

遠赤外反射像を用いた可視光反射像生成による 投影型拡張現実のための映り込み再現

石川 陽菜^{*1}渡辺 義浩^{*1}

Abstract – 投影型拡張現実において、投影対象を鏡面素材に質感操作する際には、現実空間が映り込む様子の再現が求められる。一方、投影対象は拡散反射性を示す必要があることから、従来の映り込み再現手法では、投影対象の近くに鏡を配置し、現実空間の反射を撮像する必要があった。そこで本稿では、遠赤外域で投影対象から鏡面反射像を撮像し、現実空間の色を持つ可視光像を生成することにより映り込みを再現する手法を新たに提案する。

Keywords : 拡張現実, 質感再現, 質感操作

1 はじめに

投影型拡張現実とは投影によって物体の外観を操作する技術で、エンターテインメント、ヒューマンインターフェースなどの様々な分野での応用が期待されている [1, 2]。同技術は、人間が機器を取り出したり装着したりすることなく投影対象の視覚的外観を上書きし、材質や形状が変化したような体験を生み出すことができる。

このような外観操作の一つとして、投影型拡張現実による様々な質感操作が報告されている [2, 3]。なかでも投影対象を鏡面素材に質感操作する際には、周囲環境が映り込む様子の再現が求められる [4]。この際、投影型拡張現実では実物体を質感操作するため、周囲環境の映り込みは現実空間を反映したものである必要がある。また、ユーザの映り込みが動的に変化する場合、投影と同時に映り込み像の生成をリアルタイムに行う必要がある。

この映り込み像の色は、再現する質感の反射特性だけでなく、周囲環境の色にも依存する。例えば、導体の映り込み像はフレネル反射により導体固有の色を持つが、銀色のような無彩色に近い導体の場合には、映り込み像は周囲環境の色になる。また、誘電体の鏡面反射成分は、周囲環境の色で構成される。したがって、同質感の映り込みを再現するためには、周囲環境の色が求められる。

このような背景のもと、本稿では、投影型拡張現実で現実空間の映り込みを再現することを目的とする。同目的を達成する手法として、鏡を用いて映り込みを再現する手法がある。同手法は、暗環境下で鏡の反射が暗くならないように照明や投影システムの配置を調整する必要があることや、周囲環境を捉えるために、鏡

を別途配置しなければいけない問題があった。

そこで本稿では、遠赤外域で投影対象から鏡面反射像を撮像し、映り込みを再現する手法を提案する。具体的には、投影対象の遠赤外反射像から、現実空間の色を持つ可視光像を生成することにより、多様な質感の映り込みを再現する。この際、遠赤外反射像からリアルタイムに推定されたユーザの骨格と、予め撮像したユーザの可視光像を用いて、ユーザの骨格を反映させた可視光像をリアルタイムに生成する。実験では、本手法により導体および誘電体の映り込み再現が可能であることを確認した。また、予備実験として、遠赤外域で鏡面反射性を示す立体物に対して艶消しや塗装を行い、投影対象を作成した。

2 関連研究

映り込みを再現する手法として、パストレーシングを投影型拡張現実に応用した事例がある [5]。同手法では、人間の知覚積分効果を利用して、パストレーシングにおけるノイズを含む映像を高フレームレートでレンダリングする。このようにして、動く物体に追従可能な速度での投影が行われ、高いリアリティの映り込みを再現した。しかし同手法において再現される映り込みは仮想の周囲環境の映り込みであり、投影が実施される実際の現実空間を映り込ませることは試されていない。

これに対し、投影型拡張現実で現実空間の映り込みを再現するために、投影対象の近くに球面鏡を置いて、同鏡に映った現実空間の反射を、投影像に利用した事例がある [3]。一方、投影型拡張現実では部屋の照明を消した暗環境で行われることが多い。これは部屋の照明を点灯させた明環境で投影を行うと、投影結果のコントラストが低下するためである。したがって同手法では、暗環境下で同鏡の反射が暗くならないように照明

^{*1}東京科学大学

や投影システムの配置を調整する必要がある。また、周囲環境を捉えるために、球面鏡を別途配置しなければいけない問題もある。

このような問題を解決するには、現実空間の反射を投影対象から直接撮像する手法が望ましい。一方、投影対象は拡散反射性を示す必要があることから、可視光域では鏡面反射像を撮像できない。このような制限下で投影対象から鏡面反射像を撮像する手法として、遠赤外域の反射像を撮像する手法が考えられる。これは、物体の反射率が、入射する光の波長に依存することに起因する [6]。この波長間の反射特性の違いにより、投影対象のような可視光域で拡散反射の特性を示す物体が、遠赤外域では鏡面反射の特性を示す場合がある。

