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

柳澤昂輝[*1]　　野元貴史[*1]　　渡辺義浩[*1]

Abstract – 本稿では, 高速なプロジェクタ・カメラを用いて, 動的に変化する環境に対し, 見かけを操作する手法を提案する. 本手法では, 見かけ操作のために投影する補正画像に, 瞬間的な白色投影を埋め込む. 同投影像を同期した高速カメラで撮像することで, 推定を介さずに白色照明下での観測像を直接取得できる. また, 補正画像の投影を高フレームレートで行うことで, 動的環境下においても位置ずれなく見かけ操作を実現することができる. 実験では, 運動する対象に対し, 同対象の表面のテクスチャの彩度を強調または減衰できるかを確認した.

Keywords : プロジェクタ・カメラ, 高速プロジェクタ, 見かけ操作, 動的環境

1　はじめに

近年, プロジェクタ・カメラによって実世界を拡張する様々な応用が提案されている [1]〜[5]. 本稿では, その中でも投影によって現実物体に対して見かけ操作を行うシステムに着目する. 見かけ操作とは, プロジェクタ・カメラを用いて, 補正光の投影を行い, 現実物体の色を変化させる技術を呼ぶ.

投影を用いた見かけ操作は, 主に 2 種類のシステムに分けられる. 第 1 のシステムは, 劣悪な投影環境下であっても, 均一な反射率を持つスクリーンに対する投影と同等な品質の実現を目的としている [6][7]. 同システムでは, カメラから壁面などの現実物体の反射率を取得し, 提示したい映像とともに, 不均一な反射率を打ち消すように補正光を投影することで実現する. 第 2 のシステムでは, 対象に適切な補正光を投影することで, 同対象そのものの見かけを変化させることを目的としている [8]〜[11]. 同システムでは, まずカメラから対象の反射率を取得する. 次に, 得られた反射率から対象の彩度の強調や減衰を行う補正光を投影する. 本稿では後者のシステムについて論ずる.

既存システムは, 対象が運動する動的環境下での見かけ操作を実現したが, 像の取得から補正光の投影を行うまでに大きな遅延があった. 遅延が大きい場合, 物体の運動時に, 補正光と同対象の投影位置の対応にずれが生じ, 観測者に違和感を与える問題があった. また, 補正光を生成するためには, 同対象の白色照明下における反射率が必要となる. これを既存システムでは, 補正光が投影された見かけを入力とし, 計算による推定から得ていた. 同推定には, 投影を行う基準位置で白色基準物体によるキャリブレーションが必要であった. しかし, このような推定による白色照明下の反射率取得は, 基準位置に対して深度方向に変化があるシーンにおいて, 精度が低下する問題があった.

そこで, 本稿では動的環境下において, 高速に見かけ操作を実現する手法を提案する. 本手法は, 約 1000fps で投影可能な高速プロジェクタと高速カメラを用いることで, システムの高速化を実現する. また, 同手法では白色照明下の反射率を従来の推定を介する取得は行わない. 同高速プロジェクタが独自の機能として備える瞬間的な白色投影を利用し, これを補正光の投影パターンに埋め込んで同期撮像を行うことで直接反射率を取得する. 実験の結果, 提案手法によって, 動的に運動する物体に対して見かけ操作が実現できることを確認した.

2　関連研究

プロジェクタ・カメラを用いて対象の見かけ操作を行う研究はこれまでも多数行われてきた. Nayar らは, 投影対象表面の不均一な反射率をあらかじめ取得し, 同対象表面のテクスチャを打ち消すように補正光を投影した. これにより, テクスチャによる品質低下を抑えた投影を実現した [6]. また, Fujii らはプロジェクタ・カメラの光軸が一致した同軸のシステムを構築し, 動的環境へ対応するモデルを提案した [7]. ただし, これらの手法は, 物体の持つ見かけを除去し, 投影環境に左右されない高品質な投影を行うことを目的としている.

