

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[†]

[†] 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: †{tagawa,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、さまざまなハードウェアによる工夫がなされてきた。本研究では、さら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

Rapid BRDF Measurement by Composing Multiple Illumination

Seiichi TAGAWA[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†], and Yasushi YAGI[†]

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

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

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

Abstract For rapid measurement of BRDFs which express characteristics of reflection, many hardwares have been devised which exclude mechanical drives. In this paper, we introduce a new method to reduce the number of measurements of BRDF by composing multiple illumination. Multiple light sources, instead of a single light source, simultaneously illuminate the target object. We solve the overlapping problem of reflection by decomposing reflection into diffuse and specular components based on the dichromatic reflection model. We confirmed that the measuring time can be reduced by 7.6 times for measuring BRDF of a glossy coins, and that noise in the measured data can be reduced.

Key words bi-directional reflectance distribution function, dichromatic reflection model, specular reflection, diffuse reflection, noise reduction

1. はじめに

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付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、物体の同一性の判定など、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み合わ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。向川ら [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。

さらに、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 S/N 比を向上できることを示した [3]。さらに、照明分布を球面調和関数 [4] [5] や、ウェーブレット変換 [6] 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、これらの直交変換は、逆変換が可能であることが前提で

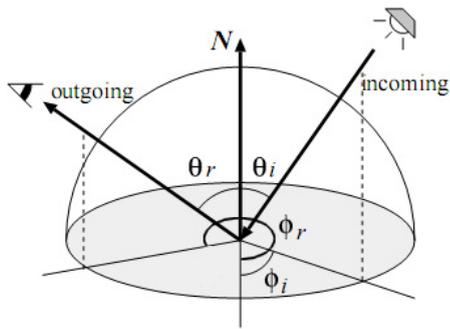


図 1 BRDF の角度パラメータ

あり、鏡面反射成分の計測値が飽和すると正しく逆変換できないことから、反射特性の計測には向かない。

一方、Sen ら [7] は、光の双対性を実証する際に、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 [7] 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均様な分布となることから、一度の計測で必要な情報が得られる。また、鏡面反射は局所的な分布を持つことから、複数方向から照明したときに重ならない組み合わせが存在する。そのため、反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。提案手法では、直交変換の逆変換などの演算を必要としないため、鏡面反射成分が飽和していても利用できる。

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) の入射光強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 4 パラメータで記述される関数であり、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 BRDF 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 に、プロジェクタと楕円鏡を組み合わせた BRDF 計測装置 [3] 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

