

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11954

研究課題名（和文）曲面における光反射特性の計測手法の確立と文化財アーカイブへの応用

研究課題名（英文）Establishment of a method for measuring optical reflection characteristics on curved surfaces and its application to cultural heritage archives

研究代表者

井上 信一（Inoue, Shinichi）

東京工芸大学・工学部・客員研究員

研究者番号：70743813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：質感に影響を与える光沢において、物理的な光反射特性（BRDF、光沢ムラ）の新しい計測技術の開発を行った。成果として、従来計測が困難であった曲面において、これをパラボロイド（放物面）の反射と考え、集光照明を導入した曲面のBRDF計測技術を開発した。また、光沢ムラが光の角度で異なって見える現象を解析するために、角度分解能の高い変角光沢ムラ計測技術を開発した。これらは測定装置として試作機開発まで進めた。新たな光反射特性（BRDF、光沢ムラ）が数値で計測できるようになった。これらBRDFおよび光沢ムラと知覚の関係を実験で解析した。文化財アーカイブ、CGへ活用することを検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光沢は人間の知覚である質感に大きな影響を与える。このため光沢は重要な品質特性として産業界で広く計測評価されてきた。本研究により、新たに曲面のBRDF計測技術が開発されたこと、角度分解能の高い変角光沢ムラ計測技術が開発されたことは、産業界においては品質管理、製品開発において従来は人間に頼っていた評価を数値化できる可能性がある。さらに、仏像のような光沢を有する文化財の光反射特性をアーカイブとして残すことが可能となる。学術的には、人間が素材に対する高級感のように、従来解析する上で計測できなかった光沢についての新たな情報が数値化できるようになる。

研究成果の概要（英文）：We developed a new measurement technology for physical light reflection characteristics (BRDF, gloss unevenness), which affects gloss, which affects texture. As a result, we developed a BRDF measurement technique for curved surfaces that was difficult to measure conventionally by considering this as a reflection of a paraboloid, and using condensed lighting. Additionally, in order to analyze the phenomenon in which gloss unevenness appears differently depending on the angle of light, we have developed a variable angle gloss unevenness measurement technology with high angular resolution. We proceeded to develop a prototype of these as measuring devices. New light reflection characteristics (BRDF, gloss unevenness) can now be measured numerically. The relationship between these BRDFs, gloss unevenness, and perception was analyzed through experiments. We considered using it for cultural property archives and CG.

研究分野：視覚情報工学

キーワード：BRDF 光反射特性 曲面 光沢 光沢ムラ 質感

1. 研究開始当初の背景

物体の見えを科学的に定量化する研究が広く進められてきた。人間が物体の質感を認識する際に強く影響を与える光沢感も、光反射現象として精緻な解析が進められている。光沢は物理的には光反射特性の知覚であり、光反射特性は双方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) として計測できる。最近では、光の入射角と反射角の相互の光反射を分布して詳細に表す BRDF を用いた計測、記録が進められている。BRDF はコンピュータグラフィックス (CG) における光反射特性として用いられるため、CG 活用の発展に伴ってその計測手法も重要な学術的対象として進められている (図 1)。

