

非対角反射率行列を用いた プロジェクタカメラ系の高精度反射色推定

西澤 昌宏^{*1} 岡嶋 克典^{*1}

High-Accuracy Reflected Color Estimation with Non-Diagonal Reflectance Matrix for Projector-Camera System

Masahiro Nishizawa^{*1} and Katsunori Okajima^{*1}

Abstract ---プロジェクタカメラ系による物体のアピアランス操作技術は、パブリックビューイング環境での拡張現実感技術として有望であり、様々な応用が期待できる。これまでに、カメラ撮像からプロジェクタ投影像の影響を除去した画像を推定しながら投影像を適応的に生成する方法が提案されているが、推定画像の精度がそのまま投影結果の品質に影響を及ぼしてしまうという問題がある。そこで今回、反射色の事前情報を使うことで非対角な反射率行列を 3 個のパラメータで表現し、シーン反射色のオンライン推定を高精度に行う手法を提案する。本手法により、高品位な質感変調が必要とされるデザイン支援ツールや食品 AR にも、プロジェクタカメラ系を活用することができる。

Keywords: projector-camera system, reflectance matrix, online estimation

1 はじめに

プロジェクタ投影光によって物体のアピアランスを任意に変化させる技術はプロジェクションマッピングの名称で広く知られている。これはビデオスルー型 AR と異なり、ユーザ装置も不要でパブリックビューイング環境でも対応できるという利点がある。その多くは事前に用意した映像を建築物や身体などに投影するデジタルアートとして利用されているが、近年、主に顔や服にアート作品を投影するために、プロジェクタとカメラの組合せであるプロジェクタカメラ系による動的なプロジェクションマッピングも実践されている。これも基本的には、事前に作成した映像の投影範囲やスクリーン物体の位置姿勢をトラッキングしながら投影するシステムとして使用されている。

一方で、画像処理ベースでスクリーン物体の色や質感を操作するプロジェクタカメラ系も提案されている [1][2]。これはプロジェクタカメラ系を、プロジェクタ投影像を出力、カメラ撮像を入力とした画素毎の色フィードバック系と解釈し、カメラ撮像が目標画像に近づくようなプロジェクタ出力を計算する投影像色再現システムを基本とする。このシステムでは、プロジェクタ投影像及びカメラ撮像の画素対応をとり、投影像が含まれるシーンの撮像から現在の投影像の影響を差し引くことで、白色光下における現在のシーンを推定することができる。また、

推定シーンに所望の画像変換をかけて目標画像とすることで、現実のシーンに画像変換を適用しているかのような効果を与えることができる。この種の方法では、事前に映像を用意することなく、スクリーン物体の見た目をパラメトリックに変調することも可能となる。そのため、デジタルアートとしてだけでなく、実空間における物体の色や質感のシミュレーションツールとしても応用可能で、デザイン支援やショーウィンドウ、食品 AR 等への適用が期待できる。

プロジェクタカメラ系による質感変調では、白色光下シーンの推定精度がシーンの色及び質感の変調精度に直接影響を及ぼす。原理的に、正確な反射率行列を求めるに必要な拘束条件はオンラインで得られないが、RGB それぞれで独立な反射率を持つとする単純なモデルでもある程度推定できてしまうため、上記の問題についてはこれまであまり注意が払われてこなかった。本稿では、従来のモデルでは推定不可能だった非対角な反射率行列をオンラインで推定するための手法を提案する。本手法により、プロジェクタカメラ系で測色学的に精確な色変調が可能になり、質感変調がより高品位に実現できるようになる。

以下、2 章ではプロジェクタカメラ系の反射モデルと制御方法、そして反射率行列を高精度に推定するための提案手法について述べる。提案手法を実現するためのキャリブレーション手法もここで解説する。3 章では精度の検証方法及び結果を示し、考察する。

