

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[†]

[†] 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: †{sumino,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

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、投影画像を変える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、異方性反射特性を持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

High Speed Measurement of BRDF using an Ellipsoidal Mirror

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

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

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

E-mail: †{sumino,mukaigaw,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) is used for representing properties of the surface reflectance. However, it requires huge amounts of time to densely measure BRDFs because the target object should be illuminated from all incident angles and the reflected lights should be measured from all reflected angles. In this paper, we present a high-speed method to measure BRDFs using an ellipsoidal mirror and a projector. The object is placed at a focal point, and a camera and a projector are placed at the other focal point using a half mirror. By using this setup, the illumination angle can be rapidly rotated by changing the projection pattern. Moreover, the omni-directional reflected lights from the object can be measured by one static camera at once. We have created a prototype measuring system. It requires about fifty minutes to measure BRDFs of velvet and satin which have an anisotropic reflection property, even if the sampling interval of the incident angle is one degree.

Key words ellipsoidal mirror, BRDF, anisotropic reflection

1. はじめに

物体の幾何情報である3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、光学情報である物体表面の反射特性は、未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関わらず、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こと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単純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、機械的な並進・回転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 3 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、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]。さらに、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持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。また、試料とカメラの両方を半球の中心に配置できないため、中心付近に並べて配置し、この誤差を吸収するために、大きな半球が必要であった。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、光源を平行移動する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、さらにプロジェクタを用いることで、機械的な回転・移動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

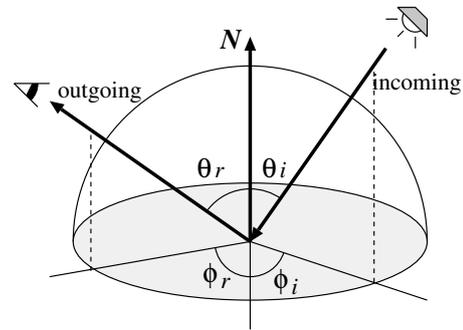


図 1 BRDF の 4 パラメータ

み合わせた BRDF 計測装置である。機械的な回転・移動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 に示すように、光源方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光照射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る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 $(\phi_i + \phi_r)$ 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大きく変化する異方性反射となる。異方性反射をもつ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 で記録するとすれば、

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

と、3GB もの大量データとなってしまう。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。もしカメラと光源を 1 度刻みで移動させ、反射光を計測するのに必要な時間が仮に 1 秒であったとしても、

$$1 \text{sec} \times 360 \times 90 \times 360 \times 90 = 1,049,760,000 \text{sec} \approx 33 \text{years}$$

という途方もない非現実的な時間がかかってしまう。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りない。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大きな問題ではないが、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。

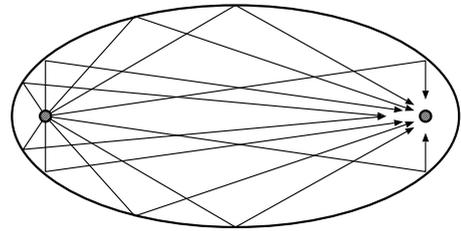


図 2 楕円鏡の特性

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面であり、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 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

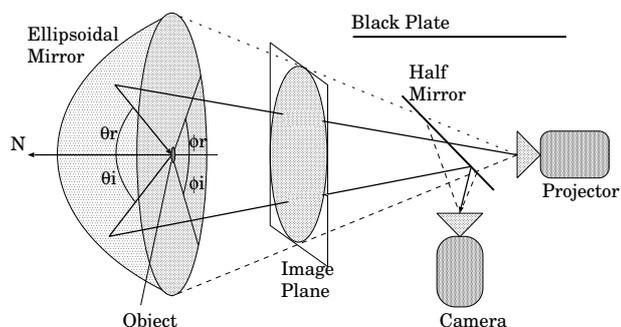


図 3 設計した計測装置



図 5 長軸端に穴の空いた楕円鏡

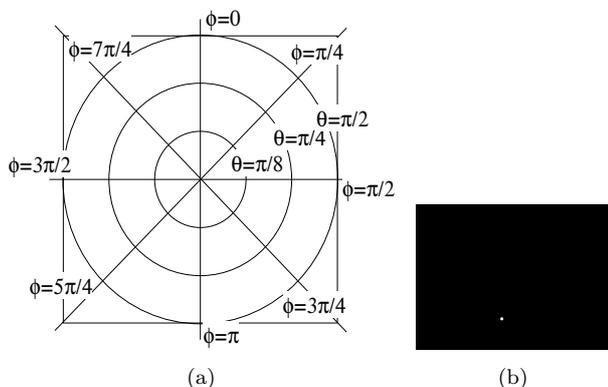


図 4 (a) 画像と角度の対応, (b) 投影パターンの例

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時は、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（内部パラメータの推定）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4(b)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、方向に依存せずに一定となる。