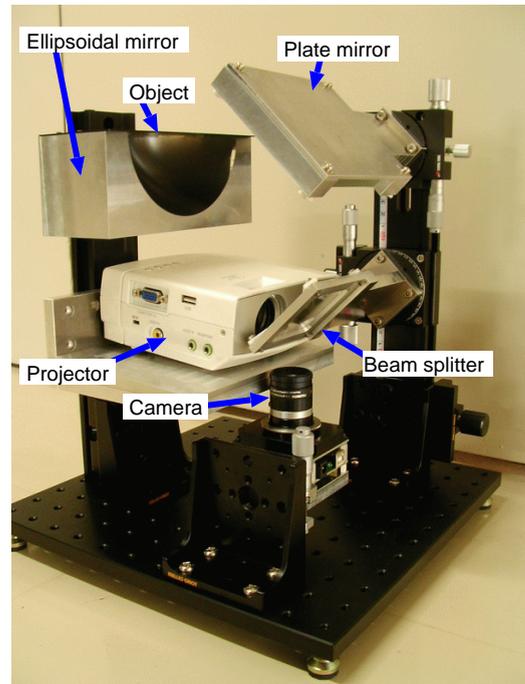


図 2 BRDF 計測装置 [3] の外観

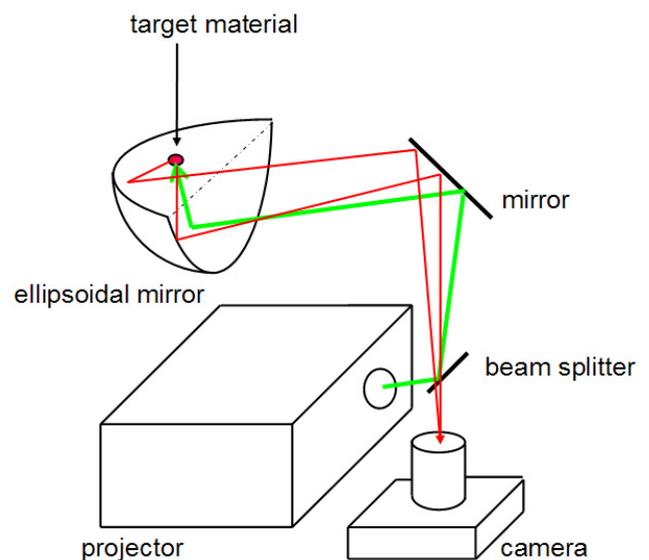


図 3 照明と反射光の経路

質がある。図 3 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。

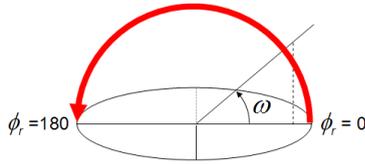


図4 光源方向の座標系

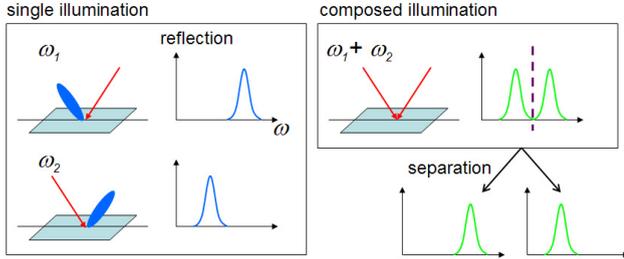


図5 複数光源の同時照明による高速計測の原理

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4のように、 $\phi_r = 0, \theta_r = 90$ から $\theta_r = 0$ を通り、 $\phi_r = 180, \theta_r = 90$ に至る半円弧状に変化させる。本稿では、光源方向と $\phi_r = 0, \theta_r = 90$ 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_r を1度刻みとして等方性 BRDF をサンプリングする場合は、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5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わかれば、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。

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

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わかる。

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るため、単一光源での反射光を容易には復元できない。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、

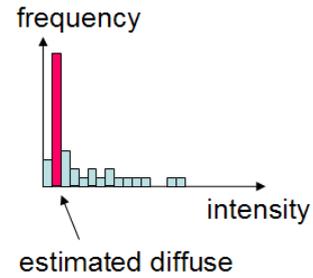


図6 画素値のヒストグラム

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持つ。ここで、拡散反射は観測方向に関わらず一定の値となることに着目すれば、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6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、もっとも頻度の高い輝度値が拡散反射成分である。ただし、鏡面反射が飽和すると、輝度値の最大値が拡散反射として選ばれる可能性があるため、輝度値の最大値は除外して選択する。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。

$$r_\Omega \Rightarrow d_\Omega + s_\Omega \quad (2)$$

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7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。

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

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

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は、それぞれ次節と次々節で述べる。

3.3.1 拡散反射成分の復元

拡散反射成分は、あらゆる方向に一様の強度で反射し、その強度は照度按比例する。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

