



環境照明再現により投影テクスチャの コントラスト低下を抑制するプロジェクションマッピング

竹内正稀¹⁾, 岩井大輔¹⁾, 佐藤宏介¹⁾

1) 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,
m.takeuchi@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {daisuke.iwai, sato}@sys.es.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、環境照明を消灯し、プロジェクタから投影対象以外の環境面に環境照明を再現するよう PM する疑似環境照明技術を構築した。提案技術を用いて明室を再現しつつ投影対象にテクスチャを PM し、明室での投影テクスチャの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: プロジェクションマッピング, 拡張現実感, プロジェクタ・カメラシステム, 色補償

1. はじめに

プロジェクションマッピング (PM) はコンピュータ上で作成した映像を現実空間の対象物体にプロジェクタで重畳投影し、その質感を切り替えることができる技術である。室内の全方位に PM を施し、対面式のグループミーティングをサポートする技術などに応用されている [1]。PM は暗室条件下での映像投影を前提としている。明るい環境照明下においては投影対象物体に環境光が重畳され、投影テクスチャのコントラストが低下するため、自然に見えなくなる恐れがある。PM の照射光量を増やすことによって対象面の輝度を増加させることは可能だが、環境光を減算させることはできず、元の輝度よりも低輝度を表現できない [2]。

そこで本稿では、環境光を制御することで投影コンテンツのコントラスト低下を抑制する技術を提案する。通常の PM では対象物体にのみ映像を投影し質感を変化させるのに対して、本稿ではそれに加え、環境光源をプロジェクタに置き換えることで、投影対象以外の環境面に環境照明を再現するような疑似環境照明技術を構築する。これにより、環境照明無しに明室が再現された状態で、投影テクスチャのコントラスト低下を抑えた PM が可能になる。

2. 提案手法

提案手法の処理フローを図 1 に示す。まず環境照明が点灯している明室状態の室内をカメラで撮影し、環境照明下での室内の色情報を計測する (図 1(a))。その後、環境照明を消灯し、暗室状態にする (図 1(b))。計測した色情報をもとに、環境照明下での室内の見えを再現するような映像を算出し投影する (図 1(c))。環境照明の再現には、室内のすべての面に投影するため複数のプロジェクタを用いる [3]。このような環境照明再現状態で対象物体を所望の見えに切り替えるよう計算して生成した投影コンテンツを投影し、対象の質感等を変化させる (図 1(d))。その結果、明室環境下でコントラスト低下を抑制しつつ、対象の表面の質感を

化させる PM が可能になる。

3. 提案システムの実装

3.1 実験装置と実験環境

図 2 に示すように、7 台のプロジェクタ (内 3 台: acer H6517ST, 4 台: BenQ TK850) を用いて環境照明の再現を行った。青色のパーティションを用いて小部屋環境を構築し、その中に木目調の机を設置した。机の上には投影対象として、白色の立方体を置いた。また小部屋全体を撮影可能な位置に、魚眼レンズを取り付けたカメラ (カメラ: canon EOS M6 Mark II, レンズ: canon EF8-15mm F4L フィッシュアイ USM) を設置した。プロジェクタのうち 3 台は外向き投影用として、主にパーティションに投影する。残りの 4 台は内向き投影用として、主に机と対象物体に投影する。右と左のパーティションの上部それぞれに外向き用

