

拡散反射成分と鏡面反射成分の定義に基づく分離

日浦 慎作¹ 河野 陽葉¹ 宮崎 大輔¹ 馬場 雅志¹ 古川 亮¹ 青山 正人¹

概要: 画像中に混在して観測される鏡面反射と拡散反射の各成分を分離するために、偏光を用いる手法や両成分の色みの違いを利用する方法、ランバート則に基づく手法など様々な方法が提案されている。しかし、これらの手法は拡散反射や鏡面反射において広く見られる側面的な性質を利用したものであり、拡散反射そのものの定義とは直接の関係がない。そこで本稿では様々な反射成分分離手法を顧みつつ、拡散反射の定義に基づく成分分離とはどのようなものか、またそれはどのように実装することが出来るのかについて考察する。

1. はじめに

実世界を構成する多様な物体の反射特性を単一のモデルで表すことは容易ではない。表面下散乱が無視でき均一な物体の反射特性は、一般にノンパラメトリックな表現である双方向反射率分布関数 (BRDF) [1] により表すことができるが、これはいわば計測の結果得た生データのようなものであり、物体の反射特性を簡潔に表現したものであるとはいえない。そこで、主にコンピュータグラフィックスの分野において、リアルな物体の表現を求めてパラメトリックな反射モデルが多数提案されてきたが [2]、これらのほとんど全ては二色性反射モデル [3] に基づいている。二色性反射モデルは物体の反射光が拡散反射と鏡面反射との2成分からなると仮定したモデルであり、そのうち拡散反射成分は Lambert モデル、Oren-Nayar モデル [4] などにより、また鏡面反射成分は Phong モデル [5]、Torrance-Sparrow モデル [6]、Blinn モデル [7] 等によりモデル化する手法が考案されている。このように二色性反射モデルは物体の反射を表現し、または解析する上で欠くことの出来ない基礎的な枠組みであると言える。

二色性反射モデルは物体の測光学的な性質を画像から解析する際にも広く用いられる。実物そっくりの CG を生成するためには実物の反射特性や形状を計測することが求められるが、このようなインバースレンダリング [8] において先に挙げたような各種の反射モデルを当てはめる際には、その前処理として各画素の輝度値を拡散反射に由来する成分と、鏡面反射に由来する成分に分離する必要があることが多い (以下ではこのことを反射成分分離と呼ぶこ

とにする)。例えば照度差ステレオ法 [9] では輝度変化に Lambert モデルを当てはめることにより形状を推定するため、入力画像に鏡面反射成分が重畳していると法線の推定結果に大きな影響を及ぼす。

このような背景から、反射成分分離を行うための手法は古くから研究されてきた。代表的なものとして、偏光に関する性質を用いる手法や両成分の色みの違いを利用する方法、ランバート則に基づく手法などが提案されている。しかしこれらの多くでは、鏡面反射と拡散反射の定義そのものに基づく分離手法であるとはいえない。例えば鏡面反射光が入射角により偏光しがちなことや照明光の偏光が保たれやすいこと、物体色に色づくことなく照明色を保つことなどは、鏡面反射光において広く見られる性質の1つであるが、鏡面反射の定義そのものではない。また拡散反射は Oren-Nayar モデル [4] に見られるように非ランバート性を有するものもあるため、ランバート則を当てはめる方法は拡散反射を分離するための一般的な手法であるとはいえない。

それでは反射成分分離において、偏光や色情報を用いることなく、どのような鏡面反射モデル、拡散反射モデルにも適用出来るような、いわば一般的な分離手法とはどのようなものであろうか。これを考えるためには、今一度、二色性反射モデルにおける鏡面反射と拡散反射の定義について考える必要がある。本稿ではまず過去に提案された様々な反射成分分離手法を顧みたのちに、定義に基づく反射成分分離について考察し、これを実現するための装置構成や基礎的な実験結果について報告する。

2. 関連研究

ここではまず、様々な反射成分分離手法と、それらの手

¹ 広島市立大学
Hiroshima City University

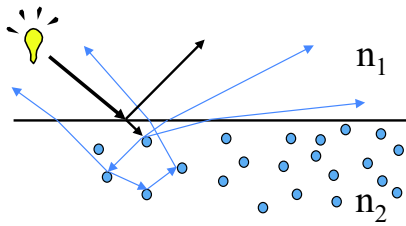


図1 二色性反射を生じる物理モデル. 入射光は空気と物体の界面において, 両者の屈折率の違いによりフレネル反射を起こし鏡面反射を生じる. 透過光は物体内部の色素粒子により色づきながら散乱され, 再び物体表面を通過することで拡散反射として出射する.

