

偏光による形状推定および色の解析

Using Polarization for Shape Estimation and Color Analysis

宮崎 大輔
Daisuke Miyazaki

広島市立大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1
3-4-1 Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima 731-3194
E-mail: miyazaki@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 物理学の知識を活用して画像解析を行う研究分野は物理ベースビジョンと呼ばれている。本講演では、偏光や光の反射、スペクトル分布の知識を応用した物理ベースビジョンの研究について紹介する。1つ目の話題として、複数視点から対象物体の偏光状態を観測することで物体の三次元形状を取得する手法を紹介する。2つ目の話題として、単視点から透明物体の偏光状態を観測し、偏光レイトレーシングによる解析を用いて透明物体の三次元形状を取得する手法を紹介する。3つ目の話題として、複数視点から対象物体を観測し、観測された物体表面の反射と同じ反射をする画像を計算する手法を紹介する。最後に4つ目の話題として、メタメリズムを生起させる塗料の調合割合を自動的に計算する手法を紹介する。

Abstract Research field which uses physics for image analysis is called physics-based vision. This presentation introduces physics-based vision research using polarization, light reflection, and spectral distribution. The first topic is the shape estimation method, which analyzes the polarization state of the object reflection observed from multiple viewpoints. The second topic is the shape estimation method of transparent objects using polarization raytracing. The third topic is the method to render a photorealistic graphics through the analysis of object reflection observed from multiple viewpoints. The fourth method is the method which computes automatically the mixing ratio of paints that causes a metamerism.

1. はじめに

現実世界をカメラ等で観測し、その画像を処理し、解析し、認識し、理解する研究分野はコンピュータビジョンと呼ばれている。コンピュータビジョンの研究の中でも、光学などの物理学の知識を使って画像を解析する研究分野を物理ベースビジョンと呼ばれている。物理ベースビジョンの研究としては例えば、物体の反射を解析したり、光源色を推定したり、波長スペクトル分布を解析したり、偏光解析をしたり、光の散乱を解析したり、といったものが挙げられる。本講演では物理ベースビジョンの研究のうち、4つの研究内容について発表する。

1つ目の研究[1]は、偏光に基づいた三次元形状計測の研究である。対象とする物体は色が黒色で、表面が光学的に滑らかであり鏡面反射が強く観測される誘電体である。対象物体を周囲のあらゆる方向から非偏光な光で照射し、物体表面の鏡面反射光を偏光カメラで観測する。

物体は複数方向から観測し、その偏光状態を解析することで物体の三次元形状を計算する。

2つ目の研究[2]も、偏光に基づいた三次元形状計測の研究である。対象とする物体はガラスやアクリルで出来た透明物体で、表面が光学的に滑らかなものである。対象物体を周囲のあらゆる方向から非偏光な光で照射し、物体を偏光カメラで観測する。物体は単視点から観測し、その偏光状態を偏光レイトレーシングで解析することで物体の三次元形状を計算する。

3つ目の研究[3]は、現実の物体と同じ反射をCG（コンピュータグラフィックス）として再現する研究である。対象とする物体は複数色で塗装された不透明物体である。物体の反射を数式モデルで表現し、そのパラメータを推定する。対象物体を複数方向から観測し、その反射を解析することで現実そっくりの反射を発生させるパラメータを推定する。物体表面で反射された光を物体の色を表す拡散反射とツヤやハイライトを表す鏡面反射に分けるために、光

源とカメラの前に偏光板を設置する。また、取得データのサイズを減らすためにウェーブレット圧縮を行う。

4つ目の研究[4]は、メタメリズム（条件等色）を意図的に発生させることでアート作品として利用しようとする研究である。2つの物体色がある光源下で同じ色に観測されるのに、別の光源下では異なる色として観測される現象はメタメリズムと呼ばれる。使用する光源によって衣服等の見え方が変わるため、服飾業界や広告業界では、従来、メタメリズムに悩まされてきた。この研究では、逆にメタメリズムを有効活用してアート作品として利用することを目的としている。メタメリズムを意図的に発生させるためには、そのような絵の具を用意しなければならない。その絵の具を手動で見つけ出すのは色や波長に対する専門知識が必要となる。一般のユーザでもメタメリズムを発生させる絵の具を使用できるようにするため、その絵の具を自動的に見つけ出す手法を提案する。多数の絵の具のスペクトル分布をデータベース化し、メタメリズムを発生させることが出来る絵の具の配合割合を自動的に計算するソフトウェアを開発する。

