

部分偏光している拡散反射と鏡面反射の分離 Separating Partially Polarized Reflection Components

梶山 颯真[†] 朴 太和[†] 川原 僚[‡] 岡部 孝弘[‡]
Soma Kajiyama Taihe Piao Ryo Kawahara Takahiro Okabe

1. はじめに

光の反射には主に、拡散反射と鏡面反射がある。画像に鏡面反射が含まれる場合、画像のセグメンテーション[1]や Shape-from-Shading[2]などの様々なタスクの精度に影響を及ぼすため、画像に含まれる拡散反射成分と鏡面反射成分の分離は画像処理タスクの前処理として重要である。

反射成分の分離手法には、拡散反射光と鏡面反射光の色の違いに着目する手法や偏光状態の違いに着目する手法がある。色の違いに基づく手法は、鏡面反射光の色が光源色に等しいのに対して拡散反射光の色が光源色と物体色の両方に依存することに着目して反射成分の分離を行う。偏光状態の違いに着目する手法では、鏡面反射光が完全偏光、拡散反射光が非偏光であると仮定し、カメラと光源の前で直線偏光板を回転させ、鏡面反射光と拡散反射光の偏光状態の違いによる観測輝度値の変化を利用して反射成分の分離を行う。また、Nayar ら[3]は、鏡面反射光が部分偏光であると仮定し、色と偏光の両方の情報を用いて拡散反射と鏡面反射を頑健に分離する手法を提案している。

ところが、物体表面層での散乱と界面の透過を経て観察される拡散反射光は、フレネルの式により入射面に垂直な方向と平行な方向で強度透過率が異なることから、一般に部分偏光である。そのため、拡散反射が非偏光であると仮定した手法の精度には限界がある。

そこで本稿では、拡散反射光も部分偏光であることを仮定した反射成分分離手法を提案する。提案手法では、カラー偏光カメラで撮影された画像を入力として、拡散反射と鏡面反射の部分偏光モデルと 2 色性反射モデルに基づいて反射成分分離を行う。具体的には、拡散反射光と鏡面反射光の色の違いを用いて鏡面反射光の色を推定し、3 次元色空間における偏光情報の変化に伴う色の变化から位相角を推定する。その後、これらの情報を用いて、最小二乗法により各反射光の偏光度、直流成分、振動成分を推定し、推定したパラメタから各反射成分を算出する。カラー偏光画像を用いた実画像実験と合成画像実験を行い、提案手法の有効性を示す。

2. 関連研究

従来の反射成分の分離方法として、反射光の色の違いを用いる手法[4], [5]、反射光の偏光状態の違いを用いる手法[6], [7]、高周波パターン[8]を用いる手法などが存在している。提案手法は、反射成分の色の違いと偏光状態の違いの 2 点に着目し、反射成分を分離する。

反射成分の色の違いに基づく反射成分の分離を行う手法

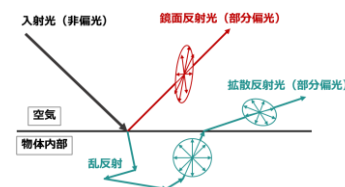


図 1 反射モデル

として、Shafer ら[4]は、2 色性反射モデルを提案し、反射成分分離を行う手法を提案している。2 色性反射モデルは、反射光が拡散反射光と鏡面反射光の和で表現されるモデルである。鏡面反射光の色は光源色に等しいのに対して拡散反射光の色が光源色と物体色の両方に依存することに着目し、拡散反射成分の色と鏡面反射成分の色の違いを手掛かりにすることで、各々の反射光の色ベクトルと反射強度を推定し、反射成分分離を行う。

また、偏光を用いる手法も多く存在する。一般に、鏡面反射光は物体表面で反射するため、偏光であると仮定し、拡散反射光は物体内部に透過し、乱反射するため、非偏光であると仮定する。既存手法[6], [7]では、鏡面反射光が完全偏光であると仮定し、偏光板の回転に伴う輝度値の変化を利用することで、反射成分分離を行う。

さらに、複数の情報を組み合わせて、反射成分の分離を行う手法も存在する。Nayar ら[3]は各反射成分の色の違いと偏光状態の違いの両方を用いて、鏡面反射光が部分偏光であると仮定して反射成分の分離を行っている。具体的には、まず各画素における偏光板の回転に伴う輝度値変化から鏡面反射成分の色を推定する。次に、近傍画素を用いて拡散反射の色を推定し、各反射成分の色ベクトルを手掛かりに 2 色性反射モデルに基づいて、反射成分分離を行う。

