

色と偏光に基づく拡散反射と鏡面反射の分離

朴 太和^{1,a)} 川原 僚^{2,b)} 岡部 孝弘^{2,c)}

概要: 画像に含まれる拡散反射成分と鏡面反射成分の分離は、様々な画像処理タスクの前処理として重要である。偏光に基づく反射成分の分離では、従来、拡散反射光が非偏光であると仮定して分離を行っていた。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、一般に部分偏光であるため、従来手法の精度には限界がある。そこで本稿では、鏡面反射光だけでなく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法を提案する。提案手法では、カラー偏光画像を入力として、拡散反射と鏡面反射の偏光モデルと2色性反射モデルに基づいて、反射成分を分離する。実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を示す。

1. はじめに

光の反射には拡散反射と鏡面反射がある。画像に含まれる拡散反射成分と鏡面反射成分を分離することは、様々な応用に有効である。偏光レンズによる水面や雪面のギラツキの除去、ガラスの映り込み除去など様々な応用がある。

また、反射成分の分離は画像処理タスクの前処理としても重要である。画像に鏡面反射が含まれると、画像のセグメンテーション [1] や Shape-from-shading [2] などのタスクに影響する。拡散反射のみの画像を使用することによって、より精度の高い結果が得られる。

反射分離の分離手法には、拡散反射光と鏡面反射光の色の違いを用いる手法、偏光状態の違いを用いる手法がある。色に基づく手法は、鏡面反射の色が光源色、拡散反射の色は物体の反射率に依存することを用いて、反射成分の分離を行う。偏光に基づく手法は成分、カメラや光源の前で直線偏光板を回転させ、鏡面反射と拡散反射の偏光状態の違いによる観測輝度値の変化を用いて、反射成分の分離を行う。また、複数の手掛かりを組合わせて、分離を行うこともできる。Nayar ら [3] は、拡散反射が非偏光であると仮定して、色と偏光の両方の情報を用いて拡散・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、フレネルの式により、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、透過率の違いによって、一般に部分偏光である。そのため、拡散反射が

非偏光であることを仮定した手法の精度には限界がある。

そこで本稿では、鏡面反射光だけでなく拡散反射光も部分偏光であることを仮定した反射成分の分離法を提案する。提案手法では、カラー偏光画像を入力として、拡散反射と鏡面反射の偏光モデルと2色性反射モデルに基づいて、反射成分を分離する。具体的には、拡散反射と鏡面反射の色の違いに基づき鏡面反射の色を推定し、3次元色空間における偏光状態の変化に伴う色の变化に基づき偏光角を推定したのち、これらの情報を用いて、拡散反射と鏡面反射の分離を行う。

本稿では、カラー偏光カメラで撮影した実画像を用いた実験結果を報告する。鏡面反射の色、拡散反射の反射率、および、反射成分の分離結果から手法の有効性を示す。さらに拡散反射が非偏光であると仮定した場合の結果との比較も行う。

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。提案手法は反射光の色の違いと偏光の違い、この2点に注目し、反射分離の手法を提案する。

色情報を用いて反射成分の分離を行う手法として、Shafer ら [4] は、2色性反射モデルを提案し、色の違いに基づいて反射の分離を行う手法を提案している。2色性反射モデルでは、反射光は全ての方向に均等に放射される拡散反射光と鏡面反射光の二つの成分の和である。鏡面反射成分の色は光源の色と同じであり、拡散反射成分の色は表面の反射率に依存する。観測輝度値を3次元RGB空間にプロット

¹ 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

² 九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系

a) taihe.piao881@mail.kyutech.jp

b) rkawahara@ai.kyutech.ac.jp

c) okabe@ai.kyutech.ac.jp

し、これらの観測値を含む平面を推定する。拡散反射成分の色と鏡面反射成分の色の違いを手がかりにし、それぞれの反射光の色ベクトルと反射強度を推定することで、鏡面反射と拡散反射の分離を行う。

