

# 偏光面の回転方向を用いた金属物体の相互反射の除去

前田 涼汰<sup>1,a)</sup> 日浦 慎作<sup>1,b)</sup>

**概要:** シーンに入射する直線偏光の偏光面を回転させたときの反射光は、非偏光成分、偏光面が入射光と同じ方向に回転する成分、逆に回転する成分に分けられ、後2者は光がシーンで反射した回数に対応する。本研究ではこれらの成分にモデルを当てはめることで反射成分の分離を行う手法を提案する。この手法により、従来は扱うことが難しかった金属物体で発生する鏡面相互反射の分離を行うことができる。また、提案手法が鏡面相互反射が発生する金属物体の3次元計測の高精度化に応用できることを示す。

## 1. はじめに

実シーンでは、相互反射や表面下散乱などの多様な光学現象が重畳して観測され、これがシーンの解析を困難にしている。なぜなら多くの光学的解析手法では、どれか特定の成分のみを利用するからである。例えばアクティブステレオ法では、光が物体に入射した1点のみで反射する直接反射を仮定している。そのため、相互反射や表面下散乱が発生し、1点に入射した光が複数の点で観測されると、正しい計測ができない場合がある。このとき、反射成分の分離を行い、直接反射成分のみを取り出すことができれば頑健な計測ができるようになる。

これまで、反射成分の分離法が多数提案されてきた。Nayarらは高周波照明法によって、シーン中の直接成分と大域成分の分離を行なっている[1]。しかし、この方法では直接反射と鏡面相互反射を区別することはできない。なぜなら、鏡面相互反射の空間周波数特性は直接反射と大きな違いがないためである。また、O'Tooleらはエピポーラ拘束に基づいた反射成分の分離を行なっている[3][2]。しかしこの手法では、エピポーラ面内で発生する間接反射は直接反射と区別できない。

偏光は特定の反射成分の分離・除去に広く用いられている。Wolfら直線偏光を物体に入射したときに、拡散反射が非偏光となるのに対し鏡面反射は偏光することを利用して反射成分の分離を行なっている[5]。一方、金属物体で発生するような鏡面相互反射では、直線偏光を入射すると偏光面の角度が回転することが知られている。Wallaceらはこの性質を利用し、直接反射と鏡面相互反射を見分けることができることを示している[4]。しかし、偏光面の回転

角度は反射光の経路により異なる。そのため、物体の形状や配置によっては直接反射と鏡面相互反射の偏光面の角度が同じになり見分けられないことがある。また彼らの手法では、直接反射と鏡面相互反射が混合している場合の分離も不可能である。このように、従来の鏡面相互反射の分離法は効果が限定的であった。

本研究では静的な偏光状態を観測するのではなく、入射光の偏光面を回転させ、それに対する反射光の偏光面の回転方向を解析する。これにより、図1のように、反射光を非偏光成分、偏光面が正方向に回転する成分、逆方向に回転する成分の3つに分離する。偏光面が逆回転する成分は鏡面相互反射による反射光に限られるため、提案手法により金属の鏡面相互反射の分離を行うことができる。

## 2. 偏光面の回転方向を用いた反射成分の分離

### 2.1 反射光の偏光状態の変化

直線偏光の光を物体に入射したとき、物体の材質や幾何学的形状によって反射光の偏光状態が変化する。偏光の状態には円偏光や楕円偏光も存在するが、ここでは直線偏光のみを考え、入射光の偏光面を回転させたときの反射光を3種類に分類する。

まず、拡散反射や表面下散乱では光が物体内部に入り込み複数回反射するため、様々な方向に偏光した光が混ざり合う。これにより、図2(a)に示すように反射光は入射光の偏光面の角度に関係なくほぼ非偏光になる。

一方、鏡面反射では偏光がほぼ保たれる。このとき入射光の偏光面を回転させると、図2(b)に示すように反射光の偏光面は正回転方向に回転する。この現象は、界面での1回反射である限り、粗面であっても広く観測される。

