

# プロジェクションマッピングの基盤技術

岩井 大輔

大阪大学

プロジェクションマッピング, 拡張現実感 (AR), プロジェクタカメラ系 (ProCams)

## 1. はじめに

プレゼン用スクリーンではなく、我々の身の回りの様々な面へと映像を投射するプロジェクションマッピングは、特にエンタメ・広告分野での利用が急拡大し、実際に街中で目にする機会も増えてきた。毎年、入学直後の大学生(理系)に対し、技術キーワードの浸透度合いを調査するが、直近1~2年では、プロジェクションマッピングという言葉を知らない学生はほぼ皆無であり、10年近く前から一定数が知っているという回答していた拡張現実感(AR: Augmented Reality)など他の関連用語よりも、広く認知されていることを実感する。

我が国において、プロジェクションマッピングは当初、東京駅等の巨大な建造物を投影対象としていたが、近年では、ライブパフォーマンス中のポップミュージシャンの身体への映像投射が試みられるなど、投影対象の種類は増大の一途を辿っている。サイズ、形状、および、動きに関して多様な投影面に適切に映像投射するためには、解決しなければならない技術課題が多数存在する。拡張現実感の学術領域では、20年近く、これら課題に対する基盤技術の研究が進められてきており、少なからぬ数の技術が既に実システムで応用されている。

本稿ではまず、現在主流のエンタメ・広告以外のプロジェクションマッピング応用の可能性について述べた後、それらを支える主要な基盤技術を解説する。また、最後には今後の技術トレンドを展望したい。なお、興味ある読者は、分野を俯瞰する書籍<sup>(1)</sup>や調査論文<sup>(2)(3)</sup>を参照いただきたい。

## 2. プロジェクションマッピングの応用展開

プロジェクションマッピングの研究レベルでは、多様な応用が検討されている。ここではその中でも特に、スマートオフィス・スマートホームの文脈で、屋内照明をプロジェクタに切り替えることを想定して研究されている応用展開を列挙する。

- ・ テレビ画面の外側に、映像コンテンツを拡大して投影することで、その没入感を高めるシステム<sup>(4)</sup>
- ・ 自動車の外装および内装の質感やレイアウトを、プロ

ジェクションマッピングにより様々に変更できる工業デザイン支援システム<sup>(5)</sup>

- ・ 美術館等で、色あせた文化財をプロジェクションマッピングにより仮想的に修復するシステム<sup>(6)</sup>
- ・ 油絵を描く際、絵の具の色やストローク等を、プロジェクションマッピングによりキャンバス上に直接指示する絵画制作支援システム<sup>(7)</sup>
- ・ 机の上に積まれた書類の山にプロジェクションマッピングにすることで上の書類から順に透明化し、書類探索を支援するシステム<sup>(8)</sup> (図1左)
- ・ 腕をプロジェクションマッピングにより環境中に伸長することで、手が不自由な高齢者や車椅子利用者が、手を用いた指差し等のコミュニケーションを健常者と同様に行えるようにするシステム<sup>(9)</sup> (図1右)
- ・ 手のひらにボタンのGUIをプロジェクションマッピングし、手のひらをリモコンとして扱うことを可能とするシステム<sup>(10)</sup>
- ・ 写真などの印刷物のコントラストを増幅して、撮影シーンを現実感高く再現するシステム<sup>(11)</sup>
- ・ 人の顔にプロジェクションマッピングして、仮想的に様々な化粧を施すことのできるシステム<sup>(12)</sup>

こういった多種多様な応用を実現するためには、一般的な白色平面スクリーンではなく、模様をついた立体面に適切に映像投影する必要がある、解決すべき技術課題が複数存在する。まず、立体面に投影された像は幾何学的に歪んでしまう

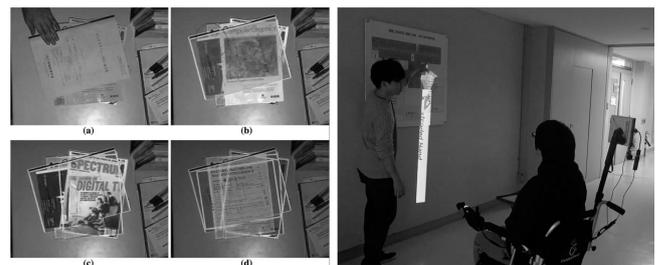


図1 プロジェクションマッピング応用研究例 (左: 書類透明化による探索支援システム, 右: 腕のプロジェクション伸長によるコミュニケーション支援システム)

