

宮崎大輔, 池内克史,
"偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測,"
情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア,
Vol.44, No.SIG9, pp.86-93, 2003.07

偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測

宮崎 大輔[†] 池内 克史[†]

コンピュータビジョンの分野では、ガラスなどの透明物体の表面形状を計測する簡便な計測手法は、いまだ確立されずにいる。本論文では透明物体の表面形状を計測する簡便で有用な手法を提案する。物体表面を反射した光の偏光度は反射角に依存する。反射角は物体の表面法線に依存するので偏光度を観測することにより物体の表面法線を求めることが可能である。しかし残念ながら偏光度と表面法線は1対1には対応しておらず、正しい表面法線を得るためにはこの曖昧性の問題を解決する必要がある。本論文では物体表面の微分幾何学的性質を利用してこの曖昧性を除去する手法について論じる。

Measuring Surface Shape of Transparent Objects from the Analysis of Parabolic Curves and Polarization

DAISUKE MIYAZAKI[†] and KATSUSHI IKEUCHI[†]

In the field of computer vision, no useful methods of measuring the surface shape of transparent objects such as glasses have been proposed. In this paper, we propose a convenient and beneficial method for measuring the surface shape of transparent objects. The degree of polarization of the light reflected at the object surface depends on the reflecting angle. The reflecting angle depends on the surface normal of the object, thus, by measuring the degree of polarization, we are able to calculate the surface normal of the object. But unfortunately, the relation between the degree of polarization and the surface normal is not 1 to 1, thus, to obtain the correct surface normal, we have to resolve this ambiguity problem. In this paper, we explain the method of resolving the ambiguity by using the differential-geometrical property of object surface.

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野では非接触で物体表面の3次元幾何形状を計測する様々な手法が考案されてきた⁹⁾。単眼視に基づく手法としては焦点調節法やshape-from-(shading/texture/contour)法、多眼視に基づく手法としてはステレオ法やshape-from-motion法がある。一方、光を物体に照射することにより形状を計測する手法としては照度差ステレオ法やモアレ法、光投影法、光レーザ法がある。

これらの手法は元来、不透明な非金属物体の形状を計測するために考案された手法であり、鏡面物体を対象とした物ではなかった。しかし近年、これらの手法を改良して鏡面物体の形状も計測しようとする動きが高まってきた。ステレオ法を鏡面物体の計測にまで拡張したのはBhatら¹⁾やOrenら¹⁸⁾などである。照度差ステレオ法やshape-from-shadingを鏡面物体の

計測にまで拡張したのはIkeuchi¹⁰⁾やNayarら¹⁷⁾, Hata⁷⁾, Satoら²²⁾などである。なお、Hata⁷⁾は照度差ではなく色相を計測に利用している。

Zongkerら²⁸⁾やChuangら⁴⁾は透明物体の形状の計測は行わずに屈折や反射を再現し、現実感のある透明物体の画像生成手法を開発した。また、Schechnerら²³⁾やSzeliskiら²⁴⁾はガラス板に重なって映る奥の景色と手前の景色を分離する手法を提案した。Murase¹⁶⁾は水面下に置いた画像の変化と水面の波の動きの解析により、水面の波の形状を計測する手法を開発した。Hataら⁸⁾は透明物体にプロジェクタで光を投影し、光が屈折する様子を観測し、遺伝的アルゴリズムを用いて透明物体の形状を復元した。

金属や透明物体などの鏡面物体の形状を計測できる技術として近年注目を浴びているのが、物体の偏光特性を用いたものである。Koshikawaら^{13),14)}は、偏光した光を鏡面物体に照射し、反射光の偏光状態を解析することにより、3次元物体のテンプレートマッチングを実現した。Wolffら^{25),26)}は非偏光の光を物体に照射したときの偏光状態を解析することにより、物

[†] 東京大学情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻
Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

体の表面法線の制約が得られることを示した。また、両眼視と偏光解析を組み合わせるにより物体の形状を計測しようと試みたが、対応点探索手法を提案しなかったため、ガラスや金属の板の向きしか計測できなかった。透明物体の形状を計測しようと最初に試みたのは Saito ら^{20),21)}である。しかし、法線の決定には曖昧性の問題があり、特定の形状にしか適用できなかった。

Miyazaki ら¹⁵⁾は Saito らの手法をさらに発展させ、熱放射光の偏光解析に基づいて法線の曖昧性の問題を解決し、透明物体の表面形状を計測することに成功した。Rahmann ら¹⁹⁾は3つの方向から物体の偏光データを取得することにより、Wolf らの手法における対応点の問題を解決できることを示した。また、Rahmann らの示した手法を使うと2つの方向からの偏光データだけで物体の表面形状を計測できることもあるということがシミュレーションを通じて実証された。彼らは実際には5つの方向から偏光データを取得し、鏡面性の不透明物体の表面形状を計測することに成功した。

