

宮崎 大輔, 池内 克史,
"偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法,"
電子情報通信学会論文誌D-II,
Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1432-1439, 2005年8月.

偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法

宮崎 大輔[†] 池内 克史[†]

A Method to Estimate Surface Shape of Transparent Objects by Using Polarization Raytracing Method

Daisuke MIYAZAKI[†] and Katsushi IKEUCHI[†]

あらまし 透明な物体の形状を計測する簡便な手法は少ない。本論文では光の偏光状態を解析することにより透明物体の表面形状を推定する手法を提案する。従来の方法は透明物体内部を光が反射・屈折・透過する現象を詳しく解析していないため十分な精度が得られない。提案手法では光の偏光状態と光の反射・屈折・透過を計算する方法として偏光レイトレーシング法を用いる。偏光レイトレーシング法でレンダリングされた偏光データと実物体の偏光データとの差を提案する反復計算法で最小化することにより、従来法よりも高い精度で透明物体の表面形状を推定する。

キーワード 偏光, 形状推定, 透明物体, レイトレーシング, ミュラー計算法

1. ま え が き

コンピュータビジョンの分野では不透明な物体の形状を計測する研究は多いが、それに比べて透明な物体の形状を計測する研究は少ない。その原因の一つとして、光が透明物体の内部で多数回反射・屈折・透過する現象である内部相互反射（内部反射, 相互反射）の影響を扱うことが難しいという点が挙げられる。本論文では、透明物体の内部相互反射を解析することにより透明物体の表面形状を計測する手法を提案する。

光の振動方向が偏る物理現象および偏った光を偏光という。偏光を用いて物体の形状を計測する手法はいくつか提案されている。Koshikawa と Shirai [1] は、円偏光を用いて鏡面性の表面を持つ多面体の法線を求めた。彼らは光の偏光状態を計算する方法としてミュラー計算法を用いた。Wolff と Boulton [2] は、二つの方向からガラス板を観測してその面の法線を求めた。Rahmann と Canterakis [3] は、二つ以上の方向から鏡面物体を観測してその形状を計測した。Miyazaki ら [4] は、一つの視点から鏡面物体の形状と反射率, 光源方向を推定した。透明物体の形状計測手法もいくつか提案されている。Saito ら [5] は、偏光を使って透明物

体の表面形状を計測する枠組みを提案した。Miyazaki ら [6], [7] は Saito らの手法を改良した透明物体の形状計測手法を提案した。Murase [8] は、水面の波を解析して水面の形状を推定した。Hata ら [9] は、透明物体に直線の光を当て、その直線が変形する様子から、透明物体の表面形状を計測した。Ohara ら [10] は、カメラのフォーカスを調節することにより、透明物体のエッジ部分とカメラとの距離を推定した。Ben-Ezra と Nayar [11] は、動画像を用いて、パラメータで表現可能な曲面をもつ透明物体の三次元形状を計測した。

これらの手法は最大でも 2 ~ 3 回の反射または透過しか考慮せず、多数回の反射や透過は考慮していない。本論文では、偏光を考慮したレイトレーシング法を用いて透明物体の内部で発生する多数回の相互反射を計算することで、透明物体の表面形状をより高精度で推定するための基礎理論を提案する。まず、2. で偏光レイトレーシング法を説明し、3. で本論文の主題である透明物体の形状計測手法を提案する。4. で提案手法の適用結果を示し、5. で結論を述べる。

2. 偏光レイトレーシング法

2.1 偏光に関する用語の定義

この章では偏光に関する用語を定義する。偏光に関する詳しい理論は参考文献にゆだねる [12]。

図 1 は、媒質 1 と媒質 2 の境界で光が反射と透過を

[†] 東京大学生産技術研究所, 東京都

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

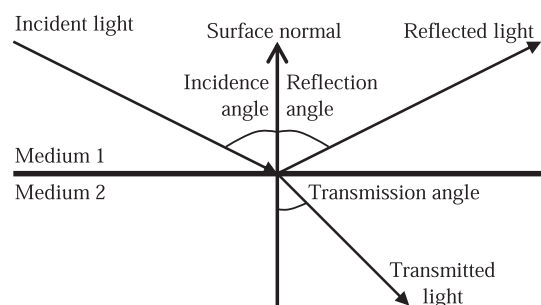


図 1 反射・屈折・透過

Fig. 1 Reflection, refraction, and transmission.