ため、面形状に合わせて投影画像を変形して補正する必要がある。次に、投影面に模様がある場合、そのまま映像を投影してしまうとその模様が投影結果に浮かび上がって見えてしまう。そこで、投影画素毎に模様をキャンセルするように補償処理を行う必要がある。また、観察者がプロジェクタからの光を遮ってしまったり、面形状が複雑であったりする場合に、プロジェクタからの光が届かない箇所が存在してしまうという問題もある。さらに、プロジェクタは一般的に投影輝度を最大化するため口径が大きく設計されており、被写界深度（シャープな画像を投影できる範囲）が極めて狭い。すなわち、立体面へのプロジェクションでは焦点ボケが生じてしまうという問題がある。人の身体などの移動・変形する投影面に、ピッタリと位置合わせてプロジェクションし続けるための技術開発も必要である。そこで次章では、これら各種の課題を解決する基盤技術を紹介する。

### 3. 基盤技術

#### 3.1 幾何学補正

立体面に映像投影する際に生じる幾何学的な歪みを解決する補正技術について紹介する。具体的には、立体面の各点にどのプロジェクタ画素が対応するかを求める。立体面とプロジェクタ画像平面との幾何学的な関係は、3次元から2次元への射影で表される。すなわち、幾何学補正では、投影する立体面がプロジェクタの光学中心に対して3次元空間中のどこにあるのかという情報を得る必要がある。

プロジェクタ単体では投影シーンの状況を計測することはできないため、プロジェクタと立体面の3次元空間中での位置姿勢関係を計測するためのセンサーを追加する必要がある。これまで、磁気トラッカーや光学式モーションキャプチャを利用するシステムが提案され、広く用いられたが、マーカー等を立体面に取り付ける必要があり、取り付けの手間とマーカー設置位置の精度確保の困難さ、マーカーによる投影結果の阻害等の問題があった。

これに対し、近年ではカメラを用いてマーカーレスでプロジェクタと投影面との位置姿勢関係を計測する手法が提案されている。例えば、一つ前のフレームでの投影面の位置姿勢から、現在フレームの投影結果を推定し、それとカメラで撮影した投影結果とを比較することで、投影面の位置姿勢を求める手法が提案されている<sup>(13)</sup>。また、距離画像も同時取得できる RGB-D カメラを用い、計測した形状情報と投影面の形状モデルとをマッチングすることで、その位置姿勢を推定する方法が提案されている<sup>(14)</sup>。

一方、これらの手法では、球や立方体のような対称形状

の場合には位置姿勢が一意に求まらない。この問題に対して、フルカラー3Dプリンタを用いて画像マーカー付きの投影面を出力し、マーカーベースの位置姿勢推定を行う手法が提案されている。この手法では、マーカーが投影結果を阻害しないよう、後述する色補償技術を適用して視覚的にそれをキャンセルすることも実現している（図2）<sup>(15)</sup>。

ここまで述べてきた手法は、いずれも投影面が剛体であると仮定しており、面が柔軟変形するような場合には適切に動作しない。3次元的に変形する投影面形状を精度良く計測することは難しい問題であるため、カメラ画像平面での2次元的な変形を計測して利用する手法が提案されている。これらでは、ハーフミラーを用いてプロジェクタとカメラの光軸を一致させ、カメラで計測した2次元の変形パターンをそのまま投影画像変形に反映させる<sup>(16)</sup>。1,000 fps のプロジェクタとカメラを用いて、高速かつ低遅延に変形立体面への投影画像位置合わせする手法<sup>(17)</sup>や、高速なプロジェクタカメラ系を用いて、表情変化する人物の顔面に遅れなく位置合わせして映像投影する技術が提案されている<sup>(12)</sup>。

#### 3.2 色補償

模様のついた面に映像を投影すると、その模様が投影結果に現れてしまい、所望の色を表示することができない。そこで、反射率の低い箇所に投影している画素は明るく、反射率の高い箇所に投影している画素は暗くバランスすることで、投影面の模様を視覚的にキャンセルする色補償技術が研究されている（図3）。

