

# AirFab : 動的造形可能な簡易型ソフトアクチュエータ

千葉蒼司<sup>†</sup> 張萍<sup>†</sup> 垣花元貴<sup>†</sup> 鳥居拓馬<sup>†</sup> 謝浩然<sup>†</sup>

**概要** : 近年開発が進んでいるソフトアクチュエータとして、動的制御可能なインフレーターブル（膨張式）構造が挙げられる。これらの開発された機構の課題として、専門知識を要する工具や特殊な素材を必要とする問題がある。本研究の提案では、インフレーターブル構造を安価にすることを旨とし、素材にはツイストバルーンとポリエチレンフィルムを用いている。本提案機構を用いれば、専門知識を有する必要がなく、手軽にインフレーターブル構造を製作可能なため、教育やエンターテインメントへの応用が幅広く期待される。

## 1. はじめに

近年の動的アクチュエータ研究において、インフレーターブル（膨張式）構造をもつ素材を動力に用いる研究が活発に行われている。インフレーターブル構造体を動的に操作する手法として、構造体内部の充填剤の量や熱調整による変形、相転移等を利用した機構が、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション(HCI)分野で研究されている。例えば、沸点の低い液体を気化させることで、膜内部の圧力を上げて変形させる平面アクチュエータがある[1]。また、インフレーターブル構造をシリコンや紙などの柔らかい素材で実現し、形状変化が可能な立体物が提案されている[2]。これらの研究手法は、特殊な工作機器や配線等を必要とし、素材が一般的に市販されていないものが多く、製作が困難という課題がある。こうした背景を踏まえ、本研究は、従来の製作手法と比較して、加工が簡易でなおかつ素材の入手性も良いインフレーターブル構造体 AirFab を提案する。



図1 提案デバイス AirFab の応用例

本研究で提案するインフレーターブル構造体 AirFab は、安価な市販品のツイストバルーンとポリエチレンフィルムで構成される。本提案の AirFab では、形状変化はツイストバルーンの膨張によって引き起こされる。特定の形に加工したポリエチレンフィルムでツイストバルーンを覆い、膨張

方向を強制させることで変形方向を制御する。この機構は特殊な技能を必要とせず、安価に実現可能であるため、簡易なソフトロボティクスとして学校教育での利用や、エンターテインメント領域での応用が期待される。エンターテインメント応用においては、生物や木の動く模型の製作等、ソフトアクチュエータの応用が容易になると考えられる(図1)。

## 2. 関連研究

インフレーターブル構造を、シリコンやフィルム等の柔軟な素材で製作する手法が開発されてきた。その中で、Sticky Actuator はインフレーターブル構造体の操作に空気圧を用いている。透明フィルムを熱圧着することで、中に空洞をもつ構造を実現している[3]。他の造形法として、Bubble は casting で製作したシリコンを貼り合わせたインフレーターブル構造である[4]。さらに、本研究の提案と同様に、異なる素材を採用したインフレーターブル構造の手法の研究も進められている。山岡らの提案[5]では、熱可塑性樹脂が重なった樹脂の板に熱を加えることで樹脂が変形する性質を利用し、樹脂層内部に空気を入れ膨張させるインフレーターブル構造が提案されている。この既存研究と本提案の違いは、樹脂の熱変形と比較して、より素早く形状変化できる点にある。

## 3. 提案手法 AirFab

本提案手法 AirFab では、入手が簡易な材料と加工方法で、インフレーターブル構造を製作可能である。AirFab の造形過程を図2に示す。

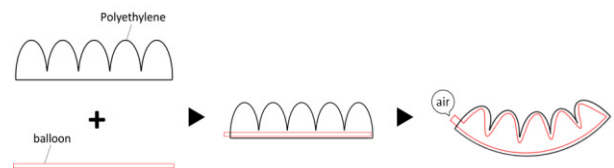


図2 提案デバイス AirFab の造形手順

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学

まず、ポリエチレンフィルムに図 2 (左図)のような規則的な線を描く。その後、描いた線に沿ってポリエチレンフィルムをミシンで縫い付け、ツイストバルーン (以下、バルーン) を最奥まで差し込む。試作品開発に実際に用いたバルーンと線にそって加工したポリエチレンフィルムを図 3(左)に示す。AirFab の駆動力の性能を検証するため、4種類の実験用試作品を作成した(図 3(右))。空気圧を高めるとバルーンが膨張するが、ミシンで縫い付けたポリエチレンフィルムの縫い目によって膨張するため、線の節点で屈曲する。

