

Reflatables: 形状再設計可能な空気膜構造体の造形手法の提案

村山 拓海^{1,a)} 山岡 潤一^{2,b)} 笥 康明^{2,c)}

概要:

本研究は、樹脂チューブと面ファスナを用いた、形状の再設計が可能な空気膜構造体 Reflatables の造形手法の提案およびその製作を自動化する機構の基礎的検討を行う。本手法では、ポリエチレン製チューブの表面に面ファスナを固定して節を作ることで、膨張時にチューブを任意の方向に曲げることを考える。この手法を通してユーザは任意の形状の空気膜構造体を設計し、チューブに空気を入れることで、任意の空気膜構造体を造形できる。さらに、面ファスナを貼り直すことで、即興的に別の形状に書き換え可能である。本提案では、手動での造形に加え、自動的に構造体を試作するためのファブリケーションツールを開発した。本稿では、Reflatables の設計手法と製造手法、及び考察、今後の展望について述べる。

1. はじめに

風船のように、膜を空気で膨らませて形状を維持する空気膜構造体は、建造物や遊具として日常的に利用されている。さらに近年ではソフトロボットや Human Computer Interaction (HCI) における変形可能なインタフェースなど、多様な領域に応用可能な構造として注目されている。

空気膜構造体の利点として、使用時のみ膨張させ、輸送や持ち運ぶ際には折り畳めることや材料のコストが高くない点が挙げられる。また内部は空気で満たされているため、さわ心地の良さ、安全性の高さ等も利点である。

これまで特に HCI 領域では、Printflatables [1] など、樹脂シートに折り目をつけて、節を作りながら熱圧着することで、膨張時に曲がる箇所を予め設定する手法が提案されてきた。Hasegawa らの Single-Stroke Structures は樹脂チューブに熱圧着を局部的に施すことで曲線的な造形を可能にする手段を提案した [2]。これはユーザが簡易に空気膜構造体を試作でき、ソフトロボットや身体に装着する外骨格デバイスなど、身体スケールを超えるようなものも含む多様な応用が試みられてきた。

一方で、これらの既存の空気膜構造体の設計手法では、成形後にそのオブジェクトの形の変更を行うことは難しい。形の書き換えが可能になることで、設計の間違いを削

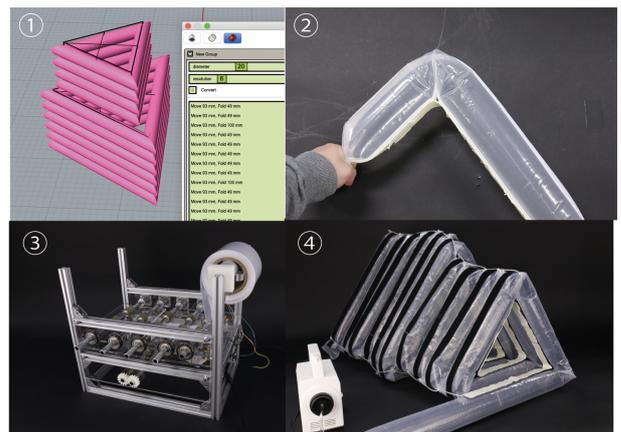


図 1 (1) 再変形可能な空気膜構造体 Reflatables の形状を設計し (2) 樹脂チューブに面ファスナを張り合わせて形をプログラムする。 (3) 手動あるいは自動で制作する装置を用いることで、 (4) 大型の構造体を短時間で印刷可能。

減でき、資源を再利用できるだろう。そこで、本研究では、ユーザが一撃の柔軟な空気膜構造体 Reflatables の設計・製造可能なデジタルファブリケーション手法を提案する。