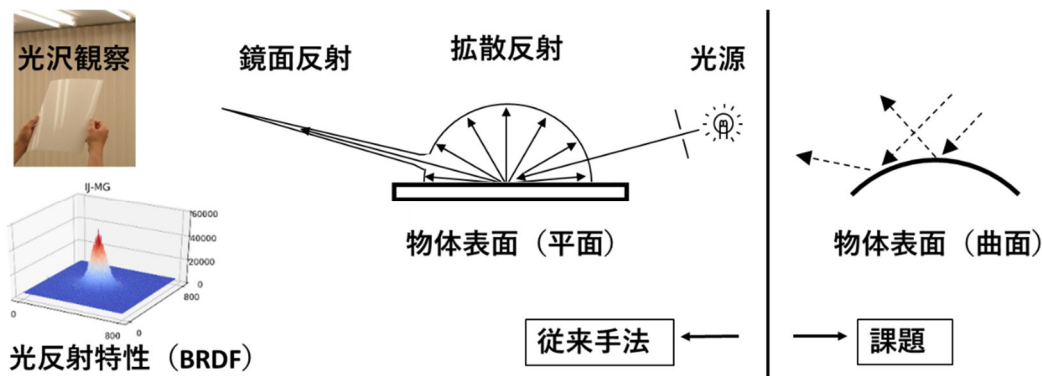


図 1 課題．光沢は鏡面反射現象であり、光反射角度分布 (BRDF) として計測できるが、物体表面が曲面の場合、精度よく計測できなかった。

当初の BRDF 計測は、反射角度毎に測定器を繰り返し移動させて行うゴニオフォトメーターによる計測手法であった。最近では、レーザー光等の反射光をエリアセンサーにより一度に反射角度分布として測定する計測技術が実用化されている[1]。我々もコリメーター光学系の特徴を原理とする BRDF 計測技術を開発した[2]。しかしながら、従来の BRDF 計測技術では、測定されるサンプルの表面は平面であることが必要である。計測光が照射される物体表面の計測エリアは、例えば 5 mm の面積を有し、物体表面が曲面であるとその曲面の角度が、反射光の角度に影響してしまう。曲面を有する形状の物体における光反射特性の計測技術には課題が多く残されていた。

2. 研究の目的

本研究では、曲面を有する形状の物体においても計測可能な光反射特性の新たな計測手法の確立を目的とした。光沢は重要な品質特性として産業界で広く計測評価されてきた。材料メーカーでは平面のサンプルでその材料の BRDF 計測が行われるが、製品の多くは曲面の形状を有する。さらに、仏像のような光沢を有する文化財の光反射特性をアーカイブとして残すには、非破壊・非接触かつ可搬な計測技術が要求される。本研究では、物体表面の曲面ジオメトリと光反射特性を同時に計測し、その物体の面における BRDF を推定する技術確立に挑戦した。本研究により、曲面を有する形状の物体においても光反射特性 (BRDF) の計測が可能となり、クルマや家電といった産業の多くの分野の品質評価に変革を及ぼすことが期待できる。さらに、文化財アーカイブに適用することで貴重な情報を後世に残すことが可能となる。

3. 研究の方法

最初に曲面の BRDF を計測する方法を研究した。この計測原理に基づく曲面の BRDF 計測実験を行い技術確立した。得られた知見から光沢ムラの計測に展開した。測定対象として、産業財、文化財を考慮して、文化財アーカイブに適用、CG への活用を検討した。これらに平行して、光反射特性、BRDF や光沢ムラ、の違いが人間の知覚に及ぼす影響について解析した。