5. 欠損データの補完

5.1 楕円鏡の穴によるデータ欠損

前章では楕円鏡を用いることで光源やカメラを機械的に回転させずに全光源方向、全視線方向に対応する反射率を計測する方法を述べた。しかし、一般に楕円鏡の長軸端付近は高精度に加工することが困難であるため、市販の楕円鏡には図5のように長軸端に穴が空いていることが多い^(注1)。穴の空いた楕円鏡を用いると一部の光源方向から照明することができず、また光源方向に関わらず一部の視線方向への反射光を観測することができないため、データの一部が欠損してしまう。そのため、計測されたBRDFは不完全なものになってしまう。

5.2 データ補完の基本原則

楕円鏡の穴によるデータ欠損は比較的広範囲で起きてしまうため、周囲のデータから線形補間などによって値を予測して埋めることは難しい。そこで本研究ではデータが欠損する方向を変化させて計測した複数のデータを統合することにより、精度を落とすことなくデータを補完する方法を考える。

データ欠損の原因である穴を物理的に移動させることはできないが、試料の向きを変えることによりデータが欠損する方向を相対的に変えることはできる。つまり、試料を傾ける角度を変えてデータを計測すれば欠損方向の異なる複数のデータが得られる。

図6は試料を傾けて配置し、法線方向を軸に試料を回転させ複数回計測を行うことにより、欠損データを補完する手順を図示したものである。まず、試料を傾けて配置し照明可能なすべての光源方向について計測する(図6上段)。試料を傾けて配置すると、画像は図6(b)のように歪んで計測されるため、図4(a)に示した角度分布となるように画像を変換する(図6(c))。次に試料を法線方向を軸に回転させ、同じく照明可能な全ての光源方向について計測する(図6下段)。2回目の計測ではデータが欠損している部分が異なるため、統合することにより計測範囲を拡大することができる。

