

高速プロジェクタ・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

柳澤昂輝^{*1} 野元貴史^{*1} 角野究^{*2} 上田晋寛^{*2} 加瀬部秀訓^{*2}
山下徹^{*2} 湯浅剛^{*2} 天野敏之^{*3} 渡辺義浩^{*1}

Abstract — 本稿では、プロジェクタ・カメラを用いて投影により実世界の物体の色を操作する技術に着目する。同技術は、物体の反射率に応じた補正光の投影を行うことで、色を変化させる原理に基づくものである。しかし、従来手法には、補正光の投影を行うまでの遅延が大きい問題と、深度方向への運動時に色操作ができない問題があった。これまでに、我々は高速プロジェクタ・カメラと、推定に依らない高速な反射率取得の2つを導入することで、特に前者の問題の解決を図った。本稿では、後者の深度問題の解決について報告する。具体的には、赤外域での高速な深度計測を組み込んだシステムへの拡張と、深度情報を用いた色操作方法を提案する。

Keywords : プロジェクタ・カメラ, 高速プロジェクタ, 色操作, 動的環境, リアルタイム深度計測

1 はじめに

プロジェクタとカメラを組み合わせたシステムを活用し、実世界を拡張する様々な応用が提案されている[1]。本稿では、その中でも投影によって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、物体の反射率に応じ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。この技術の実現は、アート・エンターテインメント、インテリア、作業支援、医療支援などに役立つ見込みが高い。

このような目的達成に向け、様々な手法が提案されている[2]~[5]。既存手法は、物体が運動する動的環境下での色操作も実現している。しかし、カメラによる画像取得から、プロジェクタによる補正光投影までの遅延が大きい問題があった。これは、低速なプロジェクタ・カメラを使っていたことが要因の一つになっている。同問題に対し、我々は、500fpsで投影・撮像を行う高速プロジェクタ・カメラを用いることで、遅延を8msにまで抑えた[6]。

また、色操作の処理においては、物体の白色照明下における反射率が重要な役割を担っている。既存システムでは、同反射率を推定によって取得していた。しかし、推定による反射率取得は、精度の低下や事前情報が必要であるなど様々な問題があった。これに対し我々は、事前情報に依らず、反射率の直接取得によって高精度化を達成しつつ、高速な取得による低遅延化も両立した[6]。

しかし、この手法では、色操作が可能な深度は10cm

程度の範囲に制限されることがわかった。この制限は、同軸化に伴う投影出力の低下や、補正光の導出に光の距離減衰を組み込んでいない点が原因であると考えられる。

そこで、本稿では高速な色操作に加え、よりロバストな深度方向への運動と立体物への色操作の実現を目指した新たな手法を提案する。提案手法は、既存手法[6]を拡張したものである。具体的には、高速な3次元計測を導入することで、色操作を行うシーンの深度、及び法線を取得する。同計測情報を投影画像の生成時に用いることで、深度方向への運動や凹凸を持つ物体に対しても色操作を実現する。

特に、本手法では高速性と高精度を両立するために、構造化光法に基づく3次元計測を導入する。ただし、同計測はパターン照射を伴う。そこで、新たに開発した赤外高速プロジェクタを用いたパターン照射によって、色操作を阻害しないシステムを実現する。また、このような3次元計測の導入により、物体の反射率を取得する可視光カメラと、補正光を投影する可視光プロジェクタを同軸化する必要がない。この点は、同軸化に伴って、撮像・投影の両者の輝度が低下していた問題を解消することができる。

実験の結果、提案手法によって、深度方向へ動的に運動する物体に対しても高速かつ、よりロバストに色操作が実現できることを確認した。

2 関連研究

色操作の応用では、白色照明下の見かけをもとにシーンの反射率を取得し、反射色の制御を行う。一方、システムが動作している間は、補正光が投影されているた

*1東京工業大学

*2東京エレクトロンデバイス株式会社

*3和歌山大学

め、白色照明下の見かけを取得することが難しい。これに対して、Amano らは、色操作されたシーンを撮像した画像から、白色照明下の見かけを推定する手法を提案した [5]。一方、同手法は推定に基づくため、白色照明下画像の精度は低かった。このような精度不足に伴う誤差をフィードバック系によって補償している。同手法は動的に変化する環境にも適用することができる。しかし、開発されたシステムの速度は 14fps であり、運動時にはシステムの遅延による色ずれが生じていた。また、上述の推定を行うためには、予め白色照明下における白色基準物体を撮像する必要があった。原理的には、物体の運動は、白色基準物体を撮像した奥行きに限定されていた。

