

複数光源の同時照明による BRDF の高速計測

田川 聖一[†] 向川 康博[†] 八木 康史[†]

Rapid BRDF Measurement by Composing Multiple Illumination

Seiichi TAGAWA[†], 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高速に計測するために、計測装置から機械的な駆動系を排除するなど、様々なハードウェアによる工夫がなされてきた。本研究では、更にソフトウェアの工夫として、複数方向から同時に照明することで、計測回数を減らし、より高速な計測を行う。複数方向から同時に照明したとき、反射光が重なり合って観測されるという問題を、2色性反射モデルに基づいて鏡面反射と拡散反射に分離することで解決した。実際に光沢のある硬貨の反射特性を計測する実験を行った結果、計測時間を約 7.6 倍に高速化できると同時に、ノイズも低減できることを確認した。

キーワード 双方向反射率分布関数, 2色性反射モデル, 鏡面反射, 拡散反射, ノイズ低減

1. まえがき

反射特性は物体表面の微視的形狀に依存し、物体の見え方を決定づける大きな要因である。反射特性を精密に計測できれば、より写実性の高い CG の作成や塗装面の検査など、応用可能な用途は少なくない。従来より、反射特性を計測するために、ゴニオリフレクトメータや凹面鏡を用いたシステム [1], [2] など様々な計測装置が提案されてきた。しかし、反射特性を密に計測するためには、あらゆる方向から照明し、それぞれ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、機械的な駆動系を有する装置では膨大な計測時間を必要とする。

近年、凹面鏡とプロジェクタの組合せというハードウェアの工夫によって、密な反射特性を高速に計測できるシステムが提案されている。角野ら [3] は楕円鏡を利用し、Ghosh ら [4] は独自に設計した凹面鏡を利用する計測装置を設計した。これらの装置では機械的な駆動系を排除し、投影パターンを変えることで照明の入射方向を高速に変化させ、物体表面での全方向への反射光を凹面鏡を用いて一度に撮影できる。

更に、光源としてプロジェクタを用いたことにより、任意の照明環境を与えるというソフトウェア面の工夫

も可能となる。向川らは、照明パターンをアダマール変換で多重化することで、計測値の SN 比を向上できることを示した [5]。更に、照明分布を球面調和関数 [4], [6] や、ウェーブレット変換 [7] で直交変換することで、計測回数を減少できることも示されている。しかし、アダマール変換は SN 比を向上させるものであり、計測時間を短縮できない。また、球面調和関数やウェーブレット変換を用いた手法では、基底関数を低周波成分に限定することで高速化できるが、滑らかな表面で生じる空間的に高周波な鏡面反射を正確に計測できなくなる。

一方、Sen ら [8] は、光の相反性を実証する際に、複数の照明であっても、それぞれの反射光が互いに重ならない場合には同時に計測できることを利用し、計測時間を短縮化できることを示した。しかし、同一点を複数方向から照明する場合には、反射光が重なってしまうため、この高速化の原理を単純に反射特性の計測に利用することはできない。

そこで、本研究では、反射光の分布を解析することで、Sen ら [8] が示した高速化の原理を、反射特性の計測に利用する方法を提案する。まず、2色性反射モデルに基づいて、反射光を拡散反射と鏡面反射に分離する。拡散反射は全方向に一樣な分布となることから、一度の計測に必要な情報が得られる。また、鏡面反射は局所的な分布をもつことから、複数方向から照明したときに重ならない組合せが存在する。そのため、反

[†] 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

射特性計測においても複数光源の同時照明が可能となり、計測を高速化できる。

2. 双方向反射率分布関数の計測装置

2.1 双方向反射率分布関数とは

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) の入射光照射度に対する観測方向 (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。

光源方向と観測方向を固定し、対象物体を観測面の法線を軸に回転させたとき、観測輝度が変化するものを異方性反射、変化しないものを等方性反射と呼ぶ。異方性反射は織物やヘアライン加工された金属など比較的特殊な反射である。一方、等方性反射は、その性質から方位角については相対角 $\phi = \phi_r - \phi_i$ で決まるため、3パラメータでの記述が可能である。

2.2 楕円鏡とプロジェクタを用いた計測装置

本節では、本研究で用いる BRDF 計測装置の動作原理を述べる。図 2 (a) に、プロジェクタと楕円鏡を組み合わせた BRDF 計測装置 [5] の外観を示す。楕円鏡には二つの焦点があり、一方の焦点を通る光は内面で反射して、もう一方の焦点を通る性質がある。図 2 (b) のように、一方の焦点に対象物体を、もう一方の焦点にプロジェクタとカメラを配置すると、プロジェクタから放射された光線はビームスプリッタ、平面鏡、楕円鏡の順に反射し、対象物体を自由な角度から照明できる。この際に、プロジェクタから投影するパターンを変えることで、任意の照明環境を設定できることが特徴である。また、対象物体の表面で反射した光は、楕円鏡によってカメラの焦点位置に集められ、一度の撮影で全方向への反射光を計測できる。これにより、光源方向や観測方向を機械的に駆動させることなく、密な BRDF を計測できる。

