プロジェクションマッピングによる照明と映像の融合
Integration of Lighting and Display through Projection Mapping

岩井 大輔（大阪大学）
Daisuke Iwai (Osaka University)

概要　プロジェクタから実物に映像を投射して、その見た目を切り替えるプロジェクションマッピングは幅広い分野での活用が期待されている。従来、投影画質を向上させる技術の研究が進み、対象の見た目を自在に操れるようになってきた。しかしながら、それは暗室で、しかも観察者が投影光を遮蔽することが無い、という強い制約の元でしか動作が保証されていなかった。本講演では、これらの技術的制約を打破すべく、著者らが最近取り組んでいる、プロジェクションマッピングにより照明と映像を融合する研究を紹介する。

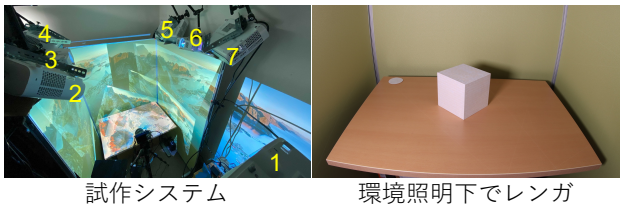
キーワード　プロジェクションマッピング　照明

1. はじめに

プロジェクタから実物に映像を投射して、その見た目を切り替えるプロジェクションマッピング技術は、アート、エンタテイメント、広告[1),2),3)]といった既存の応用領域にとどまらず、工業デザイン[4)]、遠隔コミュニケーション[5),6)]、教育を含むデスクワーク[7),8),9)]、手術現場[10)]など、幅広い分野での活用も検討されてきている。これらさまざまな分野での応用を可能にすべく、対象の見た目を所望の色や模様に変更するための投影画質向上を目指した基盤技術の研究が進められている[11)]。例えば、対象が移動していても投影像をピタッと貼り付ける幾何補正技術[12),13),14)]や、対象の模様をキャンセルする色補償技術[15),16)]が確立されてきた。

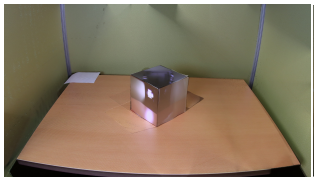
一方、プロジェクションマッピングには、それに内在する技術的制約によって、これら投影画質を向上するための試みが台無しにされてしまうという状況が容易に生じてしまう。例えば、プロジェクションマッピングを明るい環境で行うと、投影結果のコントラストが大幅に低下し、昼光下ではほぼ視認できなくなる。すなわち、環境光が統制された暗室でしか所望の投影画質を担保できない。また、観察者が対象に近づくと、投影光を遮ってしまう（つまり、影が生じる）ため、投影コンテンツが消失してしまう。

我々の研究グループは、プロジェクションマッピング技術を、映像投射の目的でのみ用いるのではなく、環境照明としても用いることが、これらの制約を解消する有望なアプローチと考えている[17)]。以降、2 節にて暗室制約を解消する試みについて述べ、3 節にて影の問題を解決する試みについて述べる。