する様子を表している．本論文では，媒質 1 と媒質 2 はそれぞれ空気と透明物体，あるいはその逆である．本論文では光学的に滑らかな物体のみを対象としているため入射角と反射角は一致する．透過角は入射角 (= 反射角) と透明物体の屈折率に依存する．表面法線ベクトルと入射光ベクトル，反射光ベクトル，透過光ベクトルは全て同一平面にのる．この平面を入射面と呼ぶ．

反射光の入射光に対する輝度の割合を強度反射率 R と呼び，透過光の入射光に対する輝度の割合を強度透過率 T という．入射面に平行 (垂直) な要素を添字 \parallel (\perp) で表す．強度反射率の平行成分を R_{\parallel} ，垂直成分を R_{\perp} で表し，強度透過率の平行成分を T_{\parallel} ，垂直成分を T_{\perp} で表す．これらの値は入射角と屈折率に依存する．相対屈折率が 1.5 のときのこの四つの値のグラフを図 2 に示す．横軸が入射角であり，縦軸が強度反射率及び強度透過率である．これらの値は二つの媒質の屈折率から数学的に計算される値である．直線偏光板を入射面に対して平行に配置して反射光を観測すると反射光の平行成分のみが観測され，偏光板を垂直に配置すると垂直成分のみが観測される．平行成分の輝度と垂直成分の輝度は図 2 のグラフにあるように入射角に依存している．入射角は入射光ベクトルと法線ベクトルのなす角であるから，偏光板で物体の反射光や透過光を観測することによって，物体表面の法線に関する情報を得ることができるとわかる．

光の偏光状態を計測するために直線偏光板をカメラの前に置いて物体を観測する．一つの画素において，偏光板を回転して観測される最大輝度値を I_{\max} ，最小輝度値を I_{\min} と表記する．最小輝度値 I_{\min} が観測されるとき偏光板の角度を位相角 ψ と呼ぶ．

図 3 では二つの座標系， $x'y'z'$ 座標系と xyz 座標

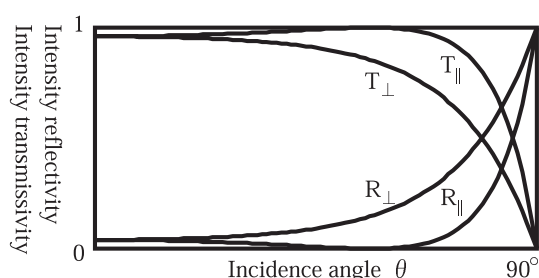


図 2 強度反射率と強度透過率

Fig. 2 Intensity reflectivity/transmissivity.

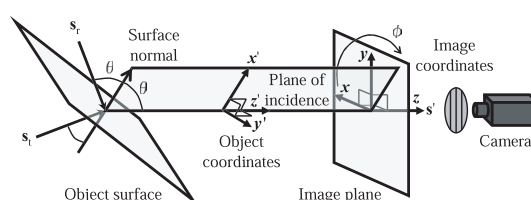


図 3 光が反射・透過してカメラに観測される様子

Fig. 3 The light reflected and transmitted observed by the camera.

系，が示されている．ここで， z' 軸と z 軸は一致しており， x' 軸は入射面に含まれ，法線と同じような方向を向いている． $+x'$ 軸と $+x$ 軸とのなす角を xyz 座標系から見たときの入射面角度 φ と呼ぶ．

2.2 ミュラー計算法

古典的なレイトレーシング法 (光線追跡法，視線探索法) は透明物体などの三次元形状が与えられたときにそれに対応する二次元画像をレンダリングする手法である．偏光を用いたレイトレーシング法を本論文では偏光レイトレーシング法と呼ぶ．偏光レイトレーシング法の機能は，(1) 光線の動きを計算する機能，と，(2) 光の偏光状態を計算する機能，に分けられる．光線を追跡する機能に関しては古典的なレイトレーシング法のアルゴリズムを用いる．光の偏光状態の変化を計算する方法にはミュラー計算法とジョーンズ計算法 [13]，コヒーレンス行列を用いた方法 [12] がある．本論文では記述・理解・実装の簡便さからミュラー計算法を採用する．これら三つの計算法の機能はほぼ同等であるため，本論文で議論した内容はそのまま他の計算法に対しても適用可能である．以降でミュラー計算法を概説するが，詳しい理論は参考文献にゆだねる [13]．