鏡面反射が相互反射により繰り返された場合でも同様に、偏光はほぼ保たれるが、偏光面の回転方向に違いが生

<sup>1</sup> 兵庫県立大学

<sup>a)</sup> maeda.ryota.elerac@gmail.com

<sup>b)</sup> hiura@eng.u-hyogo.ac.jp

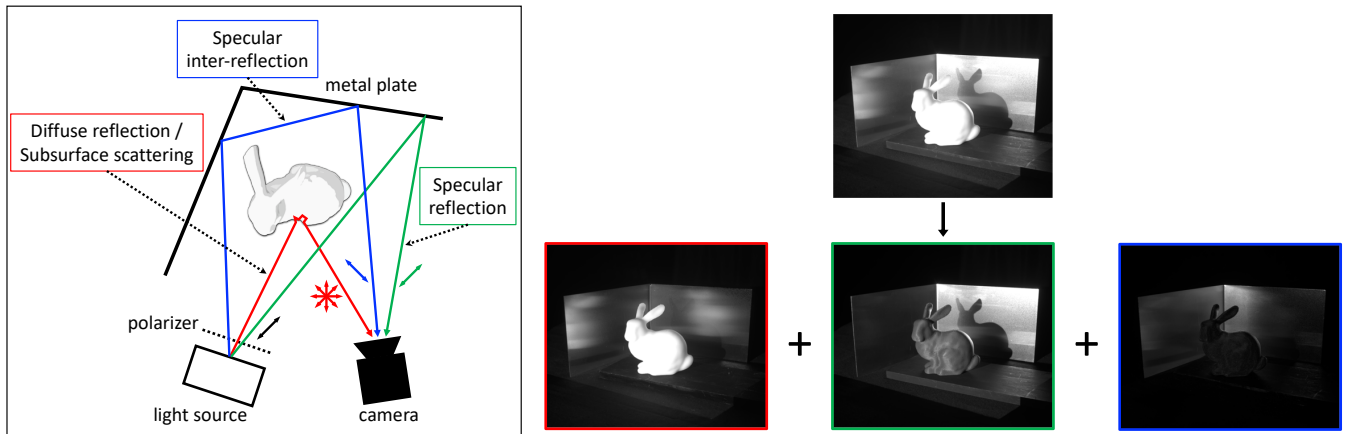


図 1: 入射光の偏光面を回転させ、それに対する反射光の偏光面の回転方向を解析することで、反射光を非偏光成分（赤枠）、偏光面が正方向に回転する成分（緑枠）、逆方向に回転する成分（青枠）の3つに分離する。この手法により、従来は扱うことが難しかった金属物体で発生する鏡面相互反射の分離を行うことができる。

じる。図 2(c) に示すように、2 回反射では入射光の偏光面を回転させると、反射光の偏光面は逆方向に回転する。最初の反射面から離れる光は、それを追う方向から見たときには偏光面が逆方向に回転しているためである。同様に 3 回以上の相互反射でも、偶数回の反射では偏光面が逆回転に、奇数回の反射では正回転となる。

## 2.2 偏光状態のモデル化

図 2 に示した 3 種類の反射成分は混ざって観測される。これらの反射成分を分離するため、それぞれの成分について、偏光板を介して観測される輝度のモデル化を行う。

カメラ側の偏光板の角度を  $v_c$ 、光源側の偏光板の角度を  $v_l$  とする。まず、図 2(a) の非偏光成分は光源・カメラの偏光板の向きに関係なく一定の値になるので、非偏光成分の輝度値  $I_U$  により次式のように表される。

$$I_{unpolarized}(v_c, v_l) = \frac{I_U}{2} \quad (1)$$

次に、図 2(b) の偏光面が正回転する成分を次式で表す。  $I_F$  は正回転成分の輝度値、  $\phi_F$  は機器や物体の配置に依存した位相成分である。

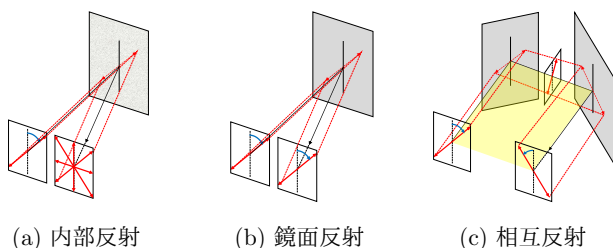


図 2: 入射光の偏光面の回転に対する反射光の偏光の変化。(a) 拡散反射や表面下散乱では反射光はほぼ非偏光となる。(b) 直接鏡面反射などの奇数回反射では、反射光の偏光面は入射光と同じ方向に回転する。(c) 鏡面相互反射など偶数回の反射では、反射光の偏光面は入射光と逆に回転する。

$$I_{forward}(v_c, v_l) = \frac{I_F}{2} \{ \cos(2v_c - 2v_l - 2\phi_F) + 1 \} \quad (2)$$

