

研究終了報告書

「三次元的変形と力伝達を両立可能な着衣型能動デバイス」

研究期間：2018年10月～2022年3月

研究者：舟洞 佑記

1. 研究のねらい

本研究提案では、三次元的に変形、かつ、力伝達可能な特徴を有する柔軟な布型デバイスの開発、制御系構築に取り組む。加えて、布型デバイスを用いて上半身着用衣型デバイスを開発、上半身動作の教示実験を実施し、動作知識情報の伝達効果を確認する。衣服自体の伸縮で多面的に力を伝達して動作教示する着衣型デバイス実現に向けた基礎検討を通し、これまで伝達・共有が困難であった身体動作情報を利活用できる社会の形成に繋げる。

日常生活内で、効果的な運動への誘導等による運動促進、正しいリハビリ動作への誘導等によるリハビリ促進が実施できれば、高齢者の健康寿命の長寿化・要介護者の自立支援が促され、健康長寿社会の実現に繋がる。現在の装着型アシストロボットは、「病院等の限定した場所での利用」「限定した関節の限定した動作アシスト」を対象に研究開発されており、日常生活での継続的な装着・ユーザの自由な動作アシストは想定していない。これまでに、自身の伸縮により三次元的に変形(人体背面と同様な三次元形状変形)可能なデバイスの基本構成の明確化、及び、布型デバイスの三次元変形の制御を達成した(ACT-I 研究)。衣服のように着用して、着用部の動作が誘導できる可能性を示した一方で、布型デバイスが外部へ伝達する力の制御には至らなかった。ACT-I 研究を通して、布型デバイスの変形と伝達力が制御できれば、日常的な動作支援のみならず、分野を超えた実用的な応用に繋がる可能性も見えたため、本研究提案にて、三次元変形と伝達力制御を両立する柔軟な布型デバイスの開発に取り組む、高い自由度での変形に加え、高い自由度で着用者に力を伝達できる布型デバイスへと改良する。加えて、身体動作知識の伝達・共有用のデバイスとしての可能性を検証するために、上半身着衣型デバイスを開発、伝達が難しい動作知識(舞踊や武道の動作を想定)の直接的な教示システムを構築、教示効果の検証実験を行う。布型デバイスで身体動作知識が伝達可能になれば、動作を伴う伝統文化・スポーツ・熟練技能伝承等の方法論を一新する可能性、また、時間的・空間的な壁を越えて身体感覚を共有できる可能性に繋がり、身体動作情報の新たな価値創造に繋がると考える。

2. 研究成果

(1) 概要

布型デバイスの変形と外部に伝達可能な力の大きさ・方向(伝達力)の制御を目指し、布型デバイスシミュレータの構築、多様な布型デバイスの開発と特性計測、上半身着用衣型デバイスの開発と動作知識の伝達を目指して研究を推進した。

布型デバイスシミュレータの構築では、実時間で物理演算が終わる一方で現実と乖離した挙動となる PBD(位置ベース物理法)シミュレータを基に、基材と人工筋間の相互作用を学習・補償することで、実世界の挙動に則した実時間シミュレータを提案した。学習した人工筋配置の構成のみならず、未学習の構成に対しても補償器による補償効果が確認できた。デバイス

設計に用いるには至らなかったが、今後、基材の布パラメータや人工筋配置の探索系を組み込み、シミュレータによる挙動予測、探索に基づくデバイス試作と挙動の計測、補償器の追加学習による精度向上が見込め、デバイス設計法の確立に繋がる技術となった。

布型デバイスの可能性を探求するために、多様な基材(ベルクロ布、圧力布、ジャージ素材等)を布型デバイス化した。研究開始当初は、平ゴムを編んだ自作の基材に細径人工筋を人手で編み込んでデバイスを製作していたが、基材製作・人工筋配置の手間、人手作業に伴ったデバイスの個体差が生じていた。研究推進中、刺繍技術を活用することで布型デバイスを機械的に製作できる可能性に気付き、刺繍機メーカーに相談、試作依頼と基礎実験を通し、刺繍による布型デバイス製作技術を開発した。これにより、様々な織布や機能性織布(ベルクロ布、圧力布等)の機能を維持したまま、画一的な特性を持つ布型デバイスが工業的に製作できるようになった。加えて、人工筋配向の高自由度化と人工筋の高密度化が可能になった。

