

可視光レーザーを活用する情報技術

# 表題（和文）高自由度照明技術としてのプロジェクションマッピング

表題（英文）Projection Mapping as Highly Flexible Illumination Technology

岩井 大輔  
Daisuke Iwai

◀キー・ワード：プロジェクションマッピング，拡張現実感  
◀KEYWORDS：Projection mapping, augmented reality.

## ABSTRACT

This article discusses the potential of projection mapping as a highly flexible illumination technology. First, we introduce several research examples that apply projectors as intelligent or smart illuminations to support our daily activities. Then, we describe technical issues in applying projection mapping to highly flexible illumination and their solutions.

## 1. はじめに

プロジェクタを用いた映像投影により，身の回りの様々な面の見かけを変調し，同時に多くの人々に対して虚実混じり合った新奇な没入体験を提供できるプロジェクションマッピングは，特にエンタテインメント・広告分野での利用が急拡大し，様々なパブリックスペースにおいて目にする機会が格段に増えてきた．一方，家庭やオフィスといったパーソナル・準パーソナルな場所においては，プロジェクタの利用範囲は映画鑑賞やプレゼンテーションといった従来のものから大きく変化していない．

これに対し，拡張現実感の学術分野では，20 年ほど前から本格的に，プロジェクションマッピングを小規模な建物の中での屋内照明として活用するための研究が盛んに行われてきている．これらの研究においては，プロジェクションマッピングを高自由度照明技術とみなし，従来の照明装置を補助もしくは置換え，より知的で便利なサービスを提供する技術の提案および開発が進められている．家庭やオフィス内の IoT（Internet-of-Things）化という文脈から，ネットワークに繋がれた知的照明としてプロジェクタを捉えることも可能であろう．

本稿では，高自由度照明技術としてのプロジェクションマッピングの可能性を議論する．まず，屋内の既存照明の補助・置換えとしてプロジェクションマッピングを適用する研究事例を紹介する．次に，これらの技術を今後普及させていくために必要となる技術課題と，その解決策について述べる．

## 2. プロジェクションマッピングの既存照明への適用

### 2.1 リビング照明

リビング照明にプロジェクションマッピング技術を活用する研究事例を紹介する．

1 例目は，人の手のひらに映像を投影し，スマートフォン化する研究である<sup>1)</sup> (図 1(a))．ユーザが手のひらを体の前で開くと，画像処理技術によってその位置姿勢を計測し，映像を幾何学補正してピタッと手のひらに位置合わせし投



図1 リビング照明へのプロジェクションマッピング適用事例：(a) てのひらのスマートフォン化<sup>1)</sup>，(b) 手腕の伸長プロジェクション<sup>2)</sup>

Fig.1 Research examples of projection mapping technologies applied to living illuminations: (a) Palm projection<sup>1)</sup>, (b) extended hand projection<sup>2)</sup>.

影する．投影されている手の五指をボタンと見立て，これらに他方の手の指で触れることで投影コンテンツを操作する．この研究が行われた当時（2006 年），スマートフォンはもちろん存在しないため，実装されたアプリケーションは家電のユニバーサルリモコン，フォトビューワー等，限定的ではあったが，現在のスマートフォンのほとんどの機能を動作させることは原理的に可能である．

2 例目は，人の手腕の映像をリビング内に投影し，さらにその腕を伸長させる身体拡張に関する研究である<sup>2)</sup> (図 1(b))．ユーザの手先の細かな運動を，タッチパネル等を用いて計測し，それを増幅して腕を伸長させる．これを用いることで，掃除ロボットを含む様々な家電を直観的に操作したり，数メートル離れたものを指さしながら対話することなどが可能となる．特に，寝たきりや車椅子を利用せざるをえないような，手の届く範囲に制限のある生活をしている人が，日常空間の様々な場所を指差すなど手のジェスチャを交えた対話を行うことが可能となり，QoL 向上に繋がると期待される．

この他にも，古いアルバムに収録した写真の明部に選択的に光を照射することで，そのコントラストを増幅して撮影時のシーンをより正確に再現する研究<sup>3)</sup>や，テレビの周囲



図2 仕事用・学習用照明へのプロジェクションマッピング適用事例：(a) 遠隔の机上を共有するシステム<sup>7)</sup>，(b) 書類透明化による机上書類探索支援<sup>8)</sup>，(c) 本棚への表紙画像投影による書籍探索支援<sup>9)</sup>

Fig.2 Research examples of projection mapping technologies applied to illuminations for office and learning: (a) Remote desktop sharing system<sup>7)</sup>, (b) document search by making documents transparent<sup>8)</sup>, (c) book search by projecting cover images on a bookshelf<sup>9)</sup>.

