

イラストの輪郭点群抽出に基づく 3D プリンタブルロボットのインタラクティブデザイン

Interactive Design of 3D-Printable Robots Based on Contour Point Cloud Extraction from Illustrations

稲川 ジャン瑠海¹⁾ 小川 純¹⁾

Gianluca Inagawa Jun Ogawa

1 はじめに

柔軟な構造を持つソフトロボットや可変形デバイスは、教育・創作・試作など多様な分野で関心を集めており [1, 2, 3], 個々のアイデアを手軽に形にできる設計支援技術の整備が期待されている。特に、ヒンジや壁構造などの柔軟可動部を含む設計では、高い形状自由度を扱う必要があり、従来の 3D CAD や専門ソフトウェアを用いた設計は非専門家にとって大きな負担となる [4, 5]。このため、より直感的かつ高速に設計と試作を繰り返せる支援手法の重要性が高まっている [6, 7, 8]。

本研究では、こうした課題に対して、2D イラスト画像をもとに柔軟構造体を設計可能なインタラクティブツールを提案する。画像から抽出された輪郭情報に対し、ユーザがヒンジ構造を簡便に定義できるインターフェースを提供することで、専門知識を要せず 3D プリンタブルなモデル生成を支援する。さらに、生成モデルはソフトマター材料を用いた層構造および膨張・収縮機構を組み合わせることで、実際に駆動可能なソフトロボットとしての展開も可能となるも網羅する。図 1 に本システムの全体構成を示す。本研究は、設計の敷居を下げ、多様なユーザによる試作・学習・創作活動の促進を目的とする。

2 2D イラストに基づくソフトロボットのインタラクティブデザイン

本研究では、2次元イラスト画像を入力とし、可動構造を含む 3次元モデルを自動生成する設計支援ツールを提案する。本ツールは、画像からの輪郭抽出処理、インタラクティブなヒンジ構造指定機能、および OpenSCAD 形式での自動出力機能を統合的に備え、3D モデリングに不慣れなユーザでも直感的にソフトロボット構造を設計可能とする環境を提供する。

まず、入力された 2次元イラスト画像に対しては OpenCV ライブラリを用い、グレースケール変換、Canny 法によるエッジ抽出、およびモルフォロジー処理により輪郭線を強調する。続いて、`cv2.findContours` 関数により主輪郭を点群データとして抽出し、3次元形状定義の基礎情報とする。抽出された輪郭は GUI 上に可視化され、ユーザはマウス操作により任意の 2点を指定することで、ヒンジ構造の挿入位置を決定する。指定点間には、ヒンジ径・高さ・厚み・丸み半径などの設定パラメータに基づき、対応する SCAD コードが自動生成される。さらに、輪郭全体には一定厚の壁構造を付加することで、内部空間の封止および造形時の構造安定性を両立させている。最終的なモデルは、Python スクリプトにより OpenSCAD 形式のスクリプトファイルとして出力される。出力ファイルは、ヒンジ・壁・ベースといった構成要素ごとにモジュール化されており、STL 形式への変

換や後処理、設計の再利用が容易である。

以上の一連の処理により、本ツールは専門的な 3D CAD 操作を必要とせず、ユーザの直感的な指定操作のみで可動構造を有する 3D プリンタブルモデルを迅速に設計可能とする。図 3 に提案ツールの処理フローを示す。

3 ソフトロボットの制作手順と駆動実験

提案する設計支援ツールによって生成されたヒンジ付き構造モデルの実用性を確認するため、空圧駆動による応用実験を実施した。本実験は、形状生成機能の検証にとどまらず、実際の外部駆動機構と組み合わせた際に可動構造として適切に機能するかを確認することを目的とする。これにより、本ツールによって出力されたモデルが、単なる静的モデルとしてではなく、物理的応答を伴う実機構造として成立することを検証する。