ミュラー計算法では光の偏光状態をストークスペクトル $s = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ で表す．ストークスペクトル

ルは四次元ベクトルであり、最初の要素 s_0 は光の輝度を表し、2番目の要素 s_1 はある座標系における x 軸方向の直線偏光の強さを表し、3番目の要素 s_2 はその座標系の x 軸と y 軸との間の斜め $+45^\circ$ の直線偏光の強さを表し、4番目の要素 s_3 は右円偏光の強さを表す。ミュラー計算法では、物質が光の偏光状態をどのように変化させるかをミュラー行列 M で表す。ミュラー行列は 4×4 行列である。

2.3 反射・透過・回転ミュラー行列

入射面角度が 0° のときの反射と透過を表すミュラー行列、 R と T 、は以下のように表される：

$$R(\theta; n) = \begin{pmatrix} (R_{\parallel} + R_{\perp})/2 & (R_{\parallel} - R_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ (R_{\parallel} - R_{\perp})/2 & (R_{\parallel} + R_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{R_{\parallel}R_{\perp}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T(\theta; n) = \begin{pmatrix} (T_{\parallel} + T_{\perp})/2 & (T_{\parallel} - T_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ (T_{\parallel} - T_{\perp})/2 & (T_{\parallel} + T_{\perp})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{T_{\parallel}T_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{T_{\parallel}T_{\perp}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ここで、 θ と n はそれぞれ入射角と屈折率である。2.1 で記したとおり、 R_{\parallel} 、 R_{\perp} 、 T_{\parallel} 、 T_{\perp} は入射角と屈折率から計算できる。

図3は入射面角度が φ である場合を表している。このときの反射光のストークスペクトルは、入射面角度を 0° に変換した入射光のストークスペクトルに反射ミュラー行列 R をかけることによって計算できる。すなわち、まず、入射光のストークスペクトル s を角度 $-\varphi$ だけ回転する。次に R を、変換したストークスペクトルにかける。最後にストークスペクトルを角度 φ だけ回転して元の座標系に戻す。透過光についても同様である。図3では観測光は反射光と透過光の和であるので、観測光のストークスペクトル s' は以下のように計算される：

$$s' = C(\varphi)RC(-\varphi)s_r + C(\varphi)TC(-\varphi)s_t, \quad (3)$$

ただし、入射光のストークスペクトルは s_r と s_t で表されており、 s_r と s_t はそれぞれ反射する前の光と透過する前の光を表している。また、回転ミュラー行列

C は以下で表される：

$$C(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & 0 \\ 0 & \sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

2.4 位相の変化

物体内部の光が空気との境界で反射するとき、入射角が臨界角より大きいと、光は透過せず、全反射する。臨界角は相対屈折率によって定まる角度である。全反射においては反射光の位相がずれるため、以下の行列を反射ミュラー行列の代わりに用いる：

$$D(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (5)$$

ただし、 δ は位相のずれを表し、入射角と相対屈折率に依存する。

また、入射角がブリュースタ角以下のときは、反射光の位相が反転するため、反射ミュラー行列の左から行列 $D(180^\circ)$ をかける。ブリュースタ角も相対屈折率によって定まる角度である。

2.5 偏光度

本研究では直線偏光板によって光を観測するため、右円偏光の強さを表すストークスペクトルの4番目の成分 s_3 を計測することはできない。ストークスペクトル $(s_0, s_1, s_2)^T$ と I_{\max} 、 I_{\min} 、 ψ (2.1) とは以下の関係にある：

$$\begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & -\sin 2\psi \\ 0 & \sin 2\psi & \cos 2\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{\max} + I_{\min} \\ I_{\max} - I_{\min} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

偏光度とは光がどれだけ偏光しているかを表す指標であり、以下の式で定義されている：

$$\hat{\rho} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}. \quad (7)$$

しかし、直線偏光板で計測できる偏光度は以下の値となる：

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}. \quad (8)$$

以降では偏光度と記述した場合は式(8)で計算された値を指すものとする。

2.6 光源分布

本論文では、物体の正面が全方向から一様な輝度で照射されており、光源は非偏光であると仮定する。ただし、物体の正面と背面には異なる輝度の光で照射されているものとする。

