プロジェクション型 AR*

Projection-Based AR

岩井大輔**
Daisuke IWAI

Key words

projection mapping, augmented reality, projector-camera system, geometric registration, radiometric compensation

1. はじめに

建築物などに映像を投影するプロジェクションマッピングは、わが国では、2012年に東京駅で行われたイベントを契機に知名度を上げ、現在では毎日どこかで同技術を用いたイベント・作品展示が実施されていると言っても過言ではないほど広く普及している。さらに、Lady Gaga や Perfume といった主要なポップミュージシャンがライブパフォーマンスに自らの身体への映像投影を採用したり、オリンピック閉会式のような国際的な大規模イベントにおいても重要な表現手段として利用されたりするなど、プロジェクションマッピングは既に欠くべからざる視覚メディアの一つと見なされるようになってきた。これらは、拡張現実感 (AR: Augmented Reality) の学術領域で 20 年ほどにわたって行われてきた、プロジェクション型 AR の研究で培われた技術がベースとなっている。

プロジェクション型 AR は、映像投影を用いて身の回りの日常空間のさまざまな面を、現実空間とサイバー空間とをシームレスにつなぐインタフェースへと切り替える。すなわち、コンピュータ内で生成されるサイバー空間の映像情報を、われわれの存在する実空間へ展開し、よりリアリティーをもって感じさせるための有力な手段として、プロジェクタによる映像投影を利用する。映画館のような、矩形の白色平面スクリーンに映像を投影する構成ではなく、身の回りのさまざまな物体にビジュアルな情報を重畳する形態で呈示できるようにするプロジェクション技術の汎用化、小型化、省電力化などの進展は、今後幅広い分野への応用が期待され、これらの発展をさらに深化させる要素技術、および応用技術に関する研究開発が盛んに行われている。開発された要素技術は、非平面な対象上での映像の位置合わせ、模様のついた対象上での所望の色の再現、人と投影像との自然なインタラクションの実現など、従来の映

像情報ディスプレイの課題に重なりつつそれを拡充するかたちで多岐にわたっている。これらの課題解決のためには、コンピュータビジョン (計算機視覚)・色彩工学・人間工学・制御工学・視覚心理学など、さまざまな学問領域で得られた知見や方法論を駆使する必要がある。プロジェクション型 AR は、基礎原理から芸術表現までを包含する学際的な学問領域である。本稿では特に、ものづくりの文脈から、プロジェクション型 AR の基盤技術をその最新動向も交えて概説する。

2. ものづくりのためのプロジェクション型 AR

プロジェクション型 AR は、ものづくりの中でも特に試作プロセスを強力に支援できると期待できる。まず、3D プリンタなどで出力した立体試作品の視覚的な質感やテクスチャをプロジェクションによって自在に変更できる。これにより、さまざまな素材サンプルを物理的に準備する必要がない上、それらを試作形状に成形加工する必要もない。さらに、仮想的な光源環境を自在に変更することも可能であり、光沢などの異方性の反射特性をもつ素材をさまざまな環境光下に置いた際の見えを切り替えることができる。通常のディスプレイ上でも CAD ソフトウェアを用いて質感等を切り替えて評価することは可能だが、立体表現するためには特殊なメガネを装着しなければならないことや、輻輳・調節の不一致による疲労等の問題がある。これに比べて、プロジェクションのアプローチでは、上記の視覚的変更はすべて立体面上で行われるため、自然な立体表現が可能である。同様の処理は、頭部搭載型ディスプレイやスマートフォンを用いる他の AR 方式 (ビデオスルー方式、光学スルー方式) でも可能であるが、複数人が同時に視覚的変更を閲覧可能である点にプロジェクション型 AR の優位性が認められる。

一方、プロジェクション型 AR では、一般的な白色平面スクリーンに映像投影するのとは異なり、模様の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ゆがんでしまうため、面形状に合わせて投影画像を変

