



投影の隠蔽が生じない複数物体への適応的な見かけの操作

永田 剛大^{*1}天野 敏之^{*1}

Abstract – プロジェクタとカメラを用いた制御系により見かけを操作する「見かけの制御」が提案されているが、シーン中の物体ごとに適応的な操作を行う方法は検討されていない。

本研究では、2対のプロジェクタ・カメラ系にレンジセンサを導入することで、物体毎に個別の操作を試みる。提案手法では、この操作のために多層のピクセルマップと距離情報を用いた動的な幾何学校正を提案する。また、前景物体により生じる、投影の隠蔽や明度差を動的に補償する方法も提案する。

Keywords : プロジェクタカメラ, 動的環境, 幾何学校正, 見かけ操作, 深度計測

1 はじめに

近年、プロジェクタとカメラを組み合わせた投影システムによって現実世界を拡張する様々な手法が提案されている [1].

その中で Amano らはプロジェクタとカメラで構成されるフィードバック系によって、適応的にみかけの色彩を変化させる「見かけの制御」を提案している [2]. この見かけの制御は、フィードバック処理の過程で投影画像と撮影画像の光学的な応答から反射率が推定している。これにより、見かけの制御では、白色照明下の物体の見かけを基準とした所望の画像処理を現実のシーンに適応する動的な光学補償を実現した。また、プロジェクタとカメラの光軸を一致させた、同軸の光学系に実装することで、立体物に対する動的な質感操作も実現している [4]. ただし、これらの見かけの制御では、撮影画像に対して画一的な処理を行っており、物体毎に異なる操作を行う処理については検討されてこなかった。

応用シーンが想定されている場合には、物体認識や領域分割を用いることで物体ごとの個別の処理を実装することができるが、本研究では、より汎用的な方法として、奥行き手がかりを用いたレイヤーごとの見かけの制御を提案している [3]. この手法では、背景の前に物体が配置されているシーンを想定し、2対のプロジェクタカメラ系から算出される視差を手がかりとすることで、背景とその前に配置された物体に対して異なる色彩操作を実現した。また、この手法では、投影の視差を利用することで、物体によって背景に生じる影の補償も実現した。

しかし、この手法ではあらかじめ幾何学校正を行っており、背景および物体の移動には対応できない問題がある。そこで、本稿では既存手法 [3] を拡張し、2

対のプロジェクタカメラシステムにおいて事前取得した幾何学校正にリアルタイムな幾何学計測を組み合わせることで、動的環境下における物体毎の見かけを操作する手法を提案する。具体的には深度カメラによるリアルタイムな3次元計測を導入することで、物体の位置座標の変化を計測し、計測結果をプロジェクタカメラの画素対応の生成に用いることで、動いた物体の位置を正しく認識し、物体毎に独立した投影を行うことを実現する。

2 提案手法

2.1 深度カメラと2対のプロジェクタカメラ系

図1に示すように、背景 (background) の前に移動する物体 (foreground) が配置されているシーンを想定する。このシーンの移動物体と背景の両方に投影の隠蔽が生じない独立した見かけの制御を行うために、2対のプロジェクタ (Prj1, Prj2) とカメラ (Cam1, Cam2) を配置する。また、それぞれのカメラとプロジェクタで独立したフィードバック系を構築する (図2)。ただし、このような同軸でない光学系で移動物体に対して見かけの制御を行うためには、カメラとプロジェクタの画素対応を表すピクセルマップを適宜更新する必要がある。このため、カメラとプロジェクタに加えてRGB-Dカメラも導入する。

本研究では、以降の2.2にて説明する手法で動的な幾何学校正により、各プロジェクタカメラ系およびお互いのカメラとプロジェクタの画素対応を表すピクセルマップを生成する。その後、2.3, 2.4にて説明する方法で、ピクセルマップから領域を推定し、投影の重畳を考慮した反射率推定を行うことで投影の重畳を考慮した協調投影を実現する。

