

フリーフォーム光源とイメージベースド・ライティングによる 物体の反射特性の推定

菊池 佳保理[†] Bruce LAMOND[‡] Abhijeet GHOSH[‡] Pieter PEERS[¶]
Paul DEBEVEC[‡] 一刈良介^{*} 田村秀行[†]

[†]立命館大学大学院理工学研究科 [‡]University of Southern California, Institute for Creative Technologies
[¶]The College of William & Mary ^{*}立命館大学総合理工学研究機構

〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: kikuchi@rm.is.ritsumei.ac.jp

あらまし 本稿では、自由な方向から光を当てた固定視点の画像群を用い、画像中の物体のディフューズアルビド、スペキュラーアルビド、スペキュラーラフネスといった物体の反射特性を測定する手法を紹介する。従来手法では、固定された複数の光源を用いて物体の BRDF を測定しているが、我々は手持ちの単光源をあらゆる方向から物体に当てて測定を行う。光源位置の取得にはディフューズ反射成分の画像を用いたシンプルな手法を使い、反射測定にはイメージベースド・ライティングを用いる。また、ディフューズ、スペキュラー反射成分の分離には、円偏光板や画像ベースでの手法を検討した。

キーワード 双方向反射関数, イメージベースド・ライティング

Reflectometry Measurement with Free-form Lighting

Kaori KIKUCHI[†] Bruce LAMOND[‡] Abhijeet GHOSH[‡] Pieter PEERS[¶]
Paul DEBEVEC[‡] Ryosuke ICHIKARI^{*} Hideyuki TAMURA[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

[‡] University of Southern California, Institute for Creative Technologies [¶] The College of William & Mary

^{*}Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: kikuchi@rm.is.ritsumei.ac.jp

Abstract This paper introduces a prototype system for measurement of per-pixel appearance parameters. For example, diffuse albedo, specular albedo, surface normals and specular roughness. Some conventional techniques estimate BRDF from images under constructed illuminations. On the other hand, images are captured with a free-form hand-held light from a fixed viewpoint camera in our system. We employ a simple method using images which have only diffuse component for estimating light directions. Polarizer and image-based methods are used for separation of diffuse and specular components in general scenes. Additionally, image-based relighting is required for free-form light conditions to calculate reflectance properties of objects.

Keyword Bidirectional Reflectance Distribution Function, Image-based lighting

1. はじめに

現実世界の物体の反射特性を測定する研究はコンピュータグラフィックスの研究分野において活発に取り組まれている。物体の見え方は双方向反射関数（以下、BRDF）によって表される。BRDFモデルは、フォトリアリスティックなレンダリングを実現するために用いられ、パラメータに実物体から測定した値をフィッティングさせることにより、物体の反射特性を近似している。

Ghoshら[1]は、等方性反射、異方性反射をもつ物

体において、反射特性のパラメータとして、スペキュラーラフネスを取得しBRDFモデルに当てはめることで、人間の顔、サテン生地などの反射を忠実に反映したレンダリング結果を示している。

しばしばこのBRDF測定には、あらかじめ複数の光源を構台に配置し、その光源に囲まれた物体をカメラで撮影したデータが用いられている。このような装置の一つに、Debevecら[2]が開発したLight Stageがある。Light Stageで撮影した物体に、二次元の任意の環境マップの照明効果を付与するイメージベースド・ライテ