2.3 等方性 BRDF の計測

対象物体が等方性 BRDF であると仮定できる場合には、前節の BRDF 計測装置を用いて、欠損のない完全な BRDF を一度に計測することができる。この場合、光源方向は図 3 のように、 $\phi = 0, \theta = 90$ から $\theta = 0$ を通り、 $\phi = 180, \theta = 90$ に至る半円弧状に変化させる。本論文では、光源方向と $\phi = 0, \theta = 90$ のなす角を ω と呼ぶ。等方性 BRDF を計測するためには、光源方向を $0 \leq \omega \leq 180$ に変化させればよい。つまり、 θ_i を 1 度刻みとして等方性 BRDF をサンプリ

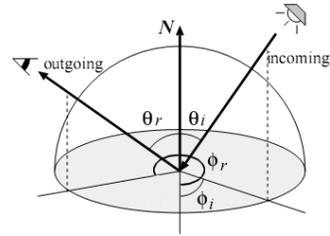


図 1 BRDF の角度パラメータ
Fig.1 Angle parameters of BRDF.

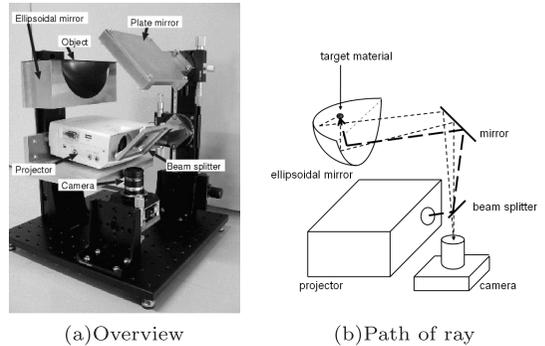


図 2 BRDF 計測装置 [5]
Fig.2 BRDF measuring device.

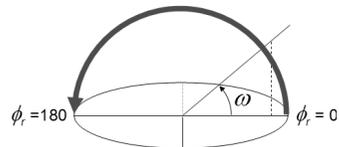


図 3 光源方向の座標系
Fig.3 Coordinate system of illumination.

ングする場合は、合計 181 回の撮影が必要である。

3. 反射光計測の高速化

3.1 基本原理

本研究では、1 度刻みの等方性 BRDF をサンプリングする際の総計測回数を減らすことを目的とする。例として、図 4 に示すように、光源方向 ω_1 と ω_2 を考える。もしも、これらの二つの光源方向から同時に照明したとき、互いに反射光が重ならず、反射光がどちらの方向からの照明によるものであるかが分かれば、それぞれの方向から個別に照明したときの反射光を復元できる。つまり、複数の光源から同時に照明しても、単一光源の場合と同等の情報を得ることができる。

同時に照明する光源方向の集合を Ω とし、各光源方向を $\omega_i \in \Omega$ とすれば、次式のように複数光源で同時

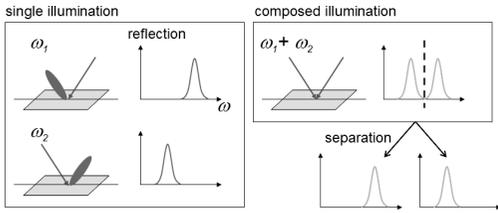


図 4 複数光源の同時照明による高速計測の原理
Fig. 4 Principle of rapid measurement.

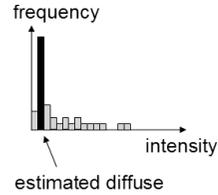


図 5 画素値のヒストグラム
Fig. 5 Histogram of intensities.

に照明したときの反射光 r_{Ω} から、単一光源での反射光 r_{ω_i} を復元する問題と考えることができる。

$$r_{\Omega} = r_{\omega_1} + r_{\omega_2} + \dots + r_{\omega_n} \quad (1)$$

もしも、 n 個の光源を同時に照明できれば、計測回数は $1/n$ になるため、BRDF 計測を n 倍に高速化できることが分かる。

3.2 反射成分の分離

実際に、複数の光源から同時に照明すると、反射光は全方向へ反射し互いに重なってしまう。そこで、本研究では、反射光を拡散反射と鏡面反射に分離し、それぞれの成分の反射光分布の違いを利用して、単一光源の反射光を復元する。

2 色性反射モデルによれば、反射光は拡散反射と鏡面反射の和で表現される。拡散反射はあらゆる方向に均一に反射するのに対し、鏡面反射は光源方向と法線対称な方向を中心に局所的な分布をもつ。拡散反射は観測方向にかかわらず一定の値となることから、全観測方向の反射光の最小値が鏡面反射の影響を受けない拡散反射成分となる。しかし、本研究で用いた計測システムでは、加工精度の問題から、楕円鏡の法線方向にずれが生じ、一部の観測方向では極端に輝度が低い外れ値となることがある。そのため、全観測方向の反射光の最小値は外れ値の影響を強く受けてしまう。

