

人間拡張のためのプロジェクションマッピング技術

Projection Mapping Technologies for Human Augmentation

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

[E-mail: daisuke.iwai.es@osaka-u.ac.jp](mailto:daisuke.iwai.es@osaka-u.ac.jp)

Projection mapping (PM) technology, overlaying images onto physical objects around us via projected imagery, enables multiple people to simultaneously experience virtual and augmented realities without the need for special glasses. While PM is often used in augmenting physical environments, its application for human augmentation has also been explored, such as extending a human body part into physical space. In this talk, I will introduce examples of human augmentation using PM and provide an overview of the underlying technologies that support it.

1. はじめに

身の回りの実物に映像を投射して重ね合わせるプロジェクションマッピング (PM) は、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着したり平面ディスプレイを手持ちする必要がある他の方式と比べ、複数人が同時に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点が優位である。この特長を活かして、従来のアート・エンタテインメント用途に限らず、手術支援¹⁾、物体探索支援^{2),3),4)}、工業デザイン支援^{5),6)}、遠隔対話⁷⁾など、様々なアプリケーションの検討が進められており、その重要な応用先の一つとして人間拡張も注目されている。

これまでの PM による人間拡張の試みは、映像投射により身体の見えを切り替えるアプローチと、実環境の見えを切り替えるアプローチの2種に大別することができる。本稿では、それぞれについて具体的な研究例を紹介する。

2. 身体への映像投射による身体拡張

身体に映像を投射してその見えを自在に切り替える身体拡張のアプローチにおける最も典型的な例は、顔への投影であろう。コンピュータビジョン分野で開発が進んでいる顔認識技術は、顔に特殊なマーカーなどを取り付ける必要なく、高速に顔の各パーツのトラッキングを可能とする。これを利用することで、顔が移動したり表情が変化したりする場合でも、あたかも瞬時に化粧が切り替わったかのような映像効果を一貫して提示し続けられることが示されている^{8),9),10)} (図1)。

顔以外の身体 PM では、身体に新たな機能を付加することや、触知覚を操作することが試みられている。前者としては、掌にボタンなどの GUI (Graphical User Interface) ウィジェットを投射することで、掌をタッチ入力可能なコンピュータ画面化し、家電の操作などを行う研究が行われている^{11),12),13)}。また、手の甲に矢印などの位置姿勢を表す視覚情報を投射することで、