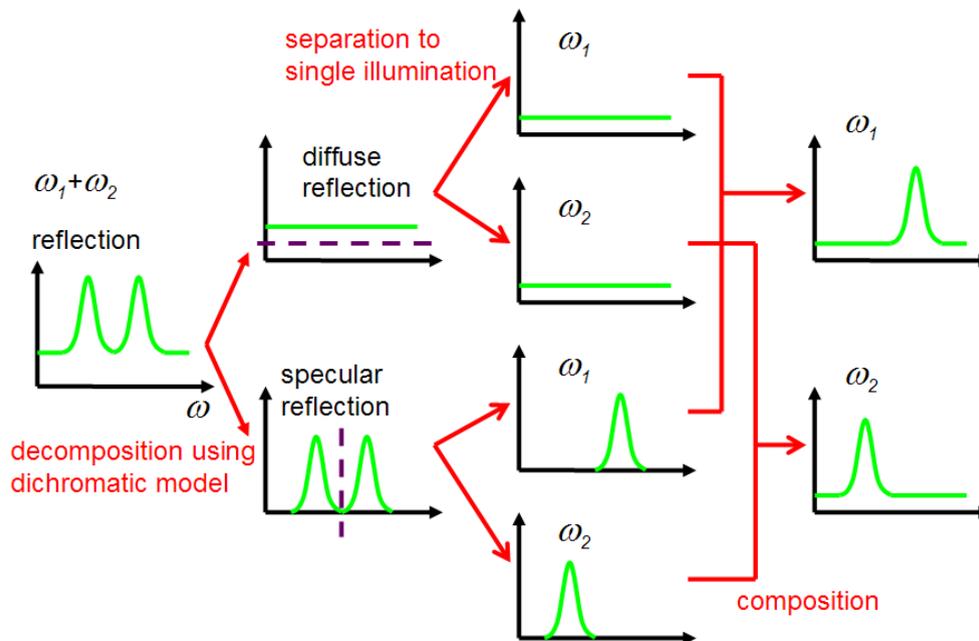


図 7 反射成分の分解による単一光源の反射光の復元

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。

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

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持つ。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、 $180 - \omega_i$ にもっと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。最適な分割点は、判別分析によって算出する。隣接するピーク間を分割することで、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恐れがある。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 節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、境界が曖昧になることから、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 倍の範囲には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

$$n = \lceil 181/\psi \rceil \quad (7)$$

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。

$$\Omega_k = \{\omega_1^k, \omega_2^k, \dots, \omega_n^k\} \quad (8)$$

ここで、

$$\omega_i^k = (i-1)\psi + k - 1 \quad (9)$$

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。

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 節で述べた BRDF 計測装置 [3] を用いて、 θ_r を 1 度刻みとして等方性 BRDF を計測する実験を行った。対象物体として、図 8 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 9 のようになり、ピーク値の 1/10 以上の反射光を持つ範囲は 11 度となった。よって光源間隔 ψ は、2 倍の 22 度とした。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



図 8 対象物体 (硬貨)

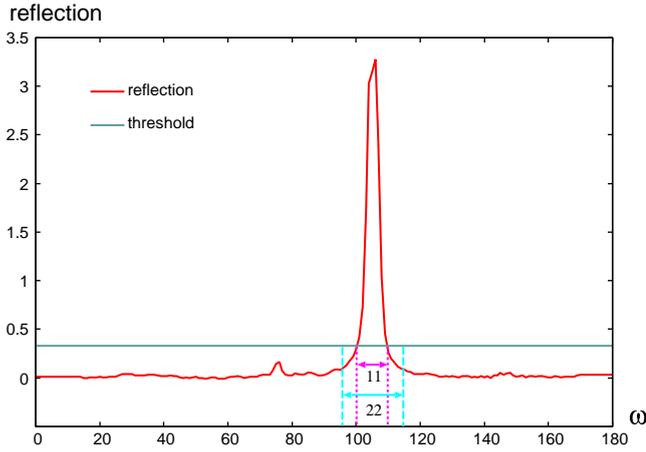


図 9 光源間隔の決定

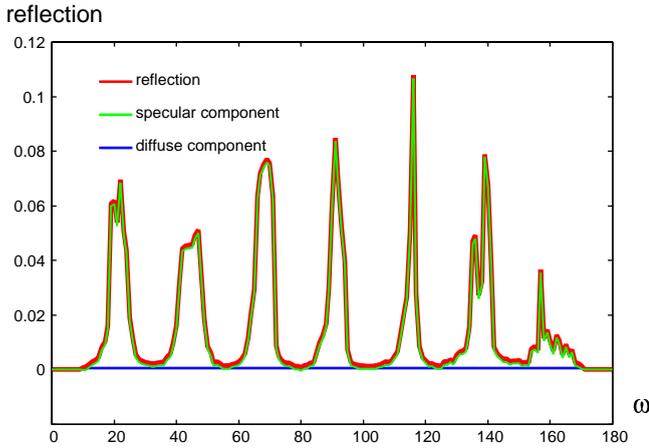


図 10 拡散反射と鏡面反射の分離

$\Omega_1 = \{0, 22, 44, 66, 88, 110, 132, 154, 176\}$ となった。この Ω_1 を照明した時の反射光の分布が図 10 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 11 に示す。小さな値でピークを持つことから、拡散反射成分が非常に小さいことが

