



深度計測とカメラフィードバックを用いた投影型色操作の検証

樊 錦元^{*1}

彭 浩倫^{*1}

天野 敏之^{*2}

渡辺 義浩^{*1}

Jinyuan Fan^{*1}, Hao-Lun Peng^{*1}, Toshiyuki Amano^{*2} and Yoshihiro Watanabe^{*1}

Abstract – 近年、プロジェクタ・カメラシステムを用いた投影型の拡張現実において、実世界の物体の色を操作する技術が提案されている。しかし、従来手法には、対象物体とシステムの距離が変化したときに色操作の整合性を維持することが難しい問題や、反射率の計算誤差によって色操作の精度が低下する問題があった。そこで本稿では、対象物体の深度方向へ運動するときに色操作の整合性を維持可能かつ高精度な色操作ができる手法を提案する。具体的には、深度情報を用いて補正光を生成する手法とカメラフィードバックによって投影結果を修正する手法の統合によって深度に依らないかつ高精度な色操作を実現した。

Keywords : プロジェクタ・カメラ, 色操作, 深度情報, カメラフィードバック

1 はじめに

近年、プロジェクタ・カメラシステムを用いて実世界を拡張する様々な研究が提案されている [1]. 特に本稿では、動く物体へ投影を行うダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) に着目する. DPM には、レイトレーシングを用いて高い現実感を実現する手法 [11] や、人の顔へ投影する事例 [12] などがある. 本稿では、その中でも投影によって現実物体の色操作を行う応用に着目する. ここでの色操作とは、物体のものの見かけに基づいて、補正光の投影を行い、人間が知覚する物体の色を変化させる技術を指す.

同技術では、対象物体のものの見かけである白色照明下画像を取得し、彩度減衰や彩度強調などの画像処理技術によって目標画像を生成する. そのあと、対象物体の見かけが目標の見かけに近づくように補正投影を行う.

このような目的を達成するため、様々な手法が提案されている [6]~[8]. Amano らは、カメラフィードバックを用いた手法を提案した [7]. しかし同手法では、白色照明下画像及び補正画像の導出に光の距離減衰を考慮に入れないため、目標シーンとシステムの距離が大きく変化するときに操作結果の明るさが一致するように維持することが難しいと考えられる.

この制限を解決するため、柳澤らは埋め込み白色投影を行い、深度情報を用いて補正光の距離減衰を調整する手法を提案した [6]. 同手法では、対象シーンの深度画像を高速取得する手法を導入することで、白色照明下画像及び補正画像の調整を行う. これによって、距離の変化に関わらず、深度方向へ運動する物体への

ロバストな色操作を達成した. しかしこの手法では、補正光の計算で用いた反射率の計算方法はシンプルであり、精度低下の問題があった. 取得された反射率の精度低下によって投影画像の生成に誤差が生じ、色操作の精度低下も発生する.

そこで本稿では、深度変化に対して色操作結果を維持できると同時に、フィードバック手法を用いて補正画像を生成する色操作手法を提案する. 具体的には、[6] と同様に、深度情報を用いて白色照明下画像及び投影画像を生成する. これに加えて、カメラで撮った色操作の結果と目標画像の差によって補正画像を修正することで、操作結果の精度の向上を実現する. さらに、本手法を実験で検証し、異なる深度での操作精度を示す.

2 関連研究

色操作の応用では、対象物体の白色照明下の見かけを取得し、反射率を計算する. そのあと、得られた反射率をもとに目標画像の生成及び補正投影を行う. この流れにおいて、反射率の精度が低下すると、色操作の結果にも誤差が生じる.

そこで、プロジェクタ・カメラシステムを用いて対象物体の反射率を計測するため、様々な手法が提案されている [3]~[5]. Han らは、連続的な反射率を多項式で表し、8つの係数を求める手法を提案した. 同手法では、5枚の画像を 500 fps のプロジェクタで連続的に投影し、100 fps の高精度な反射率計測を実現した [3]. しかし、連続的に特定の可視光画像を投影するため、対象物体の色操作をしつつ取得することができない. Li らは、反射率の次元を 3次元まで減らし、3次元の反射率を精度良く取得するため 4枚の単色画像を投影し計測する手法を提案した [5]. しかし、事前の投影や撮像を行うため、動的な色操作システムに組み込むことができない.