の壁や家具に対して表示コンテンツの周辺の映像を投影することで、没入感の高いテレビ鑑賞体験を提供する研究<sup>4)</sup>など、様々な試みが行われている。

## 2.2 仕事用・学習用照明

仕事用や学習用の照明にプロジェクションマッピング技術を活用する研究では、オフィスワークおよび学習を効率化するような提案がされている。

机上の物理的な文書の内容に合わせて、適切な支援情報を重畳投影するシステムの研究が広く行われている<sup>5),6)</sup>。例えば、机上にある会計文書内にある数字を指差すと、文書の隣に投影された電卓へとその情報がコピーされ、即座に計算結果を表示するシステム<sup>5)</sup>や、机上で開かれた教科書の参考情報を同様に投影するシステム<sup>6)</sup>が提案されている。

遠隔の机上間で情報を共有することで、共同作業や遠隔学習を支援する研究も盛んである。我々の研究グループで

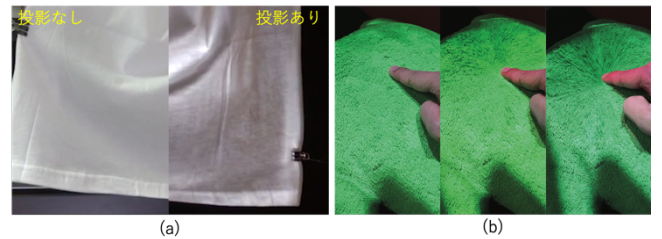


図3 プロジェクションマッピングによる柔らかさ知覚操作：(a) 視覚的な柔らかさ操作<sup>13)</sup>，(b) 触覚的な柔らかさ操作<sup>14)</sup>

Fig.3 Softness perception manipulation by projection mapping: (a) Visual softness manipulation<sup>13)</sup>, (b) haptic softness manipulation<sup>14)</sup>.

は、机上の書類への指差しや書き込み情報を、遠隔の机上にある同書類に重畳投影するシステムを提案した<sup>7)</sup> (図2(a))。従来、同様のシステムでは、互いの机上の書類の位置姿勢が同一でなければならないという制約があったが、我々は机上を観察するカメラ画像から各書類の位置姿勢を認識し、指差しする手および書き込み情報を位置整合して投影することでその制約を解決した。

その他の例としては、プロジェクションマッピングによって、積み上がった書類の一番上から順に、あたかも透明になったかのように見せることで、机上の書類探索を効率化するシステム<sup>8)</sup> (図2(b))や、本棚に収納書類の表紙画像を並べて投影表示することで書類探索を効率化するシステム<sup>9)</sup> (図2(c))、筆運びをキャンバスに重畳投影することで絵画制作の学習を支援するシステム<sup>10)</sup>などが研究されている。

## 2.3 その他の照明

その他にも様々な知的照明の提案がなされている。例えばファッション応用を指向した研究として、洗面台の照明としてプロジェクタを用いて、顔に様々な化粧を施した際の見えを再現する映像を投影するシステム<sup>11)</sup>や、着衣の模様を様々な切り替えるシステム<sup>12)</sup>等が提案されている。

プロジェクションマッピングでは視覚情報のみ提示可能であるが、これまでの研究で、映像が他の感覚にさまざまな影響を与えるクロスモーダル効果が示唆されており、視覚以外の感覚を変化させるようなプロジェクション照明の提案がなされている。例えば、柔らかい物が変形する際、その変形のスピードを操作するような映像を重畳投影すると、視覚的な柔らかさの印象を変化させられる<sup>13)</sup> (図3(a))。この技術を利用し、柔らかい物を押し込んだときに、その見かけの変形量を増幅してプロジェクションすることで、その物の触覚的な柔らかさを変化させる研究が行われている<sup>14)</sup> (図3(b))。また、ダイニングテーブルに調理風景を投影することで、食に関わる知覚や美味しさを変化させる提案もなされている<sup>15)</sup>。触覚や味覚を直接操作するためには大掛かりな装置が必要であるため、それをプロジェクショ



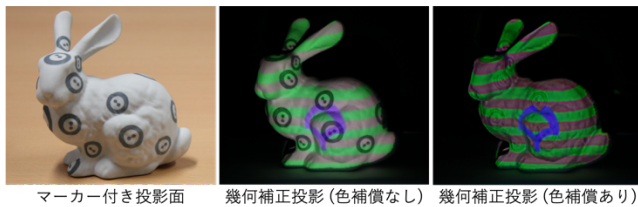


図4 プロジェクションマッピングの位置合わせ用マーカーの視覚的キャンセル<sup>17)</sup>

Fig. 4 Diminishable visual markers for geometric registration of projection mapping using radiometric compensation technique<sup>17)</sup>.