なお、本稿では円偏光を扱わないため、偏光という用語は直線偏光を表すものとする。また、一部の図は白黒印刷では見づらいため、カラーの図に関しては文献[1-4]の電子ファイル版を参考にさせていただきたい。

2. 視体積交差法と偏光を利用した鏡面物体の三次元形状計測

この節では、黒色鏡面物体の形状計測手法について述べる。対象物体は静止している固体とする。光は対象物体の全周囲から一度に非偏光の光を照射するものとする。物体を回転させて物体全体を偏光カメラで観測する。

物体表面の反射は拡散反射と鏡面反射に分けられる。拡散反射は物体内部に入射した光が内部の微細構造で乱反射して出射する光で、物体の陰影を表す。一般的な意味での物体の色は拡散反射光のことである。鏡面反射は物体表面で即座に反射する光で、入射光と同じ色をしている。一般的な意味でのハイライトやツヤは鏡面反射光のことである。

非偏光な光を誘電体に照射したとき、拡散反射光も若干偏光するものの、鏡面反射光の偏光度には及ばない。鏡面反射光は拡散反射光よりも強く偏光し、その偏光状態は物体の法線に依存して変化する。逆に、鏡面反射光の偏光状態

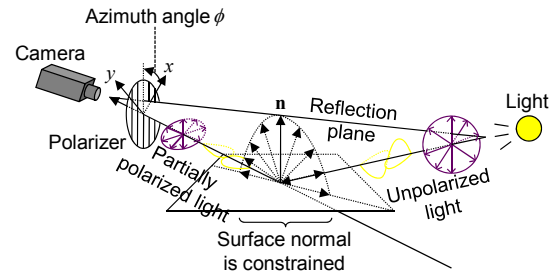


図1 反射面と法線の関係

を解析することで、物体表面の法線の情報を取得できる可能性があることを示唆している。

物体表面の形状は表面法線で表現することができる。法線と入射光のベクトルと物体からカメラに向かうベクトルを含む平面を反射面と呼ぶことにする。なお、鏡面反射は鋭い反射、すなわち入射角と反射角が同じであるものとする。この関係を図1に示す。反射面の向きが分かればその平面内に法線が含まれることが分かる。そこで、2つ以上の視点から同一物体表面の反射面の向きを推定する。図2に示す通り、物体表面の法線を一意に決定することが出来る。

光の偏光状態は長軸の角度である位相角 ϕ とそのときの輝度 I_{\max} 、短軸の輝度 I_{\min} で表すことができる。物体表面を反射した光はフレネルによる強度反射率 R に基づいて反射する。反射面に平行な成分を R_p 、垂直な成分を R_s とすると、誘電体表面での反射では $R_p \leq R_s$ が成り立つ。すなわち、光の偏光状態から位相角を推定すれば、そこから 90° 回転した方向が反射面であると分かる（図1）。これにより、物体表面法線を推定することが可能となる。

2つ以上の視点から物体を観測したとき、偏光状態を同一物体表面上で解析しなければならない。複数視点で対応する点を探すにはおおまかな物体形状が分からなければならない。そこで、視体積交差法を使って物体の概形を求める。複数視点から閉物体を観測したとき、対象物体のシルエットを求めることが出来る。その