そこで、拡散反射が観測方向にかかわらず一定の値として観測されることから、全観測方向の輝度値のうち、最も出現頻度の高い輝度値が拡散反射成分であるとみなすことができる。つまり、すべての方向への反射光の輝度値のヒストグラムを作成すると、図 5 のように、ある輝度値で頻度が突出する。ヒストグラム中で、最も頻度の高い輝度値が拡散反射成分である。拡散反射成分が分かれば、計測した反射光からそれを引いたものが鏡面反射成分となる。

反射光のうち、拡散反射成分を d_{Ω} 、鏡面反射成分を s_{Ω} とすれば、複数光源下での反射光 r_{Ω} は、次式

のように分離される。

$$r_{\Omega} = d_{\Omega} + s_{\Omega} \quad (2)$$

一般シーンを撮影した画像からの拡散反射と鏡面反射の分離は難しい問題であるが、本研究で用いる BRDF 計測装置のように全方向への反射光を同時に計測できる場合には、拡散反射の一様性を利用できるため、分離は比較的容易である。

3.3 単一光源の反射光の復元

反射光を拡散反射と鏡面反射に分離した後、単一光源の反射光の復元は、図 6 に示すように各成分ごとに行われる。つまり、式 (1) のように、単一光源の反射光を直接復元するのではなく、次式のように各成分ごとに単一光源の反射光を復元する。

$$d_{\Omega} = d_{\omega_1} + d_{\omega_2} + \dots + d_{\omega_n} \quad (3)$$

$$s_{\Omega} = s_{\omega_1} + s_{\omega_2} + \dots + s_{\omega_n} \quad (4)$$

各成分ごとに単一光源の反射光が復元できれば、両成分を足し合わせることで、最終的に必要となる反射光 r_{ω_i} が次式のように求められる。

$$r_{\omega_i} = d_{\omega_i} + s_{\omega_i} \quad (5)$$

拡散反射と鏡面反射について、単一光源の反射光を復元する具体的な方法を以下に述べる。

3.3.1 拡散反射成分の復元

拡散反射成分は、あらゆる方向に一樣の強度で反射し、その強度は照度に比例する。光源の放射輝度が一定であるとすれば、光源方向 ω_i の照度は $\sin \omega_i$ に比例する。そのため、次式のように、各反射方向に対する反射光輝度を照度に応じて比例配分することで、各光源ごとの拡散反射成分が復元できる。

$$d_{\omega_i} = \frac{\sin \omega_i}{\sum_k \sin \omega_k} d_{\Omega} \quad (6)$$

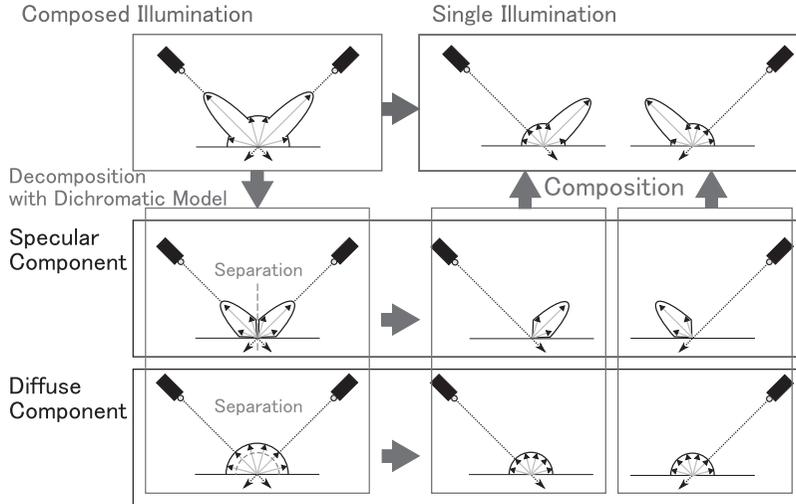


図 6 反射成分の分解による単一光源の反射光の復元
 Fig. 6 Restoration of reflected light under single illumination.

3.3.2 鏡面反射成分の復元

鏡面反射成分は、光源方向と法線対称な方向を中心に局所的な分布となる。そのため、複数光源での鏡面反射成分 s_{Ω} は、光源数と同数のピークをもつ。光源方向 ω_i に対応する分布のピーク位置は、法線対称な $180 - \omega_i$ となる。ただし、off-specular の影響でピーク位置がずれる場合があるため、 $180 - \omega_i$ に最も近い極大値をピーク位置とする。各光源に対応するピーク位置の間は谷になっており、ここが分割点となる。最適な分割点の算出は、隣接するピーク間の角度で観測された輝度が二つのピークのどちらに属するかを調べる 2 クラス識別問題に帰着できる。本研究では、クラス内の分散を最小化し、クラス間の分散を最大化する大津の 2 値化を用いて二つのクラスに分割する。このように隣接する二つのピークごとに、境界となる角度を最適な分割点として求めることで、各反射光成分がいずれのピークに属するかを決めることができ、各光源ごとの鏡面反射成分 s_{ω_i} が復元できる。