具体的に本手法では、熱圧着の代わりに 1 本の樹脂チューブの表裏面に貼り付けた面ファスナ（ループ面）を用いてチューブに節を作成する。チューブを折りながら、フック面の面ファスナを貼り付けることで、書き換え可能な節を作ることができる。このチューブに空気を注入して膨張させると、節の部分で屈曲して、大小様々なインフレータブル構造体を試作できる (図 1)。今回は、手法の提案に加えて、ユーザが事前に設計したデータをもとに、チューブの

¹ 慶應義塾大学 環境情報学部

² 東京大学 大学院情報学環

a) t16858tm@sfc.keio.ac.jp

b) yamajun@iii.u-tokyo.ac.jp

c) kakehi@iii.u-tokyo.ac.jp

長さや角度を指定できるソフトウェアを開発した。ユーザはソフトウェアに表示された長さや角度を見ながら面ファスナを張り合わせることができる。これを実現するために今回は、膨張時の節の角度とチューブを折り曲げる長さの関係を調べて、ユーザが任意の角度にチューブを曲げる方法を考案した。また、これらの作業を自動化するために、チューブを送り出ししながら、面ファスナを適切な箇所へ自動で張り合わせる装置を開発している。

本稿では、面ファスナを用いて再変形可能な空気膜構造体 Reflatables の設計手法、製造手法および技術的な評価と今後の展望について述べる。

2. 関連研究

折りたたみ可能な空気膜構造体を、簡易に試作可能なデジタルファブリケーション技術はこれまでも多く提案されてきた。aeroMorph [3] は樹脂シート同士を熱圧着で接着して簡易に空気膜構造を施策できる。また節に当たる箇所の形状を設計することで、膨張時の角度を指定できる。AccordionFab [4] は、レーザーカッターを用いて多層の空気膜構造を半自動的に製造する手法である。これらは、ユーザが簡易に半自動的に試作することが可能だが、熱圧着であるため一度造形すると書き換えは難しい。

Single-Stroke Structures [2] では、一本のポリエチレン・チューブの熱圧着を施して節を作ることで、膨張時に自動的に屈曲して、即興的に仮設建築物を試作した。Printflatables [1] も同様に樹脂シートに事前に熱圧着で節を作ることで、空気を注入した際に自動的に屈曲するインフレーター構造体を試作する手法である。成形物を体に装着することで、重いものを持ち上げたり、ソフトロボットを簡易に試作できる。これらは本手法 Reflatables の膨張時に屈曲させる構造と同様ではあるが、これまでの空気膜構造体の製造方法と同様に熱圧着であるため書き換えが難しい。

これに対し本研究では、面ファスナを用いることで、一度製造した後にも再度書き換えが可能な空気膜構造体を試作する手法を開発した。

3. Reflatables

上でも述べた通り、筆者らの提案する Reflatables は樹脂チューブと面ファスナを用いて、造形後に再度屈曲する角度を書き換え、形状の変更が可能な空気膜構造体である。

本手法の空気膜構造体の造形の流れを図 2 に示す。まずユーザは CAD を用いて完成後の形状を設計する。その後、筆者らが開発したソフトウェアにより自動的にチューブの節間の距離と節の角度を割り出す。ユーザは算出されたチューブを折る位置の指示に従いながら、フック面の面ファスナを張り合わせる。あるいは、後述する自動的に節を作る装置を用いて、節に当たる箇所を折りたたみ、面ファスナを張り合わせて、チューブを作成する。このチューブ

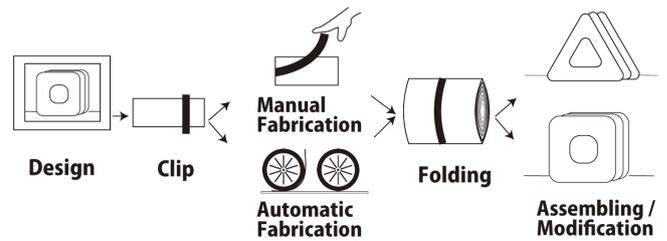


図 2 Reflatables の造形の流れ。

に空気を注入することにより、屈曲や曲線上の部位を持つ形状に膨らみ、それを図 2 右のように積層することで立体形状を持つ空気膜構造体を造作することができる。これは空気を抜くことで、巻き取り可能なチューブに戻り、コンパクトに格納することができる。さらに、再度形状を変更したい場合には、設計をやり直し、チューブを装置に入れて再印刷することで書き換え可能である。