本手法が既存手法と異なる点は、強度透過率が偏光方向に依存することを考慮して、拡散反射光も部分偏光と仮定することである。拡散反射光が部分偏光であることを考慮した反射モデルに基づいて、拡散反射光・鏡面反射光の色を推定し、反射成分の分離を行うだけでなく、偏光度等も推定する。実画像と合成画像を用いた実験を行い、拡散反射光が非偏光であると仮定した場合と比較することで、拡散反射光が部分偏光であることを考慮した提案手法の有効性を示す。

3. 反射光の偏光と色

偏光には、振動面が単一の完全偏光、任意の方向に一樣に振動している非偏光がある。また、任意方向に振動しているが、特定の方向において他方向より大きく振動する光を部分偏光と呼ぶ。なお、本稿では非偏光の入射光を扱う。

3.1 反射光の偏光モデル

[†]九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻
Kyushu Institute of Technology

[‡]九州工業大学 大学院情報工学府 知能情報工学研究系
Kyushu Institute of Technology

物体表面付近における反射の様子を図 1 に示す。観測される反射光には、物体表面において反射した鏡面反射光と、物体表面層で乱反射したのち界面から透過した拡散反射光が含まれ、いずれも偏光している。強度透過率と強度反射率は、偏光の振動方向により異なり、フレネルの式により計算される。強度透過率は入射光と法線で張られる入射面に対して平行な振動方向で最大となるため、界面を透過する拡散反射光は入射面に平行な方向に最も偏光している。一方、強度反射率は入射面に対して垂直な振動方向で最大となるため、物体表面で反射する鏡面反射光は入射面に垂直な方向に最も偏光している。

したがって、非偏光光源下において、カメラの前で直線偏光板を回転させながら物体表面を観察すると、拡散反射光と鏡面反射光、およびそれらの和である観測輝度値は図 2 に示す正弦波となる。なお、強度透過率と強度反射率が最大となる方向は直交しているため、拡散反射光と鏡面反射光の輝度値が最大となる偏光板の角度には 90° の差が存在する。

3.2 反射光の偏光・色モデル

2 色性反射モデルでは、反射光は拡散反射光と鏡面反射光の 2 つの成分から構成され、R, G, B の 3 次元ベクトルである観測輝度値 $\mathbf{i}$ は、拡散反射光の輝度値 $\mathbf{i}_d$ と鏡面反射光の輝度値 $\mathbf{i}_s$ の線形結合

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_d + \mathbf{i}_s \quad (1)$$

で表される。2 色性反射モデルにより、拡散反射光の色ベクトル $\mathbf{c}_d$ は光源色と被写体の反射率に依存し、鏡面反射光の色ベクトル $\mathbf{c}_s$ は光源色に等しい。

また、拡散反射光と鏡面反射光は部分偏光である。回転する直線偏光板の透過光を観測する場合、直線偏光板の角度 ϕ_{pol} に対する注目画素の拡散反射光の輝度 $i_d(\phi_{pol})$ は

$$i_d(\phi_{pol}) = d_d \cdot c_d + a_d \cdot c_d \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_d)) \quad (2)$$

で表され、直線偏光板の角度 ϕ_{pol} に対する注目画素の鏡面反射光の輝度 $i_s(\phi_{pol})$ は

$$i_s(\phi_{pol}) = d_s \cdot c_s + a_s \cdot c_s \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_s)) \quad (3)$$

で表される。ここで、 d_d, d_s は各反射光の直流強度、 a_d, a_s は各反射光の正弦波の振幅である。なお、 ϕ_d, ϕ_s は各反射輝度が最大となる偏光板の角度であり、 90° の差があることが知られている。

4. 提案手法

本研究では、光源色の一様なシーンに対してカラー偏光カメラを用いて撮影した 1 枚の画像を入力として、その色と偏光状態を解析することで反射成分分離を行う。カラー偏光画像の各画素では、12 個の画素値（水平に対して $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の偏光成分 $\times$ R, G, B の 3 つの色情報）が得られる。

