

人間拡張型形状変化衣服型デバイスの設計と実装

謝 浩然^{1,a)} 松崎 広夢¹ 鳥居 拓馬¹

概要：本稿は、人間拡張分野において、装着者の体温調節機能を拡張するための形状変化衣服型デバイスの設計及び実装を行う。本研究では、装着者の生体情報に応じるアクチュエータを備えた開閉可能な構造を提案する。提案アクチュエータは、植物の気孔を生体模倣し、呼吸できる衣服型デバイスを目指している。提案デバイスは、開閉可能な穴構造体、温度・湿度センサ、サーボモータ及び駆動線から構成されている。衣服の温度と湿度が快適領域から外れた場合、提案システムは衣服の穴構造を適宜開閉することができる。提案システムの有効性を検証するために、提案デバイスを装着した場合と未装着の場合にて、ランニング状態での性能比較を実施した。実験結果として、提案の形状変化する衣服型デバイスは、日常生活における快適な着用感を維持するために有効であることが検証された。

キーワード：開閉式構造、人間拡張、形状変化、衣服内気候。

Shape-Changing Clothes for Human Augmentation

HAORAN XIE^{1,a)} HIROMU MATSUZAKI¹ TAKUMA TORII¹

Abstract: This paper explores shape-changing clothing to maintain the wearing comfort and augment user's thermoregulation. We propose a retractable structure with comfort sensitive actuator. The actuator is inspired by the breathing function of plant stomata opening to facilitate gas exchange. The proposed device is composed of retractable hole structures, temperature and humidity sensors, servomotors, and driving wires. When the values of clothing temperature and humidity reach outside the comfort zone, the proposed system can open or close the clothing hole structure accordingly. To verify the effectiveness of the proposed system, we compare the performance of a wearer in running condition with and without this system. It is verified that the proposed shape-changing clothing is valid for maintaining the wearing comfort in daily activities.

Keywords: Retractable structure, human augmentation, shape changing, cloth climate.

1. はじめに

近年では、生物としての人間の限界を超えるべく、人間の感覚や身体能力を科学技術を応用して拡張する人間拡張の研究が盛んに行われている。人間が本来もたない能力や事故等で失った能力を科学技術で補完することで、さまざまなバリアを乗り越えて、多くの人の生活の質向上が期待される。ユビキタスコンピューティングやヒューマンコンピュータインタラクション等の関連研究分野では、システムの入力と出力に同じ物理境界面を用いることで、ユーザ

に新たなインタラクション形式の提示を可能にする形状変化インタフェースの研究が注目されている [1]。中には、衣服の機能を拡張し、コンピュータとのインタラクションを可能にした形状変化服の研究も行われている [2], [3], [4]。人間拡張の研究では、ユーザの身体性を重視したユーザインタフェースの設計論が提唱されている [5]。衣服型デバイスを用いた人間の感覚能力の拡張・向上が期待されている [6]。

衣服は、もはや人間の体の一部ともいえるほどに、人間の体温調整に欠かせない役割を担っている。体温調整機能に関して、現状の衣服は体温調整に関して受動的であり、基本的には着用者（あるいは介護者）が自らの意思で衣服

¹ 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科
Asahidai 1-1, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

^{a)} Corresponding-author: xie@jaist.ac.jp

を脱着することで体温調整を行う。また、普通の衣服は着用者の身体状態を監視しておらず、その点でも衣服自ら着用者の体温調整に関与できない。高齢者・障害者が体温調整・体温監視に限界をもつことに一因をもつのであれば、従来より人間の体温調整能力を補完してきた衣服を拡張することで、人間の体温調整に関する限界を克服できる可能性がある。

既存の体温調整可能な衣服型デバイスは空調服と材料服に分類できる。空調服では、扇風器の回転等により衣服内部の空気を強制的に循環させることで衣服内温度を下げる。しかし、空気循環には十分な衣服内の空間が必要となり、結果的に衣服が膨張したりと意匠性との両立が難しいという課題がある。そのため、特定の業務用の衣服に活用される一方で、多様な衣服の役割を考えると汎用性は高くないと考えられる。材料服では、衣服の機能を追加する上でバイオ素材を使用する。例えば、ユニクロのエアリズムのマイクロファイバー、アメリカゴア社の GORE-TEX 防水透湿性素材、MIT メディアラボの納豆菌繊維 [4] が挙げられる。材料服は空調服より意匠性が優れる一方で、その素材の加工には高価な装置が必要になるなど一般のユーザが入手・加工しづらく、その点では汎用性が低いという課題がある。

そこで、本研究ではウェアラブルデバイスの意匠性、機能性や汎用性等の性能を総合的に考慮し、衣服自身が変形することで人の手を介さずとも着用者の体温を調整可能な人間拡張のための衣服型デバイスの研究開発を目的とする。こうした問題を解決する衣服の開発に際し、我々は植物の気孔に着目した。既存の生物の能力に着想を得て、その能力を科学技術で再現し人間の能力を拡張するアプローチは生物規範と呼ばれる [7], [8], [9]。植物の気孔は外部環境に応じて孔の大きさを調整して蒸散を行い、植物体内のバランスを保っている。植物の気孔は、気孔を開くことで光合成のために必要な二酸化炭素を取り込み、気温の上昇による水分蒸発を防ぐために気孔を閉じるといった機能を有する。これに倣い、本提案ではセンシングで得られた衣服内の湿度に応じて服に設けた穴の開閉を制御し、快適な温湿度環境の維持を目指す (図 1)。本提案の応用として、幼児や高齢者・障害者に効果的な体温調整服や、一般の人でも使える快適服としての利用が考えられる。

本研究では、植物の気孔に着想を得た孔部開閉機構とそれを制御するシステムを提案し、実際に提案システムを搭載した服の試作を行った [10]。本稿では、デバイスの有効性を調べるため、一般的な服を着用した場合と提案システムを搭載した服を着用した場合で被験者実験を行い、実験結果の考察を行う。衣服内の温湿度環境及び主観報告でえられた結果について報告する。

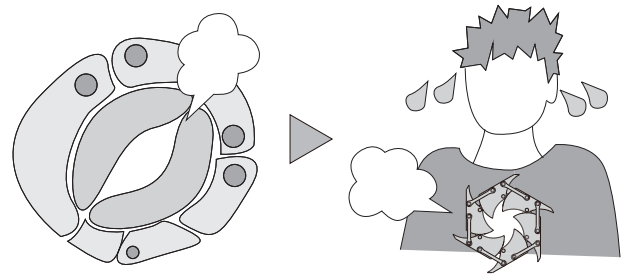


図 1 植物の気孔を模した衣服内気候調整服

Fig. 1 Thermoregulation Augmentation by the proposed shape-changing clothing (right) inspired by plant stomata (left).

