



五つのプロジェクタカメラ系を用いた 対象物体の全周囲に対する見かけの操作

山本奨騎¹⁾, 天野敏之²⁾

Shoki YAMAMOTO and Toshiyuki AMANO

1) 和歌山大学システム工学科 (〒640-8441 和歌山県和歌山市栄谷 930, s246305@wakayama-u.ac.jp)

2) 和歌山大学大学院システム工学研究科 (〒640-8441 和歌山県和歌山市栄谷 930, amano@wakayama-u.ac.jp)

概要: 空間型拡張現実感の手法の一つとして, 光学的に物体の色彩や質感を変化させる, 見かけの操作が提案されている. 見かけの操作は, プロジェクタとカメラで構成されたフィードバック系を用いた光投影により物体の見かけを操作する技術であり, 先行研究では, 二つのプロジェクタカメラ系とミラー反射を組み合わせた, 全周囲の見かけの操作も提案されている. 本研究では, この手法を発展させ, 5 対のプロジェクタカメラ系を用いた直接投影による全周囲の見かけの操作を提案する.

キーワード: AR, SAR, 見かけの操作

1. はじめに

近年, プロジェクタから現実世界に対して映像を投影し, 付加情報を提示する拡張現実感 (Argumented Reality 以降, AR) 技術が様々な分野で応用されている. このプロジェクタを用いた技術は, AR 技術の中でも特に空間型拡張現実感 (Spatial Argumented Reality 以降, SAR) と呼ばれている. SAR 技術の最大の利点として, 観測者に付加情報を認識するための特別なデバイスを装着させる必要がなく, 大勢が同時に情報の観測できることが挙げられる. この SAR 技術には, 単にテクスチャを投影するだけでなく, 放射輝度補償[1]や物体の光沢感や透明感を光学的に置き換える質感操作[2]も提案されている.

天野ら[2]によって提案された質感操作では, 光学的に同軸に配置されたプロジェクタカメラ系に認知科学の知見に基づいた画像処理を実装することで, 立体物に対する動的な透明感や光沢感の操作を実現している. ただし, この手法ではプロジェクタからの投影は正面からのみであり, 対象物体の側面や背面の操作は行えない.

そこで島名らは, 2 対のプロジェクタカメラ系を 2 左右に配置し, さらに, 鏡による対象物体背面への投影を行うことで, 物体の全周囲の見かけの操作を可能にした. しかし, この手法では, 鏡の反射を用いた投影と直接の投影では光路長が異なり, 投影の輝度差が生じる. また, 投影が重畳している部分と重畳しない部分では, キャストシャドウのような明度差が生じる問題がある.

本研究では, これらの問題を解決するために, 対象物体を取り囲むように多数のユニットを配置して, 直接物体表

面に投影を行う全周囲の見かけの操作を提案する. 提案手法は投影の光路長による反射率推定の誤差が生じないだけでなく, より多くの投影が重畳されることで, 部分的なキャストシャドウの有無による影響の軽減が期待できる. 本稿ではプロジェクタカメラ系を 5 対として, 先行研究との比較から提案手法の有効性を検証する.

2. 先行研究

2.1 モデル予測制御を用いた見かけの操作

天野ら[3]は, 見かけの予測とモデル予測制御を用いた見かけの操作技術を提案している. 見かけの操作において, 操作物体のある点における物理的な反射率 \hat{R} は,

$$\hat{R} = C ./ \{ (C_{full} - C_0) \odot P + C_0 \} \quad (1)$$

と推定される. この式において, $C \in \mathcal{R}^3$, $P \in \mathcal{R}^3$ はそれぞれカメラの撮影画像の RGB 値とプロジェクタの投影画像の RGB 値を表し, C_{full} と C_0 は最大および最小の輝度の光がプロジェクタから投影された時の画像である. また, $./$ と \odot は要素ごとの除算と積算を表す. この \hat{R} とプロジェクタから白色光を投影した時の撮影画像 C_{white} から白色光投影時の見かけ