上半身着用衣型デバイスの開発と動作伝達の基礎実験に取り組み、衣服の伸縮によって着用者の動作を誘導・制御できる可能性を見出した。これまでの装着者の関節を外力で動かして誘導するメカニズムとは異なる動作誘導の可能性を示した。被験者実験を通じて、上半身用デバイスによって提供した体幹部の前屈・後屈・右回旋・左回旋の4つの動作を着用者が正しく識別できることを示した。一連の実験により、これまで伝達が困難であったヒトの動作を、着衣型デバイスにより直接誘導できる可能性を示した。

(2) 詳細

研究テーマ A「三次元変形と力伝達を両立するデバイス・制御系開発」

実応用性の高い布型デバイスの実現を目指して設定した3つの研究項目「実機との誤差を学習する布型デバイスシミュレータの構築」「変形・伝達力制御が両立可能な布型デバイスの開発」「布型デバイス用変形・伝達力制御システムの構築」に取り組んだ。

「実機との誤差を学習する布型デバイスシミュレータの構築」は、所望の挙動を実現可能なデバイス構成を明らかにしてデバイス設計に役立てるために、基材特性・人工筋配向・保持部形成等のパラメータを変えた際でも、実機に即した挙動を再現できるシミュレータの構築を目指した。シミュレータを用いてデバイス構成を探索することを前提とするため、演算時間の短いPBD(位置ベース物理法)を基にシミュレータを構築した。PBDシミュレータでは、シミュレータ内のパラメータをチューニングしても、布型デバイスの挙動とは乖離した挙動となる。挙動の差異は、基材内部の相互作用、及び、基材と人工筋間の相互作用が正しく模擬できていないと考え、実デバイスの挙動を時系

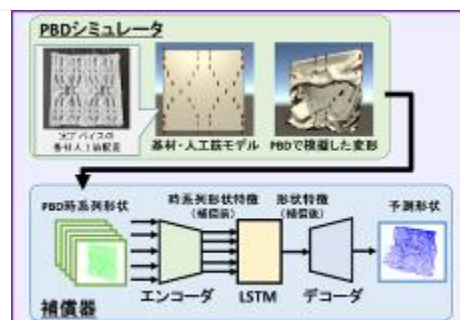


図1. 実挙動との誤差を学習して補償する布型デバイス実時間シミュレータの構成

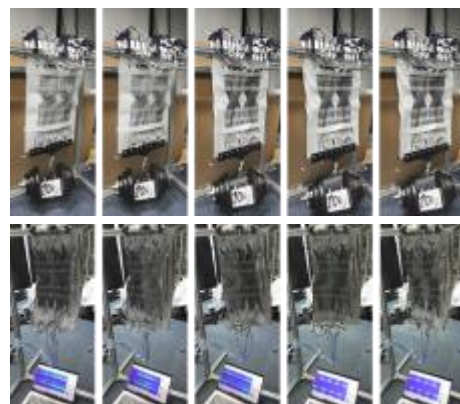


図2. 能動化したベルクロ布(上段)と圧力布の挙動(下段、PC画面が圧力分布)

列点群データとして計測、実機とシミュレータの挙動の差異を学習・補償するシステムを提案した(図 1)。デバイス設計に用いるには至らなかったが、今後のデバイス設計法の確立に繋がる技術となった。

「変形・伝達力制御が両立可能な布型デバイスの開発」では、工業的・画一的に製作可能な製作技術を確立、多様な基材を能動化できることを示した。布型デバイスにおいて多様な基材を能動化するには、基材を問わずに保持部を形成

できることが重要になる。刺繍機メーカーと連携して刺繍による保持部形成の可能性、条件を明らかにした。刺繍技術を活用することで、①保持部形成の自由度(配向・密度等)の向上、②機能性織布を含む多様な基材(綿布、ペルクロ布、圧力布等)の能動化、③高密度な人工筋の配向による発揮力の向上、に成功した(図 2 参照、業績 5-(1)-2.5-(1)-3)。