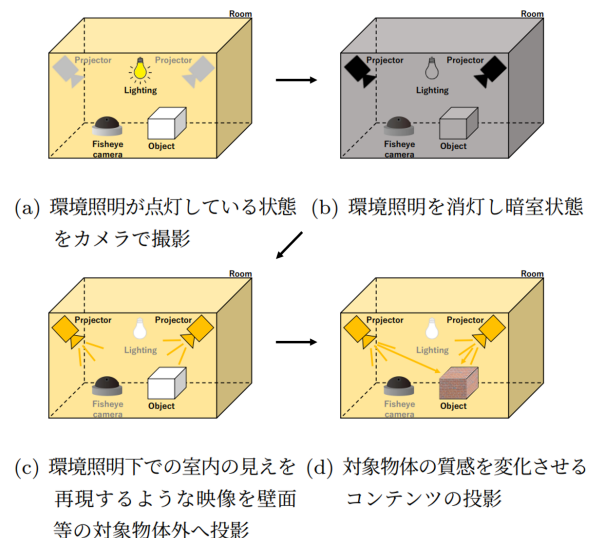


図 1: 提案手法の処理フロー

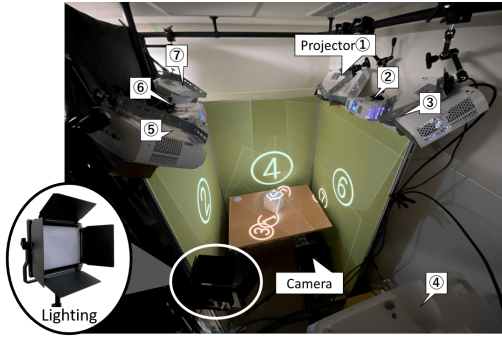


図 2: プロジェクタの設置とカメラ等の配置の様子

のプロジェクト 1 台, 内向き用のプロジェクト 2 台を設置し, 正面に外向き用のプロジェクト 1 台・カメラ・環境照明用 LED 照明を設置した. 制御できない環境光の侵入を防ぐため, パーティションとプロジェクト, カメラ, LED 照明を含むすべてを暗幕で囲った. 投影対象物体への投影コンテンツはレンガのテクスチャとした.

3.2 投影画像の生成

3.2.1 色補償

まず, 所望の色を投影面で表現させるために, 反射色計測に基づいて投影光を算出する色補償を行った [4]. これは, 反射率がスペクトルによって異なり, 映像を投影しても所望の色が表現できないことを解決するためである. プロジェクタへの入力 RGB 値 $P = (R_p, G_p, B_p)^t$ とカメラ観測 RGB 値 $C = (R_c, G_c, B_c)^t$ の関係は色変換行列 $K \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, 環境光による対象点での観測 RGB 値 $E = (R_e, G_e, B_e)^t$ を用いて次式で表される.

$$C = KP + E \quad (1)$$

本稿では実験装置を暗幕で囲うことで環境光の影響を防ぎ, 27 色の一様な光を投影し, 変換パラメータ K を求めた. 観測したい目標色を C として, 式 1 の逆変換によりプロジェクトへの入力 RGB 値を求めることができる.

3.2.2 画素の対応付け

次に, 所望の位置に映像を投影するために, プロジェクタ投影画像とカメラ撮影画像の画素の対応付けを取得し, それを用いて歪みを補正する幾何補正をした. プロジェクタで映像を投影するとき, 投影対象の凹凸により歪みが生じ, 本来の映像とは異なった見かけの投影結果となる. そこで投影画像と投影結果の幾何対応を得て歪みを解消する. 本稿では, グレイコードパターン光を投影して撮影することで, プロジェクタとカメラの画素の対応付けが取得し, 所望の位置に映像が投影されるように歪み補正をした.

3.2.3 重複投影部分の重み付け

次に, 重複投影部分の不自然な輝度値の増加を抑制するために, 重複部分の投影画像の輝度値を減衰させる処理を行った [5]. 複数台のプロジェクトを用いる際, 投影部分の重複が生じる. 重複投影部分では輝度値が増加し, 重複していない部分よりも明るく見える. 本稿では, プロジェクタ投影画像における画素ごとの輝度値に適切な重みを乗算し,

重複投影部分における画素の重みの和が等しくなるように正規化することで実装した. なお, プロジェクタ P_m の画素 (u, v) における重み $A_m(u, v)$ は, 以下のようにした.

$$A_m(u, v) = \frac{\alpha_m(m, u, v)}{\sum_i \alpha_i(m, u, v)} \quad (2)$$

ここで $\alpha_i(m, u, v) = \omega_i(m, u, v) * d_i(m, u, v)$ は, 各プロジェクトごとの値である. 式 2 において, プロジェクタ P_m における画素 (u, v) のカメラでの観測画素がプロジェクト投影領域の輪郭の内側にある場合は $\omega_i(m, u, v) = 1$, そうでない場合は $\omega_i(m, u, v) = 0$ となる. $d_i(m, u, v)$ はプロジェクト P_m の画素 (u, v) との対応が取れているカメラの観測画素と, ユークリッド距離が最も近い輪郭までの距離である.

