

[解説] 光学透過型ヘッドマウントディスプレイを組み合わせた 高ダイナミックレンジなプロジェクションマッピング

浜崎 巧^{*1} 伊藤 勇太^{*2} 廣井 裕一^{*3} 岩井 大輔^{*4} 杉本 麻樹^{*5}

Abstract – 本原稿は過去の発表論文を SIG-MR コミュニティに広く共有するため、翻訳・要約したものである。プロジェクションマッピングでは、材質や物体をレンダリングする際に現実感が求められる。この目的を達成するために、プロジェクタと光学式透過型ヘッドマウントディスプレイ (OST-HMD) を組み合わせた手法を提案する。従来のプロジェクションマッピングでは複数の観察者が同時に存在する場合、観察者全員が同じ実物体の表面上に投影されたヴァーチャルな材質を知覚することになる。一般的に材質は鏡面反射などの視点依存 (viewpoint-dependent: VI) 成分、拡散反射などの視点非依存 (viewpoint-independent) 成分の二つの成分から構成される。VI 成分は視点によって変化しないのに対して、VD 成分は視点それぞれに対して変化させる必要がある。しかし、プロジェクタのみを使用する従来のプロジェクションマッピングでは一度に一つの視点からの材質や物体しか再現できない、我々の手法では、プロジェクタは VI 成分のみを、OST-HMD は観察者の視点に応じて変化する VD 成分のみを表示する。従来のプロジェクションマッピングに比べ、異なる視点に対応した正しい材質を提示できる観察者の数は理論上無制限であり、高いダイナミックレンジと最大の明るさを実現することができる。プロジェクタと OST-HMD を組み合わせたプロトタイプを構築し、半球状の物体の表面上で四つの鏡面反射モデルを多数視点で再現して定性的な評価を行った。定量的な評価では従来のプロジェクションマッピングと比較して、2.24 倍のダイナミックレンジ、2.12 倍の最大の明るさを実現した。

Keywords : Optical see-through displays, hybrid material rendering, spatial augmented reality

1 はじめに

本原稿は過去の発表論文 [1] を SIG-MR コミュニティに広く共有するため、翻訳・要約したものである。

本研究では視点依存 (VD) レイヤーとして光学透過型ヘッドマウントディスプレイ (OST-HMD) を補助的に用いて従来のプロジェクションマッピングの性能を向上することを目的とする。プロジェクションマッピングは同時に存在する複数のユーザに対して拡張現実感を提示できるツールである。その上カメラを用いると実物体の表面上で実際の質感の再現をすることができる。その二つの特性はプロジェクションマッピングの魅力であるが、プロジェクタとカメラを用いたシステムにおいてその二つを同時に活かすことは困難である。

プロジェクタには投影する画像は視点非依存 (VI) であるという問題がある。例えば鏡面反射成分をバーチャルライト下で計算して、プロジェクタで金属質感のテクスチャを白い拡散反射する表面に投影すると、一人の観察者にしか正しい質感表現を提示できない (図 1)。これは視点の位置によって提示すべき鏡面

反射成分が変わるからである。この問題を解決するために、理想的なプロジェクションマッピングでは各観察者の視点に対応して画像をレンダリングする必要がある。正確に言えば両眼で位置が違うため、一人の観察者にさえ鏡面反射成分を正確に提示することはできない。

本研究では OST-HMD はプロジェクタに対する補助として使用する。OST-HMD はユーザ各々が装着するため、同時に同じ空間にいるそれぞれのユーザに対して異なる画像を提示できる。言い換えるとヴァーチャル物体の鏡面反射などの視点依存 (VD) 成分を OST-HMD で表示することができる。

これらの OST-HMD とプロジェクタの特性を利用すると、プロジェクションマッピングのレンダリングをプロジェクタにおける VI 成分、OST-HMD における VD 成分の二つに分けることができる。また二色性反射モデルとして知られる一般的な材質モデルでは、プロジェクションマッピングにおいてレンダリングされる画像は拡散反射などの VI 成分、鏡面反射などの VD 成分に分けられる。従来のプロジェクションマッピングは拡散反射する表面に投影する仕組みであるため、その性質上 VI 成分を提示することに適している。VI 成分は視点に対して静的であるため、レンダリングに観察者の位置情報が必要ない。それに対して VD