2.2 動的な幾何学校正

プロジェクタカメラ系から物体までの距離が変わると、プロジェクタとカメラの画素対応が変化し、フィー

^{*1}和歌山大学

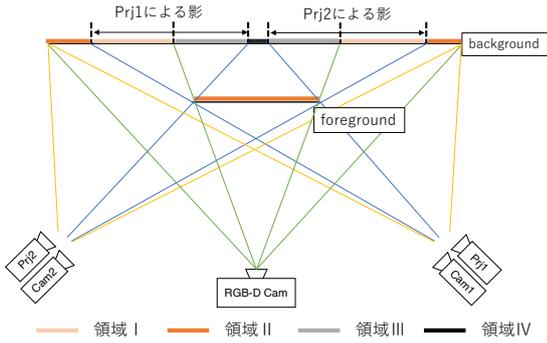


図 1: 物体による投影領域の違い

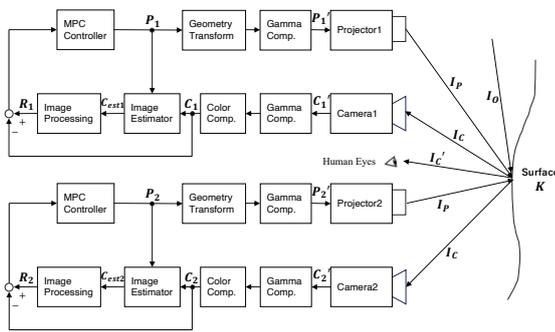


図 2: 提案手法のブロック線図

ドバックが破綻する。そのため、物体の位置に応じて画素対応を更新する必要がある。このとき画素の対応にエピポーラ拘束が仮定できる場合には、深度カメラの Z と Prj と Cam の射影行列から計算することもできるが、レンズ歪などを考慮すると精度の高い対応付は困難である。

そこで、すべての奥行きに対するピクセルマップを表したポリューメトリックピクセルマップを用い、RGB-D の深度値から C の画素ごとにポリューメトリックピクセルマップをサンプリングすることで、ピクセルマップを動的に生成する。ただし、深度カメラの距離分解能のピッチでピクセルマップを計測することは現実的ではない。そこで、本研究では視点毎のポリューメトリックピクセルマップとリアルタイムな深度情報をもとに問題の解決を図る。

ポリューメトリックピクセルマップとは深度値に対するピクセルマップを保持したボリュームデータである。このポリューメトリックピクセルマップは深度カメラの深度方向を Z 軸とし、すべての Z について Z 軸と直交する平面でピクセルマップを取得するという手順で取得できる (図 3)。ポリューメトリックピクセルマップは各画素において 3 次元空間内での画素対応を保持しているため、深度に基づいて画素ごとに層を選択することで動的に深度情報と合致したピクセルマッ

プを生成することができる。

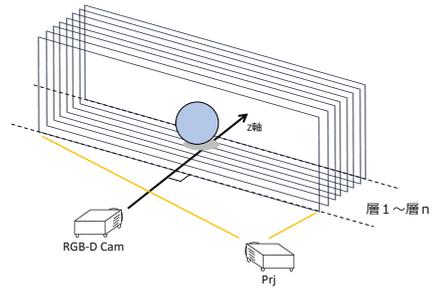


図 3: ポリューメトリックピクセルマップ

具体的には、図 4 に示す処理を行う。層 n における RGB-D Cam 視点の Prj1 とのピクセルマップを $C_2 P_1^{L_n}$ 、Cam1 視点を $C_1 P_1^{L_n}$ 、動的に生成されるピクセルマップを $C_1 P_1$ とする。そして、図 5 に示すように深度からラベル画像を生成し、ラベルに基づいたマスク $M_{C_1}^{L_n}$ からマスク画像 $M_{C_1}^{L_n} C_2 P_1^{L_n}$ が生成できる。このマスク画像を RGB-D Cam と Cam1 間で変換し、変換した層 1 ~ 層 n のマスク画像から

$$C_1 P_1 = M_{C_1}^{L_1} C_2 P_1^{L_1} \cup \dots \cup M_{C_1}^{L_n} C_2 P_1^{L_n} \quad (1)$$