*原稿受付 平成 29 年 3 月 27 日

**大阪大学大学院基礎工学研究科 (大阪府豊中市待兼山町 1-3-D552)

図1 立体面への投影例：(a) 補正をしなかった際に生じる投影像のゆがみ (b) 幾何学補正の結果

形して補正する必要がある(図1)。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、投影画素ごと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、設計上、投影輝度を最大化するためにプロジェクタは口径が大きく、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。最後に、試作品をさまざまな角度から観察することや、柔らかい素材のものであれば変形させたときの見えを確認することが求められるが、これらを実現するためには、移動・変形する投影面に、ピッタリと位置合わせをしてプロジェクションし続ける必要がある。次章では、プロジェクション型 AR の分野において研究された、これら各種の課題を解決する基盤技術を紹介する。

なお、ものづくり支援の文脈には、プロジェクタとカメラとを組み合わせる形状計測用途としてのプロジェクタ技術も含まれるが、本稿では扱わない。本稿で紹介するプロジェクション型 AR は、実環境中のさまざまな物体を投影対象とすること、環境の変化に即時に適応する即時性、ユーザの要求に反応する対話性が、計測装置全体の精度改善を主な技術開発項目としている形状計測用途とは一線を画す特徴となっている。

3. 基盤技術

ここでは、プロジェクション型 AR をものづくり支援に応用する際の各種課題を解決する基盤技術について紹介する。

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ゆがみを解決する幾何補正技術について紹介する。具体的には、立体

図2 フルカラー 3D プリンタを用いた投影立体面へのマーカー印刷と幾何学補正結果：(a) 3D プリンタで出力された投影対象 (b) 幾何学補正結果 (c) マーカーの視覚的隠消結果 (d) 異なる姿勢での幾何学補正&マーカー隠消結果

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。プロジェクタとカメラは、光学的に双対である。このため、実空間中の3次元点とプロジェクタ内の画像平面との幾何学的な射影関係は、カメラとまったく同じ原理であらかじめ較正することが可能である。この関係が求めれば、後は任意の3次元点に対応するプロジェクタ画素を一意に求めることができる。すなわち、幾何学補正の問題は、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、を求めることと同じとなる。

プロジェクタ単体では、外界の状況を計測することができないため、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。当初、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、取り付けの手間とそ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、近年ではマーカー等を取り付けることなく、カメラを用いて立体面の位置姿勢を計測する手法が広く研究されている。例えば、Resch らは、前フレームでの立体面の位置姿勢から現フレームでの投影結果を予測し、それとカメラで計測した投影結果とを比較することで、立体面の位置姿勢を求める手法を提案している¹⁾。また、Siegl らは、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立体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を提案している²⁾。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。Asayama らはこの問題に対して、フルカラー 3D プ

図3 色補償結果：(a) 白色投影時の投影面の見え (b) 表示目標画像 (c) 色補償なしでの投影結果 (d) 色補償を適用した投影結果

リントを用いてマーカーを立体面に自動的に印字して位置姿勢推定に利用し、さらにその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キャンセルする手法を提案している（図2）³⁾⁴⁾。

上記の手法は、いずれも立体面を剛体と仮定した手法であり、面が柔軟変形するような場合には対応しない。現状では、変形時の立体面形状を精度良く計測することは困難であるが、カメラ画像平面での2次元的な変形を計測する手法はいくつか提案されている。そこで、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用いて投影画像を変形させる手法が研究されている⁵⁾。さらに、Naritaらは、1000 fpsのプロジェクタとカメラを用いて、極めて高速かつ低遅延に変形立体面への投影画像の位置合わせを実現した⁶⁾。Bermanoらも、同様に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をして、映像投影する技法を提案している⁷⁾。

3.2 色補償

対象表面が白色でない場合、対象上では投影したものとは異なる色が表示される。そこでカメラを用いて投影結果を撮影し、その情報を基に対象表面の反射率を推定するなどして、目的の色の見えを再現するよう投影色を画素ごとに補正する色補償技術が複数提案されている。ここでは、その中でも最も単純なモデルを採用しているBimberらの手法を紹介する⁸⁾。他の手法も基本的な考え方はこの手法と同様である。