本論文では透明物体の表面形状を計測する新しい手法を提案する。偏光を用いた手法には光源の明るさを知る必要がないという利点があるため、本手法でも偏光を利用している。Saito らの手法における法線の曖昧性の問題を、物体を微小な角度だけ回転させることによって解決する。また、Wolf らにおける対応点の問題を、偏光度から対応点を求める方法を示すことによって解決する。本手法は Miyazaki らの手法と比べて赤外光の実験装置が不要のため装置がより簡単なものになっている。Rahmann らの論文では5つの方向からの偏光データで実物体の形状を復元したが、本論文では2つの方向からの偏光データのみで実物体の形状を復元する。

本手法では Hata の手法とは違い、カメラとプロジェクタの位置の校正を行う必要がない。我々の手法は Hata の手法と異なり、表面での反射を観測しているので、物体内部に空洞があるような物体や底面が平面でないような物体、ロボットハンドなどで空中に浮かせた物体も計測できる。ただし、相互反射の影響により誤差が大きくなってしまう場合がある。

本論文では対応点探索に放物的曲線(ガウス曲率が0の曲線)が利用できることを示す^{3),9)}。放物的曲線は Klein (クラインの壺の発明者)や Koenderink など有名な研究者が注目する重要な幾何学的性質である¹²⁾。

2章では本手法が要求する仮定について述べる。

3章では偏光解析について述べる。この章では偏光

度と反射角の関係を導くが、このとき反射角が一意に決まらないという曖昧性の問題が発生することを示す。法線は反射角に依存するので反射角が決まらなると法線は決まらない。

この曖昧性の問題を解く方法を示したのが4章である。この章では物体をカメラに対して小さな角度だけ傾けることによってこの曖昧性の問題を解決する手法について示す。物体を回転させる前に取得した偏光度データと物体を回転させた後に取得した偏光度データを比較する。すなわち、物体を2つの方向から観測したデータを取得し、2つのデータを比較するのである。2つのデータは物体表面上の同一点で比較する必要がある。回転に不変な物体表面上の幾何学的性質を利用して、この対応点を探索する方法について述べる。

5章で計測結果を示し、6章で結論を述べる。

2. 仮定

本手法では正射影を仮定する。また、計測対象物体は以下の仮定を満たすものとする。

- (1) 透明な固体であり、誘電体である。
- (2) 屈折率が既知である。
- (3) 光学的に滑らかである(表面が粗くない)。
- (4) 幾何学的に滑らかである(C^2 曲面である)。
- (5) 閉じた物体である。
- (6) 観測機器から見て、自己遮蔽(self-occlusion)が起こらない。
- (7) どこから見ても凹となる部分がない物体である。
- (8) 上記の仮定が物体を微小な角度だけ回転したときにも成り立つ。

仮定(1)は必ずしも満たされている必要はなく、本手法は不透明物体に対しても有効である。ただし、完全拡散面か完全鏡面を有する物体に限る。拡散反射光と鏡面反射光が分離できるのならば、完全拡散面・完全鏡面以外の物体にも本手法を適用できる。

本手法では上記の条件のほかに、相互反射が起きないことと物体を回転させる角度が限りなく小さいことを仮定して理論を組み立てている。しかし、実際の計測においては相互反射は発生するし、物体を回転させる角度が小さすぎると変化が少なすぎて誤差に影響されやすくなる。そもそも、不透明物体よりも透明物体のほうが相互反射の影響がはるかに大きい。逆にいえば、透明物体を計測できるほどの手法ならばどんな物体でも安定して計測できることを暗に意味している。よって、本手法の頑健さを確認するため、本論文では透明物体を計測対象として実験を行った。

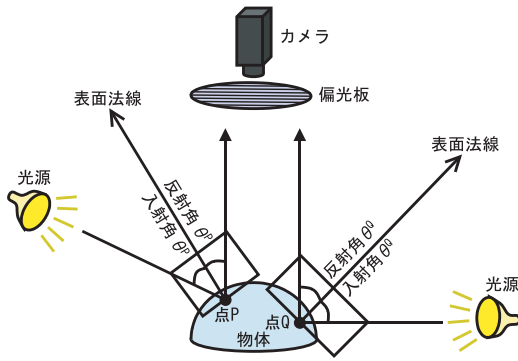


図 1 計測装置の幾何配置
Fig. 1 Location of measurement system

3. 偏光度と反射角

この章では偏光度と反射角の関係について論じる。詳しい理論は参考文献にゆだねる^{2), 15), 20), 21), 25), 26)}

図 1 は計測装置の幾何配置を表している。計測対象物体の真上にカメラを配置し、カメラの前に偏光板を配置する。屈折率 1.0 の空気中を進む非偏光な光を物体に向けて照射し、その光が屈折率 n の物体表面で反射して偏光する様子を観測する。光源方向と表面法線のなす角を入射角と言い、カメラ方向と表面法線のなす角を反射角と言う。光学的に滑らかな透明物体では入射角と反射角は等しくなる。法線を求めるためにはこの反射角（入射角）を求める必要がある。

法線は極座標表現を用いて、天頂角 θ と方位角 ϕ で表現できる。反射角は天頂角に相当する。方位角は法線と視線のなす平面で決まり、 360° の間に ϕ の候補として 2 つの値が算出され、2 つの値の差は 180° となる。2 章の仮定が成り立っているので、遮蔽輪郭 (occluding boundary) での法線が決定でき、物体領域の外側から内側へ方位角を決定していくことにより方位角の曖昧性を除去できる。

