

磁石を用いた組み換え可能なモジュール型ソフトセンサの提案

Proposal for a Reconfigurable Modular Soft Sensor Using Magnets

佐倉 玲^{1*}, 香川 舞衣^{1*}, 韓 燦教¹, 笥 康明¹

Rei SAKURA¹, Mai KAGAWA¹, Changyo HAN¹, Yasuaki KAKEHI¹

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

【要約】

柔らかい素材で構成されるインタフェースにおいて、ユーザからの変形入力を検知するために、導電性の材料を用いた柔軟なセンサの開発が進められている。そうした柔らかいセンサの形状や柔らかさをユーザに合わせて自由度高く設計できるようになってきた中で、ユーザが求めるソフトインタフェースを、プロトタイピングしながら探れるようなツールが求められている。そこで本研究では、導電性材料を 3D プリントしたセンサモジュールを磁石で組み換え可能にすることで、即興的に形状や柔らかさを探索できるソフトセンサを提案する。本論文では提案するセンサの設計および実装方法をまとめ、応用事例を示す。

キーワード: 3D プリンティング, ラティス構造, ソフトセンサ, 磁石, プロトタイピング

【Abstract】

For interfaces made of flexible materials, there is ongoing development in the creation of deformable sensors employing conductive materials to detect deformation inputs from users. Given the increasing flexibility in the design of such soft sensors, allowing for customization of shape and flexibility to suit individual users, there is a need for tools that allow users to explore soft interfaces that meet their preferences through prototyping. Therefore, this research proposes an ad hoc soft sensor that users can design and explore. This is achieved by enabling the interchangeability of sensor modules that are 3D printed from conductive materials using magnets. This paper provides a detailed description of the design and implementation methodology of the proposed sensor and offers some applications as an illustration.

Keywords: 3D printing, lattice structure, soft sensor, magnet, prototyping

* These two authors contributed equally to this work.

1. 序論

柔らかい素材で構成されるインタフェースは、変形を用いてより自然なインタラクションを実現できる手段として注目を集めている[1]。こうしたインタフェースにおいてユーザからの変形入力をリアルタイムに検出しインタラクションに利用するために、柔らかく変形可能なセンサ(ソフトセンサ)の研究が進められている[2, 3, 4]。近年では、3D プリンティングなどのデジタルファブリケーション技術を活用することで、個人に合わせて形状や柔らかさなどを設計可能なソフトセンサも開発されている[5, 6, 7]。

柔らかいインタフェースの形状や柔らかさ、変形の仕方などを設計する際には、ユーザが実際に素材に触れながらプロトタイピングを行えることが望ましい[8]。しかしながら 3D プリンティングなどの造形手法でつくられるソフトセンサでは、造形に時間がかかるため、プロトタイピングを繰り返すことが難しい。littleBits[9]などのように手軽に形状や回路を組み替えられる即興的なプロトタイピングのためのインタフェースも存在するが、個々のモジュールは固く、柔らかく組み換え可能なインタフェース

は提案されていない。

そこで本研究では、柔軟な導電材料を 3D プリントしたソフトセンサを磁石で組み換えられるようにすることで、柔らかく、即興的なプロトタイピングが可能なモジュール型ソフトセンサを提案する。本センサを活用することで、ユーザはインタフェースの形状や柔らかさをモジュールを触って組み替えながら探索し、自分に合ったインタフェースを作成することができる。

2. 提案と設計

本研究で提案するソフトセンサは、筆者らが[6]で提案した手法 LattiSense を基盤とする。これは導電性の柔軟材料をラティス構造に出力することで、変形とセンシングを可能にしている。このラティス構造をもつ一辺 30 mm の立方体が 1 つの基本的なセンサモジュールとなっており、モジュール同士を磁石で連結し 3 次元的に組み合わせることで、さまざまな形状のソフトセンサを作成することができる。各モジュールは非導電性部位の配置やラティス構造のパラメータが異なっており、それによ

て作成するソフトセンサの配線箇所や柔らかさの設計が可能である。以下で、それぞれの特徴と設計について詳しく説明する。

2.1 センシング原理

本センサは、導電性の柔軟材料がラティス構造に出力されており、押しつぶすような変形が可能である(図 1 左)。この導電性のラティス構造が押しつぶされると、変形にもなって抵抗値が低下するため、抵抗値を読み取ることで変形を連続的に検知できる。

センサは、図 1 右に示すように導電性部位が折り返した構造が基本の構造になっている。この折り返し構造によって、抵抗値を読み取るための 2 本の配線が近い位置にまとまる。非導電性部位の配置はモジュールによって異なっており、センサ全体での折り返し構造をさまざまな形で作成できるようになっている。モジュールの組み合わせについては次章で詳しく述べる。

