

楕円鏡とプロジェクタを用いた BRDF 計測のための照明の多重化

向川 康博[†] 角野 皓平[†] 八木 康史[†]

[†] 大阪大学産業科学研究所

〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 我々は、楕円鏡とプロジェクタを用いた BRDF 計測装置を提案しているが、試料を切り取る必要があること、及び、十分なダイナミックレンジが得られないという二つの問題があった。本研究では、楕円鏡の長軸に平行に試料を配置できる計測装置を新たに設計することで、一つめの問題を解決した。さらに、プロジェクタから投影する照明パターンをアダマル行列に基づいて多重化することで、計測時間を増やすことなく、計測データのダイナミックレンジを大幅に向上し、二つめの問題を解決した。

キーワード BRDF 計測, 楕円鏡, プロジェクタ, 照明の多重化

Multiplexed Illumination for Measureing BRDF using an Ellipsoidal Mirror and a Projector

Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Kohei SUMINO[†], and Yasushi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

E-mail: †mukaigaw@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract We have proposed a BRDF measuring system using an ellipsoidal mirror and a projector. However, the conventional system has two major drawbacks; the target material must be cut and the dynamic range is low. In this paper, we solve the first problem by designing a new measuring devise in which the target material is placed parallel to the long axis of the ellipsoid. The second problem is solved by the multiplexed illumination based on the Hadamard matrix. The dynamic range of the measured BRDF is drastically improved while the capturing time is the same as the original method.

Key words BRDF measurement, ellipsoidal mirror, projector, multiplexed illumination

1. はじめに

物体表面の反射特性を表す双方向反射率分布関数 (BRDF: Bi-directional Reflectance Distribution Function) は表面色だけでなく、滑らかさといった微細形状の違いによっても変化する物体表面の属性である。BRDF の計測は、CG 応用だけでなく、表面微細形状に基づく物体認識や真贋判定、塗装面の検査など、様々な応用が期待される。

物体の幾何情報である 3 次元形状は、市販のレンジファインダなどによって、比較的容易に計測できるようになってきた。それに比べて、物体の光学情報である BRDF を、高速かつ密に計測することは未だに難しい問題である。密な BRDF の計測が困難な理由は、BRDF が入射角と反射角の 4 パラメータに依存するため、角度の膨大な組み合わせについて反射率を計測

しなければならないことにある。

この問題に対し、我々は、楕円鏡とプロジェクタを組み合わせることで、異方性反射の BRDF を高速に計測できる装置を開発している [1]。しかし、この装置では試料を小さく切り取って楕円鏡の焦点位置に置く必要があり、文化遺産のアーカイブなどの用途には使えなかった。また、プロジェクタのコントラスト比の問題から、計測される BRDF のダイナミックレンジが低いという問題があった。

そこで、本稿では、試料を切り取ることなく BRDF を計測できるように、楕円鏡の長軸に平行に試料を配置できる新しい計測装置を提案する。さらに、プロジェクタから投影する照明パターンをアダマル行列に基づいて多重化することで、計測時間を増やすことなく、計測データのダイナミックレンジを大幅に向上する方法について述べる。

2. 関連研究

BRDF を密に計測するための、もっとも直接的な方法は、ゴニオリフレクトメータを用いて、試料を中心とした半球面上でカメラと光源を回転させながら反射光を計測するものである。Liら [2] は、等方性反射を仮定して可視光範囲の多波長で BRDF を計測した。武田ら [3] は、サテンなどの異方性反射を持つ布の反射特性を計測した。しかし、これらの手法の問題は、機械的な回転のために膨大な計測時間が必要なことである。

より簡便な方法として、物体表面の BRDF が一様と仮定し、各点毎に計測したデータを統合することで密な BRDF が推定可能である。Matusik ら [4] は球を撮影した結果から等方性反射の BRDF を計測した。Karner ら [5] は平面を、Lu ら [6] はベルベットを巻き付けた円筒を撮影した画像から、異方性反射の BRDF を計測した。さらに、Marschner ら [7] は 3D スキャナを併用することで、人間の顔などの凸に近い任意形状を撮影した画像から BRDF を計測した。しかし、これらの手法には、不均一な反射特性を持つ物体には適用できないという問題がある。

機械的な回転機構を排除して計測を高速化するために、試料を中心に光源とカメラを半球状に密に配置して、入射角と反射角の様々な組み合わせによる反射光を計測すればよい。Müller ら [8] は、151 台のフラッシュつきカメラを配置することで、高速な BRDF 計測を実現した。しかし、物理的な制約から密な BRDF を計測することは難しい。

一方、光学分野では、反射屈折光学系を工夫することで密な BRDF を計測する研究が古くから進められている。ボーイング社は、航空機の塗装状態を検査するために、楕円鏡を用いた BRDF 計測方法の特許を保有している [9]。さらに、Mattison [10] らは、この特許に基づいて携帯型計測装置を開発しているが、これらの装置では全方向への反射光を一度に観測することのみに主眼が置かれており、光源方向は機械的に回転させなければならない。Ward [11] は、半球面のハーフミラーと魚眼レンズを用いることで、カメラを回転させずにすべての視線方向からの反射光を一度に観測できる装置を提案したが、光源はハーフミラーの裏側で回転させなければならない、計測には時間がかかっていた。Dana ら [12] は、放物面鏡を用いることで、光源の回転機構を排除した計測システムを提案しているが、光源の並進機構は依然として必要であった。

