

研究終了報告書

「情報投影と投影対象最適化による視触覚重畳提示」

研究期間：2019年10月～2022年3月

研究者：平木 剛史

1. 研究のねらい

これまでのディスプレイ技術は主に視聴覚刺激を対象として発展してきたが、遠隔コミュニケーションや遠隔医療といった、情報化社会の進展に伴う新たな用途を念頭に、視聴覚に加えて触覚刺激を提示する研究が高まりを見せている。これまでの研究の成果から、触覚認知は圧力覚、振動覚、温冷覚等が強く影響することが知られているが、使用環境やデバイスハードウェアの制約から、これらの感覚をすべて制御することは困難である。そこで、視覚と触覚を重畳し、それぞれが刺激提示において相補的に機能することでより豊かな感覚情報提示を実現する視触覚重畳提示技術が、特にバーチャルリアリティやヒューマンインタフェースの分野で注目され、研究されている。しかし、従来の視触覚重畳提示の多くにおいて、映像に対する触覚刺激の時間遅れと位置ずれのために提示のリアリティが損なわれている。加えて、この位置合わせ処理に用いられるモーションキャプチャシステムなどの大掛かりな外部装置のために、システムの可搬性や設置自由度も低いものとなっている。もし、これらの時間遅れ、位置ずれの問題を小型でシンプルなシステムにより解決することができれば、視触覚重畳提示システムの実用性と応用可能性の大幅な向上が期待できる。

本研究のねらいは、時間遅れと位置ずれを人間が知覚不能なレベルまで低減した視触覚重畳提示を小型かつ設置自由度の高いシステムとして構築することである。光通信によって制御される触覚提示デバイスは映像に対して低遅延で動作することができる。また、映像の各画素自体に情報が埋め込むことが可能な情報投影技術を用いるため、映像と触覚制御情報の位置ずれは原理的に発生しない。加えて、映像表示装置が映像表示と情報送信、双方の役割を同時に果たすため、外部の測定・通信装置が不要な、小型で設置自由度の高い視触覚重畳提示システムが実現できる。

2. 研究成果

(1) 概要

ACT-X 研究実施により、(1)輝度変調光を用いた触覚提示デバイス制御による視触覚重畳提示、(2)色度変調光を用いた触覚提示デバイス制御技術基盤の確立、(3)受光センサを持つ投影対象への情報投影による動的プロジェクションマッピング(PM)、(4)物体表面の特定位置における触覚提示を実現する物体構造の設計・作製手法、(5)プロジェクションマッピング(PM)におけるプロジェクタ配置の効率的探索手法の5つの研究成果を得た。

研究成果(1)について、映像に対する触覚提示の位置ずれ・時間遅れを知覚不可能なレベルに低減する視触覚重畳システムを開発した。具体的には、空間分割型可視光通信を用いて映像に情報を埋め込み、この情報を用いて触覚提示デバイスを制御した。結果、時間遅れと位置ずれが人間には知覚不可能なレベルに低減されたシステムを実現した。加えてアプリケーションについて、触質感デザイン支援や視触覚図鑑システム、視・聴・触覚インタラクティブマップ、遠隔コ



コミュニケーションにおける撫で感提示を実装し、システムの有用性を確認した。

研究成果(2)について、色度変調を用いた映像への情報埋め込みにおいて埋め込めるデータ量について検討し、一般的な画像について少なくとも 5 通りのデータが埋め込めることを明らかにした。加えて、フォトダイオードを用いた色振動検出回路を開発し、この回路基板を使用して色振動が検出できることを確認した。

研究成果(3)について、受光センサを投影対象物体に埋め込んだ構造設計し、この物体に対して位置情報を埋め込んだ映像を投影することで動的な PM を実現した。入力された構造に対して自動でセンサ配置を決定して投影対象物体を設計し、これに対して実際に映像を投影することで、提案システムが動的 PM 環境での使用に十分な性能を持っていることを確認した。

研究成果(4)について、触覚振動子の振動を構造内で伝播させることで、物体表面の特定位置のみにおいて触覚提示が可能な物体構造を設計、作製する手法について提案した。具体的には、硬い振動伝播構造と柔軟な振動吸収構造を、3D プリンタで一体的に造形することで構造を作製した。また、振動伝播構造の表面には振動が伝播しつつ、振動吸収構造の表面では振動が減衰していることを確認した。

