IIEEJ 講座

コンピュータビジョンにおける偏光の活用

宮崎 大輔

広島市立大学

Using Polarization in the Field of Computer Vision

Daisuke MIYAZAKI

Hiroshima City University

1. はじめに

本講座では、偏光を用いた画像技術について紹介する.

2. 偏光と偏光板

偏光には直線偏光と円偏光があるが、本講座では直線偏光 についてのみ説明する.

ある1 方向にだけ振動している光を完全直線偏光といい, 等方的に振動している光を非偏光という.その中間状態にあ る光を部分偏光という.偏光度とは,光の偏光状態を表す尺 度の1つで,0から1の値をとり,完全偏光は1,非偏光は0 の値で表す.直線偏光板を通過した光は,完全直線偏光にな る.完全直線偏光の前にもう1つ直線偏光板を置いたとき,2 つの直線偏光板が同じ向きにあると光は2つの直線偏光板を 透過し,2 つの直線偏光板が異なる向きにあると光は透過し ない.

部分偏光した光を直線偏光板を通して観測した場合,偏光板 を回転させるごとに、透過光の輝度が変化する.ただし,偏 光板は観測方向に対して垂直に設置する.偏光板を回転させ たとき,最も高い輝度を*Imax*,最も低い輝度を*Imin*と表記す る.2次元座標系(x軸とy軸)を偏光板の平面上に定義したと き,偏光板を回転させたときの角度,偏光角oは,偏光板の偏 光軸と+x軸のなす角として定義され,+x軸から+y軸に向かう 角度として表現される.なお,偏光軸とは,直線偏光板にお いて光が透過して偏光する向きを表す軸のことである.偏光 板は180°周期なので,偏光角も0°から180°までの値をとる. 最大輝度*Imax*が観測されたときの偏光角oを位相角ψと定義す る.以上の定義のもとでは,偏光板を回転させたときに観測

される輝度11は以下のように表すことができる(図1).

$$I = \frac{l_{max} + l_{min}}{2} + \frac{l_{max} - l_{min}}{2} \cos(2\nu - 2\psi)$$
(1)



3. 反射成分分離

直線偏光板を光源の前とカメラの前に設置して,鏡面反射 と拡散反射の成分を分離する方法を説明する(図2).



図2 直線偏光光源を用いた反射成分分離

直線偏光板を光源の前に配置したとき,偏光板を通過した 光は完全直線偏光となる.鏡面反射は物体表面で即座に反射 するため,鏡面反射光はこのとき完全直線偏光となる.拡散 反射は物体内部の屈折率の不均一性により乱反射するため, 様々な方向に偏光した光が混ざり合い,拡散反射光は非偏光 となる.そこで,カメラの前にも偏光板を設置し,偏光板を 回転させて光を観測すれば,鏡面反射と拡散反射の成分を分 離することができる.

鏡面反射光の強度をls, 拡散反射光の強度をlaとするとき,

偏光板を回転させたときの観測光の最大輝度 I_{max} ,最小輝度 I_{min} との関係は以下のとおりとなる.

$$I_{min} = \frac{1}{2}I_d \tag{2}$$

 $I_{max} = \frac{1}{2}I_d + I_s$

(3)

このように、光源が完全偏光している場合は簡単に拡散反 射と鏡面反射を分離することができる¹⁾(図3).



図3 拡散反射成分と鏡面反射成分の分離結果 光源が非偏光の場合は深層学習などを使う²⁾.

4. フレネルの公式

図4に示すように、媒質1から媒質2の表面に非偏光が照 射された場合を考える.





表面法線と入射光の方向とのなす角を入射角 θ_1 とし,表面 法線と反射光の方向とのなす角を反射角 θ'_1 とする.十分滑ら かな界面を考えると, $\theta_1 = \theta'_1$ となる.また,透過光の方向 と法線のなす角を透過角 θ_2 とする.

入射角と透過角の間には以下のスネルの法則が成り立つ. $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ (4)

ただし、n1は媒質1の屈折率、n2は媒質2の屈折率である.

