

影を考慮した偏光と陰に基づくワンショット法線推定 Surface Normal from Polarization and Shadow

吉田 百花* 川原 僚† 岡部 孝弘†

Momoka Yoshida Ryo Kawahara Takahiro Okabe

1 はじめに

コンピュータビジョン分野において、被写体の形状復元は重要な課題である。形状復元の代表的な手法として深度推定と法線推定が挙げられるが、法線推定は、ステレオビジョン [1] や多視点ステレオ [2] 等の深度推定とは異なり表面の細かな傷等の詳細な表面形状を復元できる。応用例として、工業製品の外観検査や文化財の保存・調査等が挙げられる。

偏光に基づく形状復元は、偏光状態に基づいて物体の表面法線を推定する手法である。偏光解析で得られる法線は、天頂角が一意に決定されるのに対して、方位角には 180° の不定性が存在する。従来手法 [7] ではこの不定性を解決するために、被写体の形状が滑らかかつ凸物体であることを仮定している。

本手法では、偏光解析による方位角の不定性を観察される陰に基づいて解決する。カゲには、法線と光源方向のなす角が鈍角であるときに生じる陰 (attached shadow) と別の物体や面によって落とされる影 (cast shadow) の 2 種類が存在する。陰では、法線と光源方向のなす角は鈍角となることから、光源方向が既知のとき、陰は形状の情報を持つ。したがって、観測される陰の整合性に基づいて法線候補を選択することで、方位角の不定性を解消し、画素毎の法線を一意に決定する。

影は陰と同様に反射光が観測されないため、判別ができないという問題がある。本手法では、異なる方向から照らす 2 光源を用いることで、影が発生する領域を判別する。影が発生する部分については、belief propagation を用いることで近傍の形状情報から法線を選択する。

さらに、本手法はワンショットのカラー偏光画像を用いて法線推定を行う。具体的には、RGB3 色かつ異なる方向の 3 光源を同時に照射した被写体をカラー偏光カメラで撮影し、各バンドに独立に捉えることにより、ワンショットでの法線推定を実現する。本手法では、偏光解析のために視線方向から G 光源で被写体の全ての画素を照らし、残りの R, B 光源はカゲの観察のために用いる。陰と影は 1 光源での判別が困難であるが、2 光源を異なる方向から照らした際の観測輝度から、影ができる領域を判別することでこの問題を解決する。

本研究の主要な貢献は 3 つある。一つ目は、偏光に基づく法線推定の不定性を、陰に基づいて解決できることを示したことである。二つ目は、RGB3 色の 3 つの光源とカラー偏光カメラを用いることで、ワンショットの法線推定を実現したことである。これにより、動的シーンへの応用が可能となった。三つ目は影を考慮している点である。影を考慮することによって、従来手法 [7] では被写体が凸物体であることを仮定していたが、その制約が緩和された。

* 九州工業大学 Kyushu Institute of Technology

† 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 Kyushu Institute of Technology

2 関連研究

法線推定手法として、光源方向の異なる複数の光源下で撮影されたシーンの画像から反射光の明るさに基づいて法線を推定する照度差ステレオ [3][4] や偏光に基づく形状復元 [5][6][7][8]、陰に基づく形状復元 [9] 等が挙げられる。さらに、照度差ステレオをワンショットで行うための手法の 1 つとして、マルチスペクトル照度差ステレオ [10] が提案されている。

偏光に基づく形状復元は、偏光情報に基づいて被写体の表面法線を復元する手法である。偏光に基づく形状復元のワンショットの手法は、法線候補が 2 つ存在するために、方位角に不定性が存在する。Huynh ら [7] はワンショットの偏光マルチスペクトル画像を用いて被写体の法線と屈折率を同時推定する手法を提案しているが、方位角の不定性を解くために、被写体の形状が滑らかかつ凸物体であることを仮定する。Smith ら [8] は不定性によらない拘束条件を用いてデプス推定の枠組みで形状復元を行っている。Smith らは、被写体の形状が滑らかであることを仮定しているが、本手法では、影に基づく不定性解消を行う画素においては、方位角の滑らかさを仮定している。

また、Kriegman ら [9] は陰に基づく形状復元を提案している。陰に基づく形状復元は、陰境界における法線方向と光源方向の関係から法線を求める手法である。この手法では、陰の境界を光源毎に求め、複数光源の陰境界の交点において光源方向と法線が直交することから法線を導出する。Kriegman らの手法において、法線推定を行うことができるのは、陰境界の交点のみであり、法線を密に求めることはできない。一方で、本手法は画素毎に求めた法線の不定性を解決するために陰を用いるため、密な法線推定が可能である。

