

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月18日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18830

研究課題名(和文)5Dプリンタの開発と応用

研究課題名(英文)Development and Application of 5D-printer

研究代表者

津守 不二夫(TSUMORI, Fujio)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：10343237

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究は5次元プリンタを開発し、応用していくことを目的とする。5次元プリンタとはこれまでの3次元プリンタ(x, y, z)に加え「それぞれの箇所における材料物性の配向(3次元ではの2方向で表される)」を制御したプリンタである。研究期間中に開発した装置はガルバノスキャナを備えたUVレーザ光源により樹脂を硬化するタイプである。この装置を利用した応用例は生体模倣構造のひとつである人工繊毛である。人工繊毛をアレイ状に出力する際、一本一本に磁気異方性を付与することにより、それぞれの動きが異なる構造を出力した。この方法により実際に自然界にて観察されるメタクロナル波を再現することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ソフトアクチュエータを出力できる新たなプリンタを開発した。このプリンタを用いることで、自然界の繊毛に見られる効率的な送液挙動を世界で初めて実現することができた。このように、本システムは新たな生物の学理を理解するための有効なツールとなるとともに、今後のソフトロボティクスの発展にもつながり、新たなファブリケーション手法としての地位を確立する基礎となる成果であると考えている。

研究成果の概要(英文): In this work, 5D-printing system was proposed and developed. The design parameter of 5D-printing system consist of 5 parameters; 3-dimensional shape (x, y, z) and orientation (theta, phi), so that we could call the process "5D". Two types of 5D-printing systems were developed in during 2 years. One was the system with UV-laser source and scanning mirror, and the other was the system with dispensers. Using these systems, flexible polymer structures were output. One application of the system is bio-mimetic one, that is artificial cilia. Metachronal wave, which is observed in natural cilia organ, was realized by the developed 5D-printing system.

研究分野：ものづくり, MEMS

キーワード：3Dプリンタ 4Dプリンタ 5Dプリンタ 磁性粒子 ソフトアクチュエータ 生体模倣

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年3次元プリンタは大きな注目を集めている。すでに安価な装置が市場にも大量に供給されており、ものづくりの世界が根本的に変化しつつある。本申請では、3次元形状を作るのみならず、構造の各所各所に材料異方性を設定することを提案する。申請者は粉末材料を用いた加工プロセス研究に長く携わっており、粉末材料を取り扱う際に、外部から磁場や電場を印加することで、粒子を回転させ、粒子集合体としてのクラスタに方向性（異方性）を持たせることが可能である。例えば申請者が過去に研究したネオジム磁石の作製プロセスは典型的な例である。材料粉末に外部磁場を印加することにより、所望の方向に「強い」磁石を作製できる。

一方、3次元プリンタにはいくつもの手法が存在し、粉末材料も多く利用されている。造形時に粉末材料の供給と局所的な固化を繰り返し、構造を作製していくが、この際、ピンポイントに磁場や電場を印加することで、「任意箇所に任意方向の物性を印刷することができる」。これが申請者のアイデアである。申請者はこの数年間、ゴム材料に磁性粒子を分散させた柔軟樹脂材料において基礎的な技術開発を進めてきた。本申請ではさらに、外部場として、磁場のみならず電場も用いたプロセスへ発展させる。

2. 研究の目的

本申請では、3次元形状を作るのみならず、構造内の各所に材料異方性を組み込むシステムを完成させる。これは材料異方性の3次元パターンニング技術と行うことができる。粒子材料を取り扱う際に外部より磁場や電場を印加することで、材料に方向性（異方性、配向）を持たせることが可能である。この方向により材料の機械的特性のみならず磁氣的、電氣的といった多様な物性を直接制御できる。そして、このような異方性の集積により構造全体としての新たな機能を発現できる。異方性は材料各点 (x, y, z) における3次元的方向 (θ, ϕ) により表される。すなわち、異方性の3次元プリントは (x, y, z, θ, ϕ) の5次元設計パラメータを用いたプリントシステムとなり、5Dプリンタと呼ぶことができる。

いずれにしろ、基盤となる5Dプリンタの開発が最重要課題である。本研究では2種類の手法を提案する。ひとつは、従来の光リソグラフィ型の3Dプリントを応用し、材料に粒子を添加し外部場（磁場や電場）を印加するものである。期間中に、プロセス中の材料挙動の把握を進め、装置の試作品の開発・改良とともに、以下の具体的なアプリケーション開発の課題に取り組む。これらは開発する5Dプリンタの性能を効果的に用いたものであり、本手法の有効性を示すために行うものである。

