

研究終了報告書

「実世界光線場の文脈に整合した空間拡張現実」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：岩井 大輔

1. 研究のねらい

研究者は、「現実世界の見えを思いのままに編集する」というビジョンのもと、空間拡張現実 (Spatial Augmented Reality) に関する研究を行っている。プロジェクションマッピングを中心とする空間 AR の真価は、そこにはないはずの物体を現実世界に突如出現させるだけでなく、実物の見え方や質感を操作することすら可能とする点にある。このアピランス操作技術は、AI・IoT および人間センシング技術と組み合わせることで、情報環境と実世界を自然な形で融合し、身近な物体はおろか人間の身体をも、インタラクティブな物質、いわばスマートマテリアルへとアップデートし、人間と環境の高度な調和に資すると考える。

一方、従来のプロジェクションマッピングの想定環境は一般的な実環境と乖離し不自然であり、投影映像と実世界を違和感なく融合できていない。この問題の原因は、実世界の光線場 (ライトフィールド) との一貫性を保つことが考慮されなかったことに帰着する。具体的には、プロジェクションマッピングは所望の色を再現するため暗室で利用されるが、これは、人間の生活環境に不可欠な環境照明の光線場が欠落し不自然である。遮蔽による影も、境界が不自然にシャープであるなど実世界光線場とは整合しない。さらにプロジェクションマッピングでは対象に極めて近接し閲覧する状況は多く、投影画素の形が認識できるほど、見かけの解像度低下が顕著となる。過去の研究例を網羅的に調査する中で、この違和感ない融合という課題は、空間 AR 概念提唱から 20 年近くの間、達成されていないばかりか、解決への取り組みすらほとんど行われていない根本的課題であることが分かった。

本研究では、屋内を対象とし、実環境の照明と共存する実世界光線場の文脈に整合したプロジェクションマッピングを実現し、投影した光パターンが投影対象と違和感なく融合し、照明効果ではなく対象面の反射特性の変化として見えるようにすることを目指す。これにより、自然な形で実世界がスマート拡張され、人間と高度に調和するインタラクション基盤を創成する。具体的には、上述の屋内照明の再現、自然な影表現、空間解像度低下の抑制の 3 課題を解決するための映像投影技術を開発してその有効性を検討する。また、各種インタラクションを実装し、提案プロジェクションマッピングの自然さや、人間の行動や価値判断に与える影響を解明する。

2. 研究成果

(1) 概要

研究のねらいに記した 3 課題「屋内照明の再現」、「自然な影表現」、「空間解像度低下の抑制」を解決するため、「光線場制御照明」と「適応光線プロジェクタ」の各技術を開発した。

「光線場制御照明」は、複数台のプロジェクタを用いて多方向から重畳投影することで、屋内照明を再現しつつ、自然な影表現を実現する技術である。2020 年度に 7 台のプロジェクタを用いて前者(屋内照明の再現)を、2021 年度に 25 台のプロジェクタを用いて後者(自然な影表現)の原理検証を行った。2022 年度には、プロジェクタ 1 台でも自然な影表現が可能な大口径プロジェクタの投影画質を向上させる技術と、タッチインタラクションを可能とする接触検出技術を確立した。並行して、屋内照明化したプロジェクタを活用した、新たなユーザ体験を創出する研究を行った。2019 年度から 2020 年度にかけて、高速に焦点位置を制御可能な焦点可変レンズをユーザの眼鏡として利用して、プロジェクタ照明と同期させることで屋内環境の任意面をぼかしたり拡大してみせる技術を開発した。さらにこの技術を発展させ、2021 年度には、実物上に空中像を提示する立体プロジェクションマッピングにおいて、人間の両目の輻輳と焦点調節を一致させて空中像を表示する技術を開発した。