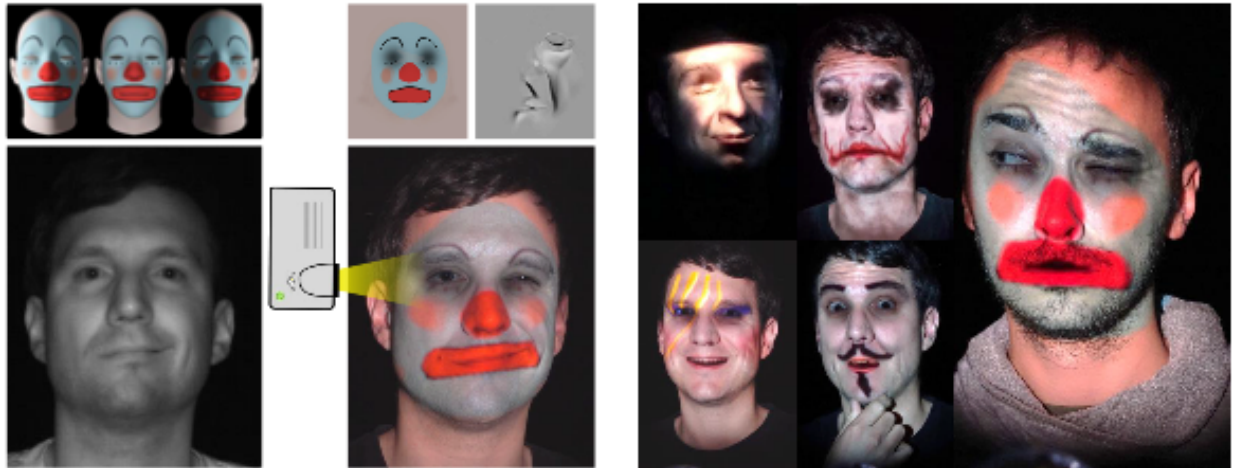


図1 顔へのPMによる身体拡張⁸⁾



図2 トレーナー縮小手の映像投射による手作業教示インターフェース¹⁵⁾

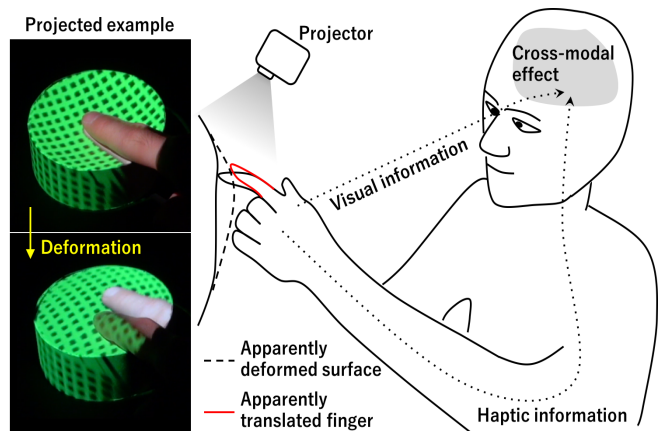


図3 疑似力触覚による形状触知覚操作¹⁶⁾

ユーザに手の位置や動きを教示するインターフェースも提案されている¹⁴⁾。我々の研究グループでは、更に詳細に手や指の動きを教示するため、トレーナーの手の映像を縮小して、被訓練者の手に投射する手作業教示インターフェースの研究を進めている¹⁵⁾ (図2)。後者、すなわち、身体へのPMによって触知覚を操作する研究では、視覚が触力覚に感覚間の隔たりを超えて影響を与える疑似触力覚のメカニズムを利用している。我々の研究グループでは、ユーザ指先の見えを変調することで接触物体の形状触知覚¹⁶⁾や柔らかさ触知覚¹⁷⁾を、操作できることを確認している (図3, 4)。

3. 実環境への映像投射による身体拡張

実環境へのPMによる身体拡張の典型的な例は、人の視覚を拡張するものであろう。1節で述べたPMの応用群はそれを代表するものである。例えば、積み重なった書類群を透明化して探索を支援する技術は、見方を変えれば、人に透明視の能力を付与する視覚拡張の例と考えることもできる²⁾。より直接的に人の視覚を拡張する技術としては、焦点距離を高速に変調可能な液体レンズを眼鏡として用い、それと同期する高速プロジェクタ (映像更新レート 1,000 Hz) で実環境を選択的に照明することで、任意の環境面のみがシャープに、それ以外はぼけて見える視覚を与