反射屈折光学系を工夫し、かつ機械的な回転・並進機構を完全に排除した研究として、Kuthirummal ら [13] は円筒状の鏡を用いて、また、Han ら [14] は万華鏡のように組み合わせた平面鏡とプロジェクタを用いた計測システムを提案している。しかし、計測できる入射角と反射角は離散的であり、密な計測ができるわけではない。

一方、本研究で提案する装置は、楕円鏡とプロジェクタを組み合わせた BRDF 計測装置である。反射屈折光学系を工夫し、機械的な回転・並進機構を完全に排除しているため、高速な計測が可能である。また、光源方向と視線方向を密に変化させて BRDF を計測できる。

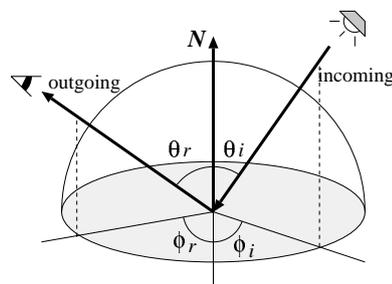


図 1 BRDF の角度パラメータ

3. BRDF 計測装置

3.1 BRDF とは

双方向反射率分布関数 (BRDF: Bi-directional Reflectance Distribution Function) とは、図 1 に示すように、光源方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光強度に対する視点方向 (θ_r, ϕ_r) への反射光輝度の比率を表す 4 パラメータの関数である。BRDF は、表面色だけではなく、滑らかさといった微細形状の違いによっても変化する物体表面の属性である。

3.2 計測原理と従来の計測装置

楕円鏡は 2 つの焦点を持ち、一方を通過する光線は楕円鏡内面で反射し、もう一方の焦点を通る。この性質を利用すれば、一方の焦点に試料を配置し、もう一方の焦点に光源とカメラをビームスプリッタを通して配置することで、試料で反射する全方向への光を 1 台のカメラで画像として計測することができる。

提案装置の特徴は、光源としてプロジェクタを用いることである。プロジェクタから 1 点のみを白としたパターンを投影することは、試料を点光源で照明することに相当する。また、投影パターン中の点の位置を変えることは、照明の入射角度を変えることに相当する。投影パターンの更新は、光源の機械的な回転に比べて、はるかに高速であるため、密な BRDF を高速に計測できる。

この原理に基づいて、我々が提案した BRDF 計測装置 RCG-1 (Rapid Catadioptric Gonioreflectometer) [1] の構造を図 2 に、その外観を図 3 に示す。この計測装置では、試料を小片に切り取ってピアノ線の先に取り付け、楕円鏡の焦点位置に配置する必要があった。また、試料の裏側から投影・撮影するため、法線方向の一部のデータが欠損するという問題があった。

3.3 平行配置型 BRDF 計測装置

本稿で提案する計測装置も同様の機器構成であるが、楕円鏡の形状と試料の配置方法を変えることで、従来の計測装置の問題を解決した。具体的には、従来の計測装置では、図 4(a) に示すように、楕円鏡を長軸に垂直な面で切り取っており、楕円鏡の長軸と試料面は垂直であった。この垂直配置型では、試料自体が光を遮ってしまうため、試料を小さく切り取る必要があった。一方、本研究で提案する新しい計測装置 (RCG-2) では、Mattison ら [10] と同様に図 4(b) に示すように、楕円鏡を長軸に垂直な平面と長軸に平行な平面で切り取り、楕円鏡の長軸と試料面が平行になるように設計した。これにより、試料自体が光を遮ることがなくなり、試料を切り取る必要がなくなった。

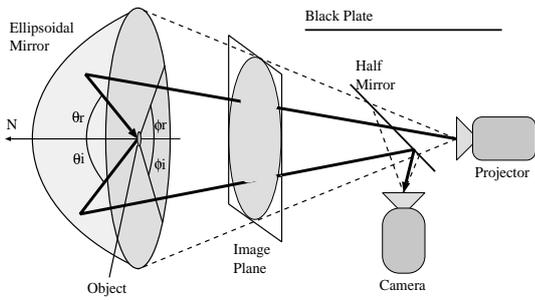


図 2 従来の垂直配置型 BRDF 計測装置 (RCG-1) の構造 [1]

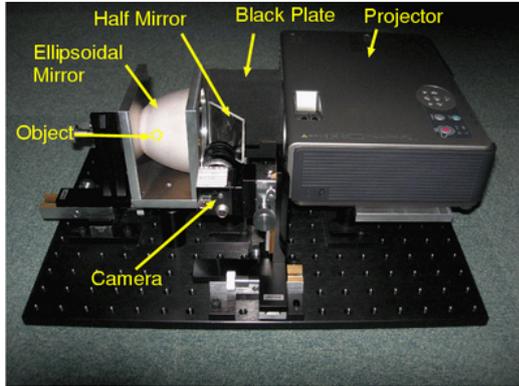


図 3 従来の垂直配置型 BRDF 計測装置 (RCG-1) の外観 [1]