3. 逆偏光レイトレーシング法

本論文では、透明物体を観測したとき手前に見える面を正面、奥に見える面を背面と呼ぶ。この章では、背面形状と屈折率を既知とし、位相角と偏光度のデータを入力として、透明物体の正面形状を推定する手法を提案する。なお、数値計算法の詳細は参考文献にゆだねる [14]。

入力偏光度を $I_E(x, y)$ と表記する。 (x, y) は画素の位置を表す。2. の手法を使えば、透明物体の形状が与えられたとき、偏光データをレンダリングすることができる。そのレンダリングした偏光データを $I_R(x, y)$ と表記する。透明物体の形状は高さ $H(x, y)$ で表す。なお、表現の簡略化のため (x, y) という引数は以降省略する。高さを x 軸と y 軸でそれぞれ偏微分した値をこう配といい、 p と q で表す：

$$p = H_x = \frac{\partial H}{\partial x}, \quad q = H_y = \frac{\partial H}{\partial y} \quad (9)$$

こう配は法線 $(-p, -q, 1)^T$ を表している。

レンダリングした偏光データ I_R は、高さと同法線に依存するため、以降では $I_R(H, p, q)$ と表記する。我々の問題は、以下の方程式に最も当てはまる表面形状 H の値を求めることである：

$$I_E = I_R(H, p, q) \quad (10)$$

ここから、誤差関数として下式が定義できる：

$$\iint E_1 dx dy, \quad (11)$$

ただし、

$$E_1 = (I_E - I_R(H, p, q))^2 \quad (12)$$

H と p, q は式 (9) で依存し合っているため、誤差関数を以下のように修正する：

$$\iint (\lambda E_1 + E_2) dx dy, \quad (13)$$

ただし、

$$E_2 = (H_x - p)^2 + (H_y - q)^2 \quad (14)$$

ここで、 λ はラグランジュの未定乗数である。

式 (13) を最小化するオイラー方程式は以下のとおりとなる：

$$p = H_x - \frac{\lambda}{2} \frac{\partial E_1}{\partial p} \quad (15)$$

$$q = H_y - \frac{\lambda}{2} \frac{\partial E_1}{\partial q} \quad (16)$$

$$H = \bar{H} - \frac{1}{4}(p_x + q_y) - \frac{\lambda}{8} \frac{\partial E_1}{\partial H} \quad (17)$$

ここで、 \bar{H} は H の 4 近傍平均を表す。これら三つの式をそれぞれ二段階に分ける：

$$p^{(k)} = H_x^{(k)} \quad (18)$$

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} - \lambda_1^{(k+1)} \frac{\partial E_1^{(k)}}{\partial p} \quad (19)$$

$$q^{(k)} = H_y^{(k)} \quad (20)$$

$$q^{(k+1)} = q^{(k)} - \lambda_2^{(k+1)} \frac{\partial E_1^{(k)}}{\partial q} \quad (21)$$

$$H^{(k+1)} = \bar{H}^{(k)} - \frac{1}{4}(p_x^{(k+1)} + q_y^{(k+1)}) \quad (22)$$

$$H^{(l)} = H^{(l)} - \lambda_3^{(l)} \frac{\partial E_1^{(l)}}{\partial H} \quad (23)$$

ここで、添字 (k) は反復回数を表す。式 (23) は後述する理由により使用しないため、反復回数を表す添字を省略した。また、 λ_1 と λ_2, λ_3 は各ループ各画素ごとに決まるスカラー値である。

まず、適当な初期形状 H を正面の各画素に対して与える。続いて、式 (18) と式 (20) により p と q を計算する。次に、誤差関数 E_1 が最小となる λ_1 と λ_2 を Brent の方法で求め、式 (19) と式 (21) を解く。すべての画素で p と q を求めたのち、高さ H を求めるため式 (22) を弛緩法 (緩和法) で解く。弛緩法の実装には ADI (alternating-direction implicit) 法を用いた。高さの変化に対して誤差関数 E_1 はあまり変化せず、変化しても滑らかに変化しないことが多いことが予備実験により確認されたため、本研究では式 (23) は解かなかった。

