

研究終了報告書

「身体表面変形デバイスを用いた自他非分離な間身体性の設計」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：堀江 新

1. 研究のねらい

本研究は、自己と他者とが生み出す身体的な接続関係である間身体性を成立させるデバイスを開発することを通じてその設計指針を明らかにすることを目的としている。個体の身体性の質としての身体性を超えて、複数人の関係性に見出される間身体性に注目する。主に現象学の実験分野で分析が行われてきた間身体性の概念を工学に応用することで、工学的に設計可能な人間同士のインタラクションを拡張する。特に、これまで行われてきた人間拡張研究が主に独立した個人の能力を拡張することを目指しているのに対し、複数人での相互作用やパフォーマンスを向上させることを主な目的として提案することによって、研究領域に新たな視点を提供するねらいがある。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は基礎研究と、その基礎研究の成果を生かした応用展開が並行で行われた。それぞれについて概要を下記に述べる。

基礎研究として、間身体性を生み出すための体表の変形手法の研究や、それによるタスクパフォーマンスに関する研究を行った。間身体性が成立する場合、複数人がそれぞれの感覚状態を互いに推定することが必要である。これまでに研究が行われてきた触覚提示装置は、観察者を想定していないため、触覚を提示されている人とその観察者との相互作用を研究することができなかった。そこで、図 1 に示すプロトタイプを製作した。プロトタイプは触覚を提示するパーツが皮膚を変形させるとともに、その変位が外部から観測可能なものであった。これを活用し、装着者に提示される刺激強度を観察者が推定できるかの検討を行った。この結果については(2)にて述べる。また、観察者が装着者に提示されている力を推定することを通じてタスクを行う系を構築し、パフォーマンスを評価した。次に、デバイスによって皮膚が変形しているのではなく、体表そのものが変形しているように見せるための装置を提案した。衣服を第二の皮膚として捉え直し、身体と衣服との恒常性を活用した。身体と衣服の間で振る舞う装置を製作し、その技術的評価やインタラクションの設計空間を定義した。さらに、他者と触覚を共有する基盤として、触覚のセンシングとディスプレイを組み合わせたシステムを考案し、ファーストステップとして個体の中でのフィードバックループ系に組み込むことで力の調整タスクが行えることを示した。

上記の基礎研究の応用展開として、いくつかの表現の現場で活用が行われたほか、企業とのコラボレーションが実現しつつある。触覚の生々しさをそのままに観察者に伝えることができる装置は、映像での触覚表現として相性がよく、映画監督である遠藤麻衣子氏の作品の中で活用された。また、皮膚の変形は人が身体を動かした際に生じる現象であることから、本研究で得られた触覚提示手法は表現者がその身体性をオーディエンスに伝達する際の技術として

利用価値が高く、箏奏者である宇山葵氏のパフォーマンスにて活用された。さらに、前述した身体運動との関連性の高さから、運動スキルの学習に利用できないかというディスカッションをスポーツ関連会社とともに進めており、共同研究の足がかりになった。最後に、視触覚デバイスの新規性が認められ、プロダクトデザイナーの山中俊治氏がディレクターを務める企画展「未来のかけら：科学とデザインの実験室」の展示内容の1つとして半年間の展示を行うこととなった。

(2) 詳細

本研究の核となるアイデアは、自己が知覚する身体感覚を他者が外部から理解可能な触覚提示によって、自己と他者との間でデジタルな空間を通じた身体的接続を生み出すことである。本研究は複数の研究要素から構成されており、各研究要素について下記に述べる。

研究項目 A 『触覚刺激を提示可能な身体表面変形デバイスのプロトタイプと複数人タスクパフォーマンス』

装着者の触覚刺激を観察者が理解するための身体表面変形デバイスの考案と製作を行った。まずはプロトタイプとして刺激素子が皮膚を変形させ、その振る舞いが可視化されるデバイスを製作した。図 1 に示す通り、装置は刺激素子が回転し、皮膚を押し込むことで変形させる他、その様子が外部から確認できるものであった。