偏光板を回して物体をカメラで観測することにより偏光度を計算することができる。偏光度は 0 から 1 までの値をとり、非偏光な光は偏光度が 0 となり、完全直線偏光している光は偏光度が 1 となる。反射角がブリュースタ角のときのみ偏光度が 1 となる。偏光度と反射角の関係は以下の式で表される^{15), 20), 21)}

$$\rho = \frac{2 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 2 \sin^4 \theta} \quad (1)$$

偏光度 ρ は屈折率 n と反射角 θ の関数になっている。屈折率は与えられていると仮定しているため、偏光度を観測することにより反射角を計算することが可能である。

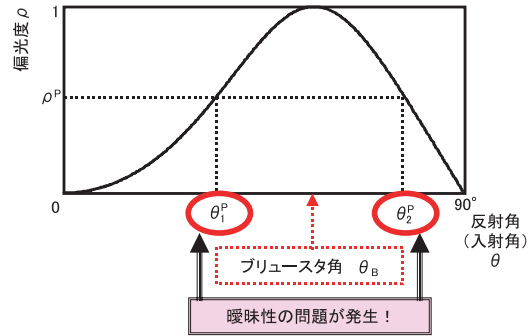


図 2 偏光度と反射角の関係 ($n = 1.5$)
Fig. 2 Reflection angle and degree of polarization

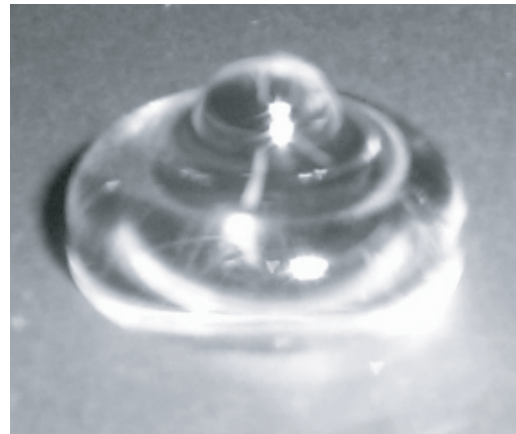


図 3 ベル型の透明物体の写真
Fig. 3 Photograph of bell-shaped object

図 2 は式 (1) のグラフである。縦軸が偏光度、横軸が反射角を表している。偏光度が 1 つ与えられたとき、反射角はブリュースタ角 θ_B のときを除いて 2 つ得られる。2 つの反射角のうちどちらか一方が正しい反射角である。正しい表面法線を得るためにはこの曖昧性の問題を解く必要があり、その手法を 4 章で述べる。

4. 物体の微小回転と対応点の探索

4.1 ブリュースタ分割

計測によって物体表面上の各点の偏光度のデータが得られる。図 3 の物体を真上から見て得られた偏光度データが図 4(a) である。図 3 はベル型の透明物体の実物写真である。図 4(a) は偏光度を表した濃淡画像であり、偏光度 0 を黒、偏光度 1 を白で表している。

偏光度データをブリュースタ角の点、つまり、偏光度が 1 である点で分割することを考えよう。ブリュースタ角の点をつないでできる閉曲線をブリュースタ線と呼ぶことにする。また、この領域分割をブリュースタ分割と呼ぶことにする。偏光度データをブリュー

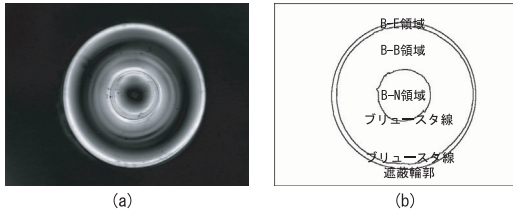


図4 ベル型物体の (a) 偏光度データと (b) プリュースタ分割結果
Fig. 4 (a) Degree of polarization, (b) segmentation result

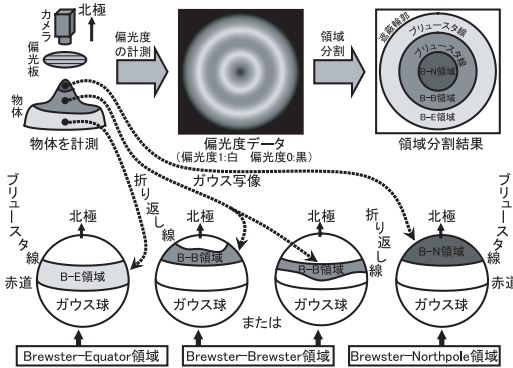


図5 ガウス写像と領域
Fig. 5 Gaussian mapping and regions

分割し、領域ごとに曖昧性を除去することにする。

物体は滑らかな閉じた物体を仮定しているので、領域内の1点でも曖昧性を除去できれば領域内のすべての反射角が決定できる。この仮定により、プリュースタ角の点をつなぐと必ず閉曲線になることも分かる。