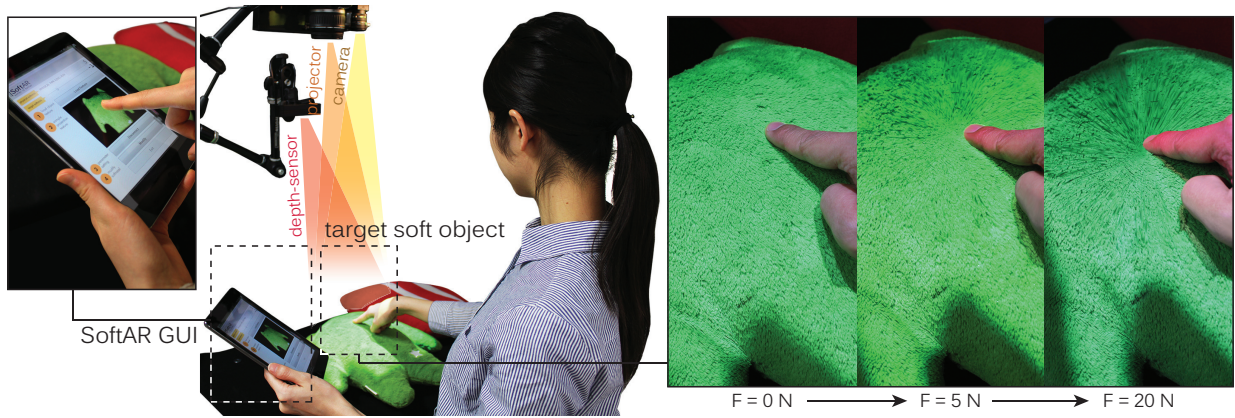


図4 疑似力触覚による柔らかさ触知覚操作¹⁷⁾

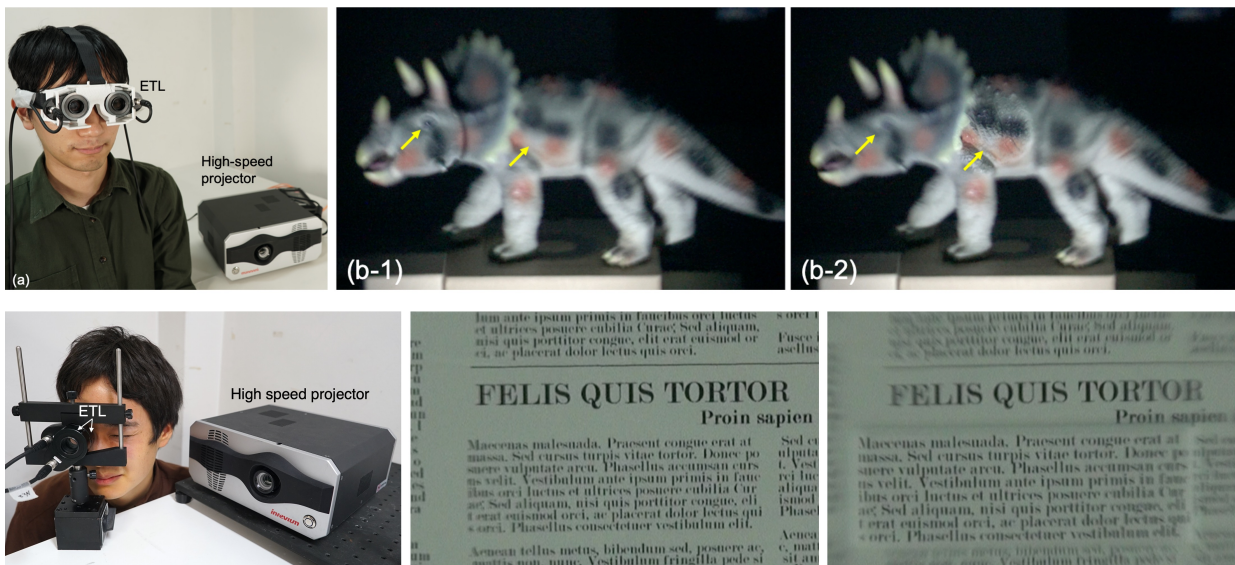


図5 液体レンズ眼鏡と高速プロジェクタとの組み合わせによる
視界のぼけ操作¹⁸⁾ (上) と拡大率操作¹⁹⁾ (下)

えるもの¹⁸⁾や、同様の原理によって特定の環境面のみを拡大視する視覚を与えるもの¹⁹⁾が挙げられる(図5)。

我々の研究グループでは、実環境へ身体像を投射する身体拡張についても検討を進めている。具体的には、手元のタッチパネルなどで計測した手指に微小運動を増幅して、手元から伸びるように投射された手腕の映像を操作する ExtendedHand というシステムを構築している²⁰⁾(図6)。このシステムを用いれば、遠くにあるものを指差したり、IoT 家電を手で直観的に操作することが可能となる。また、疑似触力覚の概念を組み込み、投射された指先映像の動きを対象の材質や形状に応じて変調することで、その対象に触れている感覚を増強させることにも取り組んでいる²¹⁾。さらには、遠隔対話システムにこの技術を導入することで、従来の平面のコンピュータ画面に表示される上半身の映像から手腕が実空間に伸びさせることも可能とし、空間を超えた身体拡張も実現した²²⁾(図7)。さらに、ドローンにプロジェクタを設置することで、固定プロジェクタで課題となっていた拡張手腕の表示位置の制約を解消する技術についても検討を行っている²³⁾。

