



狭帯域 3 バンドパスフィルタによる 明室環境でのプロジェクションマッピング

Projection Mapping in a Bright Room Environment Using a Narrowband 3-bandpass Filter

園田雄基, 岩井大輔

Yuki SONODA, Daisuke IWAI

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, yuki.sonoda@ecs.osaka-u.ac.jp)

概要: 明室でのプロジェクションマッピング (PM) では, 環境照明が投影対象に照射されるため, 投影テクスチャのコントラストが低下するという課題がある. 本稿では, 狭帯域 3 バンドパスフィルタにより, 室内照明の光が投影対象に重畳することを抑え, プロジェクタの光のみが投影対象に照射される投影技術を構築した. 提案手法においてプロジェクタ光のフィルタへの入射角が 0deg から 20deg のとき, コントラスト低下を抑制できることを確認した.

キーワード: 拡張・複合現実, 視覚, オプティクス, プロジェクタ

1. はじめに

プロジェクションマッピング (Projection Mapping: PM) は, 三次元物体の表面に仮想的な映像を投影することにより, その物体の色や質感などの見た目を変化させることができる [1]. PM は, 一般に暗室環境での使用が前提とされるが, これは明室環境下においては照明光が投影映像に重畳し, 投影されたテクスチャのコントラストが著しく低下するためである. この課題に対して, 竹内らは, 環境照明をすべてプロジェクタに置き換えることで, 投影対象への照明と投影映像のコントラストの両立を実現している [2]. しかしながら, このアプローチでは空間全体を照明可能とするために複数のプロジェクタの設置を必要とし, 構成が大規模かつ高コストであるという課題が残されている.

本研究では, このような課題に対処するため, プロジェクタによらず, 一般的な照明装置を用いた明室環境下においても投影映像のコントラスト低下を抑制する新たな PM 技術を提案する. 本提案手法では, 可視光の波長分布において透過特性が相補的となる光学フィルタを, 照明器具および投影対象周囲に配置する. このフィルタの作用によって, 照明光を投影対象から分離する. これにより, 一般照明を用いて室内環境を照らしながらも, 投影対象には照明光の重畳を抑制し, 投影映像のコントラストを改善することが可能となる. 本手法により, 明室環境下における PM の実用性が大きく拡がることが期待される.

2. 提案手法

図 1 左のように, 一般的な明室環境では, 照明も投影対象に照射されるため, プロジェクタのテクスチャコントラストが低下する. このコントラスト低下を改善するために, 図 1 右に示すように照明周りとは投影対象周りに相補的な波

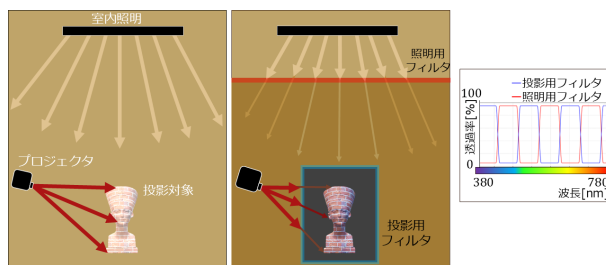


図 1: 明室環境での投影

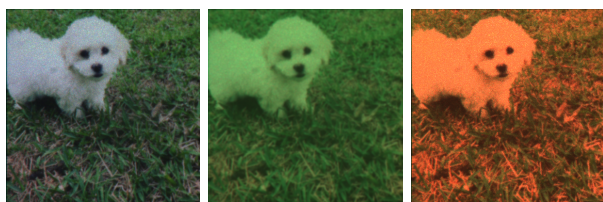
(左: 一般的な明室環境)

(右: 提案手法環境と 2 つのフィルタの透過特性)

長選択透過性をもつ光学フィルタを設置する. 照明周りに設置するフィルタを照明用フィルタ, 投影対象周りに設置するフィルタを投影用フィルタと呼称する. これらフィルタの透過特性は, 図 1 右の概念図が示すように, R, G, B 各色の一部の波長域の光を透過させる. また, 投影用フィルタでの透過率が高い波長域について, 照明用フィルタでは透過率が低くなっている. このように透過域が異なるものを用いることで一方のフィルタを透過した光はもう片方のフィルタを透過することができなくなることを利用して, 室内照明からの光が投影対象に照射されることを防ぎ, 投影テクスチャのコントラストを改善する.

