



周辺領域との輝度差を考慮した光線場投影による 違和感のない BRDF 提示

小段海人¹⁾, 天野敏之¹⁾

Kaito Kodan, Toshiyuki Amano,

1) 和歌山大学 システム工学部 (〒640-8441 和歌山県和歌山市栄谷 930)

概要: 空間拡張現実感の研究として, ライトフィールド投影による BRDF データを反映した視点移動による色彩変化が提案されている. しかし, 投影対象だけでなく, シーン全体にプロジェクタから投影をおこなうので, 投影が知覚される. そこで, 本研究では投影を行う範囲を投影対象とその周辺領域にわけ, 放射輝度差を考慮した光線場投影を行うことで, プロジェクタによる投影感を緩和する方法を提案する.

キーワード: 光線場, 双方向反射率分布関数, 空間型拡張現実感

1. はじめに

空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality : SAR) の一つとして, 現実世界で物体の見た目の質感を変化させる質感操作が提案されている. 質感操作は, プロダクトデザインや博物館での美術品展示, 商品展示などの様々な応用が考えられる.

SAR において質感を操作する試みとして, 天野ら[1]は, 4 組のプロジェクタ・カメラ系を用いたフィードバックによって, 構造色のような視線方向によって色や光沢が変化する色彩操作を提案している. また, 村上ら[2]は反射解析とライトフィールド投影を用い, 光沢の強調や構造色への色彩操作を実現する視点依存の見かけの操作を提案している. これらの操作は, 光線場投影によって高度な反射特性の見かけの操作を実現するが, 複数のプロジェクタと複数のカメラとの幾何学校正や光学校正が必要であり, 投影対象が移動する動的なシーンへの応用は困難である.

この問題を解決する方法として, 木村ら[3]は平面形状の鏡面反射を仮定した光線場投影によって, BRDF データで表される質感を付与する手法を提案している. この手法は BRDF データを反映した視点移動による色彩変化を提示することで, BRDF で表される質感を再現しているが, SAR 共通の問題として, 投影感が生じる問題がある. そこで, 本研究では提示物体の周辺の領域に環境照明を再現することで, 違和感が生じない BRDF 提示を提案する.

2. 関連研究

2.1 環境照明の再現

任意の照明環境を再現する方法として, プロジェクタによる映像提示などが考えられるが, 立体物などが置かれて

いる場合, キャストシャドウなどが BRDF の提示と一致しないため, 照明方向も一致した照明環境を仮想的に生成する必要がある.

Debevec ら[4]は 2m の球体の内側に 156 個の RGB の光源を設置し, 各光源の色と強度を個別に設定することで, 任意の照明環境を再現する Light stage を提案している. また, Zhou ら[5]は複数のプロジェクタとレンズアレイを用いたライトフィールド装置を提案している.

Debevec らが提案した Lightstage で使用している光源は LED を用いた点光源であり, 照明対象に対して均等に照明される. そのため, 物体の表面ごとに任意の方向および強度光線を投影することはできない. これに対して, Zhou らが提案した装置は任意の光線分布の投影ができるが, レンズアレイの範囲を超える広い角度の光線投影はできない. また, 投影の空間解像度はレンズアレイのレンズの個数に制限される. このような理由から, 天野・久保ら[6]は 4 台のプロジェクタの投影を異なる向きに配置された 9 枚のミラーで反射させることで, 指向性, 空間解像度が高い光線を多方向から照射する手法を提案している.

2.2 BRDF の質感提示

木村ら[3]は鏡面反射成分を持った物体に対して投影し, BRDF データを反映した視点移動による色彩変化を実現した. 木村らの方法では投影対象の周辺は黒色の背景を仮定し, シーン全体に BRDF を再現する光線場を投影している. このように周囲と独立して物体のみを明るくすると, 物体の色彩は物体固有の反射率に起因する表面色から位置や距離が特定されない開口色へ遷移する[7]ことが知られており, この知覚特性から, 木村らの BRDF の質感提示

