

3D プリンタを用いた弾力調整可能な コイルスプリングジョイント機構の提案

新山大翔^{†1} 沖真帆^{†1} 塚田浩二^{†1}

概要：本研究では、弾力を調整可能なコイルスプリングジョイントを提案する。径／全長／ピッチ等のパラメータをプログラム上で調整し 3D プリンタで出力することで、弾力や強度の異なるスプリングを作成するシステムを試作した。さらに、専用の連結ジョイントを用いることで、スプリングを辺とした立体構造物を作成できる。本稿では、これらの試作と作例を紹介し、応用として導電性フィラメントで出力したスプリングを使った押し込みセンサの試作について述べる。

Design of Spring Joints with Adjustable Elasticity for Common 3D Printer

HIROTO NIIYAMA^{†1} MAHO OKI^{†1} KOJI TSUKADA^{†1}

Abstract: We propose a coil spring joints that can adjust elasticity and print by a 3D printer. A prototype system can change springs elasticity and strength by adjusting parameters such as diameter / total length / pitch. It is also possible to create a three-dimensional structure (e.g., cube) using springs and joints. In this paper, we describe details of these springs and an application example using a conductive filament.

1. はじめに

低価格な 3D プリンタが普及し、個人でも独自に 3D モデルを設計し出力できる環境が整いつつある。これに伴って様々な種類の出力素材（以下、フィラメント）が登場している。中でも、樹脂に合成ゴム等を混ぜたフレキシブルフィラメントは、柔軟で弾力のある出力物を作成できる。ただし、弾性／柔軟性／伸縮性は造形物の構造に依存するため、開発者は目的に合わせた幾何学構造を設計する必要がある。さらに、弾力や伸縮率は、地道に出力／調整を繰り返すか、シミュレーションソフトを用いて計算する必要がある。一般の開発者には調整が難しかった。

本研究では、3D プリンタでの出力を前提とした、弾力を調整可能なコイルスプリングジョイント機構を提案する。本稿では、試作したコイルスプリング／連結ジョイントを紹介し、作成した構造物および導電性フィラメントを用いた応用例について述べる。

2. 実装

2.1 設計方針

拡張性を考慮し、コイルスプリングジョイントと連結ジョイントを組み合わせることで、弾性のある立体構造物を作成できるような構成とする。コイルスプリングは、径／全長／ピッチ等のパラメータをプログラム上で変更することにより弾力や強度を調整する。ジョイントは、連結方向

を一意に決める固定ジョイントと、任意の方向に可動する可変ジョイントを複数用意する。

2.2 コイルスプリングジョイント

スクリプトを用いて 3D データを作成する CAD ソフト OpenSCAD を用いて実装した。コイルスプリングジョイントの特徴は、連結ジョイントとの接続のために両端にナットのようなネジ溝がきられている点と、熱溶解積層方式の 3D プリントで作られるサポート材を除去しやすいようにコイル部分に傾斜を設けている点である（図 1）。プログラム上で数値入力（単位：mm）することにより、形状を変更することが可能である。調整可能なパラメータを図 2 に示す。具体的には、(1)コイルの外径、(2)ネジ溝径、(3)コイル線径、(4)ピッチ、(5)ネジ溝長さ、(6)全長、巻き方向の正逆が変更可能である。作成した 3D モデルの例を図 3 に示す。

