

# 楕円鏡とプロジェクタを用いた反射特性の高速計測システム

## Rapid BRDF Measuring System using an Ellipsoidal Mirror and a Projector

向川 康博, 角野 皓平, 八木 康史

Yasuhiro MUKAIGAWA, Kohei SUMINO, Yasushi YAGI

大阪大学 産業科学研究所

ISIR, Osaka University

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

### Abstract

物体表面の反射特性を表す双方向反射率分布関数 (BRDF) を密に計測するためには, すべての照明角度と反射角度の組み合わせについて反射率を計測する必要があるため, 膨大な時間が必要であった. 本研究では, 楕円鏡とプロジェクタを組み合わせることで, 密な反射率を高速に計測する手法を提案する. 楕円鏡の一方の焦点に試料を配置し, もう一方の焦点にカメラとプロジェクタをハーフミラーを用いて配置する. プロジェクタを用いることで, 投影画像を変えるだけで光源方向を自由に制御できるため, 光源の機械的な回転・並進機構を完全に排除することができる. 試料で反射したすべての方向への光は, カメラで一度に計測できるため, 高速な反射率計測が可能となる. 試料の配置方式を変えた2種類のBRDF計測装置を試作し, 実際に異方性反射の布と等方性反射の銅板のBRDFを計測し, 計測速度を評価した.

### 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 (以下BRDFと呼ぶ) 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. BRDFの計測は, CG応用だけではなく, 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が入射照度 (2パラメータ) に対する放射輝度 (2パラメータ) の比率を表す関数であり, 単波長に限定しても合計4パラメータ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.

それに対して, 本研究では反射光学系を工夫することで, 密なBRDFを高速に計測することを目指す. カメラを回転させる代わりに楕円鏡を利用し, 光源を回転させる代わりにプロジェクタを利用する. 提案手法では, 機械的な回転・並進機構を完全に排除することができ, BRDFを高速に計測することが可能となる.

### 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 [1] 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 [2] 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 [3] 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 [4] は平面を, Luら [5] 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 [6] 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 [7] 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, 光学の分野では, 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 [8]。さらに、Mattison[9] 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[10] 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 [11] 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 [12] は円筒状の鏡を用いて、また、Han ら [13] 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。

### 3 双方向反射率分布関数 (BRDF)

#### 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  $(\theta_i, \phi_i)$  からの入射照射度に対する視点方向  $(\theta_r, \phi_r)$  への反射光輝度の比率を表す関数であり、物体表面の反射特性を表現できる。BRDF は視点方向  $(\theta_r, \phi_r)$ 、光源方向  $(\theta_i, \phi_i)$  に加えて、波長  $(\lambda)$  にも依存するため、厳密には 5 パラメータの関数である。しかし、現実には各波長ごとの反射率を表現しても用途が限られており、計測には分光器などの機材が必要となるため、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の 3 チャンネルごとに BRDF を定義し、4 パラメータの関数とするのが一般的である。

#### 3.2 BRDF の記述

BRDF の記述方法は、パラメトリック表現とノンパラメトリックに大別できる。パラメトリック表現は、BRDF を数式によって近似表現するものであり、従来より Phong[14]、Torrance-Sparrow[15] などの反射モデルが用いられている。反射モデルを記述するためのデー

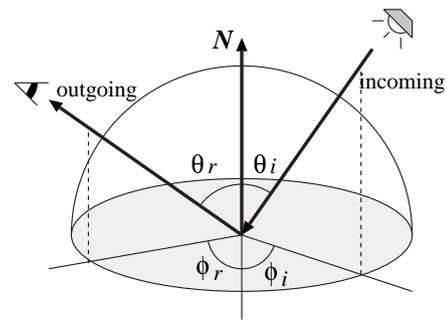


図 1 BRDF の角度パラメータ

タ量が小さいことや、ハードウェアレンダリングとの親和性が高いことから広く利用されているが、表現能力には限界がある。

一方、ノンパラメトリック表現は、各角度に対する反射率を実データに基づいて記録しておく方式であり、制約が極めて少ないため様々な反射特性を表現できる。密にデータを記録するためには大量のデータが必要となるが、近年の HDD 容量の増大化と高精度な CG 表現の必要性から、主流になりつつある。本研究では、表現能力を優先するために、ノンパラメトリック表現によって BRDF を記述する。

#### 3.3 等方性反射と異方性反射

光源と視点を固定し、法線方向を軸に物体を回転させたときに見え方が変化しないものは等方性反射、変化するのは異方性反射と呼ばれる。自然界の多くの物体は等方性反射と見なすことができ、方位角については相対角度である  $(\phi_r - \phi_i)$  で決まることから、BRDF を 3 パラメータで表現することができる。