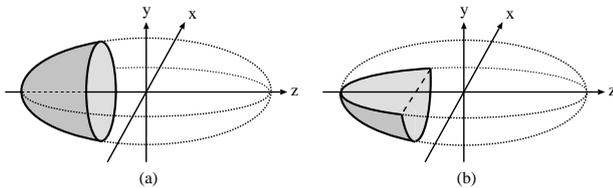


図 4 楕円鏡の形状：(a) 垂直配置型，(b) 平行配置型

提案する平行配置型 BRDF 計測装置の構造を、図 5 に示す。主な構成要素は、プロジェクタ・カメラ・楕円鏡・ビームスプリッタ・平面ミラーである。プロジェクタからの投影パターンは、ビームスプリッタと平面ミラーで反射した後、楕円鏡で反射し、試料の 1 点を照らす。試料で反射した光は、再び楕円鏡で反射し、平面ミラーで反射した後、ビームスプリッタを通過して、もう一方の焦点に置かれたカメラで 2 次元画像として記録される。

3.4 反射率の計測

光源方向と視線方向は角度で指定されるのに対し、プロジェクタとカメラでは 2 次元座標で表現されるため、角度と画像の対応関係が必要となる。ここで、カメラとプロジェクタの幾何学的キャリブレーションができていれば、角度と画像座標は容易に変換が可能である。図 6 は、提案装置におけるプロジェクタとカメラの画像座標と、光源方向 (θ_i, ϕ_i) 、視線方向 (θ_r, ϕ_r) の対応を図示したものである。

次に、提案装置で観測できる BRDF の角度について考える。本来は、光源とカメラを、試料の法線を中心とした半球上に密

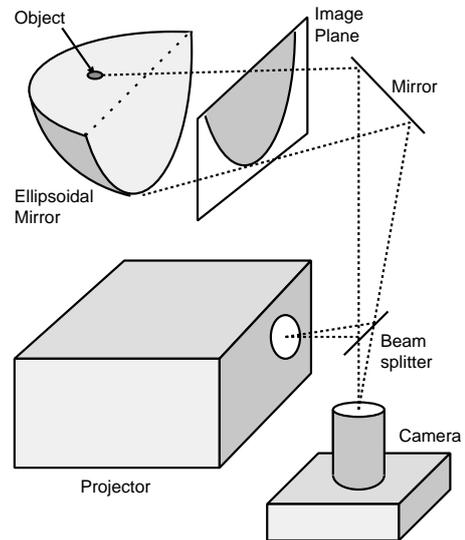


図 5 平行配置型 BRDF 計測装置 (RCG-2) の構造

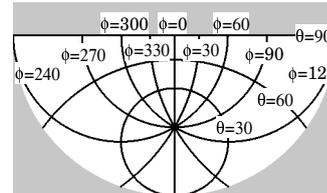


図 6 平行配置型 BRDF 計測装置における画像と角度の対応

に配置しなければならないが、提案装置の楕円鏡では半球上の一部が欠落する。しかし、等方性反射を仮定すると、少なくとも四分球のデータさえ計測できれば、一度の計測で欠損のない BRDF を計測可能であることを示す^(注1)。

等方性反射の場合には、相対角度 $(\phi_i - \phi_r)$ が $0 \sim 360$ 度についてのみ計測すればよい。つまり、図 7(a) のように、 ϕ_i を ϕ_0 に固定し、光源位置を $0 \leq \theta_i \leq 90$ の円弧上に限定できる。しかし、楕円鏡の形状の制約により、視線方向は、 $0 \leq \theta_r \leq 90$ 、 $\phi_{min} \leq \phi_r \leq \phi_{max}$ に制限され、一部の反射特性を計測することが出来ない。そこで、図 7(b) のように ϕ_i を ϕ_0 と ϕ_1 の 2 通りで計測し、そのデータを統合することにより全範囲の反射特性を得ることを考える。もしも、 $\phi_{max} - \phi_{min} \geq 180$ を満たせば、 $\phi_0 = 0$ 、 $\phi_1 = 180$ と設定できるため、試料を固定した状態で光源を $0 \leq \theta_i \leq 180$ の円弧上に動かせば、欠損のない BRDF を一度に計測できることがわかる。

4. 照明の多重化

本節では、プロジェクタを用いた BRDF 計測装置が抱えるダイナミックレンジの問題を明らかにし、その問題がアダマール行列に基づく照明パターンの多重化で軽減できることを示す。