Guo ら [10] はワンショットの照度差ステレオの手法の 1 つとしてマルチスペクトル照度差ステレオを提案している。異なる波長の複数光源を異なる方向から同時に照射した被写体をマルチスペクトルカメラで撮影することで、法線推定をワンショットで行う。この手法では、テクスチャに起因する不定性を解くために、被写体の画素間の色度を共有している。一方で、本手法では、被写体の色度に関する仮定なく、画素毎に独立に推定を行っている。したがって、テクスチャのある被写体に対し、色度のクラスタリング等を用いることなく法線推定が可能である。

3 提案手法

本研究では、偏光と陰に基づいて、単一のカラー偏光画像から被写体の法線を推定する手法を提案する。また、影も考慮する。本手法では、RGB3 色かつ異なる方向の 3 光源を同時に照射した被写体をカラー偏光カメラで撮影することで、異なる方向の光源に照らされた被写体をカメラの RGB3 バンドで独立に捉えることにより、ワンショットの法線推定を実現する。カラー偏光カメラ

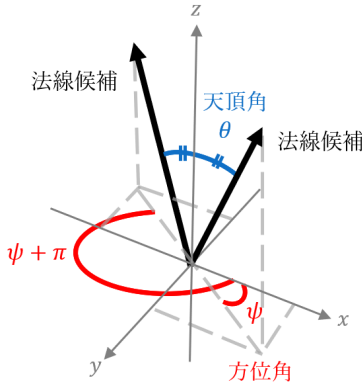


図 1: 法線の不定性

は RGB の色情報と $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の偏光情報をワンショットで取得する。また、本手法では、被写体の屈折率 η が既知であることを仮定する。

3.1 法線候補の推定

表面法線 \mathbf{n} は天頂角 θ と方位角 ϕ を用いて、

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される。ここで、天頂角は z 軸から法線に向かう角度、方位角は xy 平面における法線の角度のことを指す。方位角の 2 つの解と天頂角を偏光解析によって推定し、方位角は対象画素が陰になっている光源に基づいて解の選択を行うことで法線を一意に求める。

入射光は被写体表面で反射もしくは透過（屈折）する。拡散反射光の偏光状態は強度透過率に依存し、フレネル透過率から天頂角を導出することができる。偏光カメラで取得できる 4 つの偏光成分から、連続的に回転させた偏光板を通して観察できる最大輝度 I_{max} 、最小輝度 I_{min} が求まることから、入射光の反射と透過の割合であるフレネル透過率 [7] を決定することができる。フレネル透過率 r^2 は最大輝度 I_{max} 、最小輝度 I_{min} を用いて、

$$r^2 = \frac{I_{min}}{I_{max}} \quad (2)$$

と表される。被写体を十分な明るさで照らしているとき、被写体の屈折率 η とフレネル透過率を用いて、天頂角 θ は、

$$\theta = \arcsin \frac{\eta \sqrt{1-r^2}}{\sqrt{\eta^2 - 2r\eta + 1}} \quad (3)$$

と表される。

法線は反射面上に乗ることから、方位角は反射角度と同一角度を取る。偏光板の角度と反射角度が同じ、もしくは正反対の 180° 異なるとき、最大輝度 I_{max} をとる。偏光解析による方位角 ϕ は、最大輝度が観測される偏光板の角度である位相角を ψ としたとき、 $\phi = \psi, \psi + 180^\circ$ となることが知られている。したがって、図 1 で示すように、偏光解析による法線は、天頂角が一意に決定されるのに対して、方位角には 180° の不定性が存在する。

この方位角の不定性を陰に基づいて解消する。観測輝度は光源方向と法線の内積に依存し、照らされている画

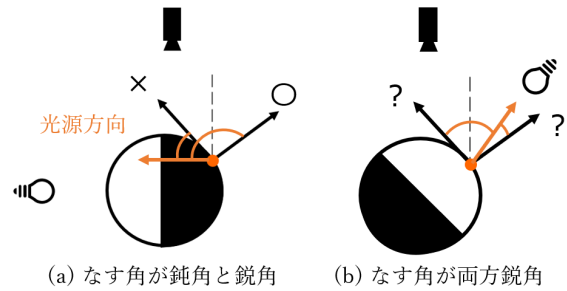


図 2: 光源方向と法線選択の関係

素での光源方向と法線の内積と観測輝度はともに正である。また、陰となっている画素での内積は負であるため、観測輝度は 0 となる。光源方向と法線候補の内積を取り、観測輝度と整合性のある法線候補を選択することで、法線の方位角に関する 180° の不定性を解消する。

