

# 偏光 Episcan による金属物体の相互反射の除去

前田 涼汰<sup>1,a)</sup> 山田 憲<sup>2,b)</sup> 久保 尋之<sup>2,c)</sup> 向川 康博<sup>2,d)</sup> 日浦 慎作<sup>1,e)</sup>

## 概要

光沢の強い金属を対象とする場合、一般なアクティブステレオ法では相互反射の影響を強く受けるため正しい 3 次元形状を得ることができない場合がある。相互反射を取り除く手法としてエビポーラ面内を伝搬する反射光だけを取得することができる Episcan[3] が提案されているが、エビポーラ面内で生じる相互反射を取り除くことはできない。一方、反射成分の分離に偏光が広く利用されているが[5]、金属面の相互反射は物体の配置により偏光方向が変化するという問題がある。そこで本研究では Episcan で取り除くことができないエビポーラ面内の相互反射を偏光を用いて除去することで、金属の 3 次元形状計測における相互反射に起因するエラーを抑制する手法を提案する。

## 1. はじめに

アクティブステレオ法では、プロジェクタから投影した光が物体表面に到達した点をカメラにより観測することで三角測量の原理により形状を求める。この手法を光沢の強い物体に適用したとき、相互反射により計測エラーが生じることがある。図 1 左に示すように、投影光が物体表面に直接到達した点（青点）よりもその相互反射光（赤線）の輝度のほうが高い場合、実際には物体が存在しない空中の点（赤点）が求められてしまう。図 1 右は実際の計測エラーの例である [6]。

相互反射を除去・抑制する方法として、間接反射成分の空間周波数特性を利用した反射成分分離法 [2] が提案されている。この原理を 3 次元計測に応用した例として、Micro Phase Shift 法 [1] では正弦波パターンの周期を細かくすることで相互反射の影響を抑制している。しかしこの方法では、鏡面仕上げのような光沢の強い物体の相互反射を除去することができない。なぜなら、鏡面相互反射の空間周波数特性は直接成分と大きな違いがないためである。

直接成分はエビポーラ拘束条件を満たすのに対し、間接成分は必ずしもそうではないことを利用した手法も提案されている。古瀬らは符号化した投影光と受光強度の相関を求めることで、エビポーラ拘束を満たさない成分を除去する手法を提案した [6]。この手法は投影パターン数が増加し計測に時間を要するという問題があったが、Episcan では走査型のプロジェクタと CMOS センサのローリングシャッタを同期させることでエビポーラ面内を伝搬する光のみを高速に取得でき、速度低下なしに金属物体の 3 次元形状を高精度に計測できることを示した [3]。しかし、必ずしも相互反射光はエビポーラ拘束に反するとは限らないことから、物体の形状や配置により効果が得られない部分が生じることがある。

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 [5]。二色性反射物体に直線偏光を入射すると拡散反射光はほぼ無偏光となることや、誘電体物質では面に対して斜めに入射した光の鏡面反射が偏光することはよく知られている。しかし、平滑面の金属反射はほとんど偏光度に影響を及ぼさないため、一般に偏光が応用されることは少ない。のちに述べるように金属反射の相互反射は偏光面が回転する性質を持つが、その回転角は物体の配置により変化するため、従来は利用することが難しかった。

そこで本論文では、エビポーラ拘束と金属面の相互反射における偏光現象を組み合わせた手法を提案する。この手法では、エビポーラ拘束を満たさない光路を経由する相互反射を Episcan により除去する。その上で残存するエビポーラ面内の相互反射成分は偏光面が逆回転することを利用し、プロジェクタとカメラの双方に直線偏光板を斜めに設置することにより除去する。実験により、この手法によ