また、Akiyama らは、動的に変化する環境光下で白色照明下の見かけを推定する手法を提案した [4]。しかし、高速化を目的とした手法ではなく、使用したプロジェクタも低速だったため、高速な白色照明下画像の取得は実現していない。

これに対し、我々は、高速プロジェクタ・カメラを用いて、補正画像と瞬間的な白色投影を交互に行い、カメラで白色投影のタイミングで撮像を行うことで反射率を直接取得する手法を提案した [6]。同手法により色操作の高速・高精度化を実現した。ただし、同システムではプロジェクタ・カメラの同軸設置のためにハーフミラーを用いたことから、白色投影と補正光投影の両者の輝度が低い問題があった。この結果、カメラの撮像画像も暗くなっていた。このため、色操作が達成可能な対象とシステム間の距離が限られていた。さらに、同手法では撮像画像から深度情報を用いることなく、シーンの反射率分布を取得していた。このため、同じ物体でも深度が変化したときに、反射率が変わる問題を抱えていた。その結果、物体の深度方向に依らず、一定の色操作を維持することができていなかった。

3 3次元計測を用いた実世界の色操作

3.1 システム構成

図 1 にシステム構成を示す。図中のパラメータは全て画像中のある画素における値を表している。本システムは、可視光高速プロジェクタ、可視光高速カメラ、赤外高速プロジェクタ、赤外高速カメラから構成される。特に、可視光での色操作を阻害しないために、3次元計測には赤外光を用いる。

このように提案手法では、新たに構造化光法に基づく高速な 3次元計測の導入を図る。具体的には、また、位相シフト法に基づく高速 3次元計測 [8][9] を用いる。同計測で得られる対象シーンの深度・法線の情報を用いることで、高速な色操作に加え、深度方向への運動や立体物に対してよりロバストな色操作の実現する。

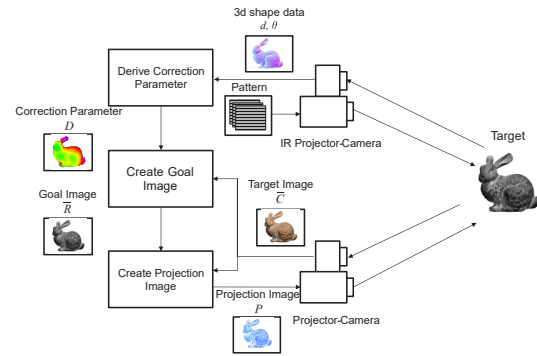


図 1 システム構成
 Fig. 1 Configuration of system

また、3次元計測を用いることで、プロジェクタとカメラを同軸化する要請を回避できる。この点は同軸化に伴う輝度の低下を避けることができる。

また、[6] の手法に基づき、可視光プロジェクタ・カメラを用いて白色照明下の見かけを得る。以降、同見かけを白色照明下画像 C と呼ぶ。同画像を得るため、システムは補正画像の投影と瞬間的な白色投影を交互に行う。撮像は可視光プロジェクタ・カメラ間で同期をとり、白色投影のタイミングで行う。

その後、白色照明下画像 C と、赤外域で同時に計測した 3次元情報から導出される補正值 D を元に、後述する深度に依らない白色照明下画像 \bar{C} を得る。続いて、 \bar{C} を用いて色操作後の目標画像 \bar{R} を生成する。次に、深度に依らない白色照明下画像 \bar{C} 、目標画像 \bar{R} から補正画像 P を生成する。続いて、対象と補正画像 P の投影位置が対応するように 3次元計測情報から、赤外カメラ視点の補正画像 P を、可視光プロジェクタ視点の投影画像 \hat{P} に変換する。最後に投影画像 \hat{P} をプロジェクタから投影することで色操作を完了する。

3.2 白色照明下画像 C の同期撮像

白色照明下画像 C の直接取得方法について述べる。本稿では、推定を介さない直接撮像手法を用いる [6]。本手法ではまず、高速プロジェクタを用いて、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) それぞれの光源が順に点灯するタイミングで補正光を投影する。次に補正光の投影後、RGB 同時点灯を瞬間的に行い、白色画像の投影を行う。白色照明下画像の撮像は、この白色投影が行われるタイミングで同期撮像することで行われる。この手法により、撮像のための白色投影を瞬間的に行いつつ、補正光の投影が可能となる。