法が依拠する原理や問題点について考察する.

2.1 色に基づく手法

二色性反射モデルでは図1に示すように, 物体からの反射光は空気と物体との界面で生じる鏡面反射と, 物体内部に進入した光が物体内部の色素粒子により散乱された成分である拡散反射により構成されたと考える [10]. このモデルの重要な仮定の1つとして, 反射光の幾何学的特性と波長依存性が分離可能であることが挙げられる [10]. すなわち, 反射光は

$$Y(\theta, \lambda) = c_S(\theta)L_S(\lambda) + c_D(\theta)L_D(\lambda) \quad (1)$$

のように書くことが出来る. ここで θ は入射角, 位相角, 観測角などの幾何学的パラメータを全て含むものとする. また λ は波長であり, 鏡面反射成分と拡散反射成分それぞれの色みは幾何学的パラメータに依存しないことを表す.

このような仮定に基づく反射成分分離では Shafer が論文中に示したように [11], 色空間における部分空間の検出として考えるとわかりやすい. すなわち, ある物体の反射色は色空間内で2次の部分空間を構成するため (図2), 主成分分析やハフ変換などを用いて物体色 $L_D(\lambda)$ や光源色 $L_S(\lambda)$ と, それらの混合比を推定することが出来る [12].

この手法はその後にも研究され, 単一の画像やテクスチャを有する物体への適用などが行われた [13], [14], [15]. しかしそもそもこの手法は, 拡散反射色 (物体色) が白色の物体には適用できないという問題がある. また, 真珠など構造色 (干渉による色づき) を有する物体等への適用も難しい.

2.2 偏光に基づく手法

空気と物体の界面で生じる鏡面反射が偏光することは広く知られている. この現象は物体の屈折率を用いて電磁気学的に導出することができ [16], その関係は図3のようになる. ここで偏光とは光を含む電磁波の電気ベクトルの振動方向として定義され, その振動面が入射面に並行な成分 R_p は垂直な成分 R_s よりも反射しにくく, 特定の角度にお

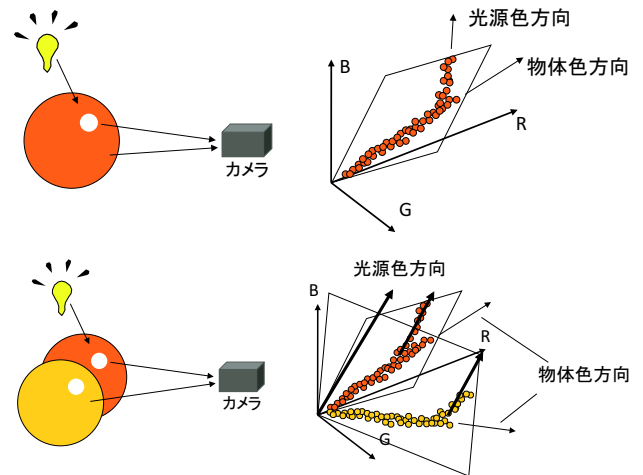


図2 二色性反射に基づく反射成分分離. 二色性反射物体の反射色は2次の部分空間を構成するため, これを解析することで両成分の色みと成分比を求めることが出来る. 複数の物体色からなるシーンを観測することで, 光源色を推定することも出来る.

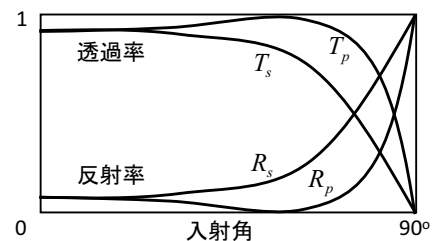


図3 入射角と透過光・反射光の関係. 反射光のうち, 偏光面が入射面に並行な成分 R_p は垂直な成分 R_s よりも常に弱く, 特定の入射角において0となる. この角度をブリュースタ角と呼ぶ.