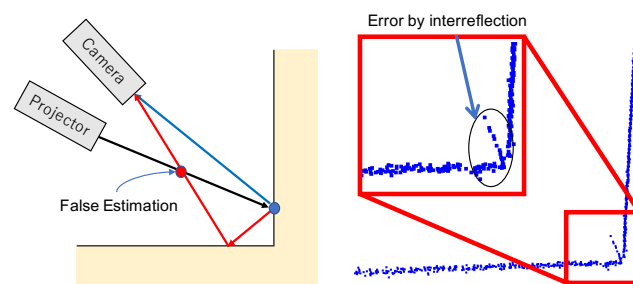


図 1: 相互反射による計測エラーの発生 [6]

<sup>1</sup> 兵庫県立大学

<sup>2</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

a) eo16a102@steng.u-hyogo.ac.jp

b) yamada.akira.xt7@is.naist.jp

c) hkubo@is.naist.jp

d) mukaigawa@is.naist.jp

e) hiura@eng.u-hyogo.ac.jp

り相互反射の影響を効果的に除去し計測精度を高めることができることを示す。

## 2. 相互反射の除去

この章ではまず、相互反射を幾何学的な性質により除去する Episcan について説明し、次に金属面の相互反射における偏光の振る舞いについて述べる。最後に、偏光と Episcan を組み合わせることで鏡面相互反射を除去する方法について述べる。

### 2.1 Episcan による相互反射の除去

Episcan はエピポーラ拘束を利用し相互反射を高速に除去することができる手法である [3]。レーザプロジェクタは MEMS によるスキャン機構により輝点を走査することで 2 次元像を投影する。また多くの CMOS センサでは各画素の露光タイミングがずれるローリングシャッタ現象を生じる。Episcan では、レーザプロジェクタの走査とローリングシャッタの露光ラインの位置とタイミングを一致させ (図 2)、エピポーラ面外からの伝搬光を除去する。これにより金属を対象にしたアクティブステレオ法でも計測精度が向上することが示されているが、文献 [3] の図 14 に示されているように、エピポーラ平面内で生じた相互反射を除去することはできない。

### 2.2 金属面における相互反射光の偏光

ガラスやプラスチック等の誘電体物質とは異なり、金属 (導体) は電場に対する固定端として働くため、一般に反射光の偏光はほとんど変化しない。よって図 3(a) に示すように、入射光の偏光面を時計回りに回転させたとき、反射光の偏光面も時計回りに回転する。しかし、同じ金属でも 2 回反射では観測される現象に違いが生じる。図 3(b) に示すように、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反時計回りに回転することになり、それが第 2 の反射を経て観測されたときにも反時計回りに偏光面が回転する [4]。よって、仮にすべての光線が図 3(b) に示す黄色の面のように同一平面上にあるとき、その面の法線に対する偏光角は符号が反転する。