でも投影感が確認されている。

3. 提案手法

本研究では木村ら[3]の BRDF 提示における投影感の問題を、周辺領域への投影によって解決する。最終的には仮想光源環境を再現することで、周辺に置かれた立体物のアタッチドシャドウも整合させることを目標とするが、本報告では、まず対象と周辺領域の放射輝度を整合させることで、投影感の問題が緩和されるか確認する。

3.1 光線分布の制御による BRDF の質感提示

木村ら[3]は、平面状の鏡面反射を仮定して、投影対象上の反射光の配光分布を、提示目標とする BRDF に変化させるライトフィールドを設計した。

図 1 左のように光源ベクトル L から照明が照射され、視線ベクトル V で緑色が、 V' で青色が見られる状況の再現を考える。このとき、 L の入射角を θ_i 、 V の観測角を θ_o として、反射特性を BRDF、 $f(\theta_i, \theta_o)$ と表すものとする。

図 1 右のように、鏡面反射面で θ_o に所望の色を再現するには、 $f(\theta_i, \theta_o)$ より θ_o の色を求め、鏡面反射を仮定して、法線ベクトル n について対称となる入射角 θ_o から $f(\theta_i, \theta_o)$ の投影を行なう。立体物では法線ベクトルは投影する物体の形状に従い変化するが、木村らの方法では、汎用性を考慮して形状を平面として n は鉛直上向きとしている。

この投影を想定される観測方向に対して行なうことで、目標の BRDF を提示することができるが、あらかじめ観測方向を想定することは困難である。そのため、可能な限り角度分解能の高い光線投影を行い、投影可能な光線のそれぞれに対して上記の方法で投影色を決定する。

3.2 放射輝度を考慮した投影画像の作成

本研究では、BRDF 提示の周辺領域に環境照明を再現することで、投影感が生じない鏡面反射物体上での BRDF 提示を試みる。周辺領域の照明環境再現に、光線合成による任意の光源環境を再現する天野・久保ら[6]の手法を用いることで、キャストシャドウやアタッチドシャドウの再現も可能になるが、本報告では、まず周辺の放射輝度を整合させることで、投影感が緩和されるかを確認する。

投影対象周辺に拡散反射板を配置し、木村らの方法による拡散反射物体の BRDF 提示を行う。この際に投影対象と周辺領域の放射輝度を測定し、投影対象の明るさを基準に周辺領域の明るさを整合させる。

具体的には、放射輝度計を用いて想定する観測方向から投影対象物体上の輝度 L_o と周辺領域の放射輝度 L_s を測定する。その後、投影対象と周辺領域に提示している BRDF データより、観測した条件での放射輝度の比率 r を取得し、 $L_o:L_s$ が r となるように周辺領域へ投影する画像の明るさを調整することで放射輝度を整合させる。

4. 輝度差を考慮した BRDF 提示

4.1 実験環境

本研究では図 2 に示すライトフィールド投影装置を使用する。この装置はプロジェクタ 4 台とミラー 9 枚 (300mm × 300mm, ステージと鏡の距離 850mm) が配置されてい

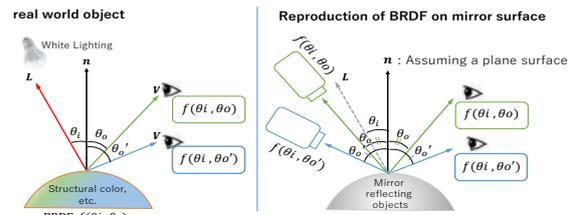


図 1: 光線分布の再現[3]

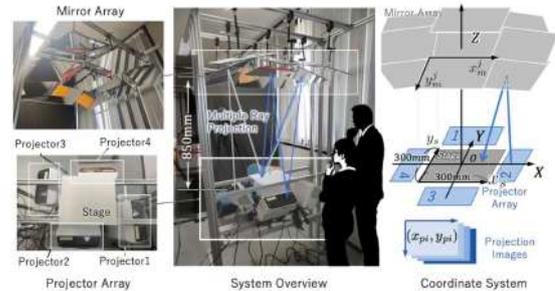


図 2: ライトフィールド投影装置[6]