とすることで動的にピクセルマップを生成し、プロジェクトカメラ間の校正結果を修正する。

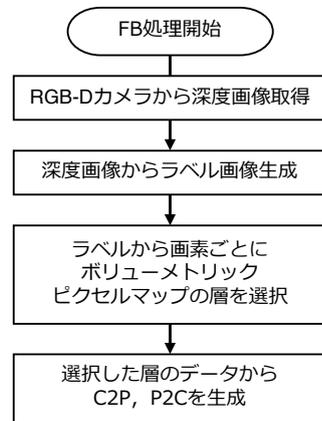


図 4: ピクセルマップ生成のフロー図

2.3 領域の判定

図 4 に示すように、領域 I は RGB-D カメラによってリアルタイムな深度計測が可能だが物体によって片方のプロジェクタの投影が遮られる。物体による隠蔽が生じない領域 II には投影強度を調整した明度差の生じない投影を行う必要がある。

プロジェクタによる投影が可能だが深度カメラによる計測が出来ない領域 III と投影も計測も出来ない領域 IV はリアルタイムな深度計測が出来ない領域であ

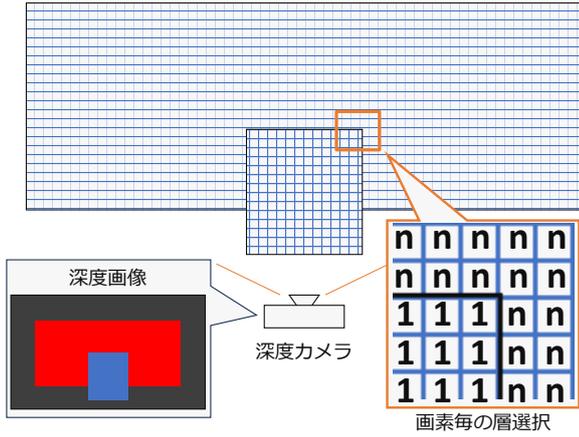


図 5: 層 1~層 n のボリユーメトリックピクセルマップから計測深度によって層判別。

物体の移動によって領域 I と領域 II は変化するが、前節で述べたようにボリユーメトリックピクセルマップとリアルタイムな深度計測によって幾何学情報は既知であるためこれを活用した判定を行う。具体的には、事前にプロジェクタ (Prj1, Prj2) 間のボリユーメトリックピクセルマップ $P_1P_2^{L_n}$ を取得し、深度計測によって P_1P_2 を生成する。ここで生成されたピクセルマップと領域 II は同値であり、領域 II の抑制を行う。

2.4 領域ごとの反射率の推定

領域によってプロジェクタの投影台数が変化するため、領域ごとに異なる反射率推定を行う必要がある。領域 I は 1 台のプロジェクタによる投影のため、撮影画像 C_i と投影画像 P_i から

$$K = C_i / (MP_i + C_0) \quad (2)$$

によって反射率 K を推定する。ここで、 C_0 は環境照明下における撮影画像、 M は 3×3 の行列でカメラとプロジェクタ間のカラーマッチングである。領域 II は 2 台のプロジェクタによる投影のため、

$$K = C_i / (M(P_1 + P_2) + C_0) \quad (3)$$

によって反射率 K を推定する。本研究では簡単のため、Prj1, Prj2 の投影強度を 1:1 で考え、 P を 2 倍とした

$$K = C_i / (2MP_i + C_0) \quad (4)$$

によって反射率 K を推定し、投影を行う。

3 実験

3.1 実験環境

実際に構築したシステムを図 6 に示す。プロジェクタ (解像度 1920×1080) とカメラ (解像度 1920×1400)