^{*1}東京工業大学

^{*2}和歌山大学

^{*1}Tokyo Institute of Technology

^{*2}Wakayama University

一方、反射率の計測方法を色操作に適用するため、Amano らは補正投影下の対象物体の見かけ対象物体の反射率を推定し、カメラフィードバックを用いて結果を修正する手法を提案した [7]。しかし、同手法では、深度に応じた反射率及び補正光の補償がされていないため、対象物体とシステム間の距離が限られていた。

これに対し、柳澤らは、深度計測を用いた色操作システムを提案した [6]。同手法は取得した深度情報を補正画像の生成に導入することによって、対象物体の深度方向への運動にロバストな色操作システムを実現した。しかし、同手法では、対象物体の反射率は瞬間撮像による一枚の白色照明下画像によって計算されるため、誤差が生じる。また、同手法はフィードフォワード系によって補正画像を生成するため、前のフレームの誤差を次のフレームに渡し、修正することができなかった。

3 深度計測とカメラフィードバックを用いた色操作

3.1 概要

本節では、深度計測とカメラフィードバックを用いた色操作手法を提案する。対象物体の深度方向へ運動するときに色操作の整合性を維持可能かつ高精度な色操作を実現するため、深度情報を用いて投影画像を生成し、投影結果と目標画像の差分を用いて次のフレームの補正を行う。

図1に本手法のパイプラインを示す。検証を行うシステムは、可視光高速プロジェクタ、二台の可視光高速カメラから構成される。

まず、色操作を行う対象物体に対し、プロジェクタ・カメラを用いて白色照明下画像 C_W 及び色操作の結果の画像 C_R を取得する。二台のカメラと可視光プロジェクタ間で同期をとり、フレームの一部及びフレーム全体で撮像を行うことで上述の二枚の画像を得ることができる。

その後、色操作を行う深度と基準深度の関係をもとに、深度に依らない白色照明下画像 \bar{C}_W 及び結果の画像 \bar{C}_R を得る。 \bar{C}_W を用いて目標画像 \bar{R} を生成する。次に、フィードバック手法を用いて結果の画像 \bar{C}_R を目標画像 \bar{R} に近づけるように投影画像 P_{PRO} を生成し投影する。

3.2 二台のカメラ撮像及び深度補正

本節では、二台のカメラとプロジェクタの同期撮像及び撮像結果の深度調整について述べる。本稿では、対象物体の白色照明下の見かけを直接的に撮像し、深度に依らない画像へ変換する手法を用いる [6]。図2に二台のカメラの撮像タイミングを示す。本手法では、高速プロジェクタを用いて、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) 光源が順に点灯するタイミングで補正投影を行う。補

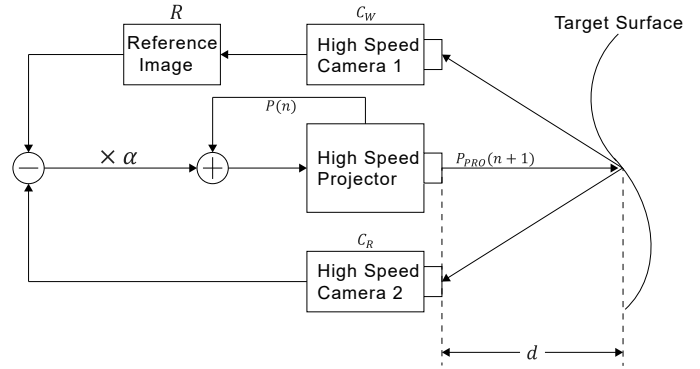


図1 提案手法のパイプライン
Fig.1 Pipeline of proposed method

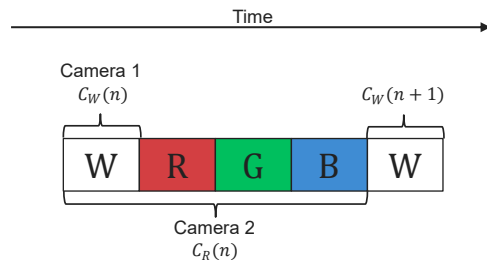


図2 二台のカメラの撮影タイミング
Fig.2 Two camera's capturing timing

正投影の後、RGB を同時に点灯し、瞬間的に白色画像 (W) を投影する。一台のカメラは、白色画像のタイミングで同期撮影することで白色照明下の見かけを取得する。もう一台のカメラは、一フレームが投影される全体 (RGBW) の時間で撮像し、補正投影の結果を取得する。