そこで石川らは、同特性により得られる遠赤外反射像を用いて、映り込みを再現する手法を提案した [7]。この際、遠赤外反射像が可視光域の色を持たない問題が生じるが、再現する質感を導体に制限し、遠赤外反射像を導体固有の色に着色することで、映り込みを再現した。一方、同手法は、再現可能な質感を導体に限定している問題がある。

3 予備実験: 投影対象の選定

3.1 実験概要

前節で述べた通り、本手法で用いる投影対象として、可視光域で拡散反射性を示し、遠赤外域で鏡面反射性を示すような物体を選定する必要がある。そこで石川らは、素材の選定を行い、アクリル、セラミック素材が同特性を持つことを示した [7]。一方、立体形状では検証されていなかったため、本稿では立体形状で同特性を示す投影対象を新たに検証した。

3.2 立体物の選定

まず、アクリルおよびセラミック素材の立体物を図 1 のように配置し、遠赤外線カメラを用いて撮像した。遠赤外線カメラは、FLIR A6751 を使用した。解像度は 640×512 、フレームレートは 125.67 fps で撮像した。このカメラで撮像できる波長域は $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ である。レンズの焦点距離は 17 mm で、F 値が 2.5 であった。実験時には、撮像対象との距離は 350 mm とした。

図 2 に、粗さが小さい立体物を遠赤外カメラで撮像した結果を示す。この結果から、球面 (アクリル) の遠赤外反射像が鮮明であることが確認できる。

3.3 投影のための前処理

図 2 に示す通り、選定したアクリルの物体が透明であることにより、投影には向かない問題がある。そのため、白塗装を行った。白塗装は、表面の粗さが変化することを防ぐために、裏側から塗布した。また、今回



図 1 実験の様子

Fig. 1 Configuration of experiment system



図 2 (左) 可視光カメラで撮像した結果. (右) 遠赤外線カメラで撮像した結果. 上から順に、(a) 球面 (アクリル)、(b) 磁器の置物 (セラミック).

Fig. 2 Results captured using a far infrared camera

は、主に表面粗さが小さい物体を予め選定し、投影のために同物体の表面に艶消し剤を塗布し、適度な粗さを付与するように調整した。この際、粗さによる遠赤外反射像のぼけを最小限にしながら鏡面反射を低減するために、2.5 分の艶消しスプレーを使用し、段階的に粗さの調整を行った。

図 4 および図 3 に、上述の前処理を実施した投影対象の遠赤外反射像と投影結果を示す。この結果から、遠赤外反射像は鮮明なまま、投影が可能になったことが確認できた。一方、図 3 (左) では、投影光の鋭い鏡面反射も観測された。対して図 3 (右) では、鋭い鏡面反射が低減されていることが確認できた。

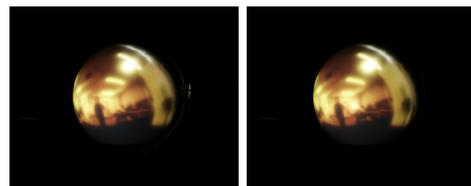


図 3 (左) 艶消し処理前の球面 (アクリル) に投影した結果. (右) 艶消し処理後の球面 (アクリル) に投影した結果. 艶消しにより、鏡面反射が低減されていることが確認できる。

Fig. 3 Results of projections on a spherical (acrylic)

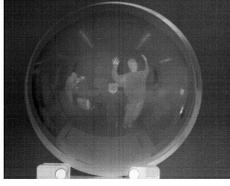


図4 艶消し後の球面 (アクリル) を遠赤外線カメラで撮像した結果. 艶消し前の結果は図2を参照.

