

# ドローンからのプロジェクション Drone Projection

岩井 大輔  
Daisuke Iwai

大阪大学 大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

560-8531 豊中市待兼山町 1-3-D552  
Machikaneyama 1-3-D552, Toyonaka, 560-8531  
E-mail: daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

**あらまし** 身の回りの様々な実空間面にプロジェクタから映像を投影重畳し、仮想空間とシームレスに融合するプロジェクションマッピングは、広範な応用が期待されている。一方、プロジェクションマッピングでは、従来据え置き型のプロジェクタからの映像投影が主流であり、移動する物体に途切れなく投影し続けることは難しかった。そこで我々は、自立飛翔型のドローンにプロジェクタを搭載するドローンプロジェクションの研究を進めている。本講演では、それを実現するための基盤技術や応用可能性についてお話したい。

**Abstract** Projection mapping merges real and virtual worlds seamlessly by projecting virtual images onto a real surface. Most of current systems utilize stationary projectors by which we cannot keep projecting images onto object moving in a large area beyond the frustum of the projector. To solve this issue, we are working on drone projection system, where a projector is mounted on a drone. This talk presents algorithms and applications of the drone projection.

## 1. はじめに

身の回りの様々な実空間面にプロジェクタから映像を投影重畳し、仮想空間とシームレスに融合するプロジェクションマッピングは、広範な応用が期待されている。これまでは主に据え置き型のプロジェクタから映像を投影するシステムが数多く研究・開発されてきており、工業デザイン、医療可視化、教育、遠隔コミュニケーション等の分野での応用が期待されている。一方、投影範囲を超えて投影対象が移動するような場合に、途切れなく投影し続けることは不可能であるため、携帯型やウェアラブル型のプロジェクションマッピングシステムが提案されてきた。しかしながら、プロジェクションマッピングの主要な利点の一つとして、非拘束である点が挙げられるが、携帯型・ウェアラブル型はユーザーを拘束してしまい、その利点を活かすきれないというジレンマを抱えていた。

そこで我々は、自立飛翔型のドローンに着眼し、それにプロジェクタを搭載したドロー

ンプロジェクションの研究を進めている。本講演ではまず、据え置き型のプロジェクションマッピングシステムにおいてどのような技術や応用が提案されてきたのかについて概説する。その後、ドローンプロジェクション固有の問題点とその解決技術について述べる。

## 2. 据え置き型プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングの研究において、据え置き型のプロジェクタを用いるシステムは主流となっている。プロジェクションマッピングは、いわゆる拡張現実感 (Augmented Reality, AR) 技術の一形態と理解することができる。AR とは、現実空間に紐付けられたサイバー空間の情報を、位置ずれ・時間ずれなく現実空間に重畳表示する技術のことで、頭部搭載型ディスプレイ (Head Mounted Display, HMD) やスマートフォンに代表されるカメラ付き小型端末を使用するのが一般的である。このような従来の AR の

アプローチと比べて、据え置き型のプロジェクトンマッピングはユーザーを拘束しない点、複数人が同時に AR 体験を享受できる点が利点として挙げられる。

一方、プロジェクトンマッピングでは、非平面で、模様があり、動いている投影対象に環境光下で投影する、という、通常の映像投影（平面・模様なし・静止・暗室下）では想定されていないような状況での投影が求められている。このような環境では、投影画質が顕著に悪化してしまうため、それを解決するための基盤技術の研究が進められている。プロジェクトンマッピングの応用としては、巨大構造物や歌手・ダンサーを対象とするものが一般によく知られているが、研究レベルでは、更に幅広い応用分野が開拓されつつある。これには、上記のような基盤技術の進展が大きく寄与している。

## 2. 1 基盤技術

色補償、幾何補正、焦点ボケ補償、相互反射補償の各技術について紹介する。なお、紙幅の制約上割愛するが、影除去、鏡面反射除去、超解像といった他技術の研究も進められていることを付記しておく。

### 色補償

模様のついた投影面にそのまま映像を投影すると、その模様が投影結果に現れてしまうという問題が生じる。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することで、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。例えば、最も初期の単純な手法では、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ことが提案された[1]。投影画素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った。

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[2]。

### 焦点ボケ補償

プロジェクタは元来、照度向上のため口径が大きく設計されており、焦点ボケが生じやすい。このため、非平面や動いている対象にプロジェクトンマッピングする際、投影画像の高周波成分（空間解像度）が失われてしまう場合が頻繁に生じてしまう。この問題を解決する手法としては、合焦位置の異なる複数台のプロジェクタを用意して、対象面とその合焦位置との距離が最も近いプロジェクタから映像を投影するよう選択するアプローチが提案されている[3]。