5.3 必要な撮影回数

本節では、欠損のない完全なBRDFを計測するために必要

(注1): 仮に穴の空いていない楕円鏡を特別に製作したとしても加工精度が低いため、信頼性の高いデータが得られない。

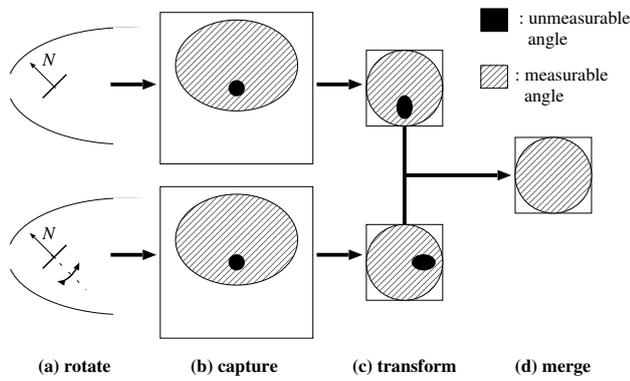


図 6 データ補完の原理

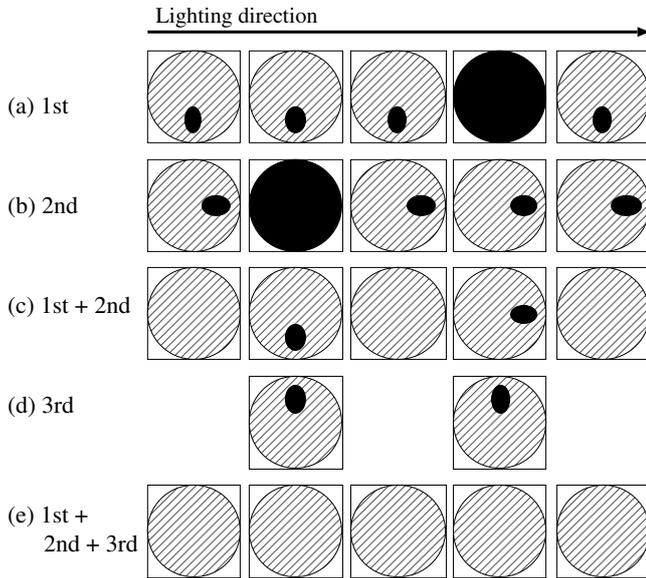


図 7 データの欠損範囲

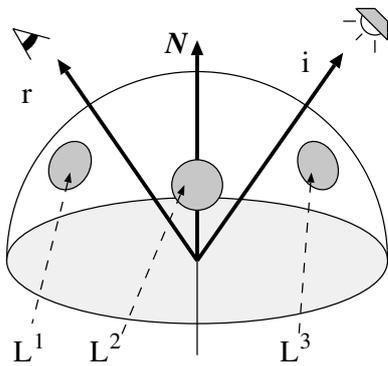


図 8 欠損方向

な撮影回数について検討する．照明と観測のいずれか一方のみでデータが欠損するのであれば，欠損方向を変化させて 2 度計測するだけで全データを補完できる．しかし，楕円鏡の穴のように照明と観測の両方が欠損する場合はそれらの組み合わせを考慮しなければならない．

図 7 は図 6(c) のように座標変換した画像を各光源方向について横に並べたものである．1 度目と 2 度目の計測 (図 7(a)(b)) では各光源方向について撮影された画像のうち一部の視線方向

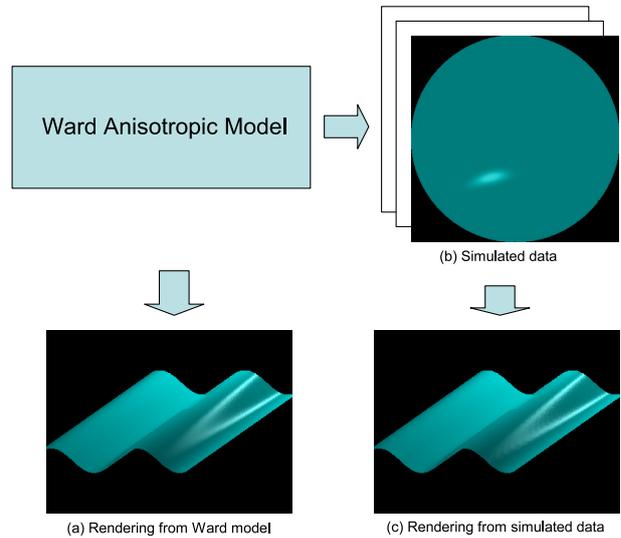


図 9 シミュレーション方法

についてはデータが欠損している．また，一部の光源方向については照明することができないため全視線方向のデータが欠損している．ここで図 8 に示すように光源方向ベクトルを i ，視線方向ベクトルを r ，全視線方向，全光源方向のうち 1 回目の計測で穴により照明，観測できない方向ベクトルの集合を L^1 と定義すると，1 回目の計測でデータが欠損する条件は

$$i \in L^1 \vee r \in L^1 \quad (2)$$

と表すことができる．同様に 2 回目の計測で照明，観測できない方向ベクトルの集合を L^2 (ただし $L^1 \cap L^2 = \emptyset$) とすると，欠損データ部は

$$i \in L^2 \vee r \in L^2 \quad (3)$$

となる．合計 2 回の計測で得たデータを統合すると

$$(i \in L^1 \vee r \in L^1) \wedge (i \in L^2 \vee r \in L^2) \\ \Rightarrow i \in L^1 \wedge r \in L^2 \vee i \in L^2 \wedge r \in L^1 \quad (4)$$

となり依然として一部のデータが欠損していることがわかる (図 7(c))．そこでさらに照明，観測できない方向ベクトルの集合を L^3 (ただし $L^3 \cap L^1 = \emptyset$ ， $L^3 \cap L^2 = \emptyset$) として 3 回目の計測を行う．3 回目の計測では全光源方向について撮影を行う必要はなく，データ欠損が起きた光源方向，つまり $i \in L^1$ の範囲と $i \in L^2$ の範囲のみ照明し撮影すればよい (図 7(d))．合計 3 回のデータを統合するとデータ欠損の範囲はなくなり，ここではじめて完全な BRDF を計測することができる (図 7(e))．

