

空の偏光分布を用いた三次元形状復元

市川 知樹^{*1,a)} Purri, Matthew^{*2} 川原 僚¹ 延原 章平¹ Dana, Kristin² 西野 恒¹

概要: 本研究では、雲がない快晴の屋外での、偏光を用いた三次元形状復元を行う。屋外での光源は空であるが、空の光は偏光しており、その偏光分布は Rayleigh sky model として表される。偏光した空の光が物体表面で反射されると、偏光状態が変化する。地上で物体を見ると、この反射光が観測される。空と太陽の光の鏡面反射と拡散反射の和で表される反射光の偏光のモデルを導出し、撮影した被写体の偏光画像と偏光状態が一致する法線を見つけることで推定を行う。本研究では、実際に雲がないときに屋外で撮影した1枚もしくは数枚の偏光画像を用いて、形状復元を行い本手法の有効性を示す。

1. 序論

画像に基づく被写体の三次元形状復元は、応用範囲の幅広さから様々な研究がされている。応用例としてはロボティクスや、文化資源などをデジタル化して保存するデジタルアーカイブなどがある。三次元形状復元の主要な方法としては、複数の視点から撮影した画像の対応点を探して、三角測量により形状復元を行う多視点ステレオが挙げられる。ただし、密な対応点を見つけることは困難であるため、復元した物体表面の点群は疎になり、復元された表面形状は実際よりも滑らかになることがある。他の三次元形状復元の方法としては、光源の方向を変化させ、観測輝度の変化により法線を推定する照度差ステレオ法 [1] が挙げられる。この手法では光源を制御する必要があるため、強度や向きが制御されていない光源下へと適用するのは困難である。

本研究では、ピクセル毎に形状復元でき、光源を制御する必要のない方法として、空の偏光分布を利用することに着目する。偏光とは、電磁波である光の振動面の向きに偏りがあることで、空の偏光分布は Rayleigh sky model として知られている。図2に示すように、Rayleigh sky model において偏光の向きと偏光の強さは、それぞれ天球上で太陽を基準とした経度と緯度によって定めることができる [2], [3]。屋外において空の偏光した光は、物体表面での反射によって偏光状態が変化して観測される。

本手法では図1に示すように、屋外で撮影した一枚もし

くは少数の偏光画像から三次元形状復元を行う。偏光画像から得られる光の偏光状態から、物体表面で反射する前の入射光の偏光状態を推定することで、偏光分布により入射光の方向および法線を復元できる。具体的にはまず、反射による偏光、空の偏光、およびそれらによって記述される屋外での反射光の偏光のモデルを導出する。そのモデルにおける法線、観測される偏光状態、空の偏光状態の関係をj用いて各ピクセルに対し、実際に観測した偏光状態を満たす入射光および法線を推定する。

本研究では、いくつかの形状や反射特性が異なる物体を用いて実験を行い、本手法の有効性を検証する。快晴の日の屋外で偏光カメラを用いて撮影を行い、得られた偏光画像から被写体の三次元形状復元を行う。実験結果により、形状と反射特性によらず三次元形状復元が可能であること、均一な材質の物体は一枚の偏光画像から形状復元が可能であることを示す。一枚の偏光画像から復元できることを用いて、形状が変化する物体へ応用できることも示す。

本手法は光源が空であるためパッシブに三次元形状復元ができ、屋外での三次元センサーとして応用することが期待される。特に車のように鏡面反射が起こりやすいような対象について、屋外で詳細な形状を復元するなどの応用が期待される。一般に鏡面反射は視点によって見え方が異なるため、光源が制御されていないもとの三次元形状復元は困難である。本手法は空の光を用いることで偏光分布を利用して、鏡面反射が起こりやすい対象についても三次元形状復元を行うことができる。

2. 関連研究

画像を用いた三次元形状復元を行う研究として、これまで多くの手法が提案されている。Bleyer らはマッチング

¹ 京都大学

² Rutgers University

^{a)} tichikawa@vision.ist.i.kyoto-u.ac.jp

* Equal contribution.

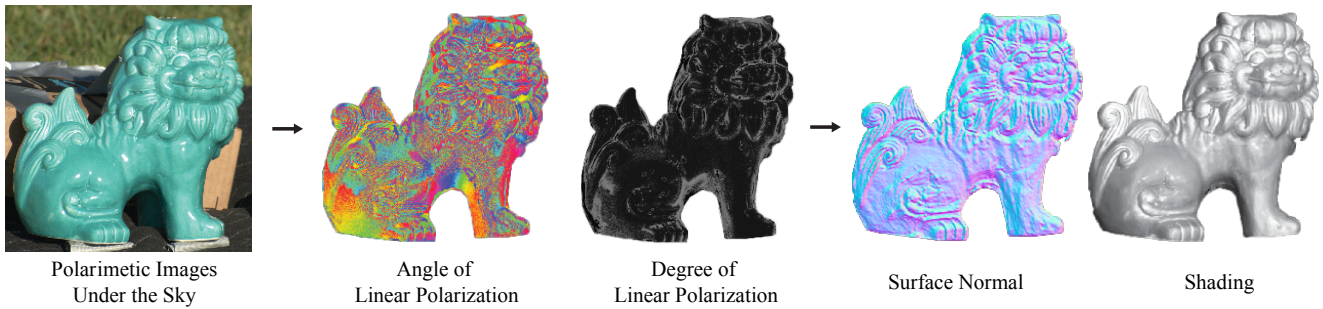


図 1 屋外での偏光を用いた三次元形状復元. 屋外では空の偏光した光が物体表面で反射し観測される. 観測した反射後の偏光状態と空の偏光状態の対応から, 反射前の光の方向を推定し, 法線を復元する.