一方、ヘアライン加工された金属や、ベルベットやサテンなどの織物は、その複雑な微細形状に起因して、法線方向を軸に回転させただけでも見え方が変化する異方性反射となる。そのような物体を対象とすると、BRDF を 4 パラメータで表現する必要がある。

BRDF のパラメータ数を 4 から 3 にできれば、計測時間やデータ容量を大幅に削減できるために都合が良い。しかし、我々の身近にある衣類などの布も異方性反射であることが多く、等方性反射を仮定してしまうと表現能力が劇的に低下する恐れがある。そこで、本研究では、あくまでも 4 パラメータで BRDF を表現し、ベルベットやサテンなどの織物の反射特性を完全に計測することを目指す。

#### 3.4 4 パラメータ表現の問題点

前述の通り、4 パラメータの BRDF で反射特性を計測し、その計測データを近似的な数式モデルを用いずに直接記録しておけば、表現能力は格段に向上する。しかし、実際にはデータ容量と計測時間の 2 つの大きな問題がある。

まず、データ容量の問題について考えてみる。例えば、 $\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i$  のそれぞれを、1度刻みで変化させ、それぞれの反射光を R,G,B の 3byte で記録すれば、

$$360 \times 90 \times 360 \times 90 \times 3 = 3,149,280,000 \text{byte}$$

と、3GB もの大量データとなってしまふ。以前は、このような膨大なデータは非現実的と見なされてきたが、近年の HDD の大容量化により、さほど非現実的な容量ではなくなってきた。さらに、このデータ量は非圧縮時の容量であり、BRDF は冗長性が高いことから、劇的な圧縮が可能であると予想される。そのため、データ容量の問題については、非現実的な問題ではなくなっている。

一方、計測時間の問題は深刻である。計測に時間がかかるのは、光源位置を 2 パラメータずつ移動させ、それぞれの光源位置でカメラを 2 パラメータずつ移動させる必要があり、全体として膨大な組み合わせとなるからである。仮に光源、カメラのサンプリング間隔を 1 度刻みとして計測すると、計測回数は

$$360 \times 90 \times 360 \times 90 = 1,049,760,000$$

という途方もない計測回数となる。この計測回数は、もしカメラと光源を移動させて反射光を計測するのに必要な時間が仮に 1 秒とすると、33 年かかることに相当する。各角度ごとにカメラ止めずに、カメラを高速回転させながら動画として撮影するなどの工夫をすれば数十倍は高速化ができるが、依然として膨大な計測時間であることには変わらない。この計測時間の問題は、計算機の性能が向上しても改善の見込みはない。

このように、データ量の問題はさほど深刻ではないが、計測時間の問題は大いに検討の余地がある。今まで、4 パラメータの BRDF を完全に計測しようという研究があまりなされていなかったのは、この計測時間の問題が大きいのではないだろうか。本研究では、この計測時間の問題に対して正面から取り組み、反射光学系を工夫することで高速化する。

## 4 楕円鏡を用いた BRDF 計測

### 4.1 原理

前章では、BRDF を計測する際の計測時間を短縮する必要性について述べた。完全な BRDF 計測に時間を必要とするのは、試料を中心としてカメラや光源を回転する機械的な機構に起因する部分が多い。このため、本研究では楕円鏡を用いることでカメラと光源の両方の回転機構を排除して、BRDF を高速に計測する方法を提案する。

本研究で用いる楕円鏡は、式 (1) で定義されるように、Z 軸に垂直な断面が円となる楕円体であり、その内

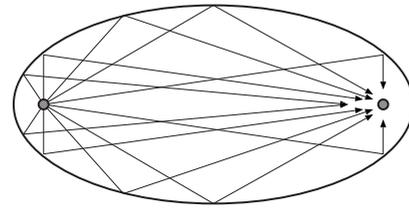


図 2 楕円鏡の特性

側が全反射するようにコーティングされているものである。ここで、 $a, b$  は楕円鏡のサイズと形状を決めるパラメータである。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

楕円鏡は 2 つの焦点を持ち、図 2 のように、一方の焦点から出た光は楕円鏡表面で反射し、必ず他方の焦点を通過するという特徴を持つ。この特性を利用し、一方の焦点に試料を配置し、他方の焦点にカメラを配置する。すると試料が放つ全方向への光は他方の焦点にあるカメラに集まり、1 枚の画像として観測される。つまり、全方向から試料を見た時の反射光を、カメラを回転させることなく、1 枚のみの画像として取得することが可能となる。