いて R_p の反射率が0となる. この特定の角度のことをブリュースタ角 θ_b と呼び, $\tan \theta_b = n$ と表される. ここで n は相対屈折率, すなわち界面の両側の物質の屈折率の比である.

このことを用い, カメラの前に偏光板を設置することで画像から鏡面反射成分を除去することが出来る. ただしこの場合, 偏光板の設置方向は物体の面の向きに合わせる必要がある. また偏光板を設置するだけで完全に鏡面反射を取り除くことが出来るのは, 面への光の入射角がブリュースタ角に一致する場合だけであり, その角度は物体の屈折率に依存する. よって光源に偏光板を装着したり, 偏光板の角度を様々に変化させたり, 物体表面の多数の点の情報を統合したりして鏡面反射を除去する研究が多数行われている [16], [17], [18]. またさらに, 前述のような鏡面反射と拡散反射の色みの違いに偏光の解析を組み合わせた手法も存在する [19], [20]. しかしそもそも, 偏光は鏡面反射の持つ特性の1つの側面に過ぎず, 鏡面反射そのものの定義ではない. 実際に, 拡散反射成分もそれぞれで偏光特性を持つことが知られている [16], [21]. なぜなら図3の T_s と T_p に示すように, 透過光は反射光により失われた残りの成分

であるためにまた偏光しており、図1において物体内の色素粒子によって拡散された光が物体の表面を外向きに通過するときこの影響を受けるからである。よって、偏光は強力な手法ではあるものの、これにより鏡面反射と拡散反射を完全に分離することが出来るとは限らない。

2.3 ランバート則を用いる方法

拡散反射は多くの場合、ランバート則に従うものとして取り扱われる。ランバート反射では、物体表面の法線と光線の入射方位のなす角（入射角）を θ_i とした場合、式(1)の拡散反射係数 $c_D(\theta)$ は以下のように書くことが出来るとする。

$$c_D(\theta) = \rho \cos(\theta_i) = \rho N \cdot L \quad (2)$$

ここで N と L はそれぞれ法線と光源方位を表す単位ベクトルである。このようにランバート則は線形であるため、このモデルに合致した成分を拡散反射とし、それ以外を鏡面反射とすることが出来る。このことを利用し、石井らはランダムサンプリングを用いて外れ値除去を行うことで画像を線形化する、すなわち拡散反射・鏡面反射と影を含む画像から拡散反射成分のみを抽出する手法を提案した[22]。またこの原理を発展させ、森らは主成分分析にEM法を組み合わせることで効率的に外れ値除去し、これにより高速かつ安定に鏡面反射成分や影の影響を除去する手法を提案した[23]。

しかしこれらの手法では、そもそも拡散反射成分がランバート則に従うという仮定に基づいており、Oren-Nayarモデル[4]をはじめとする非ランバート拡散反射モデルを組み合わせたことが出来ない。また物理的に見ても、物体の拡散反射がランバート則に従うとは限らないことが分かる。ランバート則は物体の単位表面積当たりの入射エネルギー量と入射角の関係に基いているため、入射エネルギーがそのまますべて拡散反射により再び物体表面から放出される場合には成り立つといえるが、図3に示すように、内部反射のもととなる透過光はフレネルの反射則に従うため、入射角 θ_i が90度に近くなると入射光のエネルギーはほとんど鏡面反射により反射される。このため、浅い角度で入射する光の拡散反射成分は(2)式に比べより急激に減少する。

3. 拡散反射の定義に基づく反射成分分離

これまでに見てきたように、様々な反射成分分離手法が提案されてきているが、これらは往々にして取り扱うことの出来ない物体や条件が存在したり、分離の精度が原理的に担保されていないからである。この原因は、これらの分離手法が各成分の原理に忠実に従っていないからであると言える。言い換えると、既存の手法では「光源色をそのまま反射する成分」「偏光を生じる成分」「ランバート則に従

う成分」の分離には成功しているが、それがそのまま拡散反射または鏡面反射を分離したということにはならない。それでは、拡散反射、または鏡面反射の定義に従う反射成分分離とはどのようなものであろうか。その前に、そもそも、それらの成分はどのように定義されるべきであろうか。この点について考察した後、それらを分離する手法について述べる。

