

# [招待講演] プロジェクションマッピングにおける深層学習

岩井 大輔<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: <sup>†</sup> daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし 身の回りの実物に映像を投射することで、ユーザが裸眼でバーチャルリアリティおよび拡張現実を体験できるプロジェクションマッピング (PM) では、実空間の様々な要因による画質劣化 (幾何歪み、色ずれ、焦点ぼけ等) の補償が主要な技術課題である。従来、要因ごとに劣化過程をモデル化し、その逆問題を解くアプローチが主流であった。一方、近年では、劣化過程を陽にモデル化せず、深層学習によって end-to-end に画質劣化を補償する技術が提案され、従来よりも高い性能を示すことが明らかになってきた。さらに、生成 AI を用い、PM コンテンツをシーンの文脈に合わせて自動生成する取り組みも始まっている。本講演では、このような PM における深層学習技術について概説する。

キーワード プロジェクションマッピング, 深層学習, ニューラルネットワーク, 生成 AI

## [Invited Talk] Deep Learning in Projection Mapping

Daisuke IWAI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

E-mail: <sup>†</sup> daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

**Abstract** Projection mapping (PM) allows users to experience virtual and augmented reality without wearing displays by projecting imagery onto real-world objects. A significant technical challenge in PM is compensating for image quality degradation caused by various factors in the physical world, such as geometric distortion, photometric distortion, and defocus. Conventional techniques have modeled these degradation processes individually and solved the corresponding inverse problems. However, recent advancements have shifted towards using deep learning to compensate for these degradations in an end-to-end manner without explicitly modeling the degradation processes. This method has shown superior performance compared to conventional techniques. Additionally, there are emerging efforts to automatically generate PM content tailored to the context of the scene using generative AI. This invited talk will provide an overview of such deep learning technologies in projection mapping.

**Keyword** Projection Mapping, Deep Learning, Neural Network, Generative AI

### 1. はじめに

身の回りの実物に映像を投射するプロジェクションマッピング (PM) は、ユーザが裸眼でバーチャルリアリティ (VR) および拡張現実 (AR) を体験できるという優位性から、化粧支援[1,2,3]、手術支援[4]、物体探索支援[5,6,7]、工業デザイン支援[8,9]、遠隔対話[10]、身体拡張[11]等、様々なアプリケーションの検討が進められている。一方、これらのアプリケーションにおいて所望の映像効果を得るためには、実空間への映像投射過程に存在する様々な要因による画質劣化を補償する必要がある。例えば、投射映像は立体面で幾何学的に歪み、模様をついた面で色がずれる。光効率を最大化するためプロジェクタの口径は大きく設計されており、立体面では焦点ぼけが生じやすい。これまで、これらの技術課題に対して、それぞれの画質劣化過程を精緻にモデル化し、その逆問題を解く補償技術

が数多く提案されてきた (詳細については、2000 年代 [12]、2010 年代 [13]、それ以降 [14] の各サーベイを参照されたい)。

一方、2010 年代末より、明示的に画質劣化過程をモデル化するのではなく、深層学習を用い、プロジェクタへの入力画像から観察者が目にする見え (観察者の代わりにカメラを用いて評価) までを end-to-end にニューラルネットワークで表現する試みがなされてきている。これまでの研究により、従来のモデルベースの技術よりも高い補償性能を示すことや、計算の高速化、複数の劣化過程を同時に補償できることなど、深層学習ベースの技術の多面的な優位性が明らかになってきた。さらに生成 AI の技術も PM に大きなインパクトを与える可能性がある。PM で投射する映像コンテンツの制作は、投影対象の形状と合致する必要があるなど固有の制約があり、容易ではない。そこで、生成 AI