を組み合わせた Unit1 (Cam1, Prj1), Unit2 (Cam2, Prj2) を対にして配置し、中央に深度カメラ (Realsense D455) を配置した。ボリユーメトリックピクセルマップはランバート反射と見做すスチレンボードを深度カメラの撮影方向と垂直になるように配置して取得した。このときの層の間隔は 0.9cm とし、奥行き 18cm, 計 20 層取得した。そして、投影対象には提案手法の有効性を示すためランバート反射を主成分とした平面的な物体を用いた。投影環境は室内照明を消した暗室状態でいった。

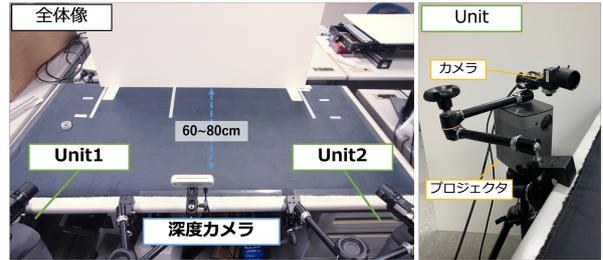


図 6: 実際のシステム構成

3.2 動的な幾何学校正結果

深度計測とボリユーメトリックピクセルマップによって生成された幾何学校正結果を図 7 に示す。撮影画像が図 7(a)(b) の時、図 7(c)(d) から深度によって画素ごとに層を選択していることがわかる。ここで選択した層をラベルとして、ボリユーメトリックピクセルマップから生成したピクセルマップが図 7(e)(f) である。深度情報が取得できる領域 I と領域 II には画素対応が格納されており、深度情報が取得できない領域 III と領域 IV は画素対応が欠落していることがわかる。

その後、ボリユーメトリックピクセルマップと生成したピクセルマップ (図 7(e)(f)) から領域の判定を行った。領域 I の判定結果を強調した画像が図 7(g)(h) であり、領域 I と移動物体による影が重なっていることがわかる。

3.3 適応的な見かけの操作結果

図 7 に示すような幾何学校正結果を用いて、背景にはモノクロ化処理、移動物体である平板と立方体と円柱それぞれに対しては色相シフトの見かけ操作を行った結果を図 8 に示す。図 8(a) は白色投影下での見かけ、図 8(b) は見かけ操作を (a) に適用した結果、図 8(c) は物体移動後の操作結果である。(b) と (c) を比較すると物体の移動に伴い幾何学校正を更新し、適応的な見かけ操作を行なっていることがわかる。また、領域 I と領域 II の判定結果から領域 II の投影を抑制することで、背景の輝度差に改善がみられた。そして、キャストシャドウによって深度計測や投影が行えない領域 III と領域 IV は制御が行えていないことがわかる。

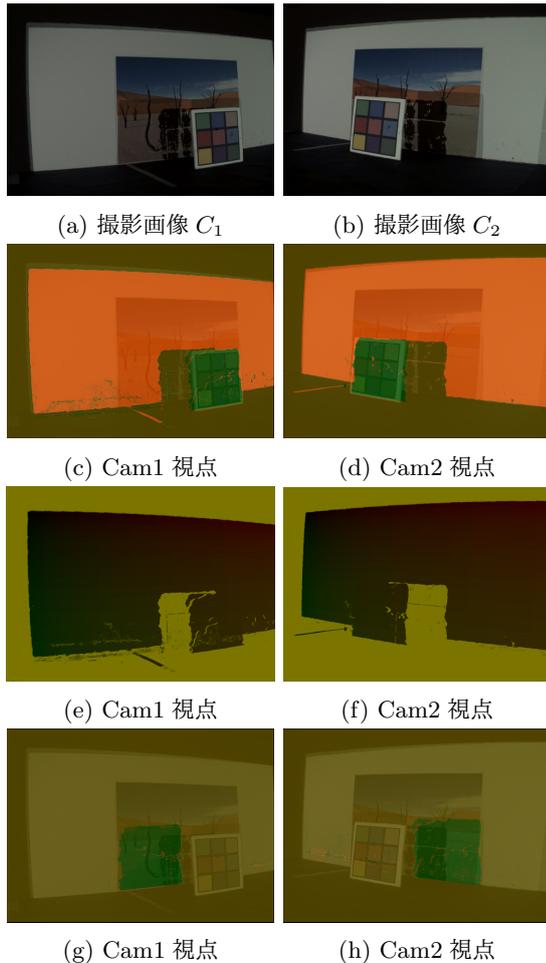


図7: (a)(b) 白色投影時の撮影画像. (c)(d) 深度によって層選択したラベル画像. 緑が層1, 橙が層20. (e)(f) ボリュームデータから生成したピクセルマップ. (g)(h) 領域の判定. 緑が領域I.