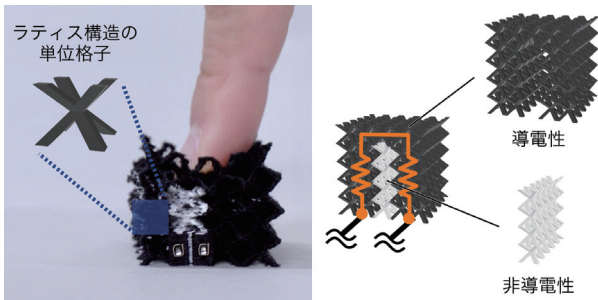


図 1. (左) 本センサの変形の様子
(右) 導電性部位の折り返し構造と配線配置

2.2 モジュール

本ソフトセンサは図 2 に示すような、基本モジュール、4 種類のパスモジュール、2 種類のコネクタモジュール、拡張モジュールから構成される。

基本モジュール

上述したような折り返し構造をもつモジュールである。このモジュール単体でも、コネクタモジュールに連結

することでセンサとして使用できる。

パスモジュール

基本モジュールとコネクタモジュールの間をパスモジュールでつないで、変形を検知する部位を構成する。非導電性部位の配置が直線型、L 字型、T 字型、十字型になっているものの 4 種類がある。

コネクタモジュール

配線のためのモジュールであり、他のモジュールとは違ってセルが一段だけの直方体になっている。コンタクトピンの部分に配線を挿すことができる。磁石が配置されている面に対して、配線が裏面にくるものと側面にくるものの 2 種類がある。

拡張モジュール

基本モジュール、パスモジュール、コネクタモジュールで構成されるセンサに、拡張モジュールを連結して形状を変更できる。パスの形状は変わらないように連結する(図 3 下)。

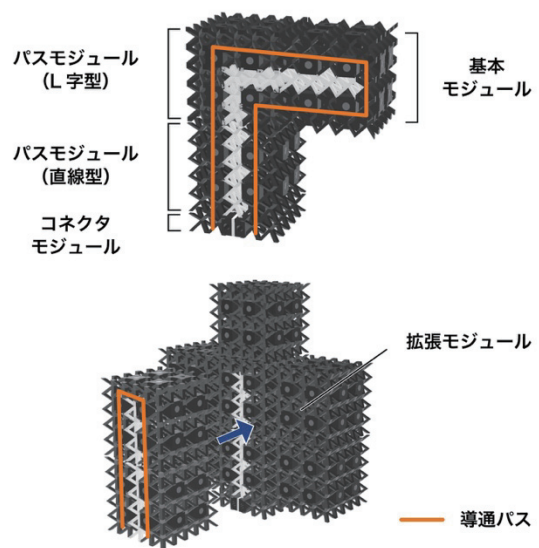


図 3. センサの連結例

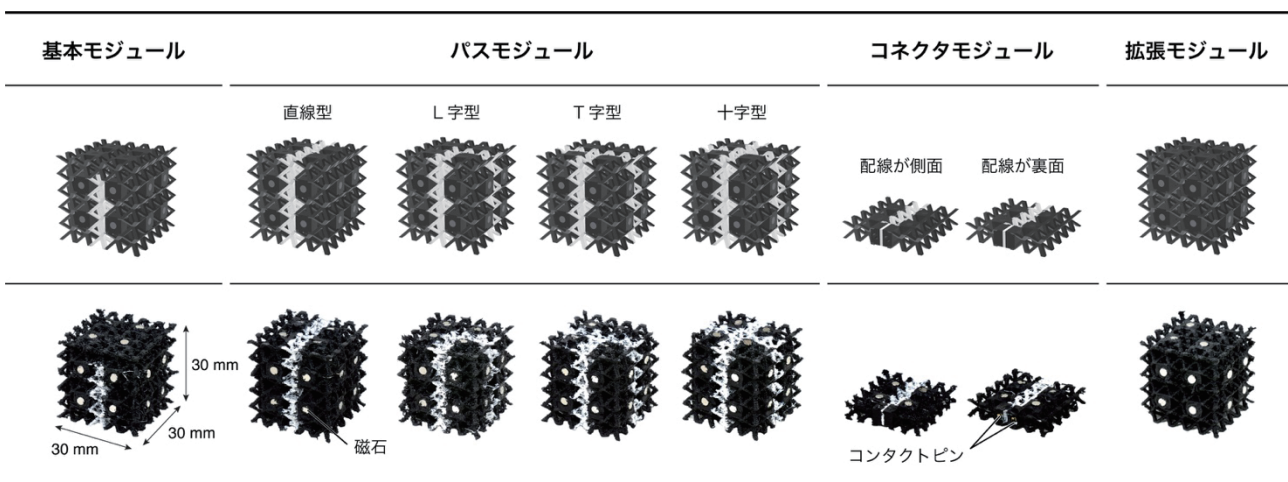


図 2. (上段)各モジュールの 3D モデル (下段)3D プリントされた各モジュール

また、それぞれのモジュールには2種類の支柱の太さをもったラティス構造のモジュールが存在している。支柱が細いものがより柔らかい構造であり、この2種類を組み合わせることで部位による柔らかさの設計ができる。