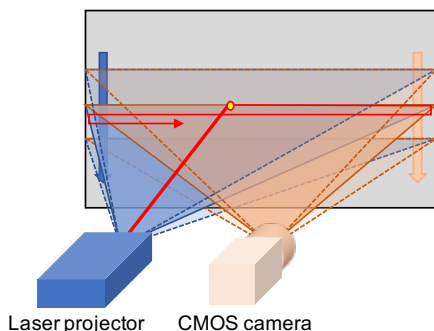


図 2: Episcan の原理

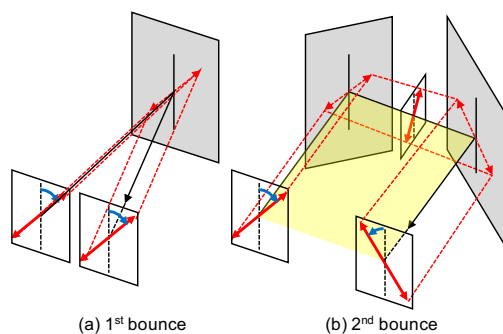


図 3: 反射回数と偏光面の回転の関係

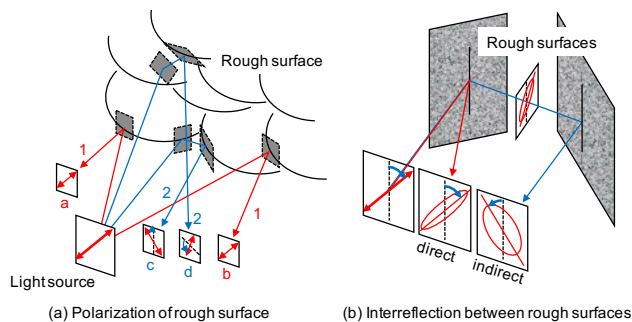


図 4: 金属粗面における反射光の偏光

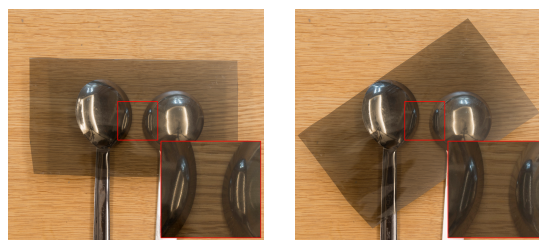


図 5: 偏光板による相互反射の除去

次に、金属粗面の反射について考える。物体表面の微小な凹凸による反射は、図 4(a) に示すように物体の凸部で生じる直接反射 a, b と、凹部で生じるミクロな相互反射 c, d に分けて考えることができる。直接反射は反射方向に関わらず偏光面が変化しないのに対し、相互反射は反射面の配置により偏光面が様々に変化する。これらの現象をマクロに観測すると、直線偏光成分に無偏光成分が加わり、結果として部分偏光になると考えられる。また、金属が鏡面である場合や相互反射が生じない程度に凹凸が浅い場合には直線偏光が保たれると考えられる。

最後に、金属粗面間の相互反射について考える。図 4(b) に示すように直接反射は部分偏光となるが、その偏光度は高い。それに対し相互反射はより偏光度が低下するとともに、楕円偏光の主軸は逆向きに回転する。

これらのことから、偏光板を相互反射方向に対し斜めに配置することで直接反射光を通過させつつ相互反射光を遮断することができる。実際の例を図 5 に示す。偏光板を斜めに配置したとき、相互反射光が暗くなっていることがわかる。

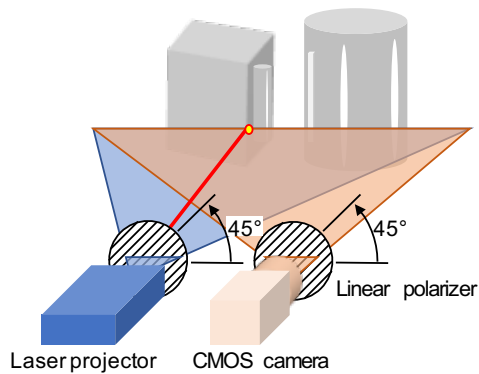


図 6: 偏光 Episcan の機器配置

### 2.3 偏光 Episcan

これまでに述べた性質を利用し、偏光と Episcan を組み合わせることで相互反射を除去する手法を提案する。図 6 に示すように、直線偏光板をプロジェクタとカメラの前にそれぞれ取り付け、双方をエピポーラ面に対し同じ方向に  $45^\circ$  傾けて設置する。これにより以下のような効果が期待できる。

- エピポーラ面外からの相互反射光は Episcan により除去される。
- エピポーラ面内の相互反射は偏光角が  $90^\circ$  回転するため、カメラ側の直線偏光板に遮断される。この効果は反射面が鏡面に近いときに効果的であると考えられる。
- 金属粗面を介する相互反射光は直接反射光に比べ偏光度が低下しているため、カメラ側の直線偏光板を通過する強度が相対的に小さくなる。この効果は粗面の凹凸が深いほど効果的であると考えられる。