2.1 狭帯域 3 バンドパスフィルタによる色ずれ

光を反射することで特定の波長域の光を透過させる光学フィルタには入射角依存性があることが知られている [3]. 本システムで用いた投影用フィルタについて, この検証のために, 3 つの異なる条件に対して同じ画像を投影した結果を図 2 に示す. 3 つの条件はそれぞれフィルタなしで投影したとき, プロジェクタ光の入射角がフィルタに対して 0deg



(a) フィルタなしの投影 (b) フィルタありの投影 (入射角:0deg) (c) フィルタありの投影 (入射角:40deg)

図 2: 狭帯域 3 バンドパスフィルタによる投影結果の変化

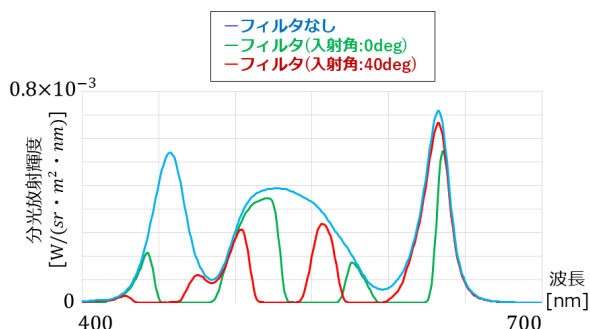


図 3: プロジェクタの波長分布の計測結果

となるように設置したとき、入射角が約 40deg となるように設置したときである。投影結果について、フィルタによってプロジェクタの投影光の波長分布が制限されることでプロジェクタから出射される光の色調と投影対象に届く光の色調が異なることが確認できる。このような問題を解決するために、著者らは色補正を行うことで色ずれを効果的に抑制できることを確認した [4][5]。

ここで、輝度計 (分光放射計, SR-LEDW) を用いて図 2 での投影画像の波長分布を計測した結果を図 3 に示す。図 3 より、フィルタに対するプロジェクタ光の入射角が変化することで、波長分布が変化することが確認された。すなわち、フィルタに対する入射角が変化することで、2 種類の光学フィルタの透過特性が相補的に機能しなくなる可能性が考えられる。本稿では、照明用フィルタを固定しつつ、投影用フィルタの角度を変化させることでコントラストがどのように変化するかを検証する。

3. 評価実験

3.1 コントラスト評価

フィルタの作用により、照明が点灯している環境下においてコントラストがどの程度改善されるかを評価するために、本研究では ANSI コントラストを用いた定量的評価を行った。ANSI コントラストは、白と黒のパターンが交互に配置されたチェッカーパターンを表示し、それぞれの領域における平均輝度値の比を算出することで求められる指標である [6]。その計算式は式 (1) に示す通りであり、 L_{White} は

白領域の平均輝度値、 L_{Black} は黒領域の平均輝度値を表す。

$$C_{ANSI} = \frac{L_{White}}{L_{Black}} \quad (1)$$

本研究では、 3×4 のチェッカーパターンを投影し、輝度計 (分光放射計 SR-LEDW, 測定角 0.1deg) を用いて各格子パターンの中心部の輝度を計測した。得られた輝度データに基づき、白パターンおよび黒パターンに属するすべての格子の平均輝度値をそれぞれ算出し、ANSI コントラストを評価した。評価条件は、プロジェクタ光のフィルタへの入射角を 0deg, 10deg, 20deg, 30deg, 40deg に設定した 5 通りの角度条件と、フィルタ未使用の計 6 条件である。投影用フィルタを輝度計のレンズ直前に設置し、分度器を用いて入射角を調整した。