本研究では、楕円鏡とプロジェクタを組み合わせることで、照明方向の変化についても高速化を図る。点光源の代わりにプロジェクタを利用し、試料を置いていない方の楕円鏡の焦点にプロジェクタの投影中心を配置することで、全方向からの照明を 1 台のプロジェクタで代用する。なお、カメラとプロジェクタの両方を同じ焦点に配置することは物理的に不可能であるため、ハーフミラーを用いて、光学的にカメラとプロジェクタの両方を同一の焦点に配置し、システム全体の小型化を実現する。焦点にあるプロジェクタが放つ光は、必ずもう一方の焦点にある試料に照射される。そのため、プロジェクタがある 1 点を照らせば、この光はある方向からの入射光に相当する。この性質を利用すれば、投影画像を変えることによって、光源を物理的に回転させることなく光源方向を自由に制御することが可能となる。投影パターンの更新は、光源の機械的な移動に比べて、はるかに高速であるため、BRDF の高速計測が可能となる。

### 4.2 計測装置の設計

前節の原理に基づいて計測装置を設計するにあたり、本研究では、試料の配置方向が異なる 2 種類のシステムを設計した。1 つは試料の面が楕円体の長軸に垂直になるよう配置した垂直配置型、もう 1 つは平行になるよう配置した平行配置型である。垂直配置型では式 (1) で定義される楕円体を Z 軸に垂直な面で分断した形状の楕円鏡 (図 3 (a)) を、平行配置型では Z 軸に垂直

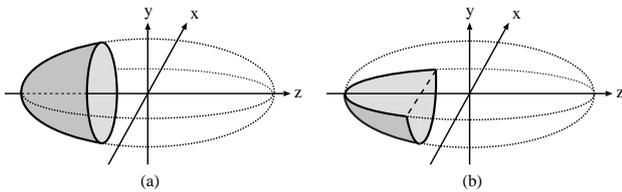


図3 楕円鏡の形状: (a) 垂直配置型, (b) 水平配置型

な面で分断し, さらに Y 軸に垂直な面で分断した形状の楕円鏡(図3 (b))を使用する。

図4は, 垂直配置型装置の設計を図示したものである。計測装置の主な構成要素は, プロジェクタ・カメラ・楕円鏡・ハーフミラーである。プロジェクタがある1点を照らすと, その投影光は楕円鏡表面の1点で反射し, 対応する光源方向 $(\theta_i, \phi_i)$ から試料を照らす。試料の全方向への反射光は, 楕円鏡表面で反射し, 1枚の画像としてカメラで撮影される。視線方向 $(\theta_r, \phi_r)$ の反射光強度を知りたい時は, 撮影画像の1点を参照すればよい。この設計では, 試料の法線方向, カメラ・プロジェクタの光軸, 楕円鏡の長軸が全て一致するため, 計測結果の精度が $\phi$ に依存しない。また, 照明器具の部品として一般に市販されている楕円鏡を用いることが出来るため, 比較的安価で製作できるという利点がある。しかし, 試料を固定するための治具や試料自体が照明・観測を妨げるため, 法線方向のデータが欠損してしまう。また, 試料を計測する際に試料を小さく切り取り配置しなければならないという欠点もある。

一方, 図5は平行配置型装置の設計を図示したものである。楕円鏡は専用に製作する必要があり垂直配置型計測装置に比べて製作のコストが高い。垂直配置型計測装置と同じくプロジェクタから1点を照らすことで1つの光源方向 $(\theta_i, \phi_i)$ からの照明を可能とし, 観測画像中の1点を参照することで視線方向 $(\theta_r, \phi_r)$ の反射光強度を知ることができる。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困難な物体も計測対象に含めることが出来る。

#### 4.3 角度と画像座標の関係

光源方向は角度で指定されるのに対し, プロジェクタでは投影画像として表現しなければならない。同様に, 視線方向も角度で指定されるのに対し, カメラでは撮影画像として獲得される。そのため, 角度と画像座標の関係が必要である。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, それぞれの光軸を楕円鏡の長軸に一致させ, それぞれの光学中心を楕円鏡の焦点に一致させることで, 角度と画像座標は容易に変換が可能である。