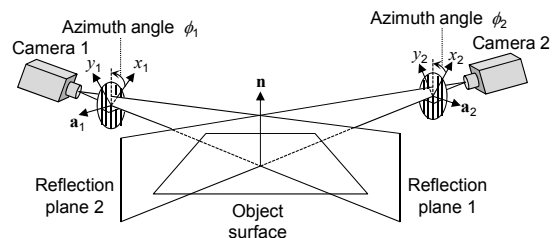


図2 2つの視点からの法線推定

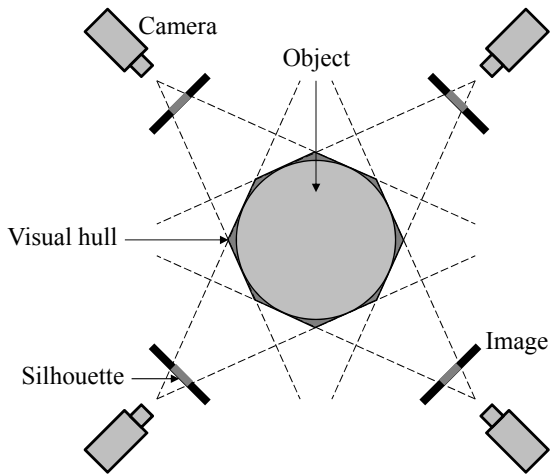


図3 視体積交差法の原理

シルエットから物体形状を推定する. その原理を図3に示す.

図3に示す通り, 視体積交差法で得られる形状は実際の形状よりも大きめの形状となる. そこで, 推定された法線をポリゴンに貼り付けてその法線で陰影を表現する. これにより, 見た

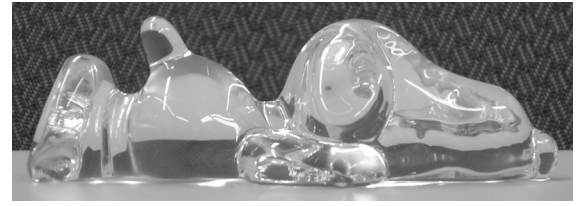


(a)

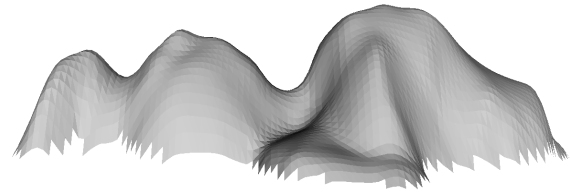


(b)

図4 (a) 視体積交差法による形状計測結果, (b) 提案手法による形状計測結果



(a)



(b)

図5 (a) アクリル製の物体, (b) 形状計測結果

目の形状が推定された法線にもとづいた見えになる. 図4(a)が視体積交差法で得られた形状そのもので, 図4(b)が提案手法の結果, つまり, 視体積交差法の形状に偏光により得られた法線をマッピングしたものである.

3. 偏光レイトレーシング法を用いた透明物体の三次元形状計測

この節では, ガラスやアクリルなどの透明物体の三次元形状を計測する手法について述べる. 対象は光学的に滑らかな誘電体であり, 内部構造が等方性を有し, 単一の屈折率で表現される静止した固体である. 物体の底面は平面であり, 上側の表面の法線を推定するものとし, 表面形状は幾何学的に滑らかであるとする. 屈折率は既知とする. 光は対象物体の全周囲から非偏光な光を照射するものとする. 物体は上側の表面が観測される方向から偏光板を前においたカメラで撮影する.

透明物体に入射した光は反射および透過・屈折する. また, 透明物体内部で複数回反射や透過・屈折を繰り返す. また, 反射や透過・屈折のたびに光の偏光状態が変化する. 物体の形状と入射した光に応じて物体を観測したときの偏光状態を計算するには偏光レイトレーシング法が一般的に使われる. 逆に, 偏光レイトレーシングの逆問題を解くことで物体の形状を計測できる可能性があると言える. そこで, この研究では, 偏光レイトレーシング法を使って透明物体の形状を計測するものとする. 偏光レイトレーシングにおける偏光状態の計算にはミュラー計算法を用いた.

形状推定は反復計算によって行われる. 初期値としておおまかな形状を与え, 繰り返し計算

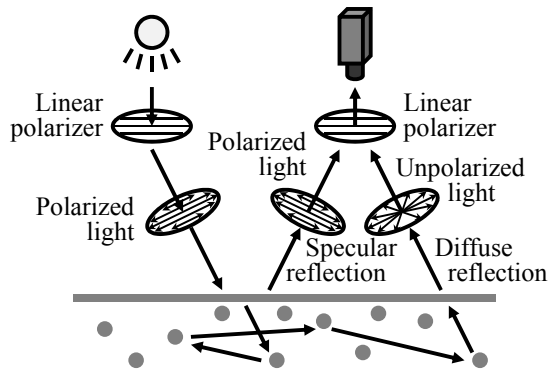


図6 拡散反射と鏡面反射における偏光

を行うことで徐々に正解となる形状に近づけていく。最適化計算で最小化するコスト関数としては、観測されたストークスペクトルの画像と偏光レイトレーシングで計算された画像の2乗誤差である。図5(a)の亚克力物体の形状計測結果を図5(b)に示す。