2. 関連研究

人間拡張分野におけるこれまでの研究は、主に人間の身体機能と存在感の拡張に関して進められてきた。Chameleon-mask は実際の人間の代理として使用され、人間の存在感を拡張することでリモートコミュニケーションを可能にした [7]。Fusion は 2つのロボットアームをユーザに装着し、熟練者の技術や動きを初心者と共有することで、より早く・正確な技術の獲得を目指し開発された [8]。テイルデバイスはテーマパーク等での使用を念頭に、使用者の感情表現や携帯式の椅子としての機能を併せ持つ [9]。xLimb [11] はウェアラブルロボットアームを用いて、日常活動に支障が生じない伸縮可能な人間の第 3腕を開発し、改良版は自由度を高めることで安定な制御が得られる [12], [13]。他には、グローブ型デバイスを用いた動作の学習支援 [14] やウェアラブルプロジェクターによる視覚拡張 [15], [16] の研究があった。

ヒューマンコンピュータインタラクション分野では形状変化インターフェースに関する様々なプロトタイプやツールが開発されている [1], [17]。これらのインターフェースでは外部環境に応じてデバイスの形状を変えることができる [18]。Filum は、必要な繊維形状の変形を達成するために紐と縫製パターンを使用している [19]。Thermorph は、実行可能な 4D プリントへのアプローチとして折り畳みジオメトリを開発した [20]。また、形状変化のために形状記憶合金が利用されることが多い。Animated Paper は紙に形状記憶合金を貼り付けることで熱源に反応して動く玩具を設計可能とする。その他、形状記憶合金を用いた動く折り紙が提案されている [21]。たとえば、Printed Paper Actuator は 3D プリンタを用いて導電性樹脂インクを紙に印刷することで、通電で加熱させて紙の形状を変更することができる [22]。

可変服に関してはその可変機能を実現するにあたりいくつかのアクチュエータが提案されている。Awakened Apparel では空気圧式アクチュエータを用いた折り紙構造

の服を提案している [23]. Breathing Clothes では毛状インタフェースである HairlyTop Interface を用いて形状変化を可能とする服を提案している [24]. Enfold は同じく形状記憶合金を利用して衣服の開閉を実現した [3]. Biologic は着用者の汗や体温に反応する納豆菌を服の変形に利用している [4]. 最近では, ModiFiber はねじり巻きナイロン線を用い, ねじり方向と収縮方向の双方向で変形できる糸状アクチュエータである [2]. また, 形状記憶合金ワイヤを衣服内に埋め込むことでクラフトファブリックの形態を実現している [25]. これらの研究では形状記憶合金を利用することが多いが, 本研究ではサーボモータによる開閉機構の制御で変形する服を提案する. 従来の提案技術は素材の柔らかさの点で優れているが, 形状記憶合金は通電時に高熱が発生し安全面で懸念されるほか, 形状変化の閾値が高く瞬発的な形状変化を調整できない点で限定的と考えられる. 本研究は人間拡張の立場から人間の温度調節機能の拡張を目指す.

3. 提案デバイス

提案デバイスでは, 人間の体温調節機能を拡張すべく, 体内気候の自動調節を担う植物の気孔を模倣した, 衣服内気候の自動調節を目指す. 提案システムは衣服内気候を計測するセンサ群および衣類内外で空気の交換を促進・抑制する開閉可能な孔部からなる. 孔部の開閉はセンサと連動したモータ制御で行う. 提案デバイスは衣服内気候を「快適」に保つべく, 換気用の孔部を自動で開閉させる. この衣服内気候の自動調整により, 着用者が自らの体温異常に無自覚な場合でも, 提案システムが着用者の体温異常を検知して体温調整を補助できる. 本節ではその提案システムの設計を述べる. まず植物の気孔を模した孔部開閉機構の仕組みを記述し, 次に孔部の開閉を自動で切り替える衣服内気候の条件 (閾値) について述べる.

3.1 孔部開閉機構

提案システムの孔部開閉機構 (図 2) は 6 枚のプレート (羽) の他さまざまなパーツからなる. 孔部の開閉機構には Retractable Ring Structure の一種 Swivel Diaphragm [26] を採用した. Swivel Diaphragm では, 図 2 (左図) に示したように一枚のプレートの先端に外力が加わることで複数枚 (本研究では 6 枚) のプレート (羽) を相互に連結することができる. 孔部開閉機構を検証するため, 本稿で報告するプロトタイプ開発では, 1 枚のプレートの動きに対してプレート 6 枚全体が連動する仕組みを利用した. プロトタイプにて試作したプレートの寸法について, 底辺が 2.8cm, 高さが 5.0cm である. 図 2 左半分に, 1 枚のプレートを動かすことで, 開孔状態 (左上) から閉孔状態 (左下) へ遷移する様子を示した (手動ではなく実際には孔部の開閉はモータ制御で行う). 本研究では, Swivel Diaphragm

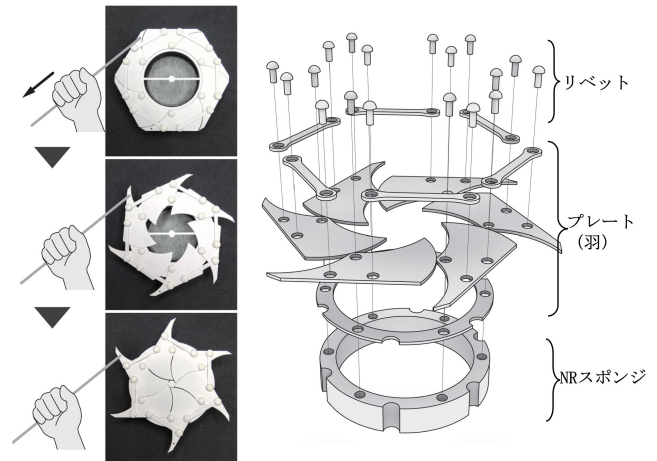


図 2 孔部開閉機構の構造 (右図) および開孔状態 (左上) から閉孔状態 (左下) へ遷移する様子 (左図)

Fig. 2 The constitution of the retractable hole structure (right) and transition from the opening state (top left) to the closed state (bottom left).

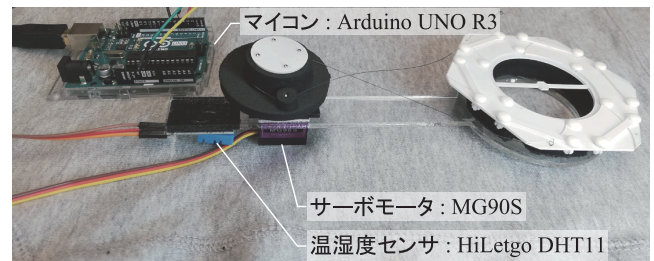


図 3 提案システムの構成

Fig. 3 The proposed clothing system.