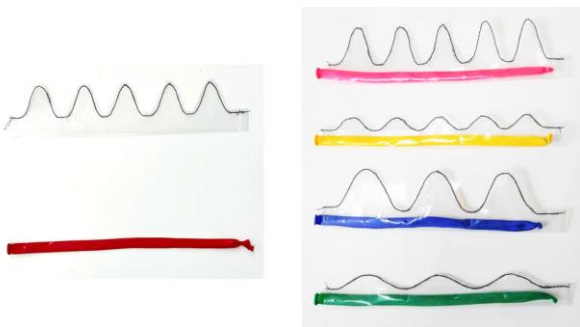


図 3 (左)バルーンと加工したポリエチレンフィルム, (右)実験用の試作品

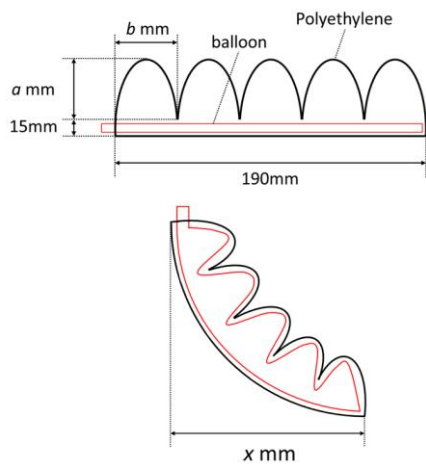


図 4 (上)水平方向から見たパターン, (下)内圧を高めた際に屈曲した様子

#### 4. アクチュエータ性能

Airfab のアクチュエータ性能を検証するため、製作形状と屈曲幅の実験を実施した。Airfab の山の高さを  $a$  [mm]、山の幅を  $b$  [mm]と設定した。山の形状はフリーハンドで描いた(図 4)。設定した山の高さや個数と、AirFab の屈曲幅  $x$  [mm]の関係を調べるため、図 4 (上)の山の高さ  $a$  [mm]と山の幅  $b$  [mm]の比率を変えた。調査にあたって、フィルムの横幅を 190mm、バルーン差し込み幅を 15mmに固定した。山の高さ  $a$  [mm]を 10mm と 30mm、山の幅  $b$  [mm]を 30mm

と 50mm の計 4 種類のパターンを製作し、それぞれの屈曲幅  $x$  [mm]を測定した。その結果を図 5 に示す。



図 5 山の高さ  $a$  と幅  $b$  の変更による屈曲幅の変化

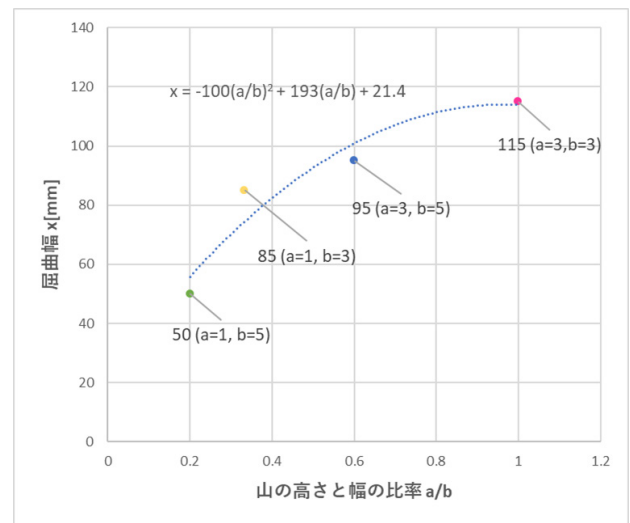


図 6 山の高さと幅の比率  $r$  と屈曲幅  $x$  [mm]の関係

図 6 に示したように、山の高さと幅の比率  $r = a/b$  の値が大きくなると屈曲幅  $x$  [mm]が増していることがわかる。比率  $r$  を用いて 2 次近似し、屈曲幅  $x$  [mm]を以下のように表すことができる。

$$x = -100.0r^2 + 193.0r + 21.4 \quad (1)$$

図 5 のような山が一定の形状であれば、式 1 に基づくことで屈曲幅が予想できる。Airfab 製作における簡易的な設計指針となると考えられる。

## 5. 評価実験

提案アクチュエータの製作に関する評価実験を行った。実験は被験者に実際に AirFab を作ってもらい、アンケートでは、AirFab の製作過程に関して、難易度や安全性、楽しさなどの点に関して5段階で評価し、5は「非常に思う」、1は「全くそう思わない」と設定した。また、アンケートは体験前と体験後の2回行った。質問は同じであるが、体験の前後での感想を比較するため、体験前は AirFab の制作手順の説明を受けただけの時点で、体験後は実際に制作を体験した後で AirFab の製作過程を評価させた。図7に実験の様子を示す。