4.1 ダイナミックレンジの問題

提案装置におけるダイナミックレンジの問題は、大きく分け

(注1): 異方性反射の場合には試料の配置角度を変えながら 3 回の計測を行えば十分である [1]。

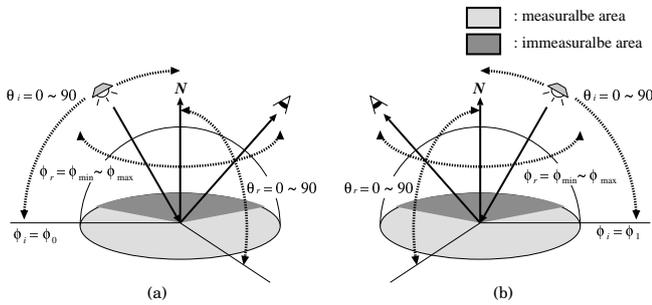


図7 等方性反射特性の計測手法 (a) $\phi_i = \phi_0$ (b) $\phi_i = \phi_1$

て2つある。1つめは、鏡面反射と拡散反射の強度差によって生じる問題である。鏡面反射を飽和させないようにレンズを絞ったりシャッタースピードを速くすると、図8(a)のように拡散反射が暗くなり観測できない。逆に、拡散反射を明るくすると、図8(b)のように鏡面反射が飽和してしまう。これは、提案装置に限ったことではなく、一般的な画像計測においても生じる問題である。

2つめは、プロジェクタを光源代わりに用いた提案手法に特有の問題であり、黒を投影している画素の明るさが、完全にゼロとならない問題である。一般に、プロジェクタは黒を投影した場合でもわずかに光を発している。個々の画素は暗くても、投影パターン全体の光量が一点に集光すると無視できない明るさとなる。例えば、プロジェクタのコントラスト比が1000:1で、投影パターンの大きさが1024×768画素である場合を考える。ある投影パターンのうち10画素が白であり、その他の画素はすべて黒である場合には、白い画素の光量の総和と黒い画素の光量の総和の比はおおよそ

$$10 \times 1000 : (1024 \times 768 - 10) \times 1 = 1 : 79 \quad (1)$$

となり、黒い画素による光量が白い画素による光量に対して非常に大きくなってしまふことがわかる。この例は、図8(c)のように、計測したい信号に対して、本来は無視すべき信号が79倍も存在してしまうことを意味している。すべての画素を黒としたパターンを投影した結果を差し引くことで、この誤った成分は取り除けるが、必要とされる計測データに割り当てられるのはわずか数bitになってしまい、抜本的な解決にはならない。

4.2 照明の多重化の原理

1970年代から、主に分光器の精度向上を目的とした信号の多重化技術が盛んに研究されてきた[15]。分光器では各波長での光量が少なくなるため、複数の波長を多重化によって同時に観測することで、ノイズを低減している。近年、Schechnerら[16]はこの信号多重化技術を通常の画像撮影にも応用し、各光源を一つずつ光らせるのではなく、多重化した複数の光源を同時に光らせて観測した後に、単一光源下でのシーンを復元する手法を提案した。Wengerら[17]も、LEDを球面上に配置した任意照明撮影システムにおいて、照明の多重化によるノイズ低減の評価をした。本節では照明の多重化の原理を概説する。

n 個の光源があり、それぞれを一つずつ照明したときの観測画像中のある1点の輝度の真値を s_1, s_2, \dots, s_n とし、これら

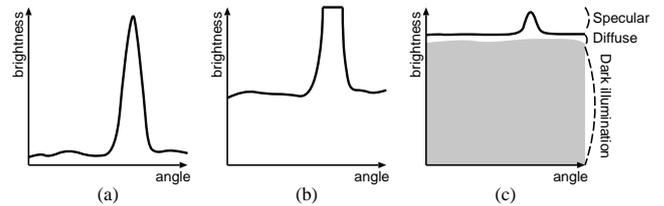


図8 反射角度と反射光輝度の関係の例

を n 次元ベクトル s で表す。例として、 $n = 4$ の時に、観測時のノイズが e である場合を考えると、観測値 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ は

$$\begin{aligned} \eta_1 &= s_1 + e_1, \\ \eta_2 &= s_2 + e_2, \\ \eta_3 &= s_3 + e_3, \\ \eta_4 &= s_4 + e_4. \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、ノイズ e_i の平均が0、分散が σ^2 であるならば、観測値と真値の平均二乗誤差の期待値は、

$$E\{(\eta_i - s_i)^2\} = E\{e_i^2\} = \sigma^2, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

となる。ただし、 E は期待値を表す関数である。

次に、照明を多重化する場合について考える。次式の多重化行列 W は、 n 個の光源に対する重みを表している。

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

照明を多重化した際に撮影される観測画像中のある1点の輝度を m_1, m_2, m_3, m_4 とし、これらを n 次元ベクトル m で表すと、次式の関係が成り立つ。

$$m = Ws. \quad (5)$$

多重化された照明環境での観測画像 m から、単一光源下での見え方 s の推定値 \hat{s} を次式のように推定することができる。

$$\hat{s} = W^{-1}m. \quad (6)$$

ノイズが信号に依存しないと仮定すれば、観測値はそれぞれ、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \eta_1 &= s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + e_1, \\ \eta_2 &= s_1 - s_2 + s_3 - s_4 + e_2, \\ \eta_3 &= s_1 + s_2 - s_3 - s_4 + e_3, \\ \eta_4 &= s_1 - s_2 - s_3 + s_4 + e_4. \end{aligned} \quad (7)$$