「適応光線プロジェクタ」は、投影対象上での画素密度を可変とすることで、効率的に高解像度な映像投影を実現する技術である。2019 年度に空間光位相変調器を動的な自由形状レンズとして用いることで、プロジェクタの解像度を空間的に操作する手法の開発に着手し、2021 年度までに基盤技術を確立した。さらに、2020 年度から 2021 年度にかけて、解像度低下の主要因である焦点ぼけをデジタル画像補正により補償する技術の研究も行った。従来、プロジェクタの各画素がどの程度ぼけるのかを予め計測する必要があったが、深層生成技術を用いることで、その較正プロセスをスキップして焦点ぼけ補償画像を生成する技術の開発に成功した。

上記の基盤技術開発に加え、1 期生の伊藤勇太 准教授(東京大学)との領域内連携、国内メーカー企業、海外大学との研究領域外連携が進んだ。

達成状況: 基盤技術の開発に関しては、当初の計画以上に進展した。一方、そのインタラクション応用についての評価については、十分ではない部分もあったと考えている。以上より、全体的には、一部未達であるものの、当初計画はおおむね達成されたと考えている。

(2) 詳細

研究テーマ A「実世界の光線場を操作する光線場制御照明の実現」

2020 年度より、プロジェクションマッピングによって屋内照明を再現する研究を実施した。暗室でのプロジェクションマッピングでは、暗闇に投影対象のみが明るく浮かび上がる不自然な体験となる。一方、明室下でプロジェクションマッピングすると、低輝度を正しく表示できないため、投影結果のコントラストが低下する。そこで本研究では、屋内照明を消灯し、複数台のプロジェクタでそれを再現しつつ、投影対象の見えを操作するシステムを、プロジェクタ 7 台を用いて構築した。屋内照明が照射していたときの周囲環境の色を、予めカメラで記録しておき、それを再現するようプロジェクタの各画素の色を計算する技術、および、複数台の投影重畳領域においてなめらかに映像を接続する技術を開発した。実験により、屋内照明を再現し、コントラスト低下



図 1: プロジェクタを用いた屋内照明再現とそのプロジェクションマッピング結果



図 2: 25 台投影による自然な影表現

を抑えつつ対象の見える操作できることを確認した(図 1) [その他の成果 4]。

2021 年度より、自然な影表現を可能とするプロジェクションマッピングシステムの構築を試みた。前提として、屋内照明下で生じる影を自然な影と考えた。屋内照明は、環境中の実物に多方向から光を照射しているため、その一部のみが遮蔽されたいわばソフトシャドウを自然な影とする。本研究では、25 台のプロジェクタを 5×5 の 2 次元アレイにして天井に分散配置し、下方の実物を多方向から照射するシステムを構築した(図 2) [その他の成果 3]。同システムを用いて下方に設置した机上に映像を投影し、その上に手・腕をかざしたところ、映像が完全に遮蔽されることがないことを確認した。また、副次的効果として、一台での投影と比べて机上での鏡面反射が弱まり、プロジェクションマッピング特有のぎらつき感も抑制できることが確認できた。手・腕による遮蔽状態の印象を 10 名の被験者にアンケートしたところ、全員から、プロジェクタからの投影像が遮蔽されているというよりも、むしろ屋内照明が遮蔽されていたように感じた、という回答が得られ、所望の効果が得られたことを確認した。

2022 年度には、プロジェクタ 1 台での自然な影表現にも取り組んだ。本研究の申請前に、空中像提示用の再帰透過光学素子を用いた大口径プロジェクタを構築してその原理検証を行っていたが、投影結果のコントラスト低下が顕著であった。これに対し本研究において、光の経路を解析することで、光学素子の特定の部位を遮蔽する空間マスクを適用することで、画質を大幅に改善できることを示した。さらに、投影物体への接触を検出する技術を考案し、接触操作によって投影コンテンツを切り替えるタッチインタラクションを可能とした(図 3) [代表的な論文 3]。

プロジェクタを屋内照明としてのみ利用するのは、本来の映像投影能力のほんの一部しか活用できていないことに他ならないため、プロジェクタを屋内照明として機能させつつ、新たなユーザ体験を創出することを目指した。2019 年度には、高速に焦点位置を制御可能な焦点可変レ