単純な手法として、投影画素値と表示される輝度との関係を線形モデルで表す技術が提案されている<sup>(18)</sup>。投影画素

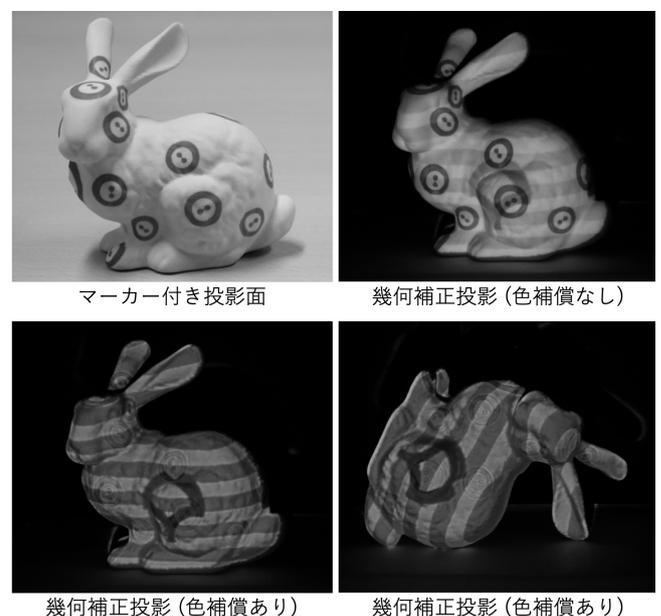


図2 位置合わせ用マーカーをキャンセルする幾何学補正手法

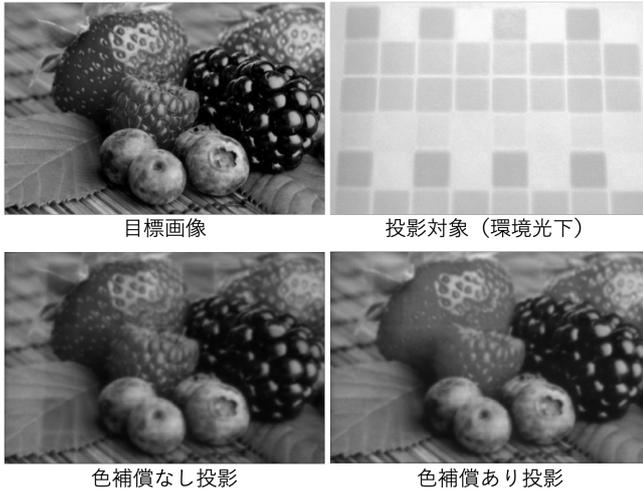


図3 色補償技術

値の計算は画素毎に異なるパラメータを用いて計算を行う必要があるが、GPUのフラグメントシェーダーを用いることにより効率的に並列計算することができ、動画の毎フレームを遅れなく補償処理することが可能である。

一方、プロジェクタには各メーカーによる独自の色作りが施されており、その結果、上記の単純な線形モデルが適切にプロジェクタの入出力特性を近似できず、所望の色を対象面上で再現することができない、というケースが多数存在する。そこで最近では、プロジェクタの色空間を $4^3$ から $6^3$ 程度の粗さでサンプリングし、その間をスプライン関数で非線形補間する手法が提案されており、単純な線形モデルと比べて良好な色補償が実現できている<sup>(19)</sup>。

### 3.3 影除去

プロジェクタと投影対象との間に遮蔽物があると投影結果に影が生じる。この問題を解決するため、複数台のプロジェクタを分散的に配置し、投影面上の各点に対して遮蔽されていないプロジェクタを選択して投影することで影を除去する技術が研究されている(図4)<sup>(20)</sup>。

影除去のアルゴリズムでは、投影面に加えて遮蔽物の形状と位置も計測して、各プロジェクタからの投影画像を計算する必要がある。さらにこのとき、異なるプロジェクタの投影重畳領域を目立たなくするように、それぞれの輝度を各投影領域の端に向かって徐々に低下させる処理が必要になり、計算量が増大し、ビデオレートで動作させることは、現状では困難である場合が多い。

この問題は主に、1台のホストコンピュータが全ての投影画像を計算するというシステム設計に起因している。さらに計算された投影画像を各プロジェクタに伝送することを考えると、プロジェクタ台数の増加に応じて伝送路の帯域を広く確保しなければならないという問題もある。これに対して

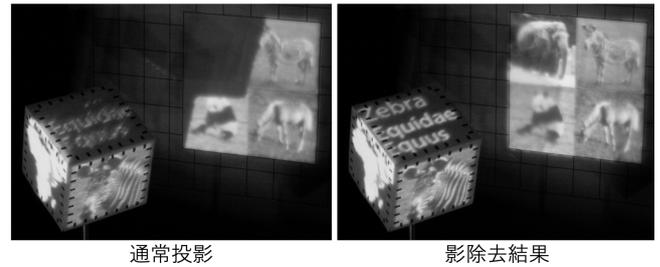


図4 影除去技術

システム制御の分野で研究が進められている分散最適化の技術を適用し、プロジェクタ端末毎に独立に投影像を計算することで、計算負荷を減らすとともに伝送コストも抑制する手法が提案されている<sup>(21)</sup>。

