

楕円鏡を用いた双方向反射率分布関数の高速計測

角野 皓平[†] 向川 康博[†] 八木 康史[†]

High Speed Measurement of BRDF Using an Ellipsoidal Mirror

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

あらまし 物体表面の反射特性を表す双方向反射率分布関数を密に計測するためには、様々な角度から照明した場合の反射光を様々な角度から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、高速に反射率を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。これにより、投影画像を変えただけで光源方向を自由に制御できる。また、試料のあらゆる角度への反射光は、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。実際に計測装置を試作し、異方性反射特性をもつベルベットとサテンの反射率を計測したところ、光源のサンプリング間隔をそれぞれ1度とした場合でも、約50分で計測できた。

キーワード 楕円鏡, BRDF, 異方性反射

1. まえがき

物体の幾何情報である三次元形状は、レンジファインダ等を用いることによって比較的容易に計測できるようになってきた。一方、光学情報である反射特性は、いまだに計測が容易ではない。反射特性は、物体の表面の微視的構造に起因する情報であり、単なるCGへの利用だけでなく、文化遺産のアーカイブや物体認識など、様々な用途に応用可能な重要な情報であるにもかかわらず、簡便な計測方法が確立されていない。

これは、反射特性を表す双方向反射率分布関数(BRDF)を完全に計測するためには、対象物体に対してあらゆる方向から照明したときの反射光を、あらゆる視線方向から観測しなければならず、膨大な計測時間と記憶容量が必要となるのが大きな理由である。そのため、従来は、BRDFをパラメトリックモデルで近似したり、物体表面上でBRDFが一様であると仮定するなど、対象物体を限定して問題を簡単化することが多かった。

それに対して、本研究では対象物体を限定せず、反射光学系を工夫することで、BRDFを密に計測するという問題に正面から取り組む。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

反射特性を簡潔に記述するために、Phongモデル[1]やTorrance-Sparrowモデル[2]などのパラメトリックモデルが広く利用されている。実物体の反射特性をこれらのパラメトリックモデルで表現するためには、パラメータ推定が必要となる。佐藤ら[3]は、対象物体の三次元形状と実画像に基づいて、Torrance-Sparrowモデルのパラメータを推定する手法を提案している。また、町田ら[4]は、反射モデルのパラメータ推定のための、最適な光源位置を決定する手法を提案している。しかし、これらのパラメトリックモデルによる近似表現では、複雑な反射特性を正確に表現することは難しいという問題がある。

一方、昨今の計算機の記憶容量の増大に伴って、反射特性をパラメトリックモデルで近似表現するのではなく、光源方向を密に変化させた場合の見え方を、そのまま記録しておくノンパラメトリックモデルが主流になりつつある。光源方向を密に変化させることができれば、複雑な反射特性でも原理的には誤差なく記録することができる。Debevecらは、光源を回転させて、

[†] 大阪大学産業科学研究所, 茨木市
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka
University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, 567-0047 Japan

顔の反射特性を計測する Light Stage を提案した [5]。また、高速度カメラとフラッシュを用いることで、計測時間を大幅に短縮した [6]。更に、反射特性の計測が目的ではないが、回転機構を排除し、ドーム状に LED を配置して任意の照明環境を模倣できる装置も提案している [7]。しかし、これらの方法は、光源方向を変えるだけであり、視線方向は固定されていた。

物体表面の BRDF を完全に計測するためには、光源だけではなくカメラも物体を中心としてあらゆる方向に配置しなければならない。武田らは、光源とカメラを同時に回転できる装置を用いて、サテンなどの異方性反射をもつ布の反射特性を計測した [8]。しかし、密にデータを計測するためには、光源方向と観測方向のすべての組合せについて反射光の観測が必要であるため、膨大な計測時間が必要となる。