ンマッピング技術で代用できるということは、工学的・経済的にメリットが大きい。今後多様な知覚を操作するようなプロジェクション照明技術の提案が続いていくであろう。

### 3. 技術課題

2章で述べたような知的な照明を実現するためには、一般的なスクリーンとは異なり、非平面かつ模様のついた面に適切に映像を重畳投影する必要がある。さらに従来の一般的な照明との調和を考慮すると影の問題を解決する必要もある。本章では、こういった課題を解決するプロジェクションマッピング技術を紹介する。

#### 3.1 位置合わせ

平面ではない対象に投影された像は幾何学的に歪んでしまうため、対象に整合するよう、投影する画像を適切に変形させて位置合わせする必要がある。これには、プロジェクタの各画素が対象上のどの位置に投影されているか、という対応情報が必須であるため、対象の位置姿勢や変形具合といった幾何学的な情報を取得する手法が提案されている。

このような情報を計測するため、対象に目印となるマーカーを貼付し、それらをカメラで観測する技術が一般的に用いられてきたが、投影結果にマーカーが浮かび上がってしまうという問題があった。これに対し、人の目には見えず、近赤外線のみを選択的に吸光する特殊なインクをマーカーとして用いる手法が提案されている<sup>12), 16)</sup>。また、このような特殊なマーカーを用いずに、次節で述べる色補償技術を適用することで、投影像によってマーカーを視覚的にキャンセル技術も提案されている<sup>17)</sup>(図4)。

また、ラスタスキャン型のレーザープロジェクタの各画素の投影タイミングを光センサで計測することで、光センサ上の画素位置を取得して、投影映像を位置合わせする技術も提案されている<sup>18)</sup>。光ファイバを用いて光センサまで投影光を導光することも可能であり、目立たないように投影対象に光ファイバを埋め込むことで、投影結果に影響を与えない位置合わせが、このアプローチにおいても可能となる。



図5 透過型ミラー素子を大口径レンズとして用いた影の生じにくいプロジェクションマッピング技術<sup>24)</sup>

Fig. 5 Shadowless projection mapping by applying transmissive mirror device as large aperture projection lens<sup>24)</sup>.

#### 3.2 色補償

模様のある面に映像投影すると、その模様が投影結果に浮かび上がってしまうという問題がある。これは、投影面の反射率が空間的に非一様であるため、同じ色の光を投影したとしても反射光の輝度が異なってしまうことに起因する。そこで、画素毎に対象の反射率に応じて明るさを調整することで、模様の影響を抑えることが可能となる。

5年ほど前までは、プロジェクタの入出力特性(入力画素値と出力輝度値の関係)が線形であるという仮定に基づいた手法が数多く提案されていた<sup>19)</sup>が、最近では非線形性を許容するような技術の研究が盛んに進められてきている<sup>20)</sup>。さらに、複数台のプロジェクタからの投影像を重ね合わせることで反射率の低い対象上での色補償能力を向上させる手法<sup>21)</sup>や、対象の模様の細かさに対してプロジェクタの空間解像度が低すぎることに起因する色補償精度低下を改善する手法<sup>22)</sup>等、より高精度な色補償を実現する技術が様々な提案されてきている。

#### 3.3 影除去

間接照明に代表されるように、日常空間で好まれる照明は、なるべく影が出にくいよう、もしくはなるべく柔かい印象の影となるよう設計されていると考えられる(このあたりの知識については、お恥ずかしながら浅学にして持ち合わせておらず、見当はずれであれば陳謝申し上げたい。当学会誌読者諸氏の方がお詳しいであろう)。プロジェクタは一般的に、比較的小さな口径のレンズを用いて集光する光学系を採用しているため、投影光を遮ると、日常照明と比べると極めてくっきりとした影が生じてしまう。日常照明との親和性の高いプロジェクションマッピングを実現するためには、この問題の解決が必要だと考える。

影を生じにくくするため、複数台のプロジェクタを分散配置し、いずれかのプロジェクタが遮られたら、遮られていないプロジェクタから、その領域へより明るい光を投影する研究が行われている<sup>23)</sup>。一方、このような合成開口的な解決方法ではなく、光学的に解決する手法も提案されている。具体的には、空中像提示で用いられる大型の透過型ミラー素子を大口径レンズと見立てたシステムが提案され

ている<sup>24)</sup> (図5).