「布型デバイス用変形・伝達力制御システムの構築」では、①制御系のハードウェアの改良、②コンプレッサレス制御系の検討・試作、③時系列点群に基づく制御法の構築、に取り組んだ。期間中、改良・試作を進めつつ、合計 120 チャンネル分の制御器を構築した(図 3)。③に関し、幾つかの制御手法を提案した(業績 5-(1)-1, 5-(3)-2, 5-(3)-3)。



図3. 二次圧計測可能 64ch 制御器
(同サイズ内に 96ch 分収納可)



図4. 人体サイズの試作 1号・2号



図5. 刺繍を用いた人体サイズの試作 3号

研究テーマ B「上半身用デバイス開発と上半身動作の直接的な伝達」

動作知識の伝達可能性を検証するために設定した2つの研究項目「上半身用デバイスの開発」「上半身動作教示システムの構築と検証実験」に取り組んだ。

「上半身用デバイスの開発」では、幼児サイズの人形での基礎検討、1/2 スケールの人体骨格での肩外転の検証、人体サイズの試作 1号(人工筋数 14 本、右肩:外転・水平内外転、右肘:屈曲、体幹:回旋)、試作 2号(人工筋数 28 本、左右肩:外転・水平内外転、左右肘:屈伸展、体幹:回旋)、試作 3号(人工筋数 80 本、左右肩:外転・水平内外転、左右肘:屈伸展、体幹:回旋)を開発してきた(図 4, 5)。当初、シミュレータをベースに各部位の人工筋配置を最適化、部位に適した布型デバイス構成を明らかにする予定であったが、シミュレータの構築に時間を要したため、本研究期間内においては試行錯誤的に各部位の運動を誘発するデバイス構成を求めた。同一部位において、収縮する人工筋の組合せを変えることで、着用者への力の大きさや方向を調整可能な上半身用デバイスが開発できた(図 5)。

「上半身動作教示システムの構築と検証実験」では、図 3 の制御系と図 5 の上半身用デバイスを用いて、実験実施者を対象に基礎実験を実施した。事前に訓練することで、着用者は上半身用デバイスからの動きの刺激を知覚、デバイスの状態に合わせて自ら運動することに

よる動作誘導効果が見られた。これは、これまでの装着型ロボット・スーツにおける、「着用者とロボット間の関節角を同期させるように制御することで着用者の動作を誘導・操作するアプローチ」とは異なる形態での動作誘導の可能性を示唆する。即ち、上半身用デバイスの変形が着用者に違和感(窮屈感・突っ張る感)を提示、着用者は衣服から感じる違和感を解消するように自ら姿勢を変化、結果として着用者の動作がデバイスにより誘導されたと考えられる(図 6)。被験者実験により、個人や動作による差異はあるものの、複合的な動作の誘導効果が確認された。

付随して、体幹部の前後屈・左右回旋に特化した上半身用デバイスを試作(図 7)、基本的な刺激の分離実験と、ヒト機械システムにおける運動感覚フィードバックへの適用可能性を検証した(さきがけ「インタラクション領域」青山忠義先生(名古屋大学)と共同で実施)。被験者実験を通して、3 分程度の事前訓練のみで、体幹部への 4 種の刺激を着用者は正しく識別できることを確認した(図 8)。

JST の SciFoS 活動に参画する中で、VR コンテンツ制作企業にインタビューし、VR コンテンツ制作の妨げになっているのが触感覚であることを認識した。基本構成の布型デバイスを前腕部に巻き付けて想起される触感覚を試験的に調査したところ、既存の振動や圧迫では提示が難しい感覚が想起できる可能性が見えた(図 9、業績 5-(3)-5)。