計測時間を劇的に短縮する方法として、反射鏡を用いたシステムがいくつか提案されている。Ward [9] 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。しかし、光源はハーフミラーの裏側で回転させなければならず、計測には時間がかかっていた。一方、Dana [10] は、放物面鏡を用いることで、BRDF だけでなく双方向テクスチャ関数 (BTF) をも計測できる装置を開発している。しかし、光源の回転機構は排除できたものの、光源の並進機構は依然として必要である。また、計測できる光源方向・視線方向の範囲は限定されており、あらゆる方向のデータが計測できるわけではない。近年、Han ら [11] は、万華鏡のように平面鏡を組み合わせ、更にプロジェクタを用いることで、機械的な回転・並進機構を完全に排除しつつ、BTF を計測できるシステムを開発した。しかし、光源方向・視線方向は離散的であり、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。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 を計測できるコンパクトな装置である。

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

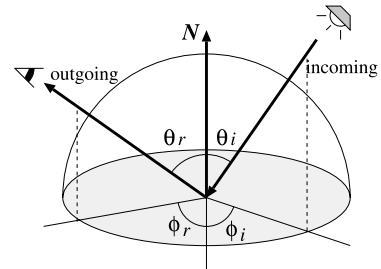


図 1 BRDF の 4 パラメータ
Fig. 1 Four parameter of BRDF.

ように、光源方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光照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 (θ_r, ϕ_r) 、光源方向 (θ_i, ϕ_i) に加えて、波長 (λ) 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 [1]、Torrance-Sparrow [2] 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みなすことができ、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おそれがある。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

前述のとおり、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二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、 θ_r 、 ϕ_r 、 θ_i 、 ϕ_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 3 Byte で記録すれば、

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

と、3 GByte もの大量データとなってしまう。以前は、このような膨大なデータは非現実的とみなされてきたが、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。更に、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合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を止めずに、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。

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

楕円鏡は二つの焦点をもち、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もつ。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

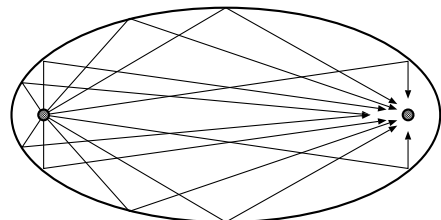


図 2 楕円鏡の特性
Fig. 2 Property of ellipse.

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ときの反射光を，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設計した計測装置を図3に示す．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 (θ_i, ϕ_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 (θ_r, ϕ_r) の反射光強度を知りたいときは，撮影画像の1点を参照すればよい．

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．図4(a)は，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) の対応を示している．

なお，各光源方向に対応する1画素のみを光らせて

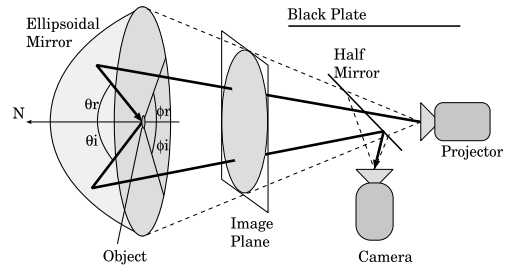


図3 設計した計測装置
Fig. 3 Design of measurement apparatus.

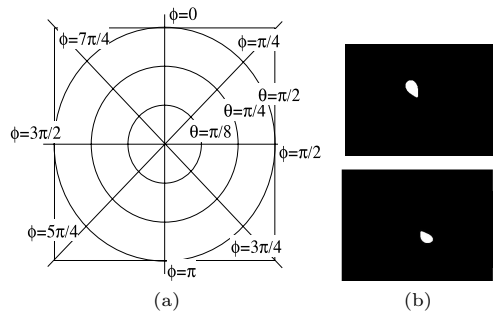


図4 (a) 画像と角度の対応，(b) 投影パターンの例
Fig. 4 (a) Correspondence of image and angle.
(b) Examples of projection pattern.