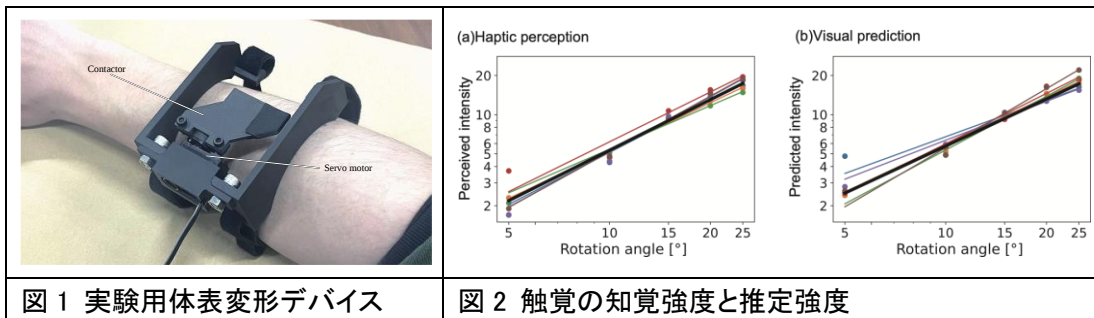


図 1 実験用体表変形デバイス

図 2 触覚の知覚強度と推定強度

装着者が提示されている刺激の強度をどのようなモデルで知覚し、観察者がどの程度推定ができるかを確かめる実験を行った。実験はマグニチュード推定法を用い、装着者は知覚強度を数値で回答し、観察者は装着者が知覚しているであろう強度を数値で回答する形式であった。実験の結果、図 2 のように刺激強度に応じて知覚強度が大きくなる傾向が得られ、さらに知覚強度・推定強度モデルはそれぞれ下記の式で表現された。

$\psi_{Haptic} = 0.275\phi^{1.287}$ $\psi_{Visual} = 0.362\phi^{1.200}$	式 1
---	-----

指数の違いは 0.087 であり、この誤差の程度は人間の左右の知覚強度モデルの差と同程度であることを確認した。したがって、デバイスは装着者に触覚の強度を提示することができ、さらに観察者がその強度を推定可能であることが示された。

さらに、このインターフェイスを用いることによる協調タスクに関する実験系を立案した(図 3)。

実験は二人一組で行うものであり、モニター上に表示された棒状のオブジェクトを目標の位置まで持ち上げる課題である。ただし、オブジェクトを水平に保つ必要があり、相手の操作量に応じて自分の操作量を調整する必要があった。双方はデバイスを装着しており、タスクの難易度のほか、入力した操作量をどちらの装着者のデバイスに反映させるかの条件や、相手のデバイスの可視・不可視などの条件を変更しながら実験を行い、協調タスクにおける触覚相互理解の必要性について評価を行った。その結果、相手の触覚を理解することによって難易度が高い場合にタスクの成功率が高い傾向が見られたほか、保持するオブジェクトの安定性が高くなる傾向が見られた(図 4)。自己の入力量を相手が知っているということを前提に行うことができるときに、人は本来の身体的な協調行為のパフォーマンスを発揮することができる可能性が示された。