3.2.4 画素の補完

次に, 3.2.2 節で対応付けできていない投影画素の RGB 値を補うための補完を行った [6]. プロジェクタ投影画像とカメラ撮影画像のすべての画素に対応関係が取得できるわけではなく, 対応関係が取得できていない部分には色補償が反映されない. そのためカメラとの対応関係が取れずに欠損してしまうプロジェクトの投影画像の画素については RGB 値の補完処理を行う. 本稿では補完する画素の RGB 値を, その近傍領域の画素の中で RGB 値が判明している画素の値の重み付き和で計算した. なお, 左上, 左下, 右下, 右上の近傍点をそれぞれ p_0, p_1, p_2, p_3 とし, それぞれの座標を $(p_{0x}, p_{0y}), (p_{1x}, p_{1y}), (p_{2x}, p_{2y}), (p_{3x}, p_{3y})$ とおいて, x 方向の重み a_x , y 方向の重み a_y を以下のよう求めた.

$$a_x = \frac{1}{2} \left(\frac{x - p_{0x}}{p_{3x} - p_{0x}} + \frac{x - p_{1x}}{p_{2x} - p_{1x}} \right) \quad (3)$$

$$a_y = \frac{1}{2} \left(\frac{y - p_{0y}}{p_{1y} - p_{0y}} + \frac{y - p_{3y}}{p_{2y} - p_{3y}} \right) \quad (4)$$

RGB 値のそれぞれについて, 近傍点 p_0, p_1, p_2, p_3 での値を c_0, c_1, c_2, c_3 として, 補完する画素 (x, y) の値 $c_{(x,y)}$ を以下のように重み付けをし補完した.

$$\begin{aligned} c_{(x,y)} = & (1 - a_x)(1 - a_y)c_0 \\ & + (1 - a_x)a_y c_1 \\ & + a_x a_y c_2 \\ & + a_x(1 - a_y)c_3 \end{aligned} \quad (5)$$

3.2.5 逆ガンマ補正による線形化

最後に, 色補償を線形計算で行うために逆ガンマ補正による線形化を行った. カメラやプロジェクトなどの映像機器は, 入出力特性としてガンマ特性と呼ばれる非線形性を有する. ガンマ特性は, 輝度値入出力の非線形性をべき乗則表現で近似していることを指す. しかし, 式 1 は線形な入出力関係であることを前提としているため, 正しく計算することができない. そこで予めガンマ特性を計測し, その逆変換によって補正する必要がある. 本稿では分光放射輝度計を用いてプロジェクトの出力特性を計測することでガンマ値を得た.

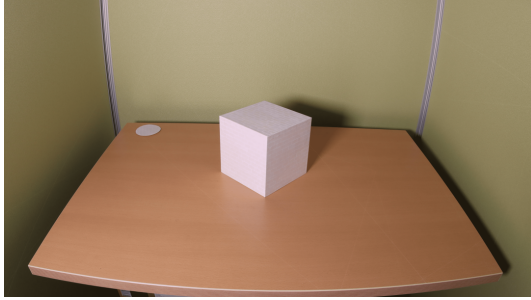


図 3: 環境照明下でのレンガテクスチャの投影結果

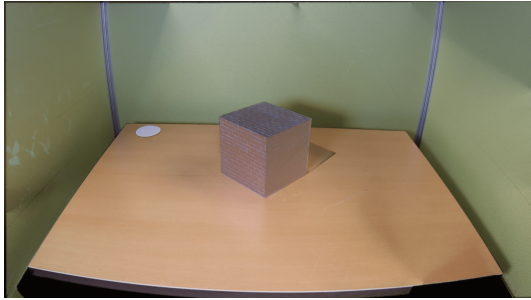


図 4: PM による疑似環境照明下でのレンガテクスチャの投影結果

3.2.6 投影

投影は、環境照明下でのレンガテクスチャの投影 (図 3) と、上記の処理を行い生成した疑似環境照明下でのレンガテクスチャの投影 (図 4) を行った。図 3 では、投影されているのは立方体の面にマッピングされているレンガのテクスチャのみである。