3.1 拡散反射の定義

拡散反射の定義について明確に述べている文献は少ない。多くの場合は「ざらざらした表面からの光の反射」[24]のように現象面からの定性的な説明にとどまるものが多いが、その中で新編色彩科学ハンドブックでは（一部、ランバート則と混同した表現もあるものの）「表面の輝度がどの方向から見ても一様な面である」との記述がある[25]。また文献[2]や電子情報通信学会知識ベース[26]でも同様に「拡散反射は<中略>観測方向に依存せず、あらゆる方向に均一の強度で観測される」と説明されているように、ぶれのない拡散反射の定義としてはこのほかにないように思われる。一方で、鏡面反射は「平滑な表面での反射で、通常の正反射の法則に従う反射」[25]のように説明されることが多いが、実際には物体表面が平滑でなく凹凸があっても、その微細なそれぞれの小平面において生じる鏡面反射が観測されることが多く、鏡面反射をその広がりだけで定義づけることは難しい。よって、少なくとも、拡散反射成分だけを取り出すためには、どの方向から見ても一様な輝度（今後、輝度の観測方位非依存性と呼ぶ）をもつ成分を抽出することが自然であるように考えられる。

しかしこの観点から従来の反射成分分離の各手法について考えてみると、意外にこの観測方位非依存性が考慮されていないと分かる。色みや偏光に基づく手法では、前述のように観測方位非依存性に基づいた分離ではないことは自明である。また輝度変化に基づく解析手法でも、前述のランバート則に基づく手法では光源の方位を変化させているが観測方位は一定であり、やはり観測方位非依存性は調べていないといえる。多視点画像の解析において鏡面反射成分による影響を取り除くために輝度の一致性を調べる例はあるが[27]、多くの場合、その目的は多視点画像の効率的な圧縮や形状復元であり、拡散反射成分を精度良く求めることを意図したものでないことが多い。

3.2 観測方位非依存性に基づく反射成分分離

拡散反射成分に起因する輝度は、観測方位によって変化しない。このことを直接的に調べることにより反射成分分離を行う手法について考える。このとき、必然的に対象物体とカメラの間の相対的な位置関係を変化させる必要がある。このためには、物体を回転させるか、カメラを移動させるかの2つの方法がある。しかし実際には、物体を回転

させる方法で輝度の観測方位非依存性を計測することは容易ではない。なぜなら物体表面の輝度は、物体と光源の位置関係によっても変化するためである。拡散反射成分はランバート則に従うものであっても、物体の法線に対する光源方位が変化すると、それによる輝度は変化する。鏡面反射においても同様である。よって、正確に輝度の観測方位非依存性を計測するためには、光源と物体の位置関係が固定されていることが望ましい。

物体に対し、カメラがその位置を変えることで観測方位を変化させる方法について考える。このとき、物体上の点の対応付けの問題が発生する。多視点画像解析・マルチベースラインステレオ法では、物体上のテクスチャ等の情報を用いて視点間の特徴点の対応付けを行っているが [27]、もし物体表面が平滑でテクスチャも乏しいとすると、異なる方位から観測したカメラ画像間で、同一の点同士を対応付けることは困難である。別に用意した三次元計測装置などにより物体の3次元形状をあらかじめ計測しておき、物体の脇に設置した参照物体や、十分にキャリブレーションされたカメラ移動架台などを用いることでカメラの外部パラメータも把握することができれば、理論上は物体上の1点のカメラ画像内の軌跡を追跡することは可能であるが、実際に十分な精度で全ての点の軌跡を追跡することは容易ではなく、オクルージョンに関する対応なども必要となる。そこで我々は、プロジェクタを用いて物体表面に目印を付与する方法を考えた。この方法では図4のように、対象物体に対して位置や姿勢が固定されたプロジェクタを用いる。カメラを移動するつど、プロジェクタからはグレイコードパターン光を投影する。このパターン光はプロジェクタを用いた3次元形状計測に用いられるもので、この場合には縦または横どちらかのパターンのみにより形状計測が可能であるが [28]、今回の目的のためには縦と横の両方のパターンを投影する。このことにより、カメラ画像の各画素に対し、プロジェクタのどの画素が対応しているのかの情報を密に得ることが出来る。次にこのプロジェクタを完全に消灯し、輝度観測用の光源のみが点灯されている条件での画像を入力する。