垂直配置型計測装置におけるプロジェクタとカメラ

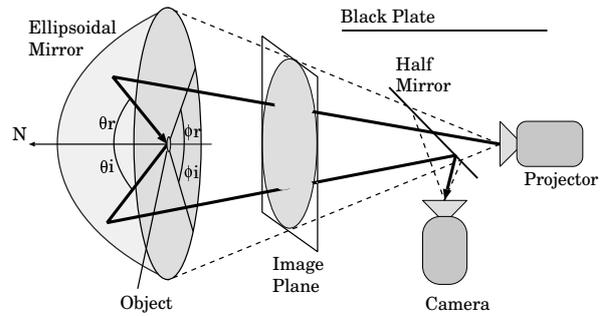


図4 垂直配置型計測装置の設計

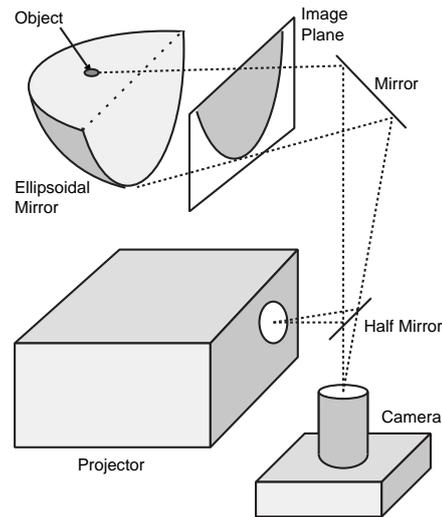
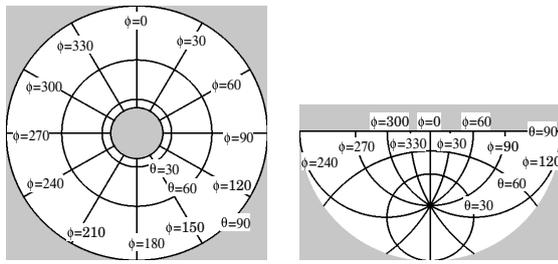


図5 水平配置型計測装置の設計

の画像座標と光源方向 $(\theta_i, \phi_i)$ , 視線方向 $(\theta_r, \phi_r)$ の対応を図6(a)に示す。但し, 試料の法線方向付近の範囲については照明・観測が不可能である。同様に, 平行配置型計測装置の角度と座標の対応を図6(b)に示す。試料の法線と楕円鏡の長軸が一致していないために,  $\phi$ 方向に依存して計測精度が変化している。また, 一部の光源・視線方向で照明・観測が出来ないが, 法線方向については計測可能である。

なお, 各光源方向に対応する1画素のみを光らせても, 十分な光量が得られないため, 完全な点光源ではなく, ある程度の立体角を持った光源にすべきである。しかし, 投影画像における1画素に対応する光源の立体角は, 各方向ごとに異なる。そこで, 試料に対する光源の放射輝度を一定とするために, 図7のような, 与えられた光源方向との角度差が閾値以内となる画素を白とし, それ以外の画素を黒とした投影パターンを用意する。これにより, 試料から見た場合の光源の立体角は, 方向に依存せず一定となる。