4. 実験

提案手法の効果を確認するために主観評価と客観評価の 2 種類の実験を行った。

4.1 見た目の自然さに関する主観評価

4.1.1 実験目的

環境照明下での対象物体への PM (以下、環境照明による明室条件とする) と、提案手法による疑似環境照明下での対象物体への PM (以下、疑似環境照明による明室条件とする) の主観的な見えの違いを評価する。

4.1.2 実験手順

被験者は、21 歳から 25 歳の健常者 15 名 (男性 14 名, 女性 1 名) であった。被験者に実験設備の暗幕の内部に入っ

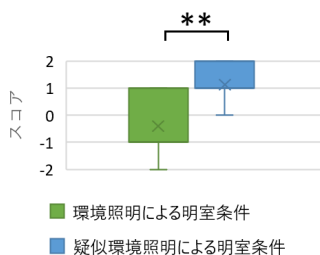


図 5: 自然さ評価のアンケート調査結果

てもらい、環境照明による明室条件と疑似環境照明による明室条件の 2 通りのレンガテクスチャ投影の様子を見せた (図 3, 4)。それぞれの条件において、レンガのテクスチャが自然に見えるかどうかを回答させた。自然に見える場合を 2、どちらとも言えない・分からない場合を 0、自然に見えない場合を -2 として 2 から -2 の 5 段階で回答させた。なお、1 人目の被験者には先に環境照明による明室条件を見せ、2 人目の被験者には先に疑似環境照明による明室条件を見せた。3 人目以降も、奇数番目の被験者には先に環境照明による明室条件を見せ、偶数番目の被験者には先に疑似環境照明による明室条件を見せた。

4.1.3 結果

結果を図 5 に示す。平均値は、環境照明による明室条件では -0.4、疑似環境照明による明室条件では 1.1 だった。ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、(環境照明による明室条件) < (疑似環境照明による明室条件) の有意差が認められた ($p < 0.01$)。

4.1.4 考察

環境照明による明室条件よりも、疑似環境照明による明室条件の方が、レンガのテクスチャが自然に見えるという結果が得られた。これより、提案手法による明室条件下における PM は自然な見えの向上の観点で有用であるといえる。

4.2 測色による客観評価

4.2.1 実験目的

環境照明による明室条件と疑似環境照明による明室条件を、測色により暗室条件とそれぞれ比較する。

4.2.2 実験手順

対象物体に PM されている映像の色情報を計測した。色情報は $L^*a^*b^*$ 表色系による値を分光放射輝度計 (SR-LEDW) で測色した。また、暗室条件における対象物体への PM の様子を図 6 に示す。なお図中の赤丸は測色部分を示す。環境照明による明室条件は図 3、疑似環境照明による明室条件は図 4 であり、測色部分は図 6 と同じである。分光放射輝度計の観測穴から観察される測色部分について、観測穴にカメラを設置して撮影したものを図 7 に示す。各図の中心部の黒点が測色箇所である。3 つの条件それぞれで測色を行った。環境照明による明室条件と疑似環境照明による明室条件については、暗室条件時との色差を求めた。