二枚の画像を取得した後、深度 d 及び基準深度 \bar{d} を用いて、光の距離減衰モデルに従い、基準深度 \bar{d} での画像 \bar{C}_W と \bar{C}_R に変換する。この計算を下式で表される。

$$\bar{C}_W = C_W \frac{d^2}{\bar{d}^2} \quad (1)$$

$$\bar{C}_R = C_R \frac{d^2}{\bar{d}^2} \quad (2)$$

3.3 補正画像を生成するフィードバック手法

前節で得られた \bar{C}_W と \bar{C}_R を用いて、フィードバック手法によって補正投影の生成について述べる。 $n+1$ フレームの補正投影の生成は下式で表される。

$$\bar{R}(n) = f(\bar{C}_W(n)) \quad (3)$$

$$P(n+1) = P(n) + \alpha V^{-1}(\bar{R}(n) - \bar{C}_R(n)) \quad (4)$$

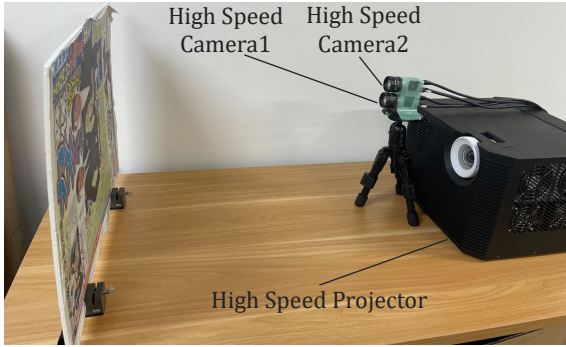


図3 検証を行うシステム
Fig. 3 System used for experiment

$$P_{PRO}(n+1) = P(n+1) - V^{-1}\bar{E}(n+1) \quad (5)$$

$n+1$ フレームの目標画像 $\bar{R}(n+1)$ は $n+1$ フレームの白色照明下画像 $\bar{C}_W(n+1)$ によって生成される。関数 f は、画像に対し行う彩度減衰や彩度強調などの画像処理を指している。フィードバック手法の設計として [9] を参照し、得られる目標画像と n フレームの結果画像 $\bar{C}_R(n)$ の差を前のフレームの投影画像 $P(n)$ に加算し $n+1$ フレームの投影画像 $P(n+1)$ を生成する。 V はプロジェクタとカメラの間の色変換行列であり、 α はフィードバック係数である。最後に投影画像から基準深度での環境光 E を減算し、最終的にプロジェクタから投影する画像 P_{PRO} を生成する。

4 実験

4.1 実験環境

本稿で、構築したシステムを図3に示す。最大 947 fps でのカラー投影が可能な高速プロジェクタ [2](解像度 1024×768) と 520 fps でカラー撮像が可能な高速カメラ (解像度 720×540) 二台を用いて構築した。計算機は、CPU に Xeon Gold 6136 3.0GHz dual, GPU に GeForce RTX 3090 を搭載したものを利用した。実験は、異なる深度で固定される対象物体に対して行うため、深度情報はあらかじめ各画素ごとに取得する。フィードバック係数 α は 0.5 とした。投影環境は、照明のない暗室にて行った。この場合、式 (5) の環境光 E は、白色照明下画像を得るため投影される白色投影を表す。

4.2 実験結果

本実験では、投影対象として新聞紙を使用した。基準深度 \bar{d} は 1.0 m に設定し、対象までの深度 d を 1.1 m に設定した。基準深度 \bar{d} と深度 d にて提案手法と深度に依らない既存のフィードフォワード手法 [6] の比較を行った。今回行う色操作は彩度減衰とした。

まず、基準深度における比較を図4に示す。それぞ

れ、(a) は白色照明下での見かけ、(b) は生成する目標画像、(c) と (d) は既存手法 [6] の色操作結果及び色度図での評価結果、(e) と (f) は提案手法を用いた色操作結果及び色度図での評価結果である。今回は、結果画像からランダムに 100 点を選び出し、画素値を CIE1931 色空間に変換し色度図に書き出した。行った色操作は彩度減衰のため、色度図の中の 100 点は、座標 (0.33, 0.33) に集中すればするほど色操作の精度が高いことを表す。比較結果より、提案手法のサンプル点がより (0.33, 0.33) に集中することがわかり、より高精度な色操作を実現することを確認できた。

続いて、深度情報を用いて補正される結果を図5に示す。(a) は基準深度 \bar{d} での操作結果、(b) は異なる深度 d において深度補正されない操作結果、(c) は補正されたあとの結果、(d) は補正なしと補正ありの結果の差分である。結果によって、補正される結果のほうが深度による文字の部分の明るさの減衰が自然であることを確認できた。

次に、深度 d における比較を図6に示す。(a) と (b) は既存手法の色操作結果及び色度図での評価結果、(c) と (d) は提案手法を用いた色操作結果及び色度図での評価結果。結果から、提案手法は基準深度だけでなく、深度が変化しても既存手法より精度良く対象物体を色操作できることを確認できた。