の選択に先立ち, 建築分野の構造形態学 [27] における形状変化が可能となる他の構造も試作検討した. 具体的には, Hoberman Arch 構造 [28] や Iris 構造 [29] も試作検討を行ったが, 1 つのモータで複数の孔部が制御可能な Swivel Diaphragm を選択した. Swivel Diaphragm を基本単位とすることで, 複数の孔部開閉機構を連結した場合でもそれらの同時開閉を 1 つのモータで制御できる点で優れていると判断した.

3.2 提案システムの構成

図 3 に提案システムの構成を示す. 提案システムは, Swivel Diaphragm 型の孔部開閉機構のほか, 開閉の動力を担うサーボモータ (Servomotor), 開閉の制御を行うマイコン (Microcontroller), 外部環境の変化を測定するセンサ (Sensor), およびバッテリー (図外) から構成される. Swivel Diaphragm 型の孔部は厚さ 1mm のアクリル板とリベットで構成した (図 2 右半分の組み立て図). 孔部開閉機構とサーボモータは直径 0.2mm の超弾性ワイヤで繋がっており, 1 つのモータを順回転・逆回転させることでワイヤを巻き取り, 孔部の開閉を制御する.

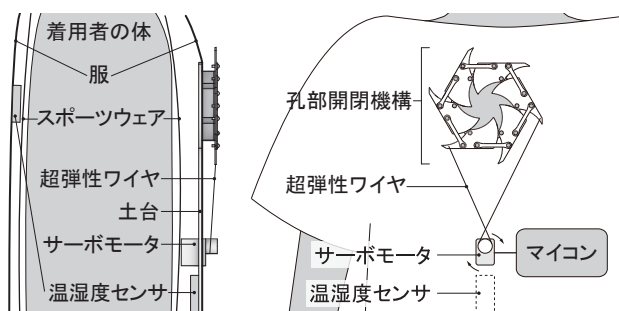


図 4 提案システムを装着したときの断面図(左)と正面図(右)
 Fig. 4 The proposed shape-changing clothing system in side view (left) and front view (right).

3.3 プロトタイプ開発

本研究では提案システムで衣服内気候の自動調整が可能かどうか、また開閉機構の動作が円滑に行えるかを検証するためにプロトタイプを作成した。プロトタイプ開発には、Arduino UNO R3 マイコン（マイコンチップ ATmega328P、動作電圧 5V）、MG90S サーボモータ（動作電圧 4.8～6.0V、トルク 1.8kgf・cm）、HiLetgo DHT11 温湿度センサ（動作電圧 3.4～5 V、湿度測定範囲 20～90%±5%RH、温度測定範囲 0～50 ± 2 °C）を利用した（図 3）。高出力サーボモータや高精度温湿度センサも選択可能であるが、本プロトタイプは提案デバイスの汎用性と経済性を考慮し、最低限のスペックを考慮して開発された。プロトタイプの着用時のイメージ像を図 4 に示す。プロトタイプ開発にて提案システムを搭載した提案服を図 5 に示す。プロトタイプの実装にあたり、孔部開閉機構のモータ周辺および衣服内気候のセンサ周辺を具体化する必要がある。以下では順にその詳細を述べる。

3.3.1 開閉機構の動作

本研究では提案システムの第一目標である衣服内気候の自動調整の効果検証に注力するため、プロトタイプではいくつかの箇所でも物理的・技術的な簡略化を行った。具体的には、孔部の開閉が円滑に行えるように孔部開閉機構とモータを土台で固定し、同一平面に位置するようにした。また、プロトタイプ開発に使用したサーボモータの動力で動作するようにリベットの大きさを調整した（ナイロンプッシュリベット、直径 2.5mm × 長さ 4.0mm）。リベットは大きいほど摩擦力が増えるので動作に大きな力を要し、小さいほど平面内の動作から逸脱し易くなる。この他、着用時の心地よさの向上やプレートの可動性向上のために、図 2（右図）に示したように NR スポンジ（内径：5.0cm 外径：7.3cm；厚み：1.0cm）を提案の衣服型デバイスの布とプレート間に取り付けた。孔部開閉機構の寸法について、完全開けた状態で正六角形（一辺の長さ：5.0cm；横幅：8.8cm）となり、完全閉じた状態の場合横幅が 11.6 となる（図 2 の左図）。機構の重量が 14g である。孔部開閉機構は関節部周辺など人体の自由度の高い場所は適さないため避



図 5 提案システムを搭載した提案服(右)および同じ形の通常服(左)

Fig. 5 The proposed clothing (right) and the normal clothing (left) for comparison.

けて配置する。本プロトタイプでは、人体の背中上方にあたる服の背面に配置した。

3.3.2 衣服内環境の計測

提案システムを搭載した衣服の目標は、衣服内気候を監視し、衣服内気候の悪化を検知したときには孔部を自動で開閉させて換気を促進・抑制して衣服内気候を調整する（望ましい状態に近づける）ことである。こうした衣服内気候の自動的な調整は、何らかのセンサの測定値とモータによる孔部開閉の連携が確立できれば、さまざまな異なるセンサ（たとえば体表面温度センサや発汗量センサなど）との連携も可能と考えられる。そこで一例として、本研究のプロトタイプでは一般のユーザや高度に専門的でない開発者でも比較的扱いやすい温湿度センサを用い、衣服内の温熱的快適性を高めること体温調節機能の拡張を目指した。衣服内環境を計測する温湿度センサは通常複数個をある程度自由な位置に取り付け可能である。本プロトタイプでは、人体の胸と背中下方も当たる服の位置に配置した（図 5）。

3.3.3 衣服内気候に基づく孔部開閉

衣服内気候に基づく孔部開閉の条件（閾値）に関して述べる。衣服内気候と温熱的快適性（主観的な体感温度）の関係を調べた既存研究 [30] では、衣服内気候と温熱的快適性の関係は温度や湿度等の複雑な非線形関数であると報告されている。本研究のプロトタイプでは、複雑な調整能力を実現することよりもむしろ、センサ測定値に基づく孔部開閉による衣服内気候の改善を確認することにある。そこで本研究では多変量の非線形関数に代わり、湿度のみ（一変量）に基づく孔部開閉で衣服内気候（湿度）を自動調整できるかを検証する。プロトタイプでは既存研究 [30] を参考に孔部の開閉条件を以下のように定め、着用者の背中付近の湿度を温湿度センサで測定した結果に基づき孔部を開閉させた。

- 衣服内湿度 70%以上を「不快」とみなし、70%以下から 70%以上に変化したときに孔部を開く。
- 衣服内湿度 60%以下を「快適」とみなし、60%以上か



図 6 孔部開閉機構を2つ取り付けた服の試作

Fig. 6 Shape-changing clothing with two retractable hole structures.