3. 研究の方法

初年度の装置開発の目標は主に、UVレーザを用いたプリンタの完成である。具体的には現在開発中の試作機の紫外線露光部分を、ガルバノスキャナを備えたUVレーザ光源と交換する。これにより自由度の高い加工が可能となる。ステージ部分には所望の強度と方向に外部磁場を印加できる装置が備え付ける。この磁場印加装置は円柱形の永久磁石を用いた独自のものであり、ソフトアクチュエータの開発実験を進めながら、新しい装置の問題点を洗い出していく。

アプリケーションとしては、紫外線硬化型の柔軟ゴム材料を用いたソフトアクチュエータの開発を進める。これまで申請者が（5Dプリンタなしで）行ってきた研究ではシンプルな構造のみを作製してきており、今回開発した装置により自由度を大幅に高めるとともに、より微細な構造も作製したい。特に人工繊維毛については設計が確立しており、新たなプリンタで実現するターゲットとしたい。水溶性ゲル材料を用いた構造の作製・駆動実験を行いながら実験結果を装置開発へもフィードバックしていく。

4. 研究成果

UV硬化樹脂を用いた造形システムを完成させた。図1に示すように、造形プールやステージ部分は市販の3Dプリンタを用いたパーツ造形を行っている。上部にUVレーザを集光・走査するためのレンズおよびガルバノミラーがある。また、ステージ（プール）下部に円柱形のネオジム磁石を所定の角度に回転できるような機構を設置している。このような仕組みにより磁場を印加しながら造形を行うことが可能である。

このシステムを利用して造形した例を図2に示す。ここでは簡単なパンタグラフ状の構造を造形した。注目したいところは、2つの矩形構造の外径は同じものだという点である。しかしながら、それぞれの梁内部に組み込まれた磁気異方性は異なるものである。具体的には、片方は梁に沿って平行な異方性、片方は梁と垂直な異方性である。その結果、磁場を同様に印加した場合も両者の変形は異なるものとなる。この場合、片方は縦に伸び横につぶれる一方で、もう片方は、逆方向、横に伸び縦につぶれる結果となる。

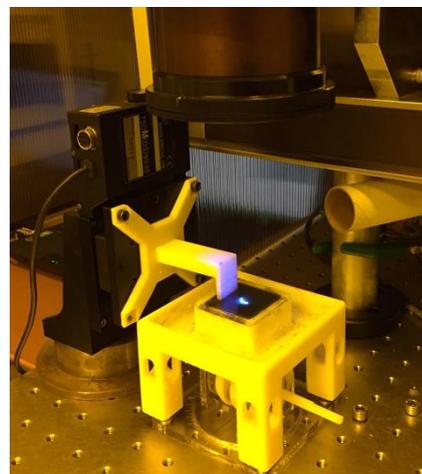


図1 UVレーザ光源を用いた5D造形システム主要部外観。

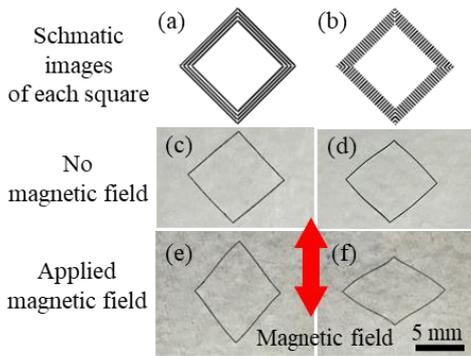


図2 出力した構造駆動例. それぞれ異なる磁気異方性を有する矩形構造が, 同じ磁場中で反対方向へ変形する.

次に, 異方性を用いた応用例として, 人工繊毛構造を取りあげる. 自然界の繊毛には特有の挙動が観察される. ひとは左右非対称な往復運動である. この現象は単純な磁性弾性梁構造に回転磁場を印加することにより再現することを既に報告している. もうひとつの大きな特長は, 繊毛群はサッカースタジアムで起こる「ウェーブ」のような, 集団的な波の伝播挙動を示すことである. この波挙動をメタクロナル波と呼ぶ. 従来の磁場駆動型システムでは, 繊毛群を作製してもすべての繊毛がシンクロした同一の動きしか起こすことはできない. 図3は本研究で開発したシステムを利用して作製した例である. 図上部にそれぞれ異なる方向に磁気異方性を設定した模式図を示している. 隣合う繊毛とはそれぞれ45度ずつのずれが設定してある. このずれにより, 繊毛の動きに位相のずれが設定できる. 図には磁場を360度回転させた際の繊毛群の駆動パターンを示している. 左に変形しているものは橙色に, 右に変形しているものは緑色に示してある. それぞれの色は磁場の回転とともに右方向にシフトしていくことが明瞭に示されており, メタクロナル波が人工的に再現されていることが確認できる.