表 1 本論文における表記法.

v	視線方向
$n(x)$	ピクセル x の法線
s	太陽の方向
$\ell(x)$	ピクセル x での視線の鏡面反射後の方向
γ	視線 ℓ と太陽の方向 s のなす角
T_ℓ	ℓ の向きの空の接平面. x 軸が $\ell \times [0, -1, 0]^T$ の方向で定義されている.
n_{T_ℓ}	法線 n の接平面 T_ℓ への正規化した射影
φ_{T_ℓ}	n_{T_ℓ} と T_ℓ の y 軸の間の角度
ϕ_ℓ	ℓ の向きの空の偏光の向きを表す角度
n_Π	法線 n の画像平面 Π への正規化した射影
φ_Π	n_Π と画像平面の y 軸 y_Π の間の角度

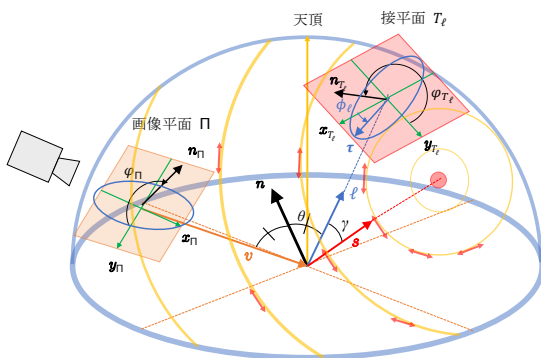


図 2 空の偏光分布と撮像系. 空の偏光分布は Rayleigh sky model によって表される. 両矢印で表すように偏光の向きは太陽を通る大円上で等しく, 天球上で太陽と直交する向きとなる. 偏光度は太陽を中心とする緯線上で等しい. 緯線の太さは偏光度の大きさを表す. 画像平面と接平面上の楕円は偏光状態を表す. 図中の文字の意味は表 1 に示す.

に PatchMatch アルゴリズム [4] を用いた多眼ステレオを提案している [5]. 他には多視点ステレオと照度差ステレオ法を組み合わせることで, 三次元形状と反射特性の両方を復元する多視点照度差ステレオ法がある [6].

屋外での三次元形状復元として, 空の輝度分布をモデル化することで照度差ステレオ法を行う方法がある. Preetham らは濁度という空気中のもやによる散乱を空の輝度の分布に導入し [7], Inose らはその分布を利用した照度差ステレオ法で多眼ステレオの結果を改善することを提案している [8]. Jung らは, 空の輝度分布を二次関数で表される空の光と, ガウス関数で表される太陽の光の和であるとして, 照度差ステレオ法を行う方法を提案している [9]. これらの手法は空の輝度のみを用いており偏光は用いていないため, 必要な光源状態の数が多い.

偏光を用いた三次元形状復元では, 光が物体表面で反射される際に法線の向きに応じて偏光することを利用する. Cui らは偏光と多視点ステレオを組み合わせる方法を提案している [10]. 疎に復元された三次元点を補間するために, 偏光から表面の法線の方位角を推定し, 多視点ステレオで

求めた深度を伝搬させる方法をとっている. 多視点ステレオを用いているため一枚の画像から復元することができず, 光源が偏光している場合を考えていない. Tozza らは遠い点光源を仮定した場合の, 偏光を用いた三次元形状復元を提案している [11]. さらに Smith らは屋外での光源を太陽のみと仮定することで, 屋外でも適用できることを示している [12]. しかし実際は, 屋外では偏光分布をもつ空の光の影響があり, 反射後の光の偏光に影響を与える. 本研究では, 屋外において単眼で撮影した偏光画像から, 空の偏光分布を考慮したモデルを用いて物体の形状復元を行う.

空の光は太陽の光が大気中の分子によってレイリー散乱されたものであり, 偏光分布は Rayleigh sky model で表される [2], [3]. 空の偏光分布については昆虫との関係が研究されている. Heinze と Reppert はオオカバマダラが特定の向きの偏光に反応することを発見し, 太陽コンパスとの関連を研究した [13]. Horváth と Varjú は空の偏光した光の淡水域での反射と, 水生昆虫が水を見つけることとの関係を研究した [14]. 本研究では空の偏光分布を利用して三次元形状復元を行う.

3. 空の偏光分布を用いた三次元形状復元

本研究では, 物体表面での反射により偏光状態が変化した空の光を観測し, 観測した一枚もしくは少数の偏光画像

から三次元形状復元を行う。観測される反射光と表面の法線の関係を求めるには、反射による偏光と空の偏光分布を組み合わせる必要がある。本節では、最初に偏光についての基本的な性質と、反射による偏光について説明する。次に、光源である空が偏光していること、および空の偏光分布について述べる。最後に、空の光が物体表面で反射された際の光の偏光、および観測した偏光状態を用いた三次元形状復元の方法について述べる。図2に撮像系を示す。図中の文字の意味は表1にまとめる。

ここで次のことを仮定する。物体表面での反射は鏡面反射と拡散反射の和として表せるとする。鏡面反射は完全鏡面反射であるとして、拡散反射はランバート反射とする。空は雲がなく快晴の状態であり、平行投影カメラで撮影すると仮定する。

3.1 反射による偏光

光は横波の電磁波で、振動面は進行方向を含む平面の一つとなる。振動面が時間に対して一定の光の状態を直線偏光といい、振動面が時間とともに回転する光の状態を円偏光という。一般的な光源では、様々な向きに偏光した光が合成され、振動面がランダムに変化する。この光の状態を非偏光という。振動面が規則的でも、完全なランダムでもない状態を部分偏光という。部分偏光は偏光した光と非偏光の光の合成として考えられる [15]。本研究では、直線偏光した光と非偏光の光による部分偏光を考える。直線偏光の部分偏光における偏光フィルタの角度 ν と、フィルタを通じて観測される光の輝度 $I(\nu)$ の関係は

$$I(\nu) = I_0 + \rho I_0 \cos(2\nu - 2\phi) \quad (1)$$

となる。ここで、 I_0 は光の輝度、 ρ は偏光度 (DoP: degree of polarization)、 ϕ は偏光の向きを表す角度 (AoP: angle of polarization) である。偏光状態は4次元のベクトルのストークスベクトルで表現される。第4成分は円偏光の成分を表すが、直線偏光の部分偏光を考えるため第4成分は常に0となる。ストークスベクトル S は

$$S = \begin{bmatrix} 2I_0 \\ 2I_0\rho\cos(2\phi) \\ 2I_0\rho\sin(2\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。