カラー偏光カメラの偏光フィルタの角度 ϕ_{pol} に対する注目画素の観測輝度値 $\mathbf{i}(\phi_{pol})$ は式(1), (2), (3)より

$$\mathbf{i}(\phi_{pol}) = \mathbf{i}_d(\phi_{pol}) + \mathbf{i}_s(\phi_{pol})$$

$$= (d_d \cdot \mathbf{c}_d + d_s \cdot \mathbf{c}_s) + (a_s \cdot \mathbf{c}_s - a_d \cdot \mathbf{c}_d) \cos(2(\phi_{pol} - \phi)) \quad (4)$$

と表される。 $\phi = \phi_s = \phi_d + \pi/2$ は注目画素の法線に依存する位相角である。

提案手法では、まず、2 色性反射モデルに基づいて鏡面反射光の色 $\mathbf{c}_s$ を推定し、偏光情報に基づいて位相角 ϕ を推定す

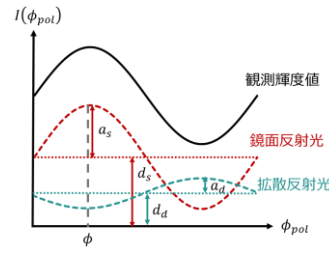


図 2 偏光板の角度に対する観測輝度値

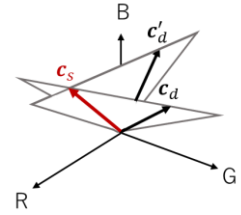


図 3 3次元色空間

る。その後、最小二乗法による最適化を行い、 $\mathbf{c}_d, d_d, d_s, \rho_d, \rho_s$ を推定する。なお、 ρ_d, ρ_s は各反射光の偏光度であり、

$$a_{d,s} = \rho_{d,s} \cdot d_{d,s} \quad (5)$$

の関係がある。

4.1 鏡面反射光の色推定

2 色性反射モデルから、被写体における各画素の色ベクトルは 3 次元色空間において拡散反射光と鏡面反射光の 2 つの色ベクトルの線形結合で表される。式(4)より観測輝度値 $\mathbf{i}(\phi_{pol})$ を色ベクトルについて整理すると

$$\mathbf{i}(\phi_{pol}) = (d_d - a_d \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi))) \cdot \mathbf{c}_d + (d_s + a_s \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi))) \cdot \mathbf{c}_s \quad (6)$$

で表すことができる。

式(6)より各画素における偏光方向毎の R, G, B の輝度値は $\mathbf{c}_d$ と $\mathbf{c}_s$ の 2 つのベクトルの線形結合で表現されるので、4 点の輝度値が $\mathbf{c}_d$ と $\mathbf{c}_s$ で張られる原点を通る平面上に存在する。一般に画素毎に $\mathbf{c}_d$ は異なるが、 $\mathbf{c}_s$ は共通であることから、画素毎に張られる平面の交線として $\mathbf{c}_s$ が得られる。すなわち、各画素における平面を推定し、図 3 に示すように画素毎の平面を重ね合わせることで交線ベクトルを推定することで鏡面反射光の色ベクトルを推定することができる。まず、ノイズの影響を考慮して、特異値分解（最小二乗法）を用いて平面あてはめを行う。具体的には、各画素の 4 個の RGB 値を並べた行列の最小特異値に対応する特異ベクトルを平面の法線とみなす。次に、各画素の平面の法線から、同様に特異値分解を用いて平面の交線を推定する。具体的には、法線ベクトルを並べた行列を

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}_1^T \\ \mathbf{n}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{n}_p^T \end{bmatrix} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \quad (7)$$

のように特異値分解して、最小特異値に対応する特異ベクトルを平面の交線、つまり光源色とみなす。なお、 p は交線ベクトル推定に使用した法線の数である。

4.2 位相角 ϕ の推定

次に、注目画素の法線に依存する位相角 ϕ を推定する。モノクロ偏光画像の場合、偏光板の角度に対する観測輝度値の変化に対して正弦波を当てはめ、最大輝度の角度を推定することで、 180° の曖昧性を残した位相角を推定することができる。一方、カラー偏光画像の場合、観測輝度値の変化が描く正弦波はバンド毎に異なるため、モノクロ偏光画像と同様の手法で位相角を推定することができない。