また、偏光情報を用いる手法も多く存在する。偏光とは特定の方向にのみ振動する光（電磁波）であり、被写体の偏光情報を解析することで、反射光の偏光状態と被写体の法線情報を推定し、反射除去の分野に用いることができる。一般的に、鏡面反射光が物体表面で、即座に反射する為、偏光であると考えられる。拡散反射光が物体内部の屈折率の不均一性により乱反射するため、非偏光であると仮定する 경우가多い。既存手法 [5][6] では、偏光板の回転による輝度値の変化を利用し、拡散反射と鏡面反射の分離を行う。これらの手法では、拡散反射光が非偏光であると仮定しているため、拡散反射は偏光板の回転により輝度値が変化しないことを利用し、鏡面反射成分を推定する。

また、複数の手掛かりを組合わせて、反射成分の分離を行う手法も存在する。Nayar ら [3] は色と偏光情報を両方用いて、拡散反射が非偏光であると仮定し、拡散反射・鏡面反射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角度による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、反射光それぞれの色ベクトルを手がかりにし、2色性反射モデルに基づいて、反射成分の分離を行う。

これらの既存研究は、拡散反射が非偏光であると仮定している一方で、Cui ら [9] 拡散反射が部分偏光と仮定し、偏光に基づく形状復元の手法を提案している。拡散反射が部分偏光と仮定すると、偏光板の角度による観測輝度値は余弦波となることを示し、この仮定に基づき、偏光による形状復元の精度が向上することを示している。

本手法が既存の反射成分分離の研究と異なる点は、拡散反射光が部分偏光と仮定することである。カラー偏光カメラで撮影した実画像を用いて実験を行い、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を用いて、拡散反射・鏡面反射の色を推定し、反射の分離を行う。実験結果から手法の有効性を示し、拡散反射が非偏光の場合と比較することで、拡散反射が部分偏光であると仮定することの影響を示す。

3. 偏光

光は電磁波であり、波の性質を持っている。偏光は光の波動性の一つであり、振動方向の偏る光である。特定の方向にのみ振動している光を完全直線偏光、任意の方向に一律に振動している光は非偏光という。振動方向の分布が不一致で、特定方向に振動する強度が他の方向より強い光を部分偏光という。

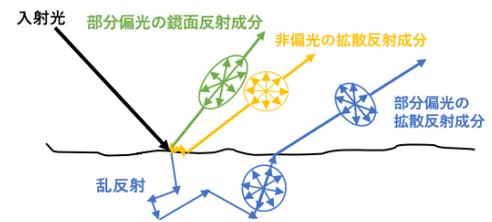


図 1: 反射モデル

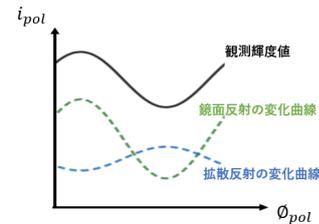


図 2: 観測輝度値の変化

3.1 偏光と反射の関係

反射光のモデルを図 1 に示す。入射光が非偏光の場合、観測される反射光のモデルには 1 回反射の鏡面反射の部分偏光成分と、物体表面で乱反射した拡散反射の非偏光成分、および物体表面層で乱反射し界面から透過した拡散反射の部分偏光成分が含まれる。したがって、鏡面反射の偏光成分が拡散反射の偏光成分より強い時、図 2 に示すような曲線になる。

拡散反射と鏡面反射の偏光度はフレネルの式により、それぞれ強度透過率と強度反射率によって決定される。拡散反射は入射面（入射光と法線が存在する面）に平行に反射するとき、強度透過率が最大となるため、平行な方向に一番偏光している。鏡面反射は入射面に垂直に反射するとき、強度反射率が最大となるため、垂直な方向に一番偏光している。そのため、直線偏光板を回転させながら拡散反射と鏡面反射を観察すると、図 2 に示すように、観測輝度値が最大となる偏光板の角度が 90° の差がある。

