

修理可能で軽量・柔軟な 空圧制御ファブリックシステムの提案

赤地 由妃^{1,a)} 山岡 潤一^{1,b)}

概要：近年ファッション業界では、空気を用いたウェアラブルデバイスへの需要が高まっている。ブランドのコレクションやオーダーメイドの衣装などで、実際に空気を用いた洋服や靴、靴などが実装されてきた。ただし、これらは一般のユーザが生活の中で使用するには課題が多く、例えば空気漏れが一度発生すると修理できないことや、空圧駆動のデバイス部が重くて持ち歩けないことなどが挙げられる。そこで本論文では、修理可能で、軽量・柔軟な空圧制御ファブリックシステムを提案する。本論文では、関連研究や実装、空気回路などのデザインスペース、アプリケーション、議論と今後の展望を述べる。

1. はじめに

近年ファッション業界において、空気を用いたウェアラブルデバイス開発の需要が高まっている。例えば、Louis Vuitton[1]は空気を使ったアウターウェアなどを製造販売しており、防寒性などが優れる。また、Fredrik TjaerandsenのBalloon Dress[2]は、空気を使った未来的なフォルムを提案している。ハイブランドによる装飾的なものだけでなく、触覚技術（ハプティクス）を用いた空圧制御インターフェイスも関心を集めている。手や腕に装着するタイプの空圧制御インターフェイスは、視覚障害者のみならず、ユーザに対する通知機能などウェアラブルデバイスの実装に有用である。洋服や腕時計、靴、靴など、人々は空気をまとい生活していくことが想定される。

一方で、空圧制御のウェアラブルデバイスが普及する上で、課題は多くある。例えば、(1) 空気漏れが一度発生すると修理ができないこと、(2) 空圧制御を行うハードウェア部分が重くて持ち歩けないこと、などが挙げられる。通常の布地のファブリックでは、ユーザが生活の中でアイロンをしたりミシンをかけたりすることで、衣類を修理していくプロセスが存在する。空圧制御のウェアラブルデバイスにおいても、修理のプロセスを導入し、日常生活でユーザが使用しやすいシステムが必要になる。

本研究で提案する空圧制御のファブリックシステムは、ソフトロボティクスの研究で使用されてきたエラストマ（ゴムと樹脂の中間の特性を持つ物質）を使用しており、

ユーザが指や手を使った操作により、ウェアラブルデバイスをカスタマイズする手法を提案する。空圧制御のモジュールキットは、PneuBots[3]など、これまでさまざまな研究事例がある。これらの先行研究では、熱可塑性の塩化ビニルフィルムを用いたヒートシールなどの製造方法が使われることが多い。アイロンや針、糸などの専用の道具を必要とするものもある。エラストマを使用する理由は、より直感的な身体操作でファブリックシステムをメンテナンスする仕組みを構築するためである。(A) 親指と人差し指でエラストマを押し潰す行為、(B) 人差し指で穴をふさぐ行為など、直感的な身体操作（図1）により、エラストマは形状変化する。またヒートシールよりも、大きく膨らむため、視覚的インパクトが強い。従来のヒートシール製法では、今回提案するような直感的な操作は難しい。

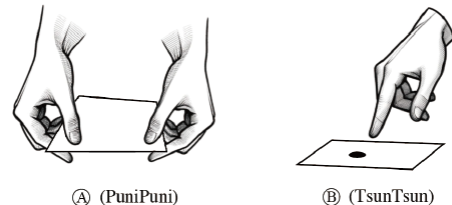


図1 指を使った直感的な身体操作の例

本提案システムは、レーザーカットで裁断されたレイヤを重ね合わせて製造されており、空気回路や電子パーツなどをコンポーネンツとして含む構造である。ユーザは自らの手でレイヤをカットし修復しながら、切り絵のようにウェアラブルデバイスを作る。本提案ではさまざまなパ

¹ 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

^{a)} akachi0803@kmd.keio.ac.jp

^{b)} yamaoka@kmd.keio.ac.jp

ターンのファブリック事例をユーザに示し、ユーザはその中から好きなものを選び、好きなようにカットし、指で修復しカスタマイズしながら、自らのウェアラブルデバイスを設計する。