図4(b)は図4(a)の偏光度データをプリュースタ分割した結果である。図4(b)には遮蔽輪郭を表す曲線1本と2本のプリュースタ線が描かれている。

各領域を以下の3種類に分類する(図5)。

- (1) B-E領域
- (2) B-N領域
- (3) B-B領域

BはBrewsterの略、NはNorth poleの略、EはEquatorの略である。図4(b)にはB-E領域、B-N領域、B-B領域がそれぞれ1つずつ現れている。

B-E領域は遮蔽輪郭を含む領域だと定義する。遮蔽輪郭は背景差分によって求める。今、カメラの位置を北極に配置したガウス球(単位球)を考え、B-E領域内の各点をガウス写像によりこの球面上に対応させてみよう。このとき、遮蔽輪郭はガウス球面上の赤道に写像される。赤道上の点は $\theta = 90^\circ$ の点である。B-E領域内の点は $\theta_B \leq \theta \leq 90^\circ$ として曖昧性が除去できる。

B-N領域は $\theta = 0^\circ$ となる点を含む領域である

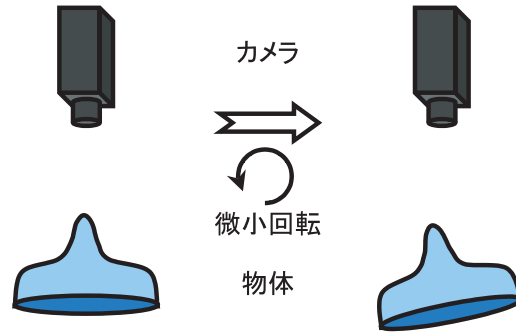


図6 物体の微小回転
Fig. 6 Rotating object at a small angle

と定義する。先ほどと同様のガウス写像を考えると $\theta = 0^\circ$ となる点はすべて北極に写像される。2章の仮定(6)により、遮蔽輪郭以外の点で $\rho = 0$ となる点は $\theta = 0^\circ$ となる点であることが分かる。B-N領域内の点は $0^\circ \leq \theta \leq \theta_B$ として曖昧性が除去できる。

以下ではB-B領域の曖昧性を除去する手法について説明する。

4.2 折り返し線

今、物体を視線に垂直な軸回りに微小な角度だけ回転することを考えよう(図6)。物体を回転させないで得られた偏光度データと物体を微小回転させて得られた偏光度データを比較することにより、曖昧性を除去する。2つの偏光度データは、物体表面上の同一な点で比較しなければならない。物体表面上の幾何学的不変量が一致する点を2つの偏光度データでそれぞれ1つずつ探し出す必要がある。

物体表面上の領域をガウス写像によりガウス球面上に写した様子を描いたのが図5である。ガウス球の北極の上空の方向にカメラが位置するものとする。物体表面上のB-B領域はプリュースタ線のみで囲まれ、 $\theta = 0^\circ$ の点や $\theta = 90^\circ$ の点を含まない。つまりガウス球面上ではB-B領域は北極も赤道も含まない。物体表面が滑らかなとき、物体表面上の閉領域はガウス球面上でも閉領域に写像される。これらのことにより、物体表面上のB-B領域をガウス球面上に写像した領域は必ずプリュースタ線とそれ以外の1個以上の曲線で囲まれる。プリュースタ線ではないガウス球面上の曲線を折り返し線と呼ぶことにする。

この折り返し線がいったいどういう曲線になっているかを見るために図7のようなガウス写像を考えよう。この図はベルの一部のような形をした曲面をガウス球に写像させた例である。曲面上の点線はガウス球面上の曲線に写像されるが、この線が折り返し線になっている。ガウス球を見ると、折り返し線をはさんで片側

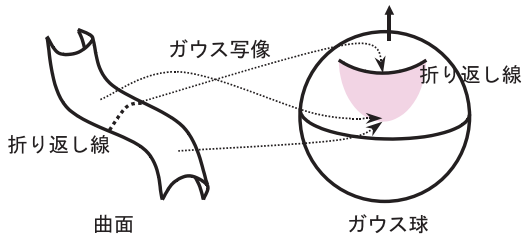


図 7 ベル型曲片のガウス写像
Fig. 7 Gaussian mapping of bell-shaped surface

にしか曲面上の点は写像されず、もう一方の側には一切写像されないことが分かる。

物体を回転させるとそれに応じてガウス球も回転する。つまり、折り返し線は物体を回転させても折り返し線のままである。また、以下の定理 4.1 に示すように、折り返し線は放物的曲線 (parabolic curve) になっている。ゆえに、この折り返しという性質は物体の回転に不変な幾何学的性質である。

定理 4.1 曲面の一部の領域のガウス写像を考えたとき、ガウス球面上のある曲線の片側にしか曲面上の点が写像されないとき、その曲線に対する物体表面上の曲線を折り返し線と呼ぶことにする。折り返し線は放物的曲線である。

(証明) 図 8 を用いて説明する。図 8(a) は物体表面上の様子を表しており、図 8(b) は図 8(a) に対応するガウス球面上の様子を表している。水平に描かれている曲線が折り返し線である。今、物体表面上の折り返し線上に点 p と点 r をとり、折り返し線の片方の側に点 s を、もう片方の側に点 q をとる。点 p 、点 q 、点 r 、点 s はお互い重ならないように決める。物体表面上の点 p, q, r, s に対応するガウス球面上の点を p', q', r', s' とする。点 p' と点 r' は折り返し線上にのり、折り返し線の定義から、点 q' と点 s' は折り返し線の片側に写される。