$$C_{est} = \hat{R} C_{white} \quad (2)$$

を推定している. そして, C_{est} に任意の画像処理を施し目標値 R を作成し, 現在の見かけ C との差から投影光 P を決定

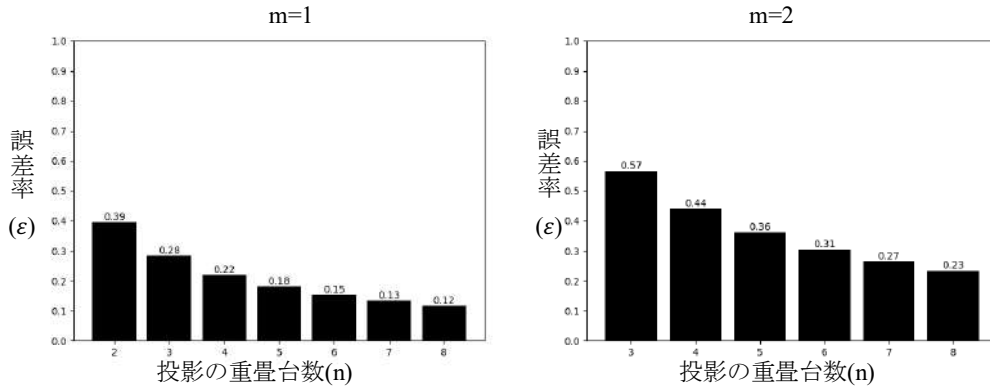


図 1: 誤差率εの投影の重畳台数による変化

し投影することで任意の見かけの制御を実現している。

2.2 全周囲の見かけの操作

島名ら[4]は、2対のプロジェクタカメラ系（以降、ユニット）を左右に配置し、さらに、鏡による対象物体背面への投影を行うことで、物体の全周囲の見かけの操作を可能にしている。この手法では、ユニット間で情報の共有を行わず、それぞれが独立して投影を行なっているため、投影の重畳部分において、片方のユニットの投影がもう片方のユニットにとって外乱となり、反射率推定に影響を及ぼす。その結果、投影の重畳している部分としていない部分とではキャストシャドウのような明度差が生じる。ただし、投影の重畳部分の操作は安定し、同一の目標設定では投影画像は同じ値に収束することが確認されている。

2.3 分散協調投影のための重畳部分の実時間輝度補正

上坂ら[5]は、投影の重畳している部分と重畳していない部分の反射率の違いを利用することで投影の重畳部分を検出し、検出された重畳部分における反射率推定を、貢献度を用いて行うことで、重畳部分の投影光を抑制し、重畳している部分と重疊していない部分の明度差の改善を実現している。ここで貢献度とは、それぞれのプロジェクタの投影がカメラで観測される物体表面の放射輝度に与える影響の比率である。ただし、この方法では、動的に投影の重畳の有無を検出する必要がある。また、それぞれの投影の貢献度（影響の強さ）を撮影画像のすべての点で予め求めておく必要がある。

3. 投影の重畳部分における反射率推定

本研究では、上坂らの輝度補正を多数のユニットに応用する。このとき、投影の重畳の数が多いことを仮定し、期待される重畳数を与えることで、重畳の検出を省略する。また、光路長が均一になる装置構成にすることで、貢献度を一様として、貢献度の事前取得を省略する。

このような仮定において、投影の重畳部分における反射率推定を考える。今、操作対象のある点に関して、あるユニットのカメラが撮影画像Cを得ており、n台のプロジェク

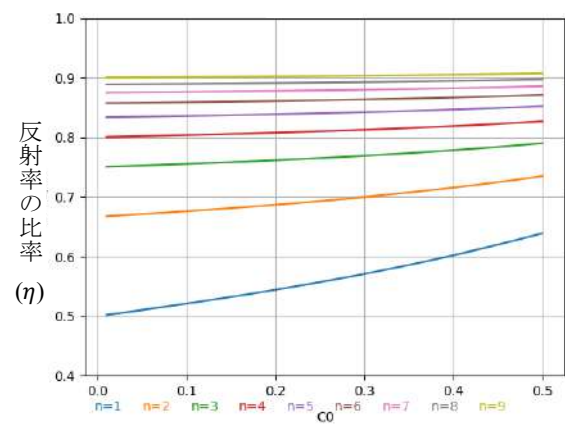


図 2: n台での反射率と n + 1台での反射率との比率に対する環境光成分C₀の影響

タからの投影が重畳していると仮定した場合、

$$\hat{k}_n = C./\{(C_{full} - C_0) \odot (P_1 + P_2 + \dots + P_n) + C_0\} \quad (3)$$

となる。ここで、 P_1, P_2, \dots, P_n はそれぞれ、ユニット1からユニットnまでのプロジェクタの投影光を表し、全てのユニットで同一の操作を行う場合、操作対象は完全な拡散反射特性を持つと仮定しているので $P_1 = P_2 = \dots = P_n$ と考えることができる。ゆえに重畳部分の反射率推定の式は、

$$\hat{k}_n = C./\{(C_{full} - C_0) \odot n * P + C_0\} \quad (4)$$

と表すことができる。ここで、操作対象上のある点に関して、投影の重畳がn台分ではなく、m台分だけ少ないn - m台のプロジェクタからの投影が重畳していると仮定した場合は、

$$\hat{k}_{n-m} = C./\{(C_{full} - C_0) \odot (n - m) * P + C_0\} \quad (5)$$

と表すことができる。

図 1 は、 \hat{k} の R 要素 \hat{k}_r を、 $C_r=0.6, C_{full,r}=1, C_{0,r}=0.3, P_r=0.8$ として、式(4)を用いて求めた反射率 $\hat{k}_{n,r}$ と、投影の重畳が、仮定したn台分ではなく、n - m台分であったと