る[6]. 投影物体を配置するステージの大きさは 300mm 平方である。この装置では、ミラーとプロジェクタの組み合わせによって、ステージ上の各点ごとに平均 13 本の光線が投影される。

4.2 投影対象物体

投影される光線の配光分布が離散的であるため、光線の角度解能程度の分散をもつ表面粗さの物体を用いる。

本研究では、BRDF 提示する投影対象に、(a) 平面物体かつ適度な表面粗さをもつアルミ箔を、周辺領域には白色画用紙を用いて輝度差を考慮した BRDF 提示が再現できているか検証を行う。また、様々な物体でも、輝度差を考慮した違和感のない BRDF 提示が可能であるか検証するため、投影対象を、(b) 法線方向が連続的に変化する金属光沢を持つ曲面 (ただし、鏡面反射が視点に届く程度の曲率とする)、(c) 相互反射が生じる複雑な形状の鏡面である紙、(d) 鏡面反射かつ透過する光学特性をもつ物体 (ガラス製の皿) としての投影も行った。図 3 にこれらの投影対象の白色照明下での様子を示す。

4.3 平面物体への BRDF 提示

投影画像の生成では、点光源を図 2 に示す世界座標において、 $(X, Y, Z) = (100, 100, 400)$ [mm] に設定し、木村らの方法により、投影画像を作成した。

提示する質感として RGL Material Database[8]を用い、BRDF 提示対象のサンプルには、silk blue, aurora white, golden yellow を、照明環境を再現する周辺領域には、paper yellow を選定した。図 4 に木村らの方法と提案手法で生成された投影画像の一例 (Projector1 の投影画像) を示す。

BRDF 提示するアルミ箔の輝度と周辺領域に用いる白画用紙の輝度を放射輝度計 (SEKONIC SPEEDMASTER L-855D) で測定した結果、それぞれ 360 cd/m^2 , 100 cd/m^2 であった。この結果をもとに、3.2 節で説明した方法によって周辺領域への投影強度を調節した。

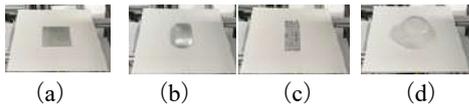


図 3: 投影対象物体 : (a) 平面物体, (b) 曲面物体, (c) 複雑形状物体, (d) 透過物体

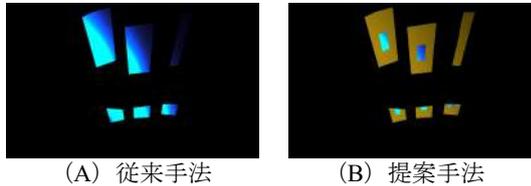


図 4: Projector1 の投影画像

4.4 平面物体への投影結果

提案手法における平面物体への投影結果を図 5 に示す。BRDF 提示対象上では、視点に応じた色彩変化しており、金属光沢を持つ BRDF の質感が表現されている。その一方で、周辺領域では、視点による色彩変化はなく、paper yellow のマットな質感が提示されていることが確認できる。この周辺領域への投影が投影感の緩和に貢献しているかを確認するために、周辺領域に植毛紙を配置した従来手法と提案手法の比較を図 6 に示す。現在はまだ評価はできていないが、主観的には、提案手法によって投影感が緩和されていることが確認できた。今後の研究では、ユーザスタディによる有効性の評価を行う予定である。

4.5 様々な物体での BRDF 提示

次に、提案手法が様々な物体において、投影感が緩和されるかを確認するために、図 3 に示した (b) 曲面物体, (c) 複雑形状物体, (d) 透過物体に、従来手法と提案手法で BRDF データを提示した結果を図 7 に示す。提案手法の提示結果を見ると、物体の輪郭に沿って、投影対象と周辺領