(a) 垂直配置型 (b) 水平配置型

図 6 画像と角度の対応関係

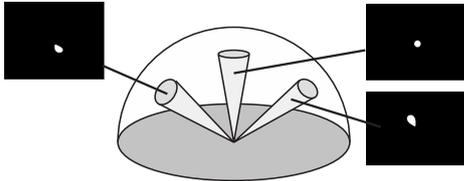


図 7 投影パターンの例

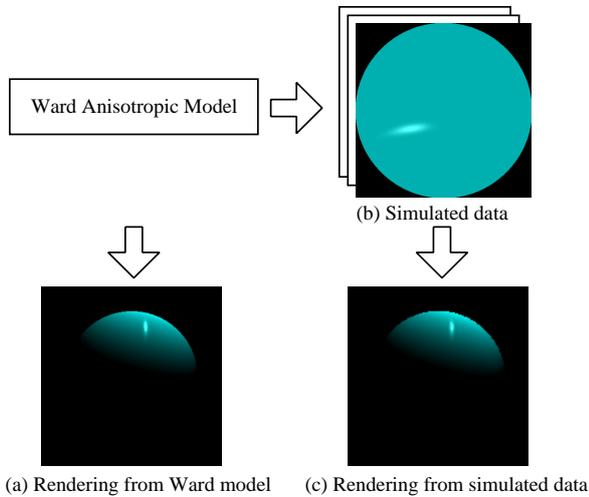


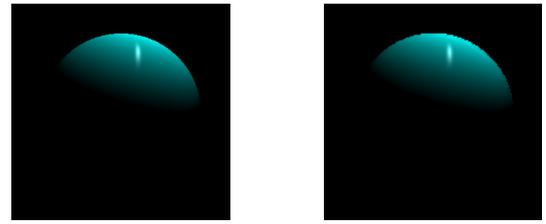
図 8 シミュレーション方法

## 5 実験

### 5.1 シミュレーション

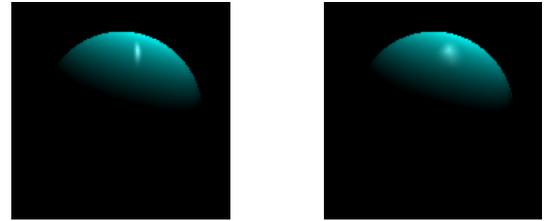
提案手法をもとに反射特性の計測を行う際に、光源方向と視点方向の 4 パラメータ ( $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ ) のサンプリング間隔を小さくすれば、より密なデータが得られるが、サンプリング間隔の二乗に反比例してデータ容量は増加し、計測時間も長くなってしまふ。そのため、光源方向のサンプリング間隔に相当する画像枚数と、視点方向のサンプリング間隔に相当する画像サイズを、それぞれどれくらいにすれば十分であるかを事前に調べる必要がある。

そこで、実際に計測する前に、サンプリング間隔とデータの精度の関係を調べるためのシミュレーション実験を行った。異方性反射を表現できるパラメトリック



(a) Ground truth (b) Lighting interval: 0.5

Image size: 384×384



(c) Lighting interval: 1 (d) Lighting interval: 5

Image size: 96×96

Image size: 12×12

図 9 サンプリング間隔の比較

表現モデルとして、式 (2) に示す Ward の異方性反射モデルを用いた。

$$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{\cos\theta_i\cos\theta_r}} e^{-\tan^2\theta_h(\frac{\cos^2\phi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2\phi_h}{\alpha_y^2})} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_d, \rho_s$  は拡散反射と鏡面反射の反射率、 $\alpha_x, \alpha_y$  は鏡面反射の広がりを表す標準偏差である。異方性反射を持つように、 $\alpha_x, \alpha_y$  はそれぞれ 0.05, 0.16 とした。この値は、[10] において、圧延真鍮の反射特性として記されているものである。

図 8 に、シミュレーションによる画像品質の比較方法を示す。(a) は、式 (2) により定義された反射モデルを用いて球をレンダリングした結果であり、これが正解となる。一方、(b) は、提案装置で撮影されるであろう画像を、レイトレーシングによって計算した同じ反射モデルのシミュレーション画像である。(c) は、シミュレーション画像に基づいて、球をレンダリングした結果である。(a) と (c) を比較することで、サンプリング間隔の影響を調べることができる。シミュレーションにおける光源のサンプリング間隔は 0.5 から 5 度までの 6 段階とし、撮影画像サイズは 384×384 から 12×12 までの 6 段階とした。

これらの計測データに基づいて生成した比較用 CG の画像サイズは 160×160 である。CG 生成時の光源は、視線方向と光源方向のなす角が 0 から 180 度の範囲で 10 度刻みに 19 通り、これを視線方向を軸に 90 度分、10 度刻みに回転させ、合計 19×10 通りの位置に配置した。カメラと物体は固定である。図 9 は生成した CG の例であり、サンプリング間隔が広くなると、特に鏡