図4には同様の繊毛構造を2次元的に配列した例を示す. 5Dプリンタにより, これまで作製困難であったこのような異方性を有する3次元構造を直接造形することが可能となった. 造形した構造による, 流体搬送性能等の評価は今後の課題である.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- [1] Minori Furusawa, Kazuki Maeda, Seiji Azukizawa, Hayato Shinoda, and Fujio Tsumori, Bio-mimic Motion of Elastic Material Dispersed with Hard-magnetic Particles, Journal of Photopolymer Science and Technology (in print). 査読有

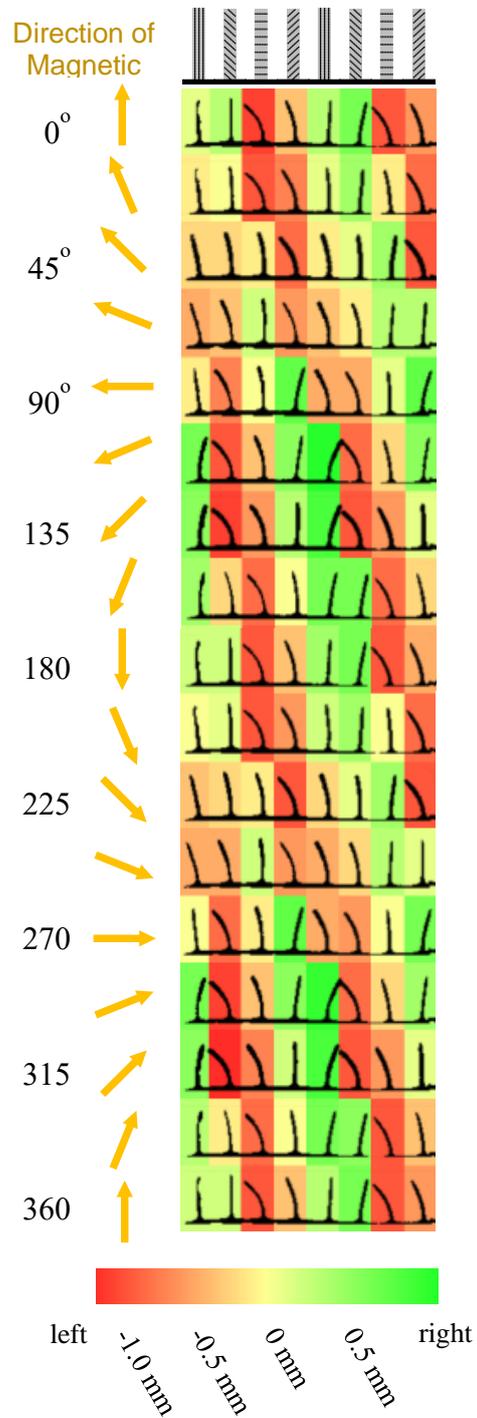


図3 人工繊毛群の駆動例. 背景色はそれぞれ左右への変位量を示

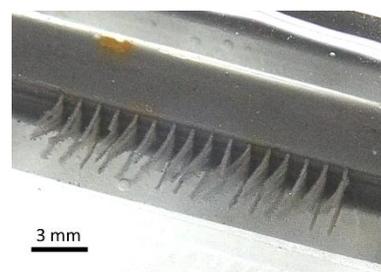


図4 人工繊毛群を2次元的に配置した例.

- [2] Seiji Azukizawa, Hayato Shinoda, Kazuki Tokumaru, and Fujio Tsumori, 3D Printing System of Magnetic Anisotropy for Artificial Cilia, Journal of Photopolymer Science and Technology, 31-1 (2018), 139-144. 査読有
- [3] Hayato Shinoda, Fujio Tsumori, Development of Energy Harvesting System using Deformation of Magnetic Elastomer, Japanese Journal of Applied Physics, 57-6 (2018) 06HJ05. 査読有
- [4] Daiki Maede, Fujio Tsumori, Toshiko Osada, Kentaro Kudo, Visco-elastic Control of Elastomer with Magnetic Particles by Applied Magnetic Field, IEEJ Trans. Sensors Micromachines, 138-2 (2018), 48-53. 査読有
- [5] Ryuma Marume, Fujio Tsumori, Kentaro Kudo, Toshiko Osada, K. Shinagawa, Development of Magnetic-field-driven Artificial Cilium Array with Magnetic Orientation in Each Cilium, Japanese Journal of Applied Physics, 56 (2017), 06GN15. 査読有