同様に、図 2(c) の逆回転成分を次式で表す。  $I_R$  は逆回転成分の輝度値、  $\phi_R$  は  $\phi_F$  と同様の位相成分である。

$$I_{reverse}(v_c, v_l) = \frac{I_R}{2} \{ \cos(2v_c + 2v_l - 2\phi_R) + 1 \} \quad (3)$$

カメラで観測される輝度は 3 つの成分の和で表される。

$$I(v_c, v_l) = I_{unpolarized} + I_{forward} + I_{reverse} \quad (4)$$

光源とカメラに備えられたそれぞれの偏光板の角度を変えながら観測した各点の輝度から、各成分のパラメータを求める。  $i$  番目の観測画像について、カメラ側の偏光板の角度を  $v_{c,i}$ 、光源側の偏光板の角度を  $v_{l,i}$  としたときの輝度を  $I_i$  とする。このとき、以下の最適化問題を解くことで、各反射成分のパラメータを求めることができる。

$$\min_{I_U, I_F, \phi_F, I_R, \phi_R} \sum_i^N \{ I_i - I(v_{c,i}, v_{l,i}) \}^2 \quad (5)$$

この式は変形することで線形最適化問題として解くことができる。

## 3. 実験と結果

計測には偏光カメラ（FLIR 製、BFS-U3-51S5P-C）を用いた。このカメラは各画素に 4 通りの偏光板を配置した偏光イメージセンサを搭載しており、ワンショットで  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の 4 つの偏光方向の画像を撮影できる。これによりカメラの前の偏光板を省略でき、また撮影時間も短縮出来る。光源にはプロジェクタ（EPSON 製、EB-W05）を用い、プロジェクタの前には出力光の偏光を解除するための  $1/2$  波長板と直線偏光板を順に配置した。提案手法と、比較対象となる通常画像を用いた計測結果のいずれについても、露光時間を変えた画像を複数枚撮影し HDR 合成を行った。実験は暗室環境で行なった。

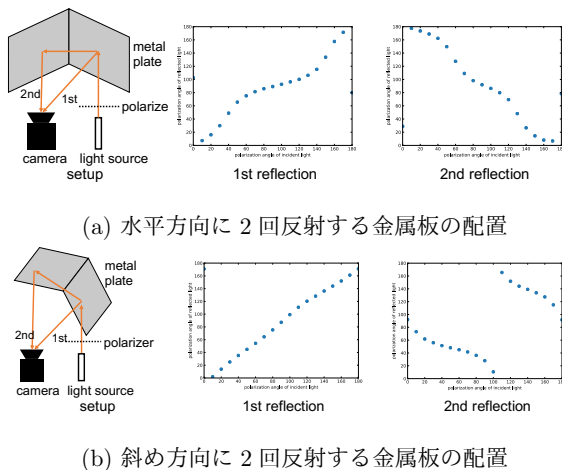


図 3: 入射光と反射光の偏光面の角度の関係

### 3.1 偏光面の回転方向の変化の検証

金属物体について、1 回反射と 2 回反射で偏光面の回転方向が異なることを検証する実験を行った。実験では、金属物体に入射する直線偏光の偏光面を回転させ、それに対する 1 回反射と 2 回反射の偏光面の角度をそれぞれ計測した。撮影対象は、相互反射が発生するように折り曲げた金属板（アルミニウム製）である。金属板は、図 3(a) のように水平方向に 2 回反射が発生する配置と、図 3(b) のように斜め（水平面から約  $45^\circ$ ）に 2 回反射が発生する配置でそれぞれ計測を行った。光源からは金属板の片側の面だけに光を照射しており、反対側の面には光が直接照射されないようにしている。これにより、各面ではほぼ 1 回反射と 2 回反射のみの光を計測できる。

横軸を入射光の偏光面の角度、縦軸を反射光の偏光面の角度とし、 $0^\circ$  から  $180^\circ$  の範囲でプロットした結果を図 3 に示す。いずれの場合でも、1 回反射の場合、入射光に対し反射光の偏光面の角度は単調増加し、また反射方向によらず位相ずれがないことが確認できる。

一方、2 回反射では、入射光に対し反射光の偏光面は逆回転していることが確認できる。また、水平方向に 2 回反射が発生する場合（図 3(a)）に対し、斜めに 2 回反射が生じる場合（図 3(b)）では約  $90^\circ$  だけ位相がずれている。これはシーンを回転させた角度の 2 倍に対応し、理論通りの結果である。