研究成果(5)については発展的に取り組んだ内容であり、プロジェクションマッピングにおける複数プロジェクタ配置の最適化問題について、星状カーネル分解を応用した配置探索手法を提案し、様々な対象物について高速にプロジェクタの最適な配置を求めることができることを確認し、さらに光源を配置したシミュレーションによって求めた配置の妥当性を確認した。

これらの研究成果については積極的に对外発表を行い、国際論文誌 1 件、解説記事 1 件、国際会議口頭発表 2 件、ポスター発表 1 件、国内会議発表 3 件の実績を得た。

(2) 詳細

研究成果(1): 輝度変調光を用いた触覚提示デバイス制御による視触覚重畳提示

【輝度変調を用いた映像への触覚制御情報埋め込み手法の確立】

輝度変調を用いた情報投影技術により、映像へ触覚制御情報を埋め込む手法を確立するためのシステムを開発した。高速 DLP プロジェクタを用いて、空間分割型可視光通信 (PVLC) により映像に触覚制御情報を埋め込むことができるシステムを開発した。また、PVLC で伝送可能な情報量は限定的であるため、触感パターンの ID を埋め込み情報としてシステムを構築した。結果として、人間がちらつきを知覚しない 50 Hz の更新レートで触覚パターン ID を埋め込んだ映像を投影する手法が構築できていることを確認した。

【輝度変調光制御型触覚提示デバイスの開発】

映像の輝度変調光により制御可能な触覚提示デバイスを開発し、ユーザがデバイスを装着することによる視触覚重畳提示を実現した。触覚提示デバイスとして、指先端の爪上部に振動子を配置した指先装着型デバイス、ペン軸内に振動子を配置し、スタイラスのように対象物に間接的に触れて使用するペン型デバイス、また、上腕部に巻きつけて装着し、広範囲に触覚を提示する腕装着型デバイスの 3 種類を開発した。開発したデバイスの様子を図 1 に示す。

指先装着型デバイスとペン型デバイスの評価として、視触覚重畳提示において人間が弁別可能な時間的整合性(時間遅れ)と空間的整合性(位置ずれ)の刺激閾を明らかにするため知覚実験を行った。これは、提案システムが視覚刺激-触覚刺激間の時間遅れと位置ずれが小さい視

触覚重畳提示を実現したことで初めて実験が可能となったものである。実験の結果、指先装着型デバイスとペン型デバイスの時間遅れの刺激閾はそれぞれ約 100 ms と約 160 ms、位置ずれの刺激閾はそれぞれ約 10 mm と約 15 mm であることがわかった。提案する触覚提示デバイスにおける遅延時間の最大時間は計測の結果 96.3 ms であり、提案システムはピクセル単位(本システムの設計においては 0.82 mm)で情報を埋め込んでいることから、投影光制御によって、人間に違和感のない形で視触覚重畳提示が可能な性能を持つことが確認できた。また、ペン型デバイス刺激閾が指先装着型デバイスのそれより緩い条件となっているが、これは接触の直接性がペン型デバイスの方が低いことが要因と考えられる。

腕装着型デバイスの評価では、まず人間が弁別可能な時間的整合性の刺激閾を明らかにするための実験を行った上で、複数個の振動子による撫で感提示に必要なデバイスの設計指標を明らかにするために実験を行った。結果、時間的整合性の刺激閾は約 500 ms であり、撫で感の連続性と快感を最大化するパラメータはストローク速度 80mm/s、素子間隔 0 mm であることが明らかとなった。また手の映像を撫で感提示と同時に投影する場合、素子間隔が疎でも連続的で心地よい撫で感提示が可能であることが示唆された。これは、触覚提示の質を維持したまま、軽量化、低消費電力化を実現できることを意味している。