^{*1} 横浜国立大学

^{*1} Yokohama National University

2 プロジェクタカメラ系

2.1 投影色計算モデル

本研究におけるプロジェクタカメラ系の投影色計算は Amano et al.のモデル[1]をベースに構築した。ある対応する画素において、プロジェクタ投影像 P とカメラ撮像 C の関係は、

$$C = R(MP + C_0) = RC_P \quad (1)$$

で与えられる。ここで C_0 はプロジェクタのバックライトと環境光、 M はプロジェクタ色空間とカメラ色空間の色変換行列、 R はカメラ色空間における投影対象の反射率を表す行列である。ただし、 P 及び C は $[0, 1]$ で正規化されており、入出力特性は線形化されているものとする。なお、計算はすべて画素毎に行うものとする。

白色光下で得られるカメラ撮像の推定値を C_{est} とすると、これはプロジェクタが最大輝度の白色光、即ち $P = [1 \ 1 \ 1]^T$ を投影したときの見た目に相当するので、反射率行列 R さえ推定できれば

$$C_{est} = R \left(M \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + C_0 \right) = KC_w \quad (2)$$

で求めることができる。得られた推定画像 C_{est} に所望の画像変換

$$C_d = f(C_{est}) \quad (3)$$

をかけて目標画像 C_d を生成すれば、画像変換 f を現実のシーンに適用したかのようなアピアランス操作が実現できる。目標画像 C_d を実現するプロジェクタ投影像 P_u を得るには、モデル式(1)に $C = C_d$ を代入して P について解けばよく、

$$P_u = M^{-1}(R^{-1}C_d - C_0) \quad (4)$$

で求められる[2]。他にも、Amano et al.[1]が現在の出力 P からの増分 ΔP を目標画像と現在の画像との差分 $\Delta C = C_d - C$ から適応制御によって得る手法を提案している。

2.2 反射率行列の推定問題

式(1)において、色変換行列 M と環境光 C_0 はキャリブレーション時に求めることができるが、反射率行列 R はシーンに依存するためオンラインで求める必要がある。しかし、フレーム毎に得られる情報はプロジェクタ投影像 P とカメラ撮像 C の一組であり、9個の未知パラメータを持つ R に対して3個の拘束条件しか与えないため、正確な R をフレーム毎に求めることは不可能である。また、 R の推定精度は式(3)と式(4)にも影響を与えるため、最終的な投影品質に大きく影響する。

既存研究[1][2]では、 R を対角行列と仮定し、RGB それぞれ独立に反射率を求めている。即ち、

$$R = \text{diag}(C \oslash C_P) \quad (5)$$

ここで演算子 $\oslash$ は要素除を表す。しかし Grossberg et al.[3]が指摘しているように、カメラのRGBセンサの分光感度は通常大きくオーバーラップしているため、一般の

R は対角行列にならない。そのため式(5)による反射率推定では、照明色の影響を完全に除去することはできず、反射色の推定精度は低い。

本稿ではこの問題に対処するため、 R を3自由度の非対角行列として表現し、高精度に白色光下での反射色を近似する手法を2種類提案する。どちらの手法を用いても、非対角行列 R をオンラインで推定可能である。

2.3 主成分行列の線形和による方法

一つ目の方法は、多くのマンセル色票の分光反射率が3個の主成分で近似可能である[4]という物理的事実に基づく。即ち、分光反射率 $R(\lambda)$ が

$$R(\lambda) \cong \alpha_1 R_1(\lambda) + \alpha_2 R_2(\lambda) + \alpha_3 R_3(\lambda) \quad (6)$$

と近似されるのと同様に、反射率行列 R も

$$R \cong \alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2 + \alpha_3 R_3 \quad (7)$$

と近似可能であると仮定する。主成分行列 R_1, R_2, R_3 さえ事前に求めておけば、反射率行列を求める問題は主成分係数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ を求める問題に置き換えられる。以下、この仮定に基づく主成分係数の求め方を述べる。

主成分行列 R_1, R_2, R_3 を3階テンソル $T = [t_{ijk}]_{3 \times 3 \times 3}$

で表すと、式(7)は次のように表せる。

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 t_{ijk} \alpha_k \quad (8)$$

ここで r_{ij} は R の第 (i, j) 成分を表す。反射色を $C = [c_i]_3$ 、

投影色を $C_P = [p_j]_3$ とすると、式(1)は式(8)を用いて

$$c_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} p_j = \sum_{k=1}^3 \left(\sum_{j=1}^3 t_{ijk} p_j \right) \alpha_k \quad (9)$$