本論文では、関連研究や実装、空気回路などのデザインスペース、アプリケーション、議論と今後の展望について述べる。

2. 関連研究

2.1 ウェアラブルデバイスのモジュールキット

ユーザがウェアラブルデバイスをカスタマイズして製造できるモジュールキットの先行研究は多くある。Wearable Bits[4]は、e-テキスタイルをプロトタイピングするツールキットで、金属製のスナップボタンを用いて、センサやモータなどを接続し、プログラミング操作する。A Cuttable Wireless Power Transfer Sheet[5]は、好きな形に切っても機能を維持できるワイヤレス充電シートを開発し、家具・鞆・衣服などに貼り付けるだけで、ワイヤレス充電可能なウェアラブルデバイスを製造できるシステムである。Awakened apparel[6]は、空圧制御の折り紙構造のファブリックシステムで、プログラミング制御で形状変化するスカートなどの応用例を示している。PneuBots[3]は、空圧制御のモジュール式のソフトロボット構築キットであり、応用例にリストバンドなどのウェアラブルデバイスがある。

先行研究において、ファブリック構造に電子パーツを組み込み、ウェアラブルデバイスを容易に製造できるようにしたキットは多いが、本論文の提案手法は、電子パーツだけでなく、空気回路をレイヤに内蔵し、カットしても修復できる構造を示した。この空気回路の修復可能なファブリックシステムは先行研究とは異なる部分である。

2.2 空気回路の関連研究

本論文の提案手法においては、レイヤに内蔵された空気回路が重要になる。milliMorph[7]は、ミリメートルスケールの空気回路をヒートシールで製造し、連続的な収縮運動を引き起こす空圧機構を設計する研究である。Venous Materials[8]は、静脈上の流体回路をエラストマで製造し、指を使ったアナログな操作で動くシステムを設計した研究である。Fluidic Computation Kit[9]は、電子を使わずに、流体回路のスイッチなどを制御する研究である。PneuSeries[10]は、双方向逆止弁を用いて、隣接する空気のカューブを1つずつ制御するシステムの研究である。Liquid Printed Pneumatics[11]は、高速液体印刷技術を使用して、積層造形を行うことで、空圧制御可能な構造を製造するシステムである。

これらの研究は、ウェアラブルデバイスに特化したものではない。ただし、本研究の空気回路の構造設計は、これらの先行研究を参考にしている。特に、Venous Materials[8]

や Fluidic Computation Kit[9]は、電子的手法に限定せずとも、アナログなユーザの操作が、空気制御のシステムにおいて有効であることを示した事例であり、本研究の身体操作に通ずるものである。

3. プロトタイプ

3.1 基本構造

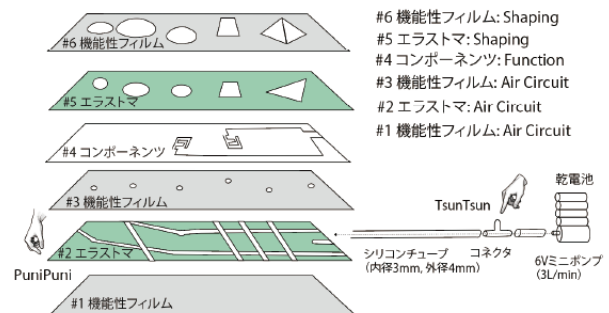


図2 基本のレイヤ構造

提案システムの基本構造は、エラストマテープ（3M製VHBテープ Y-4910J - 0.5mm）と機能性フィルムを用いたレイヤ構造である（図2）。第1層から第3層までは空気回路のレイヤであり、2枚の機能性フィルムをエラストマテープで接着することで、空気回路を設計している。複雑な回路を設計する場合のために、Autodesk社のEAGLEによる自動回路計算を利用した。設計後の空気回路の修復手法については後述する。