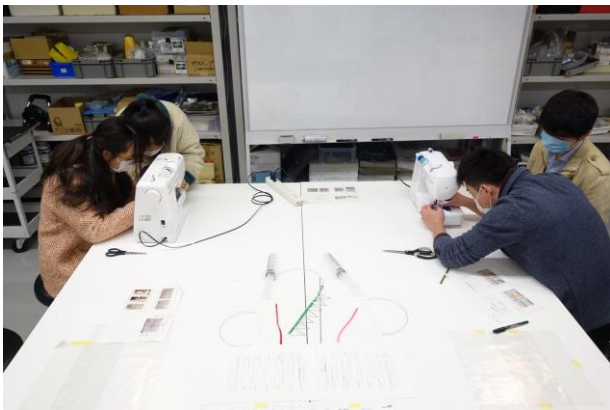


図7 製作・評価実験の様子

実験に参加したのは、本学に所属する22～25歳の男女10名である。被験者に AirFab を実際に作ってもらうにあたり、最初に実験手順と AirFab の応用例をスライドで説明した。口頭のみで AirFab への理解を深められるように制作手順を図入りで解説を行った。この解説を踏まえて体験前のアンケートに回答させた。次に AirFab の製作を体験させた。製作を体験したのち、体験後のアンケートに回答させた。この実験では全ての被験者に同じ形状の AirFab を製作させた。実験で被験者が製作した AirFab を図8に示す。

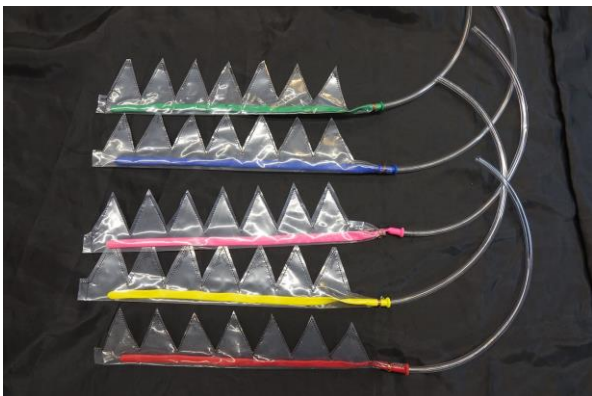


図8 被験者が製作した AirFab

被験者が体験中に行った制作手順は以下の①～④である(図9も参照)。

- ① ポリエチレンフィルムに型を当てて、マーカーでなぞる。
- ② なぞり終えた線に沿ってミシンで縫い付ける。
- ③ ミシン目に沿ってポリエチレンフィルムを切り抜く。これで AirFab の形状が完成する。
- ④ 次にポリエチレンフィルムの空洞にツイストバルーンを差し込む。最後に空気を注入するためにプラスチックチューブを差し込み、針金で巻いて固定する。以上の手順を図9に示す。