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も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4(b)のような，与えられた光源方向との角度差がしきい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，方向に依存せずに一定となる．

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2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の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。

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

ここで、 ρ_d 、 ρ_s は拡散反射と鏡面反射の反射率、 α_x 、 α_y は鏡面反射の広がりを表す標準偏差である。異方性反射をもつように、 α_x 、 α_y はそれぞれ 0.05、0.16 とした。この値は [9] 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 5 に、シミュレーションによる画質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

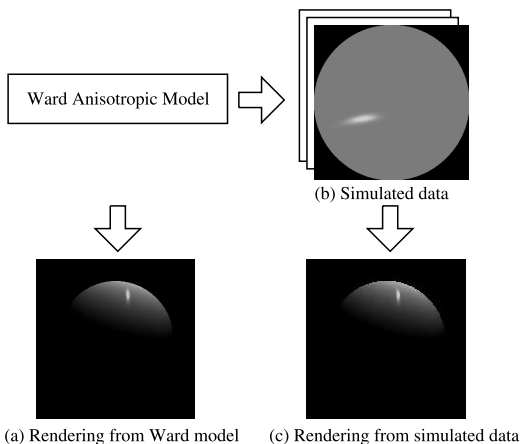


図 5 シミュレーション方法
Fig. 5 Simulation method.

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 6 は生成した CG の例であり、サンプリング間隔が広がると、特に鏡面反射の再現性が低下していることが分かる。

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 7、図 8 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 × 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 7 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 8 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 40 dB 以上

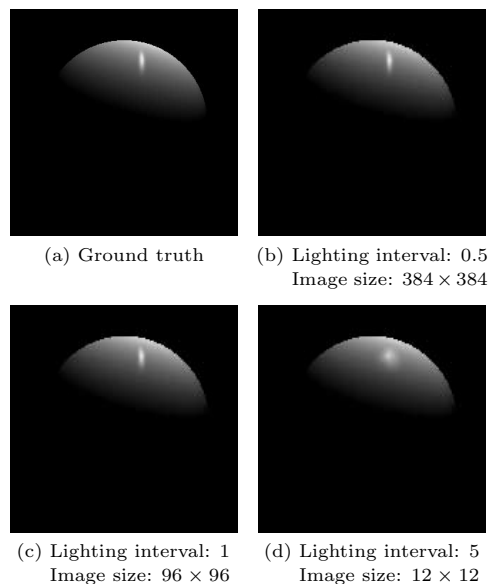


図 6 サンプリング間隔を変えてレンダリングした CG
Fig. 6 CG images under various sampling conditions.

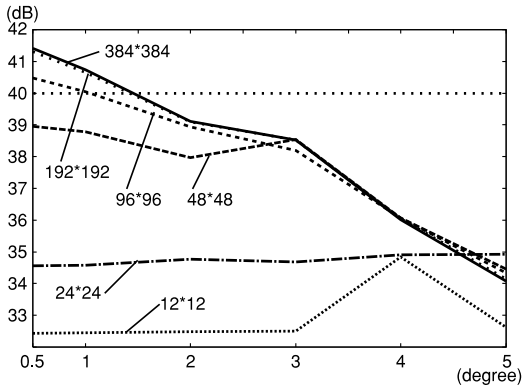


図 7 光源サンプリング間隔と PSNR の関係

Fig. 7 Relation between lighting interval and PSNR.

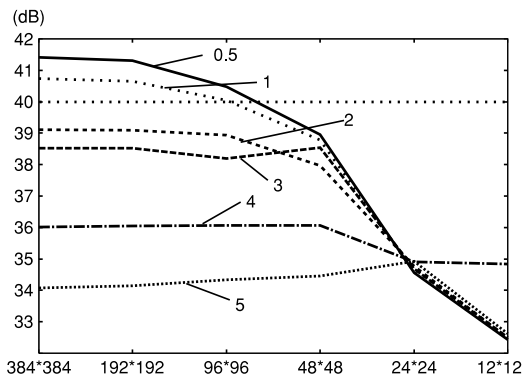


図 8 画像サイズと PSNR の関係

Fig. 8 Relation between image size and PSNR.