このとき、三角形 prq 、三角形 psr 、三角形 $p'r'q'$ の面積は正になるのに対し、三角形 $p's'r'$ の面積は負になる。いま、点 q 、点 r 、点 s を点 p に限りなく近づける事により、点 p でのガウス曲率 K を求めようとした場合、以下が成り立つ。

$$K = \lim_{r, q \rightarrow p} \frac{\Delta p'r'q'}{\Delta prq} \geq 0 \quad (2)$$

$$K = \lim_{s, r \rightarrow p} \frac{\Delta p's'r'}{\Delta psr} \leq 0 \quad (3)$$

よって、点 p でのガウス曲率 K は 0 となる。なお、図 8(b) において、点 p' と点 r' の位置関係が左右逆の場合でも同様に証明できる。また、点 p と点 r が曲線ではなく曲面にのっている場合でも同様に証明でき

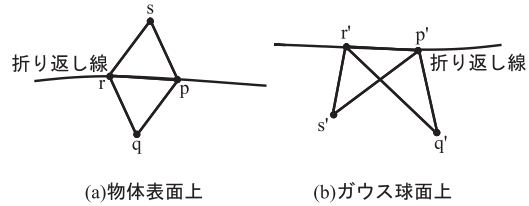


図 8 (a) 物体表面上, (b) ガウス球面上; の折り返し線
Fig. 8 Folding curve on (a) object, (b) Gaussian sphere

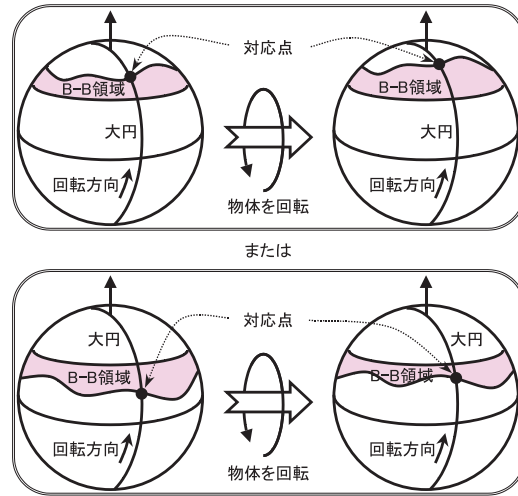


図 9 対応点
Fig. 9 Corresponding point

る。また、 $p' = r'$ や $p' = q'$ や $p' = s'$ や $r' = q'$ や $r' = s'$ や $q' = s'$ のときはもっと簡単に証明できる。(証明終わり)

ガウス球の北極と南極を含み、回転方向を表す大円を考える。この大円上の点は物体を回転させた後もこの大円上に移る。この大円と折り返し線の交わる点を対応点として用いることにする(図 9)。図から分かる通り、この対応点は、物体表面上の B-B 領域内の点のうち、物体の回転方向に沿った法線ベクトルを持つ点の中の、偏光度最小点となっている。得られた 2 つの偏光度データそれぞれをブリュースタ分割し、各 B-B 領域内に 1 つの対応点を探し出すことができる。

図 10 は滑り台のような形をした曲面をガウス球に写像させた例である。曲面上の点線はガウス球面上の一点に写像されるが、この点が折り返し点になっている。曲面上のいくつもの点がガウス球上の一点に写像されるため、物体表面上で 1 点と 1 点を対応させることは困難である。しかし、これは問題にならない。なぜなら、我々が必要なのは対応点における偏光度の値であるからである。ガウス球面上で一点に写像される