ただし、撮像のために埋め込む白色投影は色操作を行う補正光の品質に影響を与えるため、白色投影時間は可能な限り短くする必要がある。また、同手法は低速なプロジェクタで行なった場合、補正画像と白色画像で輝度差が大きい画素にてフリッカーが知覚される

が、今回導入したプロジェクタであれば十分高速なため、影響はないと考えられる。

3.3 3次元情報を用いた補正画像 P の生成

目標の色を達成するための補正画像生成までの手順を示す。白色照明下画像 C が得られたとき、目標画像 R を達成する補正画像 P は式 (1) の関係が成り立つ [7]。

$$P = V^{-1}(K^{-1}R - E) \quad (1)$$

ここで K は反射率, E は環境光, V はカメラとプロジェクタ間応答の線形変換を示す。また、目標画像 R は、白色照明下画像 C を彩度減衰など目的に応じた画像処理を適用することで求める。反射率 K は下式により求める。

$$K = \frac{C}{W} \quad (2)$$

W は白色照明下画像の撮像のための瞬間的な白色投影を示す。

ただし、白色照明下画像 C はカメラが直接撮像することで取得するため、例えば対象がシステムから離れると、撮像される C は暗くなる。これに伴い、白色照明下画像 C から求められる反射率 K は小さくなる。つまり、反射率は対象とシステムの距離によって変化する。これにより、上述の手法 [6] では深度の変化によって、正しい色操作を達成できなかった。

以上を踏まえ、深度方向に運動する場合でも、ロバストな色操作を実現するためには、深度に依らない反射率の導出が必要となる。そこで、深度に応じた補正值 D を導入した、新たな手法を提案する。本手法では、ある深度で既存手法を用いて達成された色操作が、深度に変化があっても同じ色操作が達成されることを目指す。

白色照明下画像 C を取得したときの深度を d とする。深度 d は、計測されたデプス画像より各画素ごとに得られる。同画像 C を、補正值 D を用いて、特定の深度 \bar{d} での画像 \bar{C} に変換する。この特定の深度 \bar{d} は予め決めた定数である。補正值 D は、光の距離減衰モデルに従い、下式で表される。

$$D = \frac{1}{\frac{1}{d^2} \cos \theta} = \frac{d^2}{\bar{d}^2 \cos \theta} \quad (3)$$

θ は、物体の法線を基準とした投影光の入射角を示す。深度 \bar{d} における白色照明下画像 \bar{C} は、補正值 D を用いて下式により求められる。

$$\bar{C} = DC \quad (4)$$

基準深度 \bar{d} における白色照明下画像 \bar{C} から基準深度における反射率 \bar{K} と目標画像 \bar{R} を得る。特定の深度 \bar{d} を仮定したときの補正画像 \bar{P} は下式となる

$$\bar{P} = V^{-1}(\bar{K}^{(-1)}\bar{R} - E) \quad (5)$$

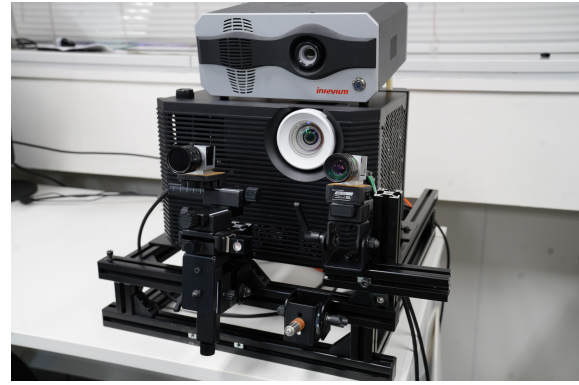


図2 開発したシステム
 Fig.2 The developed system

同補正画像 \bar{P} は、下式により深度 d の補正画像 P に変換できる。

$$P = D\bar{P} \quad (6)$$

最後に補正画像 P を、可視光プロジェクタ視点の投影画像 \hat{P} に変換して投影することで、基準深度 \bar{d} における白色照明下画像を基準としたロバストな色操作を実現する。