以上、式 (18) ~ (22) を一通り解く作業を 1 ループとして、式 (11) が十分小さくなるまで反復計算をすることで透明物体の正面形状を求める。式 (18) ~ (22) のそれぞれの計算に対して最適な数値計算手法を用いることができるため、式 (15) ~ (17) ではなく式 (18) ~ (22) を解いた。

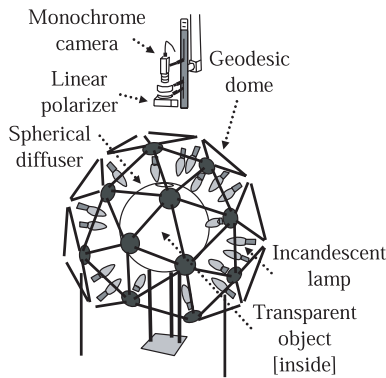


図 4 計測装置 “コクーン”
Fig. 4 Acquisition system “Cocoon”.

4. 実験結果

4.1 計測装置

偏光データ取得のための計測装置 “コクーン” を図 4 に示す．直径 35cm のプラスチック球内部の中心に計測対象物体を配置する．このプラスチック球を 36 個の白熱電球で照らす．36 個の光源はこのプラスチック球の周囲を空間的にほぼ均等に配置する．この光源で照らされたプラスチック球が光を拡散し，この球が球面光源として働き，計測対象物体をすべての方向から照らす．プラスチック球の上部には小さな穴が開いており，そこから対象物体をモノクロカメラで撮影する．直線偏光板はカメラと穴の間に配置する．また，黒いプラスチックのパイプの上に計測対象物体を置き，背面の下方からの光が非偏光で一様となるようにした．

直線偏光板を回転すると観測輝度が正弦的に変化する．直線偏光板を三つ以上の異なる角度で回転して得られた画像をもとに，その正弦関数を最小二乗法により求めることができる．そして，その関数の最大値を I_{max} ，最小値を I_{min} ，最小値のときの偏光板の角度を ψ とする (2.1)．本実験では，偏光板を $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ に回して 4 枚の画像を計測して I_{max}, I_{min}, ψ を計算した．

4.2 レンダリング結果

透明物体の形状計測を行う前に，偏光レイトレーシング法のレンダリング (2.) の一例を示す．屈折率 1.5，直径 30mm の透明アクリル半球を曲面側から観測した．正面形状が半球面で，背面形状が円盤である．カメラは円盤に垂直な方向に配置した．計測によって得られた偏光データを図 5(a) に示す．この図は偏光度を

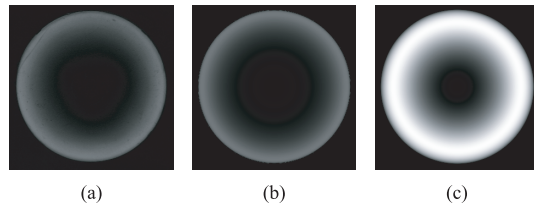


図 5 偏光度: (a) 実データ, (b) 偏光レイトレーシング法でレンダリングしたデータ, (c) 内部相互反射が発生しないと仮定してレンダリングしたデータ

Fig. 5 Degree of polarization: (a) Real data, (b) data rendered by polarization raytracing method, (c) data rendered by assuming the internal interreflection does not occur.

表しており，黒と白はそれぞれ偏光度 0 と 1 を表す．

偏光レイトレーシング法のレンダリング結果を図 5(b) に示す．レンダリングに必要なパラメータは屈折率と物体形状，光源分布であるが，屈折率と物体形状は既知とした．光源分布に関しては，正面に照射する光の輝度と背面に照射する光の輝度の比を取得する必要がある．物体を配置した状態で背面に照射する光を計測することは現実的に無理がある．そこで，計測した偏光度 (図 5(a)) と計算した偏光度 (図 5(b)) が最も近くなる輝度の比を計算した．図 5(b) はこうして求めた光源分布をもとに計算した結果である．