反射による輝度と偏光状態の変化は4行4列の Mueller 行列 M で表され、入射光のストークスベクトルを S_i とすると、反射のストークスベクトル S_o は

$$S_o = MS_i \quad (3)$$

となる。反射による Mueller 行列は

$$M = kC(\varphi_o)RC(-\varphi_i) \quad (4)$$

と表される。ここで k はスカラーの係数、 C はストークスベクトルに対する回転行列

$$C(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\varphi) & -\sin(2\varphi) & 0 \\ 0 & \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

であり、 R は反射による偏光の変換を表す行列である。また、 φ_i は入射光の偏光を定義する座標の y 軸と入射面の間の角であり、 φ_o は反射光の進行方向と物体表面の法線からなる平面と、反射光の偏光を定義する座標の y 軸との間の角度である。入射光は、 $C(\varphi_i)$ により入射平面で定義される座標系に変換され、 R で表される反射によって偏光状態が変化され、 $C(\varphi_o)$ により観測する座標系へ変換される。

物体表面での反射による偏光の双方向反射率分布関数モデルは、Baek らが提案したモデル [16] を用いる。

3.1.1 鏡面反射による偏光

完全鏡面反射を仮定しているため、鏡面反射は法線 n に対して視線 v と対称な向き l から来る光を反射する。完全鏡面反射を仮定しているため、式 (4) の R は

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} R_+ & R_- & 0 & 0 \\ R_- & R_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_x \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_x \cos \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。ここで $R_{\pm} = \frac{R_s \pm R_p}{2}$ 、 $R_x = \sqrt{R_s R_p}$ 、 θ は入射角、 $\cos \delta$ は θ がブリュースター角未満の場合 -1 となり、ブリュースター角以上の場合 1 となる。ブリュースター角とは $R_p = 0$ となる入射角である。 R_s, R_p はフレネルのエネルギー反射率で

$$R_s(\theta) = \left(\frac{\sin(\theta - \theta_t)}{\sin(\theta + \theta_t)} \right)^2, \quad R_p(\theta) = \left(\frac{\tan(\theta - \theta_t)}{\tan(\theta + \theta_t)} \right)^2 \quad (7)$$

である。 θ_t は屈折角でスネルの法則から

$$\theta_t = \sin^{-1} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \sin \theta \right) \quad (8)$$

となる。ここで、 μ_1, μ_2 は境界前後の媒質の屈折率である。

3.1.2 拡散反射による偏光

拡散反射は入射光が物体表面を透過し、内部で散乱して非偏光になり、物体表面から再度透過して出てくる現象である。拡散反射では方向 l から入射した光は様々な方向へ反射され、カメラに向かう向きの光 dS_o が観測される。

ランバート反射を仮定しているため、微小な立体角 $d\omega$ から光 S_i が入射されたとき、拡散反射により観測方向へ向かう光 dS_o は

$$dS_o = \frac{n \cdot l}{2\pi} C(\varphi_o) T(\theta_o) D(\zeta) T(\theta_i) C(-\varphi_i) S_i d\omega \quad (9)$$

となる。ここで θ_i は入射角、 θ_o は物体内部から観測者へ

透過してくる際の入射角で、反射光と法線のなす角 θ_r を用いて、スネルの法則より $\theta_o = \sin^{-1}\left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \sin \theta_r\right)$ となる。 ζ は拡散アルベドで、内部に透過した光の減衰率を表し、 \mathbf{n} は入射点の法線、 $\boldsymbol{\ell}$ は入射光の方向である。 $\mathbf{D}(\zeta)$ は内部の散乱による非偏光化を表す 4 行 4 列の行列で

$$\mathbf{D}(\zeta) = \begin{bmatrix} \zeta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

である。 $\mathbf{T}(\theta)$ はフレネル透過による偏光を表す行列で

$$\mathbf{T}(\theta) = \begin{bmatrix} T_+ & T_- & 0 & 0 \\ T_- & T_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

となる。ここで、 $T_{\pm} = \frac{T_s \pm T_p}{2}$, $T_x = \sqrt{T_s T_p}$, θ は入射角である。 T_s, T_p はフレネルのエネルギー透過率で

$$T_s(\theta) = 1 - R_s(\theta), \quad T_p(\theta) = 1 - R_p(\theta) \quad (12)$$

で定義される。

拡散反射される光は、式 (9) を法線に対する上半球全体の立体角 Ω で積分したものである

$$S_o = \frac{1}{2\pi} \mathbf{C}(\varphi_o) \mathbf{T}(\theta_o) \int_{\Omega} (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell}) \mathbf{D}(\zeta) \mathbf{T}(\theta_i) \mathbf{C}(-\varphi_i) S_i d\omega \quad (13)$$

となる。

3.2 空の偏光

空の光の輝度と偏光の分布は天候に依存するが、本研究では雲がない快晴である場合を考える。空と地面の距離と比較して、地上での十分小さい距離にある領域では、空の各点は地上の観測地点によらず向き $\boldsymbol{\ell}$ のみで表される。すなわち方向光源が地面に対して上半球に分布したものとみなせる。

3.2.1 空の偏光分布

太陽からきた光が大気中の分子によってレイリー散乱され、空の光となる。太陽の光は非偏光であるが、レイリー散乱により光が偏光され、空は偏光分布を持つようになる [2]。