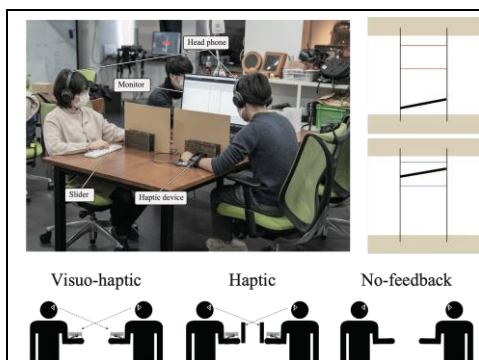


図 3 実験環境及び実験条件

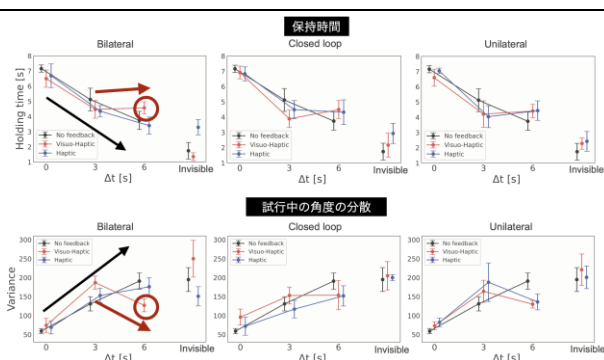


図 4 協調タスクパフォーマンスの実験結果

本研究項目の触覚インターフェイスの考え方をまとめ、Seeing is Feeling と名付けたシステムを製作した(図 5)。本 ACT-X プロジェクトのパイロットスタディとして行っていた触覚の空間性を他者に伝達する手法と、これまでに確かめた知覚効果や探索したアプリケーションをまとめた。当システムには露出した触覚刺激素子と、触覚刺激素子の振る舞いを増幅する視覚的な表象のための機構が搭載されている。これによってわずかな皮膚の変形の度合いを視認できるシステムとなった。本研究成果は、全く新しい指向性をもつ触覚提示システムとして CG とインタラクティブテクノロジーに関する国際学会である SIGGRAPH Asia 2022 に採択され、展示を行った。



図 5 Seeing is Feeling

研究項目 B『身体性を伴うインタラクションのための視覚的表象としての体表変形の研究』

本研究項目では、身体性を伴うインタラクションのために、主体に帰属する体表変形のインターフェイスの設計空間を明らかにした。そのために、主体に帰属する体表変形の手法に関する方法論の考案と、プロトタイプ、技術的評価を行い、それを活用した主観的な評価実験を行った。研究項目 A で扱ったインターフェイスは、変形がデバイスに帰属していたのに対し、本研究項目では身体側に帰属させることで、「その身体そのものが変形しているように見える」変形手法を目指した。実際に皮膚そのものを内側から変形させることは侵襲的な処置が必要であり実現が難しかったため、身体と衣服との関係の恒常性に着目した。衣服は社会的な意味のみならず第二の皮膚として主体の身体の輪郭をなぞっており、その間に介入が加えられることはこれまでに無かった。そこで、身体と衣服の間で振る舞うインターフェイスを考案した(図 6)。続いて、このインターフェイスの設計空間を明らかにするために、入力となり得る主体、出力の形態、応用について整理した(図 7)。その設計空間に基づき、視覚表現のデザインを定性的なプロセスで行い、シナリオとその変形との合致度や嗜好度を評価した。これにより、本インターフェイスの適用可能な範囲と各シナリオでの適切な動作パラメータが明らかになった。本研究成果は人間拡張領域の国際専門会議である Augmented Humans International Conference 2023 にて採択され、口頭発表を行った。