3.2 偏光特性を考慮した 2 色性反射モデル

反射光が全ての方向に均等に放射される拡散反射光と、鏡面反射光の二つの成分の和である。観測輝度値 i は i_d と i_s の線形結合

$$i = i_d + i_s \quad (1)$$

で表される。2 色性反射モデルにより、色空間における拡散反射の色ベクトル \mathbf{c}_d は被写体の反射率に依存し、鏡面反射の色ベクトル \mathbf{c}_s は光源の色に依存する。

また、拡散反射と鏡面反射は部分偏光であるため、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拡散反射の変化 $i_d(\phi_{pol})$ は

$$i_d(\phi_{pol}) = d_d \cdot \mathbf{c}_d + a_d \cdot \mathbf{c}_d \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_1)) \quad (2)$$

で表される。偏光フィルタの角度 ϕ_{pol} に対する注目画素の鏡面反射の変化 $i_s(\phi_{pol})$ は

$$i_s(\phi_{pol}) = d_s \cdot \mathbf{c}_s + a_s \cdot \mathbf{c}_s \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_2)) \quad (3)$$

で表される。ここで、 d_d と d_s は拡散反射と鏡面反射の一定成分、 a_d と a_s は拡散反射と鏡面反射の余弦波成分の振幅である。なお、 ϕ_1 と ϕ_2 は拡散反射と鏡面反射それぞれの輝度値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、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、その色情報と偏光情報を解析することで反射成分を分離する。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° , 45° , 90° , 135° の偏光成分 \times RGB 3チャンネル)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 $i(\phi_{pol})$ が

$$\begin{aligned} i(\phi_{pol}) &= i_d(\phi_{pol}) + i_s(\phi_{pol}) \\ &= (d_d \cdot \mathbf{c}_d + d_s \cdot \mathbf{c}_s) \\ &\quad + (a_s \cdot \mathbf{c}_s - a_d \cdot \mathbf{c}_d) \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi)) \end{aligned} \quad (4)$$

で表される。 ϕ は注目画素の法線に依存する偏光角である。2色性反射モデルに基づき、鏡面反射の色 \mathbf{c}_s を推定し、偏光情報に基づき、偏光角 ϕ を推定する。これらの情報を用いて、交互最小二乗法によって \mathbf{c}_d と (d_d, a_d, d_s, a_s) を交互に最適化することで推定する。拡散反射の色 \mathbf{c}_d の初期値は、近傍画素が類似の拡散反射率を持つことに着目して求める。

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次元色空間には拡散反射と鏡面反射2つの色ベクトルの線型結合である。式(2)、式(3)により、観測輝度値 $i(\phi_{pol})$ を色ベクトルについて整理すると

$$\begin{aligned} i(\phi_{pol}) &= \mathbf{c}_d \cdot (d_d + a_d \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_1))) \\ &\quad + \mathbf{c}_s \cdot (d_s + a_s \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_2))) \end{aligned} \quad (5)$$

で表すことができる。図3は被写体の任意点の色空間を示す。

シーンを照らす光源の色が一様なとき、各画素における鏡面反射光の色は光源の色に一致する。そのため、被写体上の任意の点における鏡面反射の色ベクトルは図4のように、同じ方向である。よって、各画素における拡散反射と鏡面反射の色ベクトルで構成された平面を求め、それらの交線ベクトルを計算することで、鏡面反射光が色空間にお

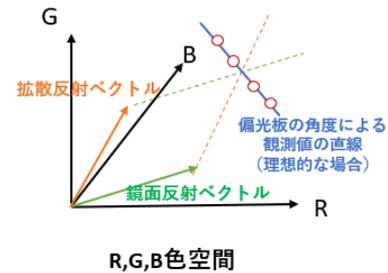


図 3: 2色性反射モデル

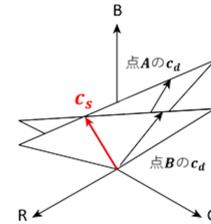


図 4: 平面間の交線推定による鏡面反射の推定

ける方向(鏡面反射の色ベクトルの向き)の推定が可能になる。

各画素に関して平面を推定するには、まず1個の画素につき、12個の偏光情報を4つの偏光方向についての色ベクトルに変換する。4方向のカラー偏光情報に対して、

$$\begin{bmatrix} R_0 & G_0 & B_0 \\ R_{45} & G_{45} & B_{45} \\ R_{90} & G_{90} & B_{90} \\ R_{135} & G_{135} & B_{135} \end{bmatrix} = U \Sigma V^T \quad (6)$$