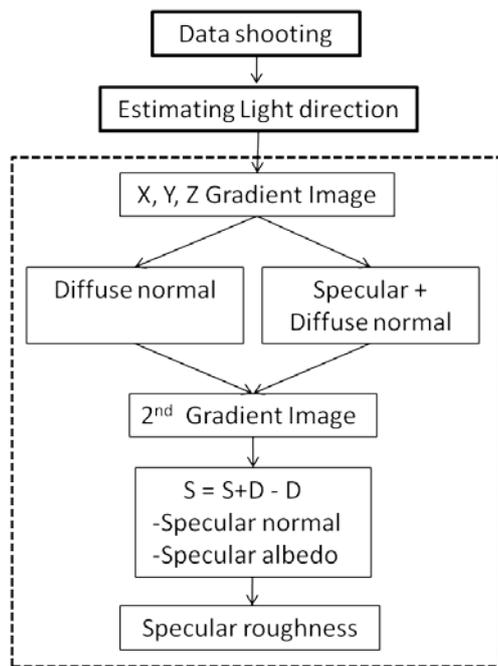


図 1: 全体の処理の流れ

リングを施すことで、あたかも物体が環境マップの世界に存在するように表現することができる。

Masselus ら[3]は、Debevec ら[2]のシステムの光源において、自由に位置を変えられる手持ちの光源を代用することで、簡易なシステムでも現実世界の物体のイメージベースド・ライティングに利用できることを示している。Masselus ら[3]はシーン内にミニチュアの置物を配置し撮影しているが、Winnemöeller ら[4]は車などの大きな物体も撮影対象としている。

本手法も、特別な機器を必要とせずに、手持ちの軽量のライトと市販のデジタルカメラを用いてデータ撮影を行う。手持ちの光源方向の推定には、[3][4]の様にキャリブレーション物体をシーン中に置いたり、複雑な画像処理を行わない、新たな方法を検討した。更に、Ghosh ら[1]は、あらかじめ構築した照明状況下で撮影した画像からスペキュララフネスなどの物体の反射特性を推定したが、本手法ではイメージベースド・ライティングを施すことで物体の反射特性を推定することを目的とする。

2. 提案手法

図 1 に処理の流れを示す。Masselus ら[3]やWinnemöeller[4]らの研究と同様に、物体の周りから、物体の中心に向かって手持ちの光源を当て、シーンの写真を撮影する。我々の手法では円偏光板を使う。右円偏光板を光源の前に置くと、偏光板を通った光は右円偏光となり、物体に入射する。物体からのディフューズ反射成分は偏光されず、スペキュラー反射成分は左円偏光になるという性質がある。円偏光板で光源とカメラを覆い物体の撮影を行うことで、ディフューズ、スペキュラー+ディフューズ反射成分を持つ画像を取



図 2: データ撮影のセットアップ

得する。次にディフューズ反射成分のみをもつ一連の画像から、画像毎の撮影時の光源方向を推定する。最後に、Ghosh ら[1]の手法に従い、1, 2 次の球面調和関数のグラデーションパターンに基づいてシーンをイメージベースド・ライティングし、物体の面の法線、ディフューズアルビド、スペキュラーアルビド、スペキュララフネスを取得する。

2 章では、画像データの撮影プロセスと撮影したデータの光源方向の推定について述べる。なお、画像撮影時には円偏光板を用い、ディフューズ、スペキュラー+ディフューズ反射成分を持つ画像を取得する。手順は次の通りである。

2.1. 画像データの撮影

撮影は暗い部屋の中で、物体に直接当たる光源以外の照明の影響がないように行う。手に持った光源を物体の中心に向け照らし、固定視点からシーンの写真を連続的にカメラで撮影する(図 2)。物体の周りを球を描くように光源の位置を動かし、1 ショットずつその位置を変え光を当てていく。本手法では、左円偏光板をカメラの前に設置し、左円偏光板、右偏光板を交互に光源の上に付け撮影を行う。

2.2. 円偏光板を用いた反射成分の分離

撮影した画像の枚数は約 200 枚である。手動で光源を動かすことを考えると適当な数であると考えられる。面の法線はシーンがディフューズ反射成分のみを持つ時に最も正確に算出することができる。そこで、我々は、円偏光板の特性を活かして写真を撮影し、2 つのグループに分類した。1 つはディフューズ反射成分のみをもつ画像の集合で、2 つ目はディフューズ反射とスペキュラー反射成分の両方を含む画像の集合である。ディフューズ反射のみをもつ画像の集合は法線を推定する計算に用いる。