カラー偏光画像の観測輝度値は 3 次元色空間において図 4 に示すように、式(4)第一項 (直流成分) を中心に、式(4)第二項方向に $\cos(2(\phi_{pol} - \phi))$ の長さで変化している。そこで、輝度値が 3 次元色空間における直線上で 1 次元的に変化していることに着目して、モノクロ偏光画像の場合と同様に位相角 ϕ を推定する。具体的には、直流成分を引いた輝度値に対して特異値分解を行うことで観測輝度値に最も近い直線の方法を求める。そして、各偏光方向の輝度値を求めた直線に射影し、各射影点の直流成分からの距離の変化から位相角を推定する。

4.3 拡散反射光の色、偏光度、及び直流成分の推定

式(4)の他の未知数については、推定した鏡面反射の色 $\mathbf{c}_s$ 、位相角 ϕ を用いて、最小二乗法により $\mathbf{c}_d$, d_d , d_s , ρ_d , ρ_s を推定する。そこで、式(4)における直流成分と振動成分を

$$\mathbf{m} = d_d \cdot \mathbf{c}_d + d_s \cdot \mathbf{c}_s \quad (8)$$

$$\mathbf{v} = a_s \cdot \mathbf{c}_s - a_d \cdot \mathbf{c}_d \quad (9)$$

とおく。なお、直流成分 $\mathbf{m}$ と振動成分 $\mathbf{v}$ はそれぞれ RGB の 3 次元ベクトルであり、カラー偏光情報から容易に算出できるが、振動成分 $\mathbf{v}$ には位相角 ϕ の曖昧性ゆえに符号の曖昧性が存在する。式(8), (9)における未知数は、 $\mathbf{c}_{d,R} + \mathbf{c}_{d,G} + \mathbf{c}_{d,B} = 1$ という色のスケールを考慮すると、事前に求めた $\mathbf{c}_s$ 以外の 6 つである。式(8)と式(9)を合わせて 6 つの方程式があるが、 $\mathbf{m}$ と $\mathbf{v}$ は $\mathbf{c}_d$ と $\mathbf{c}_s$ で張られる平面上に存在することから、ランクが 6 に満たないことを示すことができる。したがって、これらの未知数を画素毎に推定することはできない。

そこで提案手法では、拡散反射光の色 $\mathbf{c}_d$ が一様であると考えられる領域に分割し、各領域において領域内の $\mathbf{c}_d$ が等しいという仮定の下で式(8), (9)を解く。具体的には、各領域 R において、最小二乗法により

$$\sum_{p \in R} \left\{ \begin{aligned} & (\mathbf{m}_p - f(\mathbf{c}_d, d_d, p, d_s, p))^2 \\ & + (\mathbf{v}_p - g(\mathbf{c}_d, d_d, p, d_s, p, \rho_d, p, \rho_s, p))^2 \\ & + \lambda_p \cdot s(\rho_s, p)^2 + \lambda_d \cdot s(d_d, p)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{c}_d\|_1 = 1, 0 < d_d, p, d_s, p, 0 < \rho_d, p, \rho_s, p < 1$$

を最小化して、各領域 R における拡散反射光の色 $\mathbf{c}_d$ 、各画素 p における直流成分 d_d, p , d_s, p 、偏光度 ρ_d, p , ρ_s, p を推定する。なお、 $s(\rho_s, p)$, $s(d_d, p)$ は領域内における偏光度 ρ_s 、拡散反射光の直流成分 d_d の滑らかさに関する項であり、それぞれ偏光度画像、直流強度画像にラプラシアンフィルタをかけることにより算出される。また、 λ_p , λ_d は各滑らかさ項の重みである。

式(10)の非線形最適化の初期値は、以下のように求める。まず、拡散反射光の色 $\mathbf{c}_d$ の初期値は、従来手法[9]によりおおまかな鏡面反射除去画像を取得し、各画素における RGB バンドの画素値の和が 1 になるように正規化したものを用いる。なお、従来手法は白色光源を仮定しているが、鏡面反射の色 $\mathbf{c}_s$ を用いて画像のホワイトバランスを変更することで、任意の光源色に対して従来手法を適用することができる。次に、各反射の直流成分と偏光度 d_d , d_s , ρ_d , ρ_s の初期値を