に示すように特異値分解を行い、最小の特異値に対応する特異ベクトルが平面の法線ベクトルになる。これらの情報を用いて、平面を一意に確定することができる。

また、鏡面反射の弱い画素(拡散反射がメイン)を使って鏡面反射の色を推定すると、精度が低下するため、各画素に関して、特異値分解で得られた特異値 σ の大きさから、鏡面反射の強い画素をある程度推定する。最大特異値 σ_1 が他の特異値に比べて特に大きく、 σ_1 と σ_2 は比較的に大きい値である画素を鏡面反射の強い画素とみなして、平面の交線を推定することで、推定結果の精度を上げる。

4.2 偏光角の推定

次に、注目画素の法線に依存する偏光角 ϕ を推定する。モノクロ偏光画像の場合、偏光板による観測輝度値は余弦波のように変化するため、余弦波を当てはめて、最大輝度値の偏光板の角度を推定することで、 90° の曖昧性が残った偏光角を推定することができる。しかし、カラー偏光カメラで撮影する場合、画素値にノイズが含まれることや、鏡面反射成分の大小により色ごとに 90° の曖昧性が一貫しない場合があるため、モノクロ画像のように最大輝度値の偏光板の角度から偏光角 ϕ を決定することはできない。

この問題を解決するため、RGB 色空間において、4 方向の偏光情報の変化を一番満たす余弦波の式を推定する必要がある。そこで式 (6) の特異値分解を用いて、式 (5) 第 2 項のベクトル（直線）を当てはめることで、偏光角を推定する。

具体的には、特異値分解を用いて、4 方向の偏光情報を通す直線を当てはめ、その直線を満たす 4 偏光方向の偏光情報を推定する。これらの情報と原点との距離を余弦波の位相として計算し、最大位相における偏光板の角度を偏光角として推定する。しかし、直線の方法が一意に定まらないため、直線から推定した偏光角には曖昧性がある。直線の方向の違いによって、推定した偏光角には 90° の差がある。偏光角の曖昧さ問題は 4.3 節で最小二乗法を用いて、解決する。

4.3 拡散反射光および鏡面反射光の推定

式 (4) の他の未知数については、推定した鏡面反射の色 c_s 、偏光角 ϕ の結果を用いて、最小二乗法を用いて c_d と (d_d, a_d, d_s, a_s) を交互に最適化することで推定する。交互最小二乗法を用いて計算する場合、推定した鏡面反射の色 c_s 、偏光角 ϕ 以外、拡散反射の色 c_d の初期値も必要になる。

拡散反射の色 c_d の初期値は、近傍画素が類似の拡散反射率を持つことに着目して求める。まず、入力画像をスーパーピクセルを用いて、セグメンテーションを行う。スーパーピクセルの処理によって、色の類似度と位置関係により、画素をグループ分けできる。4.1 節で説明したように、鏡面反射と拡散反射がメインの画素を判定し、各画素において拡散反射がメインの場合、入力画像の色をそのまま正規化し、拡散反射の色の初期値として与える。鏡面反射がメインの場合、一番近いスーパーピクセル内から、拡散反射がメインの画素を見つけ、その画素の初期値を使用する。隣接するスーパーピクセルで見つからない場合、さらに外側のスーパーピクセルへ探索し、見つかるまでこの処理を繰り返す。

これらの既知の値、つまり、鏡面反射の色 c_s 、偏光角 ϕ と拡散反射の色 c_d の初期値を用いて、最小二乗法を用いて、拡散反射の色 c_d 、拡散反射と鏡面反射の振幅成分と一定成分 (d_d, a_d, d_s, a_s) を 2 組に分けて交互に推定する。最小二乗法で計算する際に、

$$\begin{aligned} \min & (\mathbf{i}(\phi_{pol}) - f(\mathbf{c}_d, d_d, a_d, d_s, a_s))^2 \\ \text{s.t.} & \frac{a_d}{d_d} < k \end{aligned} \quad (7)$$