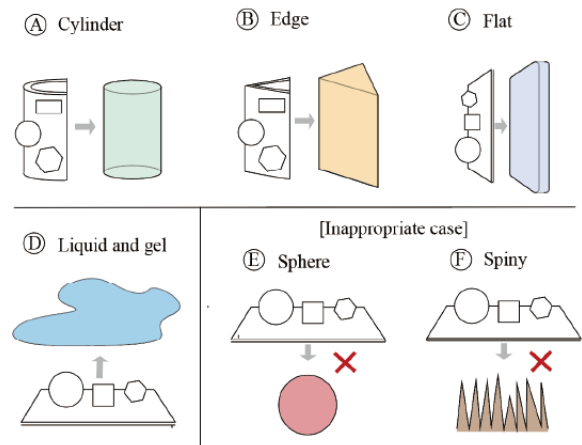


図3 提案ファブリックの利用方法

提案する空圧制御のファブリックシステムは、軽量・柔軟であるため、さまざまな形状に巻き付けることができる（図3）。ウェアラブルデバイスで多く採用されている円筒タイプの形状（A）のみならず、エッジのある形状（B）やフラットな形状（C）にも対応する。また、エラストマは耐水性があるため、短い時間であれば液体の中でも劣化しにくい。ただし、電子パーツをコンポーネントとして含む

ファブリックは、あらかじめ取り外した方が安全である。伸ばしすぎるとエラストマが切れることがあるため、球体形状 (E) は非推奨である。また、トゲがある形状 (F) も、破損の原因となる。

第4層は、コンポーネント用のレイヤである。電子パーツを組み込んだり、紙や布地を切ってエラストマ内部に封入することで、ユーザはさまざまなデザインをカスタマイズできる。最上部の第5層から第6層は、インフレータブルの形状を提示する部分である。多くのインフレータブルデバイスは球体提示が多く、特にエラストマを用いた手法では球体提示になりがちであるが、本提案システムではシャープな形状にも対応する。この手法は筆者らの AirPolygon[12] に述べられた方法を用いる。

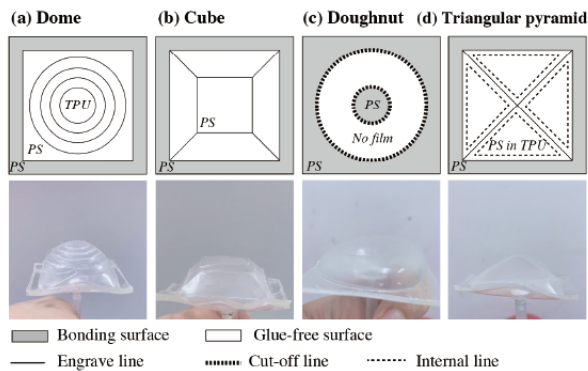
3.2 機能性フィルムとコンポーネント

機能性フィルムは、いくつかの素材を検討し (図4)、熱可塑性ウレタンフィルム (TPU) や導電性ポリエチレンテレフタレート (導電 PET)、ポリスチレン (PS) を使用する。エラストマとの接合度が低いポリエチレン (PE) やポリプロピレン (PP) などのフィルムは、空気漏れの原因となる。またレーザーカッターでダイオキシンなどが発生する塩化ビニル (PVC) も使用しない。

フィルムの種類	略称	厚み	Surface Energy*	コメント
◎使用しているフィルム				
熱可塑性ウレタンフィルム	TPU	0.1mm	43	曲線的な形状に向いている
導電性ポリエチレンテレフタレート	導電PET	0.1mm	-	タッチセンサーになる
ポリスチレン	PS	0.15mm	36	直線的な形状に向いている
×使用していないフィルム				
塩化ビニル	PVC	-	39	レーザーカッターでダイオキシンが発生
ポリエチレン	PE	-	31	接合度が弱い
ポリプロピレン	PP	-	29	接合度が弱い
アクリル	PMMA	-	38	薄いフィルムが入手不能

*Surface Energy - Dynes/cm from 3M datasheet. 高い方がエラストマとの接合度がある。
<https://multimedia.3m.com/mws/media/1133654O/fsd-165.pdf>

図4 機能性フィルムの選定



([12] より引用)

