

目標の立体形状に変形するレーザーカッターで作製可能な連結型パウチモータ

岡 空来* 小山 和紀* 権藤 智之* 池田 靖史* 川原 圭博* 鳴海 紘也*

概要. 近年、ソフトロボティクスや Human-Computer Interaction (HCI) の分野では、熱圧着により作製された「パウチモータ」(平面空気圧アクチュエータ) が形状変化インタフェースなどに応用されてきた。しかし、パウチモータにより作られる立体の多くは単純な形状に限られていた。これは、(1) パウチ作製に使用されてきた改造 CNC マシンが複雑形状を作るには低速であり、(2) 単一の入力により複数のパウチモータを駆動しても各パウチの変形角度を制御できず、(3) 目標の 3 次元形状に変形するパウチモータのパターンを計算するソフトウェアが存在しなかったためである。そこで我々は、レーザーカッターを用いてパウチモータを高速に融着する製造手法を開発した。また、パウチの融着パターンに微小な突起を付けることで、完全に膨らんだ際のパウチの変形角度をほぼ線形に制御した。さらに、目標の 3 次元形状を入力すると、その形状に変形するパウチのパターンを出力するソフトウェアを開発した。

1 はじめに

近年、ソフトロボティクスの分野では、熱圧着により作製した「パウチモータ」[3, 4] と呼ばれる薄型の空気圧アクチュエータが研究されてきた。さらに、Human-Computer Interaction (HCI) の分野では、パウチモータが気体・液体で駆動する形状変化インタフェースなどにも応用されてきた [2, 5, 6, 10]。

しかし、パウチモータにより作られる 3 次元形状の多くは単純なものに限られており、複数のパウチを単一の通路で連結した複雑な形状を実現するのは困難であった。これは、(1) これまで自由形状のパウチ作製に使用されてきた改造 CNC マシンが複雑形状を作るには低速 (5.0 mm/sec [3]) であり、(2) 複数のパウチモータを単一の入力により駆動しても各パウチの変形角度を制御できず、(3) 目標の 3 次元折り形状に変形するパウチモータのパターンを計算するソフトウェアが存在しなかったためである。

そこで我々は、(1') レーザーカッターを用いてパウチモータを高速 (86 mm/sec, [3] の 17 倍) に融着する製造手法を開発した。また、(2') パウチモータの融着パターンに微小な突起を付けることで、完全に膨らんだ際のパウチの変形角度をほぼ線形に制御した。さらに、(3') 目標の 3 次元形状を入力すると、その形状に変形するパウチモータのパターンを出力するソフトウェアを開発した。なおレーザーカッターにより熱可塑性フィルムを熱融着する手法は過去に提案されている [9] もの、単純な熱融着のパターンにより風船状の構造を実現するにとどまっております。複雑な熱融着のパターンにより折り形状の変形角度制御を実現するには至っていない。また、逆

問題を解きパウチモータの原理を応用することでインフレタブルな曲面を作製する手法は提案されている [7] が、これは収縮変形を利用し 3 次元の曲面形状を実現したものであり、折り変形を利用し 3 次元自由形状を実現したものではない。

2 本論

まず本研究の概要を示す。本研究はパウチモータを製造するフェーズと駆動するフェーズに分けられる。以下に詳述する。2 枚の熱可塑性フィルム (厚み 100 μm , ポリエチレン L-LDPE) を、レーザーカッター (Trotec Speedy400-80 W) に重ねて置き、アタッチメントで押さえながら熱融着し、パウチを製造した (図 1a)。このときフィルムの切断を防ぐために、(a) フィルムの位置をレーザーの焦点から 2.0 cm オフセットし、(b) レーザーの出力をフィルムを切断せず融着する程度 (Power: 50% (= 40.0 W), Speed: 2.0% (= 86 mm/s), PPI: 1000) に抑えて加熱した。パウチモータにパネルを貼り付けて作製した折り形状の展開図 (図 1b) に空気圧を十分印加することで目標の立体形状を得ることができる (図 1c-e)。

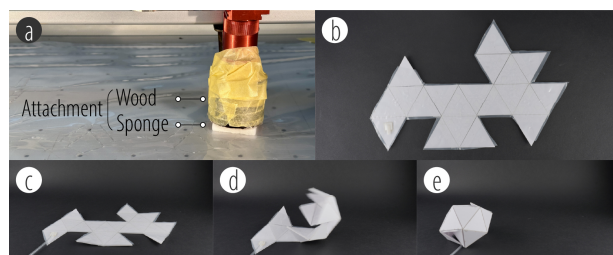


図 1. 本研究の概要. (a) レーザーカッターによるポリエチレンシートの熱融着. (b) 展開された正二十面体. (c-e) 空気印加による正二十面体の自己折り.