*1慶應義塾大学

*2東京工業大学

*3慶應義塾大学

*4大阪大学

*5慶應義塾大学



図1 VD成分有り，無しでの質感再現
Fig.1 material reproduction with and without VD components

成分は観察者の視点によって動的に変化するもので、観察者の動きに対して更新し続ける必要がある。そのためVD成分の表示はOST-HMDが特性上適している。

本論文では従来のプロジェクションマッピングの材質レンダリングを改善することを目的として、OST-HMDとプロジェクタを組み合わせた手法を提案する(図2)。プロジェクションマッピングに対するVD成分を表示するための追加レイヤーとしてOST-HMDを扱う。さらに本手法では各観察者にOST-HMDを装着させることによって、プロジェクションマッピングの質を落とさずに観察者の数を増減することができる。

2 関連研究

2.1 プロジェクションマッピング

現在に至るまでにプロジェクションマッピングによって実物体の外観を変化させる研究が数多く行われてきた。ShaderLamps[2]が最初に任意の形の白い表面に画像を投影する実装をした。

プロジェクションマッピングにおける材質再現により現実味を持たせる研究がされてきた。主な手法として、高い解像度[5]やダイナミックレンジ[6]を得る

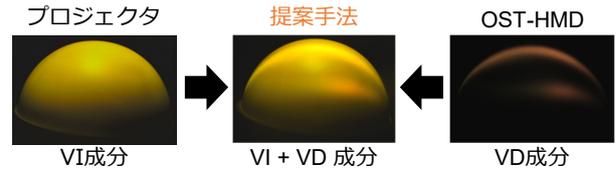


図2 提案手法
Fig.2 The main concept of our method

ために複数のプロジェクタとカメラを使用するものがある。

ユーザそれぞれまたはユーザの目それぞれに異なる画像を提示する手法が大きく分けて二種類存在する。一つ目は光学部品や機器構造を利用して提示する画像を空間的に分割する手法[4, 7]、他方は時分割する手法[3, 8]である。

しかし上記のプロジェクションマッピングの手法では、観察者の最大数がコンテンツの空間的または時間的解像度に対してトレードオフである。上記の手法と違い、我々の手法ではVD性を持つプロジェクションマッピングを理論的に無制限の同時に存在する観察者に対して提示することができる。

2.2 プロジェクタとOST-HMDの組み合わせ

プロジェクタとOST-HMDを組み合わせてヴァーチャルコンテンツの外観をよくする研究が存在する[9, 10]。これらの研究ではプロジェクタを追加の光源とみなしており、物体の材質再現のためのVIレイヤーとしては扱っていない。

FoveAR[11]はOST-HMDとプロジェクタを用いてヴァーチャル物体の提示を行っており、OST-HMDでVD成分を表示している点で我々の研究と似ている。しかしこの手法は視野角の拡張を目的としており、材質再現の質を高めることを目的としていない。この手法と違い、我々の手法ではVD成分とVI成分を同時に提示して材質再現の質を高めることを目的とする。

3 提案手法

3.1 視点依存性によるレンダリングの分割

視点依存性をもつプロジェクションマッピングを実現するために、質感をVI成分とVD成分に分割する必要がある。我々は質感の外観の計算をVI成分とVD成分の線形和で表す。

写実的なCGで一般的に用いられる物理ベースレンダリングモデルでは、質感をVI成分とVD成分に分けることができる。物体表面の点 p で発せられる光の放射輝度 L_o は以下の式の通りに表される。

$$L_o(p, v) = L_e(p, v) + \int_{\Omega} f_r(p, l, v) L_i(p, l) (n \cdot l) Vis(p, l) dl \quad (1)$$

L_i は点光源 l からの入射光ベクトル, L_e は p から観察者 v の方向への自発光の放射輝度, n は p における法線ベクトル, Vis は l から p に対しての光が可視かどうかを示す関数を表している. 記号 \int_{Ω} は半球内の全ての方向での積分, f_r は双方向反射率分布関数 (BRDF) を表している. BRDF は物体の表面に入射した光がどれだけの光が反射するかを示す関数であり, 反射する場所や方向によって値が変化する.