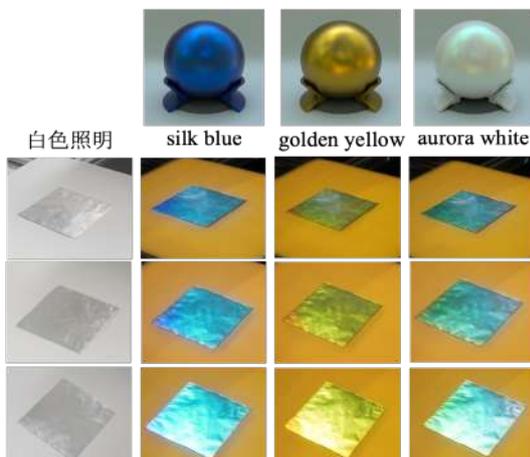


図 5: 平面物体への BRDF 提示結果

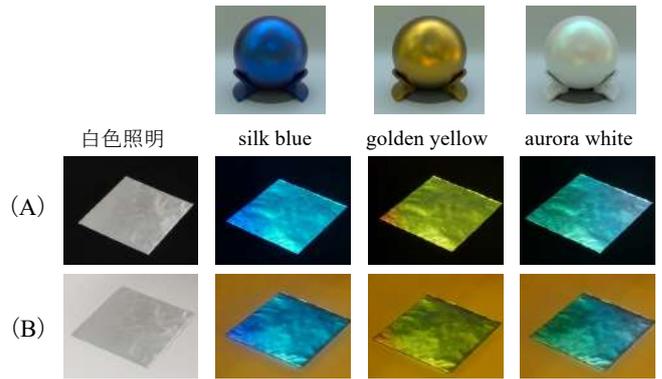


図 6: BRDF 提示結果の比較: (A) 従来手法, (B) 提案手法

域の境界で、金属光沢を有する BRDF とマットな BRDF の投影のずれはなく、周辺領域に違和感なく BRDF が提示できていることが確認できた。主観的な評価では、周辺領域への投影が BRDF 提示の投影感を緩和しているように見受けられたが、これらの様々な物体についても、ユーザスタディを通じて提案手法の有効性を検証する予定である。

5. 投影結果について

実験結果に示したように、周辺領域に違和感なくマットな質感の BRDF データの提示を実現することができた。また、主観的な評価では、金属光沢の BRDF 提示で投影感が緩和されたように知覚された。

今後の研究では、まず、ユーザスタディを通じて、提案手法の有効性を客観的に評価する予定である。また、本論文で説明した手法による周辺領域への投影では、周辺領域の形状は平面と仮定している。したがって、周辺領域に立体物をおいた場合に生じるキャストシャドウは、BRDF 提示で想定している照明環境と整合しない。このとき、キャストシャドウも整合させることができれば、より違和感がなくなることが期待できる。そのため、今後の研究では周辺領域に天野・久保らの光線場投影手法を適用し、BRDF の光源位置と整合したキャストシャドウやアタッチドシャドウの生成を試みる予定である。

6. まとめ

本研究では、ライトフィールド投影装置を用いた視点移動に対応した BRDF データで与えられる質感の提示において、投影対象と周辺領域の放射輝度差を考慮して周辺領域の放射輝度を整合させることで、投影による違和感が生じない BRDF 提示を試みた。本研究では、投影光量の整合方法を考案し、投影対象と周辺領域の境界で、金属光沢を有する BRDF とマットな BRDF の投影をずれなく提示することを実現した。今後の研究では、この提案手法が投影感の緩和に貢献しているかをユーザスタディによって検証する。また、天野・久保らの光線場投影手法を適用し、BRDF の光源位置と整合したキャストシャドウやアタッチドシャドウの生成も試みる予定である。