4. 偏光と反射モデルとウェーブレット圧縮を

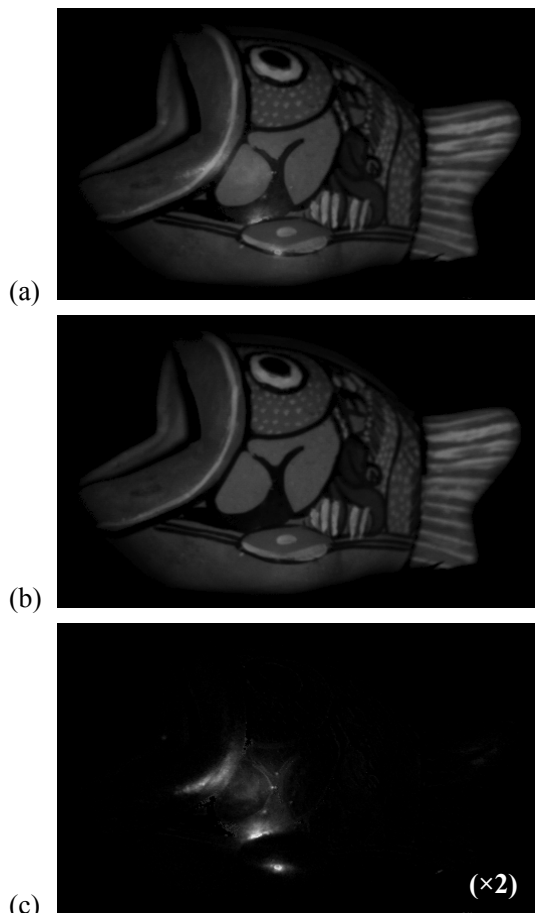


図7 (a) 通常の画像, (b) 分離した拡散反射の画像, (c) 分離した鏡面反射の画像

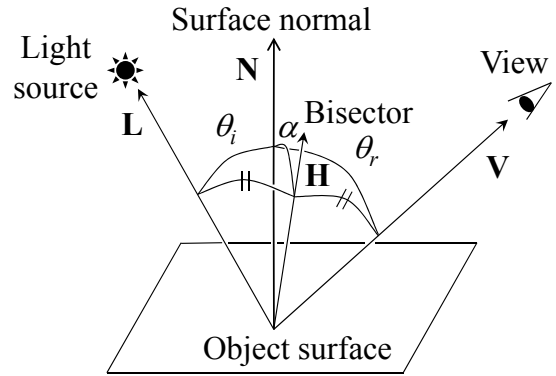


図8 光源方向と視線方向と法線方向の幾何学関係

利用した物体の見えの再現

この節では、物体の見えをCG再現する手法を述べる。対象は不透明な物体とし、拡散反射か鏡面反射もしくはその両方が観測される静止した固体とする。物体の三次元形状は市販の3次元レーザー距離センサを用いて計測する。現実の物体の見えは物体表面の反射に依存しており、視点や光源方向が変化すると物体の見えも変化する。そのため、現実の物体と同じ見えをCGで再現するためには現実と同じ反射を模倣しなければならない。

物体表面の反射は拡散反射と鏡面反射に分けられる。それぞれの反射の性質は異なるため、まず前処理としてそれぞれの反射を分離する。分離は図6に示すように偏光を用いる。完全偏光した光を物体に照射すると、鏡面反射は偏光した状態のまま反射するが、拡散反射は物体内部で拡散するため出射時には非偏光になる。図7(a)の物体に対して偏光を使って分離した拡散反射成分を図7(b)に、鏡面反射成分を図7(c)に示す。