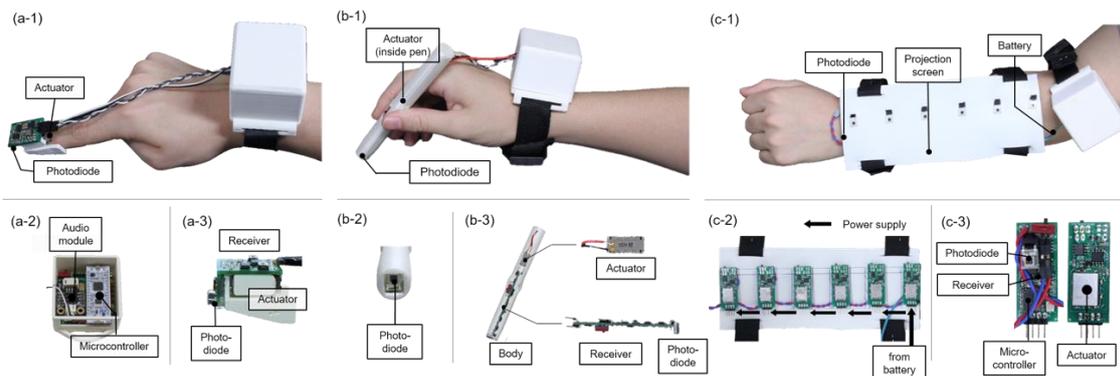


図 1: 開発した触覚提示デバイス (a) 指先装着型、(b) ペン型、(c) 腕装着型

【輝度変調光制御型触覚提示デバイスを用いたアプリケーションの開発】

輝度変調光制御型触覚提示デバイスをユーザが装着する視触覚重畳提示を用いたアプリケーションの開発を行った。指先装着型デバイスとペン型デバイスを用いたアプリケーションとして、産業用途への展開として曲面スクリーン上における表面テクスチャのデザイン支援システム(図 2 左)、教育用途への展開として視触覚図鑑システム(図 2 中央)、バリアフリー支援用途への展開として視・聴・触覚インタラクティブマップシステムを実装した。また、腕装着型デバイスを用いたアプリケーションとして、手の映像投影と腕への撫で感提示により、リモートユーザからの接触を伴う遠隔コミュニケーションを実現するシステムを実装した(図 2 右)。

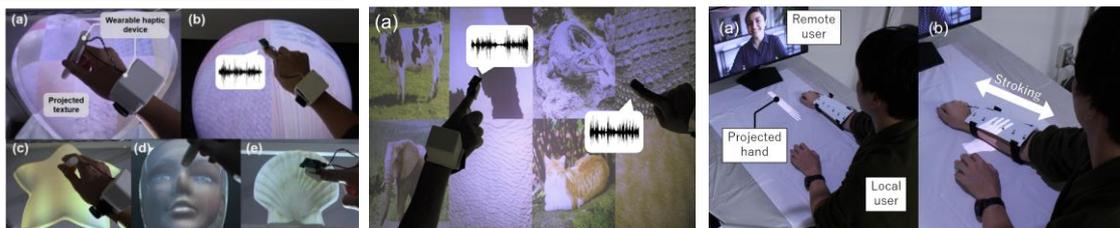


図 2: 提案した視触覚重畳提示システムを用いて実装したアプリケーション

本研究成果については、触覚分野のトップ会議である EuroHaptics にて口頭発表 [1]、インタラクション技術分野のトップ会議である ACM SIGGRAPH Asia にて口頭・デモ発表 [5] を行っており、高い評価を得ている。

研究成果(2):色度変調光を用いた触覚提示デバイス制御技術基盤の確立

【色度変調を用いた映像への触覚制御情報埋め込み手法の確立】

色度変調を用いた映像への情報埋め込みにおいては、R、G、B 3 色の振動をそれぞれ制御することで、原理上は $2^3 = 8$ 通りの情報を埋め込むことができる。一方、映像中の画素の色によっては、輝度を一定に保ちつつそれぞれの色度を変調することができないため、実際には何通りの情報を埋め込むことができるのかは明らかになっていなかった。

そこで、様々な色や画像について少なくとも 1 通りの色振動パターンを生成できることを明らかにするため、色振動画像生成プログラムを実装した上で実験を行った。結果、代表色として選定した黒、灰、白、赤、緑、青、シアン、マゼンタ、グレーの 9 色の画像と USC-SIPI image database に含まれる Lena, Mandrill, Couple といった画像群について色振動パターンが生成でき、90%以上の高い精度で振動を検出できることを明らかにした。また、様々な色について果たして何通りの情報を埋め込んだ形で色振動パターンを生成できるのかを明らかにするために、色振動画像生成プログラムを実装した上で実験を行った。結果として、前述した代表色 9 色のそれぞれについて、少なくとも 5 通りの色振動パターンを生成できることを明らかにした。