以上のように、1 回反射では常に入射光と反射光の偏光面の角度がほぼ同じになるのに対し、2 回反射では反射光と入射光の偏光面の角度は逆回転し、さらに反射の方向によって位相が変わる。よって、偏光面の回転方向を用いることで物体の配置に関わらず分離が可能となる。

### 3.2 反射成分の分離

本手法を用いて反射成分の分離ができることを実験によって確かめる。計測対象は折り曲げた金属板である。実験のセットアップを図 4(a) に示す。プロジェクタは金属

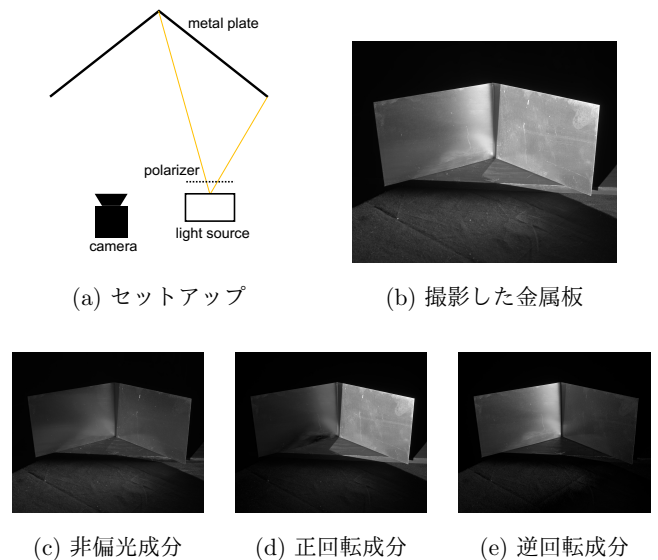


図 4: 反射成分の分離結果（金属板）

板の片方の面（右側）のみを照らすが、相互反射の影響で別の面（左側）も照らされる。カメラで撮影した通常の輝度画像を図 4(b) に示す。相互反射の影響により、直接照明されていない左側の面も明るくなっていることが確認できる。

反射成分の分離では、カメラと光源の偏光板の角度がそれぞれ  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の、計 16 通りの組み合わせで撮影を行なった。偏光カメラを用いているため、実際には光源側の偏光板を回転させるだけであり、画像の撮影枚数は通常撮影に対し 4 倍である。本手法を用いて反射成分の分離を行なった結果を図 4 に示す。

図 4(c) に示す非偏光成分には、拡散反射である床面やその影響と、多数回の反射によって偏光が保たれなくなった成分が含まれている。図 4(d) に示す正回転成分では、光源が直接照射している右側の金属面が特に明るくなっているため、主に直接反射の成分を取り出せていることがわかる。図 4(e) に示す逆回転成分では、光源が直接照射していない左側の面が特に明るくなっているため、主に鏡面相互反射の成分を取り出せていることがわかる。

図 5 は反射成分の分離を様々なシーンに対して適用した結果である。これらの実験では、シーン全体に光を照射している。図 5(a) では、凹面のボウルの平らな底に近い部分で直接鏡面反射が発生しており、ふちの部分で強い鏡面相互反射が発生している。図 5(b) は、金属板の前に拡散反射が主体の模型を置いたシーンに対する結果である。非偏光成分では、拡散反射物体である模型と、それが金属板に映り込んだ部分が明るくなっていることが確認できる。正回転成分には、金属板での直接反射成分や模型の表面での鏡面反射成分が主に含まれている。さらに相互反射成分が除去されることにより、金属板上の模型の影がはっきりとしている。逆回転成分では、金属同士の鏡面相互反射成分

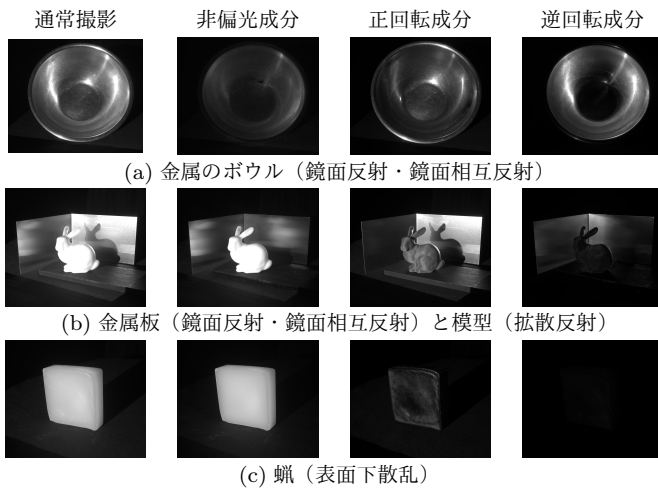
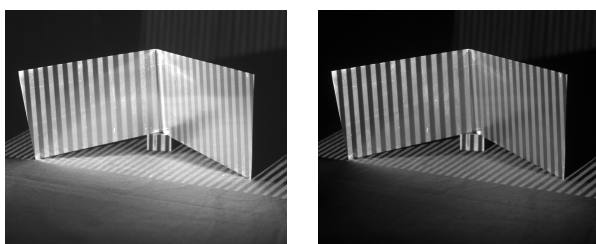