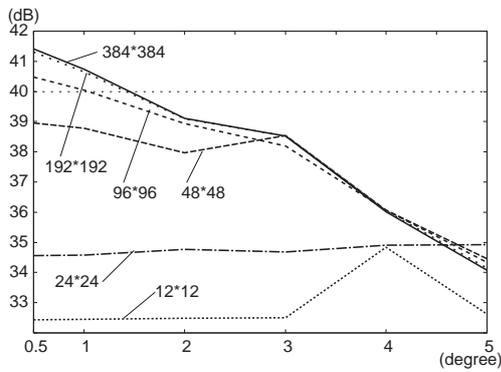


図 10 光源サンプリング間隔と PSNR の関係

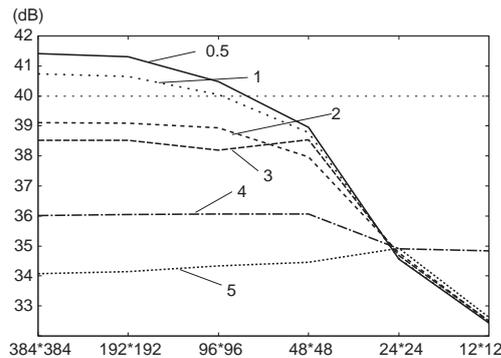


図 11 画像サイズと PSNR の関係

面反射の再現性が低下していることがわかる。

画質の違いを定量的に評価するために、Y,Cb,Cr 各成分について PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) を計算した。図 10, 11 は、光源サンプリング間隔、画像サイズをそれぞれ変化させたときの、 $19 \times 10$  通りの光源に対する Y, Cb, Cr 各成分の PSNR の最小値をグラフ化したものである。図 10 は 6 通りの画像サイズについて、光源サンプリング間隔を変化させたときのグラフ、図 11 は 6 通りの光源サンプリング間隔について、画像サイズを変化させたときのグラフである。

最小値はすべて Y 成分についての PSNR となった。これは Cb, Cr 成分に関してはサンプリング間隔を広くしても、色そのものが変化するわけではないため安定して再現性が高いのに対して、Y 成分に関しては鏡面反射付近で特に反射光が劇的に変化する場合の明暗を正しく表現できないため、サンプリング間隔が広がるにつれて精度が落ちるためであると考えられる。

一般に、画質評価においては PSNR が 40dB 以上であれば 2 つの画像は見分けがつかないと言われており、PSNR の最小値が 40dB を越えたのは光源サンプリング間隔が 1 度刻み、画像サイズが  $96 \times 96$  を越えるときであった。光源サンプリング間隔が 1 度刻みであることは画像枚数が 32400 枚であることに相当する。なお、視線方向と画像座標の関係は楕円鏡のパラメータ

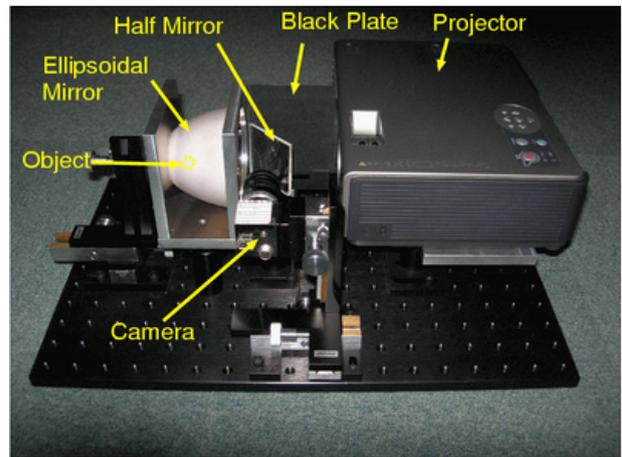


図 12 垂直配置型計測装置：RCG-1

によって左右され、図 6 のように  $\phi_r$  ごとに  $\theta_r$  の密度が異なるため、角度は等間隔ではない。この結果より本研究では光源サンプリング間隔 1 度刻み (画像枚数 32400 枚)、画像サイズ  $96 \times 96$  をひとつの目安として捉え、次節での実機による実験においても、この値を用いる。

## 5.2 計測装置

図 12 は、垂直配置型の BRDF 計測装置 RCG-1 (Rapid Catadioptric Gonioreflectometer) である。デジタルカメラとして PointGrey 製の Flea を、液晶プロジェクタとして EPSON 製の EMP-760 を、楕円鏡としてメレスグリオ製の楕円体リフレクターを用いた。この楕円鏡では長軸端付近は切り取られており、 $0 \leq \theta_i, \theta_r \leq 27$  のデータを得ることができない<sup>1</sup>。なお、試料は長軸端の穴を利用して楕円鏡の後ろからピアノ線を用いて焦点位置に配置している。ピアノ線も一部のデータを欠落させてしまうが、ピアノ線は細く、その位置は事前にわかっているため、周囲のデータから補完しても影響は少ないと考えられる。

一方、図 13 は、水平配置型の BRDF 計測装置 RCG-2 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。楕円鏡は、全ての  $\theta$  について 240 度の範囲の  $\phi$  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出来る。

