

投影型拡張現実のための遠赤外域の反射像による 映り込み再現の検討

石川 陽菜^{*1} 渡辺 義浩^{*1}

Abstract – 本稿では、投影型拡張現実のための現実空間の映り込み再現手法を検討する。これまでに、投影型拡張現実を用いた現実空間の映り込みは、シーン内に置かれた半球面鏡を用いて実現された。一方、同手法では映り込む環境が暗い、シーン内に半球面鏡を置くことによる没入感の低下などが考えられる。本稿では、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物体の反射特性を用いて、遠赤外反射像による映り込み再現手法を提案する。実験では、遠赤外線カメラを用いて、映り込みの再現が可能な投影対象の素材の選定および本手法のシミュレーションを行った。

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ある。プロジェクションマッピング (PM) とも呼ばれており、近年では運動物体に適用するダイナミックプロジェクションマッピング (DPM) も新たに可能となった。PM 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、PM による様々な質感操作も報告されている [1]。特に、拡散反射素材の投影対象を鏡面反射素材に質感操作した際、その表面に周囲環境が映り込む様子の再現は、没入感を向上させる上で重要である。

映り込みを再現する手法として、パストレーシングを用いた DPM がある [2]。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低減することで、高いリアリティの映り込みを DPM において実現した。しかし同手法において、DPM 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かった。

このような現実空間の映り込みに関して、球面鏡を用いて、周囲の環境を撮像する手法が利用できる。例えば、投影対象の近くに球面鏡を置いて、同鏡に映った周囲環境の反射像を、DPM で利用した事例がある [3]。しかし、DPM におけるコントラスト低下を避けるために、環境光を暗くする必要があり、球面鏡の反射像が暗くなる問題がある。また、DPM の投影対象は、拡散反射素材であるため、周囲環境を捉えるために、球面鏡を別途配置する問題もある。

また、このような映り込みの再現は、PM 以外の拡

張現実においても重要視されている。映り込みの再現に向けて、周囲の環境画像を取得する様々な手法が提案されている。例えば、LeGendre らは、低ダイナミックレンジ (LDR) の限られた視野の環境画像から、高ダイナミックレンジ (HDR) の全方位の環境画像を推定する手法を提案した [4]。しかし、入力として、限られた視野の情報しか得られないため、視野外で動的に変化する人間などの映り込みを再現することは難しいと考えられる。

このような背景のもと、本稿では、DPM の投影対象から周囲環境の様子を直接捉える可能性を検討する。このために、遠赤外域の反射像に注目する。物体の反射は、その表面の粗さと入射光の波長の相対的なスケールに依存する [5, 6, 7]。したがって、可視光域では拡散反射の特性を示すが、遠赤外域では鏡面反射の特性を示す場合がある。

例えば、このような光の波長による反射像の違いを利用して、投影型非接触インタフェースを実現した事例がある [8]。同手法では、上述の特性を示す物体を用いて、可視光で映像を提示し、遠赤外反射像を用いてユーザの手による入力操作を認識した。これによって、スクリーンに向けて把持されたプロジェクタカメラのみで、提示・入力を実現することができる。

そこで、本稿ではこのような可視光域と遠赤外域の反射特性の違いを利用して、投影型拡張現実における現実空間の映り込みを再現する手法を検討する。具体的には、遠赤外域の投影対象表面の映り込みの反射像を、可視光のプロジェクションマッピングの映像に利用する可能性を検討する。特に、投影対象を観察する人間の映り込みに注目する。このような運動物体は、静止した周囲の環境物と異なり、予め取得することができず、リアルタイムに捉える必要がある。したがっ

^{*1}東京工業大学

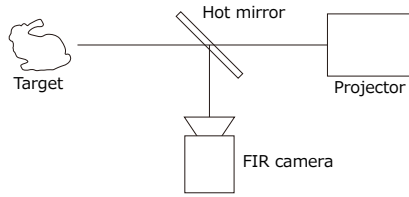


図1 システム構成
Fig.1 System configuration

て、このような反射像による観測が有効であると期待できる。しかし、遠赤外域には、可視光域の色を観測できない問題もある。今回は再現する素材を限定して、このような制限下における質感操作について検討した結果を報告する。

