

透過型2面直交リフレクタを用いた反射特性の効率的な獲得

木村 充志^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)}

概要：物体表面の反射特性を記述する双方向反射率分布関数 (BRDF) は、入射光と出射光の両方向に依存する4次元の関数であるため、その効率的な計測は課題である。本稿では、透過型2面直交リフレクタを用いたBRDFの効率的な計測法を提案する。透過型2面直交リフレクタは、2層のマイクロミラーアレイからなるプレートで、プレートの片側にある点光源から様々な方向に放たれた光が、反対側の面对称な位置で再び一点に交わる性質を持つ。提案手法では、2面直交リフレクタとプロジェクタ-カメラシステムからなる装置により、入射光の方向を機械的な回転・並進を伴わずに制御するとともに、多方向への出射光の明るさを一度に捉える。実際に試作機を作製して計測した結果を報告する。

キーワード：コンピュータショナルフォトグラフィ、プロジェクタ-カメラシステム、BRDF

1. はじめに

不透明物体の反射特性は、双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF) で記述される。BRDFは入射光と反射光の両方向に依存する4次元の関数である。そのため、光源と光度計を各々2軸で機械的に回転させながら反射光強度をサンプリングするという素朴なBRDFの計測手法は、膨大な計測時間を要する。

この課題に対し、一様な反射特性を持つ球や円筒をカメラで撮影し、様々な光源・観測方向における反射光強度をまとめて獲得する計測法 [1] やプロジェクタ、カメラおよび楕円体状の鏡面を用いて光源方向を高速に制御し、様々な観測方向への反射光強度を一度に獲得する計測法 [2] が提案されている。

本研究では、透過型2面直交リフレクタ (Transmissive Dihedral Corner Reflector Array: TDCRA) を用いた計測法を提案する。2面直交リフレクタは2層のマイクロミラーアレイからなるプレートで、プレートの片側にある点光源から様々な方向に放たれた光が、反対側の面对称な位置で再び一点に交わる性質を持つ。本手法では、プロジェクタ、カメラおよび2面直交リフレクタを組み合わせることで入射光の方向を機械的な回転機構を伴わずに制御するとともに、様々な方向への反射光強度を一度に捉える。

本手法は、従来手法のように形状が既知で反射特性が一

様な試料 [1] や楕円体状の鏡面 [2] を作製する必要がない。また、本手法は、拡張現実・複合現実の分野で投影を目的として利用されてきた2面直交リフレクタ [3][4] を、新たにセンシングに応用するものである。

2. 関連手法

最も基本的なBRDFの計測法は、試料に対して光源と光度計を機械的に回転させながら反射光強度をサンプリングする方法である。Liら [5] は、ロボットアームや回転ステージなどにより光源や光度計、試料などを機械的に回転させるゴニオリフレクトメータを用いて計測を行った。しかし、この手法は1回につき1つの光源・観測方向の組をサンプリングするため、多くの計測回数を要する。また、機械的な回転機構を有することからfpsの向上が難しく、その結果、膨大な計測時間を要する。

これに対し、Marschnerら [1] は、一様な反射特性を持つ球や円筒をカメラで撮影し、一度に多くの光源・観測方向の組をサンプリングすることで計測回数を大幅に削減した計測法を提案している。また、Mukaigawaら [2] は、楕円体状の鏡面がもつ光学的な特性を活かして仮想的にプロジェクタとカメラを半球状に配置することで、機械的な回転機構を用いない計測法を提案している。

提案手法では、2面直交リフレクタと呼ばれる光学系とプロジェクタ-カメラシステムを組み合わせて計測を行う。本手法は、従来手法のように形状が既知で反射特性が一様な試料 [1] や楕円体状の鏡面 [2] を作製する必要がない。