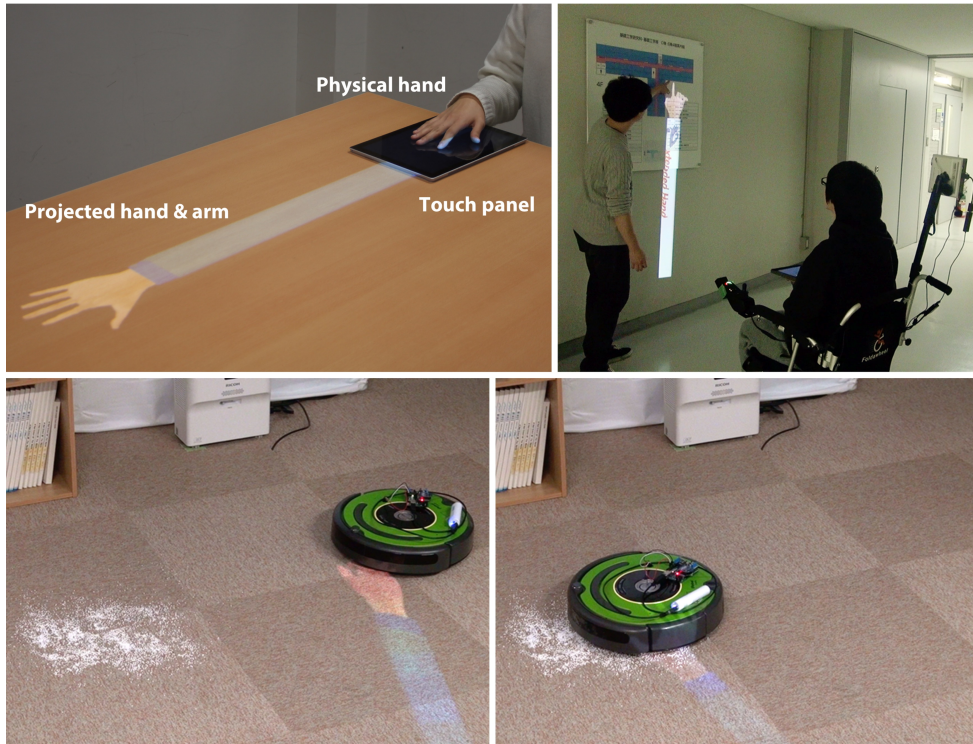


図6 手腕映像の実環境投射による身体拡張 ExtendedHand²⁰⁾

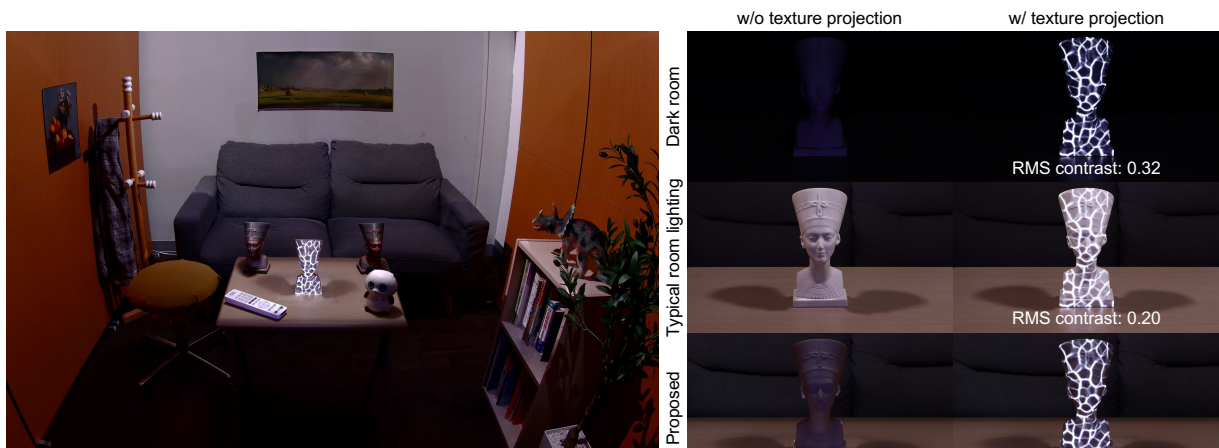


図7 環境照明をプロジェクタで置き換えて実現した明室での高コントラスト PM²⁴⁾

4. おわりに

本稿では、これまでの具体的な研究事例を複数示すことで、PM 技術による身体拘束のない人間拡張の可能性について議論した。今後、PM 研究は、単一のプロジェクタのみで行われてきた原理検証フェーズから、複数台のプロジェクタを用いた社会実装に向けたフェーズへと進展していくものと考えている。例えば、PM には明るい環境下では投射映像のコントラストが大幅に低下してしまうため、利用状況が限られるという制約があったが、我々のグループは直近の研究において、環境照明を複数台のプロジェクタで置き換えることで、それを解消した²⁴⁾ (図8)。複数台のプロジェクタにより、投射範囲の拡大や影の除去といったその他の課題解決も原理的に可能であり、いつでもどこでも PM による身体拡張の恩恵を受けられる社会の実現に向けた研究開発が今後も続いていくものと考えている。