ら60%以下に変化したときに孔部を閉じる。

ただし、着用時点で湿度が60%-70%の場合は「快適」とみなし、孔部を閉じた状態に設定した。提案システムでは、孔部開閉機構をユーザが自分の好みや機能調節の最適化のために自由調整できる。本プロトタイプを用いた実験では、孔部開閉といった単純な仕組みで体温調整が可能かどうかを調査することを目指したため、開口サイズなどのパラメータや開口度合の詳細な制御などは詳しく追及していない。図6は孔部開閉機構を2つ取り付けた服の試作を示す。

4. 評価1：拡張服の特色のアンケート調査

4.1 調査内容

提案デバイスの特色を統合的に評価するため、空調服や材料服と比較するアンケート調査を行った。本調査では、提案システムを搭載した服（以下、提案服）に対して、比較対象としては、株式会社空調服*1のFAN FITシリーズ（以下、空調服）、MIT Media Labが開発した納豆菌を用いた材料服Biologic[4]（以下、材料服）を代表的な体温調整可能な衣服型デバイスとして用いた。FAN FITやBiologicは容易に制作できるものではないため、直接使用しての比較は難しい。加えてCOVID19感染症対策のため、本調査はオンラインでのアンケート形式で行った。以下の5個の評価軸に対して、5段階評価で回答させた（1：全くそう思わない～5：とてもそう思う）。

- 意匠性：この服のデザインは優れていると思うか。
- 機能性：この服は体温調節に役立つと思うか。
- 経済性：この服の制作コストは安いと思うか。
- 実現可能性：自力でこの服を制作できると思うか。
- 汎用性：この服は様々な服に応用できると思うか。

意匠性と機能性はプロダクトデザインでよく使われる評価軸である。本研究はインタラクション分野における人間拡張型デバイスの拡張機能を検証するため、さらに実現可能

1. 空調服*

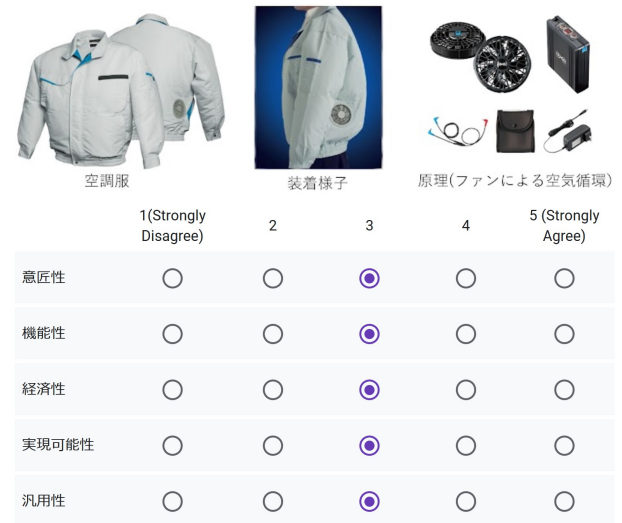


図 7 デバイスの特色に関するオンライン調査画面（空調服の場合）。

Fig. 7 Online questionnaire for benchmark evaluation.

性、経済性と汎用性の評価軸を加えた。図7は空調服に関する質問画面を示す。図示された服の特色に関する印象を被験者に評価させるため、デバイスの写真を掲載したほか、装着時の写真を掲載し、駆動原理を図解した。

4.2 調査結果

大学院生20名が本オンライン調査に参加した。評価結果を図8に示した。提案服は意匠性（平均3.40）と汎用性（平均3.15）に関して他の服よりも高い評価だった。これは、本研究で提案した形状変形デバイスはデザイン性に優れ、様々な既存の服に応用できると判断されたことを示唆する。その一方で、提案服は経済性と機能性に関して他の服よりも低い評価がかった。その理由としては、提案デバイスの制作に電子工作やレーザーカットを要する点で難易度が高いことが考えられる。また、空調服の扇風器駆動やハイテクのバイオ材料と比較したとき、提案服が直接的な空気循環を利用していない点で体温調整機能が低いと推測できたものと考えられる。各評価軸に関して、Wilcoxon順位和検定を実施したところ、意匠性に関して提案服は空調服よりも有意に高い（ $p < 0.05$ ）、機能性に関して提案服は空調服よりも有意に低い（ $p < 0.1$ ）が、他の評価軸では有意差はなかった。提案服と材料服の間ではどの評価軸でも有意差はなかった。

5. 評価2：提案服の衣服内気候の調整機能

機能評価実験では、提案システムが衣服内気候の自動調整を促進できるか、具体的には温湿度センサと孔部開閉機構を用いることが衣服内気候を望ましい状態（快適な状態）に近づける効率を改善できるかを調べる。本評価実験

*1 空調服：www.9229.co.jp/products/ff91810

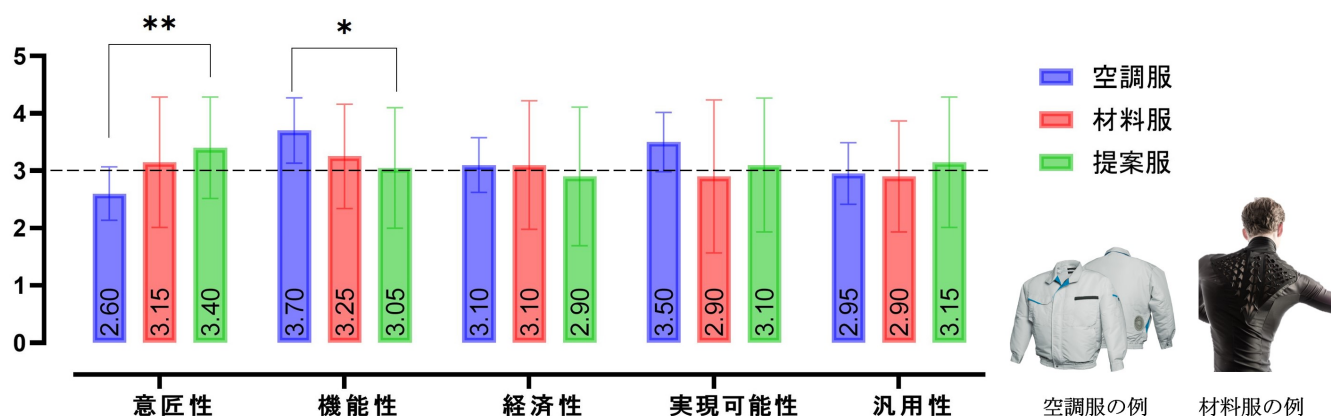


図 8 体温調整可能な衣服型デバイスの比較実験の結果。(右下は空調服と材料服の図示例。)

Fig. 8 Comparison results among three clothes devices. Right-bottom subfigures show the illustration examples of air-conditioned and material-specific types.