対象上のある1点について、環境光、プロジェクタからの入射光、対象の反射率をそれぞれ E 、 I 、 M とすると、反射光 R は、以下のように表される。

$$R = (IF + E)M \quad (1)$$

ここで F は、プロジェクタから対象面までの距離と入射

図4 複数枚の鏡を用いた仮想複数台プロジェクタ系による影除去結果

角によって決まる入射光の減衰を表す。所望の色の見えを R に代入すると、それを再現するために投影色 I は以下の式により計算できる。

$$I = (R - EM) / FM \quad (2)$$

未知パラメータである EM は、プロジェクタより黒を投影（つまり、 $I=0$ ）した際の反射光として観測し、 FM はプロジェクタより白色を投影（つまり、 $I=1$ ）した際の反射光から算出する。図3に色補償の効果を示す⁹⁾。

上記の色補償モデルは、プロジェクタの入出力特性が線形であることを仮定している。しかしながら、通常、ガンマ特性等の影響によってその線形性は保証されていない。そこで、あらかじめいくつかの色パターンを白色面に投影し、それをカメラで計測し、その色の対応をルックアップテーブルとして保持することで、非線形な色空間を線形に補正することが必要である。近年では、投影対象に直接、より多数の色パターンを投影してプロジェクタとカメラの色の対応をより細かく取得し、その間を連続的に非線形補間することで、極めて高精度に色補償する技術も提案されている¹⁰⁾。

3.3 影除去

プロジェクタと投影対象の間に遮蔽物があると、影が生じてしまう。この問題を解決する方法として、複数台のプロジェクタを分散的に配置し、あるプロジェクタが遮蔽された場合でも、遮蔽のないプロジェクタから投影することで、影を除去する技術が研究されている。例えばNagaseらは、複数枚の鏡を用いて仮想的に複数台のプロジェクタから映像を投影するようなシステムを構築し、影除去を実現した（図4）¹¹⁾。影除去のアルゴリズムでは、遮蔽物の

図5 合焦距離の高速前後移動による被写界深度拡大結果

形状と位置を計測し、それを基に各プロジェクタからの投影画像をすべて計算する必要がある。さらにこのとき、影領域とそうではない領域との境界を目立たなくするように、境界部分において異なるプロジェクタからの投影画像をブレンドするなどの処理が必要になり、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、一台のコンピュータがすべての投影画像を計算することに起因しており、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際、プロジェクタ台数が増えると広帯域の伝送路が必要となるため、コストも増大してしまう。この問題に対して、Tsukamoto らは、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活用し、プロジェクタ端末ごとに独立に投影画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方法を提案している¹²⁾¹³⁾。

3.4 焦点ボケ補償

プロジェクタは、投影輝度を最大化するために、レンズの開口径が広く設計されている。このため、被写界深度は極めて狭く、立体面に映像を投影する場合は面全体に合焦することはほとんどのケースで不可能である。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、立体面上の各点で最も合焦しているプロジェクタから映像を投影する、という技術が提案されている¹⁴⁾。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、Zhang らはまず、投影距離に応じてプロジェクタ画素がどのようにボケるかを計測し、保持する。映像を投影する際には、対象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を提案している¹⁵⁾。さらに Iwai らは、焦点変調可能なレンズを用いて、知覚されないほど高速に合焦距離を前後移動させることで、被写界深度を広げる技術も提案している（図5）¹⁶⁾。

投影結果のボケの要因は、焦点ボケだけではない。投影光が対象面下で散乱する表面下散乱によっても、投影像のエッジ情報が失われてしまう。この表面下散乱による画質劣化も、焦点ボケの補償とまったく同じ方法で解決することが可能である。例えば、Bermano らは、Zhang らの手法を適用し、あらかじめ対象面上でのボケ具合を計測しておいて、その情報を基に投影画像を鮮明化することで、投影結果をよりクリアに提示できることを示した¹⁷⁾。