### 3.4 焦点ボケ補償

一般的に、プロジェクタは投影照度を最大化するために、レンズの開口が広く設計されている。このため、被写界深度は狭く、立体面に映像を投影する場合は面全体に合焦する(ピントを合わせる)ことはほとんどのケースで困難となる。この問題を解決する最も単純なアプローチとして、それぞれが異なる距離で合焦するように設置した複数台のプロジェクタを用いて、立体投影面上の各点で最も合焦しているプロジェクタを選択し、それらから映像を投影する、という技術が提案されている<sup>(22)</sup>。

一方、プロジェクタ1台のみで焦点ボケを補償するアプローチも提案されている。例えば、投影画素毎に様々な投影距離において、ボケの様子を表す点拡がり関数を計測しておき、映像投影の際には、投影面までの距離からボケ量を推定し、それに応じて投影画像を鮮明化(高周波成分強調)させることで投影結果の焦点ボケを抑える技術が提案されている<sup>(23)</sup>。さらに、焦点を変調可能な特殊な液体レンズを用いて、知覚されないほど高速に合焦距離を前後移動

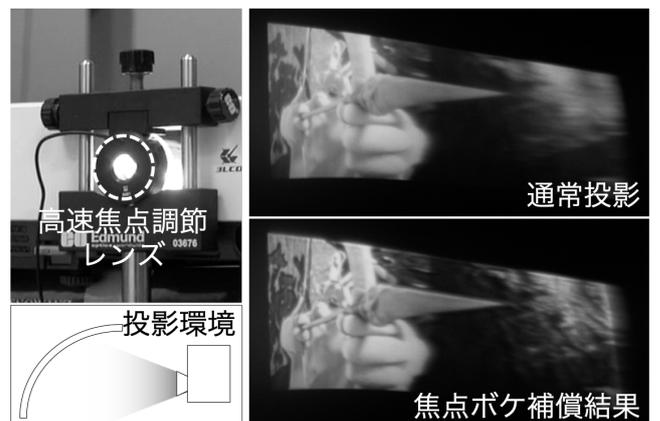


図5 焦点ボケ補償技術

(スワイプ) させることで、被写界深度を広げる技術も提案されている (図 5) (24)。

なお、投影結果のボケの要因は、焦点ボケだけではない。投影光が対象面で散乱する表面下散乱と呼ばれる現象によっても、投影像がぼやけてしまう。この表面下散乱による画質劣化も、焦点ボケ補償と全く同じ方法で解決することが可能であることが示されている(25)。

#### 4. 最新動向

ここまでで紹介した技術は全て、ある投影面において所望の色や見えを再現する目的を達成するためのものであった。これに対し、近年は投影面の動きをも制御するような技術の提案がなされてきている。例えば **Bermano** らは、人に酷似したロボット (アンドロイド) の顔面の表情を映像投影によって変更する研究の中で、実際には動いていないロボット顔面に、微小に表情変化する動画を投影した(25)。その結果、あたかもロボット顔面が動いて表情変化しているかのような視

覚効果が得られることを報告した。**Kawabe** らは、この効果を人の視覚処理メカニズムから明らかにし、動きの情報だけを輝度パターンとして重畳するだけで、投影対象の様相があたかも動いているかのように知覚させられることを示した(26)。これからも、このような人の知覚をハックするような投影技術の研究が進展していくものと考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、プロジェクションマッピングの各種基盤技術 (幾何学補正, 色補償, 影除去, 焦点ボケ補償) について概説した。さらに、最新の技術動向として動き補正技術について紹介した。プロジェクタハードウェアの技術革新によって、高輝度化および低価格化が進むとともに、名刺サイズの小型のプロジェクタが市販されつつある。近い将来、屋内照明がプロジェクタに置き換わる可能性は高く、実用に向けた技術開発の加速が期待される。

(平成 30 年 10 月 10 日受付)