3.2 光源方向の選択

偏光解析により法線候補を求めるためには、すべての画素を照らす必要があるため、G 光源を視線方向から照射することによって、カメラから観察できる被写体表面の方位角の 2 つの解と天頂角を推定する。また、影を考慮した陰に基づく不定性解消のために、R、B 光源を用いる。

図 2 に光源方向と法線選択の関係を示す。図 2 (a) は光源方向と法線候補のなす角が片方は鋭角、もう一方は鈍角となっており、図 2 (b) ではなす角がともに鋭角となっている。陰に基づく不定性解消では、2 つの法線候補と光源方向の内積の正負が一致する光源方向（図 2 (b)）であるとき、その画素について不定性を解くことができない。法線の範囲は光源方向に依存し、図 2 (a) のように法線候補と光源方向のなす角が一方は鋭角、もう一方は鈍角となる必要がある。また、入力画像の陰の境界付近では、陰があいまいであるために判定が困難であるため、法線と光源方向の間の角度 α を用いた $|\cos \alpha|$ を信頼度 s として導入する。

図 3 に光源方向に依存する画素毎の信頼度を示す。このとき、 $\cos \alpha$ が 0 となる部分が陰の境界である。図 3 (a) の光源方向と z 軸中心に 180° 回転した光源方向のどちらでも照らされるもしくは照らされない画素は、2 つの法線候補と光源方向のなす角が両方鋭角もしくは鈍角となり不定性が残るため、信頼度を 0 とする。

影を考慮した不定性解消を行う際、対象画素が影のとき、上述の方法を用いて判別できないため、陰と影の判別を行う必要がある。しかし、陰は観測輝度が両方 0 であるために、観測輝度で陰と影を判別することはできない。そこで、R と B 光源を、図 4 のように天頂角 90° かつ 2 光源が z 軸中心に 180° 異なる光源方向で照射する。このとき、どちらの光源でも照らされていない画素については、少なくとも一方の光源で影であることが分かる。このとき、陰に基づく不定性解消を行うことはできないため、belief propagation で不定性を解消する。また、信頼度が低い画素についても belief propagation で不定性を解消する。

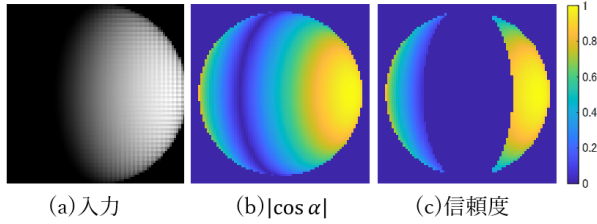


図3: 光源方向による信頼度

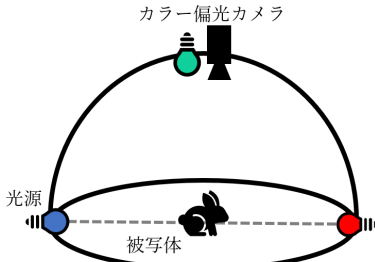


図4: 実験装置

3.3 低信頼度領域・影領域の不定性の解決

本稿では、陰に基づいて方位角を決定できなかった画素に関して、方位角の滑らかさを仮定し、

$$E(\phi) = \sum_{p \in P} \sum_{q \in N_p} C_s(p, \phi_p, \phi_q) + \sum_{p \in P} C_d(p, \phi_p) \quad (4)$$

のエネルギーを最小化する方位角の集合 ϕ を考える。ここで、エネルギー最小化を行う対象の全ての画素を P 、全画素の方位角の集合を ϕ とする。方位角の解の候補は位相角 η か、 $\eta + \pi$ の2つである。また、ある画素 p の4近傍の画素を $q \in N_p$ 、平滑化コストを $C_s(p, \phi_p, \phi_q)$ 、データコストを $C_d(p, \phi_p)$ とする。また、平滑化コスト $C_s(p, \phi_p, \phi_q)$ には、近傍の画素の方位角との相違度を用いる。ここで、平滑化コスト C_s は、方位角 ϕ_p を用いて表されるベクトル $\mathbf{v}_p = (\sin \phi_p, \cos \phi_p)^T$ を用いて、

$$C_s(p, \phi_p, \phi_q) = 1 - \frac{\mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_q + 1}{2} \quad (5)$$