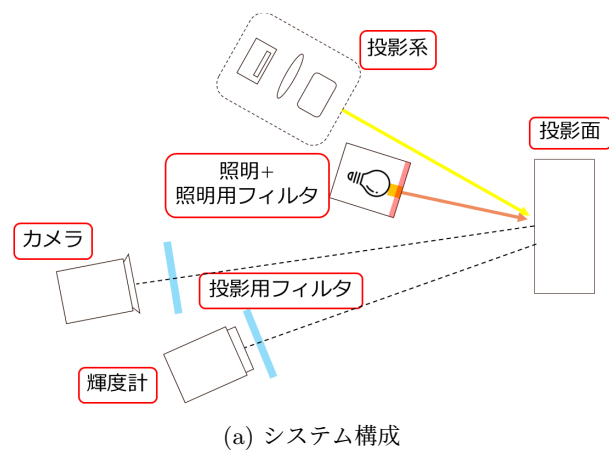
また、投影結果の視覚的評価のために投影結果を撮影した。使用したカメラ、(Canon EOS M6 Mark II, 画素数: 6960 × 3940) であり、そのレンズ直前に投影用フィルタを設置して、プロジェクタ光の入射角を上記と同様に調整した。なお、今回の投影条件においてはカメラのダイナミックレンジが十分でないため、露光時間 1/6, 1/3, 1 秒の 3 段階による HDR 撮影を実施した。そして、得られた画像はトーンマッピング処理を行った。

3.2 投影環境

本研究ではフィルタのサイズに制約があることから、一般的な明室環境における実験ではなく、図 4b に示すような、投影対象を小さくした環境で検証した。投影系に関しては、小型の投影面に対して高解像度な投影を実現するため、谷らが提案する高密度投影システム [7] を採用した。具体的には、レンズを取り外した DLP (Digital Light Processing) プロジェクタ (RICOH, PJWXC1110, 画素数: 1280 × 800) の前面に、焦点距離 75 mm の投影レンズ (THORLABS, AC508-075-A) と、焦点距離 100 mm の縮小レンズ (Nikon, AI AF Micro Nikkor 105mm F2.8D) を組み合わせて設置した。これにより、画素密度を向上させることが可能となった。

照明には市販の白色 LED を用い、その直前に照明用フィルタを設置して照明周りのフィルタとした。この際、照明用フィルタは固定し、入射角 0deg で透過した光が投影対象に照射されるよう配置した。投影用フィルタについては、カメラおよび輝度計のレンズ直前に設置することで、フィルタを透過した光のみを測定対象とした。

投影用フィルタおよび照明用フィルタの透過特性を確認するため、照明に用いた LED の光をそれぞれのフィルタに透過させ、その出射光を輝度計により測定した。その結果を図 5 に示す。フィルタなしのプロットは LED そのものの発光特性を示している。両フィルタにおいて透過光のスペクトルピークが異なっていることが確認できた。また、2 つのフィルタを重ね合わせた際の透過光についても波長特性を確認した。投影用フィルタ+照明用フィルタのプロットについては図 5 下から他の 3 条件に比べ輝度が著しく小さく、両フィルタの組み合わせによる高い遮光性能が確認された。



(a) システム構成



(b) 実際の投影環境

図 4: 検証のためのセットアップ

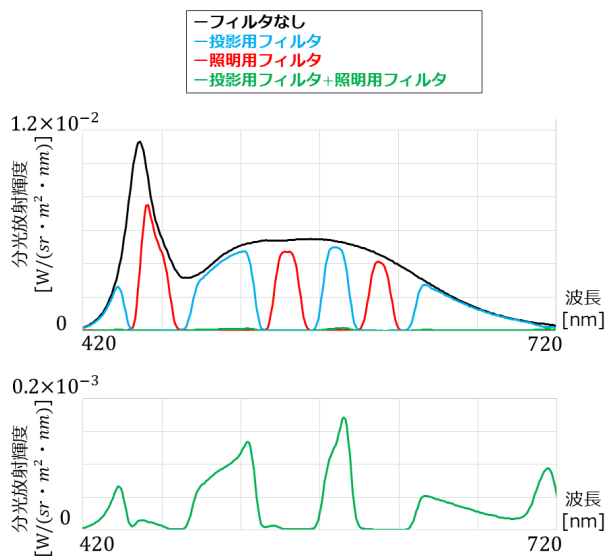


図 5: 照明の波長分布の計測結果

(上: 4 条件の計測図)

(下: 両フィルタ条件について詳細な計測図)

3.3 結果・考察

フィルタの設置角度に関する 6 条件での投影結果および ANSI コントラストの測定結果を図 6 に示す。これらの結果からフィルタへの入射角が 0deg から 20deg の範囲にある場