#### 文 献

- (1) O. Bimber and R. Raskar: "Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds", A. K. Peters, Ltd. (2005)
- (2) O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein, and A. Grundhöfer: "The Visual Computing of Projector-Camera Systems," Computer Graphics Forum, Vol.27, No.8, pp.2219-2245 (2008)
- (3) A. Grundhöfer and D. Iwai: "Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications," Computer Graphics Forum, Vol.37, No.2, pp.653-675 (2018)
- (4) B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson: "IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences," In Proceedings ACM CHI, pp.869-878 (2013)
- (5) C. Menk and R. Koch: "Truthful Color Reproduction in Spatial Augmented Reality Applications," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.19, No.2, pp.236-248 (2013)
- (6) D. Aliaga, A. Law, and Y. Yeung: "A Virtual Restoration Stage for Real-World Objects", ACM Transactions on Graphics, Vol.27, No.5, pp.149:1-149:10 (2008)
- (7) M. Flagg and J. M. Reh: "Projector-guided painting," In Proceedings of ACM UIST, pp.235-244 (2006)
- (8) D. Iwai and K. Sato: "Document Search Support by Making Physical Documents Transparent in Projection-Based Mixed Reality," Virtual Reality, Vol.15, No.2, pp.147-160 (2011)
- (9) Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, and K. Sato: "Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching Unreachable World," In Proceedings of Augmented Human, pp.19:1-19:9 (2017)
- (10) G. Yamamoto and K. Sato: "PALMbit: A PALM Interface with Projector-Camera System", In Adjunct Proceedings of UbiComp, pp.276-279 (2007)
- (11) O. Bimber and D. Iwai: "Superimposing Dynamic Range," ACM Transactions on Graphics, Vol.27, No.5, pp.150:1-150:8 (2008)
- (12) A. H. Bermano, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer: "Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection," Computer Graphics Forum, Vol. 32, No. 2, pp.311-323 (2017)
- (13) C. Resch, P. Keitler, and G. Klinker: "Sticky Projections-A Model-Based Approach to Interactive Shader Lamps Tracking," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.22, No.3, pp.1291-1301 (2016)
- (14) C. Siegl, M. Colaianni, L. Thies, J. Thies, M. Zollhöfer, S. Izadi, M. Stamminger, and F. Bauer: "Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping," ACM Transactions on Graphics, Vol.34, No.6, pp.237:1-237:11 (2015)
- (15) H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato: "Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.24, No.2, pp.1091-1102 (2018)
- (16) P. Punpongsonan, D. Iwai, and K. Sato: "Projection-based visualization of tangential deformation of nonrigid surface by deformation estimation using

- infrared texture," Virtual Reality, Vol.19, No.1, pp.45-56 (2015)
- (17) G. Narita, Y. Watanabe, and M. Ishikawa: "Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No.3, pp.1235-1248 (2017)
- (18) O. Bimber, A. Emmerling, and T. Klemmer: "Embedded entertainment with smart projectors," IEEE Computer, Vol.38, No.1, pp.56-63 (2005)
- (19) A. Grundhöfer and D. Iwai: "Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Selection in Multi-projection Environment," IEEE Transactions on Image Processing, Vol.24, No.12, pp.5086-5099 (2015)
- (20) M. Nagase, D. Iwai, and K. Sato: "Dynamic Defocus and Occlusion Compensation of Projected Imagery by Model-Based Optimal Projector Selection in Multi-projection Environment," Virtual Reality, Vol.15, No.2, pp.119-132 (2011)
- (21) J. Tsukamoto, D. Iwai, and K. Kashima: "Radiometric Compensation for Cooperative Distributed Multi-Projection System through 2-DOF Distributed Control," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.21, No.11, pp.1221-1229 (2015)
- (22) O. Bimber and A. Emmerling: "Multifocal projection: A multiprojector technique for increasing focal depth," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.12, No.4, pp.658-667 (2006)
- (23) L. Zhang and S. Nayar: "Projection defocus analysis for scene capture and image display," ACM Transactions on Graphics, Vol.25, No.3, pp.907-915 (2006)
- (24) D. Iwai, S. Mihara, and K. Sato: "Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.462-470 (2015)
- (25) A. Bermano, P. Bruschweiler, A. Grundhöfer, D. Iwai, B. Bickel, and M. Gross: "Augmenting Physical Avatars Using Projector Based Illumination," ACM Transactions on Graphics, Vol.32, No. 6, pp.189:1-189:10 (2013)
- (26) T. Kawabe, T. Fukiage, M. Sawayama, and S. Nishida: "Deformation Lamps: A Projection Technique to Make Static Objects Perceptually Dynamic," ACM Transactions on Applied Perception, Vol.13, No.2, pp.10:1-10:17 (2016)



岩井 大輔

いらい・だいすけ

2007 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程了。2013 年より同大学院准教授。プロジェクションマッピング、拡張現実感の研究に従事。博士 (工学)。