図5 AirPolygon の形状提示システム

機能性フィルムの重ね合わせ (図5) による空気形状のカスタマイズについては、AirPolygon[12] で提案したレーザーカッターによる手法を用いる。

コンポーネントは、空気を制御する電磁弁やタッチセンシングを行う静電容量フィルム (図6)、電子回路、ハンダ付した電子パーツなどを使用する。

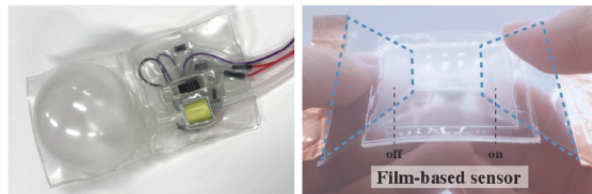


図6 コンポーネント層の設計例: 電磁弁と電子回路 (左) 静電容量フィルム (右)

紙のように、水に濡れると破れたり摩擦したりする素材は、エラストマ内部に封入することで、耐水性や耐久性が向上する。どのようなものをユーザがエラストマ内部に封入するかは、ユーザが選択可能である。従来、紙などの特殊な素材を洋服としてまとうには、複雑な加工をする必要があったが、この手法であれば、ユーザが紙に書いたものも、洋服の内部に封入することができる。

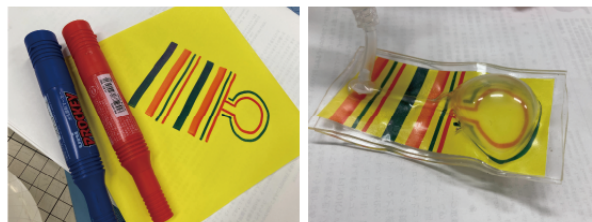


図7 紙をコンポーネントにする設計例

3.3 空気回路の基本設計

提案手法では、空気回路の設計が重要である。空圧制御では、空気漏れが一度発生すると全体の空圧バランスが崩れてしまい、ユーザが修理することが難しいという課題がある。一部の空圧制御デバイスは、シリコンチューブを使用しているが、チューブが絡まる場合があり、ウェアブルデバイスのような身体を動かすものには向いていない。提案手法では、空気回路のレイヤをファブリックシステムの内部に設計し、これらの課題に対応した。

空気回路の自動計算は Autodesk 社の EAGLE のソフトウェアを用いている (図8左)。このソフトウェアの Autorouter 機能は、プリント基板の自動配線を行うためのものだが、設定で「回路の幅」や「回路同士の間隔」をミリ単位で設定することができる。どちらも 5mm 前後を指定して自動配線することで、最適な空気回路を設計することができる。

3Dプリンタを用いて、空気漏れを起こしにくい形状の独自のコネクタを設計している(図8右)。コネクタの形状は、ユーザが指で穴を押さえること(=TsunTsun)で、アナログ的な方法でも、空気のon/offを行えるよう直感的な操作を誘発するように設計した。

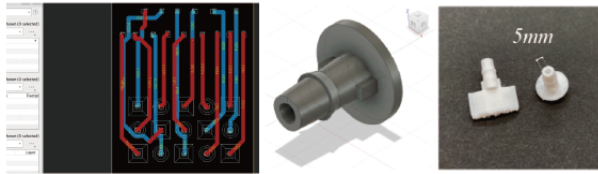


図8 EAGLEソフトウェア(左)コネクタ形状(右)

3.4 空気回路の組み立て及び修復

提案手法により、空圧制御のファブリックから洋服を制作する場合において、パターンの裁断時に空気回路が切断されてしまうことは避けられない(図9)。提案手法の空気回路は、ユーザが任意の位置でカットしても、修復可能な構造である(ただし切断部分が、空気回路ではなく膨張部の場合、空気回路を閉じることができない)。