5 考察

本実験で、カメラフィードバック手法と深度による補正光を補償する手法の統合によって、深度に依らないかつ高精度な色操作を実現することを確認できた。深度によらないフィードフォワード型色操作手法との比較によって、フィードフォワード手法の導入によって結果の精度がよくなることを確認できた。

一方、フィードバック手法では最終結果まで収束する時間を要する問題がある。動く対象物体を色操作する際に、遅延による人間が知覚する投影結果のずれを最小限に抑えることが望ましい。今後は、フィードバック手法を改善することで、収束時間を減らすことが望めると考える。

6 まとめ

本論文では、深度計測とカメラフィードバックを用いた投影型色操作の提案を行った。この実現にあたり提案した手法では、二台のカメラで取得した白色照明下画像及び結果の画像に対し、深度によらない画像に変換する。変換された画像を用いてフィードバック手法で投影画像を生成し、対象物体に補正光を投影し色操作を行った。また、実験により既存のフィードフォワード手法より高精度な色操作を実現することを確認

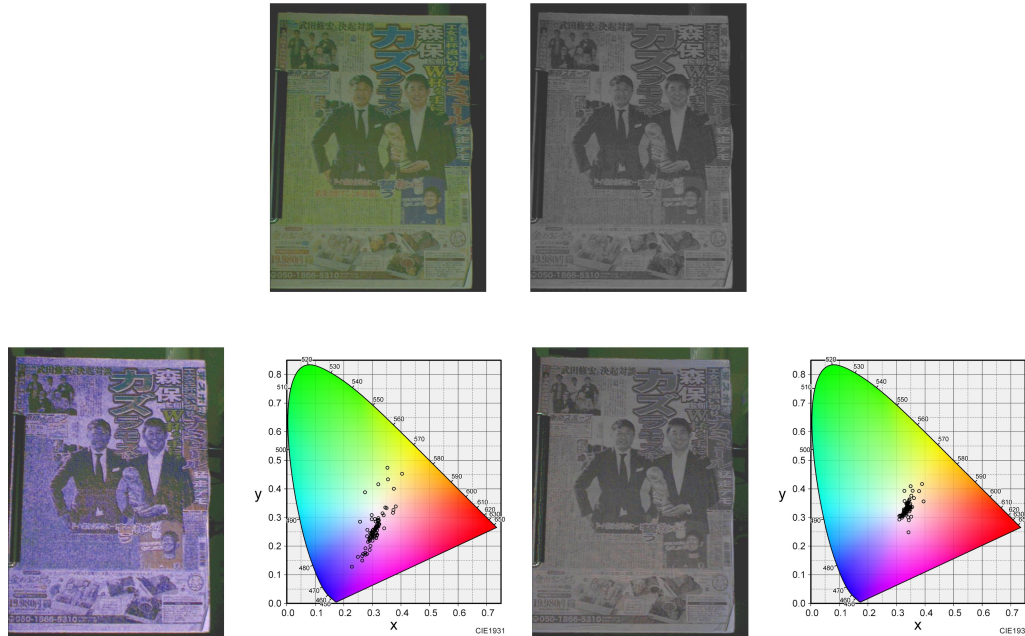


図4 実験1 (基準深度): 左上から右へ順に, (a) 白色照明下の見かけ, (b) 目標画像 (彩度減衰), (c) 既存手法 [6] の色操作結果, (d) 既存手法の色度図での評価結果, (e) 提案手法の色操作結果, (f) 提案手法の色度図での評価結果

Fig. 4 Experiment 1 (Reference depth): From top left, (a) Appearance under white illumination, (b) Target image (Color removal), (c) Result by existing method [6], (d) Result by existing method evaluated by chromaticity diagram, (e) Result by proposed method, (f) Result by proposed method evaluated by chromaticity diagram