図 2 に示すように、天球上の太陽を通る大円上の偏光の向きは同じであり、その偏光の向きは空の半球の接平面 $T_{\boldsymbol{\ell}}$ 上で太陽と直交する向きである。太陽の方向を \mathbf{s} とすると偏光の向きは $\boldsymbol{\ell} \times \mathbf{s}$ となる。

観測地点から空のある点への向き $\boldsymbol{\ell}$ を z 軸とする接平面の座標系を考える。カメラから見たこの座標系の x 軸 $\mathbf{x}_{T_{\boldsymbol{\ell}}}$ を

$$\mathbf{x}_{T_{\boldsymbol{\ell}}} = \frac{\boldsymbol{\ell} \times [0, -1, 0]^T}{\|\boldsymbol{\ell} \times [0, -1, 0]^T\|} \quad (14)$$

と定義すると、カメラ座標系から接平面の座標系への変換は

$$\mathbf{C}_{T_{\boldsymbol{\ell}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{T_{\boldsymbol{\ell}}} & \boldsymbol{\ell} \times \mathbf{x}_{T_{\boldsymbol{\ell}}} & \boldsymbol{\ell} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

となる。接平面座標系での偏光方向 $\boldsymbol{\tau}$ は

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{C}_{T_{\boldsymbol{\ell}}}(\boldsymbol{\ell} \times \mathbf{s}) \quad (16)$$

となり、空の偏光の AoP $\phi_{\boldsymbol{\ell}}$ は

$$\phi_{\boldsymbol{\ell}} = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_y}{\tau_x}\right) \quad (17)$$

となる。

次に空の光の偏光度を考える。非偏光の光のレイリー散乱による偏光度 ρ_R は

$$\rho_R = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \quad (18)$$

となる [3]。ここで θ は入射光の向きと散乱された光の向きのなす角である。空の光は、非偏光である太陽光のレイリー散乱なので、偏光度は式 (18) に従うが、実際の空の偏光度の最大値 ρ_{\max} は 1 にならない。そのため ρ_{\max} を係数として補正を行う。太陽と視線方向のなす角 γ と、太陽光の進行方向と空の光の進行方向のなす角 θ は等しいため、空の光の偏光度 $\rho_{\boldsymbol{\ell}}$ は

$$\rho_{\boldsymbol{\ell}} = \rho_{\max} \frac{\sin^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma} \quad (19)$$

となる。

3.2.2 空の輝度分布

本手法では形状復元に光の輝度も用いるため、空の光の輝度の分布を導入する。Perez sky model ではある一つの方向の輝度を参照値として、参照値との輝度の比を 5 つのパラメータを用いてモデル化している [17]。カメラ座標系での天頂方向を \mathbf{g} とすると、方向 $\boldsymbol{\ell}$ の空の輝度は

$$I_{\boldsymbol{\ell}} = \frac{f(\mathbf{g}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\ell})}{f(\mathbf{g}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\ell}_0)} I_{\boldsymbol{\ell}_0} \quad (20)$$

となる。ここで関数 f は

$$f = \left(1 + a \exp\left(\frac{b}{\mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\ell}}\right)\right) (1 + c \exp(d\gamma) + e(\mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\ell})^2) \quad (21)$$

であり、 a, b, c, d, e は空の状態を表すパラメータである。

3.3 屋外での反射光の偏光

図 2 に示すように屋外で撮影した偏光画像は、3.1 節で述べた反射によって空の偏光した光が変化した偏光状態となる。本節ではある一つのピクセル \mathbf{x} について、観測される光のストークスベクトルを導出する。

法線 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ を画像平面 Π に投影した $\mathbf{n}_{\Pi}(\mathbf{x})$ と、カメラ座標系の y 軸のなす角 $\varphi_{\Pi}(\mathbf{x})$ は

$$\varphi_{\Pi}(\mathbf{x}) = \cos^{-1}(\mathbf{n}_{\Pi}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y}_{\Pi}) \quad (22)$$

となる。ここで、 $\mathbf{y}_\Pi = [0, 1, 0]^T$ である。

反射される光を空の光の鏡面反射、空の光の拡散反射、太陽の光の拡散反射の3つの要素に分解して考える。以降では簡単のためピクセル依存性を表す \mathbf{x} を省略する。

3.3.1 空の光の鏡面反射

完全鏡面反射を仮定しているため、視線 \mathbf{v} が物体表面で反射されると入射面内で法線に対して対称な向きに向かう。反射後の視線 ℓ は

$$\ell = \mathbf{v} - 2(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (23)$$

となる。 ℓ の向きの空の光の輝度 I_ℓ 、偏光度 ρ_ℓ 、偏光の向き ϕ_ℓ はそれぞれ式 (20), (19), (17) で与えられる。空のストークスペクトル S_ℓ は

$$S_\ell = 2I_\ell \begin{bmatrix} 1 \\ \rho_\ell \cos 2\phi_\ell \\ \rho_\ell \sin 2\phi_\ell \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

となる。このストークスペクトルが、式 (4) の Mueller 行列に従って変化する。接平面の座標系から入射面で定義される座標系への変換を行うため、法線の接平面 T_ℓ への射影と接平面の座標系の y 軸とのなす角 φ_{T_ℓ} を求める。接平面の座標系での法線 $\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell}$ はカメラ座標系での法線 \mathbf{n} を、式 (15) の回転行列を用いて座標変換することで求められ、

$$\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell} = \mathbf{C}_{T_\ell} \mathbf{n} \quad (25)$$

となる。これを用いて φ_{T_ℓ} は

$$\varphi_{T_\ell} = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell, y}}{\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell, x}} \right) - \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