と表される。

式(4)で示したエネルギー関数を belief propagation で最小化する。具体的にはエネルギー関数 $E(\phi)$ をポテンシャル関数に入れて最大化する ϕ を選択する。データコスト C_d と平滑化コスト C_s をそれぞれポテンシャル関数に入れた belief B_d, B_s は

$$B_d(p, \phi_p) = \exp(-C_d(p, \phi_p)) \quad (6)$$

$$B_s(p, \phi_p, \phi_q) = \exp(-C_s(p, \phi_p, \phi_q)) \quad (7)$$

となる。したがって、次のようなメッセージ関数を用いて belief を伝播することにより、解の選択が可能となる。

$$m_{p \rightarrow q}(\phi_q) = \sum_{\phi_p \in \{\eta, \eta + \pi\}} B_d(p, \phi_p) \times B_s(p, \phi_p, \phi_q) \prod_{k \in N_p \setminus q} m_{k \rightarrow q}(\phi_k, \phi_q) \quad (8)$$

表1: 推定結果の角度誤差平均

入力	被写体	提案手法 (°)	比較手法 [8](°)
合成画像	球	0.0023	56.98
	Stanford Bunny	0.65	30.73
実画像	球	9.53	22.50

4 実験

本稿では、図4の光源方向から照射した被写体における法線推定を行った。合成画像実験では、球と Stanford Bunny、実画像実験では、球、陶器、サメの置物の法線を推定した。また、合成画像実験、実画像実験ともに手法[8]との定性的な比較を行った。さらに、合成画像の球、Stanford Bunny と実画像の球において、真値との比較も行った。

4.1 法線推定

図5に実験結果を示す。合成画像、実画像ともに RGB3 光源を異なる方向から同時点灯した画像を用いた。各光源は図4の方向で設置し、G光源は偏光解析、RとB光源は影を考慮した陰に基づく不定性解消に使用した。本稿では、陰に基づく不定性解消は信頼度 s が0.4以上のときのみ行い、図5の不定性で示した黄色の領域については3.3節で示した belief propagation で不定性を解消した。また、比較のために、Smithらの手法[8]を用いて同じ被写体の形状復元を行った。Smithらの手法では、モノクロ偏光画像を入力とするため、図5の入力のGバンドのみを用いた。

図5(a)に合成画像を用いた法線推定結果を示す。図5(a)の推定結果と角度誤差より、合成画像実験による推定結果は定性的に良好であることが分かる。また、比較手法[8]より、定性的に良好な結果が得られていることが確認できる。

図5(b)に実画像を用いた法線推定結果を示す。図5(b)の入力は、モノクロ偏光カメラを用いて、RGB3光源の下で順に撮影した3枚の画像を組み合わせたものである。また、本手法において、鏡面反射は考慮していないため、入力画像の鏡面反射部分はマスクで取り除いて推定を行った。図5(b)の推定結果と角度誤差より、定性的に良好な結果を得られていることが分かる。陶器のような面や角のある物体の形状を正しく復元できている。さらに、サメの置物のように、テクスチャや色に関する制約を用いることなく、形状を復元できている。また、比較手法[8]より、定性的に良好な結果が得られていることが確認できる。

提案手法の角度誤差の平均を表2に示す。合成画像の角度誤差平均はどちらも1°以下となっており、定量的に良好な結果が得られていることが分かる。実画像の角度誤差平均は10°以内に収まっており、改善の余地はあるものの、概ね良好な結果である。また、表1より、合成画像実験、実画像実験ともに、比較手法[8]より定量的に良好な結果を得られていることが分かる。

