

# 照明変化を考慮した見かけ制御投影法の基礎検討

山本 豪志朗<sup>1,a)</sup> 志水 友輔<sup>1</sup> 武富 貴史<sup>1,b)</sup> 加藤 博一<sup>1,c)</sup>

**概要：**投影型拡張現実感は同一空間にいる不特定多数の利用者に同一のものを提供できるという特徴から、複数人で行う作業の支援システムや多人数で体験するエンタテインメントシステムなどに用いられている。一方で、光投影を利用して実物体の見かけを様々変化させる技術が開発されており、これを適用することで投影型システムの高品質化が期待できる。本論文では、照明が変化する環境下でも、投影対象領域に置かれた平面物体の反射率を安定的に推定し、その見かけを任意に制御するプロジェクタカメラシステムについて検討する。そして、照明変化に対する見かけの表現方法を紹介し、従来法との比較を行うことで本手法の投影品質を評価する。

## 1. はじめに

拡張現実感技術は実世界と仮想世界を融合する技術として研究開発が進み、作業支援や道案内、ゲームなど、実務応用からエンタテインメント応用まで幅広い活躍が期待されている。その応用において質を高めるには、ユーザインタフェースやインタラクション、ユーザエクスペリエンスの設計を充実させるという方法も存在するが、一方で技術そのものの質を向上させることも一つの方法である。本研究では、近年プロジェクションマッピングなどで注目を浴びている光投影型の拡張現実感技術に着目し、その技術向上によってエンタテインメント応用に寄与する。具体的には、対象の見かけを光投影によって制御する場合に、照明変化が生じると適切な処理が行われず意図した見かけとならない問題に対して、照明変化と反射率を同時推定することによって解決する方法を提案検討する。

本研究では、図2に示すようなプロジェクタとカメラを一つの組みとシステムを構成し、平面上で動く対象に対してその見かけ制御を行う技術の実現を目指す。特に照明変化が生じる場合にも頑強にその制御を行うために、照明変化と反射率を同時推定することを目標とする。ただし、その処理を行ううえで、人の目には見かけが制御されたように見えることが重要である。そのため、この点を踏まえ、継時加法混色という混色方式に着目した手法を考案し、それについて検討する。

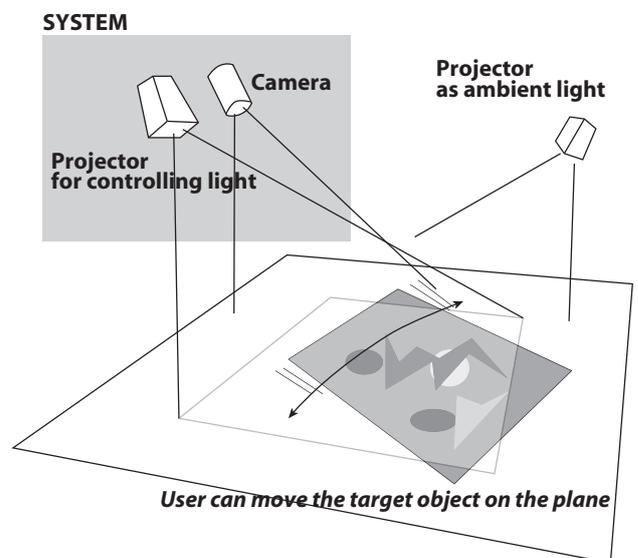


図1 システム概要：プロジェクタとカメラで構成されるシステムにて対象物体の見かけの制御を実施する（意図的な照明変化のためにもう一台プロジェクタを配置する）

図2 aa.

## 2. 関連研究

光投影によってももの見かけを制御する場合、大きく二つの方法がある。一つは、光学補正であり、対象が元来有する反射率の影響を考え、観察後の見かけを全く異なるものに変える技術である。つまり、対象の反射率を打ち消しつつ、目標の色を重ねる処理を行っている。Nayar や Grossberg らはプロジェクタとカメラの関係をモデル化し、行列式を導き、双方の入出力を線形化する手法を提案し、そのうえで光学補正を行った [1], [2]。Fujii らは、その後学

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
NAIST, 8916-5 Takayama, Ikoma, Nara 630-0192, Japan  
a) goshiro@is.naist.jp  
b) takafumi-t@is.naist.jp  
c) kato@is.naist.jp

モデルの反射特性の部分がかメラの色域では一定であると仮定し、新たな光学モデルを用いて、照明変化が無い条件下にて、対象物体が動くことによって生じる各箇所の反射率変化に対しても光学補正を行う手法を提案した [3]。橋本らは反射率や環境光をモデルに加え、逐次最小自乗法を用いて推定を行い、光学補正を動的に行う手法を提案した。