と変形できる。ここで行列 $U = [u_{ik}]_{3 \times 3}$ を

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^3 t_{ijk} p_j \quad (10)$$

と定義することで、式(9)よりモデル式(1)を

$$C = U\alpha \quad (11)$$

と書ける。ここで $\alpha = [\alpha_k]_3$ は主成分係数を表すベクトルとする。したがって、

$$\alpha = U^{-1}C \quad (11)$$

で主成分係数を求めることができる。

2.4 同時対角化による方法

二つ目の方法は、反射率行列を対角化する共通の一次変換 W を利用する方法である。これは数学的には反射率行列を同時対角化することと同値である。いかなる反射率行列も可換であるため、同時対角化可能であることが知られている[5]ことから、すべての反射率行列が対角行列になるような色空間が存在する。この手法では、反射率行列 R を

$$R = WDW^{-1} \quad (12)$$

と表現する。ここで $D = \text{diag}(d_1, d_2, d_3)$ である。 W はキャリブレーションの段階で事前に求めておくことができるので、反射色 C と投影色 C_p から D を算出できる。式(12)より、モデル式(1)は

$$C = WDW^{-1}C_p \quad (13)$$

と変形できる。ここで $C' = W^{-1}C$, $C'_p = W^{-1}C_p$ とすると、

$$C' = DC'_p \quad (14)$$

より、式(5)と同様に

$$D = \text{diag}(C' \oslash C'_p) \quad (15)$$

と表せる。ただし式(5)とは異なり、反射率行列が対角になる色空間上で三刺激値の反射率を求めているので、元のカメラ色空間では非対角な反射率行列を求めたことになる。

2.5 プロジェクタカメラ系入出力のキャリブレーション

式(1)を正しく計算するためには、カメラとプロジェクタの階調値 I_p, I_c をそれぞれ線形化する必要がある。実験では、 I_p, I_c とそれに対応する線形化後の投影色 P および線形化後の反射色 C の関係を、次のモデル式にフィッティングさせた。

$$P_i = (I_{pi}/I_{max})^{r_{pi}} \quad (16)$$

$$I_{ci} = I_{max} \max(0, C_i - C_{\theta i})^{1/r_{ci}} \quad (17)$$

ここで添字 i は R, G, B チャンネルを表す。 I_{max} は階調値の最大値 (8bit カラーなら $I_{max} = 255$) を表す。プロジェクタカメラ系の入出力方程式 (式(1)(16)(17)) で計 21 自由度のパラメータが必要であるが、これらを同時にキャリブレーションする手法について説明する。

キャリブレーションには X-Rite 社の ColorChecker Classic を色サンプルとして使用した。ColorChecker の灰色パッチ No.19 - 24 は分光反射率がスペクトル的にほぼ一定のため、どのようなカメラ色チャンネルにおいても三刺激値の反射率はほぼ一定とみなせる。したがって、No.19 - 24 のパッチにおいてのみ反射率をスカラー量 $r^{(n)} (n = 19, \dots, 24)$ に置き換えられるため、式(1)を

$$C = r^{(n)}(MP + C_0) \quad (18)$$

と変形できる。複数種類の単色投影光を ColorChecker 上に投影した時の反射色をカメラで撮影し、それと式(16)(17)(18)による予測値との誤差を最小化することによって各パラメータを求める。ここでは、典型的な非線形最小二乗法である滑降シプレックス法を用いた。

2.6 反射率行列のキャリブレーション

2.3 節及び 2.4 節で非対角反射率行列を 3 自由度にする 2 種類の方法を説明したが、どちらも多種類の反射面によるキャリブレーションを必要とする。今回は前項で用いた ColorChecker の全 24 種類のパッチを利用した。あるパッチ n において、式(1)(16)(17)で表される投影色と反射色の対応関係を 3 色以上の投影色で得ることで、