式 (1) 中の半球に渡る積分はリアルタイムに計算することが困難であるため, $\{l_1, \dots, l_N\}$ の方向にある N 個の光源の合計に近似する. さらに主要な表面における反射のみを VI 成分と VD 成分の線形和として扱うこととする. その主要な反射に適用されている二色性反射モデルでは, f_r は VI 成分である拡散 BRDF $f_d(p, l)$ と VD 成分である鏡面 BRDF に分けられる. それ故に式 (1) は以下のように変形することができる.

$$\begin{aligned} L_o(p, v) &= L_e(p, v) + \sum_{i=1}^n \{f_r(p, l_i, v) \\ &\quad L_i(p, l_i)(n \cdot l_i)Vis(p, l_i)\} \\ &= L_e(p, v) + \sum_{i=1}^n \{f_d(p, l_i) + f_s(p, l_i, v)\} \\ &\quad L_i(p, l_i)(n \cdot l_i)Vis(p, l_i)\} \\ &= L_e(p, v) + \sum_{i=1}^n \{L_d(p, l_i) + L_s(p, l_i, v)\} \end{aligned} \quad (2)$$

$L_d(p, l_i)$ と $L_s(p, l_i, v)$ はそれぞれ拡散反射成分と鏡面反射成分における発せられる光の放射強度を表している.

式 2 の結果より, 提案手法においてプロジェクタで VI 成分として $L_d(p, l_i)$ を, OST-HMD で VD 成分として $L_s(p, l_i, v)$ を表示すればいいことがわかる. OST-HMD を装着した M 人の観察者がさまざまな位置 $\{v_1, \dots, v_M\}$ で動いているときには, それぞれの観察者の位置に対応した VD 成分 $L_s(p, l_i, v_j)$ ($j = 1, \dots, M$) を OST-HMD に表示することができる. 結果として, 既存のプロジェクションマッピングに加えて OST-HMD で VD 成分である L_s を表示することによって, 複数の観察者に対してより多くの質感表現が提示できる.

3.2 定性的な性能比較

我々の手法では, 従来のプロジェクションマッピングや OST-HMD のみを用いる手法と比べて質の高い拡張現実 (AR) 体験をユーザに提供することができる. 最初に表示できる最大の明るさ, ダイナミックレンジ, 色空間に関して上記の三つの手法を比較する. その後前章で議論した視野角と視点依存性のあるレンダリングについての比較をまとめる.



図 3 実験環境

Fig. 3 Experimental environment

表 1 定性的な性能比較

Table 1 Qualitative performance comparison

	Our method	projector	OST-HMD
Field of view	Wide	Wide	Narrow
Resolution	High	Low	High
VD rendering	Suitable	Unsuitable	Suitable
Max intensity	High	Low	High
Dynamic range	High	High	Low
Color space	Wide	Narrow	Narrow

提案手法において観察される明るさ I_{hybrid} は, プロジェクタ画像の光 αP , 環境光 αE , OST-HMD 画像の光 H の合計であり, 以下のように表すことができる.

$$I_{hybrid} = H + \alpha(P + E) \quad (3)$$

α ($0 \leq \alpha \leq 1$) は OST-HMD の透過度を示している. 同様にプロジェクタのみを使用する従来のプロジェクションマッピングの明るさ I_{SAR} と OST-HMD のみを使用する手法での明るさ I_{OST} は以下のように表現できる.

$$I_{SAR} = P + E, I_{OST} = H + \alpha E \quad (4)$$

この章では環境光はそれぞれの AR 手法に適したものを想定する. 提案手法と従来のプロジェクションマッピングは暗室環境 ($E = 0$), OST-HMD のみの手法は通常的环境光下で行われるとする. プロジェクタによる光の最大と最小の明るさを P^M と P^m , 同様に OST-HMD における光の明るさを H^M と H^m とそれぞれ定義すると, 得られる最大の明るさ I^M とダイナミックレンジ D は以下のように示される.