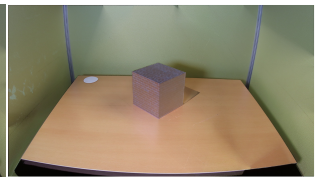


試作システム
（プロジェクタ7台）

環境照明下でレンガ
テクスチャ投影結果



提案システムでの
鏡面反射表現



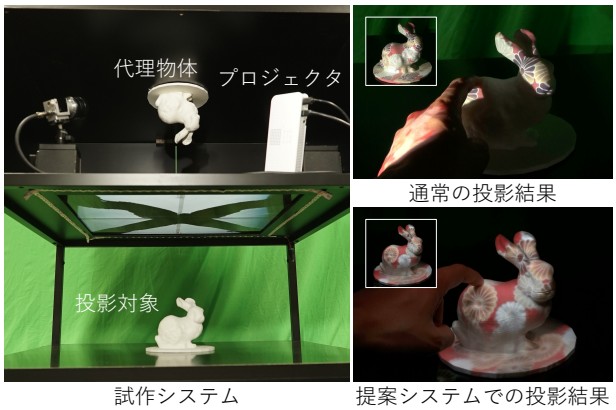
提案システムでレンガ
テクスチャ投影結果

図 1：暗室制約を解消するプロジェクションマッピング技術（参考文献[18)]より）

2. 暗室制約を解消するプロジェクションマッピング技術

環境照明は投影結果のコントラストを有意に低下させてしまうため、プロジェクションマッピングは暗室や夜中に行うという暗黙の前提が存在していた。しかしながら、人は目の前の実物の質感を判断する際、周囲の環境からその実物に照射される光の情報を利用している。例えば、環境の映り込みによって、その物体が鏡面であると判断する。また、投影対象のみが明るく、周りは暗い、というのはプロジェクションマッピングではよくある状況だが、我々の日常生活でそのような状況は稀である。すなわち、プロジェクションマッピングでいくら現実感高く高画質に対象の見えや質感を切り替えることができたとしても、それは観察者にとっては極めて不自然な状況であると考えられる。

そこで、環境は明るい状態を保ちつつ、投影結果のコントラストを低下させない方策として、環境照明の効果をプロジェクションマッピングで再現する、という技術



通常の投影結果

試作システム　　提案システムでの投影結果

図 2：再帰透過光学系を用いた大開口投影（参考文献 [24] より）

の研究を進めている [18]。一般的な環境照明は、投影対象とその周囲環境を区別せず光を照射してしまうため、投影結果のコントラストを低下させてしまう。一方プロジェクタは、照射方向毎にその照度をコントロールできるため、投影対象のみ選択的に照明しないことが可能である。

まず、環境照明を点灯させた状態で、環境面上の各点の輝度を計測する。次に、環境照明を消灯し、各点の輝度を再現するようプロジェクタ投影画像を計算して投影する。この計算には、従来確立されてきた色補償技術を用いる。

図 1 に、7 台のプロジェクタを用いた原理検証用のシステムを示す。環境照明を点灯させた状態では投影結果のコントラストが低下して投影コンテンツが視認しにくかったのに対し、環境照明を消灯しプロジェクションマッピングでそれを再現した提案手法の結果では、投影コンテンツのコントラストが向上し、視認性が上がっていることが確認できる。また、鏡面反射の表現も可能となっていることも確認できる。

3. 影問題を克服するプロジェクションマッピング技術

建物の壁などの巨大な構造物に投射された映像を鑑賞するような、従来型のプロジェクションマッピングでは、観察者が対象に近づくような状況は想定されておらず、影は重大な問題とはみなされていなかった。しかしながら、投影対象にふれることで投影コンテンツを操作するインタラクティブなプロジェクションマッピングや、小型の対象の質感や見た目を切り替えることが想定される工業デザイン支援などの応用分野では、観察者が対象とプロジェクタの間に入り込んでしまい、その結果、投影光が遮蔽され、影が生じてしまう。

従来、このような影の問題に対しては、複数台のプロジェクタを環境中に分散配置し、あるプロジェクタが遮蔽され影が発生したら、別の遮蔽されていないプロジェクタから影領域に映像投影して補う影除去技術が研究されてきた [19),20),21),22)]。しかしながら、遮蔽状態を観測した後、それを補償する投影画像を計算するため、影の発生からその補償まで、1 フレーム分以上の遅延が生じてしまう。

一般的な環境照明下では、対象が様々な方向から照明されているため、影ができたとしても全ての照明の光が完全に遮蔽されず、真っ暗になることがない。我々はこの点に着想を得て、光学的なアプローチでプロジェクションマッピングにおける影の課題を解決する技術の開発をすすめている。本稿では、これまでに取り組んできた二つのアプローチを紹介する。