図6. 試作した上半身用着衣型デバイスによる動作誘導効果の基礎的確認



図7. 体幹部4動作提示用デバイス

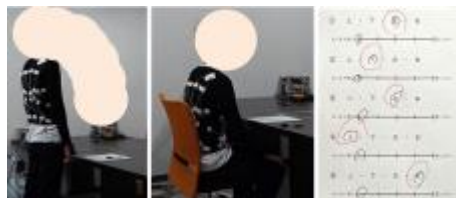


図8. 体幹部動作識別実験(立位・座位)



図9. 人体前腕部に想起した触感覚

3. 今後の展開

さきがけ研究で得られた知見を基に、「創発的研究支援事業」に取り組み、布型デバイスを応用可能な確固たる技術シーズとして確立するため、布型デバイス設計法の確立とデバイス特性の体系化を目指す。加えて、布型デバイスが拓く分野横断的研究の先駆けとして、衣服のように着用可能な全身用着衣型能動デバイスによるヒト動作の制御、及び、ヒト触感覚の制御に挑む。ヒト動作の制御では、これまで知識として持ちながらも、他者へ伝えることが困難であった動作知識を、直接他者へ伝達・伝送できる革新的なデバイスの実現を目指し、衣服の大域的な伸縮による着用者動作の制御法を開発し、ヒト動作を時空間を超えて共有できる社会への変容を促す。ヒト触感覚の制御では、既存の部分的な触覚提示に留まらず、体表全体に多様な触感覚を提示する基盤技術を確立し、全身没入感の実現、現実の触覚を拡張した触感覚提示、ヒトの適応を促す触感覚フィードバック系としての活用可能性

を示す。人体に無数に存在しつつも、これまで十全に活用されてこなかった体表全体に渡る感覚器を最大限に活用することで、ヒト自体の適応能力をも発現・拡張させ、ヒトと機械システムが高度に融合した社会への変容を促す。

布型デバイス特性の体系化と設計法の確立では、設計自由度が高い一方で実用的な設計論が確立できていない布型デバイスを産業応用可能なアクチュエータ技術として昇華する。新たなアクチュエータ分野の開拓には、まず用途志向での大まかな特性把握が重要と考える。布型デバイス実時間シミュレータを活用したデバイス設計、実デバイスの製作と特性計測、計測データを反映したシミュレータの更新、を繰り返すことで、基材・人工筋の組合せが爆発する布型デバイス特性を効率的に体系化していく。まずは3年間で、ヒト動作制御とヒト触感覚制御に適した構成を明確にする。

布型デバイスの持つ潜在的な応用可能性を具現化するために、布型デバイスを用いた全身着用衣型デバイスを開発し、ヒト動作の制御、及び、ヒト触感覚の制御に挑む。前者では、さきがけ研究でも取り扱った「伝達が難しい動作知識(舞踊・武道・スポーツ等)」を直接他者へ教示するデバイス応用を見据え、着用者動作の制御法を開発、ヒト動作制御の検証実験を行う。さきがけ研究期間中に十分に検討できなかった着衣型デバイス制御法に取り組み、動作誘導を活用した動作知識の効率的な伝達手法の確立を目指す。後者では、ヒトの全身に多様な触感覚を提示する触覚提示デバイス応用を見据え、布型デバイスの三次元的変形が及ぼす触感覚を明らかにする。多様な変形を実現可能な布型デバイスの特性と衣服のように着用可能な全身着用衣型デバイスの特性を踏まえ、これまでヒトが感じ得なかった体表の触感覚の想起・制御、及び、全身の触感覚を連動させた新感覚の創出にも挑む。3年で基礎的な検討を終え、その後4年で、具体的な応用を目指す。「ヒト動作制御」の応用先としてリハビリ応用(側弯症矯正スーツ・リハビリ体操スーツ)を、「ヒト触感覚制御」の応用先としてVR応用を開拓する予定である。