このような計測を多数の視点から行った後に、物体表面上の各点について、異なる視点から観測した輝度値を集めることで反射成分分離を行う。拡散反射成分は観測方位によらず輝度の変化しない成分であり、また鏡面反射成分はそれに対し加算的に影響することから、ここでは拡散反射成分を抽出するために、物体上の各点について全ての観測方位の輝度値の最低値を求めることで拡散反射成分を分離する。このとき、すべての視点からの画像に鏡面反射成分に起因する輝度が重畳している場合には誤差を生じることになる。しかし原理的にこの成分を拡散反射成分と識別することは出来ない。正しい結果を得るためには、鏡面反射成分の広がりに対して十分な大きさを持つ黒色部分が光源

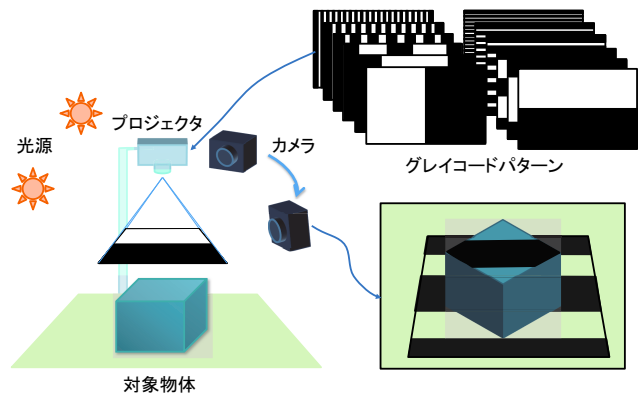


図4 プロジェクタを用いた複数画像間の点の対応付け。プロジェクタからグレイコードを投影し、それをカメラにより撮影・解析することで、視点の異なる画像間の点の対応付けを得る。反射成分分離には、プロジェクタを完全に消灯して撮影したものをを用いる。

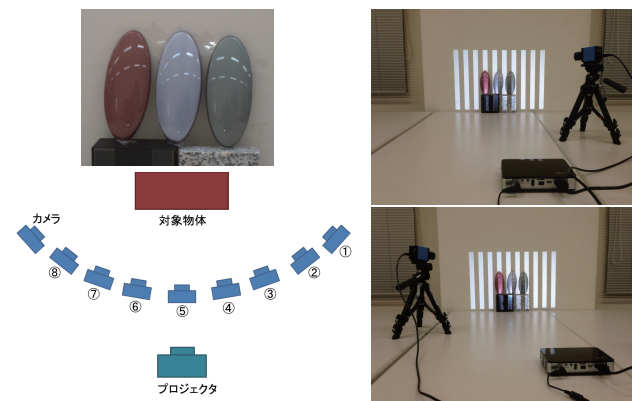


図5 左：対象物体とプロジェクタ、カメラの配置。右：プロジェクタからグレイコードパターン光を照射している様子。

マップ中に存在する必要がある。言い換えると、この手法において光源は点光源である必要はなく、光源と光源の間に一定の距離があれば複数の光源が存在してもかまわない。

4. 実験

単一の点光源下におけるシーンなど単純な照明条件では、提案手法により拡散反射成分を抽出できることはほぼ自明であったため、ここではより一般的な条件においてどのような反射成分分離がなされるのかについて確認することを意図し、一般の室内照明により照らされたシーンに対し実験を行った。図5左に示すように対象物体の正面にプロジェクタを設置し、画像同士の位置合わせの基準としてグレイコードパターン光を投影する。カメラは小型三脚に設置し、手動により9箇所に移動した。カメラの設置位置の較正は行っていない。図5右に、プロジェクタからグレイコードパターン光を照射している様子を示す。また別途、プロジェクタを消灯した時の画像も取り込んでおく。