では、温湿度センサで測定可能な温度および湿度の時間変化を衣服内気候の客観的指標とし、被験者の体感する衣服内気候に関する主観報告を主観的指標として扱う。提案服の機能評価について、孔部開閉による衣服内温度の回復速度と、被験者の体感温度の主観報告を分析する。

5.1 実験内容

本研究では提案システムを搭載した衣服型デバイスを試作し、衣服内気候を自動調整できるかの機能評価を実験的に検証した。具体的には、温湿度センサを用いた衣服内湿度の自動調整が可能かを調べた。提案システムが快適な衣服内気候の維持にどの程度貢献しているのかを定量的に評価するため、提案システムを搭載していない普通の服（以下、普通服）と提案服の2種（図5）を用いた対照実験を行った。普通服と提案服には市販の同一の服を用い、提案服にのみプロトタイプを取り付けた。衣服内気候を操作的に悪化させるため、普通服あるいは提案服を着用した被験者をトレッドミル上で一定時間走らせた。本実験では、日常生活における提案デバイスの使用と想定しており、トレッドミルを用いたのはスポーツ場面を想定したものではなく、体温変化の刺激手段として使われた。実験時間中にわたり、普通服あるいは提案服の衣服内気候の調整能力を2通りの方法、すなわち実験中の衣服内の温度・湿度の変化速度（回復速度）および実験中の体感気候の主観報告を記録した。衣服内の温度・湿度の変化は着用者の胸部および背中付近の湿度を温湿度センサで測定した。主観報告では、形状可変インタフェースの材質評価に関する先行研究 [31] に基づき作成した聞き取り用紙を用い、実験中に複数回にわたり、被験者の衣服内気候に関する体感を「温冷感」、「湿潤感」、「快適感」、「べたつき感」、「蒸れ感」の5項目5~7段階で評価させた。

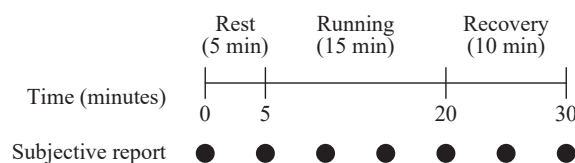


図 9 評価実験の流れおよび実験環境

Fig. 9 Evaluation procedures and experimental environment in our user study.

5.2 実験参加者

被験者は著者らの所属する大学の男子学生5名とした（年齢 23.0 ± 0 歳）。被験者の身長 172.9 ± 4.9 cm, 体重 60.9 ± 10 kg, BMI 20.3 ± 2.6 だった。身長と体重ともに日本人男性の平均を大きく外れておらず、BMI についてはやや痩せ型の被験者1名を除き他の4名が標準体型であった。被験者は実験前に研究内容に関する説明を受け、実験参加の意思を確認され、主体的に実験に参加した。

5.3 実験手順

被験者は、実験室（大学のトレーニングジム）に入室後、提案システムを搭載した服（普通の市販服、裏起毛パーカーLサイズ、ポリエステル素材）を着用した。その後の実験手順を図9に示す。最初の5分間（安静期）では、被験者は座位安静をとる。この間に温湿度を安定させる。次

に、被験者は時速 8 km/h のトレッドミル上で 15 分間走行した（走行期）。最後の 10 分間（回復期）では、被験者は再び座位安静をとった。実験中、衣服内温湿度を胸部と背中中の 2 箇所のセンサで 1 秒毎に記録したほか、室内の温湿度を 1 秒毎に測定した。主観報告は実験開始から終了までの 30 分間で 5 分毎に行い、1 回の実験につき計 7 回の聞き取りを行った（図 9 で●で示した時点）。個人差の影響を減らすため、各被験者は実験条件（提案服）と統制条件（普通服）の両方に 1 回ずつ参加した。順序効果を避けるため、実験条件と統制条件の順序はランダム化され、各被験者は異なる日に異なる条件の実験に参加した。

5.4 実験環境

評価実験に用いた提案服には、孔部開閉の動力であるサーボモータにマイクロサーボ MG90S、開閉の制御を行うマイコンに Arduino UNO R3、温湿度センサに HiLetgo DHT11 を用いた。実験は学内のトレーニングジムで行った。実験条件を揃えるにあたり、室内の温湿度環境を一定に保つ必要があるため、設定温度を 20°C とした室内の空調設備を用いた。これにより、実験中の実際の室温は $17.6 \pm 1.1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $46.9 \pm 2.8\%$ で概ね一定であった。また、トレッドミルは SportsArt 社製のものをを用いた。

5.5 実験結果

5.5.1 衣服内湿度に基づく孔部開閉制御

提案システムのプロトタイプでは湿度の測定値に基づき孔部の開閉を制御する。そこでまずは衣服内湿度の時間変化を調べる。図 10（上）に、全被験者 5 名それぞれに、提案服の背中付近で測定した衣服内湿度の時間変化を示す。同様に図 10（下）は普通服の背中付近の衣服内湿度を示す。普通服では全体的に 12 分時点付近で開孔条件に相当する湿度 70% に到達するが、他方、提案服では約 7~19 分まで開孔条件に到達する時点の被験者間のばらつきは大きい。また、普通服ではほぼ様な湿度上昇率で湿度 70% を横切る。それに対して、提案服では湿度 70% 付近での湿度上昇率は必ずしも一定ではない。被験者毎の個人差は大きいものの、提案服では、走行開始直後から衣服内湿度が急上昇したあと、衣服内湿度が 70% に到達した付近で一度上昇が止まり、その後しばらくして緩やかに上昇していく傾向がある。湿度 70% 付近での一時的な停滞は提案服の孔部開閉が正常に動作した結果と考えられる。

提案システムが衣服内気候の調整に寄与するならば、提案システムを搭載した服を着用した場合には、通常の服を着用した場合よりも短い時間で、異常化した衣服内気候を正常化できると考えられる。提案システムはヒーターやクーラーといった温湿度を操作する仕組みをもたないので、「正常化」とは単に異常化前の状態を自然回復することを意味する。図 10（上）の 20 分経過以降から読みとれる