推定値は、次式のように観測値から算出される。

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= \frac{1}{4}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4) = s_1 + \frac{1}{4}(e_1 + e_2 + e_3 + e_4), \\ \hat{s}_2 &= \frac{1}{4}(\eta_1 - \eta_2 + \eta_3 - \eta_4) = s_2 + \frac{1}{4}(e_1 - e_2 + e_3 - e_4), \\ \hat{s}_3 &= \frac{1}{4}(\eta_1 + \eta_2 - \eta_3 - \eta_4) = s_3 + \frac{1}{4}(e_1 + e_2 - e_3 - e_4), \\ \hat{s}_4 &= \frac{1}{4}(\eta_1 - \eta_2 - \eta_3 + \eta_4) = s_4 + \frac{1}{4}(e_1 - e_2 - e_3 + e_4). \end{aligned} \quad (8)$$

推定値と真値の平均二乗誤差の期待値は、

$$E\{(\hat{s}_i - s_i)^2\} = E\{e_i^2\} = \frac{\sigma^2}{4}, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

と、多重化しない場合の1/4倍となる。つまり、照明を多重化することにより、同じ観測回数でノイズを軽減できる。

4.3 S 行列による照明パターンの多重化

本研究では実際に光源を配置する代わりにプロジェクタを利用しているため、投影パターンを変えることにより、多重化行列 W を任意に設定可能である。

まず、多重化行列 W の各要素が $-1, 1$ のいずれかの場合、多重化行列としてアダマール行列を用いると、誤差が最小となることが知られている [15]。 n 次アダマール行列 H_n は、

$$H_n^T H_n = nI_n \quad (10)$$

を満たす行列である。ただし、 I_n は単位行列である。アダマール行列を用いて信号を多重化した場合、S/N 比は \sqrt{n} 倍となる。

ところが、プロジェクタによる照明では負の照明をすることができないため、アダマール行列を直接用いることは出来ない。多重化行列の要素が 0 か 1 のいずれかの場合には、アダマール行列から作成される S 行列を用いると、誤差が最小となることが知られている [15]。S 行列は、アダマール行列の第 1 行と第 1 列の要素がすべて 1 になるように行と列を入れ替えて正規化した後に、第 1 行と第 1 列を取り除き、さらに行列の各要素の 1 を 0 に、 -1 を 1 に置き換えた行列である。S 行列を用いた場合の S/N 比は $\frac{\sqrt{n}}{2}$ 倍となる。S 行列は簡便な作成方法が知られており、逆行列も次式で容易に計算できる。

$$S^{-1} = \frac{2}{(n+1)}(2S^T - 1_n) \quad (11)$$

ただし、 1_n はすべての要素が 1 である $n \times n$ の行列である。

そこで本研究では、照明を S 行列を用いて多重化する。プロジェクタを利用すれば画素単位での照明が可能であるため、 n の値を大きくすることができ、劇的な効果が期待できる。また、投影パターンを多重化することにより、パターン中の白い画素の割合が増え、プロジェクタのコントラスト比の問題についても軽減でき、より高精度な BRDF 計測が可能となる。

5. 実験結果

5.1 BRDF 計測機器

図 9 は、本研究で製作した BRDF 計測装置である。デジタルカメラとして Lucam 製の Lu-160C を、DLP プロジェクタとして TOSHIBA 製の TDP-FF1A を使用した。図 10 は楕円鏡であり、全ての θ について 240 度の範囲の ϕ で照明・観測できるように設計した。楕円鏡の上には、焦点位置に小さな窓を空けた金属板が固定されており、試料を正確に焦点に配置できる。また、バッテリー駆動が可能なプロジェクタを利用したため、ノート PC と合わせて利用すれば、屋外での計測も可能である。この設計では試料を切り取る必要がないため、文化遺産などの切り取ることができない物体も計測対象に含めることができる。

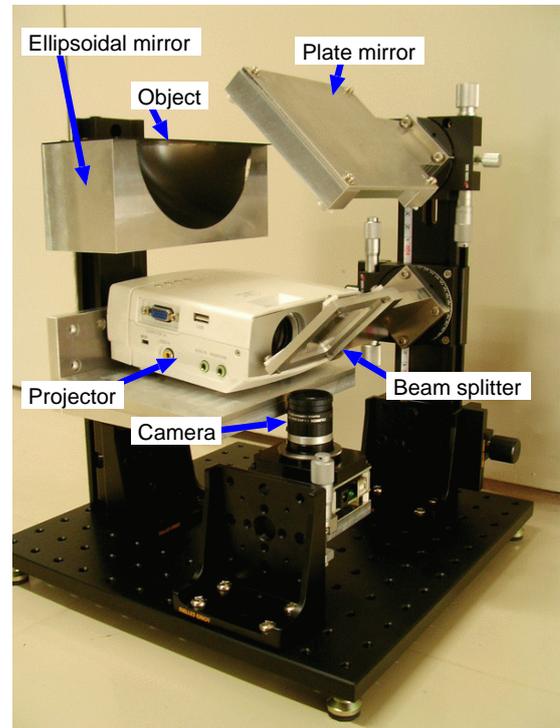


図 9 平行配置型 BRDF 計測装置 (RCG-2) の外観

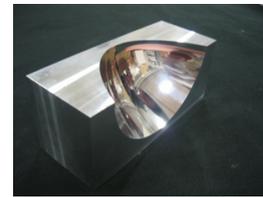
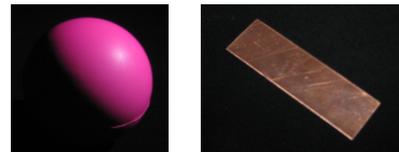