3.1 設計のやり直しが可能な空気膜構造体の原理

面ファスナと樹脂チューブを用いて、空気を注入した際に自動的に屈曲する空気膜構造の原理について述べる。

今回使用した樹脂チューブは、ポリエチレン製のチューブで、幅 100mm、厚み 0.15mm のものを用いた。面ファスナは TRUSCO 社製のマジロック (R) セットで、横幅が 25mm のものを用いた。

まず事前に樹脂チューブの表と裏に、図 3 のように面ファスナのループ面（輪っかの形状をした繊維構造）を貼り付ける。またチューブの端部はクリップで留め、密封する。その後、一箇所を表あるいは裏の任意の方向に曲げ、ある程度の長さ余らせて、フック面（爪の形状をした繊維構造）の面ファスナを貼り付ける（図 3(1),(2) 左）。その後、内部に空気を注入することで、余らせた部分が制約となり、逆の方向に屈曲する（図 3(1),(2) 右）。さらに裏側の面も折り返ししながら面ファスナを張り合わせることで、異なる方向にチューブを屈曲させることが可能である（図 3(3)）。

この時、余らせた部分の長さを変更することで、膨張時の屈曲角度を指定できる。今回は、節の長さや屈曲角度の関係を調べた。図 3 に示す折返しの長さ L を、0, 20, 40, 50, 60, 70 mm のように変化させ、それぞれ膨張させたときの角度 d (°) を調査した。その結果、図 4 に示すように、折返しを長くするほど d は小さくなる。

この実験結果をもとに、今回使用したチューブの直径を考慮して、56 度から 180 度までの角度変化と節の長さの関係式は下記のように近似して示すことができる。上記と同じくチューブの屈曲した角度を d 、折返しの長さを L とする。実際のチューブに対応する箇所は図 3(1) に示した。

$$d = -1.78L + 177.6 \quad (1)$$



図 3 Reflatables の角度指定の方法 (1),(2) 折返しの長さを変えることで角度変更が可能. (3) 両面に面ファスナを張り合わせることで異なる方向に屈曲が可能.

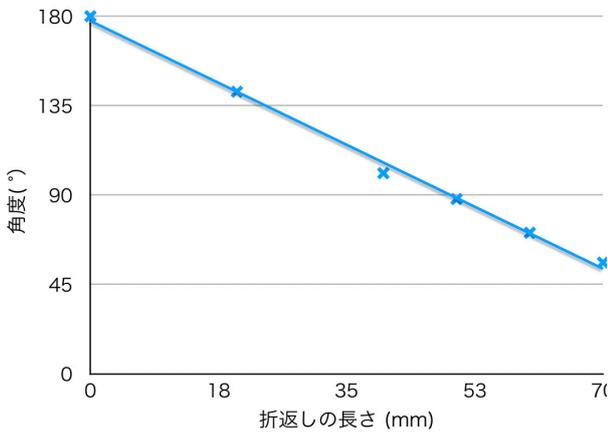


図 4 角度変化と折返しの長さの関係

3.2 設計工程

節の長さや角度の関係式を元に、3D モデルから空気膜構造体の設計図に変換するソフトウェアを開発した。今回は、CAD ソフトウェア Rhinoceros の追加開発環境である Grasshopper を用いた。

ユーザはまず、画面上で、3D モデルを作成またはインポートする (図 5)。その後、チューブの直径を 1 層の高さとして、モデルを垂直方向に輪切りにする。そして、1 層の輪切りの曲線上の頂点の数を指定 (図 6) し、頂点同士を直線で繋ぎ単純化する。輪切りの面の一箇所を上下のレイヤーを繋ぐ箇所として、全ての層の面を繋ぎ、一本の線とする。