これに対し, Bimber らは, プロジェクタ・カメラを用いて投影対象のコントラストや彩度を操作する手法を提案した [8][9]. しかし, 同手法はあらかじめ同対象の見かけを取得する必要があり, 物体の運動に対応していない. これに対し, Amano らは, プロジェクタ・

[*1]東京工業大学

カメラを用いて運動物体の見かけ操作を動的に実現する手法を提案した [10][11]．しかし，システムの速度は 14fps 程度で遅いことから，対象が運動したとき，投影対象と補正光間で投影位置の対応にずれが生じる問題があった．また，補正光を生成するためには，対象の白色照明下の見かけが必要となる．しかし，システムの特性上，対象は補正光によって常に操作された見かけとなっているため，白色照明下の見かけは直接得ることはできない．このため，同手法では推定によって同見かけを得ていた．ただし，従来の推定による手法では，高精度な反射率の取得は難しかった．反射率の推定に誤差が生じると，見かけ操作を行う正確な補正光の導出が行えない．この推定精度問題を解決するための手法が Nishizawa らによって提案された [12]．ただし，同手法では，投影を行う基準位置で白色基準物体によるキャリブレーションが必要となる．このため，立体物体への投影や深度方向への運動が起こると，正確な反射率を推定できなかった．これに対し，本稿では推定を介さない，高精度な白色照明下見かけの取得方法を提案する．

3　動的環境下の見かけ操作

3.1　システム概要

本稿では，高速なプロジェクタ・カメラを用いて動的環境下での高速な見かけ操作を実現する．図 1 に，システム構成を示す．同図のように，本システムは，高速プロジェクタ，高速カメラ，ビームスプリッタから構成される．また，ビームスプリッタはプロジェクタとカメラの光軸が一致するように配置する．なお，本システムのプロジェクタ・カメラ間の応答特性はあらかじめキャリブレーションされていることを前提とする．

また，図 2 に手法の概要を示す．本手法では，瞬間的な白色光を補正画像に埋め込み，同期撮像を行うことで対象の反射率を直接取得する．この撮像画像を白色照明下画像と呼ぶ．まず，対象の白色照明下画像 C_{cap} を撮像するため，補正画像に，見かけ操作に影響を与えない程度の瞬間的な白色投影を埋め込む．同手法は今回利用した，高速プロジェクタであれば実装可能である．撮像はプロジェクタとカメラ間で同期をとり，白色光の投影タイミングで行う．その後，撮像で得た白色照明下画像 C_{cap} を元に，対象の実現したい見かけとなる目標画像 R を生成する．

次に，白色照明下画像 C_{cap}，目標画像 R，環境光 E から補正画像 P を生成する．さらに，補正画像に瞬間的な白色光 W を埋め込む．続いて，対象と補正画像 P の投影位置が対応するように幾何変換を行う．最後に変換した画像をプロジェクタに転送し，投影することで見かけ操作を完了する．

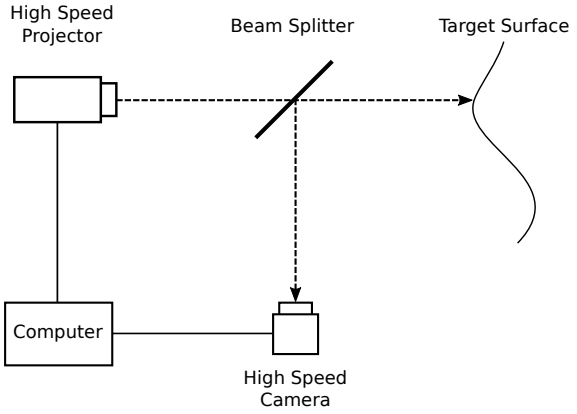

図 1　システム構成
Fig. 1　System configuration

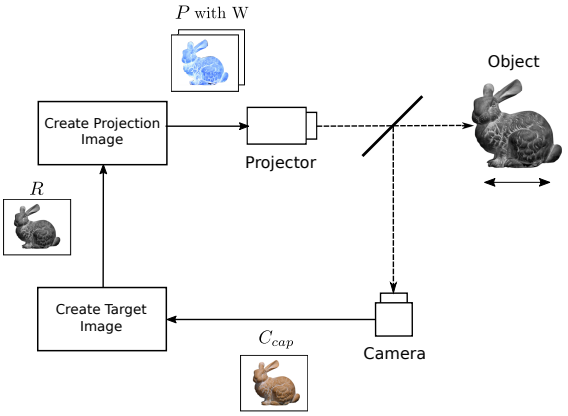

図 2　手法概要
Fig. 2　Overview of the method

3.2　白色照明下画像 C_{cap} の同期撮像

白色照明下画像 C_{cap} の同期撮像方法について述べる．本稿で用いる 高速プロジェクタは各色光源が単板 DMD に対して，R, G, B, そして RGB 同時点灯の順で投影を行うことができる [14]．補正，及び白色投影と撮像を行うタイミングチャートを図 3 に示す．本手法ではまず，R, G, 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．次に補正光投影後，RGB 同時点灯を瞬間的に行い，白色光の投影を行う．これにより，対象の補正と白色投影を両立する．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，白色投影を瞬間的に行いつつ，高フレームレートな補正光の投影が可能となる．