ように、衣服内湿度は走行後から実験終了まで約 95% に留まりつづけ、孔部開閉に伴う衣服内湿度の回復はみられなかった。

提案システムが湿度の上昇を抑制する効果をどの程度持つのか定量的に評価するため、背中付近の衣服内湿度が 70% から 95% に達するまでの平均湿度変化率を、湿度が時間に対して線形増加すると仮定して直線の傾きを調べた。具体的には、最初に 70% を超えた時点から最初に 95% に達した時点までの時系列データに単回帰モデルを適用して直線の傾きを求めた。求めた直線の傾きは提案服で平均 0.12 と標準偏差 0.073、普通服で平均 0.09 と標準偏差 0.025 だった。提案服と普通服で t 検定を実施した。その結果、普通服と提案服の湿度上昇率に有意差がみられなかった ($p > 0.4$)。

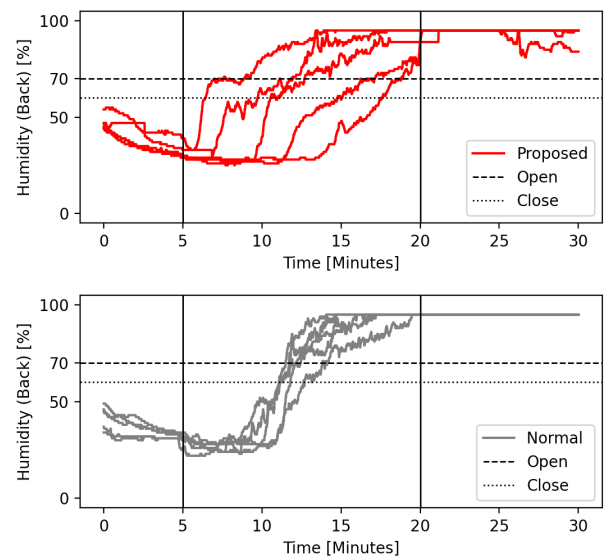


図 10 衣服内湿度（背中）の時間変化：（上）提案服；（下）普通服。
Fig. 10 Humidity change on the clothing back: proposed clothing (top) and normal clothing (bottom).

5.5.2 衣服内温度の回復速度

人間の体感温度は外気の湿度や温度などの複雑な非線形関数とされる [30]。具体的には、衣服材料の素材及び構造、装着者の着装状態、外部の環境条件などが影響するとされる。そのため、仮に湿度が一定であっても温度が下がることで体感温度が改善されることはありえる。そこで次節で衣服内気候に関する主観報告を調べるに先立ち、背中周辺のセンサで計測した衣服内温度の時間変化（被験者 5 名の平均および標準偏差）を図 11 に示す。空調設備で室温を調整したが、実験開始時点での衣服内温度を完全に統制するのは難しく、同一被験者でも条件毎に初期の衣服内気候が異なる。図 11 に示した被験者 5 名の平均でも、実験開始時点の衣服内温度が提案服と普通服で一致していない。そこでセンサーの計測値（絶対量）に加えて、開始時点や開孔時点の計測値からの変化量（相対量）を分けて分析する。

まず絶対量の平均に関しては、図 11 (上) から、提案服は普通服よりも全体的に低い衣服内温度を示す。衣服 2 種類と 7 時点を要因とする包括的な二元配置分散分析では、衣服の違いによる主効果 ($p < 0.01$) と時点の違いによる主効果 ($p < 0.01$) が有意だった。交互作用はみられた ($p < 0.05$)。各時点毎の t 検定では、衣服の違いによる有意差が、安静期の 5 分 ($p < 0.01$)、走行期の 10 分 ($p < 0.05$)、15 分と 20 分 ($p < 0.1$)、回復期の 25 分と 30 分時点 ($p < 0.05$) でみられた。保守的な態度の下で、多重比較のボンフェローニ補正 (仮説数 7) を考慮すると、5 分、25 分、30 分のみ有意差がみられた。

次に開始時点からの相対量の平均に関しては、図 11 (下) から、温度の上昇傾向は、安静期と走行期では普通服と提案服で違いがないが、回復期では提案服のほうが低い相対温度を示す。衣服 2 種類と 7 時点を要因とする包括的な二元配置分散分析では、衣服の違いによる主効果 ($p < 0.1$) と時点の違いによる主効果 ($p < 0.01$) が有意だった。交互作用はなかった。各時点毎の t 検定では、衣服の違いによる有意差が、回復期の 25 分と 30 分時点 ($p < 0.1$) のみみられた。保守的な態度の下で、多重比較のボンフェローニ補正 (仮説数 7) を考慮するとどの時点でも有意差はみられなかった。

最後に開孔時点からの相対量の平均に関しては、絶対量と同じく開孔時の温度が開孔時点でそもそも提案服の方が低く、開始時点の相対量と同じく温度の上昇傾向は提案服の方が低くゆえに最終的に到達する衣服内温度も提案服の方が低い。両衣服で被験者 5 人分のデータが有効なのは -5 分、開孔 0 分、5 分、10 分の 4 時点だった。衣服 2 種類と 4 時点を要因とする包括的な二元配置分散分析では、衣服の違いによる主効果 ($p < 0.01$) と時点の違いによる主効果 ($p < 0.05$) が有意だった。交互作用はなかった。各時点毎の t 検定では、衣服の違いによる有意差が、-5 分、0 分、10 分時点 ($p < 0.05$) でみられた。保守的な態度の下で、多重比較のボンフェローニ補正 (仮説数 4) を考慮すると有意な時点はなかった。

以上の結果は温度の時系列データなので単純には解釈できないが、どの分析結果でも衣服の違いによる主効果はあり、また開始時点から相対化しても提案服の衣服内温度は普通服のそれよりも低いことから、孔部開閉機構を取り付けた背中付近において、提案システムが衣服内温度の上昇を抑制できる可能性を少なからず示唆する。

5.5.3 衣服内気候に対する主観報告の変化

主観報告に関して、実験中に複数回にわたり、被験者の衣服内気候に関する体感を「温冷感」、「湿潤感」、「快適感」、「べたつき感」、「蒸れ感」の 5 項目 5~7 段階で評価させた。一例として「快適感」の時間変化を図 12 に示す。他の質問項目でも同様だが、普通服と提案服で大きな違いはみられなかった。服 2 種類と 7 時点を要因とする包括的