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 東京大学

次に、本機構の動作原理を説明する。本機構はパネル（＝3次元折り形状の面）とパウチモータ（＝2面角を制御する）の2つの構成要素からなる3層構造のアクチュエータである（図2a）。隣接するパネルの境界に位置するパウチが空気で満たされることでパネルが持ち上げられ、折りが実現される。パウチモータのシートの両面にパネルを貼ることで山折り・谷折りを同時に実現する（図2b）。先行研究[4]によると、空気圧を十分印加したパウチは約90°の変形角度に固定されてしまう。そこで、突起を付加することで膨らみ方が変化し、空気圧最大印加時の変形角度 θ が制御可能となるとの仮説を立て、実験を行った。以下に詳述する。まずパウチの幅 w に対する突起の長さ w_p （図2c）の比を δ と定義し、次式で与えた：

$$\delta = \frac{w_p}{w}$$

突起（上部に5個、下部に4個）を設けた長方形パウチ（アスペクト比8:1, 16.0cm×40.0cm）を複数作製し実験した（図2c）。具体的には、 δ を0%, 5%, 10%, 15%, 25%, 30%, 40%の7通りに変化させ、それぞれの長さ比に対して $n = 3$ 回、すなわち計21個のサンプルを用いた。それぞれの実験では150kPaの空気圧を印加し、パウチの変形角度を計測した。線形モデルでの決定係数は $R^2 > 0.99$ であり、長さ比 δ と変形角度 θ には次式のような線形関係があることが分かった（図2d）。

$$\theta = -239\delta + 93. \quad (1)$$

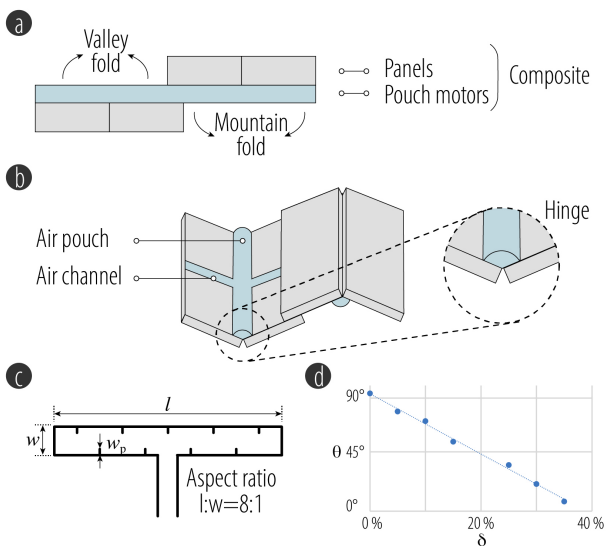


図2. (a) 本機構の層構造. (b) 山折り・谷折り. (c) パウチ内部の微小な突起のパターン. (d) 長さ比と変形角度の関係.

最後に、ソフトウェアの説明をする。本ソフトウェアは、ユーザが目標の3次元メッシュ構造を入力す

ると（図3a）、その構造を実現するパウチモータのパターン（図3b）と、それに対応する表と裏のパネルのデータを自動的に出力する（図3cd）。

パウチモータのパターン生成では、3次元形状の展開図に応じて、展開図内部の辺をパウチ化した。加えて、元の3次元メッシュ構造の変形角度と式1から必要な突起の長さを求め、それに対応する突起を生成した。パネルのパターン生成では、山折り・谷折りに合わせてパネルの必要な箇所を割り出し、表と裏のパネルとした。

最後にレーザーカッターによりパウチモータとパネルを製造し、表側のパウチ・パネル・裏側のパウチをを貼り合わせた3層構造に空気圧を印加することで、目標の3次元形状を得る。