本研究では、Lambert 反射モデルを用いて拡散反射を数式で表現する。

$$K_d \cos \theta_i \quad (1)$$

ここで、 K_d は拡散反射率を表し、 θ_i は物体表面の法線と光源方向のなす角を表す。図8に θ_i を図示する。

また、Torrance-Sparrow 反射モデルを用いて鏡面反射を数式で表現する。

$$K_s \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで、 K_s は鏡面反射率を表し、 σ は物体表面の粗さ係数を表す。また、光源方向と視線方向の2等分ベクトルをHとしたとき、ベクトルHと法線とのなす角を α とする。図8に α

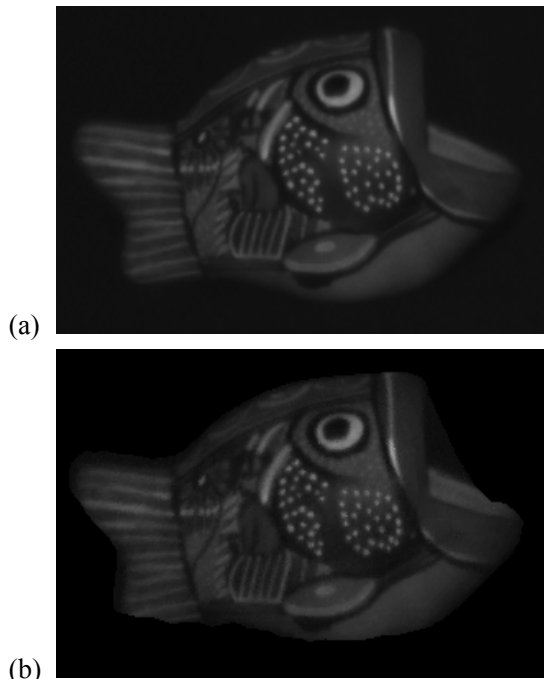


図9 (a) 実物体, (b) 本手法でレンダリングしたCG

を図示する。

物体は偏光した点光源1つで照射する。偏光板を前に置いたカメラで物体を観測する。物体を回転させて物体の全周を撮影する。物体形状と光源方向と視点方向が既知とすると、反復計算により式(1)と式(2)のパラメータ K_d , K_s , σ を推定することができる。最適化計算の目的関数としては入力画像とレンダリングしたCGとの2乗誤差とした。なお、CGを計算する処理をレンダリングと呼ぶ。

式(1)と式(2)で多くの物体の反射をある程度の再現性で表現することが出来るが、必ずしも正確に全ての物体の反射を表現できるわけではない。入力画像とレンダリングしたCGの間には差が出来る。そこで、その差も保存することで、実物に近い反射を再現できる。しかし、その差はわずかな数値のためそのまま保存するにはデータ量が大きすぎる。そこで、その差はJPEG2000でも採用されているデータ圧縮技術であるウェーブレット変換で圧縮して保存する。CGのレンダリング時には逆変換で解凍して、反射モデルで計算されたCGに足し合わせる。図9(a)の物体を本手法でレンダリングしたCGを図9(b)に示す。

5. メタメリズム生起のための油絵の具の調合割合の算出

この節では、メタメリズムを発生させる油絵

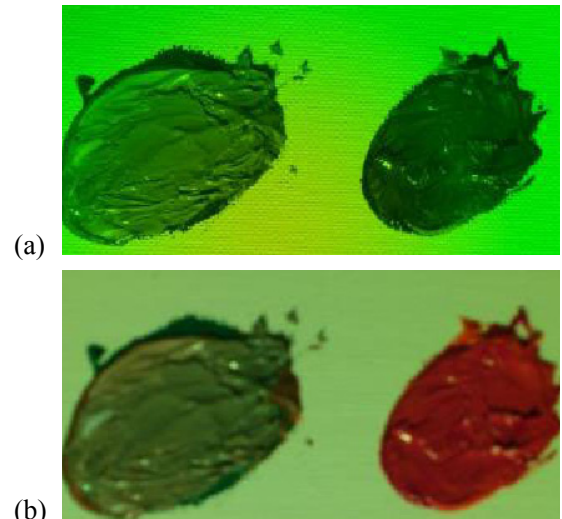


図10 (a) 光源1のもとで観察した2種類の絵の具, (b) 光源2のもとで観察した同じ2種類の絵の具

の具の調合割合を自動的に算出する手法について述べる。2種類の異なる光源を光源1と光源2のように表記する。また、複数の油絵の具を混合して作った2種類の異なる絵の具を混合塗料1と混合塗料2のように表記する。光源1のもとでは混合塗料1と混合塗料2が同じ色と明るさで見えて、光源2のもとでは混合塗料1と混合塗料2が異なる色と明るさで見えるような現象を再現する研究を述べる。そのようなメタメリズムを発生させるための混合比を計算することが本研究の目的である。