参考文献

- 1) 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 (2018) 1134-1140.
- 2) D. Iwai and K. Sato, "Document search support by making physical documents transparent in projection-based mixed reality," *Virtual Reality* 15 (2011) 147-160.
- 3) K. Matsushita, D. Iwai, and K. Sato, "Interactive bookshelf surface for in situ book searching and storing support," In *Proceedings of Augmented Human International Conference* (2011) Article 2.
- 4) Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato, "Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23 (2017) 2419-2429.
- 5) 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," In *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces* (2019) 251-258.
- 6) 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 (2020) Article 103308.
- 7) T. Pejsa, J. Kantor, H. Benko, E. Ofek, and A. Wilson, "Room2Room: Enabling Life-Size Telepresence in a Projected Augmented Reality Environment," In *Proceedings of the 19th ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work & Social Computing* (2016) 1716–1725.
- 8) A. H. Bermanno, M. Billeter, D. Iwai, and A. Grundhöfer, "Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection," *Computer Graphics Forum* 36 (2017) 311-323.
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) 山本豪志朗, 佐藤宏介, "PALMbit: 掌への光投影を利用した身体インタフェース," *映像情報メディア学会誌* 61 (2007) 797-804.
- 12) P. Mistry and P. Maes, "SixthSense: a wearable gestural interface," In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation* (2009) Article 85.
- 13) Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson, "OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere," In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology* (2011) 441-450.
- 14) R. Sodhi, H. Benko, and A. Wilson, "LightGuide: projected visualizations for hand movement guidance," In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2012) 179-188.
- 15) I. M. Taninaka, D. Iwai, K. Sato, and P. Punpongsanon, "Development of Training Systems using Spatial Augmented Hand," *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and*

Workshops (2023) 679-680.

- 16) T. Kanamori, D. Iwai, and K. Sato, "Pseudo-Shape Sensation by Stereoscopic Projection Mapping," *IEEE Access* 6 (2018) 40649-40655.
- 17) P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato, "SoftAR: Visually Manipulating Haptic Softness Perception in Spatial Augmented Reality," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 21 (2015) 1279-1288.
- 18) T. Ueda, D. Iwai, T. Hiraki, and K. Sato, "Illuminated Focus: Vision Augmentation using Spatial Defocusing via Focal Sweep Eyeglasses and High-Speed Projector," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26 (2020) 2051-2061.
- 19) T. Ueda, D. Iwai, and K. Sato, "IlluminatedZoom: spatially varying magnified vision using periodically zooming eyeglasses and a high-speed projector," *Optics Express* 29 (2021) 16377-16395.
- 20) 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 the 8th Augmented Human International Conference* (2017) Article 19.
- 21) Y. Sato, T. Hiraki, N. Tanabe, H. Matsukura, D. Iwai, and K. Sato, "Modifying Texture Perception With Pseudo-Haptic Feedback for a Projected Virtual Hand Interface," *IEEE Access* 8 (2020) 120473-120488.
- 22) D. Iwai, R. Matsukage, S. Aoyama, T. Kikukawa, and K. Sato, "Geometrically Consistent Projection-Based Tabletop Sharing for Remote Collaboration," *IEEE Access* 6 (2018) 6293-6302.
- 23) T. Duan, P. Punpongsanon, D. Iwai, and K. Sato, "FlyingHand: extending the range of haptic feedback on virtual hand using drone-based object recognition," In *SIGGRAPH Asia Technical Briefs* (2018) Article 28.
- 24) M. Takeuchi, H. Kusuyama, D. Iwai, and K. Sato, "Projection Mapping under Environmental Lighting by Replacing Room Lights with Heterogeneous Projectors," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30 (2024) 2151-2161.