偏光板を用いる際にブリュースター角に注意する必要がある。ブリュースター角とは、光の入射面で完全に偏光となる角度で、ブリュースター角より入射角が小さい場合、左円偏光板を付けた光源を用いた場合にスペキュラー反射がキャンセルされ、右円偏光板を付けた光源を用いた場合にはスペキュラー反射はキャンセルされないという特性がある。ブリュースター角

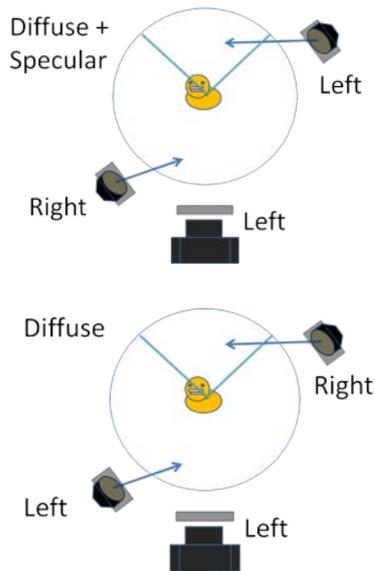


図 3: 円偏光板を用いた撮影
(上: ディフューズ反射成分,
下: ディフューズ+スペキュラー反射成分)

を超えた場合、左と右偏光板の仕組みは入れ替わる。

ここでの問題は、入射させる光源の方向が未知であるということである。よって、本実験では、ブリュースター角が約 45 度と仮定している。そのため、図 3 に示すように、物体からカメラに近い範囲から、左円偏光板、もしくは、物体の後ろ側から右円偏光板を用いて取得したデータがディフューズ成分のみを持ったデータとし、その逆は、ディフューズとスペキュラー両成分を持ったデータとしている。この判別は画像を確認しながら注意深く行う必要がある。図 4 は本実験で取得したデータの一部である。

最後に、光源方向はランバートの法則に従って求める。ランバートの法則によると、ピクセル値 R_i は、光源 i の下、ある閾値 δ より大きい値をもつ観測したディフューズ反射は $R_i = Nl_i$ と表すことができる。ここで、 δ より小さい反射をもつピクセルは除外する。行列 N は R_i に含まれる観測した反射に対応する面の法線を表す。ここで、ピクセル値と法線が既知であれば、この線形システムを解くことで光源方向 l_i を求めることができる。

2.3. 光源方向の推定

光源方向を推定するために、Masselus ら [3] の手法では、シーン内に 4 個のディフューズ球を置き、球にかかる陰から光源方向を計算している。ディフューズ球を複数配置することで、物体または球同士が陰を落とし推定に大きく影響しないようにしている。また、Winnemöeller ら [4] は、多次元尺度構成法 (MDS) と Isomap を用いて、各取得画像間の見え方の距離から光源方向を推定している。

コンピュータビジョンにおける従来の研究で、Basri ら [5] は、面の法線と光源方向を同時に取得しているが、



図 4: 円偏光板による分離で得たデータの例
(左: ディフューズ, 右: スペキュラー)

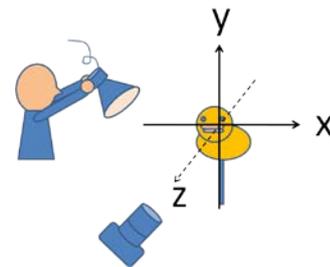


図 5: 光源方向推定のための象限の例

彼らはランバート反射に従うシーンのみと限定し一様に分布した面の法線を推定している。本研究では、従来研究の手法に代わる光源方向の推定計算のアプローチを紹介する。

まず物体の面の法線を求め、それらから光源を計算する。面法線を推定するために、式 (1) のようにベクトル $(X(p), Y(p), Z(p))$ を定義することから始める。