具体的には、OpenSCAD によって生成されたモデルを厚さ約 2mm のシリコン膜で封止し、内部に空気を注入することで構造の変形を誘発する設計とした。この際、設計支援ツールにより自動付加された壁構造を封止空間として利用し、空気の効率的な封入を可能とする構造とした。さらに、構造の変形挙動に対する制約性を高めるため、Falcon2 Pro (レーザーカッター) を用いてクラフトペーパーを元イラスト形状に沿って正確にくり抜き、この紙製シートをシリコン封止構造の内部に封入した。これにより、膨張方向に対する構造的自由度を部分的に制限し、ヒンジ部に集中的な変形を生じさせる設計的制御を加えた。内部圧力の上昇に伴い、片側の膜が優先的に膨張し、ヒンジ部に局所的な屈曲が発生することで全体構造に可動性が生じることを期待した。空気の注入には、定格圧 300 kPa・定格流量 16 L/min の小型エアポンプ (ZX524-8501-4800N) を用い、構造破損を防ぐため加圧時間を 1 秒以内に制限した。実験の結果、約 0.5 秒の加圧によりヒンジ部は最大で 30° の角度変位を示し、駆動開始圧はおおよそ 70 kPa 付近であることを確認した。この結果は、比較的低圧かつ短時間の駆動においても顕著な屈曲変形が得られることを示しており、提案ツールによる設計出力が空圧駆動に適した構造特性を有していることを示唆するものである。

図 3 に、本空圧駆動実験におけるヒンジ変位および駆動開始圧の測定結果を示す。これらの結果は、提案ツールによって自動生成された構造が、実機駆動に対しても十分な可動性と構造的機能性を備えていることを定量的に裏付けるものである。