通常のプロジェクタで同手法を実装した場合，投影レートが遅いことや，補正投影と同フレーム内に白色投影を埋め込めないことから，白色投影時間が長くなる．この場合，操作された見かけのコントラストが低下してしまうため，同対象の見かけは，目標通りの見かけにならない．

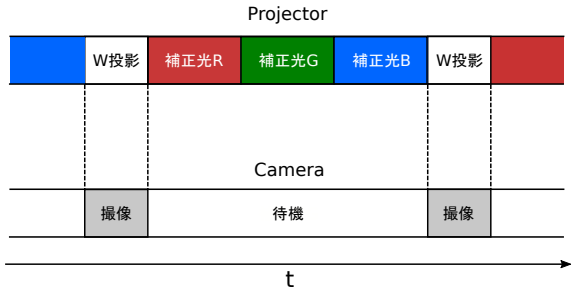

図 3　同期撮像のタイミングチャート
Fig. 3　Timing chart for synchronized imaging

本手法と高速プロジェクタを用いることによって, 白色照明下画像を直接入手することができるため, 従来手法で行なっていた推定が不要となる．その結果, 推定精度の問題が解消されるとともに, 非平面物体や深度方向への運動にもシステムを適用できるようになる．ただし, 撮像のために埋め込む白色投影は見かけ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．

3.3　目標画像 R の生成

目標画像 R の生成方法について述べる．まず, 彩度減衰を例に, 目標画像 R の生成手法を述べる．彩度減衰は対象の見かけをモノクロのように変換する操作である．この場合, 目標画像 R は下式によって生成される．

$$R = \begin{pmatrix} R_R \\ R_G \\ R_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \min(C_R, C_G, C_B) \\ \min(C_R, C_G, C_B) \\ \min(C_R, C_G, C_B) \end{pmatrix} \tag{1}$$

式 (1) において, R_R, R_G, R_B 及び, C_R, C_G, C_B はそれぞれ目標画像 R と白色照明下画像 C_{cap} の各 RGB チャンネルを示す．

次に彩度強調した目標画像 R の生成方法について述べる．同画像は白色照明下画像 C_{cap} から, 式 (2) を使って生成する．

$$R = \begin{pmatrix} R_R \\ R_G \\ R_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1+s)C_R - sC_m \\ (1+s)C_G - sC_m \\ (1+s)C_B - sC_m \end{pmatrix} \tag{2}$$

ここで, s は彩度を強調するパラメータである．$s = 0$ の時, 強調なし, $s > 0$ で彩度の強調を行う．C_m は白色照明下画像をモノクロ化した画像である．

3.4　補正光 P の導出

本手法で用いるモデルについて述べ, 目標の見かけを達成するための補正光導出までの手順を示す．モデルは Fujii ら [7] によって提案されたものに基づいている．カメラの観測輝度 $C = (C_R, C_G, C_B)^T$ が得られたとき, 式 (3) の関係が成り立つ．

$$C = K(VP + E) \tag{3}$$

ここで P はプロジェクタから投影される画像, K は投影対象の反射率 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．

本稿では Fujii によって提案された式 (3) を拡張し, 目標の見かけを実現する補正画像 P を導出する．従来手法では, 補正光が投影された見かけから反射率 K を導出する必要があった．従来の導出式を式 (4) に示す [11].

$$K = \frac{C_{est}}{C_{White}} \tag{4}$$

ここで, C_{est} は白色照明下推定画像, C_{white} は白色投影画像を表す．一方, 本システムで用いる高速プロジェクタは前節で示した手法により, 瞬間的な白色投影を補正画像に埋め込むことができる．これにより, プロジェクタの白色投影のタイミングで, 白色照明下画像 C_{cap} をカメラで同期撮像できる．式 (4) 参考に, 撮像した C_{cap} から 時刻 t における反射率 $K(t)$ の導出を式 (5) に示す．

$$K(t) = \frac{C_{cap}}{W} \tag{5}$$

C_{cap}, W はそれぞれ白色照明下画像, 埋め込まれた白色照明下の白色画像を表す．最後に前節で導出した目標画像 R と各パラメータから, 補正画像 P の導出を式 (6) に示す．

$$P(t) = V^{-1}((K(t))^{-1}R(t) - E) \tag{6}$$

ここで提案手法において V, E はあらかじめキャリブレーションを行なって取得する．以上の方法で目標の見かけを得る補正画像 P を生成する．

4　実験

4.1　実験環境

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 [14](解像度 1024×768) と最大解像度のとき 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, 演算, 及び画像処理を行う計算機は, CPU に Xeon Gold 6136 3.0GHz dual を, GPU に Quadro P400 を搭載したものを用いた．システムはプロジェクタ・カメラ間で 500fps のスループットで撮像と投影の同期をとった．