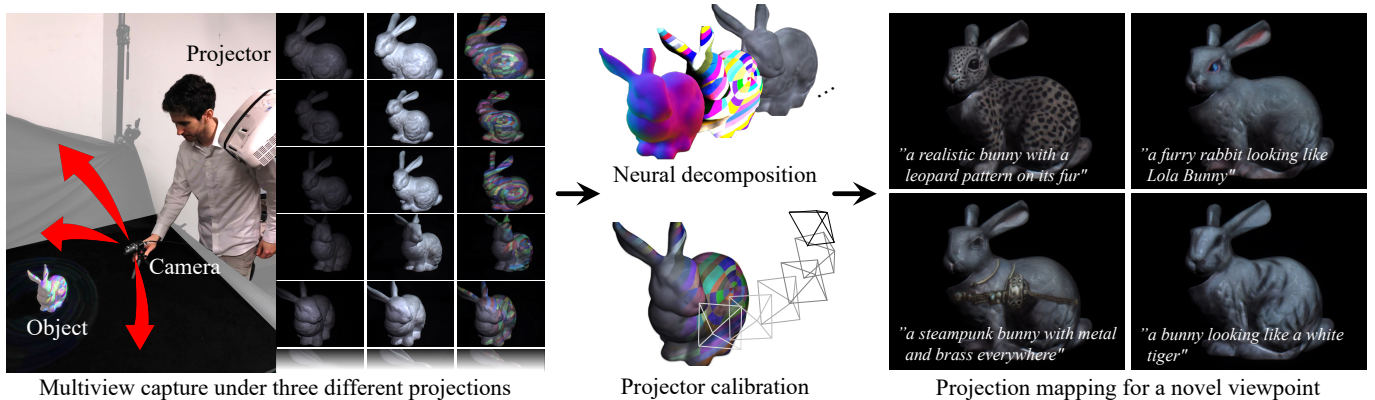


図 1：対象の形状・反射特性およびプロジェクタの内部・外部パラメータの推定を可能とする深層ニューラルネットワーク技術と、生成 AI による PM コンテンツの自動生成[22]

の技術によって、投影対象の文脈に適した映像コンテンツを自動生成する試みがなされつつある。

以上を踏まえ、本招待講演では、深層学習技術を PM に適用した研究事例をご紹介します。

## 2. 深層学習を用いた PM 画質劣化補償

### 2.1. 色補償

模様をついた対象面への PM では、模様が PM 結果に浮かび上がってしまい、目標の見えから色がずれてしまう。そこで、プロジェクタ画素単位で投射色を調整することでその模様を視覚的にキャンセルする色補償技術の研究が進められてきた。従来のモデルベースの技術では、色ずれの過程を、プロジェクタ光と対象面反射率との積で表される基本的な反射モデルに、環境光の重畳や、プロジェクタとカメラ間の色空間の差異、そしてそれぞれの非線形なガンマ特性等を組み込んでモデル化する。そして、複数枚のカラーパターンの投射結果を撮影することで、そのモデルパラメータを推定し、目標の見えを再現するための最適な画素値を算出する。しかしながら、このようなモデルベースの手法ではモデル化誤差が無視できず、色ズレの補償性能に限界があった。このため、深層学習ベースの技術が提案される前においても、すでに、プロジェクタへの入力色と観測色との対応を大量にサンプリングし、その間を非線形補間する、という方策が色補償の最高性能を示すという状況にあった[15]。

これに対し、Stony Brook 大学の Huang らによって、深層ニューラルネットワークを色補償に適用する一連の技術が、2019 年より立て続けに発表された。最初に提案された CompenNet は、単一グレイ画像をプロジェクタより投射した際のシーンの見えと、目標の見えの 2 種類の画像を受け取ると、その目標の見えを再現するための PM 画像を出力する、U-Net 型の深層畳み込みニューラルネットワークである[16]。500 枚の自然画像を用いて訓練したネットワークが、上述の非線形補