2.3 磁石による連結

各モジュールには、立方体の各面に4つずつの磁石が埋め込まれており、それによってモジュール同士を連結することができる。コネクタモジュールは一面のみに磁石が埋め込まれ、基本モジュールやパスモジュールの一面に連結することで回路との配線が可能である。

図4(a)に示すように、全ての面において対角上に同じ極性の磁石が埋め込まれており、同一配置の面同士は連結が可能である。また、回転させると磁石配置が反転して反発する面ができるため、各モジュールの非導電性部位の位置を隣りあわせる配置を考慮し、図4(b)のように磁石を配置した。

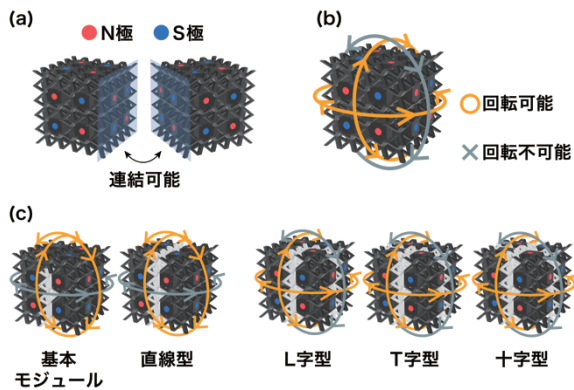


図4. 磁石の埋め込み位置と連結可能方向

3. 実装

本センサはFDM式の3Dプリンタを用いて出力され、磁石と接触ピンを熱圧入して配線するという後加工を経て作成される。抵抗値変化はArduino Unoを用いて分圧回路で読み取っている。3Dプリントと熱圧入の詳細について以下に述べる。作成されたモジュールと連結の例は図2の下段と図5に示した。

3.1 3Dプリント

本研究ではデュアルノズルのプリンタとしてTENLOG TL-D3 Pro、スライサにUltimaker Curaを用いた。導電性TPUフィラメントとしてはNinjaTekのEelフィラメント、非導電性TPUフィラメントとしては3DXFLEXのFlexible TPU Filamentを使用した。

3.2 熱圧入

磁石と接触ピンをはんだごてで熱しながらソフトセンサに圧入するという、熱圧入を行う。磁石は磁力が強く導電性があるネオジウム磁石を用いた。ネオジウム磁石は約320°Cを超えると磁性が失われてしまうため、320°C

以下で、かつプリントしたソフトセンサのTPU素材が溶ける温度として、250°Cで熱圧入した。接触ピンはコネクタパーツに400°Cで圧入した。

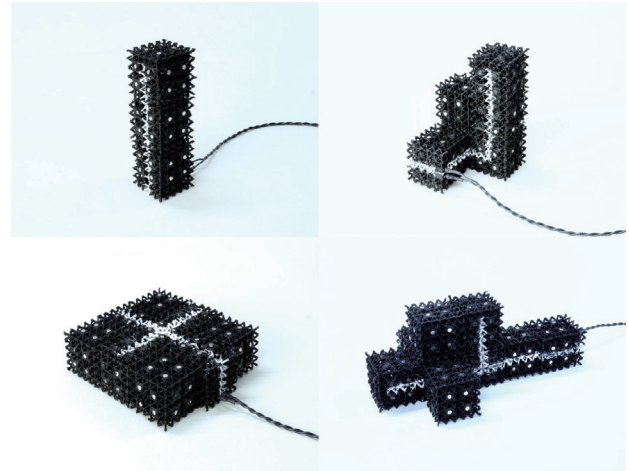


図5. 出力したモジュールの連結例

4. アプリケーション

本センサを用いて2種類のゲームコントローラのアプリケーションを作成した。

4.1 銃型コントローラ

1つ目は銃型のコントローラである。基本モジュール1つと直線型モジュール1つ、拡張モジュール5つ、コネクタモジュール1つからなり、トリガー部分の変形をセンシングすることで動作する。

このコントローラを用い、風船を割るゲームを実装した。銃形状で打つ動作を行うことで、直感的な操作が可能である。トリガー部分の柔らかさや全体のサイズを変えることで、個人の好みに合わせて調整できる。