となる。ただし $\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell, x}, \tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell, y}$ はそれぞれ $\tilde{\mathbf{n}}_{T_\ell}$ の x 成分と y 成分を表している。法線と入射光のなす角 θ_Π は、法線 \mathbf{n} と視線 \mathbf{v} のなす角と等しいため、

$$\theta_\Pi = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \quad (27)$$

となる。空の光の鏡面反射は式 (4) より

$$S_\Pi^s = \zeta_s(\mathbf{n} \cdot \ell) \mathbf{C}(\varphi_\Pi) \mathbf{R}(\theta_\Pi) \mathbf{C}(-\varphi_{T_\ell}) S_\ell \quad (28)$$

となる。ここでスカラー係数 k は鏡面反射のアルベド ζ_s とシェーディング項 $\mathbf{n} \cdot \ell$ の積であるとする。

太陽光の鏡面反射は \mathbf{s} の方向を映している法線のみで起こる。太陽の輝度は非常に大きいため、この法線を映している画像の領域では画素値が飽和する。画素値が飽和すると偏光状態を正確に観測できなくなるため、太陽の鏡面反射は無視する。太陽を映している領域の法線の推定は、周りのピクセルを使うことで行うことができる。

3.3.2 空の光の拡散反射

拡散反射では式 (20) で表される Perez sky model の輝度分布を、法線に対する上半球の範囲で積分する必要がある。しかし積分の計算を各ピクセルで行う必要があるため、計算量が非常に大きくなる。したがってモデルを簡単にするために、積分においては輝度分布を、輝度分布が I_d で一様な空と一方向からの太陽の寄与の和として表せると仮定する。一様な輝度分布からの拡散反射は式 (13) から

$$S_\Pi^d = \frac{1}{2\pi} \mathbf{C}(\varphi_\Pi) \mathbf{T}(\theta_o) \int_{\Omega} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) \mathbf{D}(\zeta) \mathbf{T}(\theta_l) \mathbf{C}(-\varphi_l) S_l d\omega \quad (29)$$

となる。ここで、 \mathbf{l} は入射する光の向き、 θ_l は入射角、 φ_l は入射光の偏光を定義する座標の y 軸と入射面の間の角、 S_l は入射光のストークスペクトルである。式 (29) の積分は行列 \mathbf{D} により第一成分以外は 0 となるため

$$S_\Pi^d = \mathbf{C}(\varphi_\Pi) \mathbf{T}(\theta_o) \cdot 2I_d \zeta_d S_0 \quad (30)$$

と表せる。ここで $S_0 = [1, 0, 0, 0]^T$ で、 ζ_d は

$$\zeta_d = \zeta \int_{\Omega} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) (T_+(\theta_l) - T_-(\theta_l) \rho_l \cos(2\phi_l - 2\varphi_l)) d\omega \quad (31)$$

であり、 ρ_l 、 ϕ_l はそれぞれ \mathbf{l} の向きからの入射光の偏光度と AoP である。 ζ_d は実効的な拡散アルベドと考えられ、フレネル透過と拡散アルベドの影響を合わせたものである。 ζ_d は入射光の偏光状態 ρ_l と ϕ_l に依存している。ここで $T_-(\theta_l)$ が $T_+(\theta_l)$ に比べて十分小さいと仮定すると、式 (31) は

$$\zeta_d = \zeta \int_{\Omega} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) T_+(\theta_l) d\omega \quad (32)$$

となる。式 (32) より ζ_d は入射光 S_l の偏光状態に依存しなくなり、 ζ_d は拡散アルベド ζ と物体の屈折率 μ にのみ依存する。これは入射光の偏光状態が、物体の表面を透過後の光の輝度に影響を与えないことを意味する。

3.3.3 太陽の光の拡散反射

太陽から直接来る光は非偏光でありストークスペクトルはデルタ関数を用いて

$$S_s = 2E_s \delta(\mathbf{l} - \mathbf{s}) S_0 \quad (33)$$

となる。ここで E_s は太陽の光の照度である。法線に対する上半球に太陽の方向 \mathbf{s} が含まれているとき、太陽の光による拡散反射は

$$S_\Pi^* = 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}) \zeta_d T_+(\theta_s) I_s \mathbf{C}(\varphi_\Pi) \mathbf{T}(\theta_\Pi) S_0 \quad (34)$$

となる。ここで θ_s は太陽と法線のなす角で θ_s となる。 I_s は

$$I_s = \frac{E_s}{\int_{\Omega} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}) T_+(\theta_l) d\omega} \quad (35)$$

で定義される。

物体表面で反射されて観測される光は、空の光と太陽光

の拡散反射と空の鏡面反射を合わせたもので、

$$\begin{aligned} S_{\Pi} &= S_{\Pi}^d + S_{\Pi}^* + S_{\Pi}^s \\ &= 2(I_d + (\mathbf{n} \cdot \mathbf{s})I_s T_+(\theta_s)) \zeta_d \mathbf{C}(\varphi_{\Pi}) \mathbf{T}(\theta_{\Pi}) S_0 \\ &\quad + \zeta_s (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell}) \mathbf{C}(\varphi_{\Pi}) \mathbf{R}(\theta_{\Pi}) \mathbf{C}(-\varphi_{T_{\ell}}) S_{\ell} \end{aligned} \quad (36)$$

となる。

3.4 形状復元

式 (36) のように法線 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ と、観測されるストークスペクトル S_{Π} の関係が得られた。本研究の目的は、屋外で撮影した偏光画像から各ピクセルの法線を推定することである。ここで太陽の方向 \mathbf{s} 、空の偏光度の最大値 ρ_{\max} 、物体の屈折率 μ 、Perez sky model のパラメータ a, b, c, d, e 、天頂の方向 \mathbf{g} は既知であるとする。