間技術よりも良好な色補償画像を出力できることが示された。その後、同グループは同ネットワークを拡張して、プロジェクタとカメラの画素対応も推定できる CompenNet++ [17]および CompenNetSt++ [18]を発表した。さらに、Attention 機構を導入することで色補償できる画像の解像度を向上させることにも成功している[19]。また、ネットワークのパラメータをオンライン更新する枠組みによって、動画コンテンツを投射しながら色補償精度を向上させていく技術も提案している[20]。

最近では、色補償や画素対応取得に加えて、対象の形状や反射特性をも推定する深層ニューラルネットワーク技術も提案されている。2021 年に Huang らが発表した技術では、プロジェクタの画角等の内部パラメータ、および、カメラとの位置関係を表す外部パラメータがあらかじめ較正されている必要があった[21]。一方、2023 年に我々のグループが提案した技術ではその制約を解消し、プロジェクタの内部・外部パラメータが未知の条件でも、対象の形状および反射特性を推定し、色補償することを可能とした[22](図 1)。さらに、これまでの深層学習ベースの色補償技術では、撮影カメラ視点での見えについてのみ色補償可能であったが、[22]では、異方性の反射特性も推定しており、他の視点での見えについても色補償を可能にした。

### 2.2. 焦点ぼけ補償

上述の色補償は、観察者の代わりとなるカメラとプロジェクタそれぞれの画素が 1 対 1 で対応すると仮定してよかった。一方、焦点ぼけは複数のプロジェクタ画素が重なり合う現象を引き起こすため、その仮定は成立せず、モデルベースの技術では計算が複雑化し、映像のフレームレートと同等なリアルタイム補償処理のハードルは高かった。

これに対し、我々のグループは、U-Net 型の深層畳み込みニューラルネットワークを用いて、プロジェク

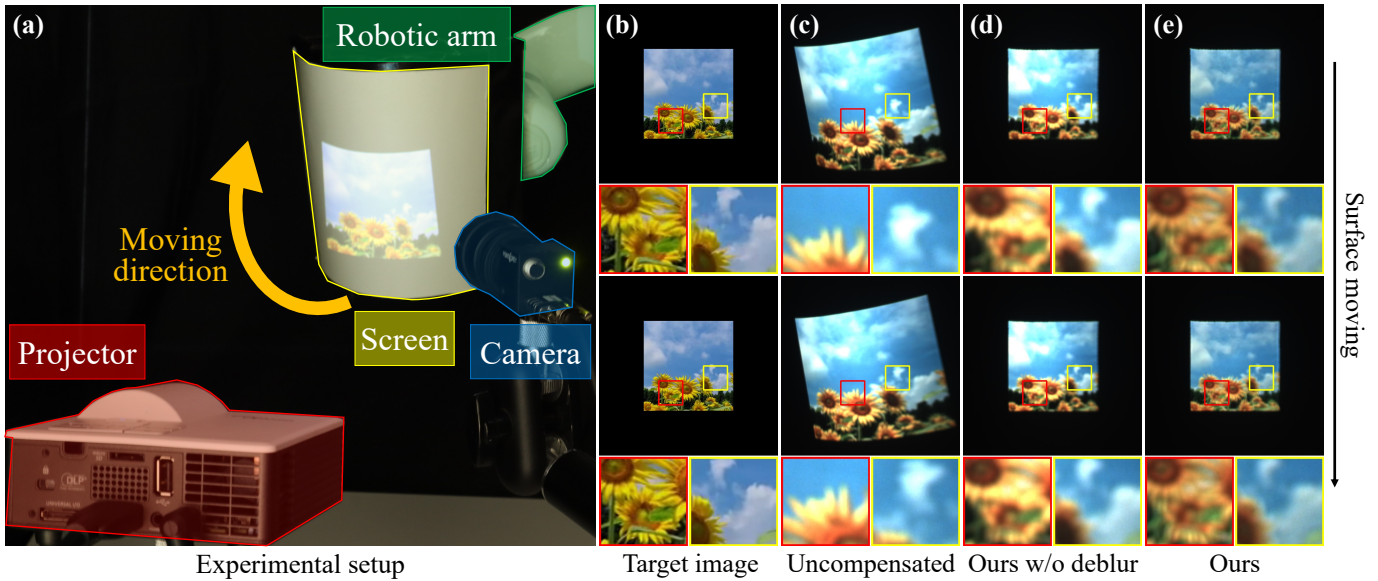


図 2 : 深層ニューラルネットワークを用いた焦点ぼけ補償[25]