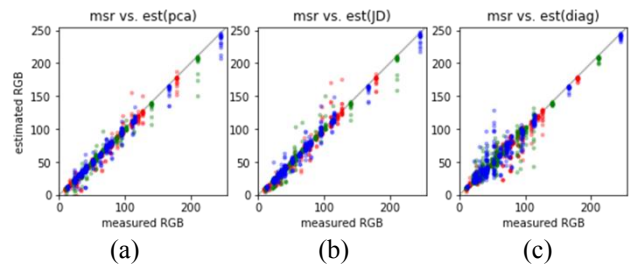


図 1 反射率行列のモデル式と反射色の推定精度

線形最小二乗法によりパッチ n の完全な 3×3 の反射率行列 $R^{(n)} (n = 1, \dots, 24)$ が得られる。なお、 $R^{(n)}$ を求めるのに必要な情報は、前節のキャリブレーションと同時に得られる。

主成分行列については、24 種類の $R^{(n)}$ をそれぞれ 1 行の 9 次元ベクトル $\text{Vec}(R^{(n)})$ に変形し、それらの第 1~3 主成分ベクトル v_1, v_2, v_3 を元の 3×3 行列に変形し直すことで R_1, R_2, R_3 を得た。ここで主成分ベクトルの導出には特異値分解を用いた。同時対角化行列 W は $R^{(n)}$ に Flachot et al.[5] の手法を用いて求めた。

3 反射色推定精度の検証

3.1 方法

2 つの提案モデルを適用した際の反射色のオンライン推定精度を従来手法[1][2]と比較した。まず、20 色の単色投影光を ColorChecker に投影し、そのときの各パッチ色を撮影した。1 組の投影色と撮影色から、従来手法も含め 3 種類の方法で反射率行列を求め、式(2)によって白色光下での反射色をそれぞれ推定した。その後、実際にプロジェクタから $P = [1 \ 1 \ 1]^T$ の白色光を投影したときの撮影色を測定して、推定色との偏差を比較した。投影色は、RGB 原色 ((255,0,0)の組合せ)、CMY ((255,255,0)の組合せ)、(255,128,0)の組合せ、低彩度の RGB ((128,128,255)の組合せ)、低彩度の CMY ((128,255,255)の組合せ)、灰色 (128,128,128)、白 (255,255,255)の計 20 色を用いた。

3.2 結果と考察

結果を投影色が RGB 原色の場合と、原色でない場合に分けて示す。図 1 に RGB 原色以外の 17 色の投影光における、各反射率行列モデルによる反射色推定精度を示す。17 色の投影光 $\times$ 24 種のパッチ $\times$ 3 チャンネルの計 1224 点をプロットした。縦軸が各モデルにおける白色光下の推定反射色の RGB 値を、横軸がそのパッチに実際に白色光を投影して測色した各パッチの RGB 値を表す。各点の色はチャンネルを表す。図 1(a)は式(7)の主成分による手法(pca)、(b)は式(12)の同時対角化による手法(JD)、(c)は式(5)の従来手法(diag)の各モデルによって計算した結果をそれぞれ示す。図 1 から、2 種類の提案手法とも、特に輝度の小さい色において

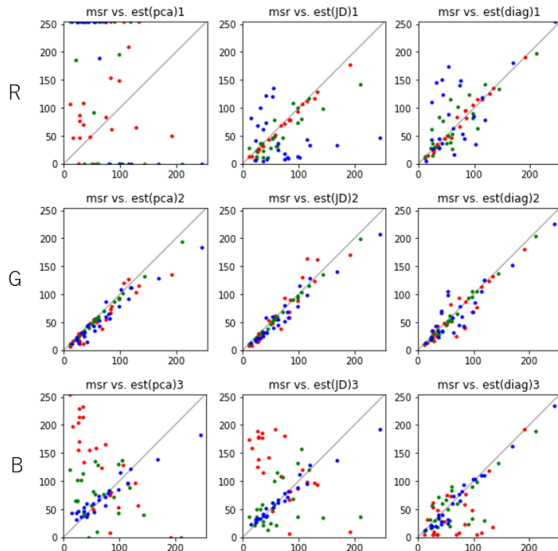


図 2 投影光が RGB 原色の場合の推定精度

顕著に従来手法よりも推定精度が向上していることが分かる。決定係数は、主成分による手法では $R^2 = 0.979$ 、同時対角化による手法では $R^2 = 0.975$ 、従来手法では $R^2 = 0.942$ であった。このことから、提案手法で反射色の推定精度が全体的に向上していることが分かる。提案した 2 種類の手法間で顕著な差はない。