$$I_{hybrid}^M = H^M + \alpha P^M, D_{hybrid} = \frac{H^M + \alpha P^M}{H^m + \alpha P^m} \quad (5)$$

$$I_{SAR}^M = P^M, D_{SAR} = \frac{P^M}{P^m} \quad (6)$$

$$I_{HMD}^M = H^M + \alpha E, D_{HMD} = \frac{H^M + \alpha E}{H^m + \alpha E} \quad (7)$$

$hybrid$ は我々の提案手法, SAR はプロジェクタのみの従来のプロジェクションマッピングを示している. 一般の室内環境であれば $H^M > P^M$, $E \gg H^m \simeq P^m$

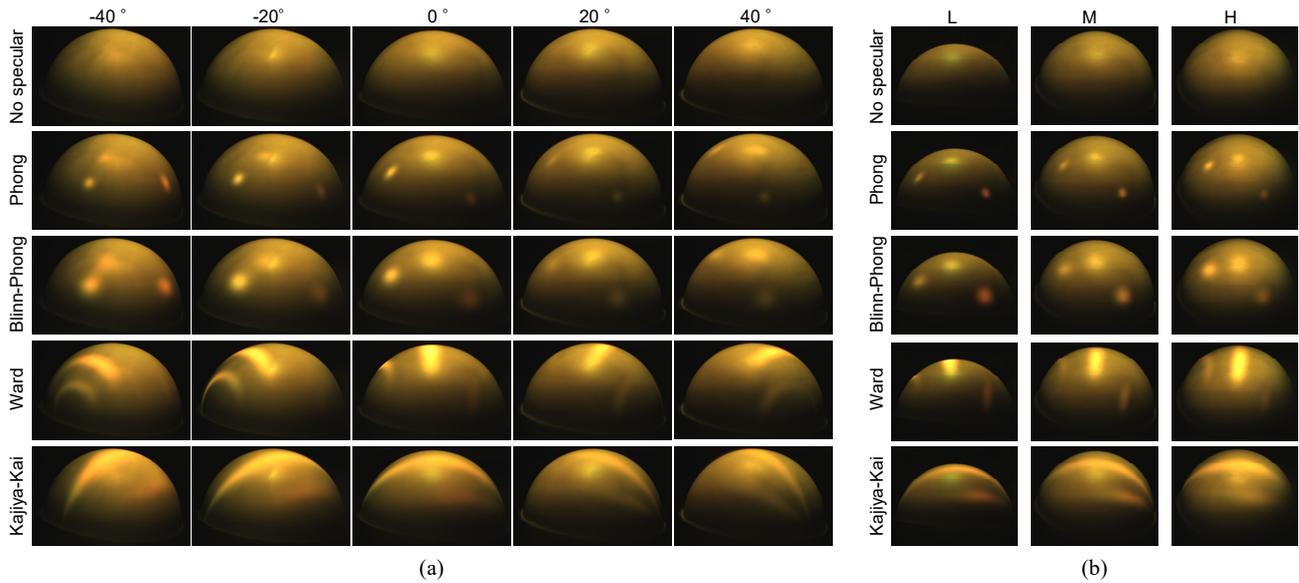


図 4 質感の再現結果
Fig. 4 Results of material reproduction

と想定される。結果として提案手法と OST-HMD のみの手法の最大の明るさは近く、従来のプロジェクションマッピングよりも大きくなる。一方でダイナミックレンジに関しては提案手法と従来のプロジェクションマッピングは近く、OST-HMD よりも大きくなる。さらに我々の提案手法は従来のプロジェクションマッピングと OST-HMD のみの手法よりも色域が広い。一般的に原色 (RGB 等) のスペクトルはディスプレイ間で異なる。そのため我々の手法では六原色となり、従来の三原色のディスプレイよりも広い色域を表現することができる [12]。