〔学会発表〕（計 19 件）

- [1] Seiji Azukizawa, Hayato Shinoda, and Fujio Tsumori, 4D-printing System for Elastic Magnetic Actuators, The 32nd IEEE Int. Conf. MEMS (MEMS2019), 248-251.
- [2] 廣田航, 津守不二夫, 気液相変化を用いた大変形可能なソフトアクチュエータ, マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2018.10.
- [3] 前田一樹, 津守不二夫, 徳丸和樹, 小豆澤成治, 4D プリンタで作製した磁場駆動ワーム型ソフトロボット, マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2018.10.
- [4] Hayato Shinoda, Seiji Azukizawa, Kazuki Maeda, and Fujio Tsumori, Bio-mimic Motion of Gel Material Dispersed with Magnetic Particles, ECS Transactions, 88-1(2018), 89-97.
- [5] Hayato Shinoda, Seiji Azukizawa, Fujio Tsumori, Impact of Metachronal Wave of Magnetic Artificial Cilia on Micro-pump Efficiency, microTAS2018, (2018) 679.
- [6] Seiji Azukizawa, Hayato Shinoda, Fujio Tsumori, Development of 4D Printing System with Magnetic Anisotropy, 9th KAIST and Kyushu University Joint Workshop , 2018.10.
- [7] 津守不二夫, 小豆澤成治, 篠田隼人, 磁性粒子分散柔軟材料を用いた 4D プリンティング技術と生体模倣, 高分子討論会, 2018.09.
- [8] Seiji Azukizawa, Hayato Shinoda, and Fujio Tsumori, Development of 4D Printing System with Magnetic Anisotropy, UK-Japan Engineering Education League Workshop, 2018.09.
- [9] Hayato Shinoda, Seiji Azukizawa, Kazuki Maeda, Fujio Tsumori, Bio-mimic Motion of Gel Material Dispersed with Magnetic Particles, First International Conference on 4D Materials and Systems, 2018.08.
- [10] Fujio TSUMORI, 5D printer for FGM, 15th International Symposium on Functionally Graded Materials, 2018.08.
- [11] 小豆澤 成治, 篠田 隼人, 津守 不二夫, 磁性粒子鎖配向型 4D プリンタの開発, 九大-理研-福岡市・ISIT 三者連携シンポジウム, 2018.05.
- [12] 篠田 隼人, 津守 不二夫, 磁性粒子分散エラストマーを利用した発電システムの開

発, 九大-理研-福岡市・ISIT 三者連携シンポジウム, 2018.05.

- [13] 小豆澤成治,徳丸和樹,工藤健太郎,品川一成,津守不二夫, 磁性微粒子鎖配向型3Dプリンティング法による磁場駆動アクチュエータの開発, 日本機械学会九州支部第71期総会講演会, 2018.03.
- [14] 丸目隆真,工藤健太郎,品川一成,津守不二夫, 外部磁場駆動型人工繊毛による3次元的な繊毛運動の設計, 日本機械学会九州支部第71期総会講演会, 2018.03.
- [15] Seiji Azukizawa, Fujio Tsumori, Hayato Shinoda, Kazuki Tokumaru, Kentaro Kudo, Shinagawa Kazunari, Development of Printing System for Magnetically Anisotropic Actuator, MicroTAS, (2017) 623.
- [16] Hayato Shinoda, Fujio Tsumori, Kazuki Tokumaru, Kentaro Kudo, Shinagawa Kazunari, Development of Energy Harvesting System using Deformation of Magnetic Elastomer, Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (2017) 8P-7-79.
- [17] Ryuma Marume, Fujio Tsumori, Kentaro Kudo, Shinagawa Kazunari, Magnetically Actuated Artificial Cilium with Similar 3D-movement of Natural Cilium, Int. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (2017) 8P-7-76.
- [18] 津守 不二夫, 丸目隆真, 工藤健太郎, 品川 一成, 外部磁場駆動型人工繊毛による3次元的な繊毛運動の再現, 第34回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2017.11
- [19] 丸目 隆真, 工藤 健太郎, 品川 一成, 津守 不二夫, 外部磁場駆動型人工繊毛による3次元的な繊毛運動の再現, 日本機械学会九州支部 久留米講演会, 2017.10.

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 該当なし
- (2) 研究協力者 該当なし

※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。