4 考察

4.1 結果に関する考察

まず, 生成されたピクセルマップについて述べる. 図8の制御結果より, 投影にノイズが混ざることが確認された. これは図7(e)(f)に示されるピクセルマップのノイズが原因である. ここで生成されるピクセルマップの質は深度情報に依存するため, より高精細な深度計測を行うことにより解消できると考えられる.

次に, 動的環境下での見かけの制御結果について述べる. 図8(b)(c)の操作結果では領域Iと領域IIにおける輝度差による影を完全に取り除くことができなかった. 原因としてポリューメトリックピクセルマップの層の間隔の広さと深度計測の正確さ, そして2台のプロジェクトの投影強度の違いが考えられる. 図7(c)(d)の領域の境界に注目すると, 撮影画像とラベルに誤差があることがわかる. この誤差はポリューメトリックピクセルマップの層の間隔をあけて取得していること

によって生じている. この誤差の影響が領域判定に現れることで, 領域Iを正確に求めることができず, 影を除去できない. そのため, ポリューメトリックピクセルマップの層を1画素単位の間隔で取得することで改善すると考えられる.

また, 本研究では簡単のため, Prj1, Prj2の投影強度を1:1で考え, P を2倍とした反射率推定を行ったが, 実際は投影距離や投影角度がプロジェクタごとに異なるため, 1:1の投影強度ではなく, それぞれの投影の影響度合いを考慮した反射率推定を行う必要がある. これには Uesaka らの提案した手法 [5] が利用できると思われる.

最後に, 円柱への投影結果について述べる. 円柱のような曲面に投影を行った結果, 画素対応の欠落 (黒い縦線) がみられた (図83行目). これはある画素の深度が層と層の間になる場合, 深度を近似して層を選択しているために生じる欠落である. ポリューメトリックピクセルマップの層の間隔が原因であるため, 前述した1画素単位のポリューメトリックピクセルマップを取得することで解消できると考えられる.

4.2 深度情報の活用に関する考察

投影対象の深度情報と見かけの制御パラメータを結びつけることで, より幅広い演出を行うことができると考えられている. 例えば, 深度が深くなるにつれて見かけの操作強度を強くすることで, 浅い深度では現実の見かけ, 深い深度では現実を拡張した見かけといった空間を作り出すといった投影が考えられる. また, 高精細な深度情報を利用することで, 物体の法線方向に合わせた投影なども検討されている [6]. このような深度情報の活用が考えられるため, 今後は深度情報に基づいた見かけ操作演出にも取り組む.

5 まとめ

本研究では, 2対のプロジェクタカメラユニットによる既存手法の問題点に着目し, リアルタイムな深度計測を組み合わせることで, 物体毎に適応的な見かけの操作を行う手法を提案した. 具体的には深度計測結果とポリューメトリックなピクセルマップを組み合わせることで, 動的に幾何学校正を行った. その結果, 移動した物体に対して校正結果を更新し, 見かけ操作が行えることを確認した.

しかし, 深度計測の質が低いため, 投影にノイズが残った. また, プロジェクタカメラユニット間の投影強度を1:1で考えたため, 投影による明度差が残った.

今後は投影の輝度差除去の改善と深度情報の見かけ演出への応用について取り組む.