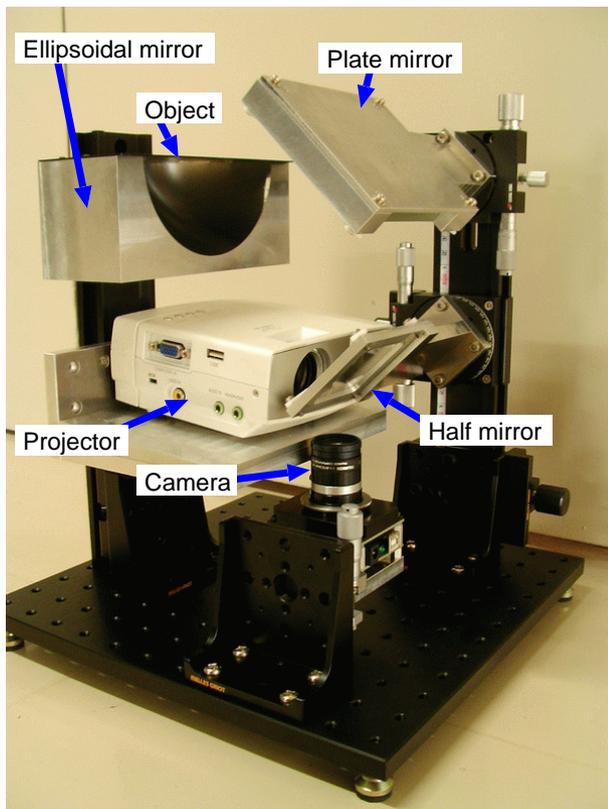
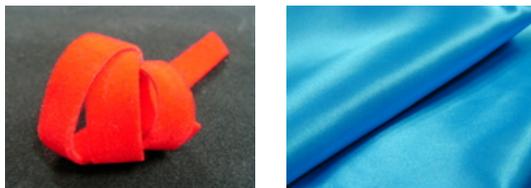
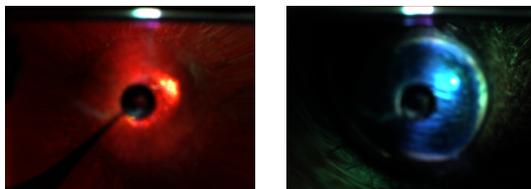


図 13 垂直配置型計測装置：RCG-2



(a) velvet (b) satin

図 14 計測対象とした試料



(a) velvet (b) satin

図 15 撮影画像の例

### 5.3 異方性反射の計測

図 14 に示すような異方性反射特性を持つベルベットとサテンを対象として、RCG-1 を用いて BRDF を計測し、データ計測時間を調べた。5.1 節での予備実験に基づき、光源のサンプリング間隔は 1 度とした。図 15 は、それぞれプロジェクタを用いて  $\theta_i = 250$ 、 $\phi_i = 30$

<sup>1</sup>試料の傾きを変えて複数回計測し、それらを統合することで欠損データを補完するなどの対策が考えられる。

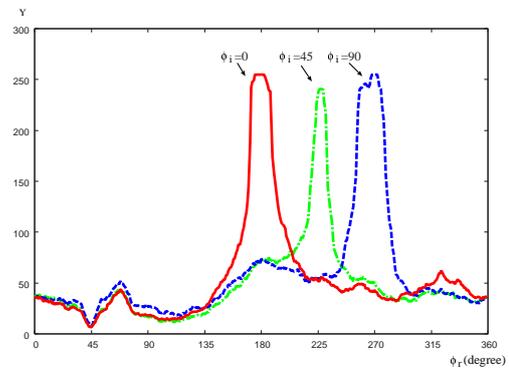


図 16 光源固定時の反射光強度の分布

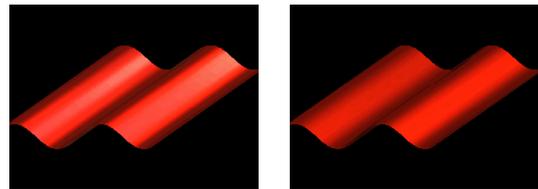


図 17 ベルベットのレンダリング結果

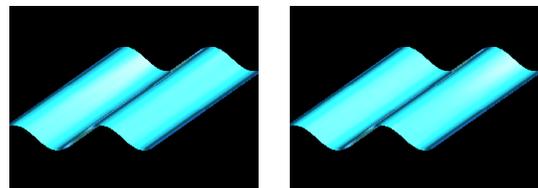


図 18 サテンのレンダリング結果

の方向からベルベット、サテンを照射したときの撮影画像である。このような画像を、合計  $360 \times 90 = 32400$  枚撮影した。1 枚あたりの撮影時間は約 0.18 秒であり、合計の測定時間は約 50 分であった。計測時間の大半を、画像のディスク書き込みと投影パターンの読み込みが占めている。