Fig.4 Results captured using a far infrared camera

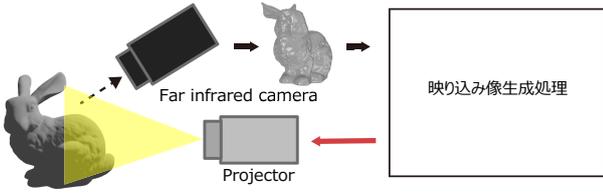


図5 システム構成

Fig.5 Configuration of system

4 可視光像生成を用いた映り込み再現手法

4.1 手法の概要

システム構成を図5に示す. このように, 投影対象から周囲環境の様子をリアルタイムに捉える. また, 投影対象は形状と法線が既知の物体とする. ここで, 映り込み再現手法の概要を図6に示す. このように, 事前に撮像されたユーザの可視光像と, 遠赤外反射像から推定されたユーザの骨格を用いて, ユーザの骨格を反映させた可視光像を生成する. このようにして得られた可視光像は球に射影され, 映り込み像の生成に用いられる. 次節より, 可視光像生成を用いた映り込み再現手法の詳細を述べる.

4.2 歪み補正処理

投影対象表面の形状および法線分布によって, 映り込んだ周囲環境の遠赤外反射像が歪む. したがって, 形状や法線分布に依存しない遠赤外反射像を得るために, 歪み補正処理が必要である.

本手法では, 環境マッピングの一つであるスフィアマッピングの逆レンダリングによって歪みを補正する[8]. 図7に歪み補正処理の概要を示す. まず, カメラ位置から物体頂点に向かう視線ベクトルと, 頂点に対応するカメラ空間法線を用いて, 反射ベクトルを求める. 次に, 反射ベクトルの x, y 成分を正規化し, 補正画像の画素座標として用いる. 最後に, 該当する画素座標に, 対応する遠赤外反射像の画素を取得する. 具体的には以下の式に沿って射影する.

$$\begin{aligned} r &= v - 2(v \cdot n)n \\ x &= \text{Normalize}(r_x) \\ y &= \text{Normalize}(r_y) \end{aligned}$$

r が反射ベクトル, n が投影対象のカメラ空間法線, v が

視点ベクトルをそれぞれ表している. また, x, y は射影先の画素座標で, $\text{Normalize}(r_x), \text{Normalize}(r_y)$ により, r の x 成分および y 成分を正規化する. この場合, 射影した遠赤外反射像は必然的に疎な画像になるため, 周囲画素を用いて補間する. このような処理により, 歪んだ遠赤外反射像は, 形状や法線分布に依存しない遠赤外反射像に補正される.

4.3 骨格推定

骨格推定は, Xu らが提案した ViTPose [9] によって行われる. 同手法は可視光域の RGB 画像のための骨格推定手法であるが, 遠赤外反射像に映り込むユーザの骨格推定も可能であることが確認された.

4.4 Pose transfer による可視光像生成

Pose transfer は, Zhu らが提案した手法 [10] によって行われる. この際, Pose transfer モデルは, 新たに学習データを作成し, 再学習を行ったものを使用した. ここで得られた可視光像は球に射影され, 可視光反射像が得られる.

4.5 映り込み像の生成

映り込み像の生成は, 可視光反射像を用いてスフィアマッピングにより行われる. この際, プロジェクタの内部パラメータおよび外部パラメータを用いてプロジェクタ視点でレンダリングすることにより, カメラとプロジェクタの位置が異なる場合でも投影できる.

5 映り込み再現結果の定性評価

5.1 実験条件

学習方法 — 定性評価のために, 学習データセットを用意した. この際, 鏡を撮像することにより, 学習データセットを作成した. データセット作成の様子を図8の (a) に示す. 可視光カメラは, Balser acA720-520uc を使用した. 図9に作成したデータセットの一部を示す. このように, データセットは人物画像と骨格座標で構成される. 骨格座標は ViTPose により推定されたものを使用した. 学習時には, 学習データとして 5000 枚使用し, エポック数は 140 とした.

映り込み像生成 — 今回の実験では, 3 節で選定された球を用いた. そのため, 歪み補正処理を省略することができる. したがって, 歪み補正に関して, 別途シミュレーションにより定性評価を行った.