$$\begin{aligned} X(p) &= \sum_i R_i(p) \text{sign}(l_{ix}), \\ Y(p) &= \sum_i R_i(p) \text{sign}(l_{iy}), \\ Z(p) &= \sum_i R_i(p) \text{sign}(l_{iz}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $l_i = (l_{ix}, l_{iy}, l_{iz})$ は、 i 番目光源方向、 R_i は光源 l_i から光源を当てたピクセル p の値を表す。sign 関数は、もし引数が正の場合 +1 を持ち、負の場合 -1 を持つ。ベクトル $(X(p), Y(p), Z(p))$ を正規化することで、ピクセル p で得られる法線を推定する。もし物体面の点 p が、オクルージョンなしで、ランバート反射に従う面ならば、光源方向は一様にサンプリングされ、計算結果は面の法線に一致すると言える。

本実験の場合、図 5 に示すように、y 軸アップの右手座標系とする。式 (1) は x, y, z それぞれにおいて、+ 方向から光を当てた全ての画像から - 方向から光を当てた全ての画像を差し引いたものである。つまり、ある側 (カメラから見て、物体の右, 上, 前) から光を当てて得た一連の画像を足し合わせ、それに対する側 (カメラから見て、物体の左, 下, 後) から光を当てた一連の画像を差し引いていることを意味している。

結果的に 3 つの X, Y, Z それぞれの要素は、ある定数に比例したものとなり、単純にこれらの 3 つの要素を正規化し、面の法線を得ることができる。実際に上の式 (1) により光源方向を推定したところ、妥当な結果を得ることができた。データを取得する際には、光源方向算出のために物体にどちらの象限から光源が当た



図 6: 1 次の球面グラデーションによる
リライティング結果
(上: x 方向, 中: y 方向, 下: z 方向)

っているか注意深く分類する必要がある。

3. 物体の見た目を表すパラメータの計算

3.1. イメージベースド・ライティング

Ghosh ら[1]はあらかじめ構築して作った照明環境内で撮影した画像データを使用しスペキュラーラフネスを算出している。本手法では、フリーフォームで得た光源と画像データから反射特性の算出に必要な画像を生成するため、推定した光源を用いてイメージベースド・ライティングを施すことで反射特性の推定を行う。

本手法では、イメージベースド・ライティングの処理を、Masselus ら[3]の手法のように行う。光源方向を物体を囲むドーム上の曲面にプロットした後、ボロノイ図を作成することで入力した環境マップをクラスタ化し、環境光として使う HDR 画像を用いてリライティングを施す。

3.2. スペキュラーラフネスの計算

本実験では、Ghosh ら[1]の手法に基づいてスペキュラー反射成分のローブの広がりを表すスペキュラーラフネスを算出する。この手法では、2 次の球面調和関数のグラデーションパターン内の、3 パターンを利用したラフネスの推定について述べている。

レンダリングは Ghosh ら[1]の手法に基づいて行う。Ghosh ら[1]は、スペキュラー法線マップやアルビドマップの取得について Ma ら[6]の手法を利用している。Ma ら[6]は、ディフューズ反射とスペキュラー反射それぞれの成分から法線を得ることで、より高精細なハイブリッド法線マップを取得した。実験の中で、1 次の球面グラデーション照明を人間の顔に直接当てて撮影した画像から精細な顔面の法線マップを生成している。なお、スペキュラー法線は、スペキュラーの反射ベクトルと視点ベクトルのハーフベクトルから求まることを述べている。

法線マップの取得において、 x, y, z の各方向から $[0, 1]$ の値をもつグラデーションマップと、フルオン状態(全画素値 1) の画像を作成し、それらを環境マップとして用いる。撮影した一連のデータを用いて x, y, z の 1 次の球面グラデーションによりリライティングした画像を、フルオン画像でリライティングした画像でそれぞれ割った画像(図 6)が x, y, z の法線を示し、統合することで法線マップを作成することができる。