【色度変調光制御型触覚提示デバイスの開発】

映像の色度変調光により制御可能な触覚提示デバイスを開発するために、フォトダイオードを用いた色振動検出回路を開発した。半波整流回路を応用することで、信号増幅と振動検出の双方をハードウェア処理で実現可能な回路基板を開発した。また、前述した 5 通りの色振動パターンを含む代表色 9 色の画像について、開発した回路基板を使用して色振動が検出できることを測定実験により確認した。

本研究成果については国際ジャーナルである ITE MTA に採録され [2]、また技術雑誌に解説記事を執筆、掲載されており [3]、高い評価を得ていると言える。

研究成果(3):受光センサを持つ投影対象への情報投影による動的 PM

制御情報を受光するセンサを投影対象物体に埋め込んだ構造について、3D モデルを入力として自動的に設計・出力し、この物体に対して位置情報を埋め込んだ映像を投影することで動的な PM を実現した。ここで、PM の実現には投影対象物体のプロジェクトに対する位置・姿勢推定が必要である。これは、投影対象の受光センサ配置位置を用いて PnP (Perspective-n-Point) 問題を解くことで実現できるが、この PnP 問題を解く際には最低 6 点の対応関係が必要である。そこで、投影対象物体の 3D モデルを入力とし、どの地点からでも最低 6 つの光センサでプロジェクト光を受光できることを探索条件として、モンテカルロ法によりセンサ配置を決定、結果を出力するシステムを開発した。また、実際にセンサを埋め込んだ投影対象物体に対して映像を投影し、動的 PM が実現できるのかを確認した。結果、映像と埋め込み情報の更新は約 20 fps で実現でき、また投影対象物体を平行移動させた際の位置推定における誤差は 1%未満であることを実験により示した。以上より、提案システムが動的 PM として十分な性能を持っていることを確認した。

本研究成果については、国内会議にてポスター発表 [7] を行った。

研究成果(4): 物体表面の特定位置における触覚提示を実現する物体構造の設計・作製手法

触覚振動子の振動を構造内で伝播させることで、物体表面の特定位置のみにおいて触覚提示が可能な物体構造を設計、作製する手法について基礎的な検討を行った。具体的には、硬い素材(ABS 樹脂)による振動伝播構造と柔軟な素材(TPU 樹脂)による振動吸収構造を、3D プリンタを用いたマルチマテリアル 3D プリントによって一体的に造形することで、構造の特定部位にのみ触覚振動を伝播させる構造を設計、作製した(図 3)。また、提案した構造における振動伝播構造と振動吸収構造のそれぞれについて振動を測定し、振動伝播構造の表面には振動が伝播しつつ、振動吸収構造の表面では振動が減衰していることを確認した。本研究成果については、国内会議にて口頭発表 [6] を行った。

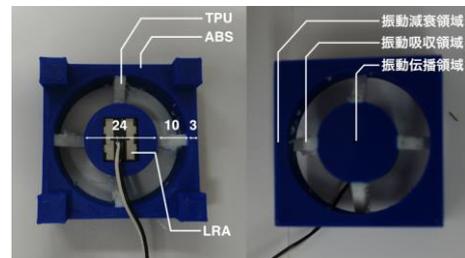


図 3: 振動子と振動伝播/吸収構造

研究成果(5): PM におけるプロジェクタ配置の効率的探索手法

本研究において PM 技術は重要な構成要素であるが、この PM において投影対象の周囲に設置するプロジェクタの配置最適化については当初の研究項目には含めていなかった。しかし、研究を進めるにつれて、この最適化問題における効率的な探索手法の構築が重要であると考え、発展的内容として着手することとした。一方で、この PM におけるプロジェクタ配置最適化問題には様々な最適化指標が存在するため、これまではヒューリスティックな解法しか提案されておらず、その計算には長い計算時間を要している。そこで、多角形ポリゴンで表現された投影対象物体について、これを星状カーネルに分解することで、この投影対象の全面を照らすことができるプロジェクタの最適配置を効率的に求める手法を提案した。従来の手法では配置探索に数十分の時間を要していたところ、提案手法を用いることで数十ミリ秒～数秒程度で配置を求めることができることがわかった。また、求めた位置に光源を配置した際に、投影対象物体の全面を照らせてるかどうかについて、簡単な形状についてシミュレーションにより確認した(図 4)。