図 3:大口径プロジェクションにおける空間マスクの画質改善効果とタッチインタラクション



図 4:立体プロジェクションマッピングにおける輻輳調節矛盾のない空中像提示

レンズをユーザの眼鏡として利用して、プロジェクタ照明と組み合わせることで屋内環境の任意面をボケさせる技術を開発した。2020 年度はこの技術を発展させ、焦点可変レンズを 2 枚重ねたものを眼鏡として利用することで、屋内環境の任意面を拡大して見せる技術を開発した。さらに 2021 年度には、これらの技術を発展させて、投影対象とは異なる奥行きに空中像を浮かび上がらせて提示する立体プロジェクションマッピングの未解決問題に取り組んだ [代表的な論文 1]。立体プロジェクションマッピングでは、液晶シャッターグラスを用いることで両眼視差を与え、投影像の知覚される奥行きを制御する。一方、焦点調節で知覚される奥行きは対象面に固定されてしまうため、輻輳調節矛盾が生じ、提示像の奥行き知覚が正確でなくなることや、疲労や酔いを誘発してしまうという課題があった。そこで、焦点可変レンズを液晶シャッターグラスに追加して、眼の焦点調節で知覚される奥行きも制御可能にするシステムを構築した(図 4)。被験者実験により、提案する立体プロジェクションマッピングが、空中像の正しい奥行きを観察者に提示可能であることを確認した。

研究テーマ B「投影光線方向を自在に操る適応光線プロジェクタの実現」

2019 年度から、空間解像度低下を抑制する投影技術として、適応光線プロジェクタの開発に着手した。具体的には、空間光位相変調器(Phase-only Spatial Light Modulator: PSLM)を動的な自由形状レンズとして用いることで、プロジェクタの解像度を空間的に操作する手法を研究した。レーザープロジェクタからの投影光を PSLM で反射させることで、PSLM 上の位相パターンに応じて投影光線方向を画素毎に制御する基本原理を考案し、試作システムを構築した。このシステムを用いて、まず提示する位相と光線方向の移動量との関係を調査し、シンプルな線形の関係で表せることを確認した。この知見をもとに、目標とする空間非一様な解像度を設定すると、投影光線群をそのように変調する位相パターンを自動決定するソフトウェアを開発した。投影実験により、所望の空間解像度変調が可能であることを実証した(図 5) [その他の成果 2]。

空間解像度低下の主要因の一つである焦点ぼけを補償する技術についても研究をすすめ



図 5: PSLM を用いた空間解像度変調(くの字面右側の画像の伸びが改善)

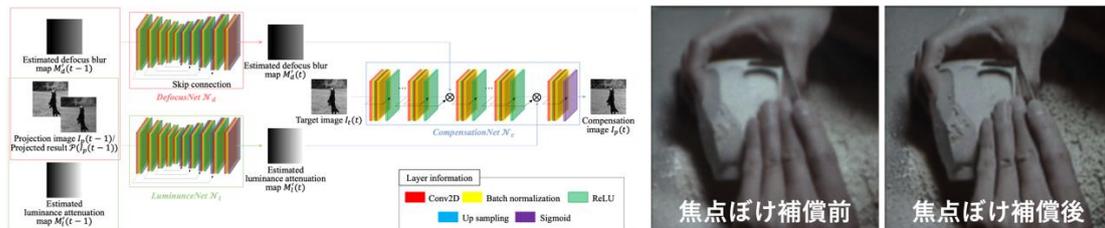


図 6: 深層画像生成ネットワークを用いた焦点ぼけ補償

た。一般的にプロジェクタの被写界深度は狭く、立体物にプロジェクションマッピングする際、焦点ぼけによる画質劣化が顕著になる。従来はこの問題に対し、予め映像のボケ具合を各画素の点拡がり関数 (Point Spread Function: PSF)として計測し、それを元に適切に高周波成分強調する画像補正技術が提案されてきた。これらの手法には、PSF 計測のためにドットパターンのような不自然なパターン投影が必要である上、巨大行列の逆行列計算が繰り返し必要で計算コストが高い、という問題があった。そこで深層画像生成の枠組みを用いて、ドットパターン投影不要かつ動画表示可能な処理速度で補正画像を計算する技術を開発した [代表的な論文 2]。具体的には、深層生成ネットワークを利用し、静止対象(2020 年度)、動対象(2021 年度)それぞれへのプロジェクションマッピングで焦点ぼけを補償できる技術を開発した(図 6)。