図 10 楕円鏡



(a) ポリウレタン球 (b) 銅板

図 11 計測対象

5.2 ポリウレタン球の計測

照明の多重化による計測精度の向上を評価するため、図 11(a) に示すポリウレタン製の球を対象として BRDF を計測した。この球は等方性反射と見なすことができることから、光源を円弧上に動かした場合の 1 自由度の変化に対応する照明パターンを多重化した。図 12(a) は、光源方向 $\theta_l = 0 - 90$, $\phi_l = 90, 270$ に相当する照明を多重化した投影パターンの一例である。このパターンを投影したときの撮影画像から、黒パターン投影時の撮影画像を引いた結果が図 12(b) である。

照明の多重化の効果を調べるため、光源方向が $\theta_l = 10$, $\phi_l = 270$ の反射光を様々な条件下で撮影して比較した。図 13 はそれぞれ、(a) 単一光源パターンで 1 回観測した画像、(b) 単一光源パターンで 10 回観測した平均画像、(c) 多重化パターンで 1 回観測した結果から推定した画像、(d) 多重化パターンで

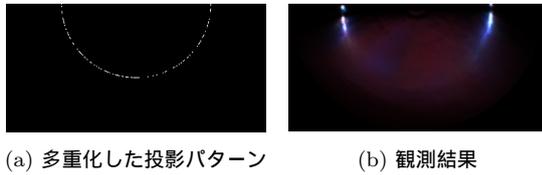


図 12 照明の多重化

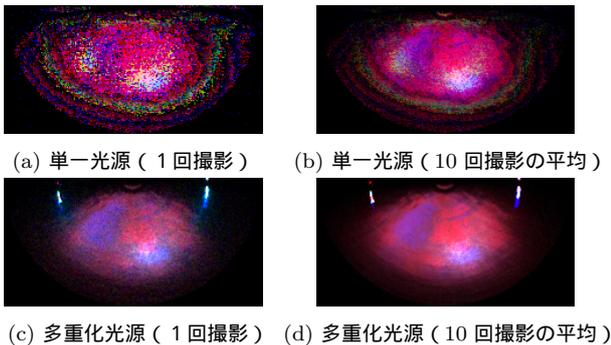
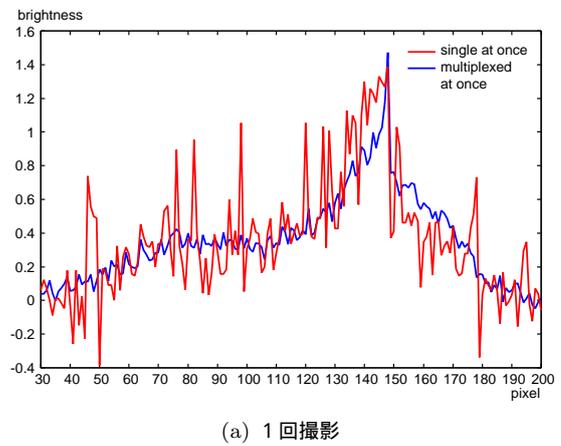


図 13 光源方向 $\theta_l = 10$ $\phi_l = 270$ の反射光分布

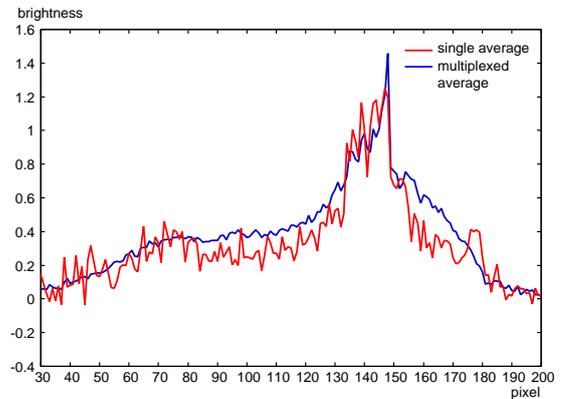
10 回観測した平均から推定した画像である。いずれも、黒パターン投影時の観測画像を引いており、比較を容易にするために画素値を 190 倍に明るく表示している。単一光源では大量のノイズが含まれており、10 枚の平均を用いても、依然としてノイズが大きい。それに対して、照明を多重化した場合には、1 回の撮影でも明らかにノイズが減少している。さらに、照明を多重化しつつ 10 枚の平均を用いると、画素毎のノイズはほとんど見えなくなる。