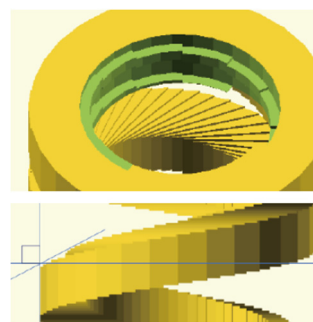


図 1 コイルスプリングジョイントの特徴。接続用のネジ溝（上）とサポート部の除去を助ける傾斜。

^{†1} 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

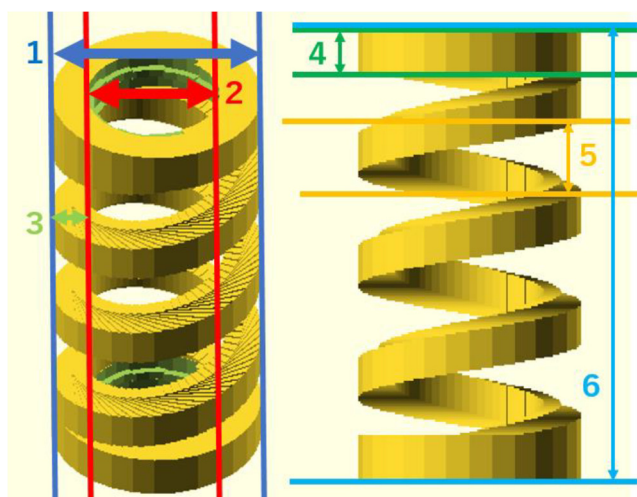


図 2 調整可能なパラメータ. (1) 外径, (2) ネジ溝径, (3) コイル線径, (4) ネジ溝長さ, (5) ピッチ, (6) 全長.



図 3 パラメータを変更した 3D モデル例.

左 : (1)15, (2)10, (3)5, (4)6, (5)10, (6)60, 正巻,
中央 : (1)7.5, (2)5, (3)2.5, (4)4, (5)2, (6)50, 正巻,
右 : (1)15, (2)10, (3)5, (4)6, (5)10, (6)30, 逆巻.



図 4 スプリングの出力例 (左), スプリングとジョイントの接続例 (右)

本システムで作成し出力したコイルスプリングの一例を, 図 4 に示す. 図左はピッチのみを変更して出力した例であり, 図右は同スプリングにボールジョイントを接続した例である. なお, 本稿で紹介するジョイントはすべて熱溶解式 3D プリンタ (UP!plus2) を用いて ABS 樹脂で出力した.

2.3 連結ジョイント

コイルスプリングジョイント同士を連結するためのジョイントを作成するシステムを, OpenScad を用いて複数開発した. コイルスプリングジョイントの両端にあるネジ溝のネジ径/ネジ溝長さに合わせて, 連結ジョイントのネジの外径, 全長, 空洞径を調整することができる.

連結方向を一意に決める固定ジョイントとして, 6 方向ジョイント, 三つ又ジョイントを用意した. 連結した後, 任意の方向に角度を調整できる可変ジョイントとして, ユニバーサルジョイントとボールジョイントを作成した. 各ジョイントの外観を図 5 に示す. これらの連結ジョイントを用いて構造体の組み立てを行ったところ, ネジ接合のためコイルスプリングをひねりながら接続させる必要があり, 組み立ての難易度が高かった. そこで改良版として, ネジ接合をスナップタイプの結合方式に変更する変換パーツを作成した. 一例を図 6 に示す. 変換パーツの片側 (図 6 右下) はオスネジのためコイルスプリングジョイントと接続できる. 逆側 (図 6 右上) には樹脂の弾性を使用したオスのスナップを備えており, 構造体の接続点となるパーツに空いたスナップ穴に差し込んで取り付ける (図 6 左). これにより, 立体物の組み立てを簡単に行うことができるようになった.



図 5 左上: 6 方向ジョイント, 右上: 三つ又ジョイント, 左下: ユニバーサルジョイント, 右下: ボールジョイント



図 6 スナップ式ジョイント. ネジ接合をスナップ接合に変換するパーツを使ってコイルスプリングを接続する.

2.4 構造体の作例

コイルスプリングとジョイントを用いて立方体を作成した例を図7に示す。図左の立方体は、コイルのピッチを大きくとることで、落下させ床に衝突したときの弾みが大きくなる。図中央は、ピッチを小さくし、コイルの全長を長めにすることにより手で触れた時の柔らかさを重視したものである。図右の立方体は、大型の構造体を作成することを想定し、自重によって形状崩壊しないように前述の二つよりコイルの太さを大きくしている。