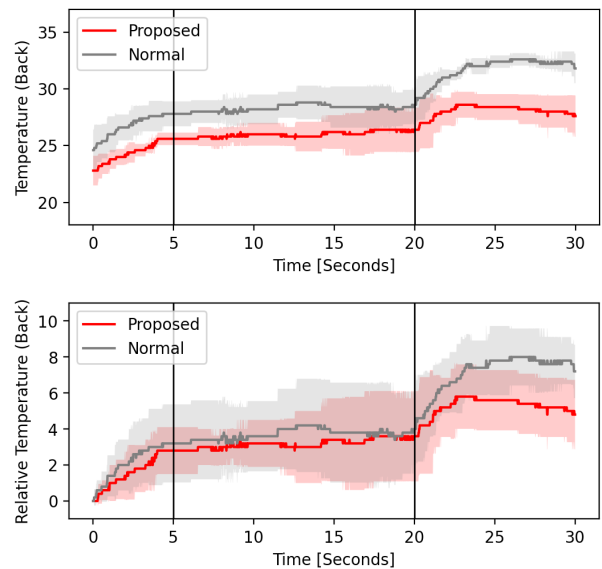


図 11 衣服内温度 (背中) の時間変化 : (上) 絶対量の平均 ; (下) 相対量の平均。

Fig. 11 Effectiveness of the proposed clothing system for the temperature change at the back position: absolute mean (top) and relative mean values (bottom).

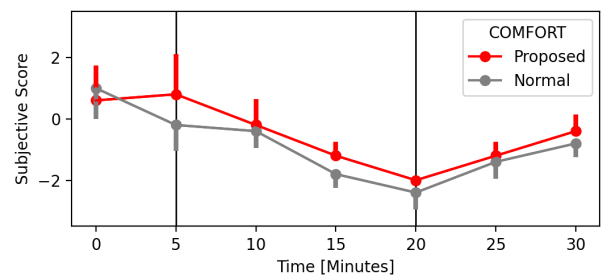


図 12 主観的快適感の時間変化

Fig. 12 Value change of user comfort in subjective evaluation.

な二元配置分散分析では、すべての質問項目で時点の違いによる主効果は有意だった ($p < 0.01$) が、衣服の違いによる主効果はなかった。このことから、衣服内気候に関する主観的な評価としては普通服と比べて提案服が改善できたとはいえない。前節 (図 11) の回復期での物理的な相対温度には違いがみられたが、その違いは被験者の主観的な評価を改善するほどではなかったことを示唆する。物理的な特性と心理的な評価の違いのほか、被験者が評価する衣服内全体に比べて提案服の孔部が小さいことなどが、こうした結果をもたらした要因と考えられる。

6. 考察と今後の課題

6.1 意匠性と機能性のトレードオフ

体温調整を行う服型のデバイスには空気循環を能動的に行うか受動的に行うかで 2 種類がありえる。空調服は扇風器の回転により能動的に衣服内の空気を循環させることで機能性を高めている。しかし、空気循環には十分な衣服内

空間が必要となるので、衣服のもつ別の側面であるファッション面と両立が難しい。本研究で行った拡張服の特色に関するアンケート調査から、提案服と材料服は受動的な空気循環を利用するので、一定の機能があるうえ、デザイン面でも優れるという評価を受けた。提案服は意匠性と機能性のトレードオフを考慮した結果であり、特に人間中心デザインを重んじる。本研究では、人間の身体能力を拡張し装着者にとって使いたい体温調整服の設計と実装を目指した。

6.2 通気性向上の効果

本研究の評価実験から、提案システムを搭載した服（提案服）が衣服内気候の自動調整に関して一定の効果を有することが検証できたと考えられる。提案服は服表面の孔部の開閉を行う単純な仕組みであるが、それが衣服内気候の調整を促進できたのは「通気性向上」と「ふいご（鞆）作用」（ふいごとは燃焼を高めるときに使う送風ポンプをいう）が関係すると著者らは考えている。衣服には本来両手、首、胴などを通す複数の孔がある。したがって、服を揺れ動かすことで一定の換気効果がある。提案服では衣服内気候が悪化すると自動的に背中の中孔が開孔するが、背中は普通の衣服ではもっとも通気性の悪いと考えられる場所であり、提案服がその場所に新しい自動開閉式の通気孔を追加したものとみれる。こうした新しい通気口を利用するように、衣服の布地が「ふいご」の袋の役割を果たし、被験者の運動に合わせた衣服の運動が「ふいご作用」を作り出すことで、外気の流入・流出を促進したと考えられる。このように、「通気性向上」と「ふいご作用」の相乗効果で、提案服では衣服内気候を改善できたと考えられる。実際、本研究の評価実験では、走行運動中からすでに孔部が開孔することで衣服内温度の早期回復がみられたが、これは「通気性向上」と「ふいご作用」が発生したためと考えられる。本評価実験の結果とくに「ふいご作用」の影響を正確に見定めるとともに、もしそれが有効であれば「ふいご作用」の影響を最大限に活用する孔部配置が今後の課題のひとつである。

6.3 今後の課題

今後の研究課題として、より暑い炎天下での環境やオフィスでの過度の冷却環境など、提案したシステムの使用が考えられる環境での評価実験を行う必要がある。本研究は生物規範の視点より植物の気孔に着目し開閉機構を提案したが、今後は気孔の性能を分析し、より適切な気孔部の設計および配置を深く探究する必要があると考えている。また、プロトタイプの駆動部ではサーボモータ及びワイヤで実装したが、今後は安全性を考慮するためソフトアクチュエータの使用が検討できる [32], [33]。本研究の提案服のプロトタイプ開発では、温湿度センサは衣服の内部に配置し

たが、今後は環境の温湿度を測るため外部にも配置すべきと考えている。通気性向上とふいご作用に関する定量的な評価を実施することも考えられる [34]。

7. おわりに

本研究では、人間の体温調節機能を拡張するものであり、気孔部により自動的に着用者の体温調節機能の拡張を行う形状変化服を提案した。提案システムは孔部開閉機構、サーボモータ、温湿度センサとマイコンから構成される。提案システムでは、温湿度センサにより温湿度を測定し、サーボモータによりワイヤを巻き取ることで孔部開閉機構の制御を行う。拡張服の特色のオンライン調査によれば、提案服は空調服より優れた意匠性がある。また、提案服は材料服と同レベルの性能を有するが、より高い汎用性と実現可能性があるとの評価を受けた。機能評価の実験には、提案システムを搭載した提案服と通常服との温度湿度調節機能に関して比較実験を行った。その結果として、提案服は通常服と比較して客観的評価と主観的評価の両面において人間の体温調節機能を少なからず改善できる可能性が示唆された。