プロジェクタ 1 台の場合は、プロジェクタからの距離に応じて変化する画素の点拡がり関数 (Point Spread Function, PSF) を投影対象上で求め、投影画像に各 PSF の逆畳み込み演算を行うことで、いわばエッジ強調画像を生成して焦点ボケによる画質劣化を補償する試みが行われている[4]。一方、この手法ではプロジェクタもしくは投影対象が移動する度に PSF を求めなければならず、動的な対象に対して適用することは難しかった。そこで、プロジェクタの焦点距離を高速に変調させることのできる焦点可変レンズを用い、人の知覚できない速度で合焦位置を投影シーンの前後にスワイプさせる焦点スワイプ投影法が提案されている[5]。この研究は、焦点スワイプの結果 PSF が距離に依らず一定になることを示し、それによって投影対象が移動しても PSF を再計測する必要なく焦点ボケ補償を実現している。

### 相互反射補償

凹面への投影では、投影光が面間を相互に反射し、望ましくない輝度の上昇(相互反射)が発生する。この現象はコンピュータグラフィクスにおけるラジオシティ法でモデル化できるため、その逆問題を解いて投影画像を生成することで、相互反射を補償する手法が提案されている[6]。

一方、負の光を投影できないという物理的制約から、このアプローチには輝度上昇の補償量に限界がある。そこで、投影面の反射率を空間的に変調して相互反射光の輝度を抑えることで、相互反射補償の効果を向上させ

る試みが行われている[7]. 反射率変調には紫外線照射により透過率を制御できるフォトクロミック化合物を用いている.

### 幾何補正 (位置合わせ)

対象が非平面であったり動いたりする場合に、歪みなく映像を表示するために、幾何補正が必要となる. 特に近年は、コンピュータビジョン技術を用いて、動いている対象にピタッと位置合わせする、動的プロジェクションマッピングにおける幾何補正の研究開発が盛んに行われてきている. ARに関する多くの研究で採用されているように、動的プロジェクションマッピングの幾何補正でも画像マーカを用いるアプローチは主流であるが、投影映像とマーカが重畳すると、投影映像の画質劣化、および、マーカ認識精度の低下という双方の問題を引き起こしてしまう. すなわち、いかに、カメラで計測可能なマーカを、人の目から隠すか、ということが主要な技術課題となっている.

その解法として、近赤外領域で急激に反射率の低下する「IR インク」を使用する、というアプローチが複数の研究で採用されている. このインクで投影対象に描かれたマーカは、人の目にはほぼ知覚されず、近赤外カメラで撮影された画像中では高コントラストに計測できる. このインクで粘土のような柔軟変形物体にマーカを描画し、それを撮影する近赤外カメラ画像を処理してその変形を計測して、変形に追従したテクスチャをプロジェクションマッピングする研究[8]や、衣服や紙面にマーカを描画して、1,000 Hz の高速カメラとプロジェクタの組み合わせで、それらが素早く移動しても、ピタッと投影映像を位置合わせする技術の研究[9]が行われている. 一方、人の目でも視認できる通常のインクで描かれたマーカを用いる場合に、近赤外カメラでそのマーカを計測するとともに、色補償の技術を用いて、人の目に対してはマーカを隠す試みも行われている[10].

画像マーカを用いないアプローチとして、ラスタスキャン型のレーザープロジェクタに特化した走査時刻計測に基づく投影画面位置の計測手法が提案されている[11]. この手法は、いわば CRT モニタにおけるライトペンの技術をプロジェクションマッピングに応用したものであり、投影シーン中に配

置したフォトダイオードが投影光を計測した時刻と、プロジェクタの V-Sync の時刻との間の時間情報から、そのセンサに入射する投影画素の位置を推定する. 小さなフォトダイオードを投影面中に埋め込むことで、投影映像中にそれが目につかないプロジェクションマッピングが実現できる.

### 2. 2 応用展開

プロジェクションマッピングの応用としては、巨大構造物や歌手・ダンサーを対象とするものが一般によく知られているが、研究レベルでは、更に幅広い応用分野が開拓されつつある. ここでは、こういった新規の応用展開を列挙する.