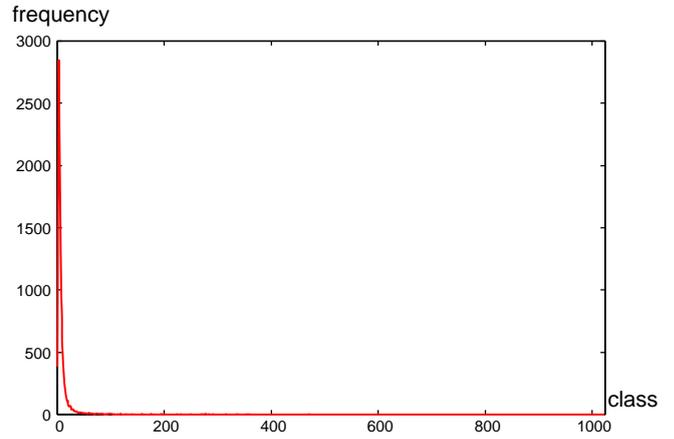


図 11 計測された輝度のヒストグラム

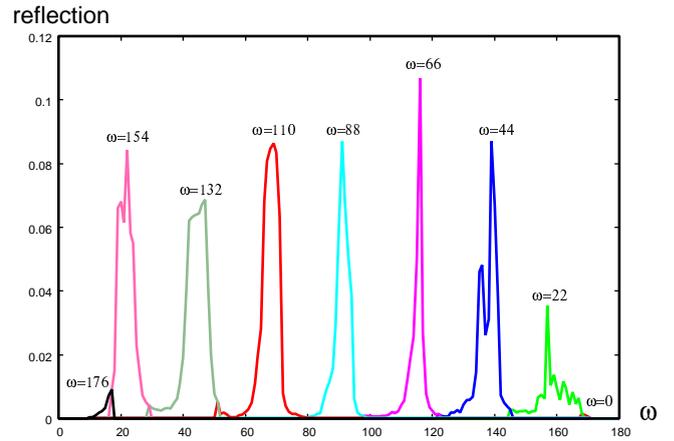


図 12 復元された反射光

わかる。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 10 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、微小かつ一様な拡散反射が計測されていることを確認できる。これは、拡散反射と鏡面反射を明確に分離できていることを示している。

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 12 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わかる。

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 13 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。