2面直交リフレクタは、主に拡張現実・複合現実の分野で投影を目的として利用されている。例えば、遮蔽があっ

¹ 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻
² 九州工業大学大学院情報工学府知能情報工学研究系
^{a)} kimura.atsushi178@mail.kyutech.jp
^{b)} okabe@ai.kyutech.ac.jp

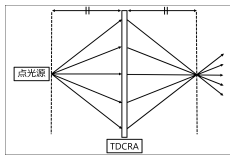


図 1: TDCRA の特性

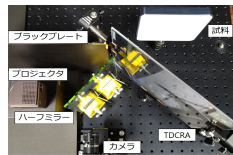


図 2: 計測装置

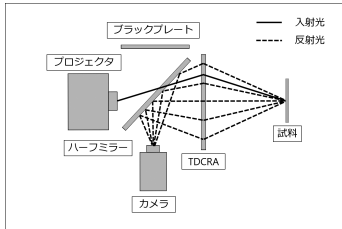


図 3: 計測装置の概念図

でも影ができにくいプロジェクションマッピング [3] や遮蔽の背後の像を映し出すディスプレイ [4] などに応用されている。一方で、提案手法では、2面直交リフレクタを新たにセンシングに応用する。

3. 提案手法

2面直交リフレクタは2層のマイクロミラーアレイからなるプレートで、図1に示すように、プレートの片側にある点光源から多方向に放たれた光が、反対側の対称な位置で再び一点に交わる性質を持つ。したがって、点光源の位置にプロジェクタ、点光源と対称な位置に試料を配置すれば、プロジェクタの出射角と同角度の入射角で試料を照明できる。また、点光源と対称な位置にカメラを配置すれば、点光源から様々な出射角で放たれた光を、2面直交リフレクタで屈折させた後にカメラで一度に捉えることができる。

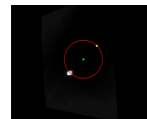
図3に計測装置の概念図を示す。ある出射角でプロジェクタから放たれた光は、2面直交リフレクタで屈折し、同角度の入射角で試料を照射する。入射光は試料の表面で反射し、その反射光は2面直交リフレクタおよびハーフミラーで屈折した後、カメラの撮像素子に捉えられる。本手法は、レーザ走査式プロジェクタを用いて照明方向を切り替え、様々な観測方向への反射光をカメラで一度に捉えるため、高速にBRDFを計測できる。

本手法では、プロジェクタやカメラの幾何学的な較正に加え、試料の法線方向の推定や放射照度・放射強度の較正を行う必要がある。試料の法線方向は、平面鏡を試料として捉えた反射光と別途捉えた入射光の中間の画像座標を法線方向とすることで推定する。また、放射照度・放射強度は、拡散反射板を試料として、放射照度が入射角余弦則を、放射強度がランバートの余弦則を満たすように画素ごとに補正係数を乗じることで較正する。