比較のために，透明物体内部の内部相互反射を考慮していない，一回の反射のみを考慮して計算された偏光度の値を図 5(c) に示す．計測した偏光度 (図 5(a)) と内部相互反射を考慮せずに計算された偏光度 (図 5(c)) の間の RMS 誤差 (平均二乗誤差) は 0.48 であり，計測した偏光度 (図 5(a)) と偏光レイトレーシング法で計算した偏光度 (図 5(b)) の間の RMS 誤差は 0.055 であった．

4.3 シミュレーション結果

次に，シミュレーションで生成した入力データに対して提案手法を適用した結果を示す．解析は二次元平面上で行った．屈折率が 1.5 の六角形の形状をした仮定の透明物体を解析の対象とする．その図形を図 6 の破線と点線で示した．これを図の上方から下向きに観測したときの偏光データをレンダリングし，その偏光データを入力として六角形の正面形状を推定する．光源分布は既知とする．

推定結果を図 6 に示す．破線が理論形状であり，実線が推定された正面形状である．図 6(a) は初期値を表しており，図 6(b)(c) は提案手法でそれぞれ 3 ループ，30 ループ計算した結果である．初期値は半円を用

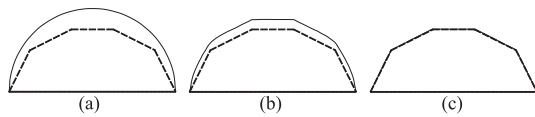


図 6 シミュレーション結果: (a) 初期値, (b)(c)3, 30 ループ計算した結果

Fig. 6 Simulation result: (a)Initial state, (b)(c)result after 3, 30 loops.

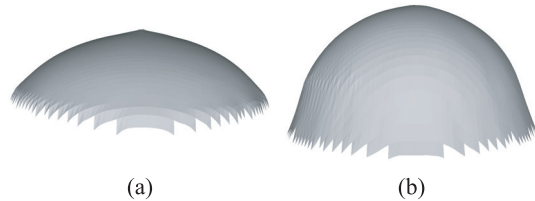


図 7 推定結果: (a) 初期値 (従来法の結果), (b)10 ループ計算した結果

Fig. 7 Estimation result: (a)Initial state (result of previous method), (b)result after 10 loops.

いた。30 ループ目には理論形状とほぼ合致した。

4.4 実半球物体の計測結果

実物体を対象とした実験ではまず、4.2 と同じ半球物体を使用した。光源分布は 4.2 と同じ値を使用した。この光源分布は同じ半球物体を使用して求められたものであり、より客観的な実験結果は 4.5 で提示する。

推定結果を図 7 に示す。図 7(a) は初期値ならびに従来法 [5] ~ [7] での結果を表しており、図 7(b) は 10 ループ計算した結果である。計算時間は Pentium4 3.4GHz のマシンで 1 ループ当たり 36 秒であった。ただし、画素数は 7,854 点であり、Brent の方法と ADI 法の反復回数はそれぞれ 8 と 24 にした (3.)。光線の追跡は最大 10 回とし、光線の輝度がしきい値以下になったら光線の追跡を打ち切った。すなわち、全てのミューラー行列をかけた後とかける前のストークスペクトルの第 1 成分 s_0 の比がしきい値以下の場合観測光のストークスペクトルとしては使用しなかった。本実験ではしきい値として $1/256$ を用いた。

より詳細な解析を行うために、この三次元物体の断面である二次元平面でも計算を行った。本実験で使用した断面は、底面の円の中心とその円に垂直な直線を含む平面である。この平面内の光はこの平面を出ず、この平面の外側の光はこの平面の中には入ってこない。このようにして得られた一次元偏光データを入力として半円の正面形状を提案手法により推定した。

提案手法を適用した結果を図 8(1c)(2c) に示す。図 8 では、実線が推定された形状を表し、破線が理論形

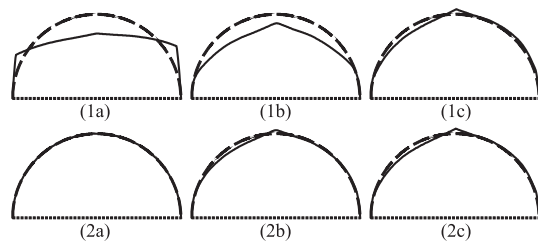


図 8 推定結果: (1a) 初期値 (従来法の結果), (1b)(1c)5, 50 ループ計算した結果, (2a) 初期値 (理論値), (2b)(2c)5, 50 ループ計算した結果

Fig. 8 Estimation result: (1a) Initial state (result of previous method), (1b)(1c) result after 5, 50 loops, (2a) Initial state (true shape), (2b)(2c) result after 5, 50 loops.