であれば二つの画像は見分けがつかないといわれており、PSNR の最小値が 40 dB を超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 96×96 を超えるときであった。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によって左右され、図 4 のように ϕ_r ごとに θ_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 96×96 を一つの目安としてとらえ、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 9 は提案手法に基づいて作成した計測装置 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

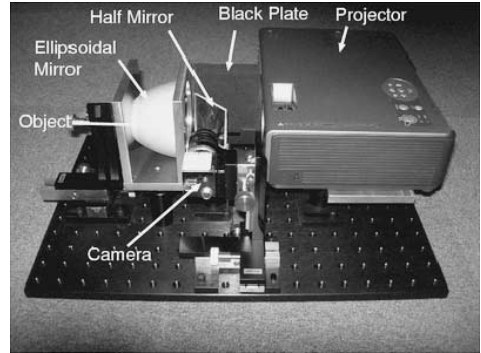


図 9 計測装置: RCG-1

Fig. 9 Measuring device: RCG-1.

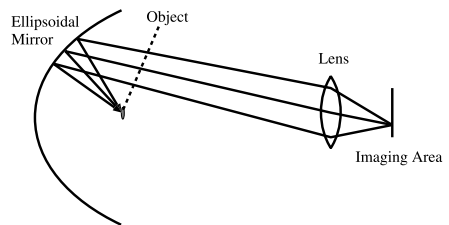


図 10 虚像に焦点を合わせたときの光路

Fig. 10 Light path with focusing.

円鏡としてメスグリオ製の楕円体リフレクタを用いた。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^(注1)。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、その位置は事前に分かっているため、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。

5.3 焦点位置

プロジェクタとカメラのレンズの焦点位置について考える。図 10 は焦点を試料の虚像位置に合わせたときの光路を示したものである。この場合、画像中の 1 点はレンズを介すことにより試料からはある大きさをもつ光源に見えてしまう。そこで本研究ではプロジェクタについては図 11 のように焦点を十分に遠くに合わせることで、点光源としての照明を実現した。また、カメラについては絞りを十分に絞ることにより光束を狭め、狭い方向への反射光のみを観測した。

5.4 布の BRDF 計測

図 12 に示すような異方性反射特性をもつベルベッ

(注1): 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 [12] が考えられる。

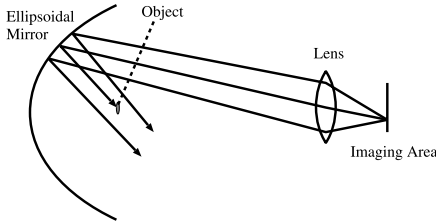
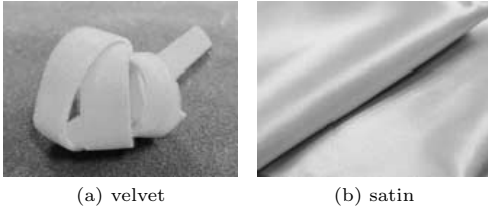
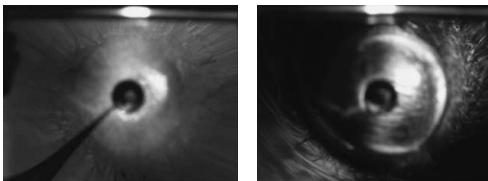


図 11 焦点を合わせないときの光路
Fig. 11 Light path without focusing.



(a) velvet (b) satin

図 12 計測対象とした試料
Fig. 12 Measurement object.



(a) velvet (b) satin

図 13 撮影画像の例
Fig. 13 Example of captured image.

トとサテンを対象として、実際に試作装置を用いて BRDF を計測し、データ計測時間を調べた。5.1 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 13 は、それぞれプロジェクタを用いて $\theta_i = 250$, $\phi_i = 30$ 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 枚当りの撮影時間は約 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、画像のディスク書込みと投影パターンの読み込みが占めている。

図 14 は、光源方向 (θ_i, ϕ_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 θ_r を 30 度に固定して ϕ_r を 0 度から 360 度まで変化させ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分かる。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。