鏡を用いた手法と比較するために, 図8 (a), (b) に示すように, 投影対象の遠赤外反射像と鏡を同時に撮像した. この際, 可視光域で鏡の反射が撮像可能で, 投影も可能な環境にするために, 照明を調整した. 可視光カメラおよび遠赤外線カメラと球面鏡および投影対象との距離はレンズから約 350 mm とし, 球面鏡の反射像にピントを合わせた. 可視光カメラは上述のものを

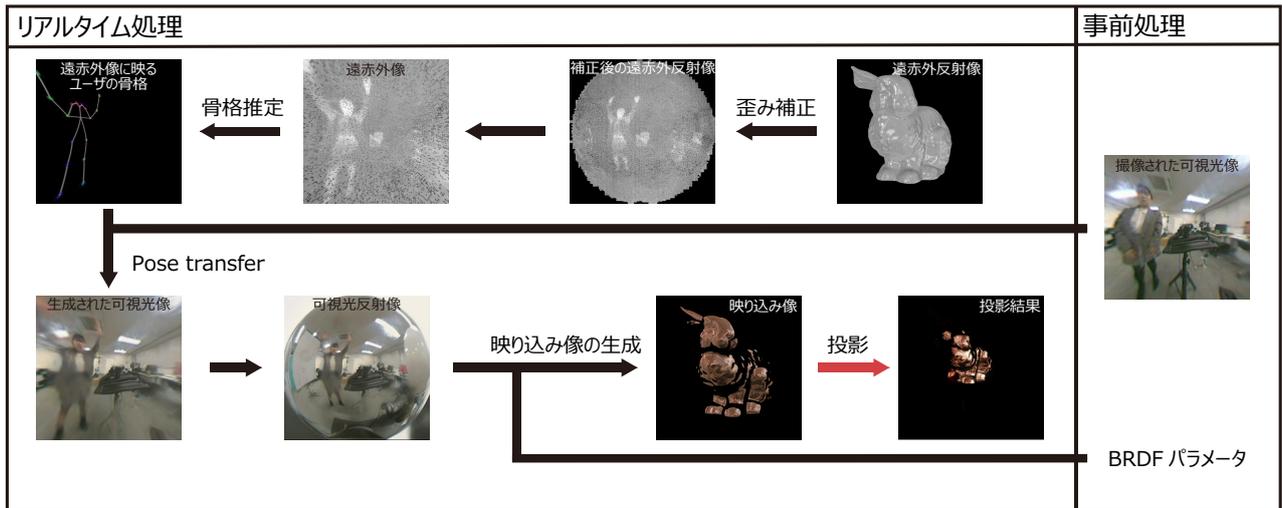


図 6 手法の概要
Fig. 6 Overview of our method

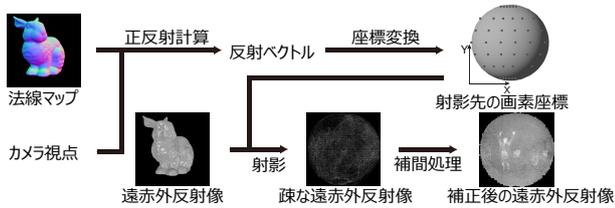


図 7 歪み補正処理の概要

Fig. 7 Overview of distortion correction

使用し、遠赤外線カメラの解像度に合わせて、85 fps で撮影した。レンズの焦点距離は 12 mm であった。また、遠赤外カメラは、予備実験と同様のものを使用した。

図 9 に示した可視光反射像を事前に撮像された可視光像として用いて、遠赤外反射像から推定されたユーザの骨格に合わせて可視光反射像を生成した。そのため、遠赤外反射像は歪み補正せずにそのまま使用した。

鏡を用いた手法では、球面鏡の撮像結果を用いて映り込み像が生成された。一方、提案手法では、生成された可視光反射像が用いられた。BRDF は、ランバードモデルおよび Torrance-Sparrow モデルを用いた [11, 12]。表 1 に同 BRDF で設定した各パラメータを示す。この際、鏡の反射像は、投影のために照明を調整したことにより暗くなる。そこで、提案手法で得られた映り込み像に近くなるように、BRDF パラメータの反射率を一律に 1.5 倍に設定した。また、映り込み像の生成のためのレンダリング処理では、簡単のため、視点を (0,0,1) に固定し、注視点は投影対象の中心に設定した。

投影実験 — 図 8 に示すように RGB プロジェクタを配置し、投影を行った。この際、RGB プロジェクタは TK700STi を使用し、解像度を 3840 × 2160 に設定した。また、鏡を用いた手法では、投影環境の照明を鏡を撮像した環境に一致させて投影した。一方、遠赤外反

射像は照明の影響を受けないと考えられるため、暗環境で投影した。

5.2 定性評価

図 10 に、歪み補正処理のシミュレーション結果を示す。このように遠赤外反射をスフィアマッピングを用いて仮想環境で再現し、歪み補正が適切に機能することを確認した。