のように、拡散反射の色 c_d 、鏡面反射の振幅成分と一定成分 (d_d, a_d, d_s, a_s) を交互に更新し、それぞれの最小二乗誤差の和が最小になるように計算を反復する。

また、反射分離の精度を向上するため、最小二乗法で計算する際、拡散反射光の偏光度 k が 1 より小さいある値

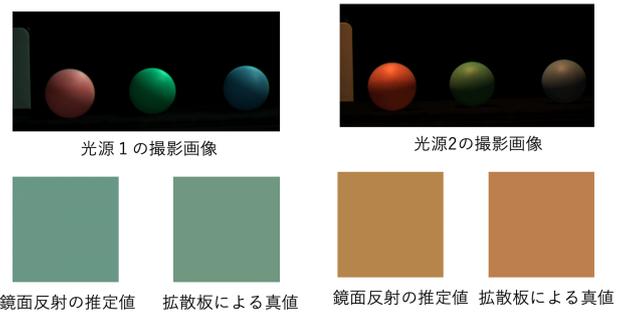


図 5: 鏡面反射色の推定結果

表 1: 鏡面反射色の推定結果

	鏡面反射の色推定値	拡散反射板による真値	真値とのなす角 ($^\circ$)
光源 1	(0.275, 0.384, 0.340)	(0.287, 0.381, 0.332)	1.45
光源 2	(0.467, 0.342, 0.191)	(0.477, 0.326, 0.197)	1.86

に設定し、計算結果に対して制限を設けた状態で最小二乗法で計算を行う。4.3 節で残っていた偏光角の曖昧性問題は、曖昧性のある二つの偏光角 ϕ の両方の結果を用いて、式 (7) を計算し、誤差の小さいほうを取ることで、偏光角 ϕ の曖昧性を排除する。推定したパラメータから拡散反射と鏡面反射の分離を行う。

5. 実験

FLIR 社の BFS-U3-51S5P-C カラー偏光カメラを使用し、実験を行った。12bit の分解能で撮影を行った。提案手法の有効性を示すため、異なる光源色（光源 1 と光源 2）でシーンを照らして、撮影を行った。また、本手法では、同じ色であれば方向・位置の異なる複数光源に対しても有効であるため、光源 2 は 2 方向から照らしている。

被写体の鏡面反射の色を評価するため、標準反射板を被写体と一緒に撮影した。標準反射板は拡散反射率が既知の反射板であり、光測定を行う際の校正基準によく使用される。シーンを照らす光源の色が一樣なとき、光源の色は物体の鏡面反射の色と同じであるため、標準反射板から計算した色を鏡面反射光の真値として、推定結果を評価する。

5.1 鏡面反射の色の推定結果

提案手法を用いて、三つの被写体から鏡面反射の色を推定し、推定結果と拡散反射板から計算した光源の色（真値）を可視化した結果を図 5 に示す。3 次元色ベクトルの推定値と真値のなす角によって、結果を評価する。鏡面反射光の色の推定値、真値、およびベクトルのなす角を表 1 に示す。

図 5 の結果より、定性的に比較することで、提案手法は鏡面反射の色推定に有効であることを確認した。また、表 1 の真値とのなす角の結果により、真値に近い値を推定でき、定量的に見ても提案手法の有効性を確認した。

また、拡散反射が非偏光と仮定する際、つまり変動成分

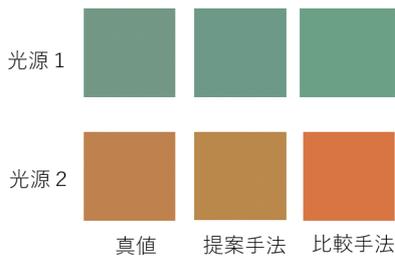


図 6: 光源色の定性的比較:

拡散反射が非偏光であると仮定した場合との比較

表 2: 光源色の定量的比較:

拡散反射が非偏光であると仮定した場合との比較

真値とのなす角 (°)	提案手法	比較手法
光源 1	1.45	2.60
光源 2	1.86	6.90

がすべて鏡面反射の場合、鏡面反射の色を推定した結果を図 6, 真値とのなす角の比較を表 2 に示す。これらの比較結果からも、提案手法の有効性を確認できた。

5.2 反射成分の分離結果

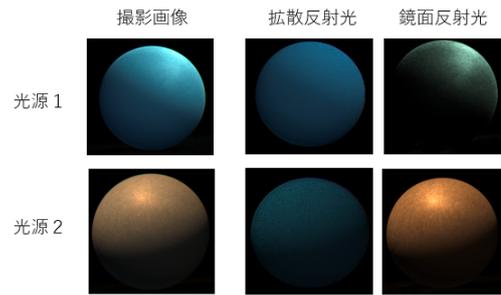
3つの色が違うボールに対して拡散反射・鏡面反射の分離結果を図 7 に示す。これらの結果から、さまざまな光源と被写体において、拡散反射と鏡面反射が分離されていることが確認できる。

また、分離結果から反射率を推定し、反射率の真値と比較することで分離の結果について定量的に評価する、図 8 に反射率の可視化結果、表 3 に反射率の真値と推定値のなす角を示す。反射率の真値は光源 1 において作成したため、光源 2 の撮影画像の推定結果と比較する際、誤差が全体的大きくなる。

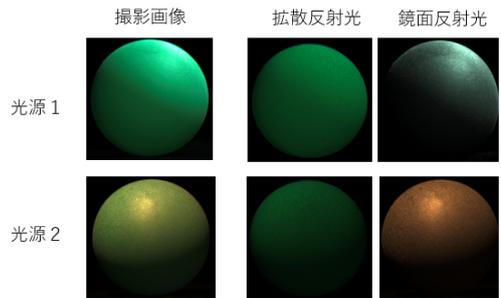
これらの結果より、それぞれの反射率の推定値が真値とのなす角が小さいことから、反射率の推定が定量的に見て、有効であることを確認した。ピンクのボールに対して、真値とのなす角が特に大きな原因は、鏡面反射の色（光源色）と近い色であると考えられる。つまり、反射光の色の違いによって反射光の色を推定したため、鏡面反射光と拡散反射光の色が近いほど式 (5) の第 1 項と第 2 項が平行に近づくため、精度が悪くなることを示しており、偏光情報だけでなく色情報も反射成分の分離に重要であることがわかる。

5.3 反射成分の分離の比較

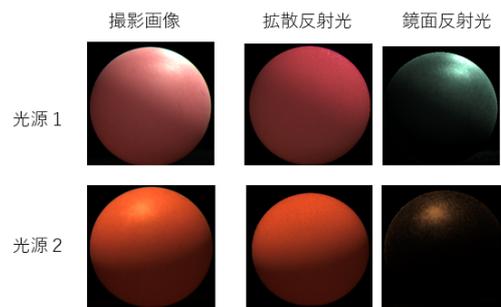
拡散反射が非偏光、鏡面反射のみが偏光であると仮定する場合、光源 1 に照らされた場合の撮影画像に対して反射の分離を行い、被写体の反射率を推定した。提案手法の反射率と比較することで、反射成分の分離について評価する。拡散反射が非偏光と仮定した比較手法に関しては、拡散反



(a) 青のボールに対する実験結果



(b) 緑のボールに対する実験結果



(c) ピンクのボールに対する実験結果

図 7: 光源 1 と光源 2 における反射の分離結果

	反射率の真値	反射率の推定値 (光源 1)	反射率の推定値 (光源 2)
青のボール			
緑のボール			
ピンクのボール			

図 8: 反射率の推定結果

射の偏光成分 $a_d \cdot c_d \cdot \cos(2(\phi_{pol} - \phi_1))$ の項を除外し、それ以外の手順は提案手法と同じである。