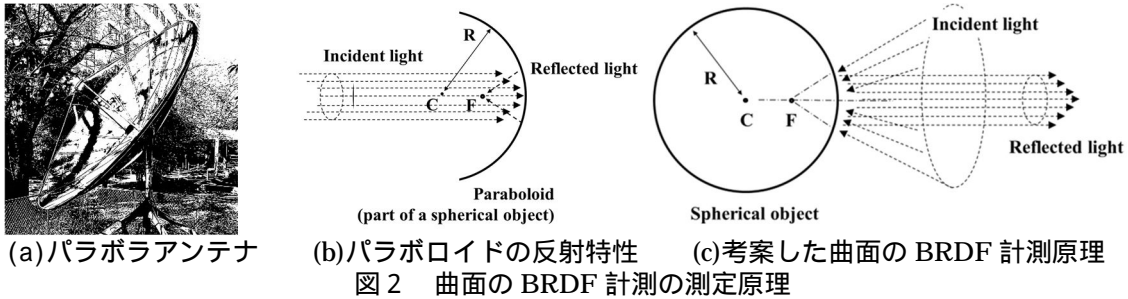
4. 研究成果

本研究の成果を 4 点にまとめて報告する。

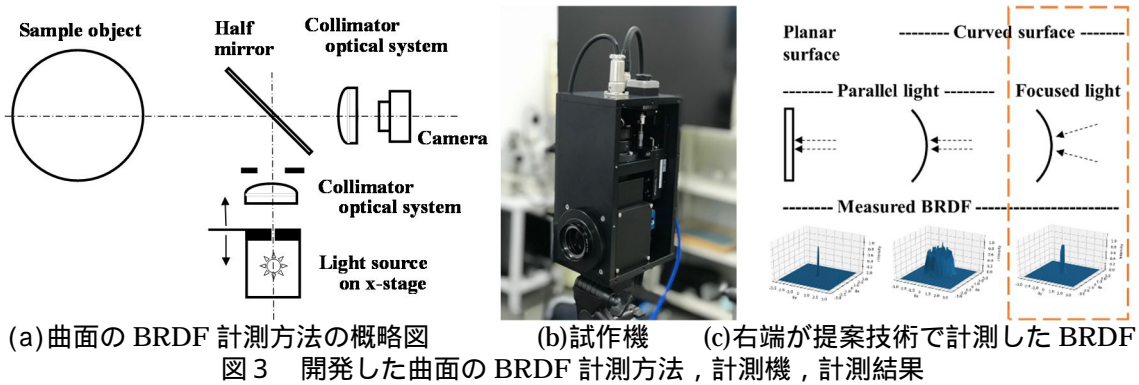
(1) 曲面の BRDF 計測技術の開発

曲面の形状と光反射特性 (BRDF) を同時に計測できる計測原理の確立に取り組んだ。この結果、パラボラアンテナとして知られるパラボロイド (放物面) の反射特性 (図 2 a, b) を応用した計測原理を考案した (図 2 c)。測定対象の曲面は、局所的にはパラボロイドと考えられる。パラボロイドの凸側からパラボロイドの焦点 (F) に向けて集光する光を当てると、反射光は平行光として反射する特性に着目した。この平行光となるはずの反射光からの反射角度のズレの分布が BRDF である。平行光からのズレの計測技術は既に確立できている[2]。この照射光を集光

する機構を組み込み、曲面の BRDF 計測の計測原理とし実験によりこれが機能することを確認した。



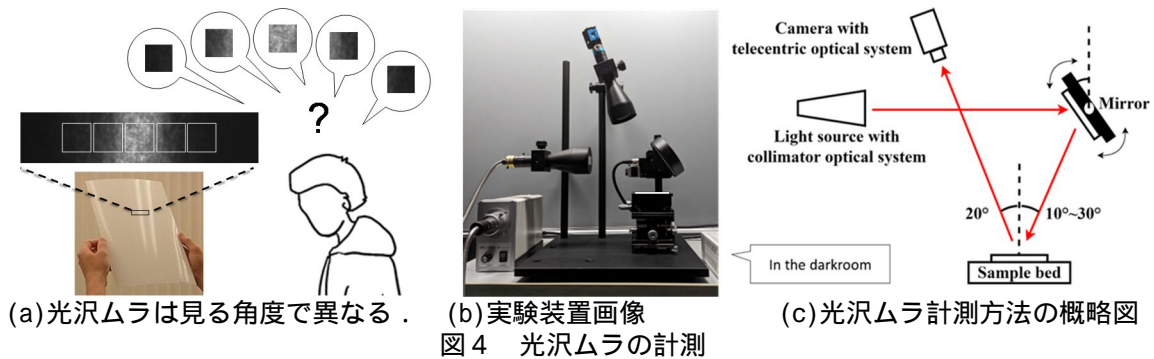
パラボロイドの曲面を球体の一部と考えると、この計測原理では曲面の形状も曲率 (R) として測定できる。この新しい計測原理を用いれば、光反射特性 (BRDF) と物体の形状 (曲率 R) が同時に計測できる。



研究成果として、特許 2 件取得、国際学会で 1 件発表、国際学術誌に 1 報掲載された(添付資料)。また、試作機を開発した。

(2) 光沢ムラ計測技術の開発

光反射現象としての光沢を BRDF で解析する中で、新たな課題がわかってきた。光沢の平均的な特性に加えて、観察者は光沢のムラに注目することである。光沢ムラとは、ハイライト領域内で観察される反射光の強度分布、すなわちバラツキである。ただし、ハイライト領域内のみ存在し、入射光角度によって見え方が異なるため、簡単に解析することはできなかった(図 4 a)。上記 BRDF の計測技術にテレセントリック光学系のカメラシステムを導入し、角度分解能 0.02° で角度を変更できる光沢ムラ測定装置を開発した(図 4 b, c)。これを用いて、鏡面反射の光沢ムラと BRDF をあわせて計測できる計測技術を開発した。



高い角度分解能を使用して、鏡やプラスチックなどの高光沢素材や、フォトライクなインクジェット用紙、コート紙などの光沢のある素材を測定および解析した。結果から、正反射角の中心からわずかに外れた角度で光沢ムラの大きさが最も大きくなることが解った(図 5)。

