

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

加速フェーズ期間：2022年4月～2023年3月

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。

加速フェーズ研究では、ACT-X 研究のねらいのうち、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については十分な成果が得られたことを踏まえ、視触覚提示システムを小型かつ設置自由度が高い形で構築することを研究の目的とする。特に、素手で利用するため広範な応用可能性が期待でき、かつ ACT-X 研究で十分に検討できなかった、ユーザが触覚提示デバイスを装着せずに使用できる視触覚重畳提示システムの技術基盤構築について中心的に扱う。

また、ACT-X 研究で培った数理科学分野の研究者ネットワークと連携し、数理最適化を用いた手法を活用することで、当初想定していたヒューリスティックな手法を用いる場合よりも高速性や効率性の観点においてより高いレベルで課題を達成することもねらいとしている。これにより、触覚提示デバイスを装着せずとも時間的・空間的に高度に融合した視触覚提示を、様々な映像投影環境に対して適用・拡張可能な形で実現するための技術基盤を確立する。これにより、ACT-X 研究で未達成であった部分について、より発展的な内容に取り組んだ上で解決することを目指す。

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2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。

加速フェーズ研究の実施により、(6)空中像への色度変調を用いた情報埋め込みによる視触覚重畳提示、(7)色度変調を用いた情報埋め込みにおける色振動探索の高速化、(8)振動伝播/吸収構造配置の数理最適化による触覚ディスプレイの開発の3つの研究成果を得た。これらはACT-X研究の研究成果を発展させた内容となっているものである。

これらの研究成果についても積極的に对外発表を行い、国際会議ポスター発表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。

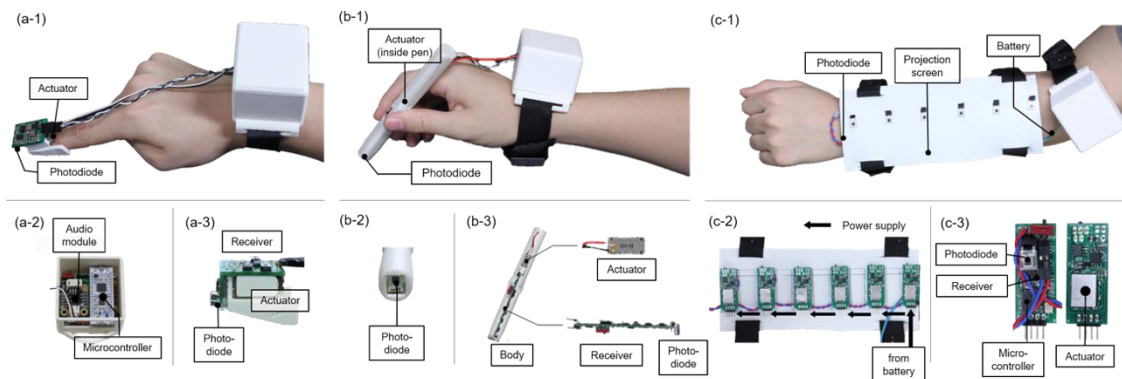


図 1: 開発した触覚提示デバイス (a) 指先装着型、(b) ペン型、(c) 腕装着型

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。

【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)。

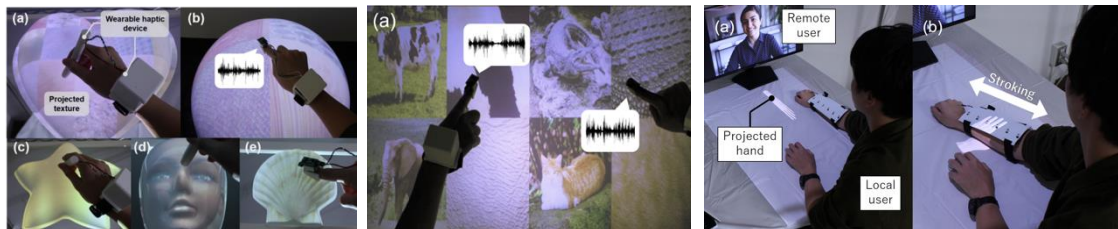


図 2: 提案した視触覚重畳提示システムを用いて実装したアプリケーション

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 [2]、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 [7] を行っており、高い評価を得ている。加えて、AR 分野のトップ国際論文誌である IEEE TVCG に論文が掲載され [1]、また AR 分野のトップ国際会議である IEEE VR において本論文に関する発表を行なった。