プロジェクタからグレイコードパターン光を照射したときの像をカメラにより撮影し、差分二値化によりカメラ画

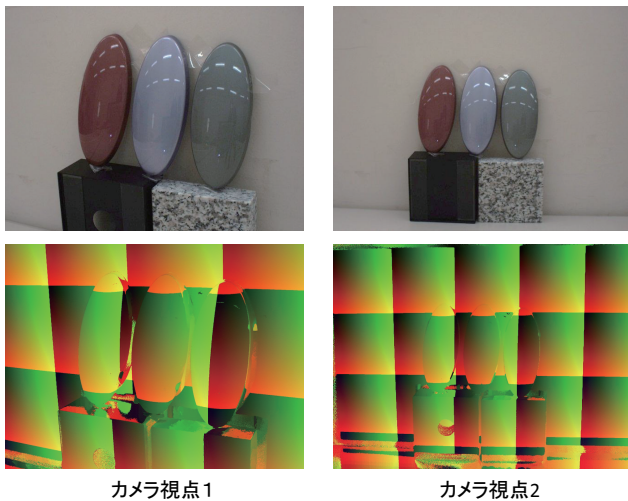


図6 カメラ画像（上段）と、それに対応したプロジェクタ座標画像（下段）。プロジェクタ座標画像では、各点に対応したプロジェクタ座標がRGB画像の各チャンネルに分割して格納されている。

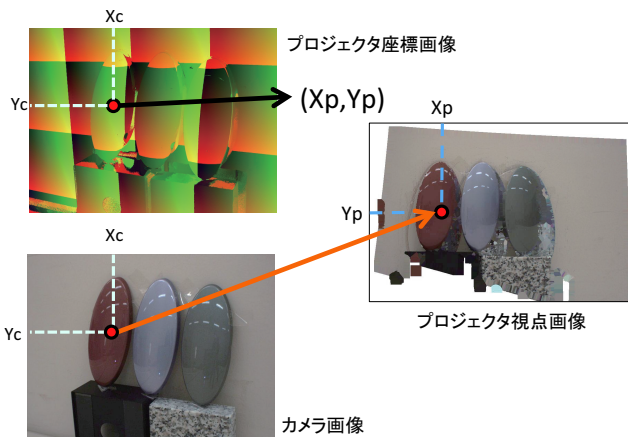


図7 プロジェクタ視点画像への変換

像の各画素に対応するプロジェクタの画素位置を求める。この結果を図6に示す。図6の上段はプロジェクタを消灯した時のカメラ画像であり、下段はそれに対応したプロジェクタ座標画像である。プロジェクタ座標画像は、各点に対応したプロジェクタ座標 (X_p, Y_p) がRGB各チャンネルに分割して格納された画像であり、 X_p の下位8bitがGチャンネルに、 Y_p の下位8bitがRチャンネルに格納されている。Bチャンネルには X_p, Y_p それぞれの上位4bitを分割して格納している。図から分かるように、プロジェクタと対象物体の位置関係が固定されているために、物体上の各点のプロジェクタ座標はほぼ一定値となる。

次に、各視点（この実験では9視点）の画像から物体表面上各点の輝度の観測方位非依存性を調べるために、カメラ画像をプロジェクタ視点画像に変換する。図7に示すように、まずプロジェクタ視点画像として、プロジェクタの画素数と同一の大きさの画像メモリを用意する。次に、カメラ画像上の各点について、その点に対応するプロジェク

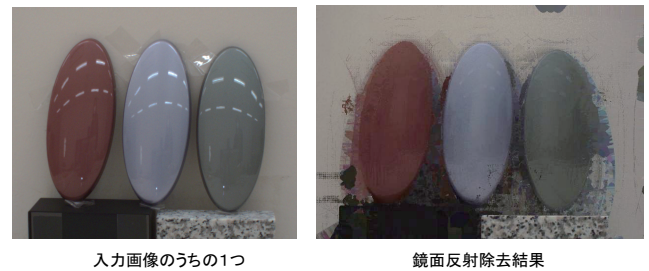


図9 実験結果。鏡面反射の除去結果（右）では照明の蛍光灯の鏡面反射が除去できていることが分かる。ただしこの実験では通常の室内において実験を行ったため、結果画像には壁面が鏡面反射により写り込んだことによる影響が残存している。

タ座標をプロジェクタ座標画像から求め、プロジェクタ視点画像中のその位置にカメラ画像の画素値を格納する。このとき、プロジェクタ座標画像上の値は連続値ではないため、プロジェクタ視点画像上では画素値が格納される画素と格納されない画素が生じる。この欠損部分は補間により埋める。ここでは簡単のため、欠損画素から最も近い非欠損画素の画素値を用いて補間した。