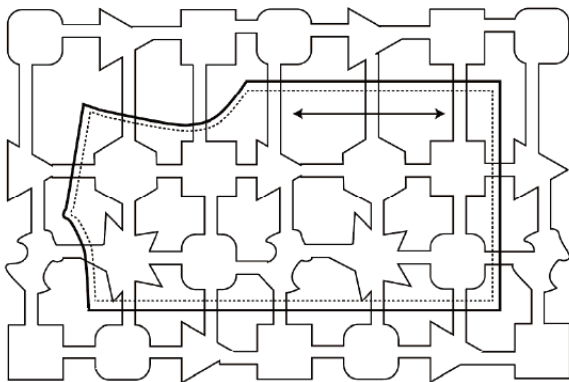


図9 洋服のパターンと空気回路

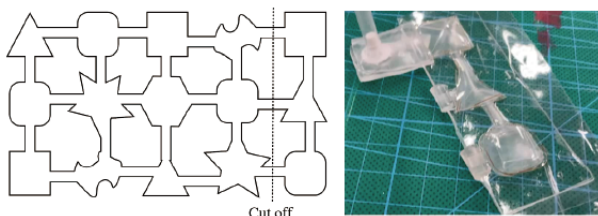


図10 空気回路の修復例

空気回路の修復例として、図10左のように、空気回路の途中でユーザがカットした場合、エラストマテープの破片により、エラストマを数回押し潰すようにして穴を塞ぐことで、空気回路を閉じることができる(図10左)。

空気回路は延長して、他のパーツを繋げることもできる。

エラストマテープ(3M製)は圧力を加えたり加熱すると、アクリル接着剤が染み出して、接着力が高まる特性がある。指を使った前述の修復操作を行うことにより、空気漏れを防ぎ、ふたたび空気回路を閉じることができる(ただし、5mm未満の細かい箇所の修復の場合、修復しても空気漏れを引き起こす可能性があるため、あまり細かい修復はできない)。図11は、空気回路を延長する図面例である。

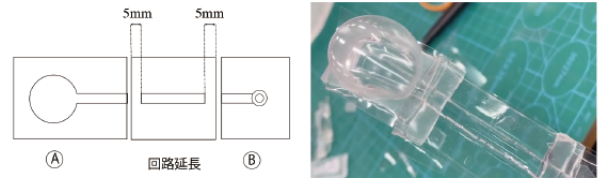


図11 空気回路の延長例

3.5 空圧制御のハードウェア設計

ウェアラブルデバイスでは、空圧制御を行うためのハードウェアは重すぎる場合、ユーザの動きの障害になる。図12は、空圧制御のスイッチ部分(Switcher)とポンプ部分(Power Supply)の電子パーツを取り出したものである。

電磁弁や5V制御のミニポンプは大きくないため、ユーザはポケットサイズで、これらのハードウェアを持ち運ぶことができる。重量は、それぞれ200g未満である。なお、電磁弁は、Mosfet(2N7000)とマイクロコンピュータ(Arduino NanoやESP32)を使用しており、空圧をコントロールする仕組みである。

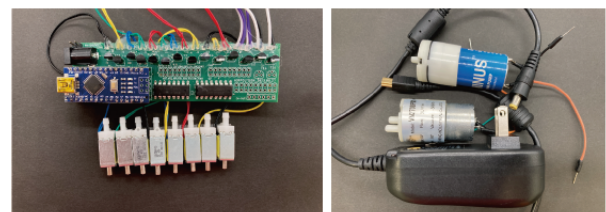


図12 Switcher(左) Power Supply(右)

4. アプリケーション

提案手法の修理可能で、軽量かつ柔軟な空圧制御ファブリックという特性を活かした応用例をあげる。この特性を活用できる最適なアプリケーションはウェアラブルデバイスであるが、インテリアにおけるファブリックなどの応用例も考えられる。

4.1 ウェアラブルデバイス

ウェアラブルデバイスの応用例は、服や靴、靴、腕時計(バンド部分)を実装している(図13)。これらは、空圧制御のハードウェアと連携することで、センシングしたり、

スマートフォンでの操作に応じて、マイクロコンピュータ (ESP 32) によりプログラミング制御可能である。実際に着用したり、持ち歩くデモを行うことで、ユーザ評価を検証したい。