企業との共同研究や他研究者との連携研究を並行して実施することで、可能な限り早い時期(2025年頃を目標)から本研究成果を社会に還元することを目指す。

4. 自己評価

研究目的に対し、布型デバイス設計にまで至らなかった点や、上半身用デバイスを用いた動作伝達実験がまだ途中である点等、当初設定した達成目的に対して至らなかった点はあるものの、デバイス設計に寄与できるシミュレータの形態が示せた点、上半身用デバイスが具体化できた点、また、それにより、これまでとは異なるアプローチで着用者の動作が誘導できる可能性を示せた点は、新たな技術シーズとなる成果と考える。一方、特許化を見据えた結果、学会発表・論文投稿への動きが遅くなり、学術的な貢献が少なかった点は反省すべきである。実際に未発表の成果があるため、今後順次発表、論文化していく。一方、本研究提案は社会への還元が重要な課題であると捉え、JSTの活動(SciFoS、サイエンスインパクトラボ)やアウトリーチ活動に積極的に参画、社会との連携可能性を模索してきた。結果として、企業との特許の共同出願、共同研究体制を築け、開発した技術を社会に還元できる体制を整えた点は評価できる。VR企業や製造業を含む幾つかの企業から共同研究を見据えた問い合わせが増え、実際に社会実装可能な領域が具体化できつつある。

研究の進め方としては、研究実施体制として外部の研究補助員を導入できなかった点が

研究推進当初の遅れの要因となった。大学制度を利用した公募では人員が集まらなかったことに加え、COVID-19 で、より一層人員の確保が難しかった。一方で、企業や別分野の研究者との連携を強化することで、研究実施期間後半に、研究を加速度的に推進することができた。COVID-19 で、人員のみならず、物品調達や現場作業が実施できないながらも、研究項目を絞ることで、当初達成目的に繋がる一応の成果が創出できたと考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 3件

1. H. Yamaguchi, Y. Funabora, S. Doki, K. Doki, Three-Dimensional Deformation Control System for Fabric Actuator, 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII2020), pp.253-258・2020.
布型デバイスの変形を点群で計測、局所領域の遷移ベクトル群(変形ベクトル)として布型デバイスの変形を記述、記述した変形状態をCNNで学習・制御する制御系を提案した。ネットワークの内挿を活用することで、中間的な姿勢も含めて連続的な変形を制御した。
2. K. Nakagawa, Y. Sakai, Y. Funabora, S. Doki, Turning a Functional Cloth into an Actuator by Combining Thread-like Thin Artificial Muscles and Embroidery Techniques, Vol.7, No.3, pp.5827-5833・2022.
McKibben型細径人工筋を刺繍によって多様な基材に縫い付ける手法を提案し、基材の機能を維持した多様な布型デバイスが製作できることを示した。具体的には、面ファスナと圧力布の2つの機能性織布を能動化、機能を維持したまま変形が制御できることを示した。
3. K. Nakagawa, Y. Sakai, Y. Funabora, S. Doki, Turning a Functional Cloth Into an Actuator by Combining Thread-Like Thin Artificial Muscles and Embroidery Techniques, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), ThA15.02・2022. (RA-L option)
RALに採録された業績5-(1)-2の内容に関し、国際会議ICRAにおいても発表した。内容は業績5-(1)-2に準ずる。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 3件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Y. Funabora, A Prototype of Locomotive Fabric: A Methodology of Making a Fabric be Locomotive with Multiple Extra-Thin Artificial Muscles, Poster Contributions in Soft Robotics Workshop in International Conference on Robotics and Automation (ICRA2019), 2019.
2. H. Yamaguchi, Y. Funabora, S. Doki, K. Doki, A Challenge of Deformation Control for Cloth Actuators, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2019), (Poster Contribution), 2019.
3. H. Yamaguchi, Y. Funabora, S. Doki, K. Doki, Deformation Description with a Set of Segmented Planes for Deformation Control of Fabric Actuator, 2020 3rd IEEE

International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), (Poster Contribution), 2020.

4. 中川滉貴, 舟洞佑記, 道木慎二, 6軸力覚センサを用いた布状アクチュエータの発揮力計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 2021.
5. 坂井佑輔, 中川滉貴, 舟洞佑記, 青山忠義, 道木慎二, 布状アクチュエータを用いた腕部に対する感覚想起の検討, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門大会, 2021.(SI2021 優秀講演賞受賞)