以上のことから、計測対象である金属表面の粗さに関わらず相互反射の強度を低下させる効果が期待できる。

### 3. 実験

偏光 Episcan によって相互反射が除去できることを実験によって確かめる。実験では、カメラは IDS 製の UI-3240CP-C-HQ、レンズは KOWA 製の LMVZ4411 を使用し、レーザプロジェクタは SONY の MP-CL1A を用いた。プロジェクタとカメラのレンズの前にはそれぞれ直線偏光板を取り付けた。実験の様子を図 7 に示す。偏光板はシーンの直接反射の成分が最大になり、相互反射の成分が最小になるように回転させて偏光角を決定した。このとき 2 枚の偏光板は同じ偏光方向になり、その向きは斜めになった。撮影では、通常の撮影、偏光板を取り付けての撮影、Episcan によるエピポーラ面内を伝搬する光の撮影、Episcan と偏光板を組み合わせた撮影の 4 通りを行った。アクティブステレオ法の計測手段には時系列コード化法を用い、プロジェクタから投影するパターンはグレイコードパターン 11 枚とそれらを反転させた 11 枚の計 22 枚を 1 セットとした。撮影結果からデコード画像を生成する。デ

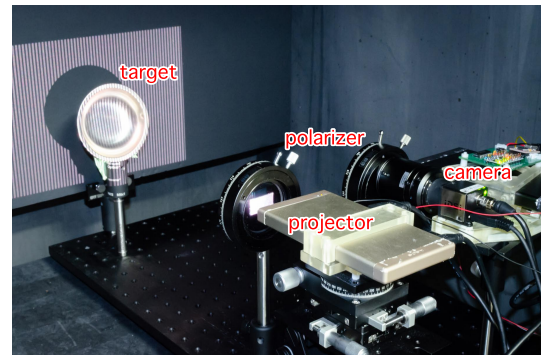


図 7: 実験の様子

コード画像はカメラの画像中の位置とプロジェクタとの対応点を表しており、本研究では輝度ないしカラーマップで表すことにより可視化している。

### 4. 結果

図 8 に金属の皿を測定した結果を示す。図 8(a) に示す皿の内側の凹んだ部分で相互反射が発生する。図 8(b) はカメラで撮影されたシーンの画像であり、この画像では Episcan や偏光板による相互反射の除去を行っていない。図 8(c) は皿で相互反射が発生しなかった場合に想定されるデコード結果のイメージ図である。通常のグレイコード法 (図 8(d)) では皿の内側に発生した相互反射の影響により誤ったコード値が得られた領域が円環状に分布している。偏光板のみを用いた撮影 (図 8(e)) でも同じように相互反射の影響を受けていることが確認できる。それらに対し、Episcan で計測した結果 (図 8(f)) では多くの相互反射の影響が取り除かれていることが確認できる。ただし、エピポーラ平面上で発生した相互反射の影響は取り除けていない。Episcan と偏光板を組み合わせて撮影した結果 (図 8(g)) では、Episcan では取り除けなかった相互反射が除去されて誤ったコード値が得られた領域が小さくなっていることが確認できる。このことから、Episcan と偏光板を併用する手法は金属の相互反射を抑制するのに有効であることがわかる。

次に、偏光板の角度を変化させた場合の比較実験を図 9 に示す。この実験ではプロジェクタとカメラの間隔を図 8 の実験よりも広げており、結果として相互反射の影響がより強く現れている。エラーとなった領域のコード値を調べたところ、図 9(b) の領域 A と B はコード値が互いに入れ替わったような関係となっており、反射回数が 2 回の相互反射によるエラーと考えられる。またこの領域については、偏光面を水平に設置した場合 (図 9(a)) に比べ、斜めに設置した場合 (図 9(a)) のほうが小さくなっている。しかし、図 9(b) の領域 C のコード値は対象物体の中央付近と同じコード値であり、偏光板を斜め設置した場合でも除去ができていないことから、3 回以上の反射など、本論文で想定する鏡面相互反射に該当しない光による影響によるも