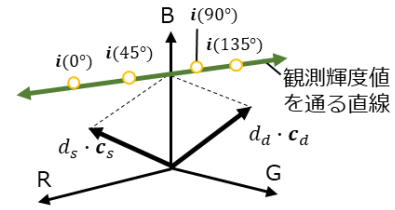


図 4 色空間における観測輝度値

計算する。具体的には、鏡面反射の色 $\mathbf{c}_s$ と拡散反射の色 $\mathbf{c}_d$ を固定して、最小二乗法により

$$\left\{ (\mathbf{m} - f(d_d, d_s))^2 + (\mathbf{v} - g(a_d, a_s))^2 \right\} \quad (11)$$

を最小化することで、各画素の d_d , d_s , a_d , a_s を推定する。ただし、4.2 節で推定した ϕ は、 $\mathbf{v}$ の符号に対応する曖昧性があるため、4.2 節で推定した $\mathbf{v}$ の符号が誤っている場合に a_d , a_s は負の値になる。そこで、 d_d と d_s には非負値制約を課す一方で、 a_d と a_s には非負値制約または非正値制約を課して解いた結果を比較し、二乗誤差の小さい結果を採用する。負の a_d , a_s が算出された画素は $\mathbf{v}$ の符号を変更し、位相角 ϕ に 90° を加算する。これにより $\mathbf{v}$, ϕ の曖昧性を除去することができる。そして、式(5)より偏光度 ρ_d , ρ_s を算出する。

5. 実験

提案手法の有効性を示すために、合成画像と実画像を用いた実験を行った。実験に用いた合成画像 (画像 1 と画像 2) と実画像 (画像 3) を図 5 に示す。いずれもカラー偏光画像をカラー画像として表示している。4.3 節で述べた領域分割には、SLIC[10]を用いた。

表 1 に鏡面反射光の色 (光源色) の推定結果を示す。図 6, 図 7, 図 8 に、画像 1, 画像 2, 画像 3 に対して提案手法を適用した結果を示す。なお、式(10)における重みパラメータは、合成画像がノイズを含まないのに対して実画像がノイズを含むことから、合成画像実験では $\lambda_p = 1.0 \times 10^{-6}$, $\lambda_d = 0$ 、実画像実験では $\lambda_p = 1.0 \times 10^{-8}$, $\lambda_d = 1.0 \times 10^{-4}$ とした。また、鏡面反射光の偏光度 ρ_s は鏡面反射成分の結果中の赤枠部分の結果を拡大して表示している。加えて、従来手法[9]、および、非偏光な拡散反射光を仮定した手法との比較を図 9 に示す。

5.1 合成画像実験の結果

表 1 は鏡面反射の色 (光源色) が正確に推定できていることを定量的に示している。図 6 および図 7 から、拡散反射の色の角度誤差は、物体表面上の大部分で 1° から 2° 程度であり、良好な結果が得られていることが分かる。また、位相角、偏光度、反射成分についても、定性的に良好な結果が得られたことが分かる。図 9 から、提案手法の結果が良好であるのに対して、従来手法[9]では拡散反射に鏡面反射が、非偏光拡散反射を仮定した手法では鏡面反射に拡散反射が混在していることが分かる。以上より提案手法が有効であることを確認できる。

5.2 実画像実験

表 1 より鏡面反射の色 c_s に関して角度誤差が3°程度であり、拡散反射の色 c_d は図 8 より各物体の色が現れていることから良好な結果を得られていることが確認できる。位相角 ϕ は法線が水平方向に近い画素では90°, 鉛直方向に近い画素では0°であるため、良好な結果が得られたことが確認できる。拡散反射光の偏光度は物体の遮蔽輪郭線に近づくにつれて大きくなっており、鏡面反射光の偏光度は鏡面反射が観測される領域で大きいことが確認できる。図 5 の画像 3 の光沢が図 7 の鏡面反射成分に分離されていることから、定性的に良好に分離できたことが確認できる。

6. おわりに

本稿では、カラー偏光画像を用いて、拡散反射・鏡面反射が共に部分偏光であることを考慮した拡散反射・鏡面反射の分離手法を提案した。具体的には、カラー偏光画像を入力として、拡散反射光と鏡面反射光の偏光モデルと 2 色性反射モデルに基づき、拡散反射光と鏡面反射光の色、位相角、偏光度、反射成分をそれぞれ推定した。また、合成画像と実画像を用いた実験を行い、本手法の有効性を示した。