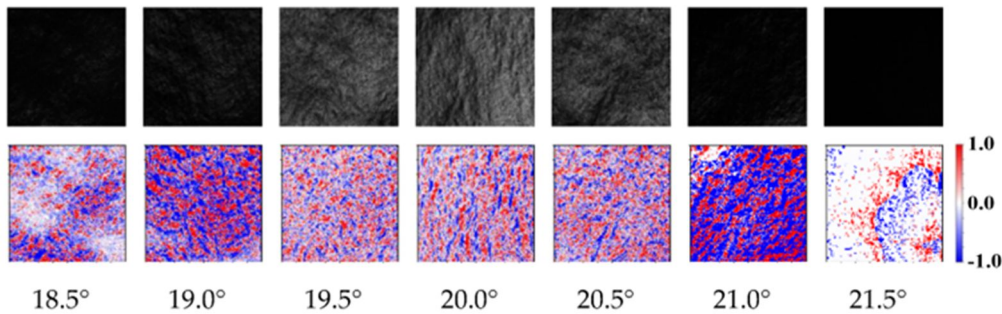


図5 インクジェット用紙の光沢ムラ（撮影画像とカラースケール表示）．
入射光角度の違いによる計測角度 20.0 度の光沢ムラ．

さらに、光沢ムラの計測技術として、入射光の角度を変化する機構をさらに2つ考案し実験を行った。ひとつは、半球状のレールに光源を設置して角度を変える機構。もうひとつは、入射光を生成するコリメーター光学系の点光源を移動することで入射光の角度を変える機構である。どちらも研究をまとめて学会で発表した。

研究成果として、国際学術誌に3報掲載、国内学会で2件発表した（添付資料）。

（3）光反射特性計測の文化財アーカイブ、CGへの活用

文化財の光沢情報のアーカイブ技術を検討した。多くの文化財は劣化が進み均一な光沢面であることを前提とすることは難しい。本研究では、金の光沢に着目し、テレセントリック光学系を応用し、広い範囲の面の反射光を位置毎の分布情報として記録する技術を適用した。提案手法は文化財のように光沢ムラが大きい対象でも、約30×30 mmの面の各位置のBRDF（双方向反射率分布関数）と光沢ムラをアーカイブ可能であることを示した。

さらに、光沢ムラを測定する技術に着目し、鏡面材料、特に魔鏡（Japanese magic mirror）の解析について報告した。輝きを持った鏡面が特徴である文化財や美術品は多い。これら鏡面の見えをアーカイブするために、異なる3方向から照明し、光沢ムラ画像を一度に測定する装置を開発した。魔鏡においては目視では観察できない像がはっきりと測定できることを確認した。今後は、光沢ムラから表面形状を推定しCGとして再現したい。

CGで実物体の光沢を再現するためのレンダリングに用いるデータであるBRDFが曲面においても計測できる技術を開発した点は今回の成果である。文化財のように取り扱いの難しい物体においても計測できるように、大きめのビデオカメラ程度の試作機も開発した。また、研究の中で得た知見として、光沢ムラが質感情報として重要なことから主に文化財アーカイブの情報として光沢ムラをターゲットとした研究を進めた。

研究成果として文化財アーカイブについて学会発表2件を行った（添付資料）。

（4）光反射特性と知覚の関係の解析

光反射特性として、BRDF、光沢ムラが計測できるようになったことを受けて、これらと人間の知覚との関係を解析した。

この研究では、光源から物体表面までのさまざまな距離および照度における人間の紙の光沢知覚を調べた。光沢は反射光の強さだけでなく、鏡面ハイライトの鮮明さ（BRDF）にも基づいて評価される。これらの光沢評価にも使用される反射光源像の見かけの広がり、光源から物体表面までの距離に依存することが解っている[3]。鏡面画像特性の物理的変化とは異なり、光沢の知覚は色の知覚と同様の恒常性を示す場合も考えられる。我々の結果は、照度が光沢の知覚に強い影響を与えることを明らかにした。低光沢のサンプルが高光沢のサンプルよりも光沢があるように見えるケース、つまり光沢反転現象も見つかった。この結果は、光沢の恒常性が機能しない場合があることを示唆している。

また、同一グレードの印刷用紙（A2コート紙）の製造会社の違いをBRDFと光沢ムラから解析してみた。さらに、製造会社による紙品質の違いはごく僅かであるが、専門家は識別できることに着目し、コントラクティブラーニング（AI）で学習させて自動識別を試みた。この結果は専門家には及ばないものの自動識別の可能性を示した。