本システムは高速な見かけ操作実現のため, 撮像, 画像処理, 幾何学変換, 投影のそれぞれを計算機上で処理を行う．実験において, 埋め込んだ白色の投影時間

図 4　見かけの彩度減衰操作: (a) 白色照明下画像 C_{cap}, (b) 目標画像 R, (c) 補正画像 P, (d) 補正結果, (e) 補正なし

Fig. 4　Apparent saturation decay operation: (a)White-lighted image C_{cap}, (b)Target image R, (c)Corrected image P, (d)Correction result, (e)No correction

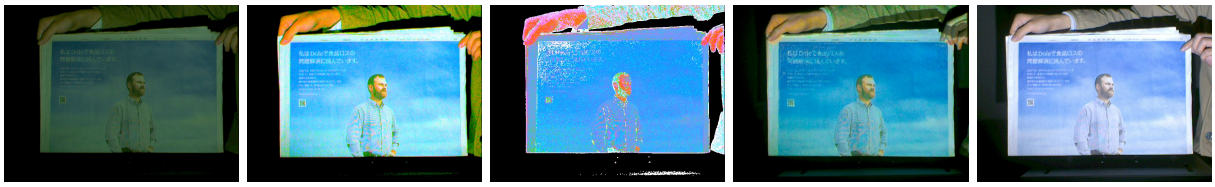

図 5　見かけの彩度強調操作: (a) 白色照明下画像 C_{cap}, (b) 目標画像 R, (c) 補正画像 P, (d) 補正結果, (e) 補正なし

Fig. 5　Apparent saturation enhancement operation: (a)White-lighted image C_{cap}, (b)Target image R, (c)Corrected image P, (d)Correction result, (e)No correction

は 100us とした．同時間は, カメラの撮像画像と補正画像のコントラストの両者のバランスを検証し, 実験的に決定した．また, 本システムの想定する環境光 E は室内照明のない環境での投影を想定しているため, 埋め込みを行なった白色光のみがこの環境光 E に当たる．カメラ座標系での補正画像をプロジェクタ座標系に変換するための射影変換は, あらかじめ取得した．

4.2　実験結果

見かけ操作の対象に, 新聞紙を用いた．同対象に対し, 見かけの彩度減衰を適用した結果を図 4 に, 彩度強調を目標とした結果を図 5 に示す．それぞれ, (a) は白色照明下画像, (b) は目標画像 R, (c) は補正画像 P, (d) は補正結果を示す．また比較のため, 補正を行わないときの見かけ画像 (e) に示す．また, (d), (e) は露光時間を 2ms として撮像し, (e) の照明は, プロジェクタから 2ms の投影時間で白色光を投影したときの結果である．(a) について, 撮像結果が暗くなってしまっているが, これは前述の通り, 撮像に必要な最低限の白色投影を行なっているためである．

まず, 彩度減衰操作の結果について, 図 4(d) と (e) から比較して行う．人物やその背景の空に注目すると, 肌色や背景の青色が, 補正により打ち消された見かけになっていることが確認できる．次に, 彩度強調操作の確認のため, 図 5(d) と (e) を比較する．特に, 人物の肌に注目すると, 補正前と比べ, 肌特有の赤みが強調されていることが確認できる．以上の結果から, 彩度の減衰, 強調を目標とする見かけ操作を, 提案手法によって得られることを確認した．

次に, 対象を移動させたときの様子を図 6 に示す．図から, 対象の移動に合わせ, 動的に補正が行えていることが確認できる．本システムの見かけ操作は約 500fps の投影レートで補正を実現した．