6. 実験

6.1 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

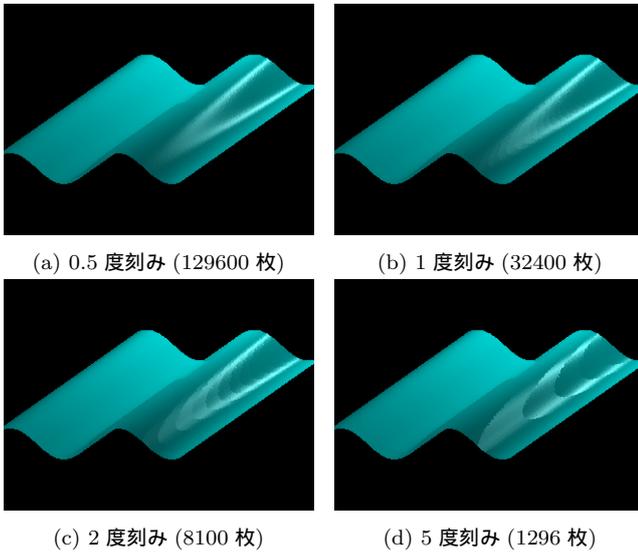


図 10 光源サンプリング間隔を変えてレンダリングした結果

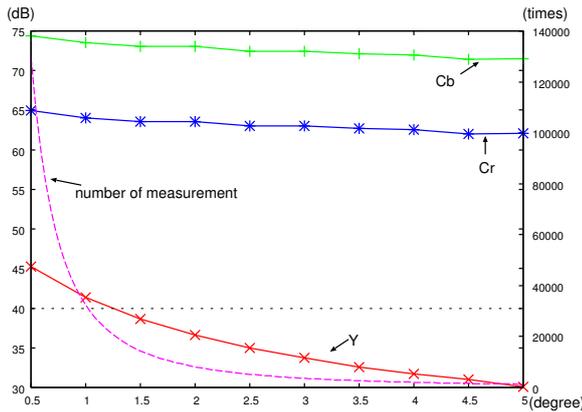


図 11 光源サンプリング間隔と PSNR の関係

てしまう．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．異方向性を表現できるパラメトリック表現モデルとして，式 (5) に示す Ward の異方向性反射モデルを用いた．

$$\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{\cos\theta_i\cos\theta_r}} e^{-\tan^2\theta_h(\frac{\cos^2\phi_h}{\alpha_x^2} + \frac{\sin^2\phi_h}{\alpha_y^2})} \quad (5)$$

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．異方向性を持つように， 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 9 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 (5) により定義された反射モデルを用いて，波形の板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，波形の板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．

まず，視点方向のサンプリング間隔に相当する画像サイズを 360×360 に固定し，光源方向のサンプリング間隔を変化させた．図 10 は， θ_i, ϕ_i の間隔を 0.5 度，1 度，2 度，5 度とした場合のシミュレーション画像から波形の板をレンダリングした例である．この結果からも，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わかる．

画質の違いを定量的に評価するために，Y,Cb,Cr それぞれについて PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) を計算した．図 11 は，光源方向を 0.5 度から 5 度まで 0.5 度刻みでサンプリングした場合の，PSNR(左縦軸) と画像枚数(右縦軸) を表している．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，Cb, Cr に関しては安定して再現性が高い．一方，Y に関してはサンプリング間隔が広がるにつれて精度が落ちている．これは鏡面反射付近で特に反射率が劇的に変化する場合の明暗を正しく再現できていないことによると考えられる．

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，この予備実験で Y, Cb, Cr すべてで PSNR が 40dB を越えたのはサンプリング間隔が 1 度以下の時であった．そのため，本研究では 1 度をひとつの目安として捉え，次節での実験による実験においても，光源のサンプリング間隔を 1 度とする．

次に光源方向のサンプリング間隔を 1 度に固定して，視点方向に相当する画像サイズを変化させた．図 12 はそれぞれ $384 \times 384, 192 \times 192, 48 \times 48, 12 \times 12$ サイズのシミュレーション画像を元に波形の板をレンダリングした結果である．なお，視点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，また図 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．

画像サイズを 384×384 から 12×12 の間の 6 つのサイズに変えたときの，PSNR の変化を図 13 に示す．このグラフでは，横軸を対数スケールで示している． 48×48 と粗い画像でも PSNR は 40dB を越えているが，これは波形の板が視点方向について密な BRDF を必要としない形状をしているためであると考えられる．この結果はシーンの形状に依存するため，一概には言えないが，通常の VGA(640×480) 程度のカメラで十分であることがわかる．

再現性は，仮定した対象物体の反射モデル，レンダリング時に仮定した形状・光源方向・撮影方法に依存するため，必要なサンプリング間隔を厳密に見積もるためには，より多くの検証データが必要である．この問題は，光源位置の最適配置問題とあわせて今後の課題としたい．