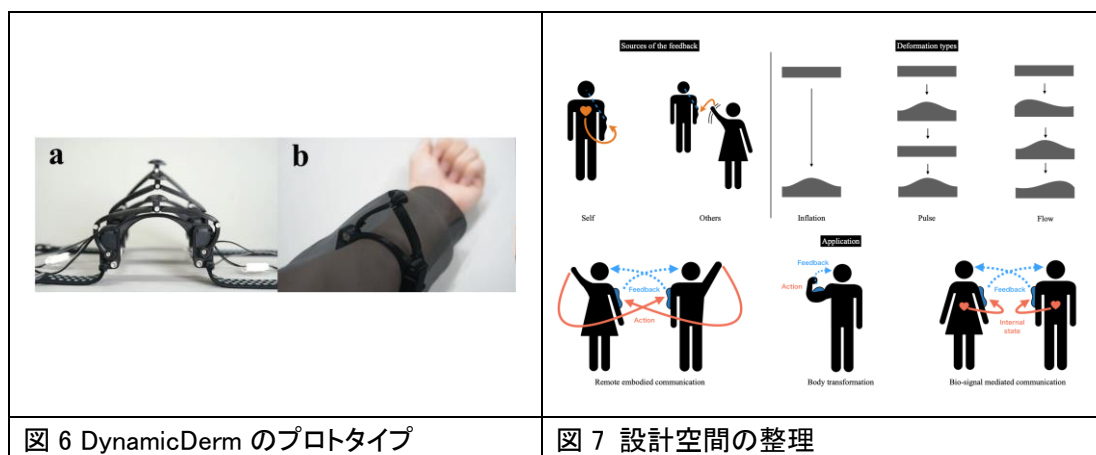


図 6 DynamicDerm のプロトタイプ

図 7 設計空間の整理

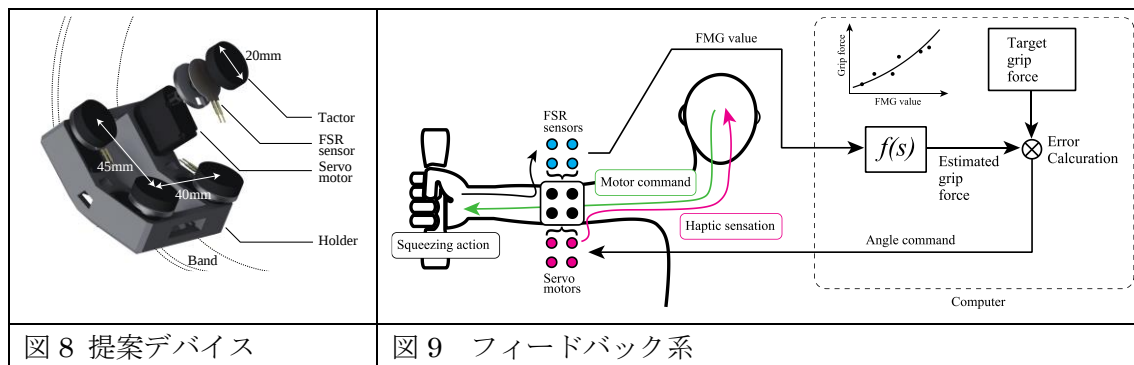
研究項目 C『生体情報に基づく体表変形によるフィードバック系の形成』

本研究項目では、間身体性を生み出すための入出力系として、筋肉の活動を推定し、皮膚の変形による刺激提示を行うシステムの開発とその初期実験を行った。研究項目 A や B にて探索した設計空間のなかで、生理学的なデータに基づいた体表変形が間身体性の設計可能性として挙げられた。本研究項目はまず、1 つの身体の中での知覚と行為の循環が提案するシステムを通じて実現するかを検討した。制作したシステムは筋活動を推定するセンサ部と、皮膚変形刺激を提示するディスプレイ部が備わっている(図 8)。筋活動の推定には Force Myography という手法を採用した。この手法は筋収縮によってデバイスに加わる荷重を計測するものである。また、皮膚変形刺激には皮膚の回転せん断刺激を用いた。この手法は皮膚をその面に平行な方向に変形させ、その変形量によって刺激の強度を提示するものである。これら 2 つの計測・提示の方向は直行しており、提示することによる計測への影響を最小限に抑

えることが可能である。図 9 に製作したデバイスを含めたフィードバック系を示す。このシステムを用いて力の調整タスクを行った結果、異なる目標の力に応じて出力する力を調整できたことが確認された。通信の経路を変更し、複数台のシステムを運用することによって、筋活動と皮膚感覚を通じた複数人の間での身体性が獲得できる基盤が得られると考えられる。本研究成果は触覚の国際専門会議である World Haptics Conference 2023 にて採択され、口頭発表を行った。