フィルタの角度	フィルタなし	40deg	30deg
投影結果			
$C_{ANSI}(\uparrow)$	1.39	1.22	1.27

フィルタの角度	20deg	10deg	0deg
投影結果			
$C_{ANSI}(\uparrow)$	9.54	8.27	7.83

図 6: PM の投影結果と ANSI コントラスト

合、コントラストが高く維持される傾向が確認された。一方、これを超える入射角ではコントラストが低下する傾向が見られた。この現象は、入射角が 20deg 以下であれば、照明用フィルタを透過した不要な波長成分を投影用フィルタによって効果的に遮断できるためと考えられる。しかし、入射角が大きくなるにつれてフィルタの透過特性が変化し、透過する波長分布が 0deg 時とは異なるため、照明光の成分がフィルタを透過してしまい、結果として入射角が大きくなるとコントラストが低下したと推察される。また、フィルタへの入射角が 20deg の時にコントラストが最大となった要因としては、投影用フィルタを透過したプロジェクタ光の波長分布の変化が考えられる。20deg の投影結果の画像について 0deg, 10deg のものと比べ、白格子の色が赤みがかったような色となっており、赤の波長域の輝度が高くなったことでコントラストが高くなったと考えられる。フィルタなしにおいて 30deg, 40deg よりもコントラストが高くなった要因も同様にフィルタによる波長分布の変化が考えられる。フィルタなしではプロジェクタ光がフィルタによって抑制されず、これにより白格子の輝度が大きくなったことでコントラストが上がったと考えられる。一方、投影用フィルタ設置によって 30deg, 40deg 条件ではプロジェクタ光のある波長域では透過が抑制され、白格子の輝度値が小さくなったことでコントラストが小さくなったと考えられる。

これらの結果から、フィルタへの入射角が 0deg から 20deg の範囲であれば、明室環境においてもコントラストの向上が期待できることが示唆された。しかしながら、この知見は照明光に関しても同様に適用される必要がある。今回の実験では照明光のフィルタへの入射角を 0deg に固定していたが、今後は入射角の変化に伴う波長分布および輝度応答の変化についても検討が必要である。

4. 終わりに

本研究では、狭帯域 3 波長域バンドパスフィルタを用いることで、照明光の投影対象への重畳を抑制し、明室環境下における PM のコントラスト向上を図った。実験の結果、フィルタへの入射角の変化に伴いコントラストが変動し、特に 0deg から 20deg の範囲において顕著な向上が確認され

た。この知見を踏まえ、今後はフィルタの透過特性を考慮した最適な配置設計を行うことで、高精度な投影システムの構築を目指す。

参考文献

- [1] Ramesh Raskar, Greg Welch, Kok-Lim Low, and Deepak Bandyopadhyay. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination. In *Rendering Techniques 2001: Proceedings of the Eurographics Workshop in London, United Kingdom, June 25–27, 2001 12*, pp. 89–102. Springer, 2001.
- [2] Masaki Takeuchi, Hiroki Kusuyama, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Projection mapping under environmental lighting by replacing room lights with heterogeneous projectors. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2151–2161, 2024.
- [3] エドモンド・オブティクス社. 光学フィルター — 原理と構造、種類と選び方、用語解説、事例, 2025. <https://www.edmundoptics.jp/knowledge-center/application-notes/optics/optical-filters/>.
- [4] Takenobu Yoshida, Chinatsu Horii, and Kosuke Sato. A virtual color reconstruction system for real heritage with light projection. In *Proceedings of VSMM*, Vol. 3, pp. 1–7, 2003.
- [5] 園田雄基, 岩井大輔, 佐藤宏介. 波長分割多重光学フィルタを用いた明室環境下でのプロジェクションマッピング. システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, Vol. 69, pp. 977–979, 2025.
- [6] American National Standards Institute. American national standard for television – methods of measuring contrast ratio of electronic display systems. <https://www.ansi.org/>, 1992. ANSI IT7.215-1992.
- [7] 谷育歩, 岩井大輔, 佐藤宏介. 高画素密度プロジェクションマッピングによる実物体の外観と知覚的に一致するバーチャル物体の提示. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2024. 2B2-02.