この線から構成されるデータの、隣り合う 2 本の線の角度を、前章の数式を元に、最適な折返しの長さを算出する。画面には、チューブの折り返す箇所までの長さ、折返しの長さが指示として表示される (図 5 右)。また今回は節の角度は 56 度から 180 度を推奨しているため、56 度以下にな

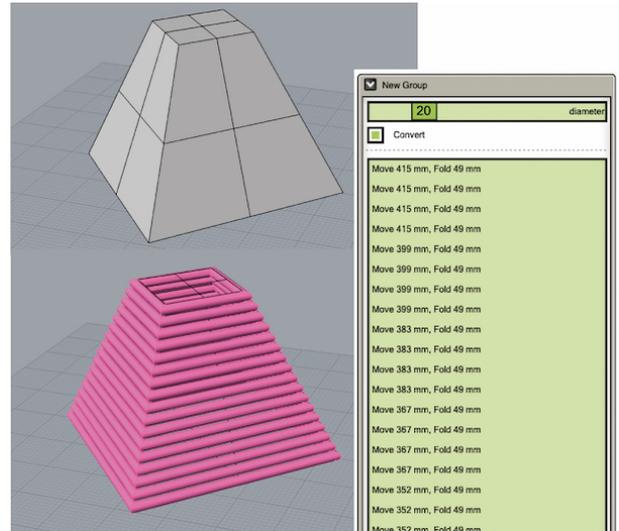


図 5 設計ソフトウェア

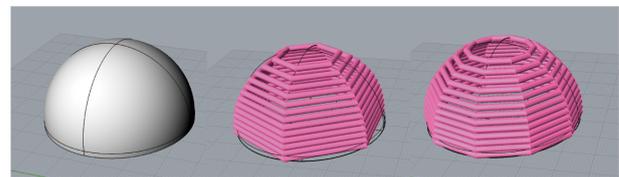


図 6 解像度の設定

ると警告が表示される。ユーザはこの指示を元に、チューブを折り返しながら面ファスナを貼ることで構造体を試作できる。

さらに今回は自動的に面ファスナを張り合わせる装置のために、この張り合わせる指示を、装置を駆動させるソフトウェアで使用するために、テキストデータに書き出すことが可能である。

3.3 製造工程

ソフトウェアで生成した節の間の距離と折返しの長さを元に、ユーザは手動で面ファスナを張り合わせて、空気膜構造体を試作できる。しかし手作業は手間がかかるため、より早く製造するために装置による自動化を検討する。

今回は自動化のために、ソフトウェア上で生成したコードを元に、自動的に空気膜構造体を製造する装置を試作した。装置は、チューブ送り出し機構、面ファスナ圧着部、マイコン (Arduino)、モータドライバ (Arduino MotorShield Rev3)、制御用 PC、電源ユニットから構成される (図 7 上)。装置の大きさは 390cm x 290cm x 350cm である。

まずユーザは、事前に面ファスナが貼られたチューブの長さを必要な長さに調整するために、末端をクリップで留める。そしてチューブをロール状に巻き直し、装置のローラに挿入する。装置が起動すると、装置のステッピングモータ (PK243-01) が回転して、チューブを送り出す (図 8(1), 図 7 左下)。節の部分に達すると、図 8(2),(3) のような動きに変更されて、チューブを曲げ始める。その後、図