本研究では、入射光が非偏光であると仮定した。今後は、入射光が部分偏光や完全偏光である場合への拡張に取り組みたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] S. Kumar and R. Nishanth et al, "Specular Reflection Removal Using Morphological Filtering for Accurate Iris Recognition", *2019 International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)* (2019), pp.1—4, 2019.
- [2] F. Tong and B. Funt, "Removing specularities from color images for shape from shading", *Computer Vision and Shape Recognition*, Vol.14, pp.273—290, 1989.
- [3] S. Nayar, X. Fang and T. Boult, "Separation of reflection components using color and polarization", *International Journal of Computer Vision*, Vol.21, pp.163—186, 1997.
- [4] S. Shafer, "Using Color to Separate Reflection Components", *Color Res. App.* 10(4), Vol.10, No.4, pp.210—218, 1985.
- [5] R. Bajcsy, S.W. Lee and A. Leonardis, "Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation", *International Journal of Computer Vision*, Vol.17, No.3, pp.241—272, 1996.
- [6] L. Wolff and T. Boult, "Constraining object features using a polarization reflectance model", *Phys. Based Vis. Princ. Pract. Radiom*, Vol.1, pp.167, 1993.
- [7] 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.
- [8] B. Lamond, P. Peers and P. Debevec, "Fast image-based separation of diffuse and specular reflections.", *SIGGRAPH Sketches*, Vol.6, 2007.
- [9] Y. Takahisa and N. Atsushi, "General Improvement Method of Specular Component Separation Using High-Emphasis Filter and Similarity Function", *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol.7, No.2, pp.92—102, 2019.
- [10] R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua and S. Süsstrunk, "SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol.34, no.11, pp.2274—2282, 2012.



図 5 実験に用いた画像

表 1 鏡面反射光の色の推定結果

	真値	推定結果	角度誤差(°)
画像 1	[0.333,0.333,0.333]	[0.333,0.333,0.333]	0
画像 2	[0.300,0.400,0.300]	[0.300,0.400,0.300]	0
画像 3	[0.301,0.366,0.333]	[0.326,0.361,0.313]	3.207

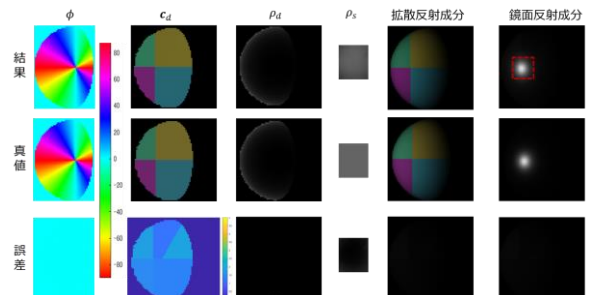


図 6 画像 1 の推定結果

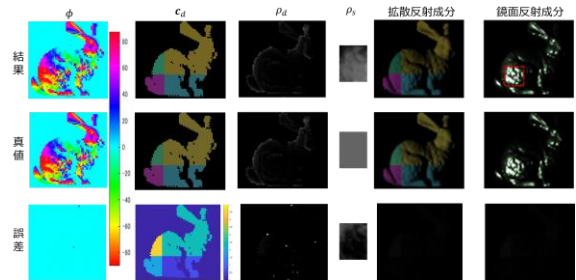


図 7 画像 2 の推定結果

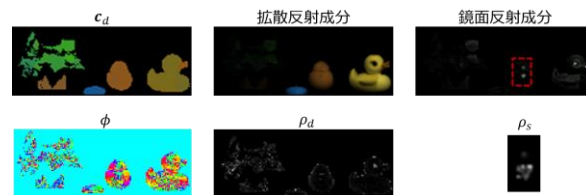


図 8 画像 3 の推定結果

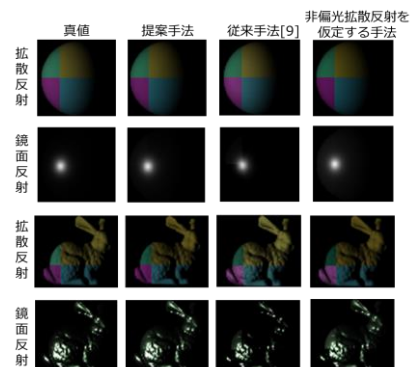


図 9 各手法との比較