当さがけ研究領域内外の研究者や産業界との連携

領域内外ともに連携を進めた。領域外連携としては、国内メーカー企業と、プロジェクションマッピングを工業デザイン(ラピッドプロトタイピング)ツールとして用いることで、大量の実モックアップを試作する必要なく、様々な質感・形状を検討可能であることを確認した。また、国際強化支援を受け、海外大学とプロジェクタ較正に関する共同研究が進み、拡張現実感の主要国際会議へ論文投稿を行った。領域内連携としては、1期生の伊藤勇太 准教授(東京大学)と、領域内での議論をベースに、科研費・学術変革領域研究(A)の計画班研究「人間機械融合視覚による質感認識能力拡張」を申請し採択され、現在共同研究を進めている。

達成状況

基盤技術の開発に関しては、当初の計画以上に進展した。一方、その評価については、知覚レベルのものが主体であり、インタラクション応用時の行動や価値判断に与える影響にまで踏み込んだ評価はできておらず、十分ではなかったと考える。以上より、全体的に見て、一部未達ではあるものの、当初計画はおおむね達成されたと考えている。

3. 今後の展開

今後の研究の展開

「光線場制御照明」と「適応光線プロジェクタ」それぞれの技術、および、インタラクション応用の3つの観点から、今後の研究の展開について述べる。

光線場制御照明については、スケーラビリティに関してさらに研究を進める必要がある。屋内照明による光線場をプロジェクタで再現することを考えると、現行システムよりも多数のプロジェクタを環境中に分散させ、より多方向の光で空間を満たすべきであることが本研究を通じて明らかになった。しかしながら、これには消費電力の問題と、制御 PC の問題がある。消費電力の問題については、台数が増えればプロジェクタ 1 台毎の明るさは低くても良いため、10W 程度で駆動するより小型の LED プロジェクタを用いる展開が考えられる。一方、制御 PC については、現行システムで用いている大型ワークステーション(消費電力も大きい)では、最大 32 台までにしか同時に映像供給できない。そこで、各プロジェクタに低能力だが低消費電力なシングルボードコンピュータ(SBC)を接続し、ホストコンピュータからブロードキャストされた映像を各 SBC にて幾何補正・色補正して映像送出する、というスケーラブルな仕組みを検討したい。一方、台数が増えると、上述の幾何補正をサブピクセルレベルの精度で行わなければ、投影結果が顕著にぼやけてしまうことも、本研究を通じて明らかになった。幾何補正のベースとなるプロジェクタの画角や位置姿勢パラメータの推定精度は空間的に一定ではなく、ある位置では正しく位置合わせされていても、別の場所ではずれてしまう [その他の成果 1]。そこで、対象の位置に応じてオンラインでパラメータ推定する技術を検討する。

適応光線プロジェクタについては、PSLM をレーザープロジェクタ以外へ適用する展開を検討する。レーザープロジェクタはフォーカスフリーという利点はあるものの、スペックルノイズやアイセーフティの観点から、利用シーンに制約がある。PSLM は、色のスペクトラムおよび空間的なコヒーレンスを想定したデバイスであり、LED 等の光源と液晶・DLP 等の空間光変調器を組み合わせる一般的なプロジェクタへの適用は検討が進んでいない。一般的なプロジェクタの解像度を空間可変にできれば、幅広い利用シーンへの適用が期待できるため、今後の課題としたい。