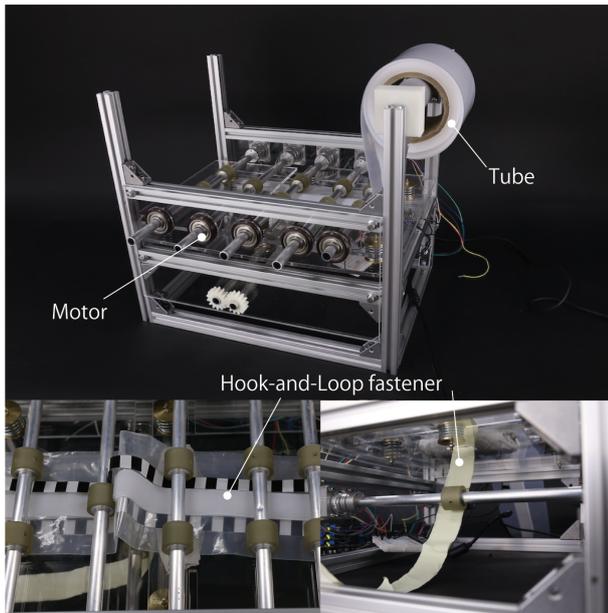


図 7 自動的に Reflatables を製造するシステム (左下) それぞれのモータを制御してチューブを送り出しながら (右下) 下から面ファスナを送り出し貼り付ける。

8(4) のようにもう片方の面ファスナを送り出しながら接着する。装置の送り出しステージの下にはイシュレータ (ばね) を配置しており、面ファスナによって厚みが変わっても送り出すことができる工夫を施した。

装置のモータの制御は Arduino を用いており、PC とは Processing とシリアル通信で接続されている。ユーザは画面上でコードをインポートして、印刷ボタンを押すことで製造が開始される。また少し修正したい場合など画面上で、節間の長さや屈曲角度を細かく調整することも可能である。

またモータとチューブが脱調して、コードの指示とずれてしまうことがある。これを防ぐために、チューブ状に図 9(2) のように 10mm 間隔で印刷された白と黒のパターンを配置して、図 9(1) のように配置されたフォトリフレクタ (LBR-127HLD) から得られる距離情報 (図 9(3)) を元に、ずれを常に補正している。

実際に装置を用いて製造した完成物は図 10 である。図 10-1 の造形物の大きさは 50cm x 85cm x 43cm, チューブの長さは 3200cm, 造形時間は設計に約 10 分, 印刷は手作業で約 1 時間, 装置を用いた場合約 15 分, 積層作業に 15 分, 空気注入に 5 分であった。また設計時にモデルの形状を変更することで、図 10(2),(3) などの形状に変えることが出来る。

4. 考察

再変形可能な空気膜構造 Reflatables の角度指定をするため、予備実験から導き出された数式モデルおよびソフトウェアから、手動あるいは自動で設計した空気膜構造体を