3.4 同時照明可能な光源間隔の決定

前節で述べた単一光源の反射光の復元は、各光源に対応する鏡面反射成分が互いに重ならないことが条件となる。光源数を増やして間隔を密にすると、計測時間は短縮できるが、重なりが生じてしまい、正しく復元できないおそれがある。逆に、間隔を広げると、重なりはなくなるものの、光源数を増やせないため効率が悪い。一般に、表面が滑らかで鋭い鏡面反射であるほど、光源数を増やすことが可能であるが、最適な光

源間隔は対象物体に依存する。

本研究では、BRDF 計測の前に、 ω 方向から照明した反射光を解析し、同時照明可能な光源間隔を事前に決定する。光源方向を ω として計測した反射光は、3.2 で述べた方法で拡散反射と鏡面反射に分離できる。鏡面反射のピーク位置は $180 - \omega$ となることから、このピークを中心に鏡面反射成分が存在する範囲を決める。ただし、実際には鏡面反射成分は完全にはゼロにならず、境界があいまいになることから、反射光強度がピーク値の 1/10 以上となる範囲を求める。この範囲外にもわずかな鏡面反射が存在するため、ピーク値の 1/10 以上となる範囲の 2 倍の範囲にほぼすべての鏡面反射が含まれるとし、この範囲を光源間隔とする。

鏡面反射光が観測される角度範囲を ψ とすれば、同時に照明できる光源数は

$$n = \lceil 181/\psi \rceil \tag{7}$$

となる。撮影回数は ψ 回であり、 k 回目の撮影時に同時に照明する光源方向の集合 Ω_k は次式のように n 個の光源を含む。

$$\Omega_k = \{\omega_1^k, \omega_2^k, \dots, \omega_n^k\} \tag{8}$$

ここで、

$$\omega_i^k = (i - 1)\psi + k - 1 \tag{9}$$

である。同様にして合計 ψ 回の撮影に必要な光源方向の集合 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_{\psi}$ が求められる。

3.5 適用限界

前節までで、複数光源を同時に照明することで、BRDF を高速に計測する原理について述べた。しかし、高速化のためには様々な仮定が必要となり、どのような計測対象でも高速化できるわけではない。そこで、本節では、その適用限界を明確にする。

提案手法は、反射光が鏡面反射と拡散反射の2成分に分離できることを仮定している。更に、拡散反射はランバートモデルで表され、その強さは観測方向に依存しないと仮定している。鏡面反射は、特定の反射モデルに従う必要はないが、ピーク位置が光源方向と法線対称となることと、分布が単峰となる必要がある。なお、鏡面反射の分布が広がると高速化の効率が低下し、 90° を超えると全く高速化できない。

このような性質から、提案手法は、滑らかな金属面のように鏡面反射が鋭いピークをもつような物体に対して特に有効である。一方、再帰性反射材のように、鏡面反射のピーク位置が光源方向と法線対称とならない場合や、表面の凹凸が顕著なために、乱反射を生じて鏡面反射の分布が単峰とならない場合などは、適用が難しい。

なお、本論文では等方性反射を仮定し、3パラメータのBRDF計測について、その高速化の原理を述べた。異方性反射の場合には、4パラメータのBRDF計測が必要となるが、上記で述べた条件さえ満たせば、提案手法によって高速化が期待できる。4パラメータのBRDF計測の場合は、光源が球面上に二次元的に分布する。それぞれの光源に対する鏡面反射のピーク位置が予想でき、その二次元的な分布を θ 、 ϕ ごとに調べることができれば、原理的には複数光源を同時照明できる。ただし、どのようにして、複数の光源を球面上に効率的に配置するのかについては、今後の検討課題である。

4. 実験

4.1 計測速度の評価

複数光源の同時照明による高速化の効果を調べるため、2.2で述べた計測装置[5]を用いて、 θ_i を1度刻みとして等方性BRDFを計測した。対象物体として、図7に示す鏡面反射の強い硬貨を用いた。

まず、光源間隔を求めるために $\omega = 75$ から照明したときの反射光を解析した。反射光の分布は図8のようになり、ピーク値の1/10以上の反射光をもつ範囲は11度となった。よって光源間隔 ψ は、2倍の22度



図7 対象物体(硬貨)
Fig.7 Target object (Coin).

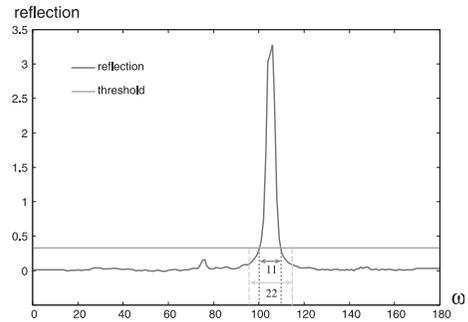


図8 光源間隔の決定
Fig.8 Decision of light direction interval.