#### 4. おわりに

本稿では、高自由度照明技術としてプロジェクションマッピングを捉え、従来の照明の補助および置換えとしてプロジェクタを用いると実現できうる知的な照明について議論した。まず、屋内の既存照明の補助・置換えとしてプロジェクションマッピングを適用した研究事例を、リビング照明、仕事用・学習用照明、その他の照明とに分けて紹介した。次に、一般的なスクリーンとは異なり、非平面かつ模様のついた身の回りの面に、適切に映像を重畳投影するための技術課題およびその解決法について概説した。今後は、照明の専門家との共創により、プロジェクションマッピング技術を照明として利活用する本格的な社会実装フェーズの到来に期待したい。

なお、プロジェクションマッピング技術に関する、より詳しい解説については、最近、調査論文<sup>25)</sup>にまとめた。こちらをご参照いただければ幸いである。

#### 参考文献

- 1) G. Yamamoto and K. Sato: PALMbit : A PALM Interface with Projector-Camera System, In UbiComp 2007 Adjunct Proceedings, pp.276-279 (2007).
- 2) Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, and K. Sato: Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching Unreachable World, In Proc. Augmented Human International Conference, pp.19:1-19:9 (2017).
- 3) O. Bimber and D. Iwai: Superimposing Dynamic Range, ACM Trans. Graph., 27-5, pp.150:1-150:8 (2008).
- 4) Jones, B. R., Benko, H., Ofek, E., and Wilson, A. D.: IllumiRoom: peripheral projected illusions for interactive experiences, In Proc. ACM CHI, pp.869-878 (2013).
- 5) P. Wellner: Interacting with paper on the DigitalDesk, Commun. ACM, 36-7, pp.86-97 (1993).
- 6) Koike, H., Sato, Y., and Kobayashi, Y.: Integrating paper and digital information on EnhancedDesk: a method for realtime finger tracking on an augmented desk system, ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 8-4, pp.307-322 (2001).
- 7) R. Matsukage, D. Iwai, K. Sato: Consistent Desktop Sharing Based on Document Coordinate System for Face-to-face Online Meeting, In Proc. ACM SIGGRAPH ASIA Emerging Technologies, Article No. 6 (2015).
- 8) D. Iwai and K. Sato: Limpid Desk: See-Through Access to Disorderly Desktop in Projection-Based Mixed Reality, In Proc. ACM VRST, pp.112-115 (2006).
- 9) K. Matsushita, D. Iwai, and K. Sato: Interactive Bookshelf Surface for In Situ Book Searching and Storing Support, In Proc. Augmented Human International Conference, pp.2:1-2:8 (2011).
- 10) Flagg, M. and Rehg, J. M.: Projector-guided painting, In Proc. ACM UIST, pp.235-244 (2006).
- 11) A. H. Bermanno, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer: Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection, Computer Graphics Forum, 32-2, pp.311-323 (2017).
- 12) Narita G, Watanabe Y, Ishikawa M.: Dynamic Projection

Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 23-3, pp.1235-1248 (2017).

- 13) P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato: FleXeen: Visually Manipulating Perceived Fabric Bending Stiffness in Spatial Augmented Reality, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. (in press).
- 14) P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato: SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 21-11, pp.1279-1288 (2015).
- 15) 鳴海拓志, 松尾宇人, 櫻井翔, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 食卓へのプロジェクションマッピングによる食の知覚と認知の変容～天ぶらを例題として～, VR論, 23-2, pp.65-74 (2018).
- 16) 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, pp.45-56 (2015).
- 17) H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato: Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 24-2, pp.1091-1102 (2018).
- 18) Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato: Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 23-11, pp.2419-2429 (2017).
- 19) O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein and A. Grundhöfer: The Visual Computing of Projector-Camera Systems, Computer Graphics Forum, 27-8, pp.2219-2245 (2008).
- 20) A. Grundhöfer and D. Iwai: Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation, IEEE Trans. Image Process., 24-12, pp.5086-5099 (2015).
- 21) J. Tsukamoto, D. Iwai, and K. Kashima: Radiometric Compensation for Cooperative Distributed Multi-Projection System through 2-DOF Distributed Control, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 21-11, pp.1221-1229 (2015).
- 22) S. Mihara, D. Iwai, and K. Sato: Artifact Reduction in Radiometric Compensation of Projector-Camera Systems for Steep Reflectance Variations, IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., 24-9, pp.1631-1638 (2014).
- 23) D. Iwai, M. Nagase, and K. Sato: Shadow Removal of Projected Imagery by Occluder Shape Measurement in a Multiple Overlapping Projection System, Virtual Reality, 18-4, pp.245-254 (2014).
- 24) K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon and K. Sato: Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate, In Proc. IEEE VR, (2019).
- 25) A. Grundhöfer and D. Iwai: Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications, Computer Graphics Forum, 37-2, pp.653-675 (2018).

#### 著者紹介

|                                        |                                                                           |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>御顔写真<br/>(必須ではありません。<br/>希望者のみ)</b> | 1980年生。2007年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)。現在、同准教授。プロジェクションマッピングに関する研究に従事。 |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|