4. 最新動向

上で紹介した技術はすべて、ある投影面の見えを変更する目的を達成するためのものであった。これに対し、近年はそ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。Bermano らは、人酷似型ロボット（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、微小な表情変化をレンダリングした動画を投影した¹⁷⁾。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投影するだけで、投影対象の模様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¹⁸⁾。このような動き補正の技術は、可動部のある製品の試作に有用となる可能性があり、今後の研究の発展が待ち望まれる。

5. おわりに

本稿では、プロジェクションマッピングとして広く知られるようになったプロジェクション型 AR 技術が、ものづくりにどのように活かされるかについて述べた。特に、試作過程において有効であることを示し、実用化のために必要となる各種技術（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、極めて小型のプロジェクタが市販されつつある。今後もプロジェクタがより身近な装置になることは間違いなく、今後、プロジェクション型 AR が、ものづくりに大きなインパクトを与える可能性は極めて高いと考えられる。今後の普及に向け、オープンソースのソフトウェアツールなどの整備を進めていきたい。

参考文献

- 1) 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, **22**, 3 (2016) 1291.
- 2) C. Siegl, M. Colaizzi, 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, **34**, 6 (2015) 237.
- 3) H. Asayama, D. Iwai and K. Sato : Diminishable visual markers on

- fabricated projection object for dynamic spatial augmented reality, Proceedings of SIGGRAPH Asia Emerging Technologies, (2015) 7.
- 4) H. Asayama, D. Iwai and K. Sato : Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, (in press)
 - 5) P. Punpongsanon, D. Iwai and K. Sato : Projection-based visualization of tangential deformation of nonrigid surface by deformation estimation using infrared texture, Virtual Reality, **19**, 1 (2015) 45.
 - 6) 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, **23**, 3 (2017) 1235.
 - 7) A.H. Bermanno, M. Billeter, D. Iwai and A. Grundhöfer : Makeup Lamps : Live Augmentation of Human Faces via Projection, Computer Graphics Forum, (in press)
 - 8) O. Bimber, A. Emmerling and T. Klemmer : Embedded entertainment with smart projectors, IEEE Computer, **38**, 1 (2005) 48.
 - 9) S. Mihara, D. Iwai and K. Sato : Artifact Reduction in Radiometric Compensation of Projector-Camera Systems for Steep Reflectance Variations, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, **24**, 9 (2014) 1631.
 - 10) A. Grundhöfer and D. Iwai : Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation, IEEE Transactions on Image Processing, **24**, 12 (2015) 5086.
 - 11) 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, **15**, 2 (2011) 119.
 - 12) 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, **21**, 11 (2015) 1221.
 - 13) J. Tsukamoto, D. Iwai and K. Kashima : Distributed Optimization Framework for Shadow Removal in Multi-Projection Systems, Computer Graphics Forum, (in press)
 - 14) O. Bimber and A. Emmerling : Multifocal projection : A multiprojector technique for increasing focal depth, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **12**, 4 (2006) 658.
 - 15) L. Zhang and S. Nayar : Projection defocus analysis for scene capture and image display, ACM Transactions on Graphics, **25**, 3 (2006) 907.
 - 16) D. Iwai, S. Mihara and K. Sato : Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **21**, 4 (2015) 462.
 - 17) A.H. Bermanno, P. Brüscheiler, A. Grundhöfer, D. Iwai, B. Bickel and M. Gross : Augmenting Physical Avatars Using Projector Based Illumination, ACM Transactions on Graphics, **32**, 6 (2013) 189.
 - 18) 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, **13**, 2 (2016) 10.

岩井大輔

2007 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程了。博士 (工学)。大阪大学助教、講師を経て、2013 年同大学院准教授。この間、2007～2008 年ドイツ・バウハウス大学客員研究員、2011 年スイス・ETH 客員研究員。投影型複合現実感の研究に従事。IEEE、日本バーチャルリアリティ学会各会員。