反射光を表すベクトルと法線を表すベクトルが張る平面 を反射面と定義する.反射光を表すベクトルも透過光を表す ベクトルも反射面に含まれる.反射面に平行な成分を添え字 p,垂直な成分を添え字sで表すとき,強度反射率Rと強度透 過率Tは以下のようになる.

$$R_{p} = \frac{\tan^{2}(\theta_{1} - \theta_{2})}{\tan^{2}(\theta_{1} + \theta_{2})}$$
(5)

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \tag{6}$$

$$T_p = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \tag{7}$$

 $T_s = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}$

これをグラフで表したものが図5である.この図では、媒質1に対する媒質2の相対屈折率 $n = n_2/n_1$ が1.5のときのグラフを示している.横軸が入射角 θ_1 を表し、縦軸は強度反射率と強度透過率を表す.



図5 強度反射率と強度透過率

5. 鏡面反射光の位相角

物体表面法線は極座標系で表現することとし,方位角を¢, 天頂角をθで表す.

また、式(5)-(6)の大小関係より、偏光板を回したとき、反射 面に対して平行な成分を観測したときに最小輝度 I_{min} が観測 され、垂直な成分を観測したときに最大輝度 I_{max} を得る(図6). 偏光角が反射面に一致しているときに最小輝度が観測される ことになり、それはすなわち、位相角 ψ が方位角と直交するこ とを表している($\phi = \psi + 90^{\circ} (\text{mod 360^{\circ}})$ または $\phi = \psi - 90^{\circ} (\text{mod 360^{\circ}})$).



図6法線と反射面の関係

偏光を解析することで法線が含まれる平面の角度がわかる ため、2視点以上から物体を観測することで、物体表面法線を 求めることができる³⁾⁴⁾(図7).



 Target object
 Estimated shape

 図 7 拡散反射のない物体の形状計測結果

6. 鏡面反射光の偏光度

偏光度は以下のように定義される.

 $\rho = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{9}$

鏡面反射光のみを観測したとき,式(5)-(6)の大小関係から 以下が成り立つ.

$$I_{max} = \frac{R_s}{R_p + R_s} I_s \tag{10}$$

$$I_{min} = \frac{R_p}{R_p + R_s} I_s \tag{11}$$

ここで、Isは反射光の輝度を表す.

式(10)-(11)を式(9)に代入すると以下の式が導かれる.

$$\rho = \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \tag{12}$$

図8 反射光の偏光度

偏光度から天頂角を求めることができ、すなわち、物体表 面の法線を求めることができる.しかし、偏光度と天頂角に は1対2の関係があり、一意に法線を決定することができな い.そのため、2 視点から物体を観測することで法線を一意 に決定する手法を開発した⁵.

7. 熱放射光と拡散反射光の偏光度

物体を熱すると赤外線を放射する(図9).物体の外部を向いている表面法線と観測方向のなす角を放射角 θ_1 とし,表面法線と入射光のなす角を θ_2 とする.媒質1(空気)の屈折率 を $n_1 = 1$ とし,媒質2(物体)の屈折率を $n_2 = n$ とする.熱放射光は物体内部に所々でランダムに発生し,内部の分子で 乱反射するため,非偏光となる.入射光が非偏光であり,界 面を透過する際に部分偏光する.その偏光状態は式(7)-(8)で 与えられる強度透過率によって決定される.放射光の観測輝 度は以下のようになる.

$$I_{max} = \frac{T_p}{T_p + T_s} I_t \tag{13}$$

$$I_{min} = \frac{T_s}{T_p + T_s} I_t \tag{14}$$

ここで、Itは放射光の輝度を表す.



式(13)-(14)を式(9)に代入すると以下の式が導かれる.

$$=\frac{T_p - T_s}{T_p + T_s} \tag{15}$$

ρ

屈折率 1.5 のときの偏光度のグラフを図 10 に示す.



図10 放射光の偏光度

熱放射光の偏光度と天頂角は1対1の対応関係があるため, 偏光度から法線を求めることができる^の.