とした。実際に鏡面反射の大部分が、この範囲に含まれていることを確認できる。

これにより、光源数は9となり、1枚目の計測の光源方向は $\Omega_1 = \{0, 22, 44, 66, 88, 110, 132, 154, 176\}$ となった。この Ω_1 を照明したときの反射光の分布が図9の赤線である。対象物体は表面が滑らかな金属であるため、鋭い鏡面反射が観測され、拡散反射は非常に弱いことが分かる。なお、光源数は9であるが、ピークは7個しか確認することができない。これは、利用したBRDF計測装置では、楕円鏡の加工精度の問題から $\omega < 10$ と $170 < \omega$ の方向は正しく計測できないことから、 $\omega = 0, 176$ からの鏡面反射が計測できなかったためである。

次に、この反射光を拡散反射と鏡面反射に分離する。計測された反射光の輝度値のヒストグラムを図10に示す。小さな値でピークをもつことから、拡散反射成分が非常に小さいことが分かる。RGBそれぞれについてヒストグラムを作成して拡散反射を求め、反射光からこれらを引いて鏡面反射成分を求めたところ、拡散反射と鏡面反射の分布は、それぞれ図9の青線と緑線のようになった。この結果より、鏡面反射成分の分布の谷で値が0に近づいていることと、表面が滑らかな金属であるため、拡散反射はほとんど観測されないことが確認できる。

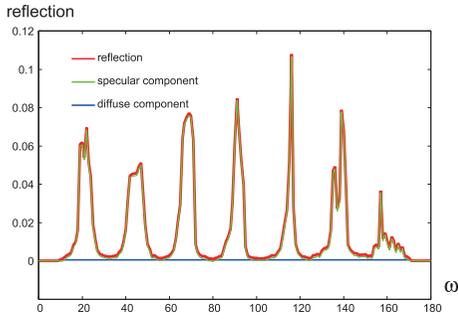


図 9 拡散反射と鏡面反射の分離

Fig. 9 Separation of diffuse and specular reflections.

最後に、分離した拡散反射成分と鏡面反射成分それぞれについて、単一光源時の反射光を復元し、両成分を足し合わせることで、図 11 に示す反射光分布を得た。この結果より、各光源ごとの反射光に復元できていることが分かる。

復元した反射光分布の正確さを評価するために、実際に単一光源下で計測した反射光分布と比較した結果を図 12 に示す。図中の緑線が実際の反射光であり、赤線が復元した反射光である。用いた装置で計測できない $\omega = 0, 176$ を除けば、反射光の分布はほぼ一致している。このことから、複数方向から同時照明しても、単一光源の反射光を復元できることを確認した。

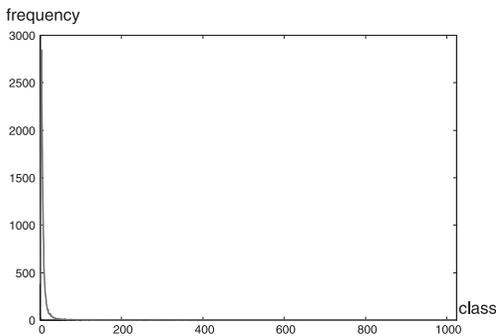


図 10 計測された輝度のヒストグラム

Fig. 10 Histogram of measured intensities.

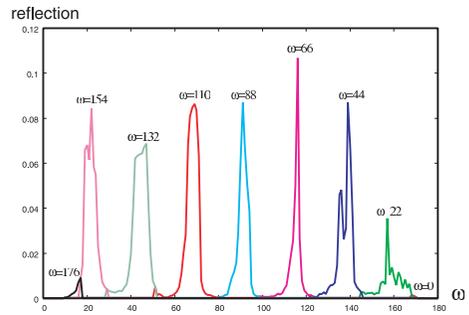


図 11 復元された反射光

Fig. 11 Restored reflected lights.

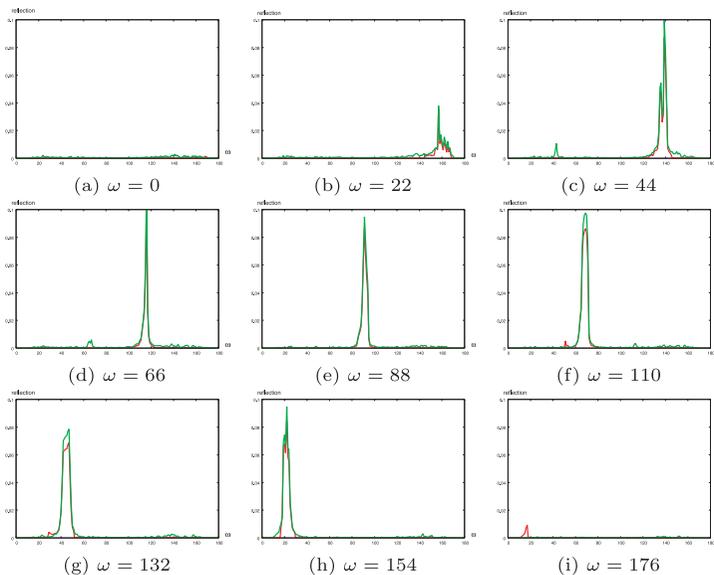


図 12 単一光源の反射光（緑）と復元した反射光（赤）の比較

Fig. 12 Comparison of restored reflections (red) with the ground truth (green).