定性的な性能比較を表 1 にまとめる。表示できる最大の明るさ、ダイナミックレンジ、色空間だけでなく、視野角、解像度、視点依存性についても記す。この表から我々の提案手法では、他の二手法と比べて複数の利点があることがわかる。

4 実験と考察

4.1 実験環境

図 3 に実験環境を示した。半球状の塩化ビニルを実験に用いるプロジェクションマッピングの投影対象とした。実環境の光が投影対象でなるべく拡散反射しないように白色のスプレーで塗装した。OST-HMD として Microsoft HoloLens (視野角 $30^\circ \times 17^\circ$, 1268×720 ピクセル) を、プロジェクタとして EPSON EB-U32 DLP (1920×1200 ピクセル) を使用した。キャリブレーションのために Microsoft Kinect v2 を使用し、プロジェクタと食べ合わせて天井につるした。OptiTrack Flex 3 (12 カメラ) もキャリブレーションのために実

表 2 最大の明るさとダイナミックレンジの比較 (OM は我々の提案手法, Pro はプロジェクタを示す)

Table 2 Evaluation of max intensity and dynamic range. OM stands for our method and Pro does for projector.

	OM	Pro	HMD	OM/Pro	OM/HMD
Max intensity	4358	2053	4175	$\times 2.12$	$\times 1.04$
Dynamic range	137	61	6	$\times 2.24$	$\times 21.5$

験室の天井につるした。HoloLens を通した視点からの画像を撮影するために、HoloLens の光学部品の後ろにユーザ視点カメラ Flea 3 FL3-U3-88S2C-C (4096×2160 ピクセル) を設置した。

本実験では Phong, Blinn-Phong, Ward, Kajiyama-Kai の四つの鏡面反射 BRDF モデルを使用した。シミュレーション内で白色の指向性光源一つ、点光源二つを設置して、VD 成分を再現した。プロジェクタで投影する画像と OST-HMD で表示する画像をレンダリングするために、Unity 5 を使用した。

4.2 視点依存性を持つ質感の再現

視点を動かしたうえで我々の手法がどの程度 VD 成分を再現できるかを評価するために、水平方向に角度が異なる視点 (-40° , -20° , 0° , 20° , 40°) から撮影した BRDF モデルそれぞれについての再現結果を比較した。その再現結果を図 4(a) に示した。視点の移動に対応して、OST-HMD 上で表示した VD 成分が変化している。

また垂直方向に異なる視点 (L, M, H) から撮影した再現結果も同様に比較した。その再現結果を図 4(b)

に示した。水平方向の再現結果と同様にVD成分は視点位置によって変化している。結果として、特に観察者が投影対象の物体の周りを動いているときに我々のシステムは質感の再現性を高めることが分かった。

4.3 ダイナミックレンジの比較

我々のシステムによる質感再現とプロジェクタのみによる再現におけるダイナミックレンジを比較した。通常OST-HMDは環境光下で使用するため、OST-HMDのみの手法は環境光下で撮影した。比較のために節3.2中で説明したパラメータである、プロジェクタの最大と最小の明るさ (P^M と P^m)、OST-HMDの最大と最小の明るさ (H^M と H^m)、OST-HMDの透過率 α 、環境光の明るさ (E) を計測した。撮影した画像の指定領域内のピクセル値が飽和しないように適切な露光時間で、ガンマカーブが直線のユーザ視点カメラで計測した。半球の中心付近の 100×100 ピクセルの正方形を指定領域とした。指定領域内のピクセル値の平均をとり、標本露光時間1秒で撮影したように正規化した。例えば平均のピクセル値が1/60秒の露光時間で撮影されたものなら、その値に60をかけた。