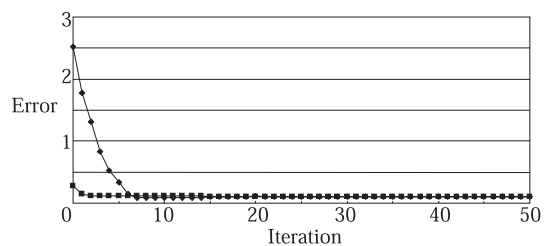


図 9 各ループごとの誤差: (四角) 理論値を初期値とした計算結果, (菱形) 従来法の結果を初期値とした計算結果

Fig. 9 Error for each loop: (square) Result when true shape is initial value, (diamond) result when result of previous method is initial value.

状を表す。図 8(1c) の初期値としては、従来法の結果 (図 8(1a)) を用いた。図 8(2c) の初期値としては、理論値である半球 (図 8(2a)) を用いた。図 8(1b)(2b) と図 8(1c)(2c) はそれぞれ、反復計算で 5, 50 ループ計算した結果である。初期値を従来法の結果にしても理論形状にしても、ほぼ同じ形状に収束した (図 8(1c)(2c))。

反復回数ごとの誤差関数 (式 (11)) の値をプロットしたグラフを図 9 に示す。図 9 の縦軸は式 (11) の値を表し、横軸は反復回数を表す。菱形は初期値が従来法での結果の場合の計算結果である (図 8(1a)(1b)(1c))。四角は初期値が理論形状の場合の計算結果である (図 8(2a)(2b)(2c))。左端の値は初期値での誤差である。8 ループ目を過ぎたあたりからは誤差にほとんど変化がなく、形状もほとんど変化しなかった。

計算時間は Pentium4 3.4GHz のマシンで 1 ループ当たり 8.4 秒であった。ただし、画素数は 320 点であり、Brent の方法と ADI 法の反復回数はそれぞれ 8

と 24 にした．光線の追跡は最大 100 回とし，光線の輝度がしきい値 $1/2.56$ 以下になったときに光線の追跡を打ち切った．

推定形状の上部に突起状の雑音に加わっている原因としては，プラスチック球の上部に空いた穴を考慮していなかったことが考えられる．計測対象物体の正面はすべての方向から同じ輝度で照射されていると仮定したが，この穴に対してはこの仮定が成り立たない．このような光源分布の違いを考慮することは今後の課題である．

従来法と提案手法の RMS 誤差を比較した．RMS 誤差は推定値と理論値との差から計算した．従来法の法線誤差は 23.3° であり，提案手法では，初期値が従来法するとき 9.09° ，初期値が理論値のとき 8.86° であった．また，従来法の高さの誤差は 2.70mm であったが，提案手法は，初期値が従来法するとき 0.672mm ，初期値が理論値のとき 0.548mm であった．

観測光は正面で 1 回反射した光だけではなく，別の方向から入射した光が物体内部で反射してカメラに入る光も含まれる．従来法ではこのような内部相互反射を考慮していないため誤差が大きいが，提案手法ではこの内部相互反射を考慮しているため誤差が比較的小さい．

4.5 実ベル型物体の計測結果

最後に，図 10 に示す透明物体を計測した．この物体はアクリル製の回転体であり，屈折率が 1.5，底面の直径が 24mm である．物体の突起部の方向から観測した．正面形状が曲面で，背面形状が円盤である．カメラは円盤に垂直に配置した．

光源分布は 4.2 と同じ光源・同じ値を使用した．すなわち，半球物体を用いて求めた光源分布をこの物体に対して適用した．形状計測手法を提案することが本論文の目的であるため，正確な光源分布を求めることは今後の課題とする．

解析はこの三次元物体の断面である二次元平面で行った．底面の円の中心とその円に垂直な直線を含む平面を使用した．図 11(c) が推定結果である．実線が推定された正面形状であり，点線が既知の背面形状である．初期値は図 11(a) に示した半円を用いた．反復計算により 5，20 ループ計算した結果を図 11(b)(c) に示す．物体の横からの写真の輪郭をもとに理論値の形状を手入力で求め，本実験の推定形状と比較した結果，高さの RMS 誤差は 0.24mm であった．