図 13 単一光源
Fig. 13 Single illumination.

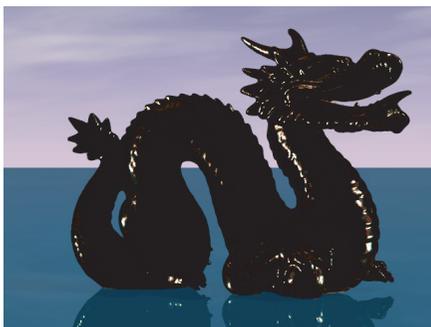


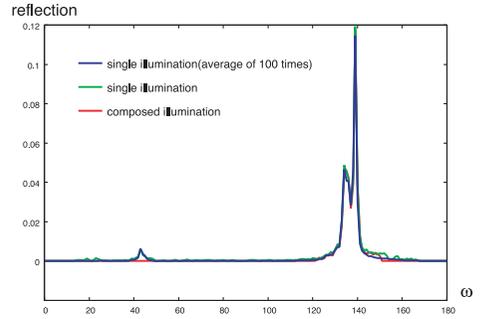
図 14 複数光源の同時照明
Fig. 14 Composed multiple illumination.

1 度刻みの等方向性 BRDF を計測するためには、単一光源では 181 回の撮影が必要であるが、本実験ではこれを 22 回の撮影に減らしたため、理論的には約 8.2 倍の高速化となる。しかし、実際にはプロジェクタから漏れる不要な光による影響を取り除くための補正データ取得などが必要となるため、実際の計測時間は単一光源時で 382 秒、複数光源時で 50 秒となり、計測の速度は約 7.6 倍に高速化された。

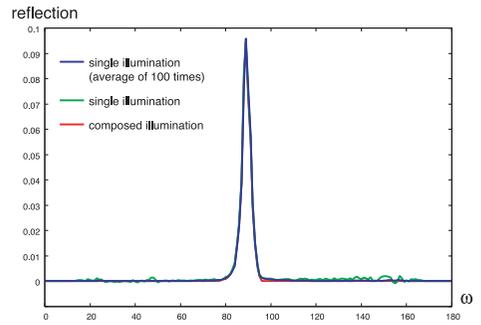
4.2 復元された反射光の精度評価

複数方向から同時に照明したときの結果から復元された反射光と、単一光源で照明したときの反射光を比較し、精度評価を行った。図 12 は、単一光源時の反射光と復元した反射光を比較しているが、拡散反射成分については、むしろ単一光源で直接計測した方が、値が不安定になっていることが分かる。

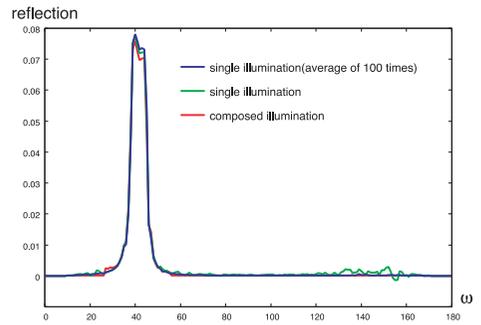
視覚的な違いを目視評価するために、計測された BRDF データを用いて竜形状の CG をレンダリングした。図 13 は単一光源の反射光を、図 14 は複数光源の同時照明の反射光を用いてレンダリングした結果である。この結果からも、単一光源の場合には、特に



(a) $\omega = 45$



(b) $\omega = 90$



(c) $\omega = 135$

図 15 ホワイトノイズ低減の効果
Fig. 15 Effect of white noise reduction.

暗い部分において赤色のざらざらとした拡散反射成分が見える。拡散反射成分は値が非常に小さくノイズの影響を受けやすい、しかし、9 個の光源を同時に照明すると、拡散反射は明るく撮影されるため、ノイズがそれぞれの反射光に分散し、一光源当りのノイズは減少する。図 14 は主に鏡面反射のみが見え、図 13 のような拡散反射はほとんど見られない。ここで、図 7 に示す硬貨は拡散反射をほとんどもたないことから、ピーク以外の角度で見られる輝度は拡散反射が計測されたものではなく、ノイズであると考えられる。

表 1 PSNR による比較 [dB]
Table 1 Comparison in PSNR [dB].