図8は9視点のうち5つの視点について、カメラ画像をプロジェクタ視点画像に変換した例を示す。元の画像は観測方向が異なるために物体の幾何学的な見えが異なるが、プロジェクタ視点画像では、ちょうどプロジェクタの位置にカメラを置いたときに得られる像と幾何学的に一致する画像が得られる。ただし画素値は個々のカメラ画像の観測方位に対応した画像である。図8には、プロジェクタ視点画像が幾何学的に一致することを示すため、2本の水平線を記入した。

最後に、全てのプロジェクタ視点画像を集め、各画素について画素値が最低となる値を求めた画像を生成する。その結果を図9に示す。蛍光灯の鏡面反射による映り込みを除去出来ていることが分かる。ただしこの実験では暗室を利用せず、通常の室内において実験を行ったため、一定の輝度を有する壁面が鏡面反射により写り込んだことによる影響が輝度値のむらとして残存している。また、物体の周囲において不自然な部分が見られるが、これはオクルージョンによりプロジェクタ視点画像上の画素値が正しく求められなかった部分である。

5. おわりに

本稿では拡散反射と鏡面反射の2つの現象に由来する輝度の成分を分離する問題について、従来法に比べ拡散反射の定義に忠実な分離法を提案し、簡易な実験結果を示した。今後は他の計測手法との定量的な比較が必要であると考えられる。また、本稿で示した視点間の画素の対応付け方法は、双方向テクスチャ関数 (BTF) 計測の後処理である rectification[29]にも応用することができ、計測対象周囲に位置合わせマーカを配置する方法に比べ、計測対象の

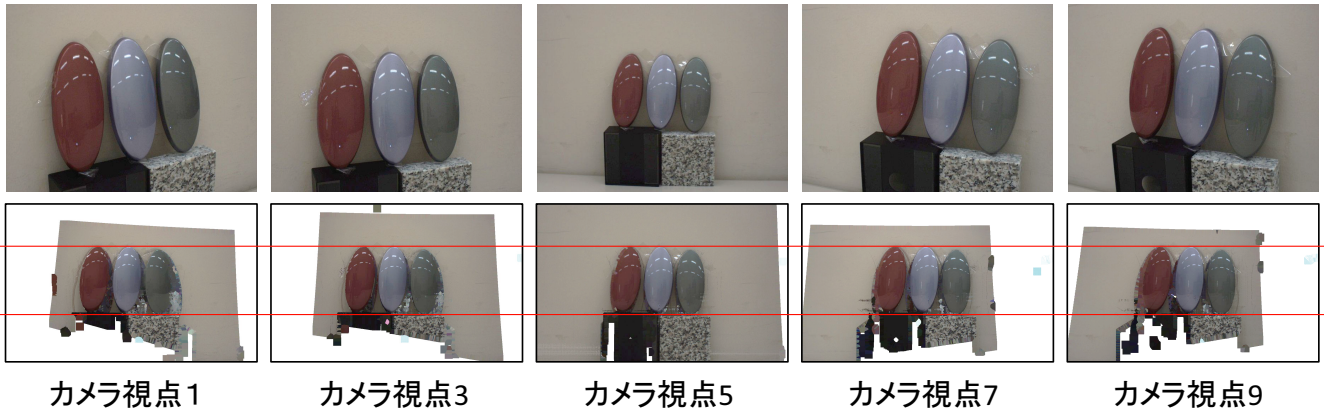


図8 それぞれのカメラ画像(上段)に対応したプロジェクタ視点画像(下段)の例。プロジェクタ視点画像では、その幾何学的見えはプロジェクタの位置にカメラを置いた場合に対応するため、すべての画像で物体の位置が一致する。ただし各画素の輝度値は各視点に対応した値となる。幾何学的な一致を示すために、プロジェクタ視点画像には2本の水平線を記入した。

平面性に影響されない高精度な位置合わせが出来ると考えられる。またBTFを圧縮して格納する際にも反射成分分離は有用な技術であり、本稿で述べたような輝度の観測方位非依存性を用いる手法はBTFデータベースに容易に適用できる。