もう一方の技術は見かけの強調であり、あたかも対象の有する反射率が変化したかのように補正光を投影し、異なる色表現を行う技術である。吉田らは光源の分光分布や対象の分光反射率等の関係をモデル化し、色変換行列を用いてカメラとプロジェクタの関係性を記述した [5]。天野らは、フィードバック系として見えの強調を行っても、適切なパラメータを設定することにより、発散せず、反射率が動的に変化する場合に対しても見えの強調を行える手法を提案した [6]。しかしながら、どちらも照明変化を考慮せず、環境光は一定であるという条件を有している。

本研究では、照明変化が生じるような環境下であっても、対象の反射率を推定し、環境光を考慮した光学補正や見かけ制御の実現を目指す。そこで、天野らが行っているようなフィードバック系の処理において、照明変化と反射率を同時に推定する方法を検討する。

### 3. 照明変化と反射率変化の同時推定手法

従来のフィードバック系ではプロジェクタとカメラで一組のデータがあれば反射率が推定できたが、照明変化がある環境下では環境光と反射率の2パラメータを同時に推定しなければならず、その一組のデータでは求まらない。そこで、二組のデータを用いる

プロジェクタとカメラの間にある光学関係を記述すると図3のようになる。ここでは、以下の式が光学モデルとして仮定できる。

$$C(t) = K(t)C_{ideal}(t) = K(t)(P(t) + F'(t))$$

このとき、 $C$  はカメラ画像、 $P$  はプロジェクタ投影像、 $F$  は環境光、 $K$  は反射率とする。環境光を一定とした場合、上記で述べた通り、この式において反射率  $K$  を求めるにはプロジェクタ投影像とカメラ撮画像の一組が必要になる。しかしながら、照明変化があると仮定した場合、この式では対応できない。そこで、本手法では高速投影することで得られる二組のデータを用いて環境光と反射率を推定することとする。そのときに解くべき式を以下の通りに求めた。

$$\begin{pmatrix} \hat{K}(t)^{-1} \\ \hat{F}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1(t) & -1 \\ C_2(t) & -1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_1(t) & 1 \\ P_2(t) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{rate} \\ T_{diff} \end{pmatrix}$$

$C_1(t), C_2(t), P_1(t), P_2(t)$  は、それぞれ、1回目、2回目の

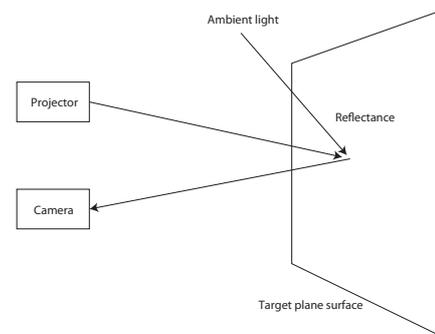


図3 プロジェクタとカメラの光学関係

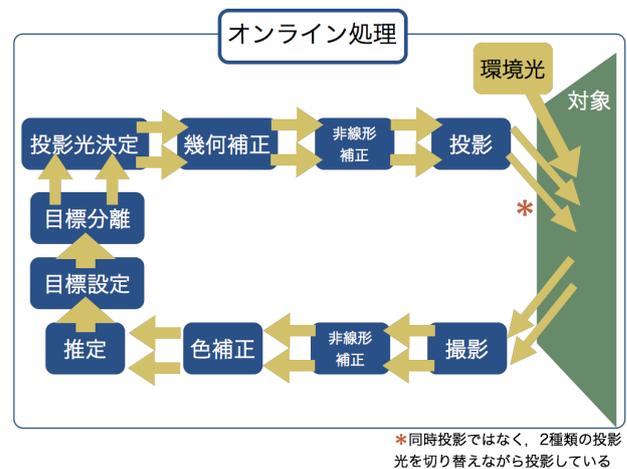


図4 提案手法をフィードバック系に適用したときの処理の流れ

撮影・投影値となる。ただし、 $T_{rate}$  と  $T_{diff}$  は計算時に定数としてまとめられるものとして記述を省略したものである。

上記を実時間フィードバック系にて実施するために、図4のような処理が必要になる。二組のデータを用いた推定によって求めた目標色を、継時加法混色を実施するために特定の2色に分離する処理が行われる。これの繰り返しによって、対象平面上で動く対象物体に対しても、的確に見かけ制御を行うシステムとなる。本稿では、まず第一段階として、推定部分について検討する。

### 4. 試作システムとその動作

まず継時加法混色を実施したときに、人にとって違和感のない見かけとなるかを確認するために、ある目標色を特定の2色に分離し、3Dプロジェクタに左右の画像として入力してその動作を確認した。その結果、全く違和感無く合成されたため、本手法を3Dプロジェクタとそれに対応するカメラを組み合わせたシステムに実装できる可能性が確認できた。

本手法の検討用に構築した環境は、図5に示す通り、カメラとプロジェクタで構成された見かけ制御システムと環境光用プロジェクタである。制御用プロジェクタは Canon LV-7380, 3000 lm (1024 × 768), カメラは Allied Vision