ディフューズ反射成分のみを持つ画像、ディフューズ+スペキュラー反射成分を持つ画像それぞれでこの処理を行い、それらの差分をとることでスペキュラー反射成分のみを持つ画像の x, y, z の 1 次の球面グラデーションとフルオンのリライティング画像を得ることができ、スペキュラーの反射ベクトルが求まる。この反射ベクトルと視点ベクトルのハーフベクトルからスペキュラー法線マップを求める。

スペキュラーラフネスは 1 次の球面グラデーション照明を拡張した 2 次の球のグラデーション照明パターンの中で物体を撮影することでピクセル毎に求める。ここで言う 2 次の球面グラデーション照明パターンとは球面調和関数における、 $l=2, m=\{0, 1, 2\}$ の 3 パターンを使用し、 $[0, 1]$ にスケール変換したものである。

Ghosh ら[1]の手法は、グラデーション光源下でディフューズ、スペキュラー反射成分を分離するのに線形的に偏光板を用いて光源を当てているため、偏光板の操作に特に重点を置いている。我々の場合、この分離は、ディフューズ反射、またはディフューズ+スペキュラー反射成分をもつ画像群から異なるグラデーション照明下でリライティングした結果画像を差し引くことで、スペキュラー反射成分を新たに取得する。

なお本手法では、ディフューズ反射成分のみの画像群、ディフューズ+スペキュラー反射成分をもつ画像群、それぞれのリライティングしたサンプリングパターンが正確に同一でなくても、ディフューズの帯域通過の振る舞いにより、妥当な結果を得ることができると考えている。

[1]において 2 次の球面調和関数のグラデーションパターン内の、3 パターンを回転させることでスペキュラーラフネスを近似することができると述べている。

4. 実験

本実験では光源に LED ライトを使い、約 200 枚の画像を Canon 5D DSLR で撮影した。推定した光源方向とディフューズ+スペキュラー成分の画像群中のスペキュラー反射の正当性を評価するために、Masselus ら[3]の手法と我々の手法で求めた光源とを比較する。図 7 に示すように、光源の方向は同様のものであるといえるが、誤差も含んでいる。しかしながら、これらの違いによる反射特性への影響は、低周波の 1 次、2 次のグラデーションパターンを用いてリライティングを行うことにより、結果を導く過程でいくらか緩和される。

図 8 - 図 11 は我々の手法を用いて反射パラメータを推定した 2 つの異なるシーンを示している。それぞ

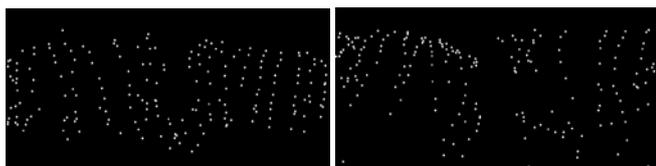


図 7: 光源方向の取得
(左: ディフューズ球から取得, 右: 物体の法線から取得)

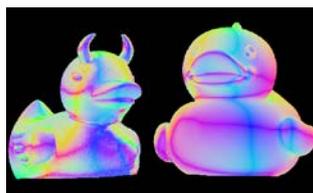


図 9: 法線マップ

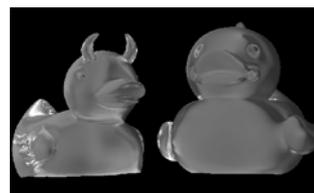


図 10: スペキュラーラフネス



図 8: アルビドマップ
(左: ディフューズ, 右: スペキュラー)



図 11: 結果の比較
(左: 実画像, 右: レンダリング結果)

れの例は、ディフューズアルビド (図 8 (左)), スペキュラーアルビド (図 8 (右)), 面の法線 (図 9), スペキュラーラフネス (図 10) を表している。

図 11 は、算出したパラメータを用いてレンダリングしたシーンと参照した写真を比較している。レンダリングには Torrance-Sparrow BRDF モデル[7]を用いた。図 11 に示すように、レンダリング結果は参照写真と近似していることがわかる。