図 5: 反射成分の分離結果



(a) 通常撮影 (b) 正回転成分

図 6: 金属板に縞模様を投影した様子

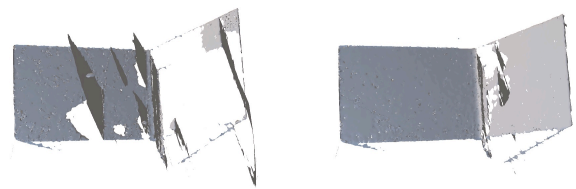
が含まれている。図 5(c) は、表面下散乱の成分が主体であるロウに対する結果である。反射光はほとんど非偏光成分で、正回転成分にはロウ表面の鏡面反射成分が含まれる。逆回転成分はほとんど存在しない。

### 3.3 鏡面相互反射が発生する金属物体の 3 次元計測

プロジェクタ・カメラによる 3 次元計測では相互反射の影響により、正しい計測ができない場合がある。特に、滑らかな金属物体では強い鏡面相互反射が発生するので計測が非常に難しい [4]。そこで、本手法により鏡面相互反射の除去を行い、3 次元計測を頑健化できることを実験によって示す。

図 6(a) は金属板に対して、プロジェクタで縞模様のパターンを投影した様子である。相互反射の影響により、縞模様が鮮明でない箇所がある。一方、図 6(b) は提案手法により正回転成分を取り出した画像である。この画像では、鏡面相互反射成分が抑制されることで縞模様が鮮明な領域が広がっていることがわかる。

プロジェクタからグレイコードを投影して 3 次元計測を行った結果を図 7 に示す。反射成分の分離を用いていない通常の撮影 (図 7(a)) では、相互反射の影響で多くの領域で誤りが生じている。これに対し、正回転成分の画像を用いた場合 (図 7(b)) では正しく形状が得られた領域が広がっている。金属板の平面上にある点の割合を調べると、通常



(a) 通常撮影 (54.6%) (b) 正回転成分 (92.8%)

図 7: 金属板の 3 次元計測結果. 括弧内は、正しく計測できた点の割合。

撮影の場合は 54.6% でおおよそ半分の領域しか正しく計測できていないのに対し、正回転成分を用いた場合は 92.8% となり、ほとんどの領域で正しい計測結果が得られた。

## 4. まとめ

本研究では偏光面の回転方向を用いた反射成分の分離手法を提案した。この手法を用いることで、従来は扱うことが難しかった金属の鏡面相互反射の分離を行うことができた。さらに本手法が、鏡面相互反射が発生するような金属物体の 3 次元計測に応用できることを示した。

偏光面の回転方向は奇数回反射か偶数回反射かによって決定される。そのため、3 回反射の偏光面は正回転となり、1 回反射と区別することができない。よって、例えば極めて平滑で反射率が高い面が向かい合った、合わせ鏡のような条件では利用できない。

本手法では、誘電体物質におけるフレネル反射のような、反射時の偏光の変化を無視してモデル化を行っている。よって特に、誘電体に浅く光が入射した場合にはその影響は無視できないと思われる。また今後の課題として、円偏光の成分を考慮した分離法に関する研究が挙げられる。

## 参考文献

- [1] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D. and Raskar, R.: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (2006).
- [2] O'Toole, M., Achar, S., Narasimhan, S. G. and Kutulakos, K. N.: Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 4 (2015).
- [3] O'Toole, M., Mather, J. and Kutulakos, K. N.: 3D shape and indirect appearance by structured light transport, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3246–3253 (2014).
- [4] Wallace, A. M., Liang, B., Trucco, E. and Clark, J.: Improving depth image acquisition using polarized light, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 32, No. 2, pp. 87–109 (1999).
- [5] Wolff, L. B. and Boult, T. E.: Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 7, pp. 635–657 (1991).