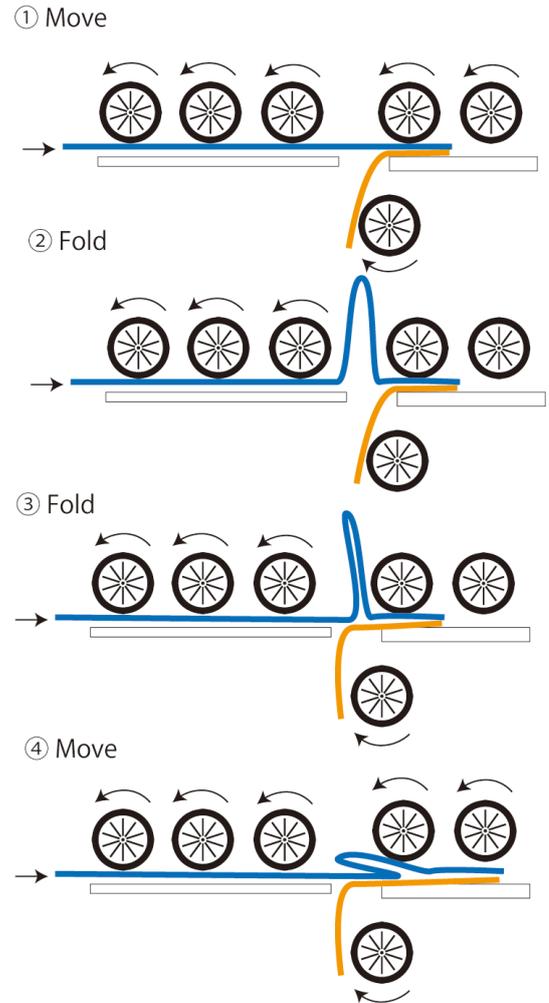


図 8 チューブに面ファスナを張り合わせる工程のそれぞれのモータの動き。

試作できた。ある程度は設計した形通りにはなっていたが、詳細な造形精度については設計モデルと完成物との差を明らかにするなど、今後の課題としたい。

4.1 積層方法

Reflatables のチューブを積層する手法として、2 種類の方法が考えられる。1 つは結束バンドなどを用いて、層の間を固定する方法である。チューブと面ファスナの節の部分に開いた隙間に結束バンドを通すことで接続する (図 11(1))。もう 1 つは、形を形成しているループ面の面ファスナを用いて、層と層の間をフック面の面ファスナで固定する方法である (図 11(2))。前者の場合は隙間を通すという手間がかかるが、層同士は強固に固定される。後者は簡便ではあり、やり直しも可能であるが、表あるいは裏のみ面ファスナを貼り付けた場合のみ可能な固定法である。今後は、この積層工程も自動化する機構を検討する。