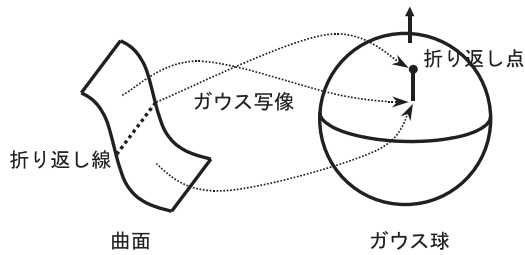


図 10 滑り台型曲面のガウス写像
Fig. 10 Gaussian mapping of slide-shaped surface

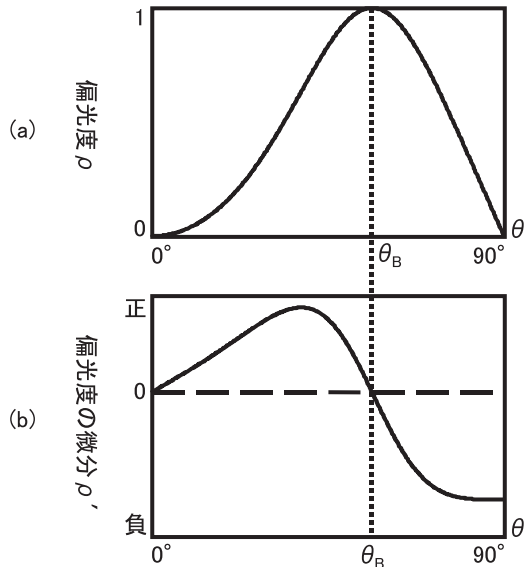


図 11 偏光度の微分 ($n = 1.5$)
Fig. 11 Derivative of degree of polarization

以上、その点に対応する曲面上のどの点においても偏光度の値はすべて同じ値になる。

また、本手法はガウス球面上で対応点を定義していることと、最小値という計算しやすい特徴量を用いているため、頑健に対応点探索ができる。

4.3 偏光度の差

物体を回転させていない状態で計測した偏光度を $\rho(\theta)$ と表し、物体を微小な角度 $\Delta\theta$ だけ回転させたときに得られた偏光度を $\rho(\theta + \Delta\theta)$ とすると、対応点において偏光度の差を計算すると以下の式ようになる。

$$\rho(\theta + \Delta\theta) - \rho(\theta) \simeq \rho'(\theta)\Delta\theta \quad (4)$$

偏光度を微分した値 ρ' のグラフを図 11(b) に示した。比較のため、図 11(a) に偏光度のグラフを示した。

偏光度の微分値 ρ' は $0^\circ < \theta < \theta_B$ のとき正の値をとり、 $\theta_B < \theta \leq 90^\circ$ のとき負の値をとる。物体を回転させる方向は与えてやるものとする。つまり、 $\Delta\theta$ の符号は既知とする。対応点における偏光度の差

は得られたデータから計算できる。これらの事から、式 (4) により、その領域の点が $0^\circ < \theta < \theta_B$ なのか $\theta_B < \theta \leq 90^\circ$ なのかが分かる。つまり、曖昧性が除去できるというわけである。

この方法の場合、符号のみで曖昧性の除去を行っているので、 $\Delta\theta$ の絶対値の量、すなわち、回転角まで分かる必要はまったくない。これは、カメラ位置の校正が不要であることを示している。また、偏光度の値に多少の誤差があっても符号にはほとんど影響が無く、回転する方向が多少ずれていても問題はない。

実際の計測において、物体を回転させる角度は、物体を回転させたときに自己遮蔽が起こらず、各領域も消えたり現れたり変化したりしなければ、どんな角度でもかまわない。ただし、相互反射などの影響を考慮すると、誤差が最小になる最適な回転角は存在する。しかし、物体の形状はあらかじめ知ることはできないので、最適な回転角を与えてやることはできない。本実験では、人の目で物体を見て、自己遮蔽が発生しないぎりぎりの角度の半分くらいの角度だけ回転した。

5. 計測結果

計測装置は Saito ら^{20), 21)} や Miyazaki ら¹⁵⁾ と同じものを用いる。

物体の裏からの光を遮断するために、黒いゴムの上に黒いプラスチックの円筒を置き、その上に計測対象物体を配置した。それでも相互反射は発生するが、物体形状が未知のとき、その影響を完全に予測することはできない。そこで、表面の正反射以外の光の影響は一樣であると仮定し、その輝度を推定し、あらかじめ入力画像からその輝度を差し引くという処理を行っておく。

偏光板を回して画像を取得することにより偏光度を計算することができる。理論的には 3 枚の画像があれば偏光度を求めることができるが、誤差の影響を減らすため 0° から 175° の 5° おきに 36 枚の画像を取得した。これらの輝度に対して最小二乗法により三角関数をあてはめて偏光度を計算した。

計測装置で物体表面の偏光データを取得した後で本手法を用いて法線を計算し、そして、法線データを弛緩法^{9), 11)}により高さデータに変換する。

提案アルゴリズムを適用する前に計測の精度を確認した。実験に用いたのは屈折率 1.5、直径 30mm のプラスチック製の半球状の透明物体である。B-B 領域が存在しないため、半球は回転させなかった。半球であるため、真値が分かるので、計測結果と比べることにより計測精度を確認できる。

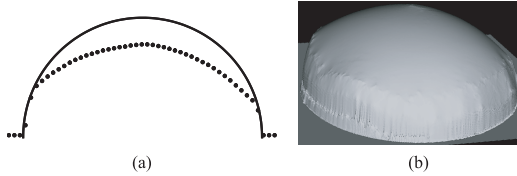


図 12 半球透明物体の計測結果：(a) 理論形状(実線)と計測結果(点)との比較 (b) 結果として計算された形状

Fig. 12 Result of hemisphere: (a) theoretical shape and obtained shape, (b) rendered obtained shape

表 1 半球透明物体の計測誤差

Table 1 Measurement error of transparent hemisphere

偏光度	0.17
反射角	8.5°
高さ	1.1mm

図 12(a) は理論形状と計測結果との比較である．実線が理論形状を表し，点が計測結果を表している．図 12(b) は計測結果のレンダリング画像の例である．全体的に高さが低くなっているが，透明物体の内部で光が何度も反射することによって生じる相互反射の影響により，偏光度が期待通りの値にならなかったためと考えられる．

