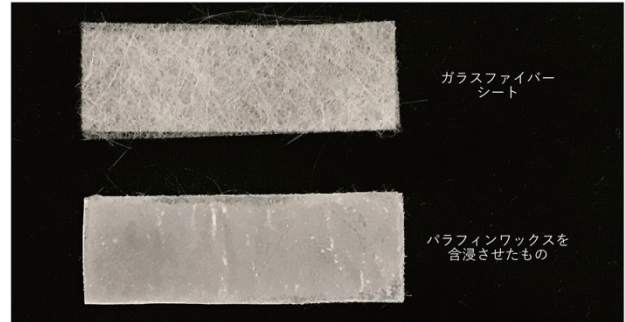


図 4. ワックスをファイバーに含浸処理を施したものの

4.5 アクチュエータの成分比率

本提案の形状固定は, 気化にともなう堆積膨張によって変形したパウチを, 油脂が固定することによって実現している. 変形する素材が液化するよりも早く, 油脂が固化する必要がある. ここで検討したのは, マテリアル, Novec7100・水の比率である. 変形に要した時間を比較したものが以下の表 1 である.

表 1. 横幅 20mm 縦幅 60mm のパウチにおけるマテリアルの混合比率・変形所要時間

| 温度 °C | 65 | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|-----|-----|------|------|------|------|
| 混合比率 (Novec: 水) | 1:0 | 1:1 | 1:2 | 1:5 | 1:10 | 1:20 | 1:30 | 1:40 |
| 所要時間 sec | 1.0 以下 | 1.0 以下 | 1.3 | 3.2 | 5.6 | 9.4 | 12.2 | 15.3 |

油脂が, 同じ条件で溶けるまでにかかった時間が, 10.3 秒であることより, Novec と水の比率は 1:20 が適当である.

4.6 空気層の追加による冷却速度の調整

上記の Novec のパウチへの水の添加による気化速度の調整に加えて, 今回の設計では一番上の層のパウチに空気を注入する. これは, 真ん中の層に注入されている Novec への熱の伝達を遅らせ, ワックスの相変化との時間差を生むためである.

4.7 結果

実際に実装した結果を図 5 に示す. 常温の状態から 61 度以上まで加熱し, 変形後, 様々な温度の空間に十分に置いたものである. 写真は常温の状態で撮影した. 冷やす速度によって形状の変化の大きさが違うことがわかる.

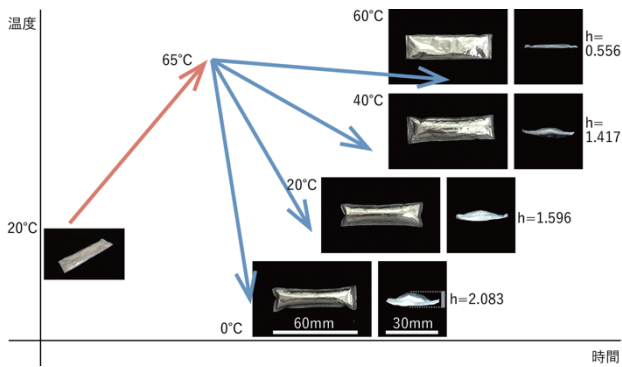


図 5.実装した素材とその変化の様子

5. アプリケーションシナリオ

本提案は、周囲の温度変化によって形状が変化を保存・書き換えをすることができる。形状保持ができる、変形を保ちながらもものを別環境へ移動することが可能になる。また書き換えることで、複数のユーザー、目的に対応した提案ができると考える。2つのアプリケーションシナリオを検討している。まず一つ目に、ユーザの体型や好み等に合わせて、モノの形を都度調整したいようなシーンにおける利用である。例えば、ファッションアイテムなどを複数人で共有している際に、装着するユーザに応じてその形状を段階的に変更することができる。面形状の素材を活かして、ファッションへの応用を目指したい。そして2つ目がマルチパーパスの事例の提案である。今回の基礎的な実装では、一様に熱をかけ、また一様に冷却することにより形状の書き換えや保持を試みたが、局所的に加熱・冷却するような手段と組み合わせると、より多様な形状を構成することが可能である。Shape-Changing Interfaces と呼ばれるような状況や機能に応じて形状を変化させるインタフェースへの応用を目指し、より複雑な形状変更の可能性を探究する。

6. 結論

本稿では、新たな形状変化の動き、周囲の温度をコントロールすることで変形を任意の状態に留め、繰り返し変形する、という新しい形状変化を提案した。複数の素材を使うことで、また外的刺激の加え方を制御することで、実現している。

それぞれのパウチに用いる素材は今回の実装で用いたものに留まらず、目的に応じて温度域の違う素材を使用することが可能である。変形させるための素材として、沸点が 61 度の Novec7100 を用いたが、Novec シリーズの Novec7000 (沸点 34 度) や Novec7200 (沸点 76 度) など他の温度域も使用することができる。また、パウチの変形をさせるための素材として、融点が 60 度のパラフィンワックスを使用した、ココナッツオイル (融点 25 度) など温度が違うものを利用することが可能である。したがって、アプリケーション、使用シーンにあわせて異なる温度での駆動ができる。環境を利用した形状変化の実用性向上、応用範囲の拡大に期待ができる。

一方課題として、パウチの温度をコントロールする必要があり、制御の難しさがある。パウチに回路を貼り付けて発生する熱を利用することや、また機会的に制御をすべくペルチェ素子を使用することなど、環境を整えることによって更に詳細に形状を設定することが可能だろう。また、本稿ではパウチの中に数種類の液体とガラスファイバーシートを封入したことにより、Liquid Pouch Motors[5]の紙のように薄く軽くという特性は持ち得ていない。今後、層構造を構成するための素材や製造手法についても改善をすすめ、素材性を活かしつつ複雑な変形が可能なアクチュエータとして検討を進める。

謝辞

本研究は、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の支援を受けた。

参考文献

1. F.Momeni et al., A review of 4D printing, Materials & Design, Volume 122, 2017, Pages 42-79,
2. G.Wang et al., A-line: 4D Printing Morphing Linear Composite Structures, CHI'19, Paper No.: 426, Pages 1-12
3. S.Sharma, Totems Designed for Broken Nature: Design Takes on Human Survival, Design Indaba conference, 2018
4. A.Menges, S.Reichert, Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects, ICD, 2012
5. N.Koya et al., Liquid Pouch Motors: 紙のインタフェースのための薄く軽く柔軟なアクチュエータ, WISS'18, 2018