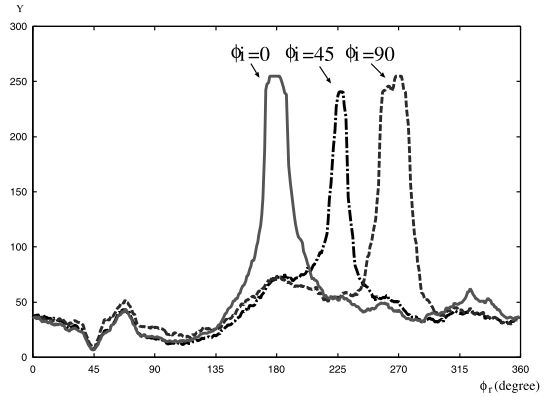


図 14 光源固定時の反射光強度の分布
Fig. 14 Reflection intensity distribution when light fixed.

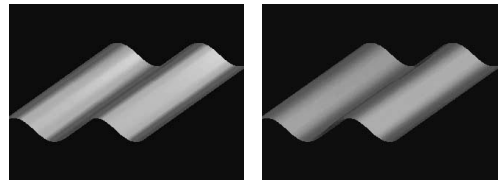


図 15 ベルベットのレンダリング結果
Fig. 15 Rendered image of velvet.

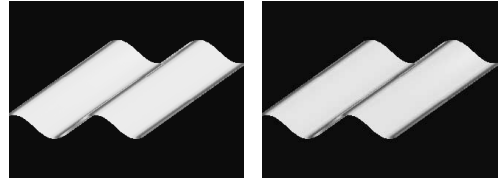


図 16 サテンのレンダリング結果
Fig. 16 Rendered image of satin.

図 15, 図 16 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 12 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。

6. む す び

本論文では、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合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、更なる高速化を目指す。

本論文では 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、本論文では全く取り扱わなかったが、反射特性に合わせた効率的な記録方法も必要である。更に、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。

文 献

- [1] B.T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," Commun. ACM, vol.18, pp.311-317, 1975.
- [2] 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.
- [3] Y. Sato, M. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," SIGGRAPH'97, pp.379-387, 1997.
- [4] 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和, "複数の照明条件の組合せによる物体の表面反射特性の密な推定," 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.8, pp.1873-1881, Aug. 2001.
- [5] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.P. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar, "Acquiring the reflectance field of a human face," SIGGRAPH2000, pp.145-156, 2000.
- [6] T. Hawkins, J. Cohen, and P. Debevec, "A Photometric Approach to Digitizing Cultural Artifacts," VAST, pp.333-342, 2001.
- [7] A. Wenger, A. Gardner, C. Tchou, J. Unger, T. Hawkins, and P. Debevec, "Performance relighting and reflectance transformation with time-multiplexed illumination," SIGGRAPH2005, pp.756-764, 2005.
- [8] 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.
- [9] G.J. Ward, "Measuring and modeling anisotropic reflection," SIGGRAPH'92, pp.255-272, 1992.
- [10] K.J. Dana, "BRDF/BTF measurement device," Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV2001), vol.2, pp.460-466, 2001.
- [11] J.Y. Han and K. Perlin, "Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope," ACM Trans. Graphics, vol.22, no.3, pp.741-748, 2003.
- [12] 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.293-300, 2006.
(平成 18 年 10 月 6 日受付)



角野 皓平

2005 阪大・基礎工・情報科学中退。現在、同大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在籍中。



向川 康博 (正員)

1997 筑波大学大学院工学研究科博士課程了。同年～2002 岡山大学助手。2003～2004 年 10 月筑波大学講師。2004 年 11 月より大阪大学助教授。コンピュータビジョン、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。情報処理学会, 日本バーチャリアリティ学会, IEEE 各会員。



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御卒。1985 同大学院修士課程了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990 大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム工学科講師, 同大学院助教授を経て, 2003 より同大学産業科学研究科教授。1995～1996 英オックスフォード大学客員研究員, 2002 仏ピカルディー大学招聘助教授, 全方位視覚センシング, 画像理解, 知能ロボットに関する研究に従事。1996 年度本会論文賞, 2003 年 ACM VRST2003 Honorable Mention Award, IEEE, 情報処理学会, 日本ロボット学会各会員。博士(工学)。