表 1 に半球の誤差を示した．誤差は，物体表面のすべての点の平均誤差であり，理論値と実測値の差の絶対値として算出した．

高さに関しては，高さ方向に得られた形状を真の形状に近づけてやり，高さの差を最小にしたときの誤差を計算している．もし，遮蔽輪郭の高さを揃えた状態で高さの誤差を計算すると 2.5mm となる．このように高さの誤差はどの高さを基準にするかで値が変わってくるので参考程度にとどめていただきたい．

図 3 の物体に本手法を適用した．計測した物体はベルの形をした屈折率 1.5，直径(幅) 24mm のアクリル製の物体である．物体を水平に置いた時の偏光度データを計測し，さらに物体を約 8° 回転させたときの偏光度データを計測した．対応点における偏光度は 0.089 から 0.084 へ下がった．このとき $\Delta\theta$ の符号が負であったので ρ' が正，すなわち，この物体の B-B 領域は $0^\circ \leq \theta \leq \theta_B$ であることが分かった．得られた法線から物体の表面形状を計算し，レンダリングした画像が図 13 である．図 13(a) はシェーディング画像，図 13(b) はレイトレーシング画像の例である．

図 14 は物体を横から見たときの表面形状を表している．本手法によって得られた形状を点で表している．参考のため，理論値と思われる形状を実線で表している．ただし，実線で描かれた形状は物体を横から見た写真の輪郭から手動で求めたものである．高さの平均

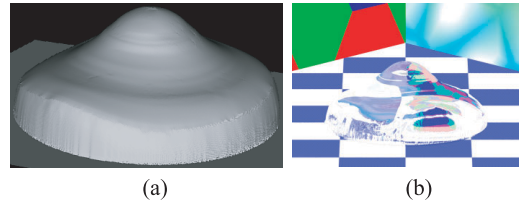


図 13 (a) シェーディング画像 (b) レイトレーシング画像
Fig. 13 (a) Shading image, (b) raytracing image

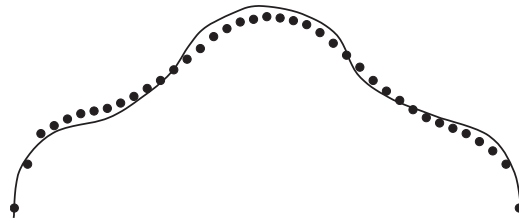


図 14 実測値と理論値の比較
Fig. 14 Obtained value and theoretical value

誤差は約 0.4mm であった．ただし，先ほども述べたとおり，高さの誤差に関しては参考程度にとどめていただきたい．

6. 結 び

本論文では従来非接触では困難と思われてきたガラスやアクリルやプラスチックなどの透明な物体の表面形状を計測する簡便で安価な手法を提案した．

偏光度から物体の表面法線を求める際の曖昧性の問題を，物体を微小回転させることにより解決する手法を，ガウス球を使って説明した．テクスチャのない鏡面物体は対応点を探し出すことは比較的困難だが，本論文では折り返しという性質を利用して対応点を求めることに成功した．さらに，折り返し線が幾何学的に重要な性質である放物的曲線であることを証明した．

本論文の最後に透明物体の表面形状を計測した結果を示して本手法の有効性を実証した．

今後の課題としては精度の向上があげられる．精度の低下の最も大きな要因は透明物体の相互反射である．今後は透明物体の表面だけでなく裏面の影響も考慮して計測する手法を開発しなければならない．

また， ϕ の決定方法も改善すべきである．それによってどのような凹物体でも計測できるようになる．しかし，凹物体は相互反射の影響が大きいため，その点からも，相互反射を考慮した手法の開発が必要となる．

その後，屈折率や半透明物体の計測，任意光源環境下における計測，などを研究する予定である．

本手法の応用分野としては，部品の組み立てや資源

ゴミの分別，河川の波の計測などの工業分野のほか，文化財のデジタル的保存や映画製作，オンラインショッピング用のカタログ作成などのエンターテインメント分野が考えられる．その第1歩として本論文では透明物体の表面形状を計測する手法の基礎を築いた．

近年，液晶を用いて光の偏光状態を実時間で計測する装置の開発が進められている^{5),6),27)}．本手法をカメラ2台で実装すれば実時間で計測することができ，プロジェクトや遺伝的アルゴリズムを用いた Hata ら⁸⁾の手法と比べて将来的な応用分野は広いと思われる．