本研究成果については、AR 分野のトップカンファレンスである IEEE VR にてポスター発表 [4] を行った。

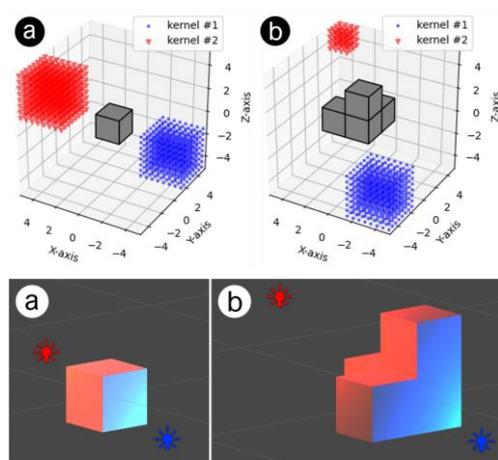


図 4: プロジェクタ配置候補とその検証

(3) ACT-X 研究を通じて実現した、ACT-X 研究領域内外の研究者や産業界との連携

ACT-X 研究者の早瀬研究員、池助教、領域運営アドバイザーの坪井俊特任教授、また領域外の数学者である大阪市立大 吉脇研究員と共同で研究を実施し、投影型 AR における課題に数理分野からアプローチして研究成果(5)を得られたのは意義深かったと考えている。

3. 今後の展開

ACT-X 研究開始時に、その最終的なビジョンとして「空間内の物体の見た目と触感を自在に操作できる環境の実現」を設定していた。これを踏まえてACT-X 研究では、空間内に多数のプロジェクタを効率的に配置し、これらのプロジェクタから触覚情報を埋め込んだ映像を投影することによる視触覚重畳提示技術について、特にユーザが触覚提示デバイスを装着する系についての基盤技術を構築することができた。これは、設定したビジョンを実現する第一歩として十分に満足できる成果であると考えている。

今後の研究展開として、短期的にはまだ途上である(a)ユーザが触覚提示デバイスを装着しない系についての基盤技術構築が、長期的には(b)この視触覚重畳提示技術を用いた人間の能力拡張手法の確立が重要であると考えている。研究展開のタイムスパンとして、映像投影技術やアクチュエータ技術の進展を踏まえながら、10-20 年程度のスパンで最終的なビジョンの達成に向けて研究に取り組んでいきたいと考えている。

4. 自己評価

(1) 研究目的の達成状況

ACT-X 研究の目的は「時間遅れと位置ずれを人間が知覚不能なレベルまで低減した視触覚重畳提示を小型かつ設置自由度の高いシステムとして構築すること」であり、その達成のために実施する研究項目(i)-(iv)を設定した。結果として4つすべての研究項目に着手した上で先述した5つの研究成果を得ることができ、研究の目的は大枠として達成できたと考えている。

一方で、研究項目(i),(ii)を中心とする、ユーザがデバイスを装着する視触覚重畳提示については研究項目(iv)であるアプリケーション開発も含めて幅広い取り組みができたものの、研究項目(iii)を中心とする、ユーザがデバイスを装着しない視触覚重畳提示については基盤技術の構築に留まっている状況である。この要因としては、特に研究成果(1)について、視触覚重畳における人間の知覚特性の解明から様々な用途への応用という広範囲に渡って着手したため想定より時間を要したこと、さらに発展的な内容として研究成果(5)に関する研究に取り組んだことが挙げられる。

(2) 研究実施体制

2019 - 20 年度は大阪大学にて実施し、2021 年度は筑波大学にて実施した。また、研究成果(5)については、ACT-X 研究者である富士通研究所 早瀬友裕研究員、東京大学 池祐一助教の両名と領域運営アドバイザーである武蔵野大学 坪井俊特任教授、大阪市立大 吉脇理雄研究員と連携して研究を実施した。