## 6. 評価実験の結果

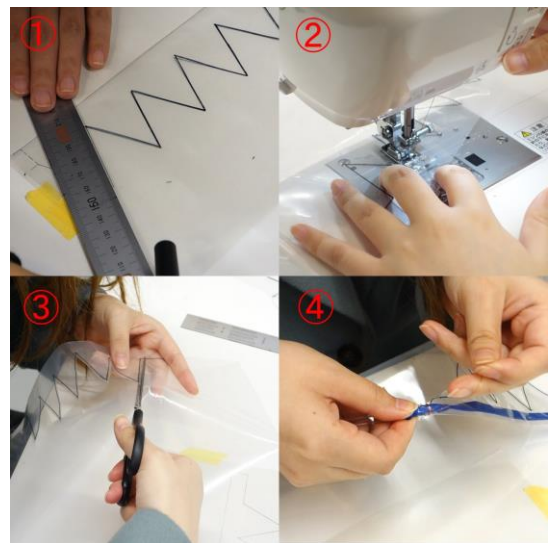


図9 被験者が行った AirFab 製作手順

アンケートの質問は以下の Q.1～Q.8 である。

- Q.1: AirFab の作品の製作過程は安全だと思いましたか。  
Q.2: もしあなたが1人で今回と同じ AirFab の作品をもう一度つくるとしたら、講師なしでも近い品質で再現できると思いますか。  
Q.3: AirFab の仕組みは面白いと思いますか。  
Q.4: Airfab に駆動力としての実用性はあると思いますか。  
Q.5: Airfab は様々な場面に応用できる汎用性があると思いますか。  
Q.6: AirFab の作品の製作過程は楽しいと思いますか。  
Q.7: 自宅でも Airfab を作ってみたいと思いますか。  
Q.8: 家族や友人にも Airfab を紹介したいですか。

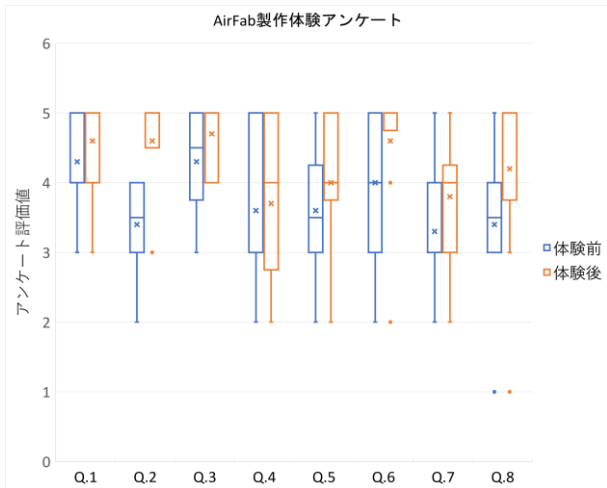


図 10 評価実験のアンケート結果

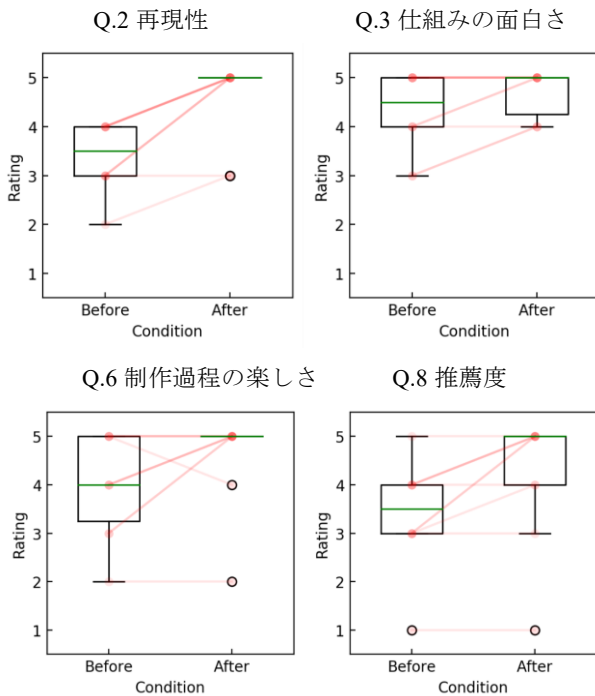


図 11 有意判定が出た4ケース

体験前・体験後のアンケートの結果を箱ひげ図で示す(図10)。アンケートの各質問項目に対して Wilcoxon の符号付順位検定を行い、AirFab 体験前と体験後で被験者の評価値に有意な増加が見られるかを検定した。その結果、図11に示した4つの質問項目「Q.2.再現性」、「Q.3.仕組みの面白さ」、「Q.6.制作過程の楽しさ」、「Q.8.推薦度」で有意な差が見られた。

「再現性」の評価値は、AirFab 体験前よりも体験後において有意に高かった ( $Z = 0, p < 0.01$ )。評価値の平均は体験前が 3.4 であるのに対して、体験後は 4.6 となり、35% 評価が向上した。また、体験前に評価を 5 と回答する被験者は 10 人中 0 人であったが、体験後は 8 人と大幅に増えた。次に「仕組みが面白いか」の評価値は、体験前よりも体験