した。

参考文献

- [1] Grundhöfer, Anselm, Daisuke Iwai: Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications; Computer Graphics Forum, vol(37), pp.653-675 (2018.5)
- [2] Watanabe Yoshihiro, Masatoshi Ishikawa: High-speed and high-brightness color single-chip DLP projector using high-power LED-based light sources; International Display Workshops, pp.1350-1352 (2019.11)
- [3] Han Shuai, Imari Sato, Takahiro Okabe, Yoichi Sato: Fast spectral reflectance recovery using DLP projector; Asian Conference on Computer Vision, pp.323-335 (2010.11)
- [4] Li Yuqi, Dongming Lu, Lei Zhao: Robust estimation of spectral reflectance by a projector-camera system; Chinese Optics Letters, vol(11), (2013.11)
- [5] Li Yuqi, Aditi Majumder, Meenakshisundaram Gopi, Chong Wang, Jieyu Zhao: Practical radiometric compensation for projection display on textured surfaces using a multidimensional model; Computer Graphics Forum, vol(37), pp.365-375 (2018.5)
- [6] 柳澤昂輝, 野元貴史, 角野究, 上田晋寛, 加瀬部秀訓, 山下徹, 湯浅剛, 天野敏之, 渡辺義浩: 高速プロジェクトラ・カメラとリアルタイム3次元計測を用いた実世界の色操作; 第60回複合現実感研究会, pp.1-6 (2021.1)
- [7] Amano Toshiyuki, Hirokazu Kato: Appearance control using projection with model predictive control; International Conference on Pattern Recognition, pp.2832-2835 (2010.8)
- [8] Amano Toshiyuki: Projection based real-time material appearance manipulation; Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp.918-923 (2013.6)
- [9] Nayar Shree K., Harish Peri, Michael D. Grossberg, Peter N. Belhumeur: A projection system with radiometric compensation for screen imperfections; ICCV workshop on projector-camera systems (PROCAMS), vol(3) (2003.10)
- [10] Fujii Kensaku, Michael D. Grossberg, Shree K. Nayar: A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments; IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol(1), pp.814-821 (2005.6)
- [11] Nomoto Takashi, Ryo Koishihara, Yoshihiro Watanabe: Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing; ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, pp.1-2 (2020.8)
- [12] Bermano, Amit H., Markus Billeter, Daisuke Iwai, Anselm Grundhöfer: Makeup lamps: Live augmentation of human faces via projection; Computer Graphics Forum, vol(36), pp.311-323 (2017.5)

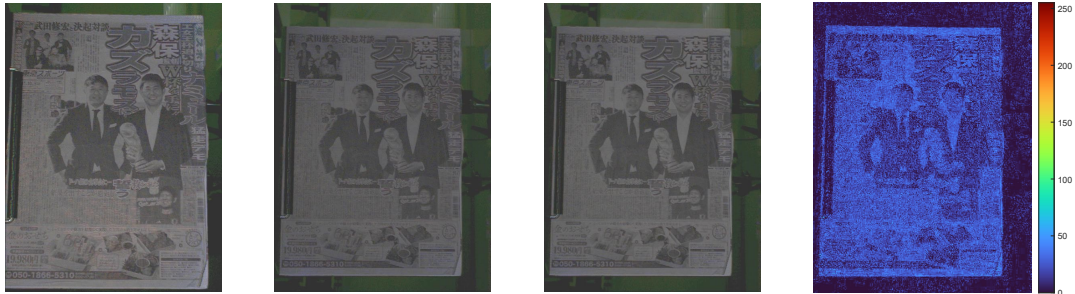


図5 実験2: 左から順に, (a) 基準深度での結果, (b) 深度補正なしの結果, (c) 深度補正ありの結果, (d) 補正なしとありの差分

Fig. 5 Experiment 2: From left, (a) Result at reference depth, (b) Result without depth information, (c) Result with depth information, (d) Difference between results with and without depth information

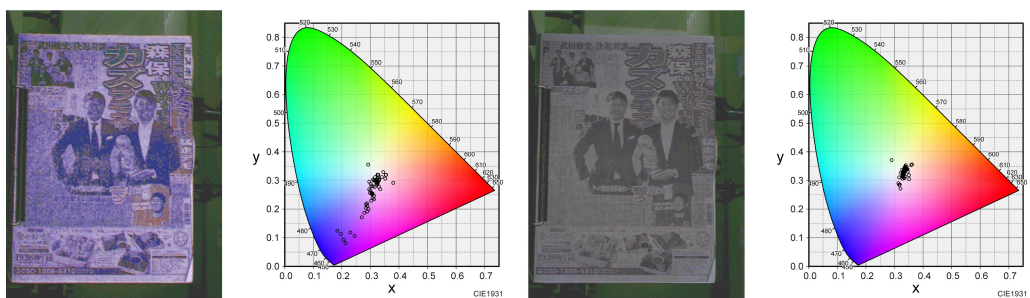


図6 実験3 (深度 d): 左から順に, (a) 既存手法 [6] の色操作結果, (b) 既存手法の色度図での評価結果, (c) 提案手法の色操作結果, (d) 提案手法の色度図での評価結果

Fig. 6 Experiment 3 (Different depth d): (a) Result by existing method [6], (b) Result by existing method evaluated by chromaticity diagram, (c) Result by proposed method, (d) Result by proposed method evaluated by chromaticity diagram