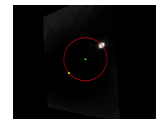
4. 実験

4.1 システムの構築

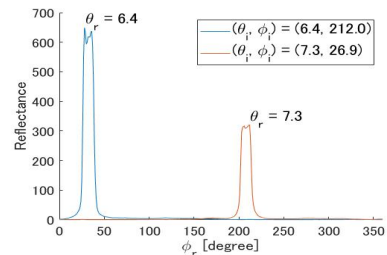
プロジェクタ、カメラおよび2面直交リフレクタなどで



(a) 反射光強度 1

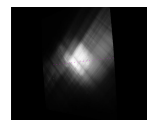


(b) 反射光強度 2

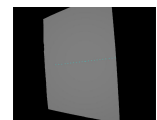


(c) 反射率

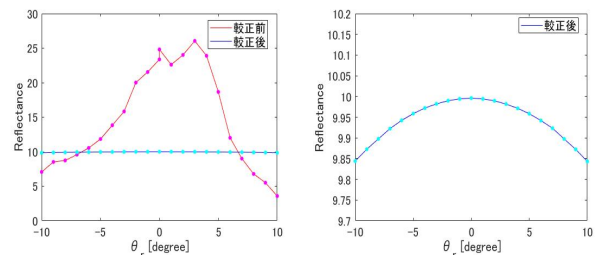
図 4: 法線方向の推定



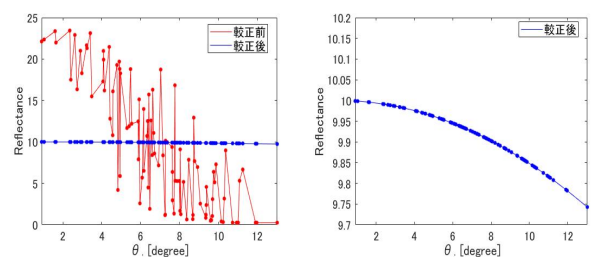
(a) 較正前の反射光強度



(b) 較正後の反射光強度



(c) 放射強度補正前後の反射光強度。右は較正後の拡大



(d) 放射照度補正前後の反射光強度。右は較正後の拡大

図 5: 放射照度および放射強度の較正

構成される計測装置の試作機を作製した(図2)。図3とは異なり、2面直交リフレクタに対してプロジェクタと試料をそれぞれ45度だけ傾けて配置している。これは、2面直交リフレクタを通して実際に観測される4つの像の内、図1に示す特性を満たす像だけを観測するためである。

4.2 試料の法線方向の推定

図4(a), (b)は、平面鏡を試料として、それぞれ光源方向 (θ_i, ϕ_i) : (6.4, 212.0), (7.3, 26.9) [度]から照明したときの反射光強度画像である。図4(a), (b)を含む、光源方向が異なる

る複数枚の反射光強度画像において、反射光の位置と別途捉えた入射光の位置 (図中、黄点) の中間の画像座標をそれぞれ求め、その重心を試料の法線方向とした (図中、緑点)。また、図 4(a), (b) において観測方向 $\theta_r = \theta_i$ (図中、赤円) への反射光強度をプロットしたものが図 4(c) である。図 4(c) に示す結果より、反射光強度は正反射方向付近で最大、その他の方向で 0 に近い値となっていることから、試料の法線方向を推定できていることが確認できる。

4.3 放射照度・放射強度の較正

図 5(a) はある光源方向から拡散反射板を照明した時の反射光強度画像であり、入射角余弦則およびランバートの余弦則を満たすように画素ごとに求めた補正係数を乗じた反射光強度画像が図 5(b) である。また、図 5(a), (b) において観測方向 ϕ_r : 0, 180 [度] (図中、赤点・青点) への反射光強度をプロットしたものが図 5(c) である。さらに、図 5(d) は光源方向を変えて同様に獲得した反射光強度画像において、観測方向 θ_r : 0 [度] (法線方向) への反射光強度をプロットしたものである。図 5(c), (d) に示す結果より、光源方向・観測方向に応じて放射照度・放射強度を較正できていることが確認できる。

4.4 BRDF の計測

図 6(a) に示すテープを試料として BRDF を計測した。図 6(b), (c) はそれぞれ光源方向 (θ_i, ϕ_i) : (8.2, 241.0), (8.8, 20.5) [度] から照明したときの反射光強度画像である。また、図 6(b), (c) において観測方向 $\theta_r = \theta_i$ (図中、赤円) への反射光強度をプロットしたものが図 6(d) である。試料は鈍い鏡面反射が視認できるテープであるため、反射光強度は正反射方向付近で最大となり、ある程度拡がりをもつ。図 6(d) に示す結果より、本システムは概ねその性質を捉えていることが確認できる。