4.1. 制限

多くの偏光板を用いた研究で、ディフューズ反射とスペキュラー反射成分の分離はブリュースター角の周辺で大きな影響を受けている。つまり、ディフューズ反射成分、ディフューズ+スペキュラー反射成分の画像群において左、右円偏光板をつけた光源を人が分類したため、誤差が含まれていると考えられる。これらの影響は、図 7 (右) に示すように、スペキュラーアルビド画像内にディフューズ成分が含まれていることから確認できる。最後に、暗いアルビドやとても光沢のある物体を使用する場合、本手法ではこの問題が起りやすいということがわかっている。

4.2. 他のディフューズ, スペキュラー分離手法

ディフューズ反射, スペキュラー反射成分の分離に偏光板を用いた手法とは別に、直接光, 間接光からディフューズ反射, スペキュラー反射成分の分離手法を試みた。Lamond ら[8]は、物体にプロジェクタからストライプ模様を照射し、その模様を少しずつずらしながら画像を撮影する。取得した画像のピクセルの最大値, 最小値からディフューズ反射, スペキュラー反射成分を推定している。

同様の実験をイメージベースド・ライティングにより求めることを試みた。4 つのシフトしたパターンを図 12 に示している。これらの画像内のピクセルの最大値, 最小値から求めたスペキュラーアルビドが図 13 である。ここで得たスペキュラーアルビドからスペキュラーラフネスを求めた結果が図 14 である。

[8]の基となった研究 Nayar ら[9]の手法では、十分高

周波な照明下での実験が理想的であると述べている。彼らは、チェッカーボードを照明の前に設置し、直接光, 間接光を物体に当てている。少しずつチェッカーボードをシフトすることでデータを取得している。また実験の中ではより細かいチェッカーボードパターンほどよりよい分離ができることを示している。

[9]の実験によると取得した画像データからうまく分離できない場合には、結果画像にチェッカーボードのパターンが照明を当てた物体に反映されてしまうということが報告されている。我々の場合、約 200 光源を用いてパターンをシフトしているので、ストライプパターンが図 13 のスペキュラーアルビドに残っていることがわかる。また、より高周波パターンである程よい結果を得ることができると述べている。よって、より多く光源方向から画像を撮影することで、シフトしたパターンを用いた分離方法により結果を向上させることができると予想している。また、これらの結果画像から偏光板を用いた場合の結果との比較することで、偏光板による分離手法を補う方法を検討している。

5. 結び

本稿では、円偏光板と手持ちの光源を使った簡易システムで、データ取得時の光源の方向推定と物体の見え方のパラメータ算出を行い、手法の妥当性をレンダリング結果によって示した。(図 11, 図 15)

実験は全て暗い部屋で行い、使用した物体に当てる光源以外の照明からの影響は取得データに影響しないように制限している。そのため、屋外、または照明が点いた場所においてデータを取得することはとても興味深いことである。また、本実験においてはゴム素材の物体、プラスチック製の物体を実験対象に用いている。異方性反射をもつ物体や透過性のある物体を用いた場合の推定は難しいと考える。