JIS Z8120の定義によれば可視光の波長の下界は約360~400nmで上界は約760~830nmである。この研究では400nm~800nmの範囲の光を扱う。この範囲を N_b 個のバンド数で均等に離散化した値をスペクトルデータの数値として利用する。人間が色を知覚するモデルとしてはCIE-XYZ表色系が一般的に使われたため、本研究でもXYZの三刺激値を使う。

光源1と光源2のスペクトル分布はあらかじめ測定しておく。色の異なる油絵の具を N_p 個用意し、その N_p 個の絵の具を混合する。それぞれの絵の具のスペクトル分布はあらかじめ測定しておく。 N_p 個の絵の具をそれぞれ混合割合 $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1N_p}$ で混ぜて混合塗料1を作り、混合割合 $w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2N_p}$ で混ぜて混合塗料2を作る。光源1のもとで混合塗料1と混合塗料2が同じに見えて、光源2のもとで混合塗料1と混合塗料2が異なる見えになるように $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1N_p}$ と $w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2N_p}$ を自動的に計算するソフトウェアを開発した。

これによって計算した実験結果が図10であ

る。図 10 (a)は光源 1 のもとで混合塗料 1 と混合塗料 2 が同じ色に見えるため、濃い緑色の絵の具の固まりに色の違いがない。図 10 (b)は光源 2 のもとで混合塗料 1 と混合塗料 2 が異なる色に見えるため、左の絵の具は濃い緑色に見えるが右の絵の具は赤く見え、2 つの絵の具の色の違いが見える。

6. おわりに

本稿では、4 つの研究について紹介した。物理ベースビジョンの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今日深いテーマであり、今後も魅力的な研究が増えていくものと思われる。著者自身も今後も偏光による形状計測やメタメリズムアートなどの研究を続けていく予定である。

謝辞

1 つ目の研究[1]は、著者が広島市立大学に着任してから実施した研究である。共同研究者の重富卓哉、馬場雅志、古川亮、日浦慎作、浅田尚紀に謝意を表す。2 つ目の研究[2]は、著者が東京大学に在任中に実施した研究である。共同研究者の池内克史に謝意を表す。3 つ目の研究[3]は、著者が東京大学に在任中に実施した研究である。共同研究者の柴田卓司、池内克史に謝意を表す。4 つ目の研究[4]は、著者が広島市立大学に着任してから実施した研究である。共同研究者の中村一貴、馬場雅志、古川亮、青山正人、日浦慎作、浅田尚紀に謝意を表す。

参考文献

- [1] Daisuke Miyazaki, Takuya Shigetomi, Masashi Baba, Ryo Furukawa, Shinsaku Hiura, Naoki Asada, "Polarization-based surface normal estimation of black specular objects from multiple viewpoints," Proc. 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, pp. 104-111, 2012.
- [2] Daisuke Miyazaki, Katsushi Ikeuchi, "Shape estimation of transparent objects by using inverse polarization raytracing," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 29, no. 11, pp. 2018-2030, 2007.
- [3] Daisuke Miyazaki, Takushi Shibata, Katsushi Ikeuchi, "Wavelet-texture method: Appearance compression by polarization, parametric reflection model, and Daubechies wavelet," International Journal of Computer Vision, vol. 86, no. 2-3, pp. 171-191, 2010.

- [4] Daisuke Miyazaki, Kazuki Nakamura, Masashi Baba, Ryo Furukawa, Masahito Aoyama, Shinsaku Hiura, Naoki Asada, "A first introduction to metamerism art," SIGGRAPH ASIA Posters, 2012.