本例ではすべての辺で同じコイルスプリングを使用した。弾力の異なるスプリングを混ぜることで、場所によって異なる弾力性を持つ構造体を作ることができる。

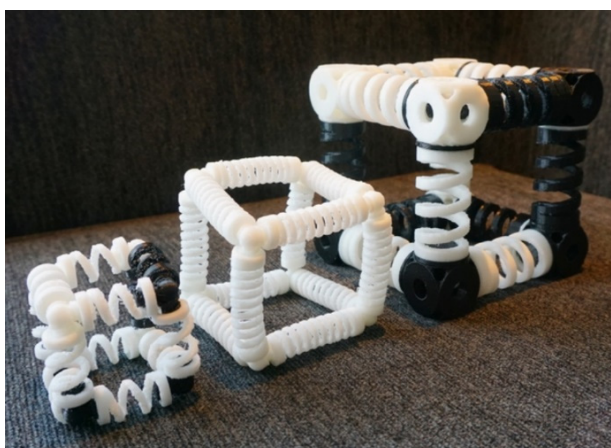


図7 弾力の異なる立方体の作例。ジョイントは三つ又ジョイントとスナップ式ジョイントを使用。

3. 導電性フィラメントを用いた応用例

コイルスプリングを導電性フィラメントで出力することで、スプリングの押し込みに応じて連続的な値変化を検出できる可能性がある。本システムで設計したスプリングを導電性フィラメントで出力し、Arduinoの静電容量センサライブラリを用いて押し込み時の静電容量変化を観察する予備実験を行った。スプリングのパラメータは外径30、ネジ溝径25、コイル線径5、ネジ溝長さ8、ピッチ8、全長80、正巻であり、フィラメントは導電性ABS（匠、株式会社ミジンコ）を使用した。導電性スプリングの下部にピンヘッドを埋め込んだ専用ジョイントをネジ接合で接続し、ワニ口クリップケーブルを介してピンヘッドとArduinoを接続した。導電性スプリングの上部には薄手の紙を挟み、紙の上から手のひらでスプリングを押し込む動作を行った。検出値は10回分の平均を200msec毎に記録した。

結果の一例を図8に示す。簡易的な実験ではあるが、(a)のタッチ開始から(b)の押し込み、(c)の最大押し込み、(d)の押し戻し、(e)のタッチ終了まで、各動作に合わせて連続的に値が変化することがわかった。安定動作すれば、押し込み量を検出可能かつ押し感を調整可能なセンサとして使用

できる可能性があるため、被験者数や条件を変えた実験を行い、改良を進めたい。

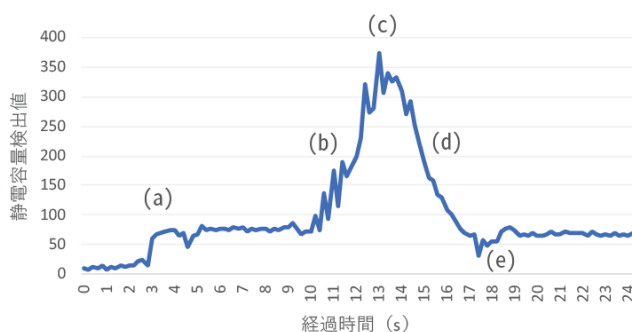


図8 導電性スプリングの押し込み時の変化量。(a)手のひらでバネ上部に触れる、(b)手のひらでバネを徐々に押し込む、(c)押し込み最大、(d)徐々に押し込みをゆるめる、(e)バネから手を放す

4. 議論

ここでは、現状の出力物の弾力／耐久性に関する課題を議論する。

現段階では出力したコイルスプリングの弾力を計測していないため、今後はデジタルフォースゲージ等を用いてパラメータと出力物の弾力の関係性を調査する予定である。パラメータと弾力の対応がわかれば、ばね定数のような指標を設け、弾力を指定してスプリングを作成するようなシステムを構築できる可能性がある。ただし、3Dプリンタで出力可能かつ一定の弾力／耐久性を維持するためには制約が存在する。試作を通して得た各パラメータに関する知見を次に述べる。なお、用語定義として、「弾力性」はコイルスプリングが物体を押し返す力、「耐久力」は圧縮に対するコイルの耐破損性能を指す。

まず、ピッチを大きくするとコイルの弾力性と可動距離が増加し、耐久力が減少する。すなわち、ピッチを大きく設定すると、出力されるコイルは作動機構の部品としての適性が高まる。一方、耐久力が低下して破損しやすくなり、塑性変形も起こりやすくなるため、純粋な構造体としての適正は低くなる。なお、補助的な影響として、FDM方式の3Dプリンタで本ジョイントを製作する場合、ピッチが大きい程サポート材を除去しやすいという利点もある。

次に、コイル太さは、コイルの耐久力や弾力性に影響し、一般にコイルが太いほど耐久力／弾力性共に高くなる。ただし、ピッチを大きくして可動距離が長い場合、コイルが太すぎると縮み切る前に折れてしまうことがあるため、配慮が必要である。