画素値の空間的な変化を調べるため、それぞれの画像の $y = 60$, $x = 30 - 200$ の各画素の輝度をグラフにした結果を図 14 に示す。(a) は撮影回数を 1 回としたとき、(b) は 10 回撮影して平均値を算出したときの、単一光源で撮影した結果（赤）と多重化照明から推定した結果（青）の輝度断面の比較である。いずれの場合も、照明を多重化することで、大幅に S/N 比が向上していることがわかる。特に、単一光源で 10 枚を平均した結果よりも、多重化照明で 1 枚撮影した方がノイズが少ないことは興味深い。10 枚撮影すると計測時間も 10 倍になってしまうが、照明の多重化によって、計測時間を増加させることなく、高精度な BRDF を計測できることがわかる。

多重化照明で 10 回計測した BRDF を用いて、球と波板の画像をレンダリングした結果を、それぞれ図 15, 16 に示す。実物の図 11(a) とは照明環境が異なるため定量的な比較はしていないが、鏡面反射の分布が実物よりも若干広がっている。その原因として、カメラ・プロジェクタ・楕円鏡のアライメントが不十分であり、試料を照明・計測している点が完全に一致していないことが原因として考えられる。試料は球面であるため、計測点が一致しないと法線が一定とならず、結果としてレンダリング結果では鏡面反射が広がってしまったと推測される。また、図 13(c)(d) では、上部の左右に不自然な白色が見られたため、図 15, 16 では、 $\theta \geq 66$ 以上のデータは $\theta = 65$ のデータで代用している。この問題は、切削によって作成した楕円鏡の面精度によるものと考えられ、楕円鏡の加工方法の改善が必要



(a) 1 回撮影



(b) 10 回撮影の平均

図 14 画像の輝度値の分布

である。なお、図 13(c)(d) では、ピンクの球にも関わらず、部分的に青色の反射光が観測されているが、これは図 5 に示す光路が波長依存であることや、光学部材間の迷光が原因と思われる。アライメントや加工精度の改善が今後の課題である。

5.3 銅板の計測

次に、本計測装置がもっとも苦手とする金属を対象として BRDF 計測実験を行った。金属は鏡面反射と拡散反射の差が極端に大きいので、両者を高精度に計測することは一般に困難な問題である。対象物体は、図 11(b) に示す銅板である。

この銅板を、それぞれ照明を多重化しない場合と多重化した場合で BRDF を計測し、その BRDF に基づいて波板の画像をレンダリングした結果を図 17 に示す。鏡面反射を飽和させないように光学系を調整して計測したため、拡散反射成分の値は非常に小さい。そのため、レンダリング結果では画像を明るく表示している。単一照明の (a) では、非常に暗い拡散反射成分を無理に明るくしたために、赤や青などの誤った色が生じている。それに対し、照明を多重化した (b) では、ダイナミックレンジが広がったために拡散反射成分のノイズは大幅に軽減され、鏡面反射も金属面らしく再現されていることがわかる。照明を多重化することで、ダイナミックレンジが向上し、ノイズが大幅に減少したことは確かめられたが、図 17(b) のレンダリング結果を見る限り、依然としてノイズが観測される。ソフトウェアとハードウェアの両方の改良によって、BRDF 計測装置としての精度を向上させることが今後の課題である。

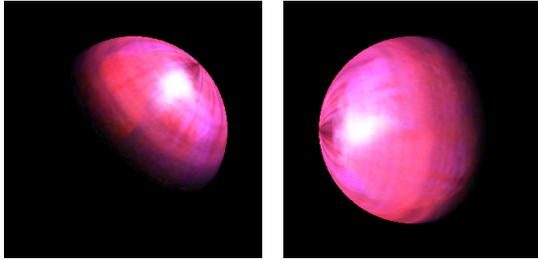


図 15 計測結果に基づいた球のレンダリング結果 (ポリウレタン)

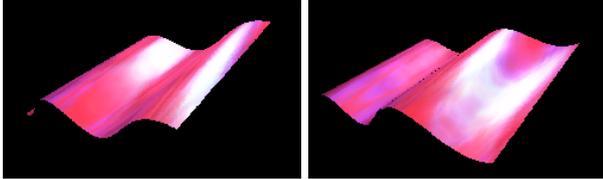
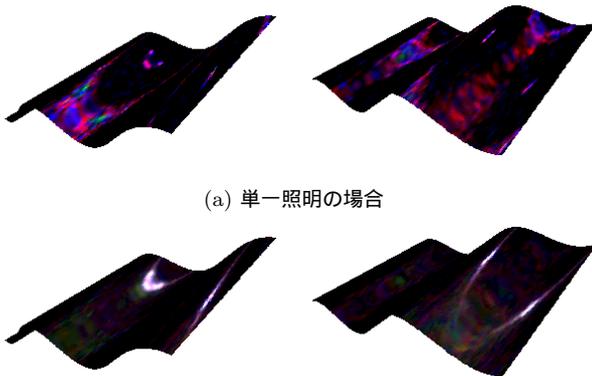