4 実験

4.1 実験環境

実際に構築したシステムを図2に示す。システムで用いた可視光プロジェクタ・カメラは最大 947fps でのカラー投影が可能な高速プロジェクタ [10](解像度 1024×768) と 520fps でカラー撮像が可能な高速カメラ (Basler acA720-520uc, 解像度 720×540) を用いて構築した。また、3次元計測を行う赤外プロジェクタ・カメラは最大 2840fps で 8bit 階調投影可能な高速プロジェクタ (解像度 1024×768) と 520fps で赤外域での撮像が可能な高速カメラ (Basler acA720-520um, 解像度 720×540) を用いて構築した。計算機は、CPU に Xeon Gold 6136 3.0GHz dual を、GPU に Quadro RTX 5000 を搭載したものをを用いた。

投影環境は、室内照明のない暗室にて行なった。このシステムにおいて式 (5) 中の環境光 E は、同期撮像のために投影される瞬間的な白色投影のみとなる。本システムの色操作は 500fps のスループット、10ms のレイテンシで実現した。

4.2 実験結果

今回、投影対象として新聞紙を使用した。基準深度 \bar{d} を 100cm に設定し、計測された深度 d が 130cm であった場合の色操作の実験を対象を静置して行なった。実験は、深度情報なしの式 (1) に基づく色操作結果と深度情報ありの提案手法による色操作結果と比較した。また、今回行う色操作は彩度減衰処理とする。投影結

果を図3に示す。それぞれ、(a)は白色照明下の見かけ、(b)は基準深度100cmにおける色操作結果、(c)は深度130cm・深度情報なしの色操作結果、(d)は深度130cm・深度情報ありの色操作結果である。提案手法では、色操作の結果として、今回は(b)と同等の色操作が得られることを目標としている。(b)と(c)で比較すると、(c)は全体的に暗い。これに対し、(b)と(d)で比較すると、深度が変わってもほぼ(b)と同等の彩度減衰の色操作が行えていることがわかる。以上の結果から、提案手法によって深度方向への運動に対しロバストに色操作が行えることを確認した。

続いて、赤外域における3次元計測で得た計測情報に基づき、可視光プロジェクタから対象へ色を投影する実験を行った。投影結果を投影結果を図4に示す。それぞれ、(a)は深度情報に基づく投影、(b)は法線情報に基づく投影である。まず(a)から、深度ごとに色分けされ、それぞれ異なる深度で設置された物体ごとに違う色が着色されていることがわかる。一方で(b)に注目すると、一つの物体に対しても、物体表面の法線に応じて色分けされて着色されていることがわかる。この結果から、3次元計測情報に基づいた投影が行えていることを確認した。

次に、対象を1m/sの速度で、深度方向30cmの範囲を含んだ運動を動的環境下で色操作を行なった様子を図5に示す。図から、対象の深度方向を含めた運動に合わせ、動的に色操作が行えていることが確認できた。

5 考察

まず、異なる深度に対象を精緻した場合の投影実験について述べる。図3において、深度情報が与えられなかったとき(c)のように全体的に暗い結果となった。これは補正画像の導出式(1)で用いられた反射率 K が小さかったことが起因する。前述のように深度が大きくなると、導出される反射率 K は小さくなる。その結果、目標画像 R も暗い画像となり、投影される補正画像 P もそれに伴い暗くなっていた。一方、深度情報が与えられた(d)は、深度が大きくなった場合でも、補正值 D により反射率 \bar{K} は小さくならない。これにより、目標画像 \bar{R} 及び補正画像 P は暗くならず、(b)と同等の色操作を実現した。

次に、動的環境下における投影実験について述べる。図5に注目すると、若干の投影ずれが確認できる。これは、運動による投影ずれではなく、システム配置のキャリブレーション誤差によるずれが原因で生じている。本システムでは、赤外カメラと赤外プロジェクタ、赤外カメラと可視光プロジェクタ、赤外カメラと可視光カメラ間でそれぞれステレオキャリブレーションを行なっている。しかし、それぞれの装置で画角が異なる

ことで各キャリブレーションに誤差が生じ、投影画像 \hat{P} の生成までに複数回視点変換を行うことで、キャリブレーション誤差が累積してしまっている。今後の目標として、この誤差による投影ずれの解消を目指す。

6 まとめ

可視光高速プロジェクタ・カメラを用いた既存手法を拡張し、高速な色操作に加え、よりロバストな深度方向への運動と立体物への色操作を実現した。この実現にあたり提案した手法では、高速な3次元計測を導入することで、物体までの深度、及び法線を取得した。同計測情報を投影画像の導出時に用いることで、深度方向への運動に対しても色操作を実現した。色操作と同時に進行される3次元計測は、新たに開発した赤外高速プロジェクタを組み込むことで、色操作を阻害しないシステムを実現した。また、このような3次元計測の導入により、可視光カメラと可視光プロジェクタを同軸化する必要がない。この点は、同軸化に伴って、撮像・投影の両者の輝度が損失していた問題を解消することができる。この提案手法によって、深度方向へ動的に運動する物体に対しても高速かつ、よりロバストな色操作を実現した。