図 11, 図 12, 図 13 に、各手法で生成された映り込み像を示す。このように、鏡を用いた手法 [3] と映り込み再現結果を比較し、より簡易なシステムで同等の結果が得られることを確認した。

6 考察

歪み補正処理はシミュレーションによって検証された。しかし、現実空間の複雑な反射を完全に再現できていないことにより、実環境では補正が期待通りに機能しない可能性がある。

有色の導体の映り込み再現結果と、その他の質感の映り込み再現結果を比較すると、後者では特に現実空間の色が重要であること分かる。また、鏡を用いた反射像は投影環境の光量不足により暗くなる。さらに投影結果を比較すると、鏡を用いた手法ではコントラストが低下し、映り込み像や質感の色が不鮮明になることが確認された。

7 まとめ

本稿では、遠赤外反射像から可視光像を生成することにより、映り込みを再現する手法を提案した。予備実験では、可視光域で拡散反射性を示し遠赤外域で鏡面反射性を示す投影対象を、立体形状で検証した。また、従来手法との比較により、導体およびその他の質



図8 実験の様子. 左から順に, (a) 撮像の様子, (b) カメラのシステム構成, (c) 投影のシステム構成.

Fig. 8 Configuration of experiment system



図9 学習データの一部
Fig. 9 Train dataset

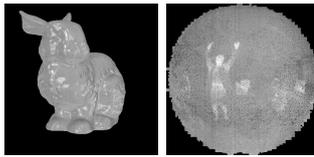


図10 歪み補正処理のシミュレーション結果.
(左) シミュレートした遠赤外反射像. (右) 歪み補正結果.

Fig. 10 Result of simulation

感の映り込み再現が可能であることを確認した.

参考文献

- [1] Grundhofer Anselm and Daisuke Iwai. Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications. *Computer Graphics Forum*, 2018.
- [2] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Midas projection: markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Transactions on Graphics*, 2018.
- [3] Christian Siegl, Matteo Colaianni, Lucas Thies, Justus Thies, Michael Zollhöfer, Shahram Izadi, Marc Stamminger, and Frank Bauer. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping. *ACM Transactions on Graphics*, 2015.
- [4] 田中法博, 望月宏祐, 禹在勇. 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法. *日本感性工学会論文誌*, 2010.
- [5] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. *ACM SIGGRAPH Emerging Technologies*, 2020.
- [6] Bennett and Porteus. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence. *Journal of the Optical Society of America*, 1961.
- [7] 石川陽菜, 渡辺義浩. 投影型拡張現実のための遠赤外

表1 BRDF で設定した質感パラメータ

	導体	誘電体
Roughness	0	0
Albedo	(0, 0, 0)	(0.39, 0.44, 0.68)
Frenel (0°)	(0.49, 0.34, 0.11)	(0.63, 0.63, 0.63)
	(0.28, 0.28, 0.28)	

域の反射像による映り込み再現の検討. 第72回複合現実感研究会, 2024.

- [8] Ned Greene. Environment mapping and other applications of world projections. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1986.
- [9] Yufei Xu, Jing Zhang, Qiming Zhang, and Dacheng Tao. ViTPose: Simple vision transformer baselines for human pose estimation. *36th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2022.
- [10] Zhen Zhu, Tengpeng Huang, Baoguang Shi, Miao Yu, Bofei Wang, and Xiang Bai. Progressive pose attention transfer for person image generation. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
- [11] Johann Lambert and Anding Heinrich. Lambert's photometrie: Photometria, sive, de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae (1760). *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, 1892.
- [12] Gerhard Meister, Rafael Wiemker, R. Monno, H. Spitzer, and A. Strahler. Investigation on the torrance-sparrow specular brdf model. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing*, 1998.

© 2025 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)



図 11 有色の導体の映り込み再現. (上) 提案手法による映り込み再現結果. 左から順に, (a) 遠赤外反射像, (b) 骨格推定結果, (c) 可視光反射像, (d) 映り込み像, (e) 投影による映り込み再現結果. (下) 鏡を用いた手法による映り込み再現結果. 左から順に, (c) 鏡の反射像, (d) 映り込み像, (e) 投影による映り込み再現結果.

Fig. 11 Reflection on colored metal



図 12 無彩色の導体の映り込み再現. 以下同様.

Fig. 12 Reflection on achromatic metal



図 13 誘電体の映り込み再現. 以下同様.

Fig. 13 Reflection on dielectric