4 考察

本実験においては、比較的低圧かつ短時間の空気注入により、ヒンジ部に最大 30° の屈曲変位が生じた。この結果は、設計段階で変形を意図的に集中させる構造的

1) 山形大学 Yamagata University

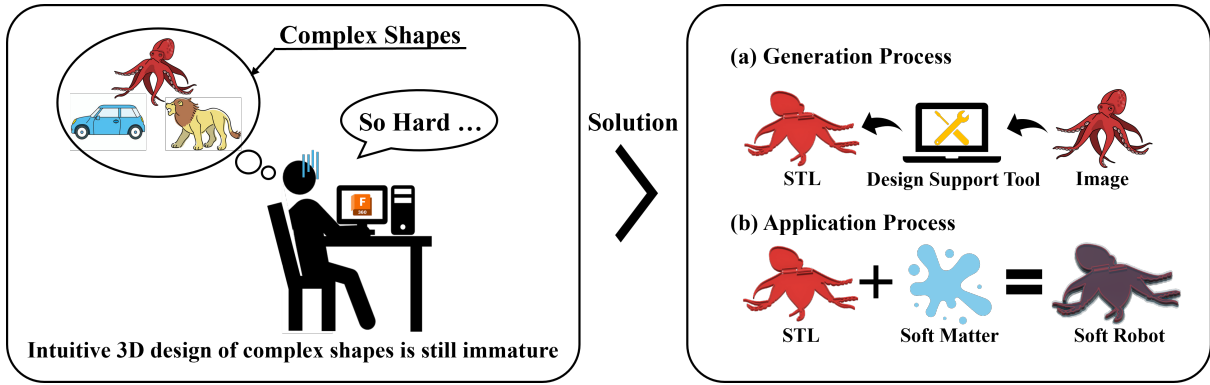


図1 従来の設計課題に対する本研究の提案手法の概略図

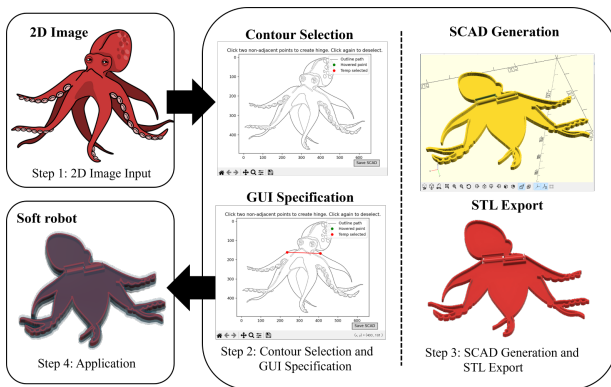


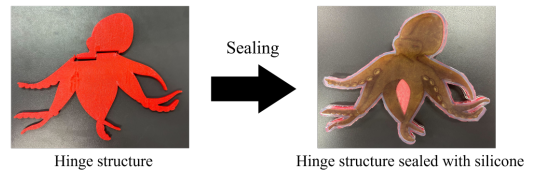
図2 『設計支援ツール』システム構成

配慮がなされていたことに起因すると考えられる。具体的には、封止空間の輪郭に沿って配置された壁構造が空気圧を効率的に保持し、さらに、Falcon2 Proで元イラスト形状に準じて切り出したクラフトペーパーをシリコン内部に封入することで、構造の変形自由度を制限し、膨張力をヒンジ部に局在化させていた。これにより、変形が意図した部位に集中的に生じよう制御されていたと推察される。また、SCAD出力時に自動生成されるヒンジおよび壁構造は、モデル全体の一体成型性と局所剛性の確保に寄与し、駆動時の安定性を支える要因となっていた。これらの構造要素がモジュール化されて出力されることで、ユーザは高度な設計操作を行うことなく、駆動対応構造を含む複雑なモデルを短時間で生成できる。この点において、本設計支援ツールの有効性が実験的に裏付けられたといえる。今後は変形制御に関する設計パラメータを定量的に整理し、駆動圧力・変位応答・材料構成との相関を体系化することで、より高度かつ汎用的なソフトロボット設計支援の実現が期待される。

5 おわりに

本研究では、2次元イラスト画像を入力とし、ユーザによるインタラクティブなヒンジ指定に基づき、可動構造を含む三次元モデルを自動生成する設計支援ツールを開発した。提案ツールは、OpenCVによる輪郭抽出処理とPython-OpenSCAD連携による自動構造生成機能を備え、直感的かつ一貫したモデリング環境を提供する。さらに、出力モデルに対して空圧駆動実験を行い、ヒンジ部の駆動開始圧および最大変位量の定量評価を通じて、

(a) 3D-printable soft robotic design



(b) Hinge displacement

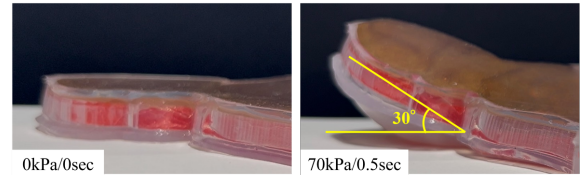


図3 ヒンジ変位および駆動開始圧の測定結果

出力構造の可動性および駆動適合性を確認した。今後は、駆動性能の向上に加え、材料設計や構造最適化の導入による適用拡張を進めることで、ソフトロボット設計における自動化と実用化の更なる促進を目指す。

参考文献

- [1] A. Georgios, N. Georgios, M. Stamatis, A survey on applications of pneumatic artificial muscles, in: 2011 19th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2011, pp. 1439-1446.
- [2] Q. Dao, S. Yamamoto, Safety enhancement of a pneumatic artificial muscle actuated robotic orthosis for gait rehabilitation, in: 2019 4th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems, ACIRS, 2019, pp. 113-117.
- [3] Phan, Phuoc Thien. Bio-Inspired Soft Artificial Muscles for Robotic and Healthcare Applications. Diss. UNSW Sydney, 2023.
- [4] Yang, Lijun, et al. "A 3D parameterized BIM-modeling method for complex engineering structures in building construction projects." Buildings 14.6 (2024): 1752.
- [5] Hirz, Mario, Patrick Rossbacher, and Jana Gulianová. "Future trends in CAD—from the perspective of automotive industry." Computer-Aided Design and Applications 14.6 (2017): 734-741.
- [6] Yap, Yee Ling, Swee Leong Sing, and Wai Yee Yeong. "A review of 3D printing processes and materials for soft robotics." Rapid Prototyping Journal 26.8 (2020): 1345-1361.
- [7] Schaffner, Manuel, et al. "3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures." Nature communications 9.1 (2018): 878.
- [8] Gul, Jahan Zeb, et al. "3D printing for soft robotics—a review." Science and technology of advanced materials 19.1 (2018): 243-262.