インタラクション応用については、提案するプロジェクションマッピング環境がユーザの行動や価値判断へ与える影響を調査していく必要がある。有望なアプリケーション対象として、工業デザイン(ラピッドプロトタイピング)、医療現場(主に手術)、食卓を検討する。1つ目については、国内メーカー企業との共同研究により、基盤技術が整っている。また、3つ目については、食品にプロジェクションマッピング用のマーカーを埋め込む技術を確立しており [その他の成果 5]、変形の生じない食品であれば実験はいつでも可能な状態にある。コロナ禍の収束を待つ必要があるが、大規模な被験者実験により、暗室で不自然な影の発生する従来のプロジェクションマッピングと、提案するプロジェクションマッピング環境において、被験者にどのような変容がもたらされるかを、精緻に分析し、本研究提案の有効性についてエビデンスを得ていきたい。

本研究の成果が将来的な社会実装につながるために必要な展開とおおよそのタイムスパン

上述の通り、工業デザイン、医療現場、食卓を提案技術の主たる応用分野と捉えているが、

社会実装の観点からは、大量のプロジェクタを導入する際の機材コスト、設置コスト、消費電力等の課題があり、現状、提案システムは社会的に広く普及する状況にはないと考える。一方、本研究で開発した、複数台のプロジェクタを用いる際の個々の要素技術については、広告・展示といった従来型のプロジェクションマッピング応用シーンにすぐにも展開可能であるため、1～2年程度の短期的にはこのような分野への社会実装を進めていきたい。結婚式場やイベント会場、シェアオフィスなど、既に複数のプロジェクタが導入されており、場の体験に付加価値が求められるような分野では、提案する光線場制御照明技術を導入する障壁は低いと考えられる。プロジェクタの小型化・高輝度化・低価格化の進展から、これらの場において設置されるプロジェクタ台数が更に増加することも見込める。このため、5年程度の中期的にはこのような領域への社会実装を進めていきたい。これらの社会実装をすすめる中で、各種コストの低減とノウハウの蓄積を図り、10年程度を目処に主たるターゲットとしている工業デザイン・医療現場・食卓への展開を進めたい。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

2節の研究成果で述べたとおり、基盤技術の開発に関しては、当初の計画以上に進展した。これは、当初計画から派生した成果(立体プロジェクションマッピングにおける輻輳調節矛盾のない空中像提示、深層画像生成ネットワークを用いた焦点ぼけ補償)が主要国際会議でいずれも論文賞を受賞[代表的な論文 1,2]するなど、学術的に高く評価されたことが証左となっている。一方、開発技術のインタラクション応用時の評価については十分ではなかった。これはコロナ禍により、大規模な被験者実験の実施が難しかったことが一因であるが、技術開発を優先してしまい、ユーザ体験を考慮した適切なコンテンツ制作にエフォートを割けなかった点も要因として挙げられる。以上より、全体的に見て、一部未達ではあるものの、当初計画はおおむね達成されたと考えている。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究の進め方についても、新型コロナウイルス感染症に大きく影響を受けた。研究体制としては、所属研究室の学生数名の協力を得ながら、複数の研究を同時並行して実施する体制とした。しかしながら、ほとんどの研究で、自宅に設置できないほどの大きさの実機を組み上げて実験する必要があり、研究室への入室に制約のあった2020年度を中心に研究の進度は遅くならざるを得なかった。研究費の執行についてもコロナ禍による影響を受けた。特に、2020年度秋以降の半導体不足により購入物品の納期が想定外に後ろにずれ込むことが多く、研究の進捗に影響があった。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究で得られた成果は、その先駆性、独創性、高い水準が評価され、国内外の複数の論文賞や学会での発表賞を受賞しており、学術的な波及効果は高いと評価できる。さらに、本研究の最終年度に、研究者自身が日本学術振興会賞を受賞[その他の成果 6]したことは、本研究の今後の世界的研究への発展性をお認めいただいたものと考えている。

AR(拡張現実感)技術は、DX(デジタルトランスフォーメーション)が進む現代において、

実世界に結び付けられた様々なデータを可視化する技術として有望である。プロジェクションマッピングは、その他の主要な AR ディスプレイ方式と異なり、ユーザがディスプレイを装着したり把持する必要なく、拡張現実を体験することのできる技術である。一方で、人の視覚の目前で情報を現実空間に付加する他の方式と比べて、本研究で課題として挙げていた暗室制約や影の問題が避けられず、これまで広告・展示といった特殊な用途以外での応用が妨げられてきた。本研究では、複数台のプロジェクタを分散配置することで屋内照明を置き換えることができ、上述の問題が技術的に解決可能であることを世界に先駆けて示した。実空間とサイバー空間を自然な形で融合するこの新技術シーズは、今後 DX の進展を加速させ、社会・経済に変革をもたらすことが見込まれる。