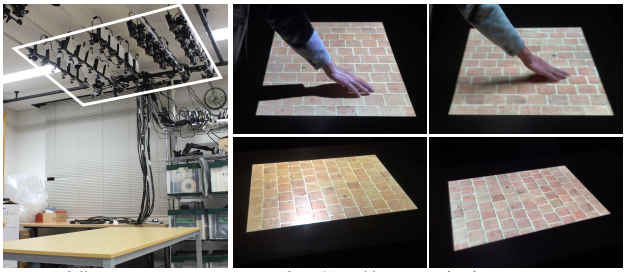
3.1 再帰透過光学系を用いた大開口投影手法

一つ目は、再帰透過光学系を用いた大開口投影システムにより、影を発生しにくくする技術である [23),24)]。技術的詳細は割愛するが、この光学系は空中像提示のために開発されたもので、空間の 1 点から照射された光が、光学素子に対して面対象の位置に結像する。この光学素子を挟んで面対象の位置に、投影対象と、その面対象の形状をした代理物体を配置する。プロジェクタでこの代理物体の見た目を操作すると、再帰透過光学系により、代理物体上の見えがそのまま投影対象にコピーされるため、対象の見えも操作できるようになる。この光学素子が、観察者の手など、想定される遮蔽物よりも十分に大きければ、投影光が完全に遮蔽されることはなくなるため、影を抑制することができる。

図 2 に、試作システムとその投影結果を示す。通常のプロジェクションマッピングでは大きな影が発生してしまう状況でも、提案システムではほとんど影が生じていないことが確認できる。

3.2 複数台のプロジェクタを用いた合成開口投影手法

再帰透過光学系を用いる手法は、システム構成がシンプルで影抑制の効果も高いが、代理物体を準備しなければいけないことが制約である。そこで二つ目のアプローチとして、複数台のプロジェクタを用いた合成開口投影



試作システム（プロジェクタ25台）　通常の投影結果　提案システムでの投影結果

図 3：複数台プロジェクタを用いた合成開口投影（参考文献 [25] より）

技術の研究を進めている[25]。投影台数が増えて対象への照射角度範囲が広がれば、遮蔽を補償するような処理をせずとも影の発生は抑制できると考えられる。

図 3 に、25 台のプロジェクタを 5×5 の 2 次元アレイ状に並べて天井に設置し、下方に設置した机の上に位置合わせしてテクスチャ投影した結果を示す。1 台のみで投影した場合と比べて、観察者の手による影の発生が抑制されていることが確認できる。また副次的な効果として、鏡面反射の発生も抑制できていることが確認できる。情報提示に必要な照度を 25 台のプロジェクタに分散していることから、各プロジェクタからの照度が抑えられ、鏡面反射が複数の角度に分散され、抑制できている。観察者へのカジュアルなインタビューからは、「映像が投射されているというよりも、むしろ、対象の反射特性が切り替わったかのように感じた」というコメントが得られており、当初目的以外にも興味深い効果があることが示唆されている。

5. まとめ

プロジェクションマッピングに内在する、暗室と影の 2 種類の技術的制約を解消する目的で、プロジェクションマッピング技術を環境照明として用いるというコンセプトで進めてきた研究について紹介した。今後は、照明技術の知見も取り入れつつ、自然で実環境になじむプロジェクションマッピングの実現を目指していきたい。

文　献

(1) M. R. Mine, J. van Baar, A. Grundhofer, D. Rose and B. Yang: “Projection-Based Augmented Reality in Disney Theme Parks” IEEE Computer, vol. 45, no. 7, pp. 32-40, (2012)

(2) Bermano, A.H., Billeter, M., Iwai, D. and Grundhöfer, A.: “Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection” Computer Graphics Forum, Vol. 36, pp. 311-323, (2017)