利益相反

本原稿に関わる開示すべき利益相反関連事項はない。

参考文献

- [1] Majken K. Rasmussen, Esben W. Pedersen, Marianne G. Petersen, and Kasper Hornbundeinedk. Shape-changing interfaces: A review of the design space and open research questions. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, p. 735–744, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [2] Jack Forman, Taylor Tabb, Youngwook Do, Meng-Han Yeh, Adrian Galvin, and Lining Yao. Modifiber: Two-way morphing soft thread actuators for tangible interaction. In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [3] Jason Lin, Jasmine Zhou, and Helen Koo. Enfold: Clothing for people with cerebral palsy. In Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, UbiComp/ISWC'15 Adjunct, p. 563–566, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [4] Lining Yao, Jifei Ou, Chin-Yi Cheng, Helene Steiner, Wen Wang, Guanyun Wang, and Hiroshi Ishii. Biologic: Natto cells as nanoactuators for shape changing interfaces. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, p. 1–10, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [5] 木村朝子, 松室美紀, 田村秀行, 大槻麻衣ほか. マグル・フレンドリー・インタフェース設計論: 身体性を重視した

- 人間拡張型 ui 設計法の提唱と考察. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2018, No. 9, pp. 1–8, 2018.
- [6] Roope Raisamo, Ismo Rakkolainen, Päivi Majaranta, Katri Salminen, Jussi Rantala, and Ahmed Farooq. Human augmentation: Past, present and future. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 131, pp. 131–143, 2019. 50 years of the International Journal of Human-Computer Studies. Reflections on the past, present and future of human-centred technologies.
- [7] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Chameleonmask: Embodied physical and social telepresence using human surrogates. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '15*, p. 401–411, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [8] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Reo Matsumura, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Fusion: Full body surrogacy for collaborative communication. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, SIGGRAPH '18*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [9] Haoran Xie, Kento Mitsushashi, and Takuma Torii. Augmenting human with a tail. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019, AH2019*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [10] Haoran Xie, Hiromu Matsuzaki, and Takuma Torii. Xclothes: Augmenting human thermoregulation using shape changing clothes. In *Proceedings of the 11th Augmented Human International Conference, AH '20*, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [11] Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Takuma Torii, and Haoran Xie. Xlimb: Wearable robot arm with storable and extendable mechanisms. In *12th Augmented Human International Conference, AH2021*, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [12] Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Toby Chong, Tsukasa Fukusato, Takuma Torii, and Haoran Xie. Auglimb: Compact robotic limb for human augmentation. *CoRR*, Vol. abs/2109.00133, , 2021.
- [13] Haoran Xie, Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Toby Chong, Takuma Torii, and Tsukasa Fukusato. Augmenting human with compact supernumerary robotic limbs. In *13th Augmented Human International Conference, AH2022*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [14] M. Kusunoki, S. Yoshida, and H. Xie. Magglove: A haptic glove with movable magnetic force for manipulation learning. In *2022 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pp. 155–158, Los Alamitos, CA, USA, sep 2022. IEEE Computer Society.
- [15] Yuya Adachi, Haoran Xie, Takuma Torii, Haopeng Zhang, and Ryo Sagisaka. Egospace: Augmenting ego-centric space by wearable projector. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference, AHs '20*, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [16] Shogo Yoshida, Haoran Xie, and Kazunori Miyata. A wearable augmented reality system with anamorphosis projection. In Masayuki Nakajima, Jae-Gon Kim, Wen-Nung Lie, and Qian Kemao, editors, *International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2021*, Vol. 11766, p. 117662K. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2021.
- [17] Marcelo Coelho and Jamie Zigelbaum. Shape-changing interfaces. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 15, No. 2, p. 161–173, February 2011.
- [18] Isabel P. S. Qamar, Rainer Groh, David Holman, and Anne Roudaut. Hci meets material science: A literature review of morphing materials for the design of shape-changing interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [19] Tomomi Kono and Keita Watanabe. Filum: A sewing technique to alter textile shapes. In *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17*, p. 39–41, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [20] Byoungkwon An, Ye Tao, Jianzhe Gu, Tingyu Cheng, Xiang “Anthony” Chen, Xiaoxiao Zhang, Wei Zhao, Youngwook Do, Shigeo Takahashi, Hsiang-Yun Wu, et al. 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*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [21] Jie Qi and Leah Buechley. Animating paper using shape memory alloys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, p. 749–752, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [22] Guanyun Wang, Tingyu Cheng, Youngwook Do, Humphrey Yang, Ye Tao, Jianzhe Gu, Byoungkwon An, and Lining Yao. Printed paper actuator: A low-cost reversible actuation and sensing method for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [23] 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.
- [24] Masaru Ohkubo, Miki Yamamura, Hiroko Uchiyama, and Takuya Nojima. Breathing clothes: Artworks using the hairytop interface. In *Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '14*, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [25] Sara Nabil, Jan Kučera, Nikolett Karastathi, David S. Kirk, and Peter Wright. Seamless seams: Crafting techniques for embedding fabrics with interactive actuation. In *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference, DIS '19*, p. 987–999, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [26] Carolina Rodriguez. Morphological principles of current kinetic architectural structures. In *Adaptive Architecture*, pp. 1–12. The Building Centre, 2011.
- [27] René Motro. *An anthology of structural morphology*. World scientific, 2009.
- [28] Hoberman Associates Inc. Olympic arch. <https://www.hoberman.com/portfolio/olympic-arch/> (参照 2022-02-22).
- [29] Iris Calculator Mechanical Iris Diaphragms. Paper mechanical iris. <https://iris-calculator.com/paper-mechanical-iris/> (参照 2022-02-22).

- [30] 原田隆司, 土田和義, 丸山淳子. 衣服内気候と衣服材料. 繊維機械学会誌, Vol. 35, No. 8, pp. P350–P357, 1982.
- [31] 薩本弥生, 池田文美, 櫻井大樹. Ventilation efficiency of a sports parka. 人間-生活環境系シンポジウム報告集 = Proceedings of Symposium on Human-Environment System, Vol. 42, pp. 123–126, dec 2018.
- [32] Qiukai Qi, Shogo Yoshida, Genki Kakihana, Takuma Torii, Van Anh Ho, and Haoran Xie. Bpactuators: Lightweight and low-cost soft actuators by balloons and plastics. In Proceedings of IEEE 4th International Conference on Soft Robotics, RoboSoft '21, pp. 559–562, Haven, CT, USA, 2021. IEEE.
- [33] Haoran Xie, Zeyu Ding, Shogo Yoshida, Toby Chong, Takuma Torii, and Tsukasa Fukusato. Augmenting human with compact supernumerary robotic limbs. In 13th Augmented Human International Conference, AH2022, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [34] 薩本弥生. 着衣の bellows action (ふいご作用) の着衣の放熱性能への効果. デザントスポーツ科学, No. 20, pp. 66–77, 1999.