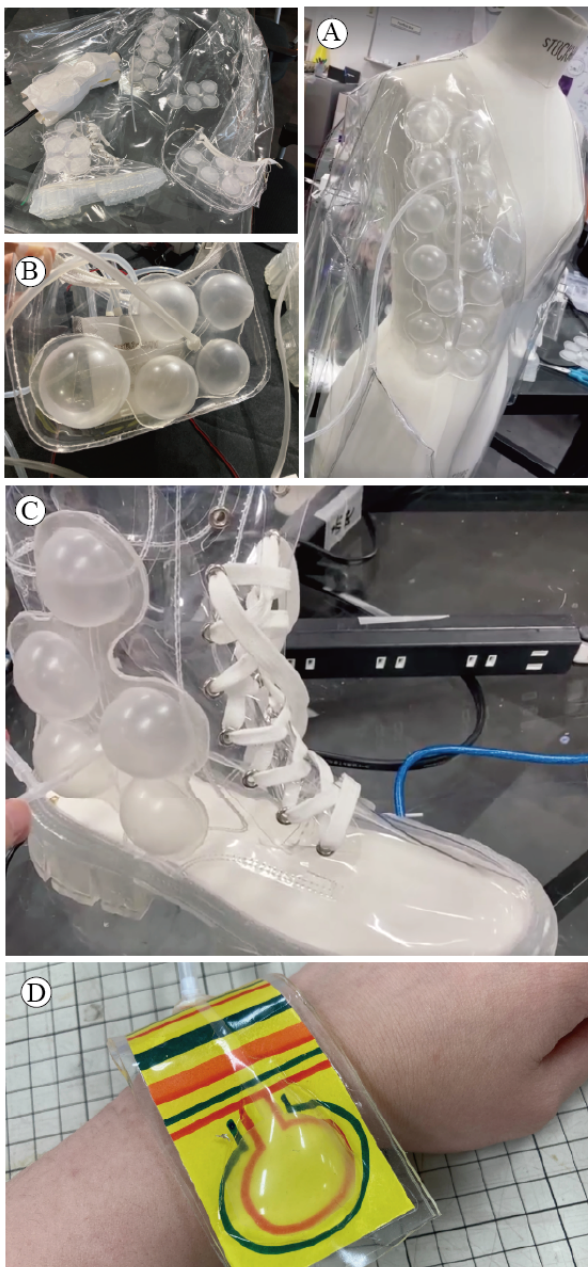


図 13 提案手法によるウェアラブルデバイスの応用例: (A) 洋服 (B) 鞆 (C) 靴 (D) 腕時計

4.2 ワークショップ

ユーザの手による修復作業が有効に機能するかどうか、国内外の展示でワークショップを行い、検証している。このワークショップ後のアンケート調査によれば、ウェアラブルデバイスの他に、インテリア雑貨や玩具などへの応用も希望するユーザが多かった。まだ未実装であるが、今後はウェアラブルデバイス以外の領域（例えばインテリアな

ど）に、本提案のファブリックシステムを用いる応用例を検討する予定である。

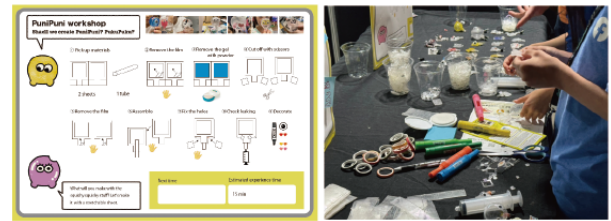


図 14 指を使ったワークショップの様子

5. 議論と今後の展望

これまでの研究結果で、空圧制御のウェアラブルデバイスのための空気回路を含むファブリックシステムは開発可能であることを確認した。ただし、製造工程において、幾つかの残された課題がある。

(1) 手による修復作業：手による回路の修復作業やアナログ式のスイッチのシステムは、ユーザ評価を経て、改善していく必要がある。ワークショップを通じて、基本的な手による修復作業は直観的であることを確認したが、ワークショップを通じて発見したユーザの手の動きを整理して、ユーザに最適なガイドラインを取扱説明書などで提示することを検討する。

(2) 柔軟性：一部の機能性フィルムの使用において、ファブリックが硬くなりすぎて、ウェアラブルデバイスにおける加工が難しい場合がある。特に、ポリスチレン (PS) を用いた場合では、直線的で硬質な形状になりやすく、機能性フィルムの違いによるファブリックの特性変化を整理する必要がある。

(3) 軽量さ：空圧制御のハードウェアは、ポケットサイズ的设计となっているが、改良の余地がある。特に、5V ミニポンプは、タバコ箱大と大きいので、さらに軽量な設計を検討する。