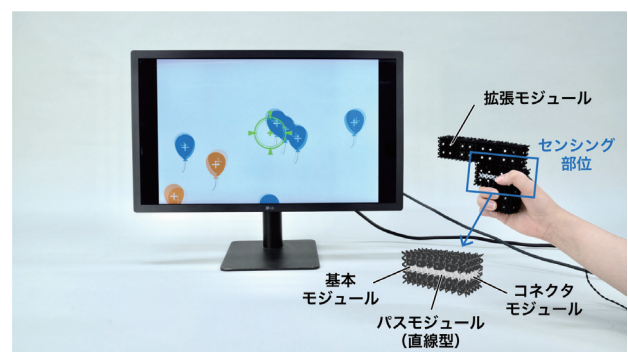


図6. 銃型コントローラの構成と風船割りゲーム

4.2 マルチボタンコントローラ

2つ目は2つのボタンをもったコントローラである。基本モジュール2つ、直線型モジュール2つ、L字型モジュール2つ、十字型モジュール1つ、コネクタモジュール2つからなる。コントローラの左右部分を押し込んだ際の変形量を検知できる。

このコントローラを用い、ブロック崩しゲームを実装した。コントローラの左右部分それぞれの変形量に応じて、バーを左右に移動させることができる。ボタン部分の柔らかさを変更し、個人の筋力に合わせて調整したり、ゲームの難易度を変えて遊んだりできる。

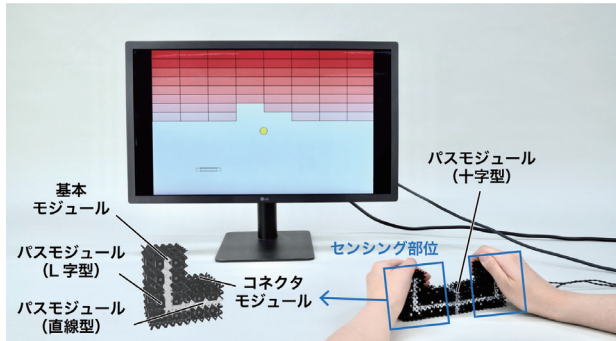


図 7. マルチボタンコントローラの構成とブロック崩しゲーム

5. まとめと今後の展望

本論文では、磁石での連結によって、形状や柔らかさを即興的に組み替えながらインタフェースをプロトタイプングできる、モジュール型のソフトセンサを提案した。センサの設計やファブリケーション手法について述べ、提案手法で作成したインタフェースの作例でその応用可能性を示した。

今後の展望として、まず抵抗値による連結状況の認識が挙げられる。本センサはモジュールを連結してパスが長くなると抵抗値が大きくなるという傾向があり、抵抗値の初期値と変化範囲を計測することで、モジュールの連結個数がある程度推定することができる。現状はインタフェースとして使用する際に、連結状況に応じたキャリブレーションが必要であるが、今後はモジュール間での抵抗値の違いや連結の仕方との関係性をさらに調査し、形状認識とキャリブレーションの自動化を行いたい。

また、今回はモジュールの形状を立方体で作成したが、提案手法では立方体以外の立体形状のモジュールも作成可能である。立方体以外の基本形状も導入してインタフェースの形状の設計自由度を高めたり、変形時にモジュール同士がずれにくいような形状の工夫にも取り組んでいきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05960 の支援を受けた。

参考文献

1. Alberto Boem and Giovanni Maria Troiano. Non-Rigid HCI: A review of deformable interfaces and input. In Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference, DIS '19, p. 885-906, New York, NY, USA, 2019. Association for

Computing Machinery.

2. Satoshi Nakamaru, Ryosuke Nakayama, Ryuma Niiyama, and Yasuaki Kakehi. FoamSense: Design of three dimensional soft sensors with porous materials. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, p. 437-447, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
3. Sang Ho Yoon, Luis Paredes, Ke Huo, and Karthik Ramani. Multisoft: Soft sensor enabling real-time multi-modal sensing with contact localization and deformation classification. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 3, sep 2018.
4. Liang He, Gierad Laput, Eric Brockmeyer, and Jon E. Froehlich. Squeezapulse: Adding interactive input to fabricated objects using corrugated tubes and air pulses. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '17, p. 341-350, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
5. Martin Schmitz, Jürgen Steimle, Jochen Huber, Niloofar Dezfuli, and Max Mühlhölzer. Flexibles: Deformation-aware 3d-printed tangibles for capacitive touchscreens. CHI '17, p. 1001-1014, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
6. Rei Sakura, Changyo Han, Keisuke Watanabe, Ryosuke Yamamura, and Yasuaki Kakehi. Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness. In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
7. Roland Aigner, Mira Alida Haberfellner, and Michael Haller. SpaceR: Knitting ready-made, tactile, and highly responsive spacer-fabric force sensors for continuous input. UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
8. 香川舞衣, 辻村和正, 佐倉玲, 山村亮介, 笈康明. 柔らかい操作インタフェースのアイデア創出を促すワークショップの実践. IPSJ Interaction 2023. 情報処理学会, 2023.
9. Ayah Bdeir. Electronics as material: Littlebits. In Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI '09, p. 397-400, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.