始めにプロジェクタのパラメータを計測するために、カメラで直接投影表面を撮影できるようにOST-HMDを取り外した。半球に一樣な黒と白の画像をプロジェクタで投影して、カメラでその反射光を撮影して P^M と P^m をそれぞれ計測した。次にプロジェクタの電源を切り環境光として実験室の電気を点け E ($=637$) を計測した。その後カメラの前にOST-HMDを設置して αE ($\alpha=0.399$) を計測した。最後に環境光を消してOST-HMD上で一樣な黒と白の画像を表示して H^M と H^m を計測した。環境光がない状況を再現するためにOST-HMDのみの手法では $E=0$ とした。

得られたパラメータからそれぞれの手法の最大の明るさとダイナミックレンジを式(5),(6),(7)を用いて計算し、表2に示した。プロジェクタのみの手法とOST-HMDのみの手法と比べて、我々の提案手法は最大の明るさとダイナミックレンジ両方において一番高い数値である。特に最大の明るさに関しては、プロジェクタのみの手法に対して約2倍、OST-HMDのみの手法に対して約20倍の数値となった。

5 まとめ

OST-HMDとプロジェクタを組み合わせたプロジェクションマッピングの手法を提案した。我々の手法ではプロジェクタで視点非依存成分、OST-HMDで視点依存成分を表示することで、理論上無制限のユーザに対して提示することを可能とした。

謝辞

日本VR学会の会員各位および研究会への投稿者各位に感謝する。本研究は科研費研究費(課題番号JP15H05925, JP17H04692), JST CREST研究費(課題番号JPMJCR14E1), JST PRESTO(課題番号JPMJPR17J2)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Hamasaki, T., Itoh, Y., Hiroi, Y., Iwai, D., and Sugimoto, M. (2018). HySAR: Hybrid Material Rendering by an Optical See-Through Head-Mounted Display with Spatial Augmented Reality Projection. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(4), 1457-1466.
- [2] R. Raskar, G. Welch, K.-L. Low, and D. Bandyopadhyay, "Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination," in *Rendering Techniques 2001*, pp. 89102, Springer, 2001.
- [3] M. Agrawala, A. C. Beers, I. McDowall, B. Frhlich, M. Bolas, and P. Hanrahan, "The two-user responsive workbench: support for collaboration through individual views of a shared space," in *The 24th ACM SIGGRAPH*, pp. 327332, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [4] O. Bimber, B. Frhlich, D. Schmalstieg, and L. M. Encarnao, "The virtual showcase," in *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, p. 9, ACM, 2006.
- [5] D. G. Aliaga, Y. H. Yeung, A. Law, B. Sajadi, and A. Majumder, "Fast high-resolution appearance editing using superimposed projections," *ACM ToG*, vol. 31, no. 2, p. 13, 2012.
- [6] A. Majumder and G. Welch, "Computer graphics optique: Optical superposition of projected computer graphics," in *Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 209218, 2001.
- [7] Y. Kitamura, T. Nakayama, T. Nakashima, and S. Yamamoto, "The illusionhole with polarization filters," in *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '06*, (New York, NY, USA), pp. 244251, ACM, 2006.
- [8] G. Koutaki, "Binary continuous image decomposition for multi-view display," *ACM ToG*, vol. 35, no. 4, p. 69, 2016.
- [9] O. Bimber, A. Grundhfer, G. Wetzstein, and S. Kndel, "Consistent illumination within optical see-through augmented environments," in *The 2nd IEEE/ACM ISMAR*, pp. 198207, IEEE Computer Society, 2003.
- [10] A. Maimone, X. Yang, N. Dierk, A. State, M. Dou, and H. Fuchs, "Generalpurpose telepresence with head-worn optical see-through displays and projector-based lighting," in *2013 IEEE Virtual Reality*, pp. 2326, IEEE, 2013.
- [11] H. Benko, E. Ofek, F. Zheng, and A. D. Wilson, "Fove ar: Combining an optically see-through near-eye display with projector-based spatial augmented reality," in *The 28th ACM UIST*, pp. 129135, ACM, 2015.
- [12] I. Kauvar, S. J. Yang, L. Shi, I. McDowall, and G. Wetzstein, "Adaptive color display via perceptually-driven factored spectral projection," *ACM ToG*, vol. 34, pp. 165:1165:10, Oct. 2015.