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 [3]、また技術雑誌に解説記事を執筆、掲載されており [4]、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タに対する位置・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タ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 [12] 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

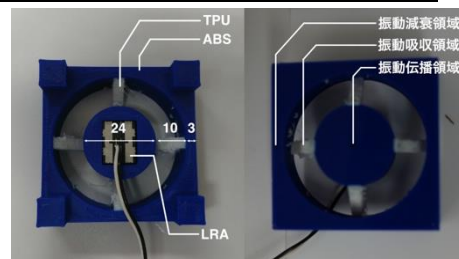


図 3: 振動子と振動伝播/吸収構造

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 [11] を行った。

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に、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い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)。

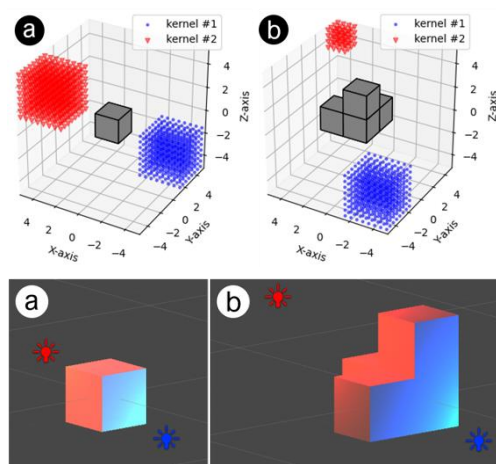


図 4: プロジェクタ配置候補とその検証

に求める手法を提案した。従来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い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 [6] を行った。

研究成果(6): 空中像への色度変調を用いた情報埋め込みによる視触覚重畳提示 (加速フェーズ)

空中像の視覚情報に対応した触覚刺激を提示する際、空中像とユーザの手の位置を対応付けるには、一般的に赤外線カメラや深度カメラを用いるため、映像に対する位置ずれや、計算や通信による時間遅延が発生していた。そこで、不可視の色振動を用いて空中像の映像自体に不可視な光信号として情報を埋め込み、この色度変調光を用いて触覚ディスプレイを制御することで、位置ずれや時間遅延を人間が知覚できない程度に低減し、空中像に視触覚重畳提示を実現することでテクスチャ感を付与することが可能なシステムを開発した。

LCD ディスプレイと再帰透過光学系を用いて空中像ディスプレイを構成し、また、色度変調光を受光するためのフォトダイオードを用いた受光センサ回路と、映像に対応したテクスチャ感を提示できる光制御型の触覚ディスプレイデバイスを開発した。

実験では、9 つの異なる単色の空中像において、R, G, B チャネルの振動の組み合わせにより、どの色の空中像についても少なくとも 2 通りの信号を受信できることが示された。また、表示した空中像の光を触覚ディスプレイデバイスの受光センサ回路で受光し、実際に信号の受信と振動の提示が可能であることを確認した。本研究成果については、国内会議にて口頭発表 [9] を行っ

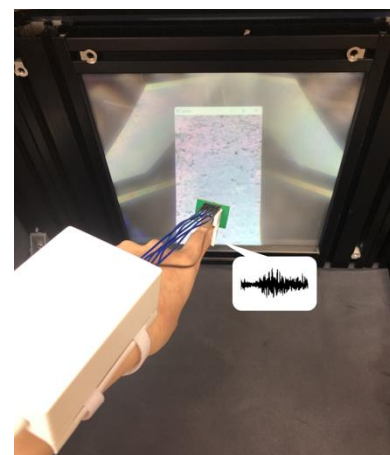


図 5: 空中像への視触覚重畳提示の様子

た。

研究成果(7):色度変調を用いた情報埋め込みにおける色振動探索の高速化(加速フェーズ)

色度変調を用いた情報埋め込みにおいて、従来手法 [Abe et al., CHI 2017 EA] ではある1つのパラメータにおいて、色振動を構成する色の組み合わせ(色ペア)を探索することは高速であったが、適切な色振動を見つける際に探索すべきパラメータの組み合わせは膨大であるため、この色の組み合わせの探索に必要な時間が、色や情報が増えるたびに爆発的に増加していた。