6.2 試作装置

図 14 は提案手法に基づいて作成した計測装置 RCG (Rapid Catadioptric Gonioreflectometer) である．IEEE1394 デジタルカメラとして PointGrey 製の Flea を，液晶プロジェクタと

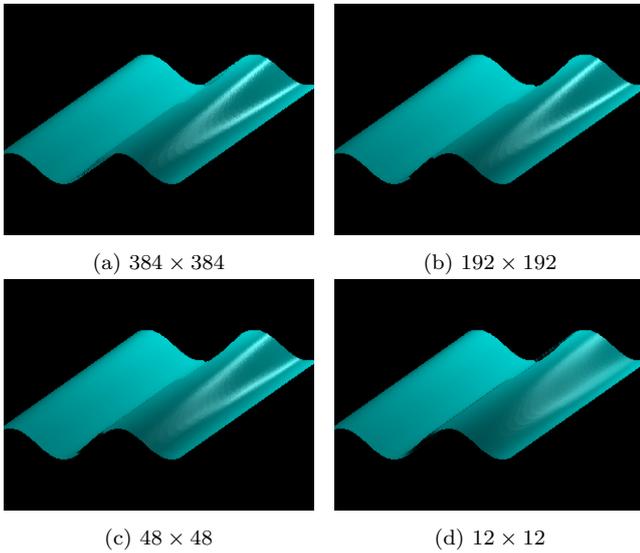


図 12 シミュレーション画像サイズを変えてレンダリングした結果

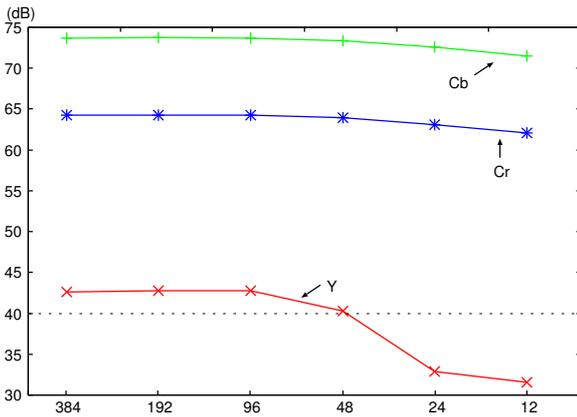


図 13 シミュレーション画像サイズと PSNR の関係

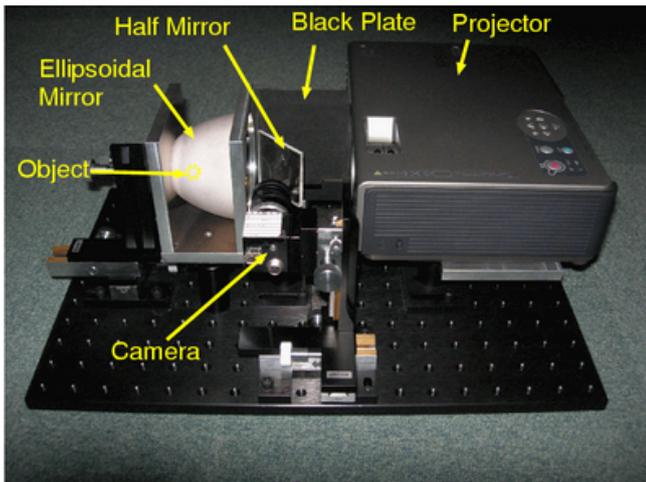
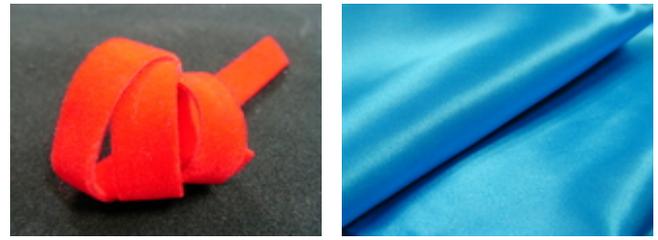


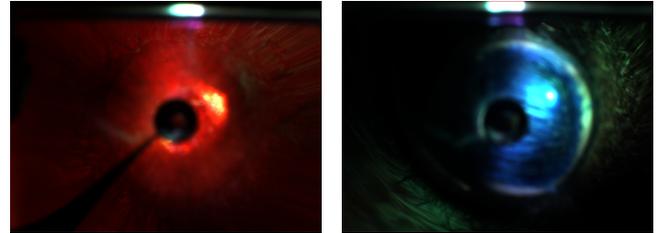
図 14 試作装置：RCG

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。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