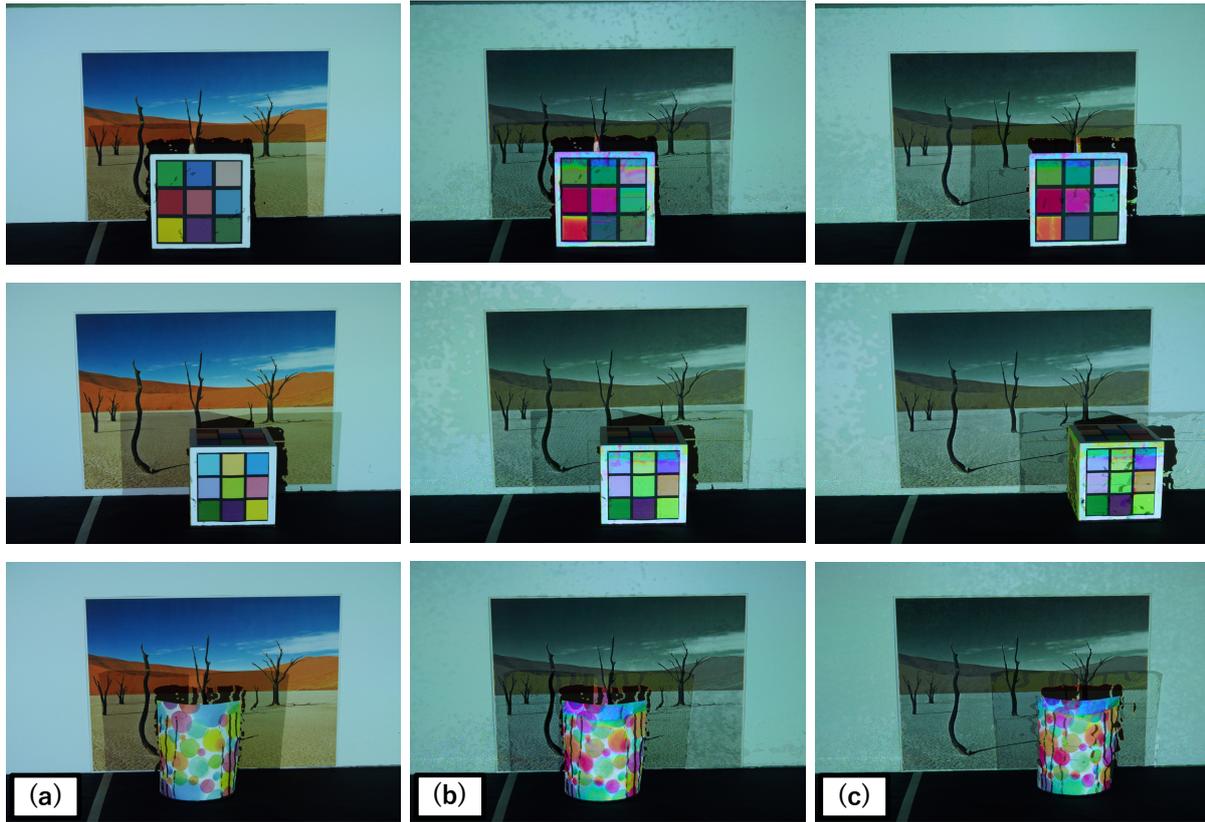


図 8: 動的環境下における見かけの制御結果. それぞれ動的物体/背景には色相シフト/モノクロ処理を適用した.
(a) 白色投影 (b) 移動前の操作結果 (c) 移動後の操作結果.

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, (2018.05).
- [2] 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, (2011.08).
- [3] T. Nagata, T. Amano: Object-wise Individual Appearance Manipulation with Layer Detection; Proceedings of the 15th Asia-Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality, (2023.08).
- [4] 天野 敏之: プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作; 映像情報メディア学会誌, Vol68 pp.J528-J533, (2014.01).
- [5] S. Uesaka, T. Amano: Cast-Shadow Removal for Cooperative Adaptive Appearance Manipulation; ICAT-EGVE 2022 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments, (2022.11).
- [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; 第62回複合現実感研究会, Vol24, No.1, (2021.01).

© 2024 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)