そこで、不可視の色振動を用いて情報を重畳する際に、不可視の色振動を構成する色ペアを高速に探索する手法を提案した。提案手法は、従来手法において個別に行っていた色ペアの探索を、配列を用いて一括で行い、ここで生成した色ペアの配列から条件を満たす色ペアを抽出することにより、高速な色ペア探索を実現した。具体的には、目標色を Lab 色空間での表現に変換して L^* 、 a^* 、 b^* の各チャンネルの配列に分解し、そのうち a^* チャンネルと b^* チャンネルの配列のみにパラメータ配列 D_a と D_b を加算し、加算後の配列を L チャンネルの配列と再度結合させることで、輝度を固定した色平面において、目標色から移動した色の配列を作成し、同様に、パラメータ配列を減算した配列も作成することで、目標色を中心として点対称となる色ペアを効率的に探索する手法を実装した(図 6)。これにより、行列計算を利用することで並列的に色ペアを探索できるため、効率的な探索が可能となった。実験においては、MacBook Pro (13-inch, 2019) を用いて、9 色の単色画像について、R, G, B チャンネルのそれぞれを振動させる色ペアを探索した。結果、探索に要した時間は、従来手法による探索が 3423.07 s、提案手法が 62.62 s であり、提案手法は従来手法と比較して約 54 倍高速な探索が可能であることを確認した。本研究成果については、国内会議にて口頭発表 [10] を行うと共に、インタラクティブ技術分野のトップ国際会議である ACM SIGGRAPH Asia においてポスター発表 [5] を行った。

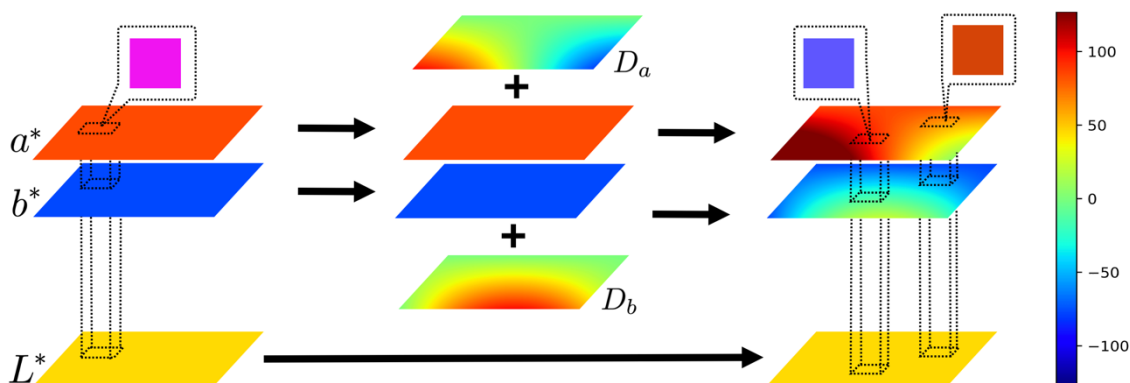


図 6: 提案手法の概要。目標色(図中では紫)を拡大し、 L^* 、 a^* 、 b^* の 3 チャンネルの配列に分解する。分解した配列のうち a^* チャンネルと b^* チャンネルについて、色空間内での移動を意味するパラメータ配列 D_a と D_b をそれぞれ加算する。そして、パラメータ配列を加算した配列と分割した L^* チャンネルの配列を再度結合することで、目標色から移動した色を複数得ることができる。

研究成果(8):振動伝播/吸収構造配置の数理最適化による触覚ディスプレイの開発(加速フェーズ)

研究成果(4)において、硬い振動伝播構造と柔軟な振動吸収構造を一体的に造形することで、振動子の振動を物体表面の特定位置のみで提示することが確認できた。しかし、ここでは ad-hoc な構造設計とその構造での振動伝播検証にとどまっており、様々な形状の構造について意図した位置で触覚提示が可能な触覚ディスプレイとして設計する手法としては構築できていなかった。そこで、与えられた 3 次元構造と触覚提示パターンについて、幾何拘束を考慮して振動伝播/吸収構造を配置した物体構造を自動的に設計、出力し、触覚ディスプレイとして構成するための手法を検討した。3 次元構造については、振動吸収領域を繰り返される単位構造によって実現するとともに、その単位構造には正弦波形状を採用することとした(図 7)。また、この構造内における振動伝播について有限要素法ソフトウェアを用いてシミュレーションし、構造の特徴を変化させながら振動伝播特性を出力することで、その影響について検討した。加えて、ある構造について実際に造形し、振動子を密着させた際の振動伝播を計測し、振動伝播領域と振動減衰領域で振動伝播が制御できていることを確認した(図 8)。本研究成果については国内会議にて口頭発表 [8] を行った。