5　考察

コントラスト低下の原因は白色照明下画像撮像用の白色投影によるものである．前述の通り, 撮像のためには白色投影が必要となる．白色投影を行うと, 瞬間的な投影であっても, 埋め込みを行わなかった場合と比べ, コントラストが低下してしまう．コントラスト低下問題に対する解決案としては, 白色投影の埋め込みを行う補正画像を減らすことが挙げられる．つまり, 補正画像に対し, 毎フレーム白色投影を埋め込むのではなく, 一定の周期で埋め込む．この方法は単純なアプローチだが, 補正光投影レートは変わらない．一方で, 白色投影を毎フレーム行わない分, 得られる白色照明下画像は減る．結果として, 投影する補正光の更新頻度は現行システムよりも低くなるため, 移動などによる環境変化に弱くなる．

赤外光源のみでカラー撮像を可能にする RGB-IR カメラが新たに注目を集めている [15][16]．システムでは見かけ操作のための補正光の投影がプロジェクタから常に行われている．従って, 単純に撮像を行うだけでは 白色照明下の見かけを得ることが難しかった．一方, プロジェクタから投影される光は可視光である．こ

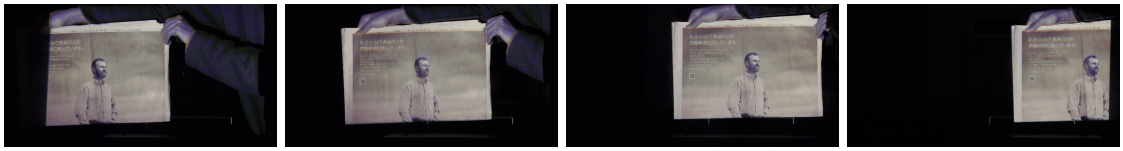

図 6　動的環境下における見かけ操作
Fig. 6　Apparent operation in dynamic environment

の RGB-IR カメラをシステムに導入することで, 赤外光源さえあれば, 補正光を考慮することなく白色照明下画像の取得することが可能となる. RGB-IR カメラによる白色照明下画像の撮像が可能となれば, 白色投影の埋め込みに伴うコントラストの低下問題の解消に期待される.

6　まとめ

高速なプロジェクタ・カメラを用いて, 動的に変化する環境に対し, 見かけを操作する手法を提案した. 提案手法では高速プロジェクタから補正画像投影時に白色投影の埋め込みを行う. 高速カメラと同期を行い, 適切なタイミングで撮像することで推定することなく直接, 白色照明下画像が入手することができる. この画像を元に補正画像を生成し, 動的環境下における見かけ操作を実現した.

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] Hirotaka Asayama, Daisuke Iwai, Kosuke Sato: Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.24, No.2, pp. 1091-1102, (2018.2).

[3] M.D. Grossberg, H. Peri, S.K. Nayar, P.N. Belhumeur: Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system; CVPR, pp.452–459 (2004.7).

[4] O. Bimber, A. Emmerling, T. Klemmer: Embedded entertainment with smart projectors; Computer, IEEE (2005.1)

[5] 佐藤 美恵, 千本 万紀子, 橋本 直己, 春日正男:壁面への映像提示を目 的とした輝度補正の検討, 映情学誌, 63(6), pp. 810–815 (2009.6)

[6] S. Nayar, H. Peri, M. Grossberg, P. Belhumeur: A projection system with radiometric compensation for screen imperfections; IEEE International Workshop on Projector-CameraSystems, (2003.11).

[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).

[8] O. Bimber, T. Amano, A. Grundhofer, D. Kurz, D. Klock, S. Thiele, F. Hantch: Projected light microscopy; SIGGRAPH 2009 Talks, no.69, (2009.8).

[9] 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).

[10] 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).

[11] 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).

[12] 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).

[13] Y. Watanabe, G. Narita, S. Tatsuno, T. Yuasa, K. Sumino, M. Ishikawa: High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay; The International Display Workshops, pp.1064-1065, (2015.12).

[14] 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)

[15] B.K. Park, S.W. Han, W. Choe, J. Lim, Y. Yoo and S. Lee: Low Light Imaging System with Expanding Spectrum Band for Digital Camera, IEEE Conference on Consumer Electronics, pp.35-36, (2012.1)

[16] H. Teranaka, Y. Monno, M, Tanaka, M. Okutomi: Single-Sensor RGB and NIR Image Acquisition: Toward Optimal Performance by Taking Account of CFA Pattern, Demosaiking and Color Correction, 2016 Society for Imaging Science and Technology, Electronic Imaging, Digital Photography and Mobile Imaging XII, pp.1-6, (2016.2)

ⓒ, 2020 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)