ここで開発された手法の応用展開の 1 つとして、箏奏者である宇山葵氏の演奏会にて、演奏とともに演奏者の内観をオーディエンスに伝達するパフォーマンスを実施した。演奏者に装着されたセンサによって呼吸情報や前腕部の筋活動を取得し、それに合わせて皮膚変形刺激と振動刺激を提示した。定性的なアンケートを実施した結果、緩急や休符の感覚が伝達されることによって、演奏者の主観的な経験をオーディエンスが感じ取ることで鑑賞体験が拡張できることが明らかになった。

さらに企業連携サポートを受け、連携のためのデバイスのプロトタイプ製作を行い、企業とともに応用を検討した。



3. 今後の展開

まず研究項目 A に関して、観察者への触覚共有手法の表現への応用を検討している。デジタルな空間から身体へ提示される触覚刺激を表現することを設計指針としたデバイスは他になく、映像表現やステージパフォーマンスに組み込める可能性が高い。現状のデバイスは原理的な機能のみにフォーカスを当てた設計であるが、用途に応じた最適な意匠設計によってパフォーマーの表現の拡張ができると考えられる。現在、プロダクトデザイナーとディスカッションを行っており、身体の形状に即した有機的なデザインや、身体運動に応じた変形パターンを検討している。

次に、研究項目 C に関連して、生体情報センシングと触覚フィードバックを活用した複数人での身体的共創に関する研究を行うことを予定している。これまでも筋活動を他者と共有する技術やインタラクションは探求されてきたが、外骨格による姿勢の強制や筋肉を刺激して直接動かすのではなく、触覚刺激を運動の手がかりの情報としてフィードバック系に組み込むことで、各ユーザーの主体性を奪うことなく共創的關係を形作れると考えられる。強制することなく有機的に手がかりが与えられるゆるやかな体性感覚的つながりを通じて、表現だ

けではなく、リハビリテーションやトレーニング、教育への応用展開を検討している。

4. 自己評価

研究目的として、間身体性を成立させる身体表面デバイスを開発することを通じた設計指針を明らかにすることを掲げていた。この目的に対して複数の身体表面デバイスを開発し、他者への身体的な感覚の伝達を行うための条件が複数明らかになった。少なくともこの手法に限定したデバイスの設計空間の探索としては十分な取り組みであったと自負している。一方で、間身体性の成立という課題の大きさに対して、身体表面の変形という手法の狭さのギャップがあり、限定的な状況でのデバイスの設計指針に留まってしまったことが反省としてある。一部、表現の現場での活用はできたものの、もう少し長期的にフィールドでの活用を目指したデザインプロセスを実施したかった。実験室の中に留まった研究であるにしても、もっと人間一般に語ることが可能な知見を明らかにする必要があったと考える。間身体性という概念を工学的に扱うという挑戦ができたことについては誇りに思っており、自分の研究者としてのキャリアの1つの転換になったことは間違いない。

研究の進め方としては、コロナウィルスの流行と収束に適応する形で研究実施体制と研究費執行を行うこととなった。具体的には、最初期は博士過程の個人研究として進めていたものを、修士学生とともに協力して進めるテーマとして扱うようになったほか、ほとんどが物品費であった研究費を JST に調整していただき、国際会議の出張費の補填や振替を行っていただくことになった。変化する状況に適応できたのは私自身に対する評価というよりも JST による研究マネジメント体制によるものであり、柔軟に対応いただけたことは、社会情勢や研究状況に応じて適切に研究を進める上で非常にありがたかった。

最近では外部での講演等の機会を頂くことも増え、その中で本 ACT-X プロジェクトについて紹介した際には興味を持っていただくことが多い。その要因としてはこれまでとは異なる観点・指向性での身体性拡張を提案しているためであると考えている。現状の身体性認知科学に基づいた工学的研究、すなわち人間拡張の領域は、個人を拡張する指向性が働いている。これに対して、本 ACT-X プロジェクトは人間を個人としてではなく関係性の中に見出しているという点で異なる視点を持っている。近代的自己観に基づく個人主義からの脱却を、本研究領域の指向性の中で目指すということ自体、大きな社会的意義があると私は考えている。