(4) 静音性：ポンプの音や電磁弁の on/off 時のクラック音は、ユーザにストレスを与える可能性がある。電子的な手法のみならず、手や非電子的な操作を使用することで、より静かな空圧制御システムが構築できる可能性がある。

(5) 空気回路の修復：現在の提案方式では、修復の跡がみえてしまい、デザイン性を損なう可能性もある。洋裁におけるステッチのデザインのように、製造工程の跡がデザイン性につながる可能性もあるが、その場合でも、修復跡をどのようにデザインするか事例を提示する必要があるだろう。

(6) コンポーネンツ：コンポーネンツには、紙や古い布など、さまざまなものを封入することができるが、コンポーネンツの設計スペースは、整理する必要がある。トゲがあるようなものを封入すると破損する可能性があるほか、

液体を封入した場合の安全性など、コンポーネントごとに注意点をまとめる必要がある。ハンダ付をした電子パーツを封入する場合は、耐久性テストなどの評価が必要である。

(7) 洗濯などの耐久性評価: ファブリックとしての耐久性評価について、洗濯における適切な実験を行う必要がある。手洗いの洗濯をおこなうことを想定した場合、何回ほど洗濯が可能かなどの検証が必要である。

上記のような議論を踏まえ、今後の展望として、安定し確立したファブリックシステムの製造プロセスを構築したい。また、必要に応じ、ユーザの手作業を助けるような専用の道具なども開発したい。これらは社会実装して、専用キットなどでユーザに届けることも検討する。テストユーザに使用してもらうことで、ユーザ評価を収集する予定である。今後は、ユーザのフィードバックを適切に評価し、提案手法に統合していきたい。

謝辞

本研究は、日本テレビホールディングス株式会社の日テレR&Dラボより支援を受けて遂行されており、この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] LouisVuit-ton. Virgil abloh-designed inflatable monogram canvas blouson and gilet. 2021. Retrieved from <https://hypebeast.com/2021/2/louis-vuitton-virgil-abloh-inflatable-monogram-canvas-blouson-gilet-release-china-viral-diy>.
- [2] Fredrik Tjærandsen. Balloon dress. 2019. Retrieved from <https://www.facebook.com/fredriktjaerandsen/>.
- [3] Hye Jun Youn and Ali Shtarbanov. Pneubots: Modular inflatables for playful exploration of soft robotics. In *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [4] Lee Jones, Sara Nabil, Amanda McLeod, and Audrey Girouard. Wearable bits: Scaffolding creativity with a prototyping toolkit for wearable e-textiles. In *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '20, p. 165–177, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [5] Ryo Takahashi, Takuya Sasatani, Fuminori Okuya, Yoshiaki Narusue, and Yoshihiro Kawahara. A cuttable wireless power transfer sheet. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 2, No. 4, dec 2018.
- [6] Laura Perovich, Philippa Mothersill, and Jennifer Broutin Farah. Awakened apparel: Embedded soft actuators for expressive fashion and functional garments. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, p. 77–80, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [7] Qiuyu Lu, Jifei Ou, João Wilbert, André Haben, Haipeng Mi, and Hiroshi 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.
- [8] Hila Mor, Tianyu Yu, Ken Nakagaki, Benjamin Harvey Miller, Yichen Jia, and Hiroshi Ishii. Venous materials: Towards interactive fluidic mechanisms. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–14, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [9] Qiuyu Lu, Haiqing Xu, Yijie Guo, Joey Yu Wang, and Lining Yao. Fluidic computation kit: Towards electronic-free shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [10] Yu-Wen Chen, Wei-Ju Lin, Yi Chen, and Lung-Pan Cheng. Pneuseries: 3d shape forming with modularized serial-connected inflatables. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, p. 431–440, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [11] Bjorn Sparrman, Schendy Kernizan, Jared Laucks, Skylar Tibbits, and Christophe Guberan. Liquid printed pneumatics. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [12] Yuki Akachi and Junichi Yamaoka. Airpolygon: Transparent, film-based and flexible 3d display with air-control. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.