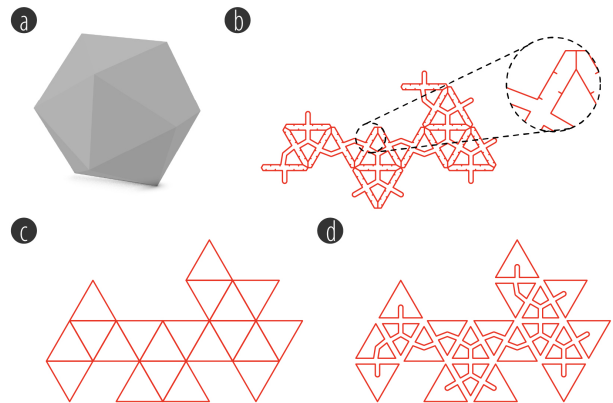


図3. ソフトウェアによる設計プロセス. (a) 入力した正二十面体. (b) 出力されたパウチモータのパターン, (c,d) 出力されたパネルのパターン（表・裏）.

3 結論

本稿では、レーザーカッターを用いて製造したパウチモータに空気圧を印加することで任意の3次元折り形状を得る技術を紹介した。空気圧を用いて折り形状を製作する手法は、熱や水分[1, 8]を使う手法に比べ、大きなトルクが見込める。今後、本研究を比較的大スケールの自己折り構造（e.g., プロダクト・パピリオン・建築）への応用を検討していく。

謝辞

本研究の一部はJST AdCORP (JPMJKB2302) および、株式会社メルカリとインクルーシブ工学連携研究機構との共同研究である価値交換工学により実施された。また、レーザーカッターによるフィルムの融着実験に協力して下さった吉田安紀彦氏および、空気ポンプについて指導して下さった東京大学大学院情報学環研究室の寛康明教授、森田崇文氏、開元宏樹氏に感謝する。

参考文献

- [1] B. An, Y. Tao, J. Gu, T. Cheng, X. A. Chen, X. Zhang, W. Zhao, Y. Do, S. Takahashi, H.-Y. Wu, T. Zhang, and L. Yao. Thermorph: Democratizing 4D Printing of Self-Folding Materials and Interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [2] Q. Lu, J. Ou, J. a. Wilbert, A. Haben, H. Mi, and H. Ishii. MilliMorph – Fluid-Driven Thin Film Shape-Change Materials for Interaction Design. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 663–672, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [3] K. Narumi, H. Sato, K. Nakahara, Y. a. Seong, K. Morinaga, Y. Kakehi, R. Niiyama, and Y. Kawahara. Liquid Pouch Motors: Printable Planar Actuators Driven by Liquid-to-Gas Phase Change for Shape-Changing Interfaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3):3915–3922, July 2020.
- [4] R. Niiyama, D. Rus, and S. Kim. Pouch Motors: Printable/inflatable soft actuators for robotics. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6332–6337, 2014.
- [5] R. Niiyama, X. Sun, L. Yao, H. Ishii, D. Rus, and S. Kim. Sticky Actuator: Free-Form Planar Actuators for Animated Objects. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, p. 77–84, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [6] J. Ou, M. Skouras, N. Vlavianos, F. Heibeck, C.-Y. Cheng, J. Peters, and H. Ishii. AeroMorph - Heat-Sealing Inflatable Shape-Change Materials for Interaction Design. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 121–132, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [7] J. Panetta, F. Isvoranu, T. Chen, E. Siéfert, B. Roman, and M. Pauly. Computational Inverse Design of Surface-Based Inflatables. *ACM Trans. Graph.*, 40(4), jul 2021.
- [8] Y. Tao, Y. Do, H. Yang, Y.-C. Lee, G. Wang, C. Mondoa, J. Cui, W. Wang, and L. Yao. Morphlour: Personalized Flour-Based Morphing Food Induced by Dehydration or Hydration Method. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 329–340, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [9] J. Yamaoka, K. Nozawa, S. Asada, R. Niiyama, Y. Kawahara, and Y. Kakehi. AccordionFab: Fabricating Inflatable 3D Objects by Laser Cutting and Welding Multi-Layered Sheets. In *Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18 Adjunct, p. 160–162, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [10] L. Yao, R. Niiyama, J. Ou, S. Follmer, C. Della Silva, and H. Ishii. PneuUI: Pneumatically Actuated Soft Composite Materials for Shape Changing Interfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, p. 13–22, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.