

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション  
基盤技術の創出と展開」  
研究課題「実体化映像による多次元インタラクション」

## 研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2025年03月

研究代表者：篠田 裕之  
(東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)

## §1 研究実施の概要

### (1)実施概要

そこに実体があるかのような触感を伴う 3D コンピュータ映像を実現し、機械学習を活用しながら操作インタフェース、コミュニケーション、創造活動や心身の支援まで、幅広い応用を展開する研究を進めた。現在までにその要素技術、すなわち空中超音波による触覚提示法、高精度立体映像を表示可能な3次元視覚ディスプレイ、実体化映像の生成や評価に活用可能な機械学習手法が進展し、実体化映像を実現可能な段階に到達したと考えている。

非接触での触覚再現技術(篠田グループ)については、手指表面での音波の回折も考慮した圧力分布生成手法を確立し、リアルタイムでの再現に到達した。触覚の解明も進み、圧覚や温冷覚を含め様々な触感再現が可能であることを実証した。また触覚刺激と快・不快の関係についても評価することができた。新方式超音波デバイスの単一素子動作を実験的に確認し、検用フェーズドアレイの設計にも進んだ。

3次元視覚ディスプレイの開発(掛谷グループ)では、時分割パララックスバリア式立体表示と入り合い構造を有するフレネルレンズを用いた粗インテグラルボリューム表示に取り組み、立体映像観察時における目の疲労の原因となる輻輳調節矛盾を解消する技術を実証した。機械学習(杉山グループ)においては、重みと予測器の学習を同時に行える全く新しい適応学習法を開発するなど、その基礎理論において顕著に進展した。

1年延長した 2024 年度は「AI と実体化映像が密結合したシステム」の実現、特に触感を自動生成する問題に取り組んだ。特に篠田グループでは、3次元映像に触感を自動的に付与するための問題と開発のステップを整理し、実用システムの開発を実施した。藤原グループは超音波音場の最適な生成手法、掛谷グループは3次元映像ディスプレイの特性改善、杉山グループは完全なラベル付けが困難な多次元情報を扱う機械学習の理論研究に取り組んだ。それらの成果は最終的に実体化映像を半自動生成するシステムに組み込まれ、大阪・関西万博「未来の都市」パビリオン内でのデモ展示開発にも活用された。

### (2)顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

#### 1.

概要： 空中超音波を用いた非接触での触覚提示において、圧覚や温冷覚を含め一定程度の万能性をもって触感再現が可能であることを世界に先駆けて実証した。従来の超音波触覚刺激は、弱く、限定された触覚を生成することしかできなかったが、表面テクスチャなどの触感を、一定程度の万能性をもって再現可能であることを実証した。実体化映像を可能にする基礎技術であると同時に、再現性よく多様な触感を生成する触覚刺激装置であり、触覚による人間の反応を科学的に明らかにするツールとしての意義も大きい。

#### 2.

概要： ユーザの状態や周囲の環境など、予測に使われる変数の分布変化に応じて予測器を適応させる技術を共変量シフト適応という。従来の共変量シフト適応技術では、まず適応に必要な重みを推定し、次に予測器を重み付き学習するという2段階の推定が行われてきたが、この方式は最善でない。そこで、重みと予測器の学習を同時に行える全く新しい適応学習法を開発し、提案法の有効性を理論的に証明するとともに、計算機実験でその妥当性も実証した。この研究成果は Asian Conference on Machine Learning 2020 の Best Paper Award (174 投稿論文中 1 件) に選ばれ、2021 年に Springer Nature Computer Science 誌にその成果をまとめ発展させた招待論文を発表した。また、NeurIPS2021 における Distribution Shifts ワークショップにて招待講演を行い、当該分野の今後の展望についてパネルディスカッションを行った。そして、NeurIPS2022 ではオーガナイザーとして Distribution Shifts ワークショップを企画し、ポスター発表 100 件・参加者数百名の大規模な国際ワークショップを実施した。更に NeurIPS2023 において Distribution Shifts ワークショップをオーガナイズすることが決定しており(2023 年 12 月 15 日)、発展著しい基盤モデルを中心とした議論を展開する予定である。

## < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1.

概要： 発生可能な出力最大値に制約のある超音波フェーズドアレイを連携させ、所定の放射圧分布を生成する技術を確立した。人体表面での音波の回折をも考慮しながらリアルタイムで逆問題を解くアルゴリズム、反射体を利用して遠方から音波を収束させる技術、照射される超音波音場をその場で計測する技術、を実証した。これらは実体化映像の実現のための必須技術であると同時に、物体操作や音響流制御など、強力空中超音波を用いた近年の応用技術全般で活用できる。

### 2.

概要： 立体映像観察時における目の疲労の原因となる輻輳調節矛盾が生じない、パララックスバリア方式の立体映像表示システムを実証した。複数観察者への裸眼映像提示、およびヘッドマウントディスプレイの両方に適用可能である。しかしながら、この方式においては観察者の位置をトラッキングし続ける必要がある、観察者の人数が限定されるという問題も残っていた。その問題を抜本的に解決するため、入り合い構造をもつフレネルレンズアレイを新たに提案し、それを用いた粗インテグラルボリューム表示方式の裸眼立体表示ディスプレイを実装した。この技術により、滑らかな運動視差を有し、輻輳調節矛盾の無い3次元映像を空中に提示することが可能となる。さらに、この方式は観察者位置のトラッキングが不要で、観察者の人数も制限されない。よって、この技術は3次元映像を提示して触覚と融合させる実体化映像を実現するための必須技術となる。加えて、ワークスペースをフレキシブルに設定できるため、実体化映像実現の目的に限定されることなく、3次元映像提示の幅広い用途に活用できる実用性の高い技術である。

### 3.

概要： 超音波触覚ディスプレイの開発において、所望の感覚刺激が得られるよう、振動子の位相や振幅などの物理パラメータの調整が非常に重要である。しかし、物理パラメータと感覚刺激の対応は自明でないため、直感的にパラメータを調整することは非常に難しく、所望の感覚刺激が得られるまでに多大な労力を要する。そこで、機械学習における「解きほぐし (disentanglement)」と呼ばれる技術をこの問題に適用することを考えた。解きほぐしは、(高次元の)特徴ベクトルを、直感的に意味のわかりやすい要素に分解する技術の総称である。これまで、「一貫性(consistency)」や「限定性(restrictiveness)」などと呼ばれる性質を、解きほぐし問題の「定義」として形式的に用いていたが、十分に動機づけられた概念ではなかった。そのため、様々に異なる方法が提案され、それらの関係や有効性は十分に議論されてこなかった。そこで我々は、解きほぐしを数学的な圏論(category theory)の概念を用いて、デカルトモノイド圏(Cartesian monoidal product)を用いた枠組みを考案した。これは、従来の様々な解きほぐしの定義を特別な場合として含む非常に汎用的な枠組みであり、第一の成果をまとめた論文は機械学習分野のトップレベルの国際会議の一つである International Conference on Machine Learning (ICML) 2023 に採択された。この研究は、圏論を用いて解き多様な機械学習の概念を統一的に論じるという大きな科学技術イノベーションの第一歩であり、この枠組みを計量学習やドメイン汎化に拡張する研究成果が得られつつある。

## < 代表的な論文 >

1. Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, “Non-Vibratory Pressure Sensation Produced by Ultrasound Focus Moving Laterally and Repetitively with Fine Spatial Step Width,” IEEE Transactions on Haptics, Volume 15, Issue 3, pp 441-450, Nov. 2021. (Open Access) doi: 10.1109/TOH.2021.3125843

概要： 空中超音波によって圧覚が再現できることを報告した。圧覚刺激が可能になることで、一定程度の万能性を有する触覚再現が可能になった。分布触覚による万能触覚再現は、ハプティクスの重要なブレイクスルーになると考えているが、その発端となる研究成果であった。

2. Borjigin, G. and Kakeya, H., “Viewing zone expansion of a dual-viewer autostereoscopic display with inclined interleaved linear Fresnel lens arrays and a time-division quadruplexing directional backlight,” Optics Express, Vol. 31, No. 11, pp. 17321-17330, 2023.