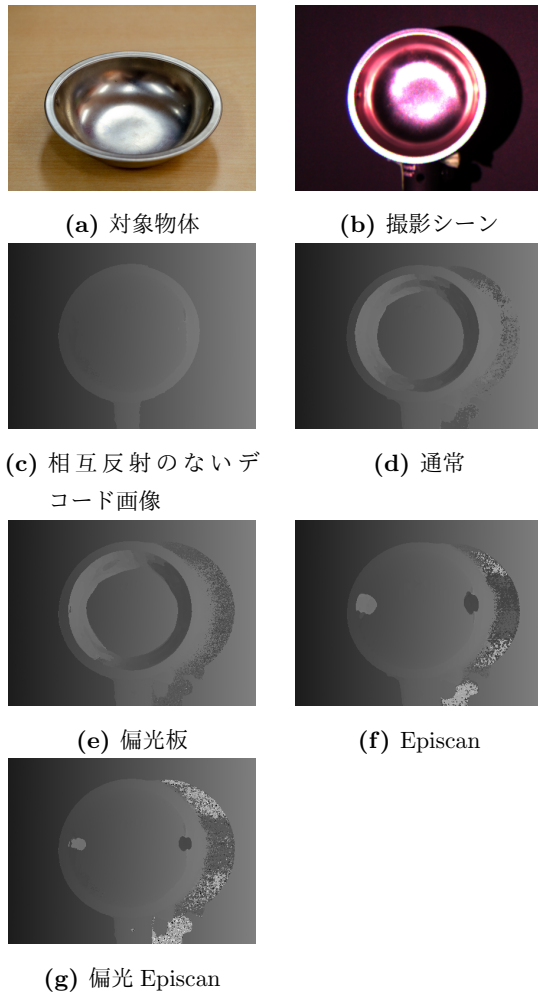


図 8: デコード画像の測定結果

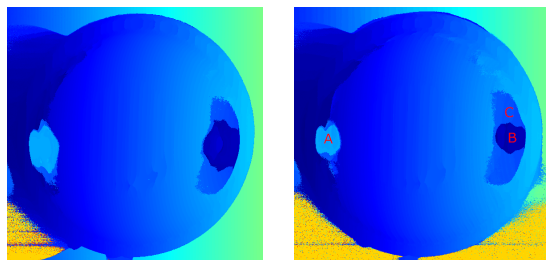


図 9: 偏光板の角度に関する比較実験結果

のではないかと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では相互反射の発生により 3 次元計測が困難な金属物体に対し、撮影枚数を増やすことなく相互反射を抑制して撮影できる手法を提案し、実験によりその有用性を示した。Episcan では困難であったエピソード平面上での相互反射を、偏光を用いることにより抑制することができた。しかし、本手法を用いても完全に相互反射を除去することはできなかった。この原因として 3 回以上の反射による相互反射や、部分偏光による影響、偏光板の挿入に伴う

輝度低下に起因するダイナミックレンジの低下等が考えられる。

## 参考文献

- [1] Gupta, M. and Nayar, S.: Micro Phase Shifting, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1–8 (2012).
- [2] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. and Raskar, R.: Fast Separation of Direct and Global Components of a Scene Using High Frequency Illumination, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 935–944 (2006).
- [3] O’Toole, M., Achar, S., Narasimhan, S. G. and Kutulakos, K. N.: Homogeneous Codes for Energy-efficient Illumination and Imaging, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 4, p. 35 (2015).
- [4] Peiponen, K.-E., Zeitler, A. and Kuwata-Gonokami, M.: Terahertz Spectroscopy and Imaging, *Springer* (2012).
- [5] 宮崎大輔：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, pp. 64–72 (2008).
- [6] 古瀬達彦，日浦慎作，佐藤宏介：スリット光の変調による相互反射と表面下散乱に頑健な三次元形状計測，計測自動制御学会論文集， Vol. 46, No. 10, pp. 589–597 (2010).