また前章で述べたように、フリーフォームで得た画像を用いて、ディフューズ反射, スペキュラー反射成

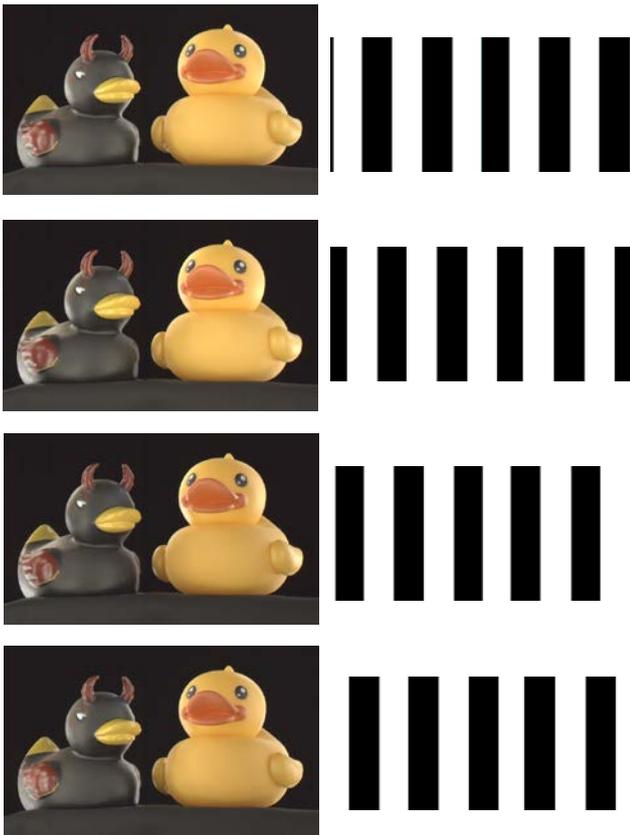


図 12: シフトパターンによる分離
(左列: リライティング結果画像,
右列: シフトパターン)

分を完全に分離する手法については今後改善していくことを考えている。

謝辞 本研究は、JST の CREST「映画制作を支援する複合現実型可視化技術」の支援による。

文献

- [1] A. Ghosh, T. Chen, P. Peers, C. Wilson, and P. Debevec: Estimating specular roughness and anisotropy from second order spherical gradient illumination, Computer Graphics Forum, Vol. 28, No. 4, pp. 1161 - 1170 (2009.6)
- [2] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H. Duiker, W. Sarokin, and M. Sagar: Acquiring the reflectance field of a human face, ACM SIGGRAPH 2000, pp. 145 - 156 (2000.7)
- [3] V. Masselus, P. Dutre, and F. Anrys: The free-form light stage, 13th Eurographics Workshop on Rendering, pp. 247 - 256 (2002.6)
- [4] H. Winnemöeller, A. Mohan, J. Tumblin, and B. Gooch: Light waving: Estimating light positions from photographs alone, Computer Graphics Forum Vol. 24, No. 3, pp. 433 - 438 (2005.9)
- [5] R. Basri, D. Jacobs, and I. Kemelmacher: Photometric stereo with general, unknown lighting, International Journal of Computer Vision, Vol.72, No.3, pp. 239 - 257 (2007.5)
- [6] W. Ma, T. Hawkins, P. Peers, C. Chabert, M. Weiss and P. Debevec: Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical



図 13: シフトパターン分離で得たアルビドマップ
(左: ディフューズ, 右: スペキュラー)

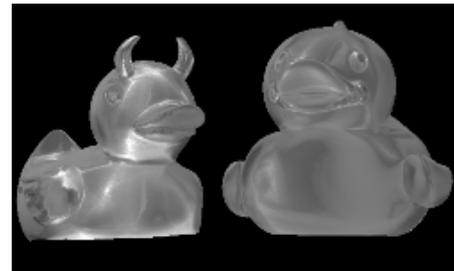


図 14: シフトパターン分離で得たスペキュラーラフネス



図 15: 他の実験結果
(左列: 実画像, 右列: レンダリング結果)

- gradient illumination, Eurographics Symposium on Rendering, pp. 25 - 27 (2007.6)
- [7] X. He, K. Torrance, F. Sillion, and D Greenberg: A comprehensive physical model for light reflection, ACM SIGGRAPH 1991, Vol. 25, No. 4, pp.175 - 186 (1991.7)
- [8] B. Lamond, P. Peers, A. Ghosh, and P. Debevec: Image-based separation of diffuse and specular reflections using environmental structured illumination, IEEE International Conference on Computational Photography (2009.4)
- [9] S. Nayar, G. Krishnan, M. Grossberg, and R. Raskar: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination, ACM SIGGRAPH 2006. Vol. 25, No.3, pp. 935 - 944 (2006.7)