光源方向 \ 照明	単一光源			複数光源		
	Y	Cb	Cr	Y	Cb	Cr
45	40.80	42.86	40.35	42.38	51.89	48.04
90	40.05	42.50	37.37	38.33	49.95	40.60
135	42.99	42.04	40.77	41.02	54.37	48.35

このノイズについて詳細に調べるため、単一光源の計測を 100 回行い、その平均値と比較した。100 回の平均値には、ほぼホワイトノイズは含まれないとみなせる。100 回の平均値、通常単一光源の計測で得られた反射光、複数同時照明の反射光から復元した反射光を、それぞれ図 15 の青線、緑線、赤線で示す。(a)(b)(c) はそれぞれ $\omega = 45, 90, 135$ の場合の反射光の分布である。この図から、単一光源の反射光のピークから外れた場所に出ている輝度はノイズであり、複数光源の同時照明から復元した反射光には含まれないことが分かる。このことから、図 13 に見られる赤いノイズはホワイトノイズであると考えられる。なお、赤成分にのみノイズが目立つことは不自然ではあるが、向川らの論文 [5] でも、光路の波長依存性が原因で、特定の色のみのノイズが観測される問題について述べられている。これは、装置の性質による問題であり、本研究でも解決できていない。

また、100 回計測のデータを正解として、単一光源の反射光と、複数光源の同時照明の反射光の誤差を定量的に評価した。Y, Cb, Cr 各成分ごとの PSNR を表 1 に示す。この結果から、Y 成分はほとんど差はないが、Cb, Cr 成分では、提案手法によって PSNR が大幅に向上していることが分かる。これは、拡散反射での赤いノイズが減少したことの裏付けになっている。

これらの評価により、複数の光源を同時に照明する提案手法では、計測値の SN 比が向上することが確認できた。提案手法は BRDF 計測の高速化だけでなく、ノイズ低減にも効果があることが分かった。

4.3 鏡面反射の弱い対象の計測

先の二つの実験で、金属のような鏡面反射の強い対象に対して、提案手法は十分に効果があることを示した。一方で、鏡面反射の弱い物体の場合にはどれだけ高速化できるかを調べるため、青色紙 (図 16) に対し計測を行った。この対象物体に対し、 $\omega = 120$ から照明したときに計測された反射光は、図 17 のようになった。 $\omega = 60$ あたりで観測される輝度の最大値の 10 分の 1 以上の値をもつ範囲は、160 度程に渡るた



図 16 青色紙
Fig. 16 Blue paper.

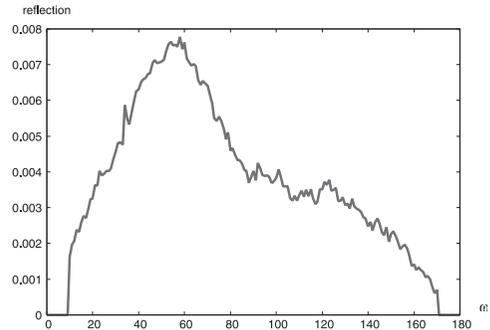


図 17 複数光源から同時照明できない反射光の分布
Fig. 17 Distribution of reflection that multiple illumination cannot be composed.



図 18 光源間隔の検証に用いたサンプル
Fig. 18 Target samples for evaluating direction interval.

め、この対象には複数光源の同時照明を行うことはできなかった。この結果より、高速化の効率は、鏡面反射の広がり強く依存することが分かる。

4.4 光源間隔決定手法の検証

本研究では、鏡面反射の広がり推定を行う際に、反射光強度がピーク値の 1/10 となる範囲の 2 倍の範囲にすべての鏡面反射が含まれると仮定した。この値は経験的に得られたものであるため、その有効性を検証するために様々な物体に対して鏡面反射の広がりを計測し、推定される値との差を調べた。サンプルとして、図 18 に示す 4 種のプラスチック、8 種の金属と 5 種の光沢紙を選んだ。

鏡面反射が存在する角度範囲を目視によって決定した目測値と、提案手法によって得られた推定値を比較した結果を図 19 に示す。この関係より、推定値の方が目測値よりも若干大きくなる傾向はあるものの、両

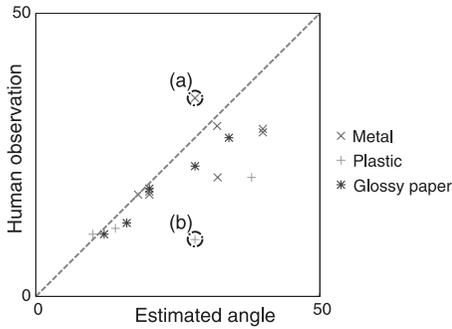


図 19 鏡面反射が観測される角度の推定値と目測値の関係
 Fig. 19 Relation between estimated angle of specular component and human observation.