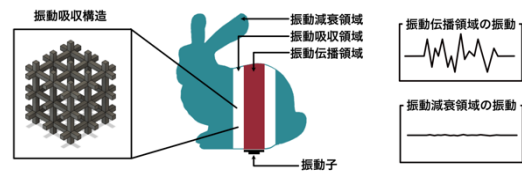


図 7: 提案手法の概要

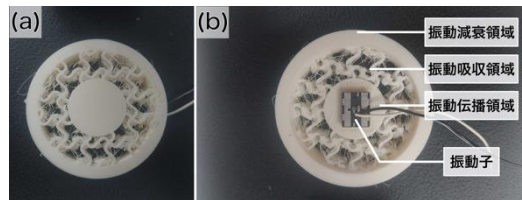


図 8: 実際に造形した振動伝播構造

(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、また領域外の数学研究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トを効率的に配置し、これらのプロジェクト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、映像投影技術やアキ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。

加速フェーズでは、前述した展開(a)について、特に 3 次元構造内での振動伝播を利用した触覚ディスプレイ技術に関する幅広い成果が得られた。これにより、表面質感の視覚的・触覚的再現技術への展開可能性がより一層高まったと考えられる。

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。

(加速フェーズ実施後追記)

加速フェーズにおいて設定した研究目的については、すべてについて着手した上で一定の成果を得ることができ、概ねその目的を達成できたと考えている。一方で、一部の成果については論文を伴う対外的な発表まで完了することができなかったが、これは 1 年間という期間に加えて、研究成果 (6)、(7) のように ACT-X 研究におけるテーマの発展的内容にも取り組んだことが要因だと考えられる。

(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。

(加速フェーズ実施後追記)

研究成果 (6)、(8) についてはそれぞれ異なる筑波大学の研究室学生 1 名と連携して実施した。また、研究成果 (7) については、筑波大学で雇用した学生 1 名と連携して実施した。

(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覚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。
(加速フェーズ実施後追記)

加速フェーズでの研究についても、研究成果(6)において社会的な注目を集めている空中像ディスプレイへのテクスチャ感提示を実現するなど、視触覚重畳システムの応用可能性をさらに高められたという点で、科学技術への貢献を成し得たと考えている。

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

研究期間累積件数: 3件(加速フェーズ実施後更新)

1. Y. Miyatake, T. Hiraki, D. Iwai, and K. Sato: "HaptoMapping: Visuo-Haptic Augmented Reality by Embedding User-Imperceptible Tactile Display Control Signals in a Projected Image," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 29, no. 4, pp. 2005-2019 (2023.4).

視覚と触覚のコンテンツを物理的表面上で一貫した視覚・触覚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である HaptoMapping を提案した。HaptoMapping は、空間分割型可視光通信 (PVLC) を用いて、投影画像にユーザには知覚できない制御信号を埋め込むことで、装着型触覚ディスプレイを制御する。システムは高速プロジェクタと3種類の触覚デバイス(指装着型、スタイラス型、腕装着型)で構成されており、指装着型とスタイラス型は、ユーザの指先に振動を与え、腕に装着するタイプのデバイスは、手の投影マッピングを同期させながら、複数のアクチュエータを用いてユーザーの前腕に撫でるような感覚を与えることができる。

2. 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。

3. 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っ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

研究期間全出願件数:0 件

(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】

4. 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】

5. S. Hattori and T. Hiraki: “Accelerated and Optimized Search of Imperceptible Color Vibration for Embedding Information into LCD images,” In ACM SIGGRAPH Asia 2022 Posters (SA 2022), pp. 16:1-2 (2022.12). (※加速フェーズ実施の成果)
6. 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.)
7. 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】

8. 佐久間 亮太, 平木 剛史: “構造の部分的置換を用いた3次元構造内での局所的振動減衰の基礎検討“, 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 3B3-4:1-3 (2022.9). (※加速フェーズ実施の成果)
9. 永野 里奈, 服部 真吾, 平木 剛史: “不可視の色振動を用いた空中像への情報埋め込み手法の基礎検討“, 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会, pp. 1D4-2:1-4 (2022.9). (※加速フェーズ実施の成果)
10. 服部 真吾, 平木 剛史: “映像への情報重畳のための不可視の色振動の探索高速化と生成可能条件の基礎検討“, 情報処理学会 第84回全国大会講演論文集, pp. 6ZD-09:1-2 (2022.3).
11. 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).
12. 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 インタラクシオン 2020 論文集, pp. 1014-1019 (2020.3).
13. 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 インタラクシオン 2020 論文集, pp. 425-430 (2020.3).