

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

Development and Implementation of a  
Tactile Feedback System Using End-to-end  
Tactile Sensor Data Projections for  
Wearable Human-Robot Interaction

触覚データのエンドツーエンド射影に基づく  
装着型触覚フィードバックシステムの開発

申 請 者

アンドレアス	ガイアー
Andreas	GEIER

総合機械工学専攻 知能機械学研究

2021 年 2 月

## (1) 審査経緯

博士論文審査の経緯を以下に示す．

- ・ 2020年11月26日 予備審査会
- ・ 2020年12月3日 教室受理決定
- ・ 2020年12月17日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- ・ 2021年1月22日 公聴会
- ・ 2021年2月6日 審査分科会
- ・ 2021年2月25日 研究科運営委員会

## (2) 論文背景・内容・評価

触覚は、多様な環境下での探索・操作タスクの実行に欠かせない重要な感覚チャンネルである．近年、分布型触覚センシング技術の普及と柔軟なスキンセンサの開発が進み、ヒューマン・ロボットインタフェースへの触覚システムの実装が容易となり、ロボットの遠隔制御、マルチモーダルインタフェース、深層学習などに広く応用されている．特に、ロボットを遠隔操縦する際に、ロボットが取得した触覚を人間に適切にフィードバックする技術は、遠隔操縦の効率を大幅に向上させることができるため、研究の進捗が期待されている課題である．しかし、ロボット側の多数の分布型触覚センサから得られるデータを、人間の操作者の皮膚に伝達する方法、特に人間の皮膚の触覚受容器を刺激するために必要となるデバイスである分散小型アクチュエータのシステム設計、すなわち触覚ディスプレイを構築する方法論は、エネルギー消費が大きくなりやすいこととディスプレイが大型化するという課題があるため、まだ研究途上であると言える．このため、これまでの触覚ディスプレイは、仮想現実の提示といった単純なアプリケーションの用途に限定されており、ロボットの触覚システムと人間への触覚提示システムとの接続性は十分に議論はなされていない．

このような背景の下、本論文では、ロボットの触覚センサの入力データから、人間に触覚を提示するアクチュエータの駆動用出力データへの、エンドツーエンドの変換に注目し、ロボットと人間の間での触覚情報の適切な流れを実現するシステムの構成方法を研究課題としている．

具体的には、ロボットへの大規模実装のために独自に開発した分布型触覚スキンセンサとスパースアクチュエータアレイを装備した超小型触覚ディスプレイを統合した触覚フィードバックシステムを開発している．

このデータ駆動型の触覚フィードバックシステムは、(1)人間の表皮のセンシング機序の知見を取り入れ、エネルギーとスペースに関する制約を抑えつつ、効果的に錯覚現象を実現可能な SMA を用いた小型触覚ディスプレイ

用アクチュエータ，(2) 触覚センサの元データから触覚ディスプレイ出力までを，GRU オートエンコーダによる学習アルゴリズムを使用した触覚センサデータの動的圧縮および触覚特性のアクチュエータ駆動信号へのインプリシットなマッピングを含めた，厳密なエンドツーエンド設計，(3) ハードとソフトウェアの両方のモジュール設計パラダイムにより，触覚フィードバックシステムの規模の拡大・縮小性，機能の拡張性，および多数のアプリケーションへの適用性，といった新しい機能を備えている．

提案した触覚フィードバックシステムの評価のために，複数の触覚ディスプレイ指先モジュールのプロトタイプを開発している．最終的なプロトタイプ（サイズ 2.7x2.3x1.2[cm]）は，8つの形状記憶合金ベースのマイクロバイブレータからなるアクチュエータアレイと，1つのアクチュエータあたりの消費電力が 180[mW]のコンパクトなドライバモジュールを実装しており，質量は 16.74[g]に抑えられている．実証実験では，人間型ロボットハンドに実装した柔軟分布型触覚センサモジュールから生成された触覚フィードバックを，人間の被験者に与えることで評価している．結果として，提案したアルゴリズムが，暗黙的または圧縮された触覚センサデータを触覚ディスプレイ駆動信号へと適切に変換され，接触およびテクスチャーなどの表面特性の情報を正確に人間に伝えられる時空間パターンの生成が可能になったことを実証している．

以上要するに，本論文は，触覚センサデータから触覚ディスプレイに至るエンドツーエンド投影を可能とする装着型触覚フィードバックシステムを構築し，有効な錯触の生成，触覚情報の伝達を実現したものである．この触覚フィードバックシステムの成果は，遠隔操縦ロボットの巧緻性，操縦性を飛躍的に高めることができ，ヒューマン・ロボットインタラクション研究分野に大きく貢献するだけでなく，バイオインスパイヤに基づくシステム設計の学問分野にも有効な示唆を与えるものである．よって，本論文は博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める．

(博士論文審査報告書)

2021年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学）

菅野 重樹

---

早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学）

高西 淳夫

---

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学

宮下 朋之

---

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学

尾形 哲也

---