1 度刻みの等方性 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が必要となるため、実際の計

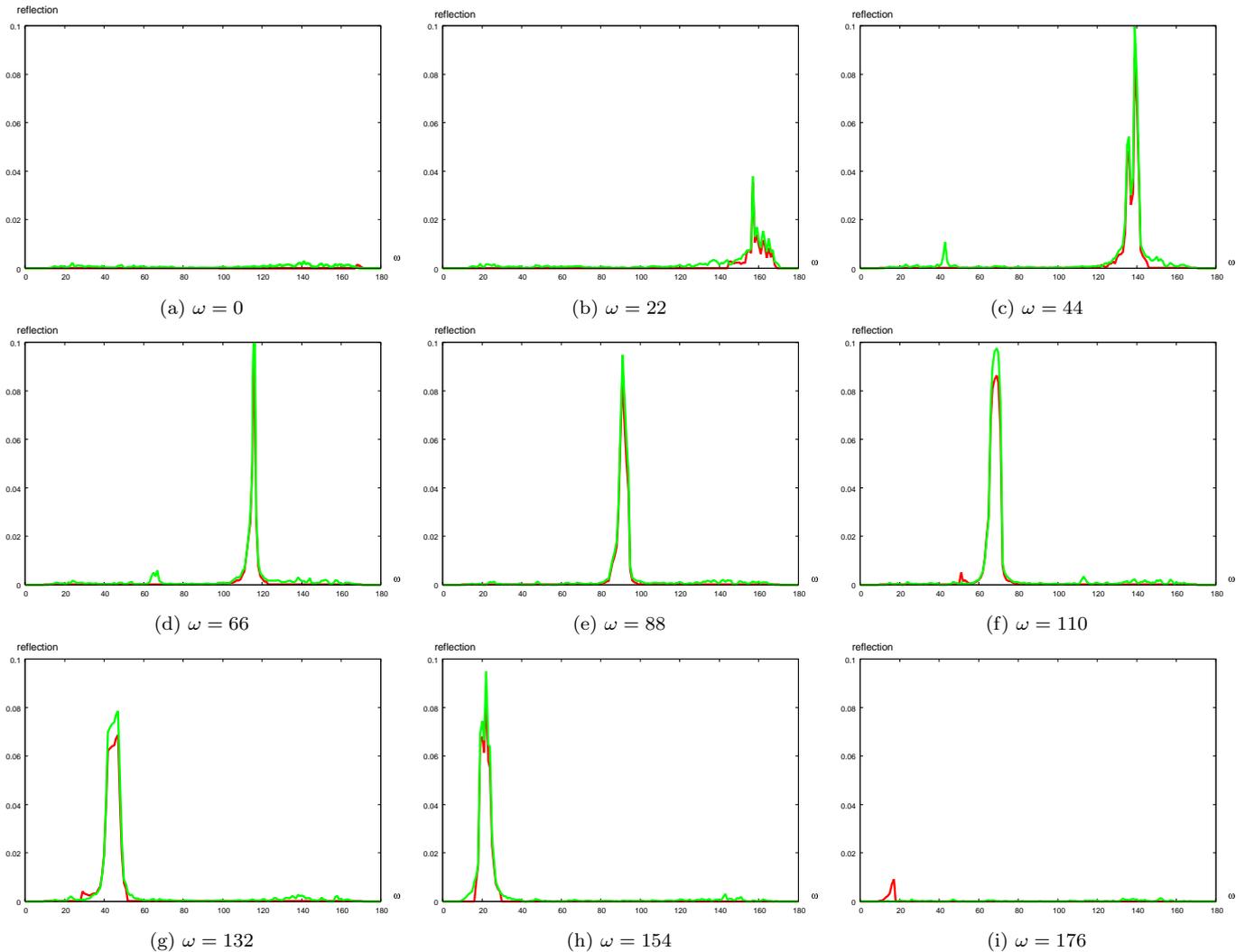


図 13 単一光源の反射光 (緑) と復元した反射光 (赤) の比較

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 13 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わかる。これはホワイトノイズの影響であると考えられる。

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 14 は単一光源の反射光を、図 15 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。しかし、図 8 に示す実物は拡散反射をほとんど持たないことから、ピーク以外の角度で見られる輝度はホワイトノイズであり、単一光源では十分な精度で計測できないことがわかる。

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、一光源あたりのノイズは減少する。図 15 は主に鏡面反射のみが見え、図 14 のような拡散反射はほとんど見られない。真値が不明であるため定量的な比較はできないが、提案手法ではノイズを低減できていることがわかる。

ホワイトノイズ低減の効果を定量的に評価するため、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見なせる。100 回の平均値、通常の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 16 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わかる。

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わかる。これは、拡



図 14 単一光源



図 15 複数光源の同時照明

表 1 PSNR による比較 [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

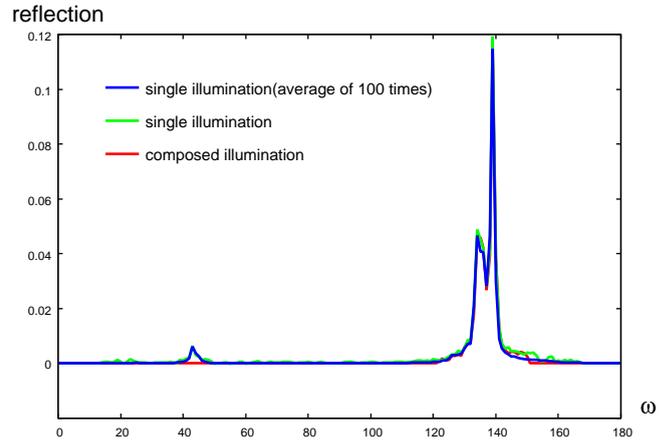
散反射での赤いノイズが減少したことの裏付けになっている。

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 S/N 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わかった。