謝辞 本研究ではMEXT 科研費 22135003 (質感脳情報学)の助成を受けた。

参考文献

[1] F. E. Nicodemus, "Directional reflectance and emissivity of an opaque surface," *Applied Optics*, Vol. 4, No. 7, pp. 767-775, 1965.
 [2] 向川康博, 反射・散乱の計測とモデル化, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2010-CVIM-172(34), pp. 1-11, 2010.
 [3] S. Tominaga and B. A. Wandell, "The standard surface reflectance model and illuminant estimation," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol.6, pp. 576-584, 1989.
 [4] M. Oren and S. K. Nayar, "Generalization of Lambert's Reflectance Model," *Proc. SIGGRAPH' 94*, pp.239-246, 1994.
 [5] B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," *Proc. SIGGRAPH' 75*. pp.311-317, 1975.
 [6] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, pp.1105-1112, 1967.
 [7] J. F. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," *Proc. SIGGRAPH' 77*, pp.192-198, 1977.
 [8] 佐藤洋一, 向川康博, インバースレンダリング, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2004-CVIM-91, pp. 65-76, 2004.
 [9] R. J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 139-144, 1980.
 [10] 富永昌治, 光と色の計測と表現 -コンピュータビジョンの観点から-, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2010-CVIM-172(349), pp. 1-15, 2010.
 [11] S. A. Shafer, "Using color to separate reflection compo-

nents," *Color Research and Application*, Vol.10, pp.210-218, 1985.
 [12] S. Tominaga, "Analysis of Object Color Images Using a Reflection Model," *Journal of Image Information and Television Engineers*, Vol. 50, No. 5, pp. 577-585, 1996.
 [13] R. T. Tan, K. Nishino and K. Ikeuchi, "Separating Diffuse and Specular Reflection Components based on Surface Color Ratio and Chromaticity," in *Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision and Applications (MVA '02)*, pp. 14-19, Dec., 2002.
 [14] R. T. Tan, K. Nishino and K. Ikeuchi, "Separating Reflection Components based on Chromaticity and Noise Analysis," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 10, pp. 1373-1379, Oct., 2004.
 [15] R. T. Tan and K. Ikeuchi, "Separating Reflection Components of Textured Surfaces Using a Single Image," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 2, pp. 179-193, 2005.
 [16] 宮崎大輔, 池内克史, 偏光の基礎理論とその応用, 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, CVIM21, Vol.1, No.1, pp.64-72, 2008.
 [17] L.B. Wolff and T.E. Boult, "Constraining object features using a polarization reflectance model," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.13, No.7, pp.635-657, 1991.
 [18] S. Umeyama and G. Godin, "Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.26, No.5, 2004.
 [19] S.K.Nayar, X.S. Fang and T. Boult, "Separation of reflection components using color and polarization," *International Journal of Computer Vision*, Vol.21, No.3, pp.163-186, 1997.
 [20] S. Lin and S. W. Lee, "Detection of specularity using stereo in color and polarization space," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.65, No.2, pp.336-346, 1997.
 [21] 重富卓哉, 松本千賀子, 宮崎大輔, 馬場雅志, 浅田尚紀, ステレオ偏光情報を用いた物体の3次元形状復元, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2010, pp. 880-887, 2010.

- [22] 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健, 光学現象の分類基準を利用した画像の線形化, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2002, pp. II-167-176, 2002.
- [23] T. Mori, R. Taketa, S. Hiura and K. Sato, "Photometric Linearization by Robust PCA for Shadow and Specular Removal," Communications in Computer and Information Science (CCIS), Springer-Verlag, vol. 359, pp. 211-224, 2013.
- [24] <http://ja.wikipedia.org/wiki/拡散反射>
- [25] 新編色彩科学ハンドブック, 日本色彩学会編
- [26] 向川康博, 日浦慎作, 佐藤いまり, 電子情報通信学会知識ベース 2 群 2 編 5 章
- [27] S.M. Seitz and C.R. Dyer, "Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring," Proc. IEEE CVPR, pp. 1067-1073, 1997.
- [28] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [29] J. Filip and M. Haindl, M, "Bidirectional Texture Function Modeling: A State of the Art Survey," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.31, no.11, pp.1921,1940, 2009.