3.4.1 均一な材質の物体の形状復元

被写体の材質が均一な場合を考えると、式 (36) でピクセル \mathbf{x} に依存するのは法線 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ のみで、ほかの未知数 $I_d, I_s, I_{\ell_0}, \zeta_d, \zeta_s$ はすべてのピクセルで共有される。式 (36) で一般性を失うことなく、 I_{ℓ_0} と ζ_s は $I_{\zeta_s} = I_{\ell_0} \zeta_s$ としてまとめることができる。さらに I_d, I_s, ζ_d について、任意のスカラー s の $I'_d = sI_d, I'_s = sI_s, \zeta'_d = \frac{\zeta_d}{s}$ という変換に対して式 (36) は不変なので I_d は 1 とおける。最適化を行う際の未知数を減らすために、 t を時間によらないパラメータとして、任意の時刻で $I_s = tI_d$ が成り立つと仮定する。

N ピクセルでの観測での自由度は $3 + 2N$ となり、観測されるストークスペクトル $S_{\Pi}(\mathbf{x})$ に対して法線 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ が一意に定まるとすると拘束式の数は $3N$ となる。この場合 $3 + 2N < 3N$ なので法線を求めることができる。次に、同じ視点から撮影した異なる時刻の M 枚の画像から形状復元することを考える。このとき空の光の輝度 I_d, I_s, I_{ζ_s} は時間に依存し、アルベド ζ_d と法線 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ は時間に依存しないため自由度は $2M + 1 + 2N$ となる。 I_d はある一時刻のみ 1 とした。拘束式は各ピクセルに対して $3M$ 個となるので合計 $3MN$ 個となる。 N は M に比べて十分大きいいため複数の画像を使用することで、自由度に対する拘束式の数の比が大きくなり頑健な推定を行える。

すべてのピクセルで共有されるパラメータと、ピクセルに依存するパラメータを、交互最適化することにより推定を行う。ピクセルによらない未知数は $I_d, t, I_{\zeta_s}, \zeta_d$ となる。これらの最適化の式は

$$\arg \min_{I_d, t, I_{\zeta_s}, \zeta_d} \sqrt{\sum_{\mathbf{x}} \sum_i^M \|\hat{S}_{\Pi} - S_{\Pi}\|^2} \quad (37)$$

となる。ここで i は画像の番号、 \hat{S}_{Π} は観測から得られたストークスペクトル、 S_{Π} は式 (36) より計算したストークスペクトル、 $\|\cdot\|$ は L_2 ノルムである。式 (37) の最適化で得られたパラメータを用いて、法線の最適化の式は

$$\arg \min_{\mathbf{n}} \sqrt{\sum_i^M \|\hat{S}_{\Pi} - S_{\Pi}\|^2} \quad (38)$$

となる。

これまで既知としたパラメータ、 $\mathbf{s}, \rho_{\max}, \mu, a, b, c, d, e, \mathbf{g}$ はすべてのピクセルで共有される。これらのパラメータが未知で画像が 1 枚の場合でも、拘束式の数が自由度よりも大きいため、解くことができる。しかし、非凸関数の最適化であるため局所解にはまりやすく、適切な初期値を与える必要がある。

3.4.2 拡散アルベドが一樣でない物体の形状復元

拡散アルベドが一樣でない物体の場合、 $\zeta_d(\mathbf{x})$ がピクセルによって異なるため、拡散アルベドの自由度が N になる。他のパラメータについては材質が均一物体の場合と同様に考えると全体の自由度は $2M + 3N$ となる。拘束式の数は $3MN$ となるため、 $M = 1$ のときは拘束式の数が自由度よりも小さく、一意に解くことができない。必要な画像の枚数は $M > \frac{3N}{3N-2}$ であり、 $N > 1$ であるとき $M \geq 2$ とするため、2 枚以上の異なる時刻での画像があればよい。

最適化は式 (37)、式 (38) と同様にピクセルによらない未知数 I_d, t, I_{ζ_s} とピクセルに依存した未知数 \mathbf{n}, ζ_d を交互最適化する。

4. 評価実験

評価実験では、第 3 節で述べた方法を用いて、快晴の屋外で撮影した偏光画像から物体の形状復元を行い、真の法線との誤差を計算した。偏光画像はモノクロ偏光カメラ (LUCID PHX050S-P) で撮影した HDR 画像、カラー偏光カメラ (LUCID TRI050S-QC) で撮影した画像、またはデジタル一眼レフカメラで偏光フィルタをレンズの前で回転させて撮影した画像を用いた。偏光カメラは 2×2 のウィンドウ内の 4 つのピクセルに、 45° ずつ回転した 4 つの角度の偏光フィルタを備えている。本研究ではこれら 4 つのピクセルを同じ位置のピクセルとして扱った。撮影時はカメラと被写体を固定して、同じ視点から複数の時刻で撮影を行った。

太陽の方向は金属球を被写体と共に撮影し、金属球に映り込んだ太陽の位置から計算した。Perez sky model の 5 つのパラメータは CIE 標準晴天空を表す値とした [18]。形状復元は鏡面反射が空を映している部分のみを行い、該当範囲は手動で決定した。真の法線は、屋内での照度差ステレオ法とアクティブステレオ法により点群と対応した法線を計算し、位置合わせをして再投影することにより求めた。