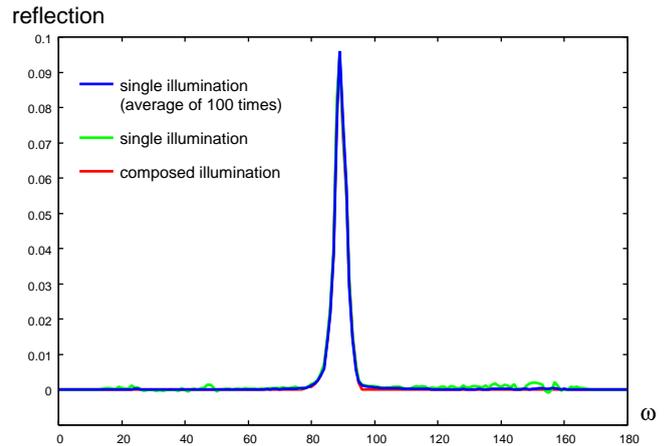
4.3 鏡面反射の弱い対象の計測

先の 2 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。そこで、鏡面反射の弱い物体の反射特性計測をどれだけ高速化できるかを調べるため、青色紙 (図 17) に対し計測を行った。

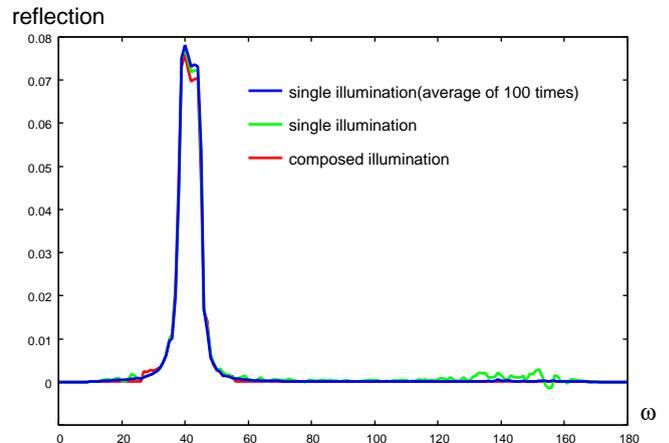
この対象物体に対し、 $\omega = 120$ から照明したときに計測された反射光は、図 18 のようになった。このグラフから読み取れるように、 $\omega = 60$ あたりで観測される輝度の最大値の 10 分の 1 以上の値を持つ範囲は、160 度程に渡るため、この対象には



(a) $\omega = 45$



(b) $\omega = 90$



(c) $\omega = 135$

図 16 ノイズを含まないデータとの比較

複数光源の同時照明を行うことはできなかった。

計測された BRDF データから竜形状の CG をレンダリングしたところ、図 19 のようになった。この図には、金属を計測したときの様なノイズは見られない。これは、拡散反射が強く、全観測方向への反射輝度が計測値に加わるホワイトノイズに対して十分に大きいからだと考えられる。

5. おわりに

本稿では、BRDF 計測の際に、複数光源から同時に照明する



図 17 青色紙

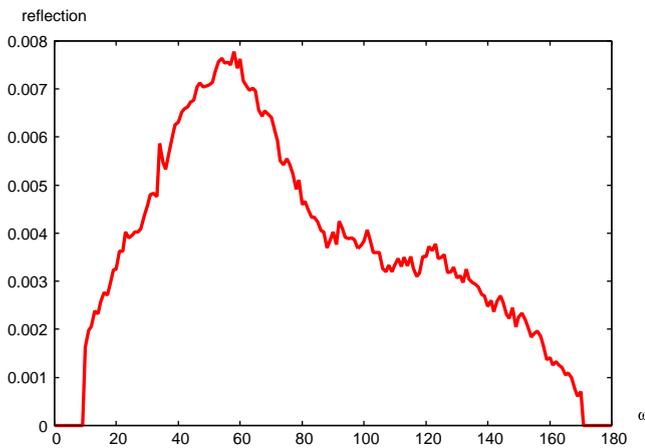


図 18 複数光源から同時照明できない反射光の分布



図 19 青色紙の反射特性を再現した CG

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きることも示した。

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持つ対象を計測し、さらに、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。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「新映像技術ダイブイントゥザムービーの研究」により進められている。

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] 向川康博, 角野皓平, 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 (MIRU2007), pp. 295-301, 2007.
- [4] A.Ghosh, S.Achutha, W.Heidrich, M.O'Toole, "BRDF Acquisition with Basis Illumination", Proc. ICCV, 2007.
- [5] 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.
- [6] P. Peers and P. Dutr, "Inferring Reflectance Functions from Wavelet Noise", Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2005.
- [7] P.Sen, B.Chen, G.Garg, S.R.Marschner, M.Horowitz, M.Levoy, H.P.A.Lensch, "Dual Photography", Proc. SIGGRAPH2005, pp. 745-755, 2005