2 遠赤外域の反射像による映り込み再現手法

2.1 概要

前節で述べたように、DPMの投影対象として許容可能な拡散反射物体が、遠赤外域では鏡面反射性を示すことがある。同特性を利用することにより、環境の明るさに依らない反射像を、投影対象から直接捉えることができる。したがって本稿では、DPMにおける映り込み再現に、この遠赤外反射像を利用する手法を提案する。しかし、遠赤外域には、可視光域の色を観測できない問題がある。その問題を解決するために、再現する質感を導体に限定した手法を検討する。

システム構成を図1に示す。このように、可視光域で拡散反射物体でも、遠赤外域では鏡面反射性を示す特性を利用して、投影対象から周囲環境の様子を直接捉える。また、提案手法の流れを図2に示す。まず、遠赤外カメラで投影対象を撮像する。この際、投影対象は、可視光域で拡散反射性を示し、遠赤外域では鏡面反射性を示す動的な物体を用いる。次に、遠赤外反射像を用いて、導体表面の映り込みを再現する手法の詳細を次節に述べる。

2.2 導体の反射特性に基づく遠赤外反射像を用いた映り込み再現

導体は鏡面反射成分のみを持つ1色性の反射特性を持つ[9]。このような物体の鏡面反射成分は、大域照明の色と導体固有の色で構成される。しかし、大域照明の色は遠赤外反射像からは観測出来ない。一方、物体の反射率は、導体固有の色に依存する。例えば金色の導体は可視光域のうち、550 nmよりも大きい波長の光の反射率が高い[10]。したがって、大域照明の光の波長のうち、高波長域が長くなるため、導体固有の色に近い色として反射することがある。

そこで本稿では、導体固有の色を限定することで、遠赤外反射像の輝度のみを用いて反射像を疑似的に再現

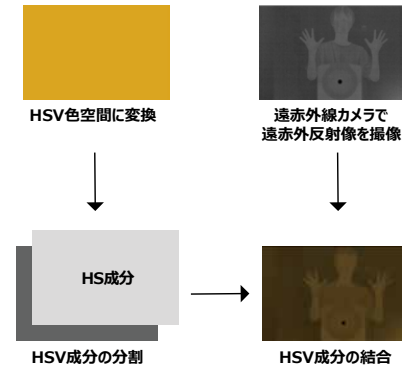


図2 手法概要図
Fig.2 Overview of our method

することを検討する。上記の特性に基づき、遠赤外反射像の輝度と導体固有の色を用いて、投影画像 I を次式のように記述する。

$$I_H(x, y) = M_H(x, y)$$

$$I_S(x, y) = M_S(x, y)$$

$$I_V(x, y) = \alpha M_V(x, y) + (1 - \alpha)F_V(x, y)$$

(x, y) は、それぞれ HSV 色空間における出力画像の HSV 成分を表す。HSV 色空間は、Hue (色相), Saturation (彩度), Value (明度) で表される色空間である[11]。 $M_H(x, y)$, $M_S(x, y)$, $M_V(x, y)$ は再現する導体固有の色の HSV 成分である。 (x, y) は画素座標、 $F_V(x, y)$ は遠赤外反射像の輝度である。また、遠赤外反射像は、人熱が熱源になるため、人間部分が白飛びする問題がある。このような問題を解決するため、例えばトーンカーブによるコントラスト補正が用いられる。

ここで、遠赤外反射像の輝度は、可視光の明度とは異なる物理量である。したがって、係数 α を用いて可視光域の反射像と近くなるように調整する。また、明度は色の明るさである。可視光域で撮像した導体の画像を HSV 成分に分解すると、ハイライト部分は V 成分にのみ乗ることが知られている[12]。ここで、ハイライトを光源の映り込みと捉えると、HSV 色空間のうち V 成分が映り込みの再現に適していると言える。

3 実験

3.1 投影素材の選定

投影対象の素材を選定するために、遠赤外線カメラを用いて、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素材を調査した。

上記の要件のうち1つ目の条件を満たす素材として、スチレン、発泡スチロール、セラミック、アクリルの4つの素材を調査した。これらの素材は、投影型拡張現実の投影対象として使用されたことのある素材である。