タの焦点ぼけを補償する技術を開発した[23]。この研究では、プロジェクタとカメラとを同軸に設置するセットアップにおいて、従来法と同等の画質補償性能を維持しつつも、1 フレームあたり 90 秒かかっていた計算速度を 0.3 秒程度まで大幅に向上させることに成功した。その後、シーンの奥行きが動的に変化する場合でも焦点ぼけ補償可能とし[24]、また、プロジェクタとカメラを同軸化しない一般的なセットアップでも動的なシーンでの焦点ぼけ補償を実現した[25] (図 2)。この技術は、一般的な球面レンズによる焦点ぼけだけでなく、空中像提示で用いられる特殊な光学系 (例: Micro-Mirror Array Plate, ASKA3D) で生じる像のぼやけの解消にも適用できることが示されている[26]。

焦点ぼけの補償に、プロジェクタ光学系の再設計からアプローチした研究もある[27]。この研究では、プロジェクタのレンズに DOE (Diffractive Optical Element)を取り付ける。DOE のパターンと投射映像の双方を深層ニューラルネットワークを用いて同時に最適化する枠組みを提案し、プロジェクタの被写界深度を広げること成功した。

### 3. 生成 AI による PM コンテンツ自動生成

生成 AI を PM に適用する研究事例はまだ多くない。我々は、PM 対象の形状に応じて映像コンテンツを自動生成する試みを[22]の研究で実施している。観察位置から見たときの対象のシルエットと、コンテンツを指定するテキスト情報 (例えば、シルエットがうさぎの形をしている場合は、「毛むくじゃらのうさぎ」等) から、Diffusion model ベースのニューラルネットワークによって PM コンテンツを自動生成することに成功した (図 1)。

### 4. まとめ

本招待講演では、PM 分野における深層学習技術の適用事例について紹介した。今後の展開としては以下の 3 点が有望であるように考えている。まず一つ目は、これまで個別に扱われてきた色補償、幾何補正、焦点ぼけなどの画質劣化過程の全てを統一的に扱えるネットワークの研究である。二つ目は、1 台だけでなく複数台のプロジェクタによる PM を同時に最適化するネットワークの研究である。最後は、生成 AI のさらなる PM への適用である。今後も、高画質な PM 体験を提供すべく、深層学習を PM に適用する試みがさらに進展していくものと考えている。

### 文 献

- [1] C. Siegl, V. Lange, M. Stamminger, F. Bauer, and J. Thies: "FaceForge: "Markerless Non-Rigid Face Multi-Projection Mapping," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 23, 11, pp. 2440-2446 (Nov. 2017)
- [2] A. H. Bermano, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer: "Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection," Computer Graphics Forum, 36, pp. 311-323 (2017)
- [3] H. Peng, S. Nishida, and Y. Watanabe: "Studying User Perceptible Misalignment in Simulated Dynamic Facial Projection Mapping," Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 493-502 (Oct. 2023)
- [4] H. Nishino, E. Hatano, S. Seo, T. Nitta, T. Saito, M. Nakamura, K. Hattori, M. Takatani, H. Fuji, K. Taura, and S. Uemoto: "Real-time Navigation for Liver Surgery Using Projection Mapping with Indocyanine Green Fluorescence: Development of the Novel Medical Imaging Projection System," Annals of Surgery, 267, 6, pp. 1134-1140 (June 2018)
- [5] D. Iwai and K. Sato: "Document search support by