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: 4件

1. 堀江新. 体表変形を通じた身体表象転移に関する研究. 学位論文. 2022

本研究では身体の表面を変形させることを通じて、外部対象と身体的な接続を生み出すシステムについて、心理物理実験やプロトタイプを製作を通じてシステムの設計指針を明らかにすることを目的とする。我々が身体を通じて直接感じ、行為を行えるのは身体図式や身体像といった身体表象の働きによるものである。この身体表象に対して、我々が自分の身体とは

異なる対象として扱っている外部対象を転移させることで、対象との協調的な行為や、対象の状態の直感的な獲得が行えると考えられる。本論文では運動する対象に着目し、対象の変位やその兆しと成る力情報をどのように提示する必要があるかを生理学・人間工学的視点から検討した。また、転移する先の身体表象として自己のみならず他者についても取り扱った。本論文を通じて身体表象転移システムの設計指針となる理念や機能、装置の形状因子に加え、関連する生理学的、人間工学的知見が明らかとなった。

2. Horie, A., Murata, R., Kashino, Z., & Inami, M. (2022). Seeing is Feeling: A Novel Haptic Display for Wearer–Observer Mutual Haptic Understanding. In SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies (pp. 1–2).

We propose a new haptic display that enables mutual understanding of haptic sensation between the wearer and an observer. In addition to presenting haptic sensations by inducing skin deformation, we have achieved creating a mutual understanding of the sensations with the observer by making the haptic stimulus evident. People have the ability to predict the sensations of others by observing their sensory states. The system is composed of a part that provides haptic stimulus while creating visible skin deformation, and a mechanical structure that visually exaggerates the deformation. The proposed system realizes richer interactions by extending the entertainment experiences of the observers during live content, increase understanding of internal states through biofeedback, and be used in remote haptic communication.

3. Murata, R., Horie, A., & Inami, M. (2023, March). Dynamic Derm: Body Surface Deformation Display for Real-World Embodied Interactions. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023* (pp. 267–277).

The body surface is an essential interface that dynamically reflects states inside and outside the body. To realize a computer mediated embodied interaction, focusing on its characteristic as a visual display, we propose dynamically intervening in the shape of the body surface. In this paper, we define the design requirement for a system that deforms the body surface, organize the design space, and build a prototype. Dynamic Derm is a prototype that dynamically deforms clothes by pushing them up from inside, where and each module can present two degrees of freedom in translation. We investigated the spatial accuracy of the system, the actuator response under load and a clothes deformation as a basic technical evaluation of the system. We also designed several presentation scenarios based on the design space, and conducted a qualitative evaluation of the adequacy of their representations.

4. Horie, A., Zheng, Y., & Inami, M. (2023, July). A Wearable System Integrating Force Myography and Skin Stretch Feedback toward Force Skill Learning. In 2023 IEEE World Haptics Conference (WHC) (pp. 190–196). IEEE.

We propose a wearable system integrating force myography (FMG) and skin stretch toward force skill learning, and describe its basic evaluation. The efficacy of learning sports, rehabilitation, and vocational skills is expected to be improved through the use of motion learning systems. Among the skills, force coordination skills, in particular, often require long–

term experience to master because visual information may not be available. The system proposed in this study integrates body motion estimation by FMG and skin stretch haptic feedback to provide feedback cues from the current force output to the target force output. After evaluating the performance of the system in terms of sensing and haptic presentation, an initial user study was conducted to assess the feasibility of force guidance in practice. The system was found to output force intensity relative to varied static target forces, indicating its efficacy. Based on the results of the experiments, we discuss future issues and potential applications.

(2)特許出願

研究期間全出願件数： 0 件(特許公開前のものも含む)

(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. **Horie, A.** Advancing Haptic Display Technology for Embodied Metaverse Experiences. In International Display Workshops 2023.
2. 堀江新, Seeing is Feeling. In 「未来のかけら: 科学とデザインの実験室」. 2024/3/29 (Fri) – 2024/8/12 (Mon). 21_21 DESIGN SIGHT