後において有意に高かった ( $Z = 0.0, p < 0.05$ )。評価値の平均は体験前が 4.3 であるのに対して、体験後は 4.7 となり、約 9% 評価が向上した。「製作過程の楽しさ」の評価値は、体験前よりも体験後において有意に高かった ( $Z = 2.5, p < 0.1$ )。評価値の平均は体験前が 4.0 であるのに対して、体験後は 4.6 となっており、15% 評価が向上した。「推薦度」の評価値は体験前よりも体験後において有意に高かった ( $Z = 0.0, p < 0.05$ )。評価値の平均は体験前が 3.3 であるのに対して、体験後は 3.8 となり、約 15% 評価が向上した。

## 7. 結論と考察

再現性は AirFab 製作の全体の難易度に関する質問である (Q.2)。アンケート結果において、1% 優位水準の下で有意に増加したため、被験者は AirFab の製作過程の難易度は説明を聞くだけの体験前よりも、製作体験後の方がより低く感じていると考えられる。よって、本研究の目的である簡易なインフレータブル構造体の提案は、達成されたと考えられる。これは、Airfab の製作過程に用いる素材や器具が特殊な物でなく馴染みやすい点と、製作手順が簡易であることが起因していると考えられる。また今回の実験では、エンターテインメント領域への発展のために試作した AirFab の応用例などは、被験者への説明に留まり、最も基本的な形状の Airfab のみを製作させた。それにもかかわらず、Airfab のエンターテインメント性の評価において、体験前と体験後で有意な増加が見られた (Q.3, 6)。これは、Airfab が製作過程と製作物も含めて、実際に体験することで伝わる面白さを持ち合わせているためだと考える。AirFab は関連研究のインフレータブル構造体と比較して、応答速度の素早さが特徴の 1 つである。そのため、被験者が製作した AirFab が目の前で機敏に形状変化を起こし屈曲する様子が、面白さを増す要素だと考えられる。実験終了後、被験者の女性が製作した Airfab を持ち帰る例があった。理由を尋ねると、Airfab を気に入ったようで、周囲の人にも紹介したいとのことだった。これは、体験前と体験後で有意な増加が見られた評価にも表れている (Q.8)。Airfab が簡易に形状変化可能という点も寄与していると考えられる。被験者から良好なフィードバックを得られたため、教育やエンターテインメント領域への応用についても期待できる。

## 8. まとめ

本稿では、製作が簡易で安価なインフレータブル構造体を提案した。アクチュエータ性能を検証し、アンケートによる評価実験を行った。

今後提案アクチュエータを用いた小学生向けのワークショップを計画している。実験で得られたフィードバックからは製作の難易度やエンターテインメント性は良好であると考えられる。さらなる簡易化を目指し、作業の簡略化

や短時間で製作可能な Airfab の応用例などを開発していく。

現時点の課題として、耐久性と駆動力が挙げられる。試作品を何度も作動させているとフィルムが破損し、バルーンが破裂することがあった。フィルム形状などにさらなる改良が必要だと考えられる。駆動力はソフトアクチュエータとしては弱く、軽い物体を動かす程度の力しか有していない。改善を重ねソフトアクチュエータとしての実用性が達成できれば、エンターテインメント領域のみならず医療分野などへの応用も期待できる。

## 参考文献

- [1] K. Nakahara, K. Narumi, R. Niiyama, and Y. Kawahara, “Electric phase-change actuator with inkjet printed flexible circuit for printable and integrated robot prototyping,” 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.1856-1863, Singapore, May.2017.
- [2] L. Yao, R. Niiyama, J. Ou, S. Follmer, C. D. Silva, and H. Ishii, “PneUI: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces,” Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and Technology, pp.13-22, St. Andrews, UK, Oct.2013.
- [3] R. Niiyama, X. Sun, L. Yao, H. Ishii, D. Rus, and S. Kim, “Sticky actuator: Free-form planar actuators for animated objects,” Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, pp.77-84, Stanford, CA, USA, Jan.2015.
- [4] X. Zhang, A. Shatarbanov, J. Zeng, V. K. Chen, V. M. Bove, P. Maes, J. Rekimoto, “Bubble: Wearable Assistive Grasping Augmentation Based on Soft Inflatables,” Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-6, Glasgow, Scotland, UK, May.2019.
- [5] J. Yamaoka, R. Niiyama, and Y. Kakehi, “BlowFab: Rapid Prototyping for Rigid and Reusable Objects using Inflation of Laser-cut Surfaces,” Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.461-469, Québec City, Canada, Oct.2017.