- making physical documents transparent in projection-based mixed reality,” *Virtual Reality*, 15, pp. 147-160 (June 2011)
- [6] K. Matsushita, D. Iwai, and K. Sato: “Interactive bookshelf surface for in situ book searching and storing support,” *Proc. Augmented Human International Conference (AH)*, pp. 2:1-2:8 (Mar. 2011)
- [7] Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato: “Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23, 11, pp. 2419-2429 (Nov. 2017)
- [8] 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 (Mar. 2019)
- [9] G. Cascini, J. O’Hare, E. Dekoninck, N. Becattini, J.-F. Boujut, F. B. Guefrache, I. Carli, G. Caruso, L. Giunta, and F. Morosi: “Exploring the use of AR technology for co-creative product and packaging design,” *Computers in Industry*, 123, 103308:1-103308:17 (Dec. 2020)
- [10] D. Iwai, R. Matsukage, S. Aoyama, T. Kikukawa, and K. Sato: “Geometrically Consistent Projection-Based Tabletop Sharing for Remote Collaboration,” *IEEE Access*, 6, pp. 6293-6302 (2018)
- [11] Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, and K. Sato: “Body cyberization by spatial augmented reality for reaching unreachable world,” *Proc. Augmented Human International Conference (AH)*, 19:1-19:9 (Mar. 2017).
- [12] O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein, and A. Grundhöfer: “The Visual Computing of Projector-Camera Systems,” *Computer Graphics Forum*, 27, pp. 2219-2245 (2008)
- [13] A. Grundhöfer and D. Iwai: “Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications,” *Computer Graphics Forum*, 37, pp. 653-675 (2018)
- [14] D. Iwai: “Projection mapping technologies: A review of current trends and future directions,” *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 100, 3, pp. 234-251 (Mar. 2024)
- [15] A. Grundhöfer and D. Iwai: “Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 24, 12, pp. 5086-5099 (Dec. 2015)
- [16] B. Huang and H. Ling: “End-to-end projector photometric compensation,” *Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 6803-6812 (2019)
- [17] B. Huang and H. Ling: “Compennet++: End-to-end full projector compensation,” *Proc. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 7164-7173 (2019)
- [18] B. Huang, T. Sun, and H. Ling: “End-to-end full projector compensation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44, pp. 2953-2967 (2022)
- [19] Y. Wang, H. Ling, and B. Huang: “Compenhr: Efficient full compensation for high-resolution projector,” *Proc. IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 135–145 (2023)
- [20] Y. Wang, H. Ling, and B. Huang: “ViComp: Video Compensation for Projector-Camera Systems,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30, 5, pp. 2347-2356 (May 2024)
- [21] B. Huang and H. Ling: “Deprocams: Simultaneous relighting, compensation and shape reconstruction for projector-camera systems,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27, pp. 2725-2735 (2021)
- [22] Y. Erel, D. Iwai, and A. H. Bermano: “Neural projection mapping using reflectance fields,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29, pp. 4339-4349 (2023)
- [23] Y. Kageyama, M. Isogawa, D. Iwai, and K. Sato: “Prodebnet: projector deblurring using a convolutional neural network,” *Optics Express*, 28, pp. 20391-20403 (2020)
- [24] Y. Kageyama, D. Iwai, and K. Sato: “Online projector deblurring using a convolutional neural network,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28, pp. 2223-2233 (2022)
- [25] Y. Kageyama, D. Iwai, and K. Sato: “Efficient Distortion-Free Neural Projector Deblurring in Dynamic Projection Mapping,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, early access.
- [26] 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*, 29, 5, pp. 2280-2290 (May 2023)
- [27] Y. Li, Q. Fu, and W. Heidrich: “Extended depth-of-field projector using learned diffractive optics,” *IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 449-459 (2023)