拡散反射が非偏光の時の反射率の推定結果、および提案手法との比較を図 9 に示す。比較結果に示すように、拡

表 3: 反射率と真値のなす角

真値とのなす角 (°)	青のボール	緑のボール	ピンクのボール
光源 1	1.77	2.18	1.43
光源 2	11.09	10.49	14.02

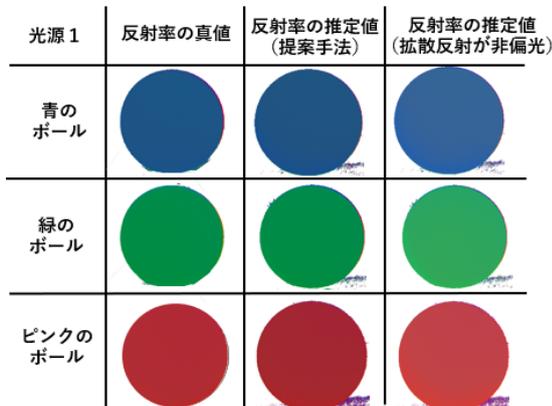


図 9: 拡散反射が非偏光の時の反射率との比較

表 4: 光源 1 における比較手法との反射率の比較

真値とのなす角 (°)	青のボール	緑のボール	ピンクのボール
提案手法	1.77	2.18	1.43
比較手法	5.58	6.02	6.78

散反射が部分偏光の仮定で推定を行う場合、より真値に近い結果が得られることが分かる。また、提案手法、比較手法でそれぞれ推定した反射率が色空間における真値とのなす角を表 4 に示す。定量的に見ても、提案手法の有効性を示した。

6. おわりに

本稿では、カラー偏光カメラを用いて、拡散反射が部分偏光であることを考慮した拡散・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、拡散反射と鏡面反射の偏光モデルと 2 色性反射モデルに基づいて、反射成分を分離する。提案手法を用いて、拡散反射と鏡面反射の色をそれぞれ推定し、評価を行った。様々な光源環境における各色の物体に対して撮影して分離を行うことによって、拡散反射・鏡面反射の分離結果の有効性も示した。

今後の課題として、光源の色と物体色が近い場合、偏光情報を手がかりとして、分離の精度を上げることが挙げられる。また、拡散反射が部分偏光であると仮定する際に、偏光を用いる法線推定などの研究への応用も今後の課題として挙げられる。

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. V. M. Kumar, R. Nishanth, N. Sani, A. J. Joseph and A. Martin : Specular Reflection Removal Using Morphological Filtering for Accurate Iris Recognition, 2019 International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSSS.2019.8882863.
- [2] F.Tong and B. V. Funt : Removing specularities from color images for shape from shading. In Computer Vision and Shape Recognition, pp. 273-290, 1989.
- [3] S. Nayar, X. Fang and T. Boult : Separation of Reflection Components Using Color and Polarization .In J. IJCV 2004, pp.163-186
- [4] S. Shafer : Using color to separate reflection components. Color Research & Application 10(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. In International Journal of Computer Vistion, Vol.17, No.3, pp.241-272, 1996.
- [6] L. Wolff and T. Boult : Constraining object features using a polarization reflectance model, IEEE Trans. PAMI 13(6), pp.167-189, 1991.
- [7] S. Lin and S.W. Lee : Detection of specularity using stereo in color and polarization space, Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition, pp. 263-267, 1996.
- [8] B. Lamond, P. Pieter, and D. Paul : Fast image-based separation of diffuse and specular reflections.” SIGGRAPH Sketches 6, 2007.
- [9] Z. Cui, J. Gu, B. Shi, P. Tan and J. Kautz : Polarimetric Multi-view Stereo. In Proc. IEEE CVPR2017, pp.1557-1567, 2017.
- [10] 栗田 哲平, “裏面照射型 4 方向 CMOS イメージセンサを利用したリアルタイム反射成分分離・応用信号処理技術”, SSII, 2018, 第 24 回画像センシングシンポジウム, IS1-34 SO1-IS1-34.
- [11] 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, Vol. 1, No. 1, 64-72 (2008)