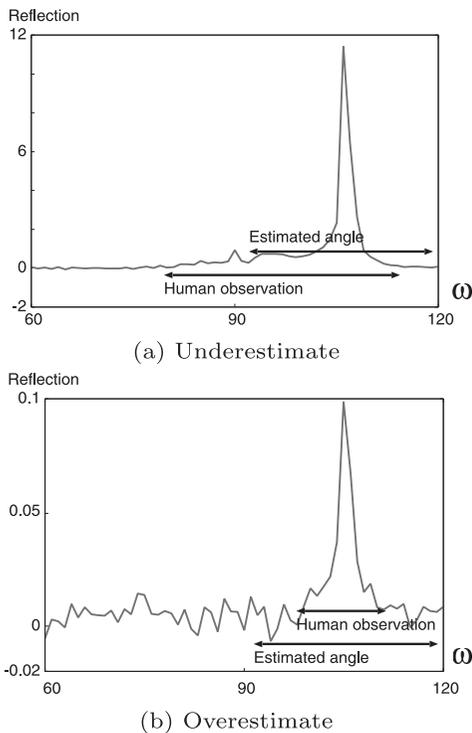


図 20 誤った判定の例

Fig. 20 Examples of incorrect estimation.

者はおおむね一致していることが分かる。

しかし、図 19 中の (a) のように鏡面反射の広がり
 の推定値が実際の値より小さくなると、鏡面反射が重
 重なってしまい、正しく BRDF を計測できない可能性
 がある。逆に (b) のように推定値が過大に評価され
 ると BRDF 計測の精度には影響を与えないが、高速化
 の効率が低下する。

ここで、角度が正しく推定されなかった理由をより

詳しく調べるため、上記 (a), (b) の場合における鏡面
 反射の分布をそれぞれ図 20 (a), (b) に示す。(a) の
 場合は、ピークを中心として左右非対称に分布しており、
 右側は急激に小さくなるにもかかわらず、左側は微小
 な輝度を保ちつつ広い角度に分布しているためである
 と考えられる。一方、(b) の場合は、鏡面反射成分の
 輝度が小さく、拡散反射成分に含まれるノイズが無視
 できない大きさをもつために、ピークの輝度の 1/10
 となる角度の推定が不安定になったことが原因である
 と考えられる。

以上の検証から、本手法で鏡面反射の広がる角度を
 求めたとき、多くの鏡面反射の強い物体では正しい値
 が求まるものの、分布が極端に左右非対称となる場合
 や鏡面反射が弱い場合などは最適な光源間隔とはなら
 ないことが明らかとなった。今後はこのような例外に
 も対応できるよう、分布の形状をより詳細に解析する
 などの工夫が必要である。

5. む す び

本論文では、BRDF 計測の際に、複数光源から同時
 に照明することで、計測を高速化する方法について述
 べた。2 色性反射モデルを用いて、反射光を鏡面反射
 と拡散反射に分離することで、反射光の重なりの問題
 を回避し、それぞれの反射光分布の特性に応じた処理
 によって、単一光源時の反射光を復元する方法を明ら
 かにした。実験では、鏡面反射の強い硬貨を対象とし
 て計測したとき、9 個の光源の同時照明が可能であり、
 計測の速度を約 7.6 倍に高速化できることを示した。
 また、計測データに含まれるホワイトノイズを低減で
 けることも示した。

ただし、計測した対象物体の BRDF の真値は不明
 であることから、計測データそのものの正確さの評価
 には至っていない。今後は、計測した BRDF データ
 の定量的な評価によって、復元した反射光の正確さの
 評価を行う必要がある。また、今後は、今回計測した
 硬貨とは異なる強い鏡面反射をもつ対象を計測し、更
 に、本研究で成立すると仮定した拡散反射のランバ
 ート性や 2 色性反射モデルの妥当性なども検討してい
 く予定である。

文 献

- [1] G.J. Ward, "Measuring and modeling anisotropic reflection," Proc. SIGGRAPH'92, pp.255-273, 1992.
- [2] K.J. Dana, "BRDF/BTF measurement device," Proc. ICCV, vol.2, pp.460-466, 2001.
- [3] 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・理解シンポジウム論文集 (MIRU2006), pp.293-300, 2007.

- [4] A. Ghosh, S. Achutha, W. Heidrich, and M. O'Toole, "BRDF acquisition with Basis Illumination," Proc. ICCV, 2007.
- [5] 向川康博, 角野皓平, 八木康史, "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；画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), pp.295-301, 2007.
- [6] I. Sato, T. Okabe, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Appearance sampling for obtaining a set of basis images for variable illumination," Proc. ICCV2003, pp.800-807, 2003.
- [7] P. Peers and P. Dutr, "Inferring reflectance functions from wavelet noise," Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2005.
- [8] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S.R. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy, and H.P.A. Lensch, "Dual photography," Proc. SIGGRAPH2005, pp.745-755, 2005
(平成 20 年 10 月 9 日受付, 21 年 3 月 3 日再受付)



八木 康史 (正員)

1983 阪大・基礎工・制御卒。1985 同大大学院修士課程了。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所教授。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 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)。



田川 聖一

2008 阪大・基礎工・情報科学卒。現在, 同大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 筑波大学大学院博士課程工学研究科了。同年~2002 岡山大学助手。2003~2004 年 10 月筑波大学講師。大阪大学助教授を経て 2007 年 4 月より同大学准教授。コンピュータビジョン研究に従事。博士(工学)。情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE 各会員。