図 2 に投影色が RGB 原色の場合の推定精度を示す。上段は投影色が R 原色の場合、中段は G 原色の場合、下段は B 原色の場合を示す。他は図 1 と同様である。特に投影色が R 及び B の場合に、すべての手法で著しく推定精度が低くなった。特に、投影色が R 原色の場合は反射色の B で、投影色が B 原色の場合は反射色の R で推定精度が大きく低下した。

そもそも反射色推定は、投影中の光の変化を見ることで反射率を推定するシステムであり、原理的に光を当てなければ推定は不可能である。プロジェクタの RGB 原色はピーキーなスペクトルであるため、例えば R 原色を投影する場合はスペクトル的に離れた B の反射情報をカメラで取得できず、B の反射率推定が特に不安定になったと推測される。提案モデルは反射率行列の統計情報を事前知識として利用する比較的複雑な計算を必要とするため、この不安定な条件ではシンプルな従来モデルよりも精度が低くなったと考えられる。この問題を原理的に回避するためには、十分な反射情報が得られる最低限の光を当てるしかない。図 3 に、投影光が RGB 原色の場合にバックライト量が推定精度に与える影響を示す。横軸が投影像のバックライトの階調値、縦軸が推定精度を示す決定係数である。(a)(b)(c)はそれぞれ R,G,B 原色投影時の結果を示す。バックライト量上昇に伴い、従来手法の精度が緩やかに上昇しているのに対し、2 つの提案手法ではある値を境に急激に精度が高くなる事が分かる。これは、上述の原理的問題を回避するために十分な反射情報を与えた場合、提案モデルの

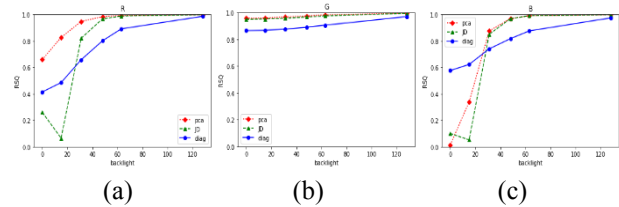


図 3 バックライト量による推定精度の変化

方が高精度であることを示している。

2 種類の提案モデルについて、反射色の推定精度はほぼ同じであった。しかし式(11)のように、主成分行列による手法は逆行列の計算を必要とする。行列式が 0 に近い場合は推定が不安定になるため、同時対角化による手法の方がロバストと言える。

4 結論

本稿では、プロジェクタカメラ系において白色光下での反射色を高精度にオンライン推定するために、非対角反射率行列を 3 自由度で記述する 2 種類のモデルを提案した。実験結果から、十分な反射情報が得られれば、2 種類の提案手法は対角性を仮定した従来の反射モデルよりも高精度に反射色を推定できることが示された。

謝辞

本研究は、横浜国立大学の共同研究推進プログラム「課題 C」の助成を受けています。

参考文献

- [1] Amano, T., & Kato, H. Appearance control using projection with model predictive control. Pattern Recognition (ICPR) 2010 20th International Conference on. IEEE, 2010.
- [2] Fujii, K., Grossberg, M.D., Nayar, S.K.: A projector camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments. In: Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition, pp.814-821, 2005.
- [3] Grossberg, Michael D., et al. "Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system." *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2004.
- [4] Romney, A. Kimball, and Tarow Indow. "Munsell reflectance spectra represented in three - dimensional Euclidean space." *Color Research & Application* 28.3 (2003): 182-196.
- [5] Alban Flachot, Edoardo Provenzi, J Kevin O'Regan. AN ILLUMINANT-INDEPENDENT ANALYSIS OF REFLECTANCE AS SENSED BY HUMANS, AND ITS APPLICABILITY TO COMPUTER VISION. EUVIP, Oct 2016, Marseille, France.