図 16 は、光源方向  $(\theta_i, \phi_i)$  を  $(30, 0)$ 、 $(30, 45)$ 、 $(30, 90)$  と設定した場合のそれぞれについて、視点方向である  $\theta_r$  を 30 度に固定して  $\phi_r$  を 0 度から 360 度まで変化したときのベルベットの反射光強度を示したものである。それぞれ、正反射方向で鏡面反射のピークが検出されているが、分布の形状が異なっていることがわかる。相対角度  $(\phi_r - \phi_i)$  が同じでも反射特性が異なる異方性反射の特徴がよく現れている。

図 17、図 18 は RCG-1 により計測したベルベット、サテンの BRDF をもとに波形の板をそれぞれ異なる光源環境下でレンダリングした結果である。このシーンでは、偶然に視点と光源が法線方向にならなかったため、データ欠損の問題は生じていない。なお、図 14 に示す実際の布と比較して、若干質感が異なるように見えるのは、試料やカメラ、プロジェクタを焦点に配置す

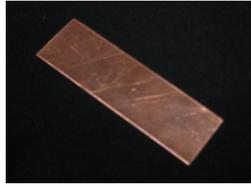


図 19 計測対象の銅

る精度が不十分であったことなどが原因として考えられる。反射特性が既知の物体を用いたキャリブレーションなどの改善が必要である。

#### 5.4 等方性反射の計測

次に、金属を対象として等方性反射の BRDF 計測実験を行った。対象物体は、図 19 に示す銅板である。RCG-2 を用いて BRDF を計測した結果に基づいて、波板形状の CG をレンダリングした結果を図 20 に示す。なお、等方性反射を仮定すると光源方向の  $\phi_r$  を変化させる必要がないため、この銅板の BRDF 計測に要した時間は約 26 秒であった。

銅の質感は再現されているが、拡散反射成分は暗く、鏡面反射成分は飽和している。金属は拡散反射と鏡面反射の差が大きいため、両者を同時に計測するためには、より広いダイナミックレンジが必要であることがわかる。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のソフトウェア面と、より高感度な冷却 CCD や、高コントラスト比のプロジェクタと組み合わせるなどのハードウェア面からの改善が必要である。

## 6 今後の課題

本稿では、楕円鏡とプロジェクタを組み合わせることで、物体表面の反射特性を表す双方向反射率分布関数を高速に計測できる装置を提案した。提案装置は、サテンやベルベットなどの布の異方性反射特性も計測が可能であり、計測時間の大幅な短縮に成功した。ただし、依然として約 50 分の時間を要しているため、高速度カメラと組み合わせるなどのハードウェアの工夫と、サンプリング間隔を反射率の変化にあわせて方向ごとに可変にするなどのソフトウェアの工夫によって、さらなる高速化を目指す。

本稿では BRDF を計測したが、試料を平行移動しながら計測を繰り返すことにより、双方向テクスチャ関数 (BTF) の計測装置に拡張することも検討している。また、データ量の問題については、本論文ではまったく取り扱わなかったが、反射特性にあわせて効率的な記録方法も必要である。さらに、反射特性が既知の物体を用いた精度評価も必要である。今後は、これらの問題を解決し、実用化を進めていく予定である。



図 20 銅のレンダリング結果

## 参考文献

- [1] H. Li, S. C. Foo, K. E. Torrance, and S. H. Westin, "Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications", Proc. SPIE, Vol.5878, pp.221-231, 2005.
- [2] 武田祐樹, フィンクアンフィヴィエト, 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
- [3] W.Matusik, H.Pfister, M.Brand, and L.McMillan, "A Data-Driven Reflectance Model", Proc. SIGGRAPH2003, pp.759-769, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] G. Müller, G. H. Bendels, and R. Klein, "Rapid Synchronous Acquisition of Geometry and Appearance of Cultural Heritage Artefacts", VAST2005, pp.13-20, 2005
- [8] K. J. Davis and D. C. Rawlings, "Directional reflectometer for measuring optical bidirectional reflectance", United States Patent 5637873, June, 1997.
- [9] 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.
- [10] G.J.Ward, "Measuring and Modeling anisotropic reflection", Proc. SIGGRAPH'92, pp.255-272, 1992.
- [11] 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.
- [12] S. Kuthirummal and S. K. Nayar, "Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture", Proc. SIGGRAPH2006, pp.916-923, 2006.
- [13] 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.
- [14] B.T.Phong, "Illumination for Computer Generated Pictures", Commun. ACM, vol.18, pp.311-317, 1975.
- [15] K.E.Torrance, and E.M.Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surface", J. Opt. Soc. Am, vol.57, pp.1105-1114,1967.