した時の反射率の真値 $\hat{k}_{n-m,r}$ との差 $\hat{k}_{n-m,r} - \hat{k}_{n,r}$ を $\hat{k}_{n-m,r}$ で除した誤差率

$$\varepsilon = \frac{\hat{k}_{n-m,r} - \hat{k}_{n,r}}{\hat{k}_{n-m,r}} \quad (6)$$

を縦軸、仮定した投影の重畳台数 n を横軸にとり、棒グラフで示したものである。この図から、 n が大きい場合には投影の隠蔽による変動 m の影響が小さくなり、重畳の相違による明度差は小さくなると考えられる。

図2は、 n 台での反射率 $\hat{k}_{n,r}$ と $n+1$ 台での反射率 $\hat{k}_{n+1,r}$ の比率

$$\eta = \frac{\hat{k}_{n+1,r}}{\hat{k}_{n,r}} \quad (7)$$

を縦軸に、 C_0 を横軸にとり、 $n = 1, 2, \dots, 9$ まで変化させたグラフを示したものである。この図より、反射率の比率 p に対する環境光成分 C_0 の影響は、投影の重畳台数 n が増加するにつれて小さくなるのがわかる。このことから、投影するプロジェクタの台数を増やすほど、仮定した投影の重畳数と実際の重畳数にずれがある投影対象上の点における反射率推定の結果の真値との誤差に、環境光成分が及ぼす影響が抑えられると言える。

そこで、本研究では、ユニットの数を5つとして有効性の検証を行う。

4. 実機による検証

4.1 実験装置

図3、4のように、白色の円形テーブルの中心から同心円状にユニットを5台と、テーブルの上方60cmの位置に環境光を与えるための照明を配置し、物体の全周囲の見かけの操作を行った。プロジェクタにはViewSonic社製M2e、カメラにはXimea xiQシリーズMQ022CG-CMをそれぞれ1台ずつユニットの構成に使用した。図3のように、それぞれのユニットは、テーブルの中心から水平方向に1m、鉛直方向に80cm離れた位置に固定し、隣り合うユニット間には72度間隔で配置した。また、実験結果の撮影はそれぞれのユニットから下方向に40cmの位置で5つの視線方



図3: 実験装置の配置

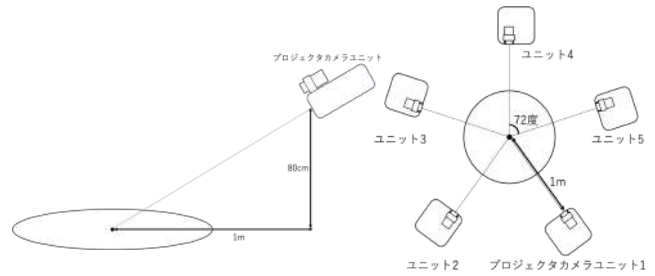


図4: プロジェクタカメラユニットの配置の概略図

向から外部カメラ(SONY社製α6100)を用いて撮影した。

4.2 実験結果と考察

図5は、投影を行うユニットが2つの場合と5つの場合で行った見かけの操作(モノクロ化)を撮影した結果である。2つのユニットによる投影には、図2のユニット2と5を使用した。2つのユニットによる見かけの操作の撮影結果は、画像全体の明るさを5つのユニットによる見かけの操作の撮影結果と同じになるように画像処理を施してある。図5の結果を比較すると、5つのユニットによる見かけの操作では、対象物体の正面だけでなく背面にも見かけの操作が行われていることがわかり、全周囲の見かけの操作が実現できていると言える。

5つのユニットによる見かけの操作では、操作対象の全



(a)2台のユニットによる見かけの操作



(b)5台のユニットによる見かけの操作

図5: 全周囲の見かけの操作白色投影(上)とモノクロ化(下)