4.1 法線の復元精度

本節では、形状の異なるいくつかの物体の形状復元を行い誤差を評価する。一樣な材質の物体と、拡散アルベドが一樣でない物体の形状復元をそれぞれ行った。図 3 に法線

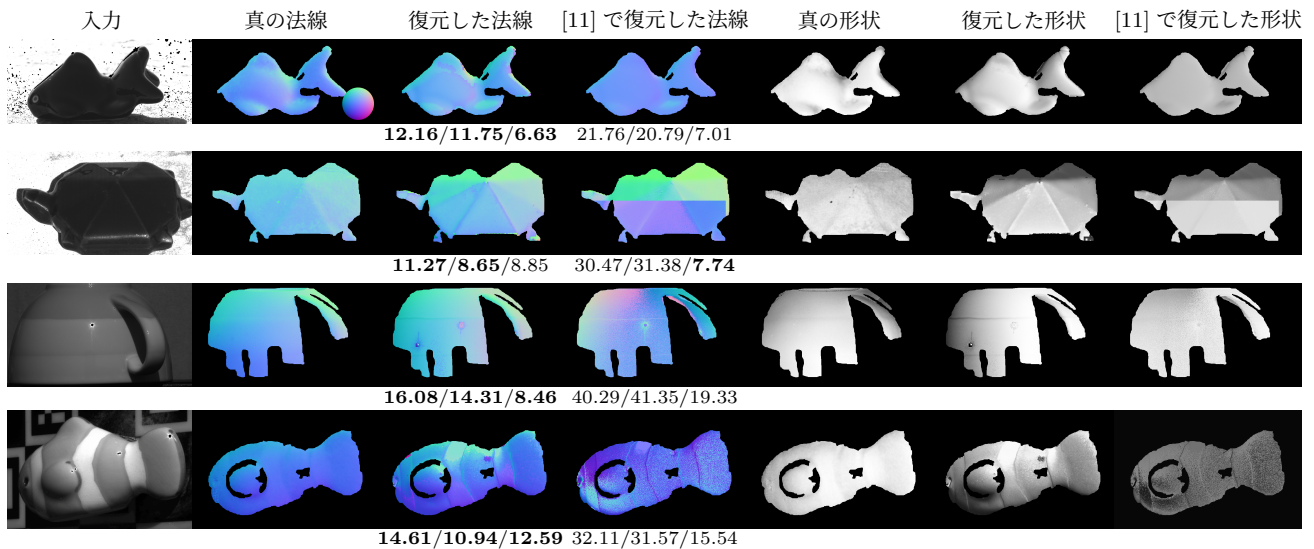


図 3 形状復元の結果. 一番上はある時刻で撮影した偏光画像. 法線の配色は黒い魚の真の法線の右下にある球を参照する. 一様な材質の物体と拡散アルベドが一様でない物体の両方とも復元できている. 図の下の数字はそれぞれ法線の角度誤差の平均/中央値/標準偏差を度数法で表す.

と形状の復元結果と誤差を示す. 復元を行った物体は陶磁器の黒い魚, 黒い亀, カップ, クマノミである. 黒い魚と黒い亀は一様な材質を仮定して推定を行った. 法線と形状は鏡面反射が空を映している範囲のみを表示している. 形状は正面から光を当てた場合のシェーディングで表している. 比較として Tozza ら [11] の手法を用いて同じ画像を入力として復元を行った. この手法の計算には著者が公開しているコードを用いた. なお, 使用した画像の枚数はそれぞれ, 黒い魚が 1 枚, 黒いカメとカップが 2 枚, クマノミが 3 枚である. すべての物体について, 角度誤差の平均, 中央値のどちらも [11] で復元した方法を下回っている. 形状を見ると, 太陽の鏡面反射による飽和が起こっていない部分を除けば, 定性的にも形状を正しく復元していることがわかる. 実験結果は空の偏光分布を用いたモデルが有効であることを示した.

クマノミの結果について, 復元した法線の誤差が周囲よりも大きくなっている部分がある. この誤差は復元に利用した画像を撮影する時間の間隔が短かったことによるものだと考えられる. 拡散アルベドが一様でない場合は, 少なくとも異なる 2 時刻の画像が必要である. 二つの時刻が近い場合, 各時刻における偏光画像の変化が小さいため, 真の法線でない解に収束することが考えられる.

4.2 反射特性の影響

本節では反射特性による復元した形状への影響について議論する. 第 3 節で述べたように, 鏡面反射と拡散反射の偏光は大きく異なる. 鏡面反射は空の偏光状態が反射によって変化するが, 拡散反射される光の偏光状態は物体外部に透過する際の偏光のみである. 反射特性による偏光の

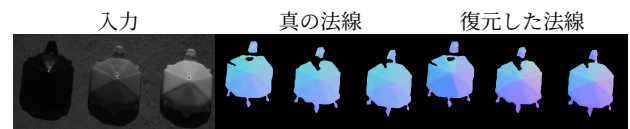


図 4 反射特性が異なる同じ形状の物体の形状復元結果. 画像内の左から黒, 緑, 白色である. 三色とも復元できている, 反射特性に対して頑健に復元できることを示す.

違いが形状復元に与える影響を実験により評価する.

図 4 は反射特性が異なる同じ形状の物体の形状復元結果である. それぞれの物体の色は画像内の左から順に黒, 緑, 白である. 法線の角度誤差の平均/中央値/標準偏差は黒色が $14.69^\circ/14.44^\circ/6.10^\circ$, 緑色が $16.36^\circ/16.22^\circ/5.72^\circ$, 白色が $14.48^\circ/14.49^\circ/5.28^\circ$ となった. 形状の復元にはすべて 3 時刻の画像を用いた. 結果より黒, 緑, 白のどの色でも正しく復元できていることが分かる. 本手法は鏡面反射, 拡散反射, 鏡面反射と拡散反射の混合のどの反射特性であっても, 形状復元が可能であることが示された.

4.3 形状が変化する物体の形状復元

材質が一様である物体は一枚の偏光画像から復元できるため, 連続で撮影した偏光画像からそれぞれ形状復元を行うことで, 形状の変化を捉えることができる. カラー偏光カメラを用いて連続で撮影した画像に対して, それぞれ形状復元を行い, 復元した形状に対して定性的評価を行った. 形状復元の際に法線以外の未知数は, ある一枚の偏光画像の推定結果を, 残りのすべての画像に用いた.