概要：同時に2人の観察者が固有視点からパネルのフル解像度で裸眼立体視ができる時分割指向性バックライト式立体表示システムを開発し、その評価を行った。

3. Zhang, T., Yamane, I., Lu, N., & Sugiyama, M. A one-step approach to covariate shift adaptation. SN Computer Science, vol. 2, no. 319, 12 pages, 2021.

概要：入出力関係を学習する教師付き学習において、入力確率分布が訓練時とテスト時で変化する場合に適応できる革新的なアルゴリズムを提案し、その有効性を理論的・実験的に実証した。Asian Conference on Machine Learning (ACML) 2020 の Best Paper Award (174 投稿論文中 1 件) を受賞した国際会議論文の発展版である。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 篠田グループ

研究代表者：篠田 裕之（東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授）

研究項目

- ・ 触覚インタラクションの確立と実体化映像の統合システム

#### ② 杉山グループ

主たる共同研究者：杉山 将（東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授）

研究項目

- ・ 機械学習基盤技術の構築および部分的情報からのモデル生成

#### ③ 掛谷グループ

主たる共同研究者：掛谷 英紀（筑波大学システム情報系知能機能工学域 准教授）

研究項目

- ・ 裸眼立体ディスプレイの開発

#### ④ 藤原グループ

主たる共同研究者：藤原 正浩（南山大学理工学部 講師）

研究項目：

- ・ 超音波デバイスの開発と応用システム展開

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1. 世界各国 18 名の著者による書籍 “Ultrasound Mid-Air Haptic Displays and Novel HCI Applications,” Springer Human-Computer Interaction Series (HCIS) を発刊した。  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-04043-6>  
・ 代表者の篠田のグループは、Forward と この中の4章分を担当。2022 年 8 月発刊。
2. World Haptics Conference 2023 において、Keynote speech を行った。
3. World Haptics Conference (WHC) 2019 で Workshop “Affective Haptics as a Direct Link to Emotion” を開催。また、WHC 2021 においても“Affective Haptics for Enhanced XR”

(Organizer: Mounia Ziat) を実施。2019 年の Workshop を契機として、IEEE Haptics Symposium 2020, Euro Haptics 2020 においても Affective haptics が重要テーマとして扱われた。

4. Steering Committee Chair として WHC 2021 の開催をサポートし、その中での目玉セッション (Cross-Cutting Challenges) として、空中ハプティクスをテーマとした “Touchless AI Interfaces for Functional and Non-Functional Haptics” が開催された。
5. 国際電気標準 IEC TC-100 において Haptics の標準化を推進中。2020 年度に Technical Report を提出し (本年度出版予定) 2022 年度から現在までに PWI 提案を実施した。
6. この CREST 研究の成果を基に、スタートアップ企業の設立を準備中である。
7. 杉山グループは University of Michigan (USA)、Université Paris-Dauphine (France)、University of Technology Sydney (Australia)、Australian National University (Australia)、University of Sydney (Australia)、Chongqing University (China)、Nanyang Technological University (Singapore)、Hong Kong Baptist University (Hong Kong) などと国際共同研究を行い、論文を執筆した。また、Stanford 大学、Columbia 大学、ETH 大学、Google などの研究者と、NeurIPS2022、NeurIPS2023 において非定常環境下での機械学習技術である Distribution Shifts に関するワークショップをオーガナイズした (2023 年は 12 月に開催)。