5 むすび

本稿では、偏光と陰に基づいたワンショットの法線推定手法を提案した。具体的には、偏光から推定される2つの法線候補と観察される陰の整合性に基づいて、画素

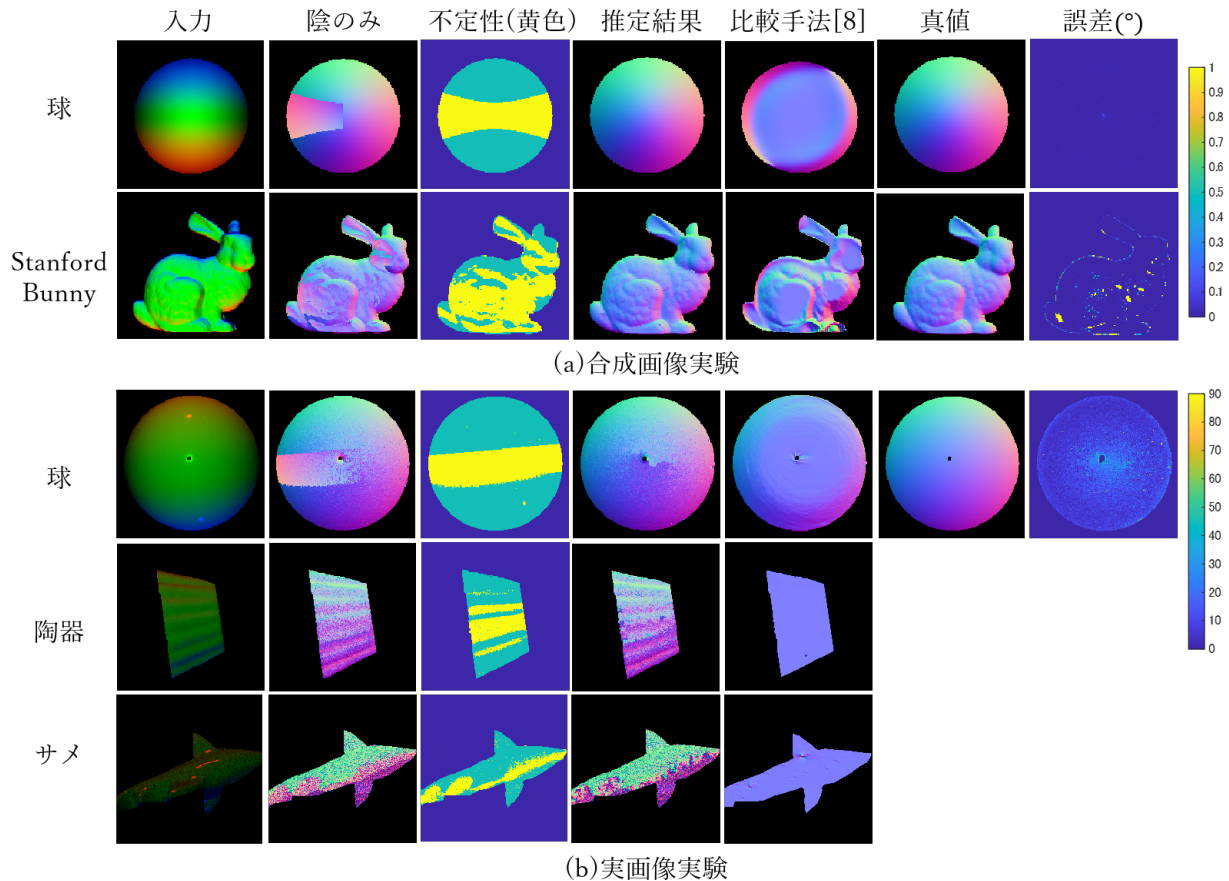


図 5: 推定結果

ごとの法線を一意に決定した。また、提案手法における光源の最適化も行った。今後は、実画像を用いた法線推定の精度向上や、鏡面反射を考慮した拡張も考えたい。

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] M. Ashdown and Y. Sato, "Steerable Projector Calibration", CVPR2005, pp. 98, 2005.
- [2] S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein and R. Szeliski, "A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms", Proc. CVPR2006, pp. 519-528, 2006.
- [3] R. J. Woodham, "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images", Optical Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 139-144, 1980.
- [4] H. S. Chung and J. Jia, "Efficient Photometric Stereo on Glossy Surfaces with Wide Specular Lobes", In Proc. CVPR2008, 2008.
- [5] G. Atkinson, E. Hancock, "Polarization-based surface reconstruction via patch matching", Proc. CVPR2006, pp.495-503, 2006.
- [6] J. Riviere, I. Reshetouski, L. Filipi and A. Ghosh, "Polarization imaging reflectometry in the wild", ACM Transactions on Graphics(36), pp.1-pp.14, 2017.
- [7] C. Huynh, A. Robles-Kelly, and E. Hancock, "Shape and Refractive Index from Single-View Spectro-Polarimetric Images", IJCV, 101(1), pp.64-94, 2013.
- [8] W. A. P.Smith, R.Ramamoorthi and S.Tozza, "Linear Depth Estimation from an Uncalibrated, Monocular Polarisation Image", ECCV2016, pp.109-125, 2016.
- [9] D. Kriegman and P. Belhumeur, "What shadows reveal about object structure", In Proc. ECCV1997 (LNCS1407), pp.399-414, 1997.
- [10] H. Guo, F. Okura, B. Shi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa and Y. Matsushita, "Multispectral Photometric Stereo for Spatially-Varying Spectral Reflectances: A well posed problem?", In Proc. IEEE/CVF CVPR2021, pp.963-971, 2021.