参 考 文 献

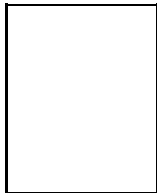
- 1) Bhat, D.N. and Nayar, S.K.: Stereo and Specular Reflection, *Int. J. Comput. Vis.*, Vol.26, No.2, pp.91-106 (1998).
- 2) Born, M. and Wolf, E.: *Principles of Optics*, p.803, Pergamon Press (1959).
- 3) do Carmo, M.P.: *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, p.503, Prentice-Hall (1976).
- 4) Chuang, Y., Zongker, D.E., Hindorff, J., Curless, B., Salesin, D.H. and Szeliski, R.: Environment Matting Extensions: Towards Higher Accuracy and Real-time Capture, *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp.121-130 (2000).
- 5) Fujikake, H., Takizawa, K., Aida, T., Kikuchi, H., Fujii, T. and Kawakita, M.: Electrically-Controllable Liquid Crystal Polarizing Filter for Eliminating Reflected Light, *Opt. Rev.*, Vol.5, No.2, pp.93-98 (1998).
- 6) Harnett, C.K. and Craighead, H.G.: Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging, *Appl. Opt.*, Vol.41, No.7, pp.1291-1296 (2002).
- 7) Hata, S.: Shape Detection of Small Specular Surface using Color Stripe Lighting, *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, pp.1:554-557 (1992).
- 8) Hata, S., Saitoh, Y., Kumamura, S. and Kaida, K.: Shape Extraction of Transparent Object using Genetic Algorithm, *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, pp.684-688 (1996).
- 9) Horn, B.K.P.: *Robot Vision*, p.509, MIT Press (1986).
- 10) Ikeuchi, K.: Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.3, No.6, pp.661-669 (1981).
- 11) Ikeuchi, K.: Reconstructing a Depth Map from Intensity Maps, *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, pp.736-738 (1984).
- 12) Koenderink, J.J.: *Solid Shape*, p.699, MIT Press (1990).
- 13) Koshikawa, K.: A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects, *Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp.493-495 (1979).
- 14) Koshikawa, K. and Shirai, Y.: A Model-based Recognition of Glossy Objects using their Polarimetric Properties, *Adv. Robot.*, Vol.2, No.2, pp.137-147 (1987).
- 15) Miyazaki, D., Saito, M., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Determining Surface Orientations of Transparent Objects Based on Polarization Degrees in Visible and Infrared Wavelengths, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.19, No.4, pp.687-694 (2002).
- 16) Murase, H.: Surface Shape Reconstruction of an Undulating Transparent Object, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp.313-317 (1990).
- 17) Nayar, S.K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surface by Photometric Sampling, *IEEE Trans. Rob. Autom.*, Vol.6, No.4, pp.418-431 (1990).
- 18) Oren, M. and Nayar, S.K.: A Theory of Specular Surface Geometry, *Int. J. Comput. Vis.*, Vol.24, No.2, pp.105-124 (1997).
- 19) Rahmann, S. and Canterakis, N.: Reconstruction of Specular Surfaces using Polarization Imaging, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.1:149-155 (2001).
- 20) Saito, M., Sato, Y., Ikeuchi, K. and Kashiwagi, H.: Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects using Polarization in Highlight, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.381-386 (1999).
- 21) Saito, M., Sato, Y., Ikeuchi, K. and Kashiwagi, H.: Measurement of Surface Orientations of Transparent Objects by use of Polarization in Highlight, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.16, No.9, pp.2286-2293 (1999).
- 22) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-color Space Analysis of Reflection, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.11, No.11, pp.2990-3002 (1994).
- 23) Schechner, Y., Shamir, J. and Kiryuati, N.: Polarization-based Decorrelation of Transparent Layers: The Inclination Angle of an Invisible Surface, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision*, pp.814-819 (1999).
- 24) Szeliski, R., Avidan, S. and Anandan, P.: Layer Extraction from Multiple Images Containing Reflections and Transparency, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.246-253 (2000).
- 25) Wolff, L.B.: Polarization-based Material Clas-

sification from Specular Reflection, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.12, No.11, pp.1059-1071 (1990).

- 26) Wolff, L.B. and Boulton, T.E.: Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol.13, No.7, pp.635-657 (1991).
- 27) Wolff, L.B., Mancini, T.A., Pouliquen, P. and Andreou, A.G.: Liquid Crystal Polarization Camera, *IEEE Trans. Rob. Autom.*, Vol.13, No.2, pp.195-203 (1997).
- 28) Zongker, D.E., Warner, D.M., Curless, B. and Salesin, D.H.: Environmental Matting and Compositing, *Proc. SIGGRAPH 99*, pp.205-214 (1999).

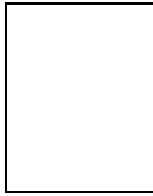
(平成 14 年 9 月 5 日受付)

(平成 15 年 3 月 28 日採録)



宮崎 大輔 (学生会員)

1977 年生 . 2002 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了 . 同年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程進学 . Physics-based vision (特に偏光解析) の研究に従事 . 理学修士 . 2000 年 VSMM 論文賞受賞 .



池内 克史 (正会員)

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業 . 1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了 . 工学博士 . MIT 人工知能研究所 , 電総研 , CMU 計算機科学部 , 東京大学生産技術研究所を経て , 2000 年度より東京大学大学院情報学環教授 . 人間の視覚機能 , 明るさ解析 , 物体認識 , 人間による組立作業の自動認識等の研究に従事 . 論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R & A 誌-98, 日本 VR 学会論文誌-00) 等受賞 . IROS-95, ITSC-99 実行委員長 , CVPR-96, ICCV-03 プログラム委員長等 . 人工知能学会 , 日本ロボット学会 , 日本バーチャルリアリティ学会 , OSA , IEEE 各会員 IEEE fellow . 2000 年度 IEEE SP ソサイエティー Distinguished Lecturer .