研究成果として、国際学会で1件発表、国際学術誌に2報掲載、国内学会で2件発表した（添付資料）。

<引用文献>

1. Leloup, F.B.; Obein, G.; Pointer, M.R.; Hanselaer, P. Toward the soft metrology of surface gloss: A review. *Color Res. Appl.* **2014**, *39*, 559–570.
2. S. Inoue and N. Tsumura, “Point Spread Function of Specular Reflection and Gonio-Reflectance Distribution,” *J. Imaging Sci. Technol.* *59* (1), 010501-1 - 010501-10 (2015).
3. S. Inoue and N. Tsumura, “Effect of light source distance on apparent gloss unevenness,” *OSA Continuum* *4*, 720-731 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Zhu Xiaoyi、Inoue Shinichi、Sato Hiromi、Mizokami Yoko	4. 巻 39
2. 論文標題 Effect of light source distances and illuminances on the gloss perception of papers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 B28 ~ B28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/josaa.450094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Shinichi、Igarashi Yoshinori、Hoshi Takeyuki、Tsumura Norimichi	4. 巻 1
2. 論文標題 Measuring BRDF for curved surfaces based on parabolic reflection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Continuum	6. 最初と最後の頁 1637 ~ 1637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OPTCON.453077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 X.Y. Zhu , S. Inoue , H. Sato , Y. Mizokami	4. 巻 -
2. 論文標題 EFFECT OF LIGHT SOURCE DISTANCE ON THE DISCRIMINATION AND GLOSS PERCEPTION OF PAPER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Commission on Illumination, CIE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.25039/x48.2021.o	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura So、Inoue Shinichi、Igarashi Yoshinori、Hoshi Takeyuki、Sato Hiromi、Mizokami Yoko	4. 巻 30
2. 論文標題 Measurement of Gloss Unevenness with Different Reflection Angles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Color and Imaging Conference	6. 最初と最後の頁 63 ~ 68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2352/CIC.2022.30.1.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Inoue Shinichi, Igarashi Yoshinori, Hoshi Takeyuki, Satoh Toshifumi	4. 巻 4
2. 論文標題 Measuring Method for Gloss Unevenness with Three Directional Lights	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 London Imaging Meeting	6. 最初と最後の頁 25 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/lim.2023.4.1.07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 So Nakamura, Shinichi Inoue, Yoshinori Igarashi, Hiromi Sato, Yoko Mizokami	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis of Gloss Unevenness and Bidirectional Reflectance Distribution Function in Specular Reflection	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Imaging	6. 最初と最後の頁 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jimaging10060146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 中村颯 , 井上信一 , 佐藤弘美 , 溝上陽子
2. 発表標題 光沢ムラ画像の識別における入射光角度条件の影響
3. 学会等名 日本視覚学会 2024年冬季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takechiyo Kaai, Noriko Yata, Yoshitsugu Manabe, Shinichi Inoue
2. 発表標題 Study of Classification of Coated Paper Brands Using Gloss Images by Contrastive Learning
3. 学会等名 IWAIT 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 五十嵐美範 , 井上信一 , 佐藤利文
2. 発表標題 3方向同時照明によるワンショット光沢ムラ測定
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan (OPJ)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上信一 , 五十嵐美範 , 機株式会 , 佐藤利文
2. 発表標題 光沢ムラ測定による魔鏡の解析
3. 学会等名 日本文化財科学会第40回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村颯 , 井上信一 , 佐藤弘美 , 溝上陽子
2. 発表標題 光沢情報が紙の判別と印象に与える影響
3. 学会等名 日本視覚学会 2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上信一 , 中村颯 , 五十嵐美範 , 星武幸 , 佐藤弘美 , 溝上陽子
2. 発表標題 テレセントリック光学系を用いた金の光沢ムラ測定
3. 学会等名 日本文化財科学会第39回大会 2022年9月11日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上信一， 五十嵐美範， 星武幸， 矢田紀子， 溝上陽子
2. 発表標題 視覚に近い光沢ムラの測定と表示方法
3. 学会等名 情報処理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上信一， 五十嵐美範， 星武幸， 津村徳道
2. 発表標題 球体のBRDF測定技術
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 反射光分布測定装置及び方法	発明者 井上信一， 五十嵐美範， 星武幸， 津村徳道	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-139043	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 反射光分布測定装置及び方法	発明者 井上信一， 五十嵐美範， 星武幸， 津村徳道	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-024612	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------