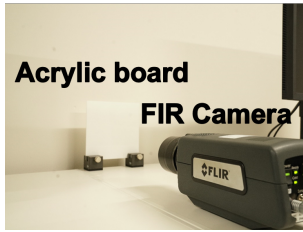


図3 実験の様子

Fig. 3 System configuration for experiment

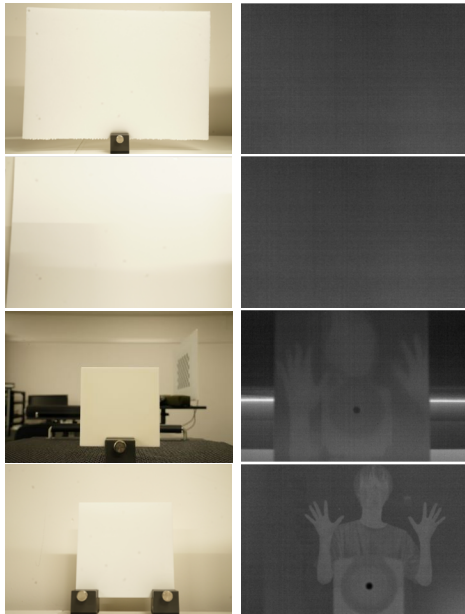


図4 各素材の遠赤外反射像。上から順に (a) スチレン, (b) 発泡スチロール, (c) セラミック, (d) アクリル。

Fig. 4 Far-infrared reflection image of each material. From the top, (a) Styrene, (b) Styrofoam, (c) Ceramic, (d) Acrylic.

実験の様子を図3に示す。このように配置した調査素材を、遠赤外線カメラで撮像した。遠赤外線カメラは、FLIR A6751を使用し、調査素材との距離は350 mmとした。解像度は 640×512 で、125.67 fpsで撮像した。また、 $-20^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ の温度を観測できる。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。

撮像結果を図4に示す。この結果より、セラミックとアクリルは遠赤外反射像がみられたのに対し、スチレン、発泡スチロールではみられないことを確認した。また、調査素材のうち、アクリルの遠赤外反射像が一番鮮明であることが分かった。一方、投影対象として用いられる素材の遠赤外線反射像では、大域照明のうち人間以外の放射のピーク波長が短いことにより、反射像がみられなかった。このことは、反射率が、粗さと放射の波長に依存することに起因する。

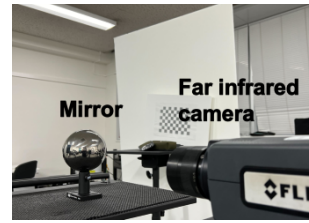


図5 実験構成. 遠赤外線カメラの配置。

Fig. 5 Experimental configuration. Experimental configuration of Far infrared camera.

3.2 導体の映り込み再現手法のシミュレーション

再現する導体の粗さを変更することにより、前節までに述べた色の不整合が知覚しづらくなる可能性がある。このことは、物体が粗さを持つ時、鏡面反射成分が、入射光の正反射方向の周りに、ある程度広がりを持って観測されることに起因する。したがって本実験では、再現する粗さの調整を検討した。粗さを調整することにより、遠赤外反射像から、導体の映り込みを本手法でどの程度表現できるか検証するために、遠赤外反射像を用いて本手法のシミュレーションを行った。

図5のように配置した直径100 mmの球面鏡を、遠赤外線カメラで撮像した。カメラと球面鏡との距離はレンズから約350 mmとし、球面鏡にピントを合わせた。遠赤外線カメラは、前節と同じものを用いた。また、実験に用いる全ての画像は、 512×512 に切り抜きした。試した導体固有の色は、金色、銀色、銅色とした。球面鏡でセンシングする環境は、図6に示すように、自分の姿を含めたものとする。また、遠赤外反射像における明るさの偏りを低減するために、コントラスト補正としてPlateau histogram equalization (PE)を適用した。また、トーンカーブ補正により、前節で述べた人間が白飛びする問題の解決を図った。

ブレンディングする導体材料を図7に示す。図7のうち材料は、設定するパラメータとしてRoughnessを0.4とし、ベースカラーを金 (R: 227, G: 171, B: 0)、銀 (R: 201, G: 202, B: 202)、銅 (R: 186, G: 110, B: 64)とした。

実験結果を図7に示す。上段がブレンディングした材料、下段が映り込み再現結果である。この結果から、ブレンディングする導体の粗さを調整することにより、遠赤外反射像を用いた映り込み再現が可能であると考えられる。

4 考察

本手法では、投影対象が動くことによる映り込み像の変化は再現できるが、観測視点が動くことによる映り込み像の変化を再現出来ない。また、遠赤外反射像

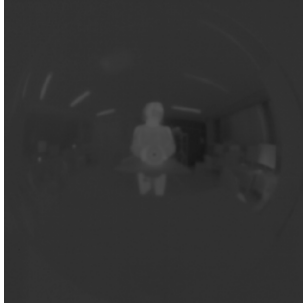


図6 遠赤外線カメラで撮像した球面鏡画像.
Fig. 6 Spheric mirror image captured by FIR camera.