図 5 に靴を連続で撮影して形状復元を行った結果を示す. 靴はかかとが持ち上がるように動き, 中央付近が前を向くようになる. かかとが上がるにつれて, 靴の中央付近

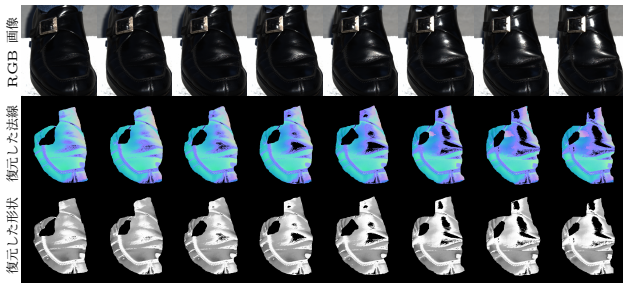


図 5 形状が変化する物体の形状復元結果. 1 行目は撮影した RGB 画像, 2,3 行目は復元した法線と形状である. 法線が表面の動きを反映しており, 形状の変化を捉えていることを示す.

では復元した法線は前を向いている. 靴の先端付近では復元した法線は常に上を向いている. 各領域に対して, 動きを反映し法線の復元ができていたため, 実験結果は形状の変化を捉えていることを示す.

5. 結論

本研究では空の偏光分布を導入することによって, 屋外での偏光を用いた新たな三次元形状復元の手法を提案した. 本手法では各ピクセルに対して物体表面で反射された光の観測から, 空の偏光分布を用いることで, その光源が空のどの向きであるかを推定し法線を復元している. 実際に晴天下で撮影した偏光画像を用いて形状復元を行い, その誤差の定量的評価を行った. 既存の偏光を用いた手法との比較では, 復元した法線の精度を比較することで本手法のモデルが有効であることを示した. 色が異なる同じ形状の物体の形状復元では, 本手法の反射特性に対する頑健性を示した. 他に, 連続で撮影した画像への応用を行い定性的に評価した. 本手法は空の光を用いるため, 特別な設定がほとんど不要である. そのため屋外での三次元センサーとして様々な用途への応用が考えられる.

今後の課題としては, 太陽の方向の推定が挙げられる. 太陽の方向は空の偏光分布を決定するため, 本手法の未知数の推定において重要となる. 考えられる方法としては, 各画像の撮影時刻と GPS による撮影場所を用いて, 異なる時刻間の太陽の位置関係を利用する方法がある. 別の課題として, 快晴でない場合への拡張が考えられる. 雲がある場合は, 空の光の輝度や偏光の分布が Rayleigh sky model と Perez sky model に従わなくなる. この問題を解消するには, 雲がある方向からの光を新たにモデル化すること, 雲が映りこんでいる領域を検出する必要がある.

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K20143, 18K19815, 20H05951, JST JPMJCR20G7, NSF 1715195 の助成を受けたものです.

参考文献

[1] Woodham, R. J.: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical Engi-*

neering, Vol. 19, No. 1, pp. 139–144 (1980).

[2] Strutt, J. W.: XV. On the light from the sky, its polarization and colour, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 41, No. 271, pp. 107–120 (1871).

[3] Goldstein, D.: *Polarized Light*, CRC Press (2011).

[4] Barnes, C., Shechtman, E., Finkelstein, A. and Goldman, D. B.: PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, p. 24 (2009).

[5] Bleyer, M., Rhemann, C. and Rother, C.: PatchMatch Stereo-Stereo Matching with Slanted Support Windows., *Bmvc*, Vol. 11, pp. 1–11 (2011).

[6] Li, M., Zhou, Z., Wu, Z., Shi, B., Diao, C. and Tan, P.: Multi-view photometric stereo: a robust solution and benchmark dataset for spatially varying isotropic materials, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 29, pp. 4159–4173 (2020).

[7] Preetham, A. J., Shirley, P. and Smits, B.: A practical analytic model for daylight, *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 91–100 (1999).

[8] Inose, K., Shimizu, S., Kawakami, R., Mukaigawa, Y. and Ikeuchi, K.: Refining outdoor photometric stereo based on sky model, *IPSP Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 5, pp. 104–108 (2013).

[9] Jung, J., Lee, J.-Y. and So Kweon, I.: One-day outdoor photometric stereo via skylight estimation, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4521–4529 (2015).

[10] Cui, Z., Gu, J., Shi, B., Tan, P. and Kautz, J.: Polarimetric multi-view stereo, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1558–1567 (2017).

[11] Tozza, S., Smith, W. A., Zhu, D., Ramamoorthi, R. and Hancock, E. R.: Linear differential constraints for photopolarimetric height estimation, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2279–2287 (2017).

[12] Smith, W. A., Ramamoorthi, R. and Tozza, S.: Height-from-polarisation with unknown lighting or albedo, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 41, No. 12, pp. 2875–2888 (2018).

[13] Heinze, S. and Reppert, S. M.: Sun compass integration of skylight cues in migratory monarch butterflies, *Neuron*, Vol. 69, No. 2, pp. 345–358 (2011).

[14] Horváth, G. and Varjú, D.: Polarization pattern of freshwater habitats recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges and its relevance for water detection by aquatic insects, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 200, No. 7, pp. 1155–1163 (1997).

[15] Hecht, E.: *Optics*, Pearson Education, Incorporated (2017).

[16] Baek, S.-H., Jeon, D. S., Tong, X. and Kim, M. H.: Simultaneous acquisition of polarimetric SVBRDF and normals., *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 6, pp. 268–1 (2018).

[17] Perez, R., Seals, R. and Michalsky, J.: All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation, *Solar energy*, Vol. 50, No. 3, pp. 235–245 (1993).

[18] on Illumination, I. C.: *Spatial distribution of daylight - luminance distributions of various reference skies*, CIE technical report, CIE Central Bureau (1994).