

偏光と陰に基づくワンショット法線推定

吉田 百花 川原 僚 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

コンピュータビジョン分野において、被写体の立体形状である3次元形状の復元は重要な課題である。特に表面法線として被写体の3次元形状を復元する手法は、深度としての復元とは異なり詳細な表面形状を復元することができるため、工業製品の外観検査等に利用できる。さらにワンショットでの形状復元は動的シーンでの応用にも役立つ。

偏光に基づく形状復元 (Shape from Polarization: SfP) は、反射光の偏光解析によって物体表面の法線方向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。Huynh ら [1] は SfP の手法として、ワンショットの偏光マルチスペクトル画像を用いた3次元形状と屈折率の同時推定手法を提案している。方位角の不定性を解くために、Huynh らは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。

形状復元の手法として陰を用いた手法も存在する。カゲには2種類が存在し、それは、被写体を光源で照らしたとき、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) である。Kriegman ら [2] は陰に基づいて法線を推定する手法を示している。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。しかし、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。

本稿では、偏光と陰に基づくワンショット法線推定を提案する。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、画素ごとの法線を一意に決定する。また、本手法における不定性の解決のために光源方向の最適化も行う。ワンショットの偏光解析による方位角の不定性を陰によって解決することで、物体形状に関する滑らかさなどの制約を課すことなく、一意かつ密に法線を推定することを目指す。

2 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。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、異なる方向の光源で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

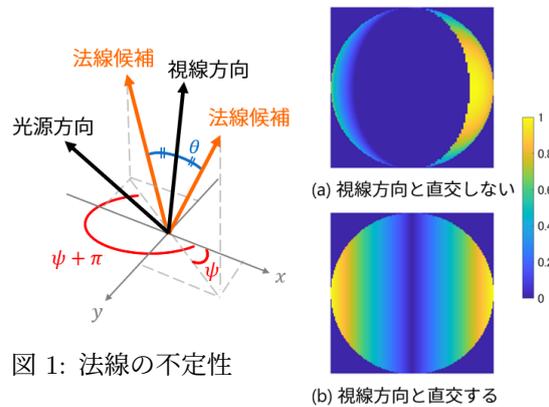


図 1: 法線の不定性

図 2: 1光源による信頼度

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、被写体の屈折率が既知であることと、理想的な拡散反射モデルであるランバートモデルを仮定する。

2.1 法線推定

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。方位角の2つの解候補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。

天頂角を偏光情報から一意に推定する。4つの偏光成分から入射光の反射と透過の割合であるフレネル透過率 r^2 が求められる。また、被写体の反射光の明るさは入射角に依存する。被写体において、十分な明るさで照らされていてかつ鏡面反射が含まれていないとき、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、

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

と表される。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、 $\phi = \psi, \psi \pm \pi$ 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、照らされている部分での光源方向と法線の内積は正である。また、陰部分での内積は負であるため、観測輝度は0となる。光源

表 1: 推定結果の角度誤差

被写体	角度誤差平均 (°)
球 (合成画像)	0.19
bunny(合成画像)	0.12
球 (実画像)	7.55
陶器 (実画像)	13.64

方向と法線の内積を取り、観測輝度と整合性のある法線を選択することで、法線の方位角に関する 180° の不定性を解消する。

2.2 光源方向の最適化

本手法における光源方向の最適化を考える。偏光解析ではすべての画素を照らす必要があるため、視線方向から被写体を照らす光源によって、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。そのため、本稿では残りの 2 つの光源方向の最適化を行う。

ある画素について、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では不定性を解くことができない。さらに、入力画像の陰の境界付近では、陰の正確な判定が困難である。そのため、法線と光源方向の間の角度 α を用いた $\cos \alpha$ の絶対値を信頼度として導入する。このとき、 $\cos \alpha$ が 0 となる部分が陰の境界である。また、光源毎で推定を行った際に不定性が残る部分では、信頼度を 0 とする。被写体を球と仮定して最適化を行い、最適化のための評価関数として、信頼度の平均を用いる。

光源方向により不定性が残る部分が異なるため、2 光源で不定性を解消する際に、信頼度の最大値の平均が高くなるような光源方向を選択する。

3 実験

3.1 光源方向の最適化

光源の天頂角、方位角を 1° 刻みにしたときの球の合成画像を作成し、信頼度平均が高くなるような光源を探することで、光源の最適化を行った。

最適化の結果を図 2 に示す。1 光源での推定で残る不定性部分は、その光源と方位角が 180° 回転した光源の両方に照らされるまたは陰となる部分である。1 光源の最適化では、不定性の残る領域が最小となる光源方向を選択する。最適化により、不定性領域が最小となる光源は、図 2(b) のように視線方向と直交する向きとなった。

2 光源の最適化において、3 光源が直交する 2 つの光源を選択したとき、信頼度平均が最も高くなった。2 光源で方位角の不定性解消を行うとき、光源毎に $\cos \alpha$ の絶対値を求め、画素毎の最大値を信頼度として扱う。そのため、2 光源が直交しているかつそれぞれが視線方向と直交するとき最も信頼度平均が高くなる。

3.2 法線推定

図 3 に合成画像での法線推定結果を示す。RGB3 光源を異なる方向から同時点灯した被写体の合成画像 (図 3 の入力画像) を入力としている。ここで光

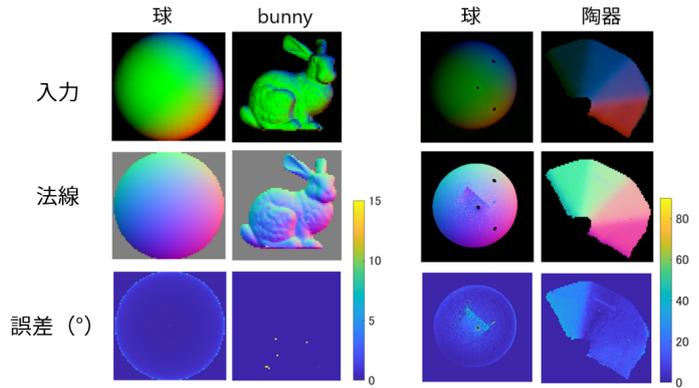


図 3: 合成画像実験

図 4: 実画像実験

源方向は、G は偏光解析のために視線方向と同じ正面から、R と B は陰による不定性の解消のために、3 光源が直交するような方向から照らした。図 3 の法線マップと角度誤差より、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。

図 4 に実画像での法線推定結果を示す。図 4 の入力画像は、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 4 の法線マップと角度誤差より、球において、中心部分以外で定性的に良好な結果を得られていることが分かる。また、陶器のような面や角のある物体の形状を、滑らかさ拘束などの形状に関する仮定を用いることなく、正しく復元できている。なお、図 4 に示す陶器の角度誤差を求める際に用いた法線の真値は、照度差ステレオによる法線を用いた。

表 1 に合成画像、実画像での角度誤差の平均を示す。合成画像の角度誤差平均はどちらも 0.2° 以内に収まっており、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 15° 以内に収まっており、概ね良好な結果が得られているが、改善の余地がある。

4 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、実画像実験での精度向上に取り組みたい。また、鏡面反射と影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] 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.
- [2] D. Kriegman and P. Belhumeur, "What shadows reveal about object structure", In Proc. ECCV1997 (LNCS1407), pp.399-414, 1997.