- テレビ画面の外側に、その画面内のコンテンツを枠外へと延長した映像を投影することで、高い没入感を与えるシステム [12]
- 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する工業デザイン支援システム [13]
- 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 [14]
- 油絵を描く際、絵の具の色やストローク等をキャンバス上に直接指示する絵画制作支援システム [15]
- 机の上に積まれた書類の山から所望の書類を探し出す際に、プロジェクションマッピングにより上の書類から順に透明化し、書類探索支援するシステム [16]
- 手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 [17]
- 手のひらにリモコンメニュー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技術 [18]
- プロジェクションマッピングにより触覚変調を行うメカニズムの調査 (温度感覚 [19], 柔らかさ [20])
- 写真などの印刷物のコントラストを増幅して、よりリアリティの高い広ダイナミックレンジな映像呈示システム (写真・電子ペーパー [21], フルカラー 3D プリン

タ[22])

- ・ プロジェクションマッピングにより、アンドロイドロボットの表情を豊かにするシステム[23]
- ・ 人の顔の動きに追従し、さらに表情変化に応じてテクスチャを変えることのできる、動的な化粧を実現するプロジェクションマッピングシステム[24]

### 3. ドローンプロジェクション

自立飛翔型のドローンにプロジェクタを搭載したドローンプロジェクションは、使用者がどこにいようと、その身近な実空間に身体的拘束なしに映像投影できる。この利点から、我々は、プロジェクションマッピングの実社会応用を後押しするものとして期待し、研究を進めている。

一方、ドローンプロジェクションには、従来の据え置き型プロジェクションマッピングシステムにはなかった固有の技術課題があることが分かってきている。まず、飛翔中、常に揺動するドローンから対象面にピタッと位置合わせして映像投影するために、揺動による映像のブレを抑制しつつ、非平面に投影する際や平面であっても斜め方向から投影する際に生じる映像の幾何学的な歪みを補正しなければならない。次に、ドローンが観察者に衝突しないことは当然として、さらにドローンから投影される映像を観察者が遮ることのないように、また、できる限り投影結果の画質（解像度や明るさ）を向上するように、ドローンの配置や飛翔経路を考慮する必要がある。

本節では、これらの技術課題に対して、これまでに行われてきている研究事例を紹介する。

#### 幾何補正（位置合わせ）

ドローンプロジェクションでは、対象面に対して様々な位置・姿勢から映像を投影することになる。対象面が平面で、かつ、プロジェクタがそれに正対している、以外の状況では、投影された映像は幾何学的に歪む。さらに、プロジェクタと投影対象との位置姿勢の関係は時間変動すると考えられるため、対象上にピタッと張り付いたような映像表示を行うため、逐次、投影像を幾何補正する必要がある。

前述の通り、据え置きプロジェクションマ

ッピングシステムにおいて、幾何補正を行う手法は既に確立されており、ドローンプロジェクションにおいても同様の手法で位置合わせを行う。必要な情報は、プロジェクタと対象との位置姿勢関係の情報と、対象の形状情報である。そのうち、対象形状については、建物や家具等、投影対象として想定される実環境中の面の多くは変形しないため、既知として扱える。一方、ドローンは揺動するため位置姿勢関係については逐次計測する必要がある。ドローンおよび搭載プロジェクタだけでそれを求めることはできないため、ドローンにマーカーを貼付してモーションキャプチャーシステムを用いる方法や、ドローンにカメラを搭載して対象面に貼付した画像マーカーを読み取って位置姿勢関係を推定する方法が、これまで提案されている[26, 27]。

現在市販されているプロジェクタでは、映像信号が入力されてから投影されるまでに、内部の処理によって数十ミリ秒単位の遅延が発生する。この時間内に、ドローンの空中での位置姿勢は変化してしまう可能性が高い。これにより、幾何補正を適用した画像が投影されても、位置ずれが生じてしまう。これを抑制するため、カルマンフィルター等を用いて、映像投影までの遅延分だけ未来のドローン位置姿勢を推定し、その推定位置から投影したときに対象面上で位置合わせできるように幾何補正を適用する手法が提案されている[26, 27]。一方、ドローンの揺動には、プロペラ回転による振動のように、より短い周期のものも存在するが、映像1フレーム（約16ミリ秒）よりも短い時間で生じる揺動については、上記の手法を用いても位置ずれを解消することはできない。これに対しては、カメラの光学式手ぶれ補正技術等を適用する等の新たな工夫が必要であり、今後の課題となっている。

#### ドローンの配置・経路

ドローンと対象面との位置姿勢関係は、投影画質に影響を与える。このため、良い画質で投影できるようなドローン配置を求めなければならない。また、観察者との衝突を避けつつ、投影対象面にアプローチするため、適切な飛翔経路を求める必要がある。我々は、このドローン配置・経路問題を解くため、以下の手法を提案している[28]。

投影画質の内、ドローンと対象面との位置姿勢関係が強く影響するのは、解像度と明るさである。ドローンが対象面に近づくと、投影領域が狭まるため、単位面積あたりの画素数（解像度）および明るさが上昇する。このことから、投影表示すべきコンテンツの全体をカバーできる最小の領域を投影する位置にプロジェクタを配置して、そのコンテンツの解像度および明るさを最大化する。次に、観察者を中心として予め決められた距離で定義される円の中に入らないように、最短経路を通して先ほど求めた位置へとドローンを移動させるための経路計画を計算する。現在位置と目標位置とを結ぶ直線が進入禁止の円を交差する場合は、現在位置を通る円の接線上を移動するようにし、経路を計算する。求めた経路からドローンが外れることを想定し、逐次、現在位置を更新して経路を計算し直す。プロトタイプを用いた実験により、上記手法の有効性を確認している。