(a) ベルベット (b) サテン

図 15 計測対象とした試料



(a) ベルベット (b) サテン

図 16 撮影画像の例

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。

6.3 布の BRDF 計測

図 15 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、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。6.1 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。本実験では計測は 1 回のみとし、欠損データの補完はしていない。図 16 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 17 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 18, 図 19 は RCG 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 2 つの光源環境下でレンダリングしたものである。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。アライメントの精度が悪かったことやダイナミックレンジが十分に足りていないことなどが原因となり、布の質感が完全に再現できたとは言いがたいが、異方性反射が表現できていることがわかる。

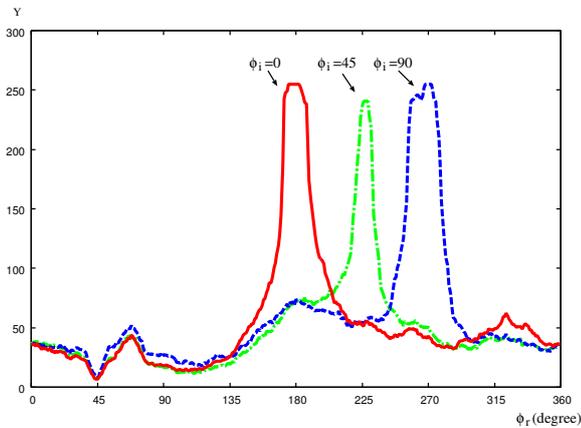


図 17 光源固定時の反射光強度の分布

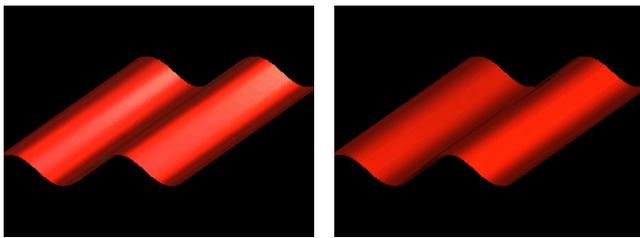


図 18 ベルベットのレンダリング結果

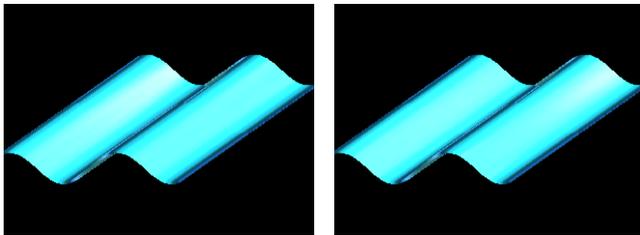


図 19 サテンのレンダリング結果

表 1 撮影枚数と欠損率

| | 1st | 1st+2nd | 1st+2nd+3rd |
|-----------|--------|---------|-------------|
| 撮影枚数 | 29034 | 58068 | 64800 |
| 照明方向の欠損率 | 10.39% | 0% | 0% |
| BRDF の欠損率 | 19.70% | 0.08% | 0% |

6.4 撮影枚数と欠損データの関係

データ欠損を補完するために必要な撮影枚数とデータの欠損率の関係をシミュレーション実験により算出した。表 1 は実際に RCG で用いた楕円鏡の形状に基づいて光源方向を 1 度刻みに変化させた場合の欠損率を計算した結果である。それぞれの計測では、穴により照明することができない光源方向や、既に全視線方向について観測済みの光源方向については計測を行わないものとする。

1 回目の計測で 9 割近くの光源方向から照明することができるが、観測された各画像にも一部データ欠損があるため、BRDF として計測できるデータは全体の 8 割程度となる。2 回目の計測データを統合するとすべての光源方向から照明したデータが得られるが、一部の光源方向については視線方向に関してデータ欠損が起きるため、わずかではあるが依然として計測できて

いないデータがあり、3 回目の計測が必要となる。3 回目の計測では 1 回目もしくは 2 回目に照明できなかった光源方向のみ照明すればよく、撮影枚数は 1 回目、2 回目に対して少なくなった。

7. 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) の計測装置として発展することも十分に考えられる。これについても装置を改良し、有用性を実証していきたい。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、反射特性にあわせた効率的な記録方法も必要である。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。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号 17680018) による。

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, 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, 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 Transactions on Graphics, Vol.22, No.3, pp.741-748, 2003.