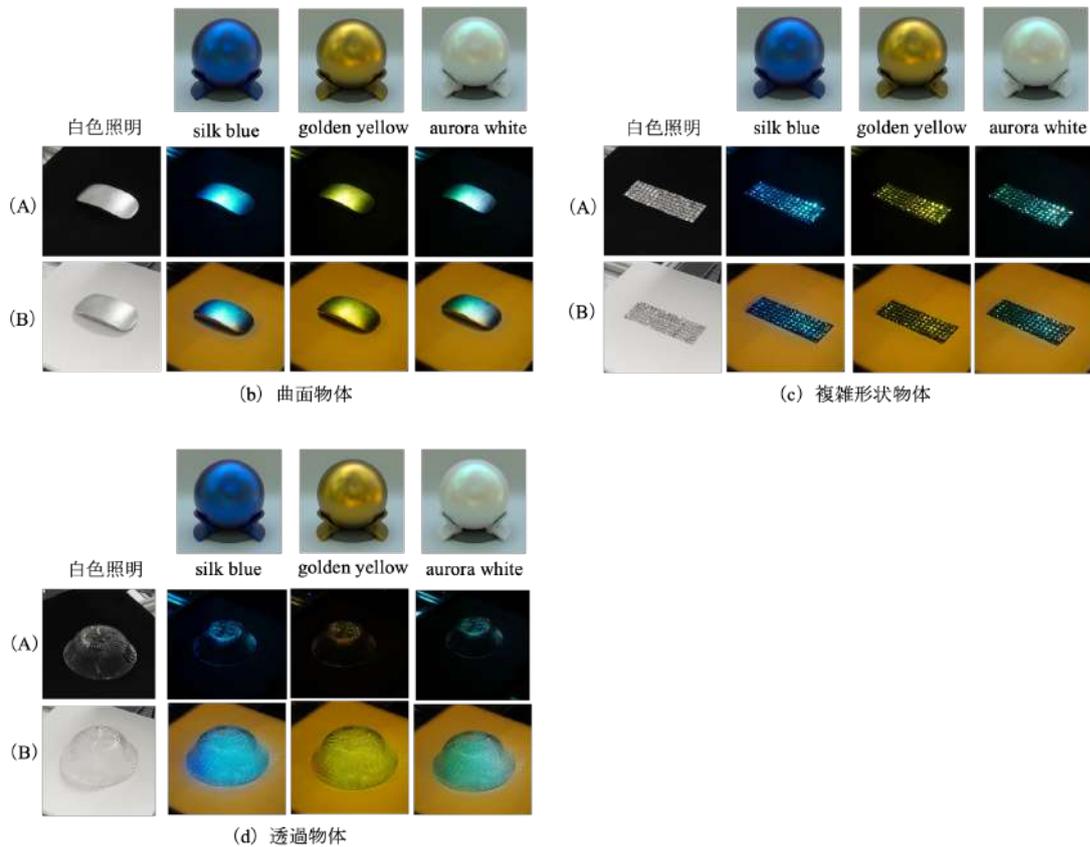


図7: 様々な物体へのBRDF提示結果の比較 : (A) 従来手法, (B) 提案手法

参考文献

- [1] T. Amano, S. Ushida, Y. Miyabayashi: Viewpoint-Dependent Appearance-Manipulation with Multiple Projector-Camera Systems, Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments Proceedings, pp.101-107(2017).
- [2] K. Murakami, T. Amano: Materiality Manipulation by Light-Field Projection from Reflectance Analysis, Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments Proceedings, pp.99-105(2018).
- [3] K. Kimura, T. Amano: Perceptual BRDF manipulation by 4-DoF Light Field Projection using Multiple Mirrors and Projectors, 19th EuroXR International Conference – EuroXR 2022, pp.95-99(2022).
- [4] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. Duiker, W. Sarokin, M. Sagar: Acquiring the Reflectance Field of a Human Face, SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings, pp.145-156 (2000).
- [5] Z. Zhou, T. Yu, X. Qiu, R. Yang, Q. Zhao: Light Field Projection for Lighting Reproduction, IEEE Virtual Reality Conference Proceedings pp.135-142 (2015).
- [6] T. Amano, R. Kubo: A Multiple Mirror based Arbitrary Lighting Environment Reproduction, 19th EuroXR International Conference – EuroXR 2022, pp.81-85(2022).
- [7] Y. Yamauchi and K. Uchikawa. Depth information affects judgement of the surface-color mode appearance. Journal of Vision, 5(6) (2005).
- [8] Jonathan Dupuy, Wenzel Jakob: An Adaptive Parameterization for Efficient Material Acquisition and Rendering. In Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia). 37(6). 274:1–274:18(2018).