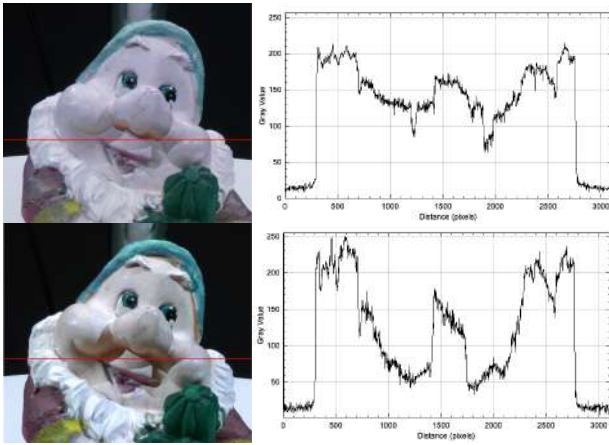


図 6:5つのユニットによる操作の明度変化(上)と
2つのユニットによる操作の明度変化(下)

ての点において見かけの操作を実現することを目標としており、2つのユニットによる見かけの操作において物体の形状によって隠蔽され、複数のユニットによる見かけの操作が行えていなかったキャストシャドウの部分に関しても操作を行うことを目指している。そこで、図6のように撮影結果に直線を取り、その線上の画素の明度を縦軸、画像のピクセル値を横軸に取ったグラフを示す。このグラフから、5つのユニットによる見かけの操作では、2つのユニットによる見かけの操作に比べて、対象物体の鼻の横付近に存在するキャストシャドウの部分にも投影光が当たっており、明度差の少ない操作が行えていることがわかる。

図7は、5つのプロジェクタカメラ系を用いた様々な見かけの操作の正面からの撮影結果であり、操作対象の色相や質感を操作できていることがわかる。ただし、エッジ強調の操作に関しては、プロジェクタカメラ系のカメラの撮影位置によって、物体の輪郭は変化してしまうため、物体輪郭の強調表示は原理的に不可能である。

5. まとめ

本稿では、投影の重畳部分における反射率推定の投影の重なり数から受ける影響を考察し、5つのプロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作を、2つのユニットのみによる操作と比較してその有効性を検証した。

投影の重畳部分における反射率推定の考察から、プロジェクタカメラ系の数を増やすほど、反射率推定結果の誤差は小さくなることと反射率推定結果に及ぼす環境光成分の影響は減少することがわかった。また、5つのプロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作と、2つのプロジェクタカメラ系による見かけの操作の比較から、全周囲の見かけの操作の実現と、投影の重畳している部分としない部分の明度差の改善が確認できた。

今後の研究では、プロジェクタカメラ系を光学的に同軸

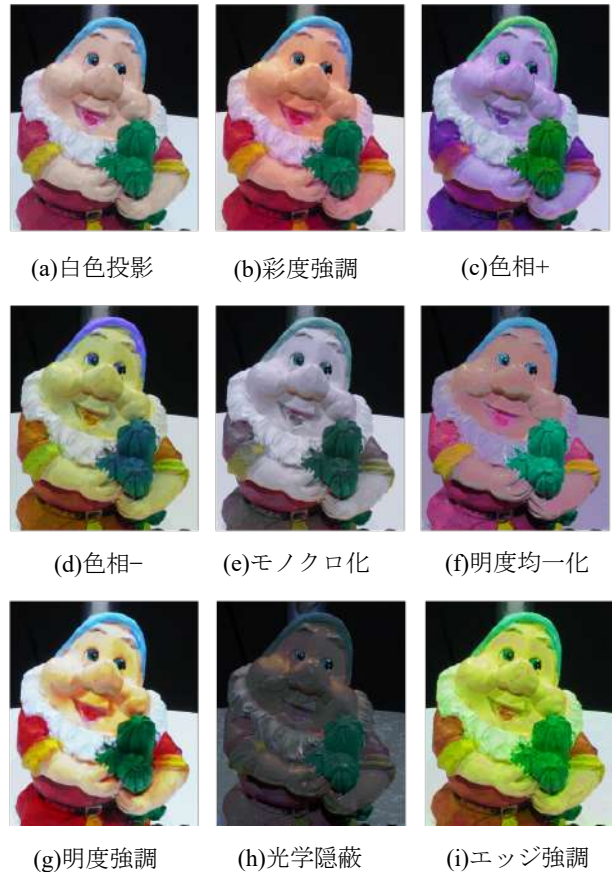


図 7:5つのユニットによる見かけの操作(正面)

に配置することで、全周囲の見かけの操作を動的なシーンにおいて見かけの操作を実現したい。

参考文献

- [1] Shree K. Nayar and Harish Peri and Michael D. Grossberg and Peter N. Belhumeur, "A projection system with radiometric compensation for screen imperfections," IEEE Int. Work. Proj., 2003.
- [2] 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 Vol. 68, No. 12, pp. J528~J533, 2014.
- [3] 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アピアランス制御", 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010)」 2010年7月
- [4] 島名功, 天野敏之, 牛田俊, "プロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.2, pp. 363-371, 2016.
- [5] Uesaka, Shoko and Amano, Toshiyuki, "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