上記の研究では、プロジェクタと投影対象との間に遮蔽物が入り込むときに生じる影の問題は考慮していない。また、複数台のドローンからの投影像を重畳することで、輝度を向上させたり、投影範囲を広げることが可能となるが、このような複数台への拡張についても考慮していない。このように、映像投射型ドローンの配置・経路問題に対しては、現状、初歩的でナイーブな解法しか示されておらず、今後さらなる研究の進展が必要である。

#### 4. おわりに

本稿では、身の回りの様々な実空間面にプロジェクタから映像を投影重畳し、仮想空間とシームレスに融合するプロジェクションマッピングについて述べた。まず、従来の据え置き型のシステムについて、その基盤技術および応用展開について概説したあと、自立飛翔型のドローンプロジェクションについて、その研究開発の現況を記した。据え置き型のプロジェクションマッピングシステムでは考慮する必要のなかった、ドローンプロジェクション固有の技術課題を挙げ、それらに対して行われている研究例を紹介した。

今後は、ドローンに搭載するシステム全体をできる限り軽量化していくことが実応用に向けての鍵となる。ドローンプロジェクシ

ョンのソフトウェア、ハードウェア両面における、今後のさらなる活発な研究開発を期待したい。

#### 参考文献

- [1] O. Bimber, A. Emmerling, T. Klemmer, "Embedded entertainment with smart projectors," IEEE Computer, pp. 56-63, Vol. 38, No. 1, 2005.
- [2] A. Grundhöfer and D. Iwai, "Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 24, No. 12, pp. 5086-5099, 2015.
- [3] 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.
- [4] L. Zhang and S. K. Nayar, "Projection defocus analysis for scene capture and image display," In Proceedings of ACM SIGGRAPH, pp. 907-915, 2006.
- [5] 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.
- [6] O. Bimber, A. Grundhöfer, T. Zeidler, D. Danch, P. Kapakos, "Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays," In Proceedings of IEEE Virtual Reality, pp. 151-158, 2006.
- [7] S. Takeda, D. Iwai, and K. Sato, "Inter-reflection Compensation of Immersive Projection Display by Spatio-Temporal Screen Reflectance Modulation," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 1424-1431, 2016.
- [8] P. Punpongsanon, 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.
- [9] 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.
- [10] H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato, "Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (accepted).
  - [11] Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato, "Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 11, pp. 2419-2429, 2017.
  - [12] 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.
  - [13] 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.
  - [14] D. Aliaga, A. Law, and Y. Yeung, "A Virtual Restoration Stage for Real-World Objects", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 5, 2008.
  - [15] M. Flagg and J. M. Rehg, "Projector-guided painting," In *Proceedings of ACM UIST*, pp. 235-244, 2006.
  - [16] 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.
  - [17] 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.
  - [18] G. Yamamoto and K. Sato, "PALMbit : A PALM Interface with Projector-Camera System", In *Adjunct Proceedings of UbiComp*, pp.276-279, 2007.
  - [19] H. N. Ho, D. Iwai, Y. Yoshikawa, J. Watanabe, and S. Nishida, "Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object," *Scientific Reports*, Vol. 4, Article No. 5527, 2014.
  - [20] P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato, "SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1279-1288, 2015.
  - [21] O. Bimber and D. Iwai, "Superimposing Dynamic Range," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 27, No. 5, pp. 150:1-150:8, 2008.
  - [22] S. Shimazu, D. Iwai, and K. Sato, "3D High Dynamic Range Display System," In *Proceedings of IEEE ISMAR*, pp. 235-236, 2011.
  - [23] 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, Article 189, 10 pages, 2013.
  - [24] 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.
  - [25] 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, Article 10, 2016.
  - [26] Y. Hosomizo, D. Iwai, and K. Sato, "A Flying Projector Stabilizing Image Fluctuation," In *Proceedings of IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, pp. 31-32, Oct 2014.
  - [27] W. A. Isop, J. Pestana, G. Ermacora, F. Fraundorfer, and D. Schmalstieg, "Micro Aerial Projector - stabilizing projected images of an airborne robotics projection platform," In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5618-5625, Oct 2016.
  - [28] 河原拓海, 岩井大輔, 佐藤宏介, "投影輝度向上および利用者との衝突回避を目指したプロジェクタドローンの動的配置," 第61回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 132-1 (3 pages), 2017.