つづいて、図 7(a) に示すサテンを試料として BRDF を計測した。図 7(b), (c) はそれぞれ光源方向 (θ_i, ϕ_i) : (6.3, 105.6), (3.5, 315.8) [度] から照明したときの反射光強度画像である。また、図 7(b), (c) において観測方向 $\theta_r = \theta_i$ (図中、赤円) への反射光強度をプロットしたものが図 7(d) である。試料のサテンは拡散反射と鏡面反射の強度差が小さいため、ある程度の強度をもつ反射光が全体的に観測されると考えられる。図 7(d) に示す結果より、確かに正反射方向だけでなく、その他の方向でも反射光が観測されていることが分かる。本システムは鏡面反射と拡散反射を同時に捉えることができています。

5. まとめ

本稿では、2 面直交リフレクタとプロジェクタ-カメラシステムからなる装置により、効率的に BRDF を計測する手法について提案した。今後は、ノイズの抑制や計測の高速

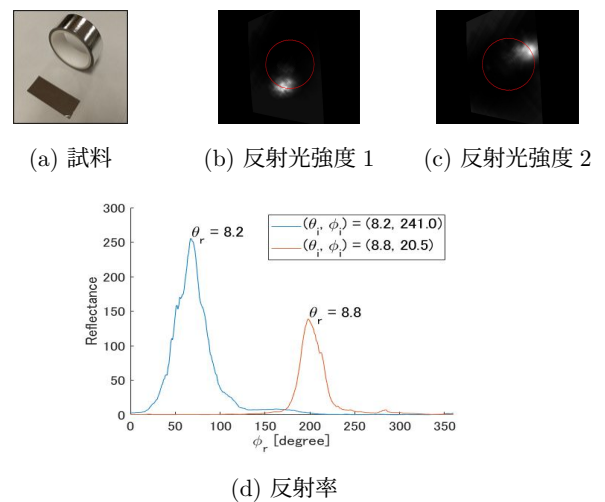


図 6: テープの計測結果

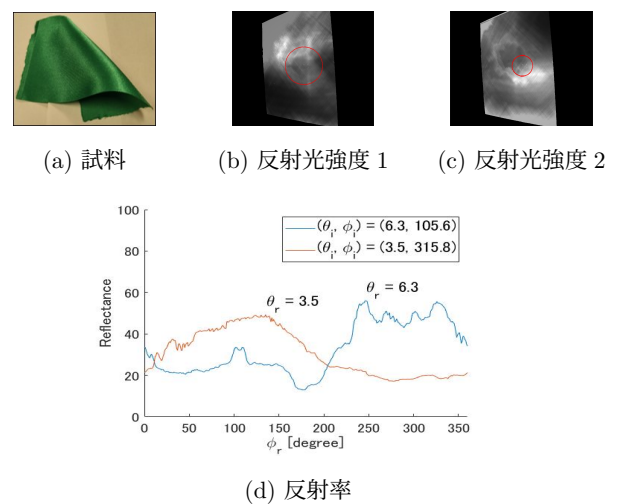


図 7: サテンの計測結果

化のため投影パターンへの工夫に取り組みたい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766, および JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] S. Marschner, S. Westin, E. Lafortune, and K. Torrance, "Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement", *Applied Optics*, Vol.39, No.16, pp.2592–2600, 2000.
- [2] Y. Mukaigawa, K. Sumino, and Y. Yagi, "Rapid BRDF measurement using an ellipsoidal mirror and a projector", *IPSSJ TCVA*, Vol.1, pp.21–32, 2009.
- [3] K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon, and K. Sato, "Shadowless projector: suppressing shadows in projection mapping with micro mirror array plate", *In Proc. IEEE VR2019*, pp.1309–1310, 2019.
- [4] T. Aoto, Y. Itoh, K. Otao, K. Takazawa, and Y. Ochiai, "A design for optical cloaking display," *In Proc. ACM SIGGRAPH2019 Emerging Technologies*, Article No.3, 2019.
- [5] H. Li, S. Foo, K. Torrance, and S. Westin, "Automated three-axis goniorelectometer for computer graphics applications", *Proc. SPIE*, Vol.5878, pp.221–231, 2005.