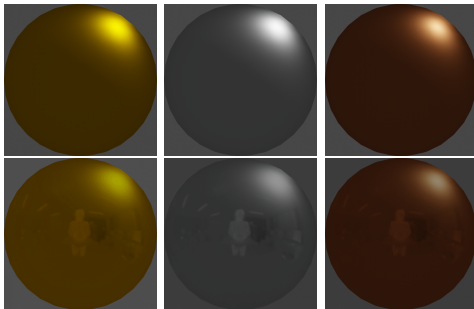


図7 導体の映り込み再現. 上段: 再現する導体のマテリアル. 下段: 提案手法による映り込み再現結果. 左から順に (a) 金色, (b) 銀色, (c) 銅色.
Fig. 7 Reflection Reproduction by proposed method. From left to right: (a) gold, (b) silver, (c) copper.

は可視光域の情報ではないことを考慮しなければならない。例えば、遠赤外線画は、温度差がない箇所や色情報が欠落している。したがって、よりリアルな映り込みの再現には、あらかじめ撮像できる可視光の情報を用いた、遠赤外反射像のRGB補正が必要である。また、本手法において、再現する導体の粗さに対して、遠赤外反射像をぼかしていないため、粗さは整合していない。したがって、粗さの整合性のあるシステムを設計することを今後の課題とする。

5 まとめ

本稿では、投影型拡張現実のための遠赤外反射像による映り込み再現手法を提案した。本手法は、投影型拡張現実における質感再現手法として応用可能である。実験により、投影対象の条件を満たす素材を確認した。また、再現する質感を限定することにより、本手法で遠赤外反射像を映り込みの再現に用いることができる可能性を示した。

参考文献

- [1] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Midas projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 6, dec 2018.
- [2] Takashi Nomoto, Ryo Koishihara, and Yoshihiro Watanabe. Realistic dynamic projection mapping using real-time ray tracing. In *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '20, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [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 Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 6, nov 2015.
- [4] Chloe LeGendre, Wan-Chun Ma, Graham Fyffe, John Flynn, Laurent Charbonnel, Jay Busch, and Paul Debevec. Deeplight: Learning illumination for unconstrained mobile mixed reality. In *ACM SIGGRAPH 2019 Talks*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [5] H. E. Bennett and J. O. Porteus. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 51, No. 2, pp. 123–129, Feb 1961.
- [6] Michael Vollmer, Sascha Henke, Detlef Karstädt, and Frank Pinno. Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging. 2004.
- [7] Philippe Spiga, Gabriel Soriano, and Marc Sallard. Scattering of electromagnetic waves from rough surfaces: A boundary integral method for low-grazing angles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 7, pp. 2043–2050, 2008.
- [8] Alireza Sahami Shirazi, Yomna Abdelrahman, Niels Henze, Stefan Schneegass, Mohammadreza Khalilbeigi, and Albrecht Schmidt. Exploiting thermal reflection for interactive systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, p. 3483–3492, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [9] 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*, Vol. 9, No. 2, pp. 311–321, 2010.
- [10] Takao Yamaguchi, Masaaki Yamamura, Imao Nagasaka, Naoyuki Ohnishi, Daizou Nakai, and Hisashi Mizui. The spectral emissivity of color metals in pure and oxidized states. *Journal of the Japan Institute of Metals*, Vol. 62, No. 12, pp. 1197–1203, 1998.
- [11] Adrian Ford and Alan Roberts. Colour space conversions. 1998.
- [12] Dahai Yu, Junwei Han, Xing Jin, and Jungong Han. Efficient highlight removal of metal surfaces. *Signal Processing*, Vol. 103, pp. 367–379, 2014. *Image Restoration and Enhancement: Recent Advances and Applications*.