このように、コイルの耐久力と弾力性／可動距離には一般にトレードオフがあるため、ジョイントの使用目的に応じてピッチ／コイル太さを調整する必要がある。

5. 関連研究

5.1 構造体作成技術

関連する構造体作成技術について Tensegrity[1], SpLink[2], MolaStructural[3]を紹介する。Tensegrity は圧縮材（剛体、パイプ等）と張力材（弾性体、ワイヤ等）の二種を用いて構造体を構成する技術であり、主に建築工学の分野で扱われる。力のつり合いにより形状を保持し、外力に対応して変形し衝撃を吸収するような特徴がある。SpLink は、引きバネを用いて立体物を作成するブロックキットである。硬さや長さの異なる金属製のバネと金属ジョイントを用いて立体を作成できるが、玩具としての側面が強く、主に動物や家具などの形状作成を目的としている。Mola Structural は、コイルスプリングと球体磁石で構成された構造モデリングキットであり、建築の構造力学の学習に特化している。

本提案では、3D プリンタで出力することを前提として、サイズや弾力を調整可能なコイルスプリング機構を作成した。出力したコイルスプリングとジョイントを組み合わせることで、弾力の異なる立体構造物を作ることができる。

5.2 3D プリンタを用いた構造作成技術

高橋ら[4]は、3D プリンタの造形パラメータを調整することで、髪の毛ほどの細さの毛が密集したような構造体を作成するシステムを構築している。Metamaterial Mechanisms[5]は、フレキシブル樹脂のフィラメントを用いてセル構造を変化させることによってドアのロック機構やスイッチなどの作動機構を作成している。

本提案では、パラメータの変更により弾力を調整可能なコイルスプリング／構造体の作成を目的とする。

5.3 導電性フィラメントを用いた入力検出

導電性フィラメントを用いて、静電容量の変化によるタッチ検出を行う研究も多く行われている。高田ら[6]は、非導電部と導電部が存在するタッチパッドを作成し、指が触れることによる静電容量の変化を計測して判別する単一電極タッチセンサを実装した。吉田ら[7]は、導電性フィラメントを用いて静電容量を持つコンデンサとして機能するようなブロックを作成し、静電容量の変化からブロックの連結を検出するシステムを提案している。

本提案の応用例として、導電性フィラメントを用いたスプリングジョイントを試作した。これにより離散的なタッチ検出だけでなく、連続的な押し込み量を検出しつつ押し込み時の反発力（弾力）を調整可能なセンサを構築できる可能性がある。

6. まとめと今後の課題

弾力を調整可能なコイルスプリングジョイント機構と連結用ジョイントを、OpenScad を用いて試作した。コイルの径／全長／ピッチ等のパラメータを調整することで、スプリングジョイントの弾力や強度を変化させることができ

る。今回、構造物の一例として、出力したジョイントを組み合わせて立方体を作成した。さらに本提案の応用例として、導電性フィラメントを用いた押し込みセンサの試作を紹介した。

今後は、フォースゲージ等を用いて弾力を計測し、各パラメータとの対応を調査したい。また、導電性フィラメントを使ったセンサの改良や、他の特殊な素材を用いた応用例の模索を進めたい。

参考文献

- [1] R.B.Fuller, "Tensile-integrity structures", United States Patent 3063521 A, November 13, 1962.
- [2] “バネのブロック SpLink【スプリング】 ワクワクでつながる金属ばねブロック”. <http://www.splinks.jp/>, (参照 2017-12-24).
- [3] “Mola Structural Model _ molamodel “. <https://molamodel.com/pages/info>, (参照 2017-12-24).
- [4] 高橋治輝, 宮下芳明. ブリッジ構造と樹脂の引き伸ばしを用いた高密度な毛構造の造形手法, WISS2017 論文集, 2017.
- [5] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch. Metamaterial Mechanisms. In Proceedings of UIST '16, pp.529-539, 2016.
- [6] 高田峻介, 志築文太郎, 田中二郎. MonoTouch : 複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ, WISS 2015 論文集, pp.91-96, 2015.
- [7] 吉田 有花, 鶴田 真也, 池川 航史, 阿部 哲也, 志築 文太郎, 田中 二郎, 静電容量に基づくブロックシステム, コンピュータ ソフトウェア, vol. 34, No.2, pp.93-101, 2017.