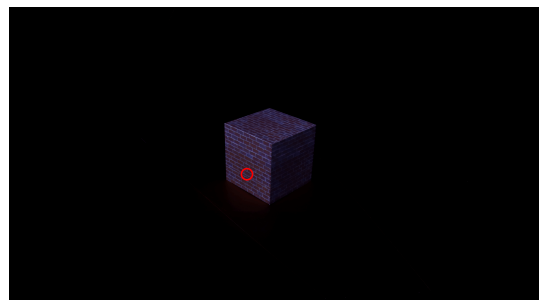
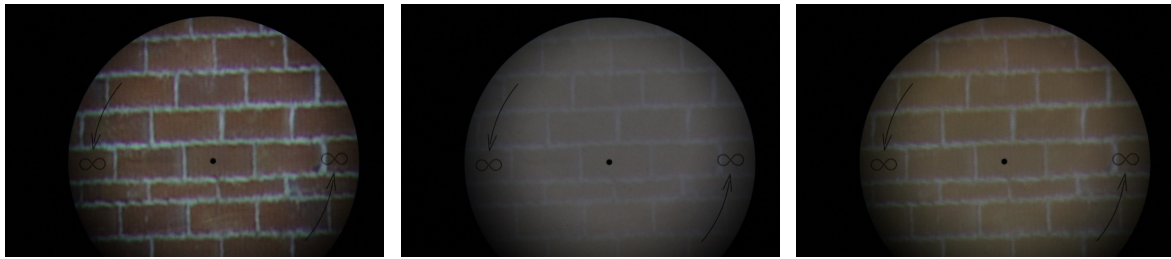


図 6: 暗室条件下でのレンガテクスチャの投影結果



(a) 暗室条件 (図 6) (b) 環境照明による明室条件 (図 3) (c) 疑似環境照明による明室条件 (図 4)

図 7: 分光放射輝度計の観測ファインダにカメラを近接させて撮影した投影結果

表 1: 色度の計測結果と色差

室内条件	L^*	a^*	b^*	ΔE
暗室条件	38.65	10.25	-3.57	-
環境照明による明室条件	64.83	-7.93	2.91	65.4
疑似環境照明による明室条件	22.74	-2.45	15.28	27.5

4.2.3 結果

分光放射輝度計で CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 表色系によって測色した。また得られた値より、暗室条件と環境照明による明室条件、暗室条件と疑似環境照明による明室条件のそれぞれについて CIE 1976 による色差を求めた。測色値と求めた色差を表 1 に示す。

4.2.4 考察

得られた色差の値はどちらも、「規格化された系統色名において、区別ができる程度」を超える色差であった [7][8]。暗室条件との色差は、環境照明による明室条件よりも、疑似環境照明による明室条件の方が小さかった。これより、疑似環境照明による明室条件の方が、暗室条件での PM との見目の差が小さいことが分かる。つまり、疑似環境照明による明室条件によって、対象物体への PM (今回はレンガのテクスチャ) の視認性の向上が認められたといえる。

5. まとめ

本稿では環境照明を再現しつつ、投影対象への PM を行った。暗室条件での対象物体への投影と比較して、環境照明による明室条件よりも、疑似環境照明による明室条件での対象物体への投影との色差が小さくなり、明室条件での投影テクスチャのコントラスト低下を抑制できることを確認した。今後は色補償やブレンディングを改善し、複雑で大きな室内環境への実現を目指す。

参考文献

[1] Andreas Rene Fender, Hrvoje Benko, and Andy Wilson: Meetalive: Room-scale Omni-Directional Display System for Multi-User Content and Control Sharing, Proceedings of the ACM international conference on interactive surfaces and spaces, pp. 106–115, 2017.

[2] Michael D. Grossberg, Harish Peri, Shree K. Nayar, and Peter N. Belhumeur: Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, 2004.

[3] Andrei State, Herman Towles, Tyler Johnson, Ryan Schubert, Brendan Walters, Greg Welch, and Henry Fuchs: The A-Desk: A Unified Workspace of the Future, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 40, No. 1, pp. 56–71, 2020.

[4] Takenobu Yoshida, Chinatsu Horii, and Kosuke Sato: A Virtual Color Reconstruction System for Real Heritage with Light Projection, Proceedings of International Society on Virtual Systems and MultiMedia, Vol. 3, pp. 1–7, 2003.

[5] Oliver Bimber and Ramesh Raskar: Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds, A.K. Peters, Ltd., 2005.

[6] Alexandru Telea: An Image Inpainting Technique Based on the Fast Marching Method, Taylor & Francis, Vol. 9, No. 1, pp. 23–24, 2004.

[7] 日本色彩学会 (編): 新編色彩科学ハンドブック第 2 版, 東京大学出版会, 1998.

[8] 日本工業規格: JIS Z 8102, 物体色の色名, 2001.