(3) 研究成果の科学技術および社会・経済への波及効果

研究成果(1)については、独自開発した高速かつ高空間解像度な視触覚重畳提示制御システムを使用して被験者実験を実施することで、これまで未検証であった視触覚重畳の時間的・空間的整合性に関する人間の知覚特性を明らかにすることができた。これは様々な視触覚重畳システムの設計指針として役立つと同時に、知覚心理実験のためのテストベッドとしても活用できるものであり、科学技術への重大な貢献であると言える。また、研究成果(5)については、数理



研究者との本格的な協働によって成し得たものであり、投影型 AR 研究コミュニティにとってインパクトのある仕事であったと自負している。加えて、研究成果(1)における表面質感設計など実産業応用の視点から応用可能性を検討し、研究成果(2)についてもパブリックサイネージ等で応用可能な技術として技術雑誌から注目されるなど、社会実装を見据えて研究を遂行できたと考えている。

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:2件

1. Y. Miyatake, T. Hiraki, T. Maeda, D. Iwai, and K. Sato: "Visuo-Haptic Display by Embedding Imperceptible Spatial Haptic Information into Projected Images," Haptics: Science, Technology, Applications, Lecture Notes in Computer Science, vol. 12272, pp. 226-234 (2020.9).

様々な視覚・触覚情報の組み合わせを利用することで、物理サーフェス上に視触覚が重畳された感覚を提示することができる投影ベースの視触覚拡張現実感システムを提案した。システムは高速プロジェクタとウェアラブル触覚ディスプレイで構成されており、空間分割型可視光通信 (PVLC) を用いることで、ユーザには知覚できない制御信号を投影画像に埋め込み、これにより触覚ディスプレイを制御できる。

2. S. Abe, T. Hiraki, S. Fukushima, and T. Naemura: "Imperceptible Color Vibration for Screen-Camera Communication via 2D Binary Pattern," ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol. 8, no. 3, pp. 170-185 (2020.7).

パブリックディスプレイの増加に伴い、QR コードなどをスマートフォンのカメラで認識することによるディスプレイ-カメラ間通信が注目されている。しかし、このような可視パターンはコンテンツ映像の見た目を損なわせてしまうという課題があった。そこで、ディスプレイの各画素の色度を高速で振動させ、これをカメラで認識することで映像の見た目を損なわないディスプレイ-カメラ間通信を実現した。

(2) 特許出願

なし

(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)

【解説記事】

3. 阿部 知史, 平木 剛史, 福嶋 政期, 苗村 健: "ディスプレイ映像の色振動を用いた不可視 QR コードの研究", 画像ラボ, vol. 32, no. 3, pp. 45-51 (2021.3).

【国際会議発表】

4. T. Hiraki*, T. Hayase*, Y. Ike*, T. Tsuboi, and M. Yoshiwaki: "Viewpoint Planning of Projector Placement for Spatial Augmented Reality using Star-Kernel Decomposition," In Abstracts and Workshops of the 28th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 583-584 (2021.3). (* These authors contributed equally.)



5. Y. Miyatake, T. Hiraki, T. Maeda, D. Iwai, and K. Sato: “HaptoMapping: Visuo-Haptic AR System using Projection-based Control of Wearable Haptic Devices,” In Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies, pp. 7:1–2 (2020.12).

【国内学会発表】

6. 佐久間 亮太, 平木 剛史: “3次元硬軟構造の一体印刷を用いた振動伝播構造設計の基礎検討”, 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 1E1-5:1-3 (2021.9).
7. 三木 明穂, 平木 剛史, 岩井 大輔, 川原 圭博, 佐藤 宏介: “映像への不可視な画素位置情報埋め込みによる動的プロジェクションマッピング”, 情報処理学会 インタラクション 2020 論文集, pp. 1014–1019 (2020.3).
8. 宮武 大和, 平木 剛史, 前田 智祐, 岩井 大輔, 佐藤 宏介: “HaptoMapping: 映像への不可視な情報埋め込みによる視触覚重畳提示”, 情報処理学会 インタラクション 2020 論文集, pp. 425–430 (2020.3).