図 16 計測結果に基づいた波板のレンダリング結果 (ポリウレタン)



(a) 単一照明の場合

(b) 照明を多重化した場合

図 17 銅のレンダリング結果の比較

6. ま と め

本稿では、試料を切り取ることなく BRDF を計測できる装置を新たに作成し、プロジェクタから投影する照明パターンを多重化することで、ダイナミックレンジを大幅に改善する手法について述べた。提案手法では、計測時間を増加させることなく、BRDF の精度を向上することが可能であることを示した。

照明パターンの多重化によってダイナミックレンジが大幅に改善されたが、実用上十分な精度で反射特性を計測できたとは言えない。この問題は、シャッタースピードを変えながら撮影するなどの高ダイナミックレンジ撮影手法と併用し、ソフトウェア面から改善できると考えられる。さらに、1 画素あたり 16bit の感度を持つ冷却 CCD や、コントラスト比が 15000:1 程度のプロジェクタと組み合わせることで、ハードウェア面からも改善が期待できる。

本研究では、光源の ON/OFF のみを制御するアダマール変換を用いたが、プロジェクタでは照度を連続的に変化させることもできるため、離散コサイン変換などの他の直交基底を用いた場合との比較も興味深い。また、提案した計測装置では、原理的に異方性反射の BRDF も計測可能であるが、2 自由度の照

明方向の変化に対応した多重化が必要となる。2 自由度の照明パターンの多重化も、理論的には 1 自由度と変わりはないが、図 6 のように方向によって角度分解能が異なることや、復号化には多くのメモリを必要とすることなど、検討すべき点も残っている。また、本稿では実際に BRDF 計測システムを試作し、いくつかの試料について計測したが、その計測データが正しいかどうかという評価には至っていない。反射特性が既知の物体を計測し、精度を定量的に評価することが今後の課題である。

文 献

- [1] 角野皓平, 向川康博, 八木康史, “楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp.261-268, Jul.2006.
- [2] H. Li, S. C. Foo, K. E. Torrance, and S. H. Westin, “Automated three-axis gonireflectometer for computer graphics applications”, Proc. SPIE, Vol.5878, pp.221-231, 2005.
- [3] 武田祐樹, フィンファンフイヴィエト, 坂口嘉之, 田中弘美 “フレネル項を考慮した多視点画像の反射光解析に基づく織布の異方性反射モデリング”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp.1582-1589, 2005
- [4] W.Matusik, H.Pfister, M.Brand, and L.McMillan, “A Data-Driven Reflectance Model”, Proc. SIGGRAPH2003, pp.759-769, 2003.
- [5] K. F. Karner, H. Mayer, and M. Gervautz, “An image based measurement system for anisotropic reflection”, Computer Graphics Forum (Eurographics’96 Proceedings), Vol.15, Issue 3, pp.119-128, 1996.
- [6] R.Lu, J.J.Koenderink, and A.M.L.Kappers, “Optical Properties (Bidirectional Reflection Distribution Functions) of Velvet”, Applied Optics, Vol.37, No.25, pp.5974-5984, 1998.
- [7] S. R. Marschner, S. H. Westin, E. P. F. Lafortune, K. E. Torrance, and D. P. Greenberg, “Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin”, Proc. 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp.139-152, 1999.
- [8] G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, “Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts”, VAST2005, pp13-20, 2005
- [9] K. J. Davis and D. C. Rawlings, “Directional reflectometer for measuring optical bidirectional reflectance”, United States Patent 5637873, June, 1997.
- [10] P. R. Mattison, M. S. Dombrowski, J. M. Lorenz, K. J. Davis, H. C. Mann, P. Johnson, and B. Foos “Handheld directional reflectometer: an angular imaging device to measure BRDF and HDR in real time”, Proc. SPIE Vol.3426, pp.240-251, 1998.
- [11] G.J.Ward, “Measuring and Modeling anisotropic reflection”, Proc. SIGGRAPH’92, pp.255-272, 1992.
- [12] K.J.Dana and J.Wang, “Device for convenient measurement of spatially varying bidirectional reflectance”, J. Opt. Soc. Am. A, Vol.21, Issue 1, pp.1-12, 2004.
- [13] S. Kuthirummal and S. K. Nayar, “Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture”, Proc. SIGGRAPH2006, pp.916-923, 2006.
- [14] J.Y.Han and K.Perlin, “Measuring Bidirectional Texture Reflectance with a Kaleidoscope”, ACM Transactions on Graphics, Vol.22, No.3, pp.741-748, 2003.
- [15] M. Harwit and N. J. A. Sloane, “HADAMARD TRANSFORM OPTICS”, ACADEMIC PRESS, 1973.
- [16] Y. Y. Schechner, S. K. Nayar and P. N. Belhumeur, “A Theory of Multiplexed Illumination”, Proc. ICCV2003, pp.808-815, 2003.
- [17] A.Wenger, A.Gardner, C.Tchou, J.Unger, T.Hawkins, and P.Debevec, “Performance Relighting and Reflectance Transformation with Time-Multiplexed Illumination”, Proc. SIGGRAPH2005, pp.756-764, 2005.