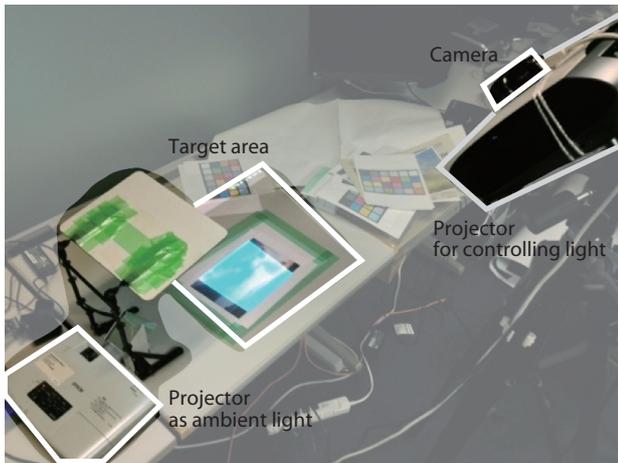


図5 試作システムの検証実験環境：見かけ制御システムで投写される対象平面に鏡で折り返しながら環境光用プロジェクタからの光を投射する

Technologies Guppy Pro (640 × 480) を用い、互いを固定し、対象となる机上面を向くように設置した。処理用コンピュータは Ubuntu 12.04, Intel Core (TM) i7 CPU 870 @ 2.93GHz を用いた。

本実装では実時間で動作するフィードバック系は構築せず、各段階での処理の確認を目的として検証を行った。その結果、対象平面上にある対象を配置し、そこに照明変化を環境光用プロジェクタによって生成したときの見かけの制御として4種類可能であることを確認した。その結果を図6に示す。本手法によって照明変化と反射率を分離して、同時に推定できるため、各変化に対応した制御が可能である。これまで行われてきた見かけの制御である光学補正および見かけの強調に対して、環境光を残すか、もしくは消し去るかなどの表現も可能になる。図6上段は、見かけの強調を行った場合であり、そのうちの左は、環境光の影響を受けずに対象の反射率を推定できるため、そもそも彩度の高い画像の上に環境光が当たっているような表現となっている。一方その右は、その上で環境光を除去する処理を行っている。同様に図6下段も、反射率を独立に求めることができるため、もともと異なる画像に環境光が当たっている表現、そこから環境光を取り除いた表現が可能となっている。

しかしながら、本手法ではある目標色に対して継時加法混色のための2色生成を実施しており、プロジェクタやカメラによって制限される色表現の中でもさらに狭い範囲のみが有効になるという問題点が存在する。また、対象の反射率が低い、つまりは暗い画像の場合は、その反射率を求めることが困難となり、ノイズを生む原因となる。他には、3Dプロジェクタなどの高速処理で実施したとしても、特定の周波数を持つ環境光が存在した場合、それらが推定精度に影響を及ぼす可能性がある。



図6 本手法を用いたときの見かけ制御の結果：中央に配置した特定照明下での元画像に対して4種類の見かけとなるよう制御できる

## 5. 結論

本稿では、エンタテインメント等にも用いられるようになってきた投影型拡張現実感の技術向上として、照明変化が生じるような環境においても対象の反射率を推定し、その見かけを制御する方法について検討した。継時加法混色という混色方式に着目し、人の目には見かけが制御された表現となりつつ、システムとしては二組のプロジェクタ投影像とカメラ撮影像を取得することにより、照明変化と反射率を同時に独立的に推定する方法を提案した。フィードバック系で用いることを前提とし、本稿ではその各段階での処理に焦点を当て、本手法について検討した。試作システムを構築し、同時推定することで、環境光の考慮と共に光学補正もしくは見かけの強調を実現する4種の表現が可能であることを確認した。

本実験結果は、フィードバック系の見かけ制御システムを組む上での第一段階に過ぎず、各種問題点については今後の課題とする。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 24700119 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Shree K. Nayar, Harish Peri, Michael D. Grossberg, Peter N. Belhumeur: *A projection system with radiometric compensation for screen imperfections* In First IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (2003).
- [2] Michael D. Grossberg, Harish Peri, Shree K. Nayar, Peter N. Belhumeur: *Making one object look like another:*

*controlling appearance using a projector-camera system*  
In Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol. 1, pp. 452-459 (2004).

- [3] Kensaku Fujii, Michael D Grossberg, Shree K Nayar: *A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments* In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Vol. 1, pp. 814-821 (2005).
- [4] 橋本直己, 渡邊暁: 環境変化に対応する動的映像補正手法映像情報メディア学会, Vol. 66, No. 9, pp. J303-J309 (2012).
- [5] 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介: 複合現実博物館のための反射色計測に基づくプロジェクタ投影テクスチャ日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 97-104 (2004).
- [6] 天野敏之, 加藤博一: モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系による見かけの制御電子情報通信学会論文誌, Vol. 94, pp. 1368-1375 (2010)