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: 12件

1. Sorashi Kimura, Daisuke Iwai, Parinya Punpongsanon, and Kosuke Sato. Multifocal Stereoscopic Projection Mapping. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2021, 27(11), 4256-4266.
液晶シャッターグラスを装着した両目に、適切な視差でずらした異なる映像を見せることで、投影対象上に空中像を提示する立体プロジェクションマッピングという技術がある。この技術では、両眼視差と焦点調節が一致しない輻輳調節矛盾が、奥行き知覚の誤りや疲労を引き起こすという問題があった。本論文では、焦点可変レンズをグラスに取り付けて、焦点調節を両眼視差の奥行きと一致させることでこれらの問題を解決した。発表した国際会議 IEEE ISMAR 2021 にて Best Journal Paper Award を受賞した。
2. Yuta Kageyama, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Online Projector Deblurring Using a Convolutional Neural Network. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2022, 28(5), 2223-2233.
投影対象が移動すると、投影映像の画質が焦点ぼけにより劣化する。投影画像の高周波成分を強調することで、その影響をある程度抑えることができるが、従来、対象が移動する度に投影コンテンツをドットパターンに切り替えて投影し、各画素での焦点ぼけの程度を計測する必要があった。本研究では深層生成ネットワークを用い、ドットパターンを投影する必要なく補償画像を生成することに成功した。発表した国際会議 IEEE VR 2022 にて Best Journal Paper Honorable Mention Award を受賞した。
3. Kosuke Hiratani, Daisuke Iwai, Yuta Kageyama, Parinya Punpongsanon, Takefumi Hiraki, and Kosuke Sato. Shadowless Projection Mapping using Retrotransmissive Optics. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2023, 29(5), 2280-2290.
空中像提示用の再帰透過光学素子を用いた大口徑プロジェクタを構築し、自然な影表現

が可能であることを確認した。また、この光学素子では投影結果のコントラスト低下が顕著であったため、光の経路を解析することで、大口径光学素子の特定の部位を遮蔽する空間マスクを適用することで、画質を大幅に改善できることを示した。さらに、投影物体への接触を検出する技術を考案し、接触操作によって投影コンテンツを切り替えるタッチインタラクションを可能とした。発表した国際会議 IEEE VR 2023 にて **Best Paper Nominees** に選抜された。

(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. 山本健太, 岩井大輔, 佐藤宏介. 画素一致プロジェクタ-カメラシステムによる動的プロジェクションマッピング. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌. 2021, 26(1), 107-116.
(日本バーチャルリアリティ学会論文賞)
2. 寺井晴香, 岩井大輔, 佐藤宏介. 空間光位相変調器を用いた投影画素の再配置による画素密度補正. 映像情報メディア学会誌. 2021, 75(6), 820-823, 2021
3. 岡本峻宙, 岩井大輔, 佐藤宏介. 多方向重畳プロジェクションマッピングによる質感編集. 第 66 回システム制御情報学会研究発表講演会. 2022, 238-240.
(第一著者:システム制御情報学会 SCI 学生発表賞)
4. 竹内正稀, 岩井大輔, 佐藤宏介. 環境照明再現により投影テクスチャのコントラスト低下を抑制するプロジェクションマッピング. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 2022, 3D3-4 (4 pages).
(第一著者:日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞)
5. Yamato Miyatake, Parinya Punpongsanon, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. interiqr: Unobtrusive Edible Tags using Food 3D Printing. Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST). 2022, 84:1-84:11.
6. 日本学術振興会賞(受賞日:2022年12月15日)
岩井大輔. プロジェクションマッピングによる実物の質感の再現および制御技術の開拓.