(3) Amit Bermano, Philipp Brüschweiler, Anselm Grundhöfer, Daisuke Iwai, Bernd Bickel, and Markus Gross: “Augmenting physical avatars using projector-based illumination” ACM Trans. Graph. No. 32, Vol. 6, Article 189, (2013)

(4) T. Takezawa, D. Iwai, K. Sato, T. Hara, Y. Takeda and K. Murase: “Material Surface Reproduction and Perceptual Deformation with Projection Mapping for Car Interior Design” Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 251-258, (2019)

(5) Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, and Federico Zannier: “Dyadic projected spatial augmented reality” Proc. ACM symposium on User interface software and technology (UIST), pp. 645–655, (2014)

(6) D. Iwai, R. Matsukage, S. Aoyama, T. Kikukawa and K. Sato: “Geometrically Consistent Projection-Based Tabletop Sharing for Remote Collaboration” IEEE Access, vol. 6, pp. 6293-6302, (2018)

(7) Hideki Koike, Yoichi Sato, and Yoshinori Kobayashi: “Integrating paper and digital information on EnhancedDesk: a method for realtime finger tracking on an augmented desk system” ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 8, No. 4, pp. 307-322, (2001)

(8) Daisuke Iwai and Kosuke Sato: “Limpid desk: see-through access to disorderly desktop in projection-based mixed reality” Proc. ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST), pp, 112–115, (2006)

(9) Iwai, D. and Sato, K: “Document search support by making physical documents transparent in projection-based mixed reality” Virtual Reality, Vol. 15, pp. 147–160, (2011)

(10) Nishino, Hiroto et al.: “Real-time Navigation for Liver Surgery Using Projection Mapping With Indocyanine Green Fluorescence: Development of the Novel Medical Imaging Projection System” Annals of Surgery, Vol. 267, No. 6, pp. 1134-1140, (2018)

(11) Grundhöfer, A. and Iwai, D.: “Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications” Computer Graphics Forum, Vol. 37, pp. 653-675, (2018)

(12) Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi 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)

(13) 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)

(14) D. Tone, D. Iwai, S. Hiura and K. Sato: “FibAR: Embedding Optical Fibers in 3D Printed Objects for Active Markers in Dynamic Projection Mapping” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 26, no. 5, pp.

2030-2040, (2020)
(15) A. Grundhöfer and D. Iwai: “Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation” IEEE Transactions on Image Processing, vol. 24, no. 12, pp. 5086-5099, (2015)
(16) Huang, Bingyao and Ling, Haibin: “CompenNet++: End-to-end Full Projector Compensation” Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), (2019)
(17) Daisuke Iwai: “Is Projection Mapping Natural? Towards Physical World Augmentation Consistent with Light Field Context” Proc. International Display Workshops (IDW), pp. 964-967, (2021)
(18) Masaki Takeuchi, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato: “Projection Mapping in the Light: A Preliminary Attempt to Substitute Projectors for Room Lights” Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), pp. 653-654, (2023)
(19) Nagase, M., Iwai, D., and Sato, K.: “Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment” Virtual Reality, Vol. 15, pp. 119–132, (2011)
(20) Iwai, D., Nagase, M., and Sato, K: “Shadow removal of projected imagery by occluder shape measurement in a multiple overlapping projection system” Virtual Reality, Vol. 18, pp. 245–254, (2014)
(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) Takashi Nomoto, Wanlong Li, Hao-Lun Peng, and Yoshihiro Watanabe: “Dynamic Multi-projection Mapping Based on Parallel Intensity Control” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 28, No. 5, pp. 2125-2134, (2022)
(23) K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon and K. Sato: “Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate” Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 1309-1310, (2019)
(24) K. Hiratani, D. Iwai, Y. Kageyama, P. Punpongsanon, T. Hiraki and K. Sato: “Shadowless Projection Mapping using Retrotransmissive Optics” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 29, no. 5, pp. 2280-2290, (2023)
(25) 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, pp. 238-240, (2022)