拡散反射光も物体内部からの放射と見なせるため,熱放射 光と同じ理論が成り立つため,同じ理屈で法線を求められる ⁷⁾.

8. ミュラー計算と偏光レイトレーシング法

偏光を用いたレイトレーシング方を偏光レイトレーシン グ法と予備,このとき,光の偏光状態を計算するためにミュ ラー計算法が使われることがある.

偏光レイトレーシング法の逆問題を解くことで透明物体の表面法線を求める手法もある⁸⁾(図11).



図 11 偏光レイトレーシング法による形状計測結果

9. Shape-from-shading と照度差ステレオ法

拡散反射物体の陰影を解析することで、物体表面の法線を求 める手法を Shape-from-shading や照度差ステレオ法という. 単一の光源を計測対象物体に照射して撮影した画像を入力と する手法を Shape-from-shading という.光源方向を3 方向以 上の異なる方向から照射した3 枚以上の画像から法線を求め る照度差ステレオ法は、物体表面形状計測に広く利用されて いる.しかし、その際、光源方向は既知である必要がある. 光源方向が未知の場合の未校正照度差ステレオ法と、単一画 像の場合の Shape-from-shading は、そのままでは理論上解く ことのできない問題である.これまで見てきた通り、偏光を 用いることで法線を求めることができる.偏光と組み合わせ ることで、未校正照度差ステレオ法⁹や Shape-from-shading¹⁰ (図 12)の安定性を高めることができる.



Target objectEstimated shape図 12 偏光を用いた Shape-from-shading の結果

10. おわりに

偏光を用いた研究はコンピュータビジョンの分野の研究

者にとっても興味深いテーマであり、今後も魅力的な研究が 増えていくものと思われる.非常に楽しみな研究分野である.

参考文献

- D. Miyazaki, T. Shibata, K. Ikeuchi: "Wavelet-Texture Method: Appearance Compression by Polarization, Parametric Reflection Model, and Daubechies Wavelet." Int'l J. Computer Vision, 86(2-3), 171-191 (2010)
- D. Miyazaki, N. Yoshimoto: "Specular removal of monochrome image using polarization and deep learning." Nicograph Int'l, 90-90 (2022)
- D. Miyazaki, T. Shigetomi, M. Baba, R. Furukawa, S. Hiura, N. Asada: "Surface normal estimation of black specular objects from multiview polarization images." SPIE Optical Engineering, 56(4), 041303:1-17 (2016)
- D. Miyazaki, R. Furuhashi, S. Hiura: "Shape estimation of concave specular object from multiview polarization." J. Electronic Imaging, 29(4), 041006:1-23 (2020)
- D. Miyazaki, M. Kagesawa, K. Ikeuchi: "Transparent Surface Modeling from a Pair of Polarization Images." IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(1), 73-82 (2004)
- D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi: "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths." J. Optical Society of America A, 19(4), 687-694 (2002)
- D. Miyazaki, R. T. Tan, K. Hara, K. Ikeuchi: "Polarization-based Inverse Rendering from a Single View." Int' Conf. Computer Vision, 982-987 (2003)
- D. Miyazaki, K. Ikeuchi: "Shape Estimation of Transparent Objects by Using Inverse Polarization Raytracing." IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 29(11), 2018-2030 (2007)
- D. Miyazaki, S. Hashimoto: "Uncalibrated photometric stereo refined by polarization angle." Optical Review, 28(1), 119-133 (2021)
- D. Miyazaki, N. Kodama: "Surface normal estimation from polarization and shading under the convexity assumption." Optical Review, 28(4), 411-424 (2021)



宮崎大輔

2005 年 東京大学大学院情報理工学系 研究科博士課程修了.博士(情報理工 学).東京大学生産技術研究所特任助教 などを経て,2008 年 10 月に広島市立大 学に着任.現在 同大学情報科学研究科 准教授.物理ベースビジョンの研究に従 事.MIRU2011 出版委員長,MIRU2017 組織委員長,NICOINT2023 プログラム 委員長.情報処理学会,電子情報通信学 会,IEEE 各シニア会員.