参考文献

- [1] A. Grundhöfer, D. Iwai: Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications; EUROGRAPHICS 2018, vol.37, No.2, pp.653-675 (2018.5).
- [2] O. Bimber, D. Klock, T. Amano, A. Grundhofer, D. Kurz: Closed-loop feedback illumination for optical inverse tonemapping in light microscopy; IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.17(6), pp.857-870, (2011.8).
- [3] M. Nishizawa, K. Okajima: Precise Surface Color Estimation using a Non-Diagonal Reflectance Matrix on an Adaptive Projector-Camera System; IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct, 10.1109, pp.190-195, (2018.10).
- [4] A. Ryo, Y. Goshiro, A. Toshiyuki, T. Takafumi, S. Christian, K. Hirokazu: Appearance control in dynamic light environments with a projector-camera system, IEEE VR Workshop on Perceptual and Cognitive Issues in AR, pp. 1-6, (2016.3).
- [5] 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; 電子情報通信学会和文論文誌, J94-D(8), pp. 1368-1375 (2011.8).
- [6] 柳澤 昂輝, 野元 貴史, 渡辺 義浩: 高速プロジェクタ・カメラを用いた動的環境下における見かけ操作の基礎検証, 第60回複合現実感研究会, pp. 37-41, (2020.1).
- [7] K. Fujii, M. Grossberg, S. Nayar: A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments, Computer Vision and Pattern Recognition; IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.1, pp. 814-821, (2005.6).



図3 静的環境下における色操作: (a) 白色照明下の見かけ, (b) 基準深度における色操作結果, (c) 深度情報なしの色操作結果, (d) 深度情報ありの色操作結果
Fig.3 Color manipulation in static environment: (a) Uncorrected image, (b) Color manipulation result at reference depth, (c) Color manipulation result without depth information, (d) Color manipulation result with depth information

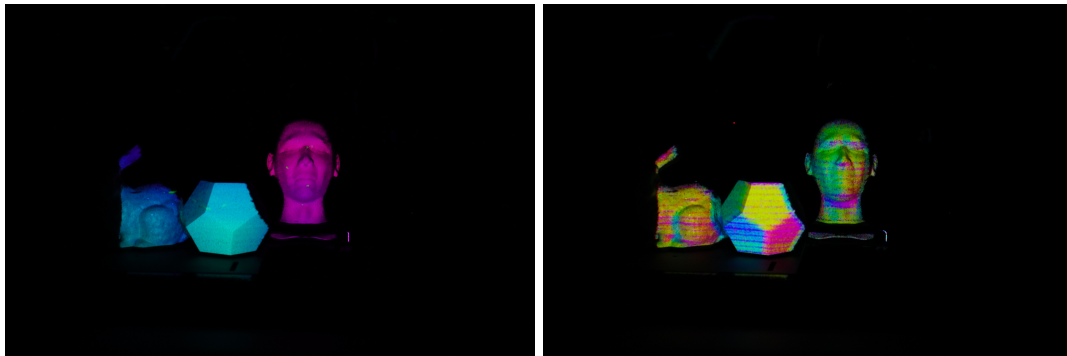


図4 3次元計測情報に基づく投影実験: (a) 深度情報に基づく投影, (b) 法線情報に基づく投影
Fig.4 Projection experiment based on 3D measurement information: (a) Projection based on depth information, (b) Projection based on normal information

- [8] 野元 貴史, 田畑 智志, 渡辺 義浩: 偏光アレイカメラを用いた構造化光法による深度・法線の高速取得, 第26回画像センシングシンポジウム, IS3-19, (2020.6).
- [9] 久一 空, 野元 貴史, 田畑 智志, 渡辺 義浩: マルチパターン埋め込み型位相シフト法に基づく高速3次元計測の開発, 第26回画像センシングシンポジウム, IS3-35, (2020.6)
- [10] Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: High-Speed and High-Brightness Color Single-Chip DLP Projector Using High-Power LED-Based Light Sources; The International Display Workshops, (2019.11)



図 5 動的環境下における色操作
Fig. 5 Color manipulation in a dynamic environment