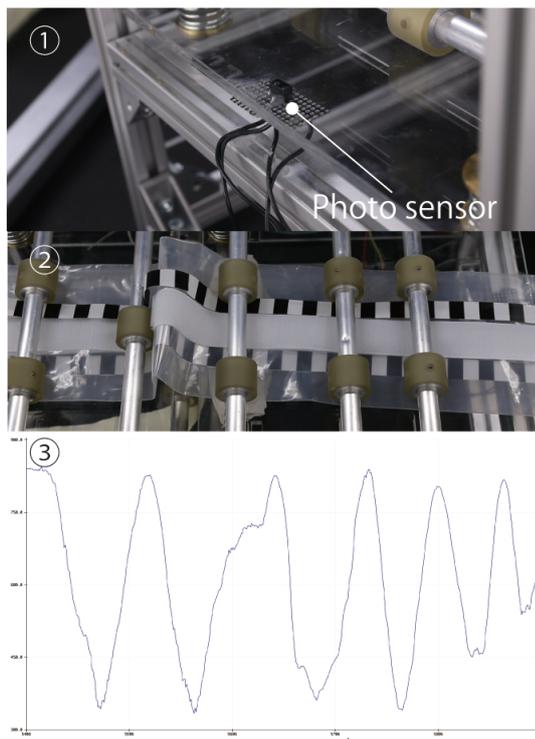


図 9 1) 送り出し距離を修正するためのフォトリフレクタ 2) チューブ表面の白黒パターンを 3) ソフトウェアで読み取り補正

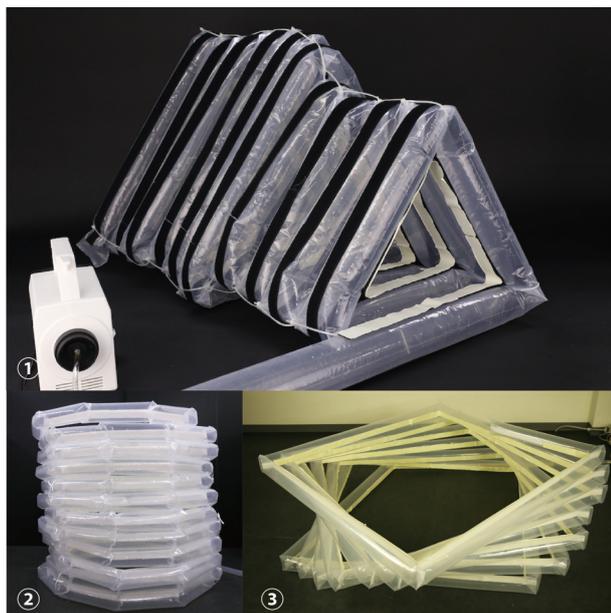


図 10 Reflatables を用いて試作した完成物

4.2 両面の節生成の自動化

両方向に屈曲させる場合、折返した箇所を保ちながら両面に面ファスナを張りつける必要がある。手で貼り付けるのであれば、折返しながら面ファスナをつけることは可能である。しかし今回試作した自動化のための装置は、最初に作った折返しの山が、裏面の折返しを作る際に潰れてしまう。このため両面の折返しを自動化するためには、局所的に面ファスナを貼り付ける機構を用意する必要がある。



図 11 1) インシュロックまたは、2) 面ファスナを貼り付けて、レイヤ間を接続する

4.3 補修・解体方法

空気を注入する際に内圧が高すぎると、折返しの面ファスナが剥がれてしまう場合がある。面ファスナが剥がれた際は、剥がれた箇所を定規などを用いて、折り返しの長さを測り、再度手で面ファスナを貼り付ける必要がある。この作業は手動であるため、適切な長さを指示する提示方法など、補修支援のシステムを検討する必要がある。

解体する際は、貼り付けている面ファスナを剥がすだけで良いが、ロール状に巻き取る際に内部に空気が残っている場合、巻き取ることが難しい。空気が抜けるまで放置、吸引器で空気を吸引する、あるいは丁寧に空気を抜いていきながら巻き取る必要がある。今後は、数カ所に空気穴を配置して、早急に空気を抜く方法などを検討する。

5. まとめと今後の展望

本稿では、再変形可能な空気膜構造体 Reflatables の造形手法について述べた。樹脂チューブと面ファスナを用いて、膨張時に任意の角度に屈曲させるために、事前に折り返しの長さや角度変化の関係を調査し、数式モデル化した。その後、算出した数式を元にソフトウェアを開発して、ユーザが任意の空気膜構造体を制作できる環境を実装した。さらに自動的に構造体を制作するための装置を開発し、実際の造形可能性を確かめた。

今回は片面の節生成は実証できたが、より複雑な形状を造形するために、両面に節を作る必要がある。また層間を接続する工程は、結束バンドなどを用いて手動で行う必要がある。今後は、両面に節を自動生成する機構、自動で積層間を接続する機構などを開発する。

また空気膜構造体は、建築や家具のみならず、ウェアラブルデバイス、ソフトロボットなど様々な分野で応用され

ている。本研究も、多様なアプリケーションに対応するために、設計環境の改善や小型な構造体を実装できる装置の開発を進める。

謝辞 本研究は一部、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の支援により実施された。また University of Colorado, Boulder の鈴木遼氏には本研究に対して様々な助言を頂き深謝する。

参考文献

- [1] H. Sareen, U. Umapathi, P. Shin, Y. Kakehi, J. Ou, P. Maes, H. Ishii, “Printflatables: Printing Human-scale, Functional and Dynamic Inflatable Objects”, In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17). ACM, 3669-3680. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025898>.
- [2] Takahiro Hasegawa and Yasuaki Kakehi, “Single-Stroke Structures”, Ars Electronica Festival 2017, 2017.
- [3] O. Jifei, S. Melina, V. Nikolaos, H. Felix, C. Chin-Yi, P. Jannik, 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). ACM, 121-132. DOI: <https://doi.org/10.1145/2984511.2984520>
- [4] J. Yamaoka, K. Nozawa, S. Asada, R. Niiyama, Y. Kawahara, Y. Kakehi, “AccordionFab: Fabricating Inflatable 3D Objects by Laser Cutting and Welding Multi-Layered Sheets”, In The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings (UIST '18 Adjunct). ACM, 160-162. DOI: <https://doi.org/10.1145/3266037.3271636>