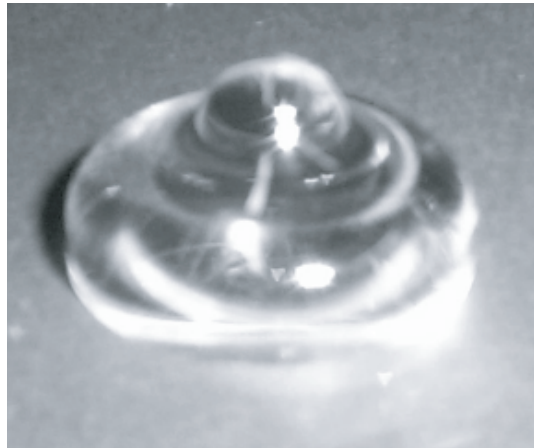


図 10 ベル型の透明アクリル実物体
Fig. 10 Bell-shaped transparent acrylic real object.

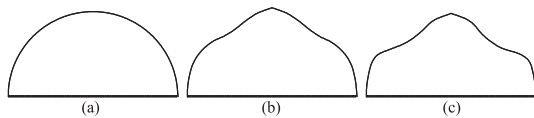


図 11 推定結果：(a) 初期値，(b)(c)5，20 ループ計算した結果

Fig. 11 Estimation result: (a) Initial value, (b)(c) result after 5, 20 loops.

5. む す び

本論文では，透明物体を計測して得られた入力偏光データと，偏光レイトレーシング法でレンダリングされた偏光データとの差を最小化することにより，透明物体の表面形状を推定する手法を提案した．また，現実の透明物体を計測して表面形状を推定した結果も示した．従来法は 1 回の反射しか考慮していなかったため推定精度が低かったが，提案手法は多数回の反射・透過を考慮したことにより精度が向上した．

多くの人工的な透明物体はそれ自体を自立させるため，底面が平面をしている場合が多いということと，材質が既知 (= 屈折率が既知) である場合が多く，本論文で設定した「背面形状と屈折率が既知」という仮定は多くの場合に有効である．しかし，この仮定が成り立たない物体も少なからず存在するので，正面の形状だけでなく，背面の形状や屈折率も計測できる手法を開発することが今後の課題である．

偏光レイトレーシング法の逆関数は解析的に解くことは不可能であるため，本論文では反復計算により透明物体の形状を計測した．本論文では一様な光源下で

観測を行ったが, Hataら [9] は光源を変化させて透明物体の形状を反復計算により求めた. また, Ben-Ezraと Nayar [11] は, 多視点から透明物体を観測して, 反復計算により形状を求めた. 今後の研究として, 精度向上のため, 光源を変化させたり, 視点を増やしたりすることが考えられるが, いずれも反復計算が必要となると思われる. 本論文では, 今後の研究の基礎となる反復計算による透明物体の形状計測手法を提案した.

本研究の将来的な応用分野としては, 文化財のデジタル的保存, ネットショッピングでの三次元カタログの製作, 透明な製品の組み立てロボット, などが考えられる. このような応用に適用することが本研究の最終目標であり, 本論文ではその最初の段階である基礎研究を行った.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省「知的資産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア基盤技術の構築」事業の助成により行われた. 筆者の一人, 宮崎大輔は, 独立行政法人日本学術振興会より特別研究員として助成を受けている. 記して謝意を表す.

文 献

- [1] K. Koshikawa and Y. Shirai, "A model-based recognition of glossy objects using their polarimetric properties," *Advanced Robotics*, vol.2, no.2, pp.137-147, 1987.
- [2] L.B. Wolff and T.E. Boult, "Constraining object features using a polarization reflectance model," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.13, no.7, pp.635-657, July 1991.
- [3] S. Rahmann and N. Canterakis, "Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.149-155, Kauai Marriott, Hawaii, Dec. 2001.
- [4] D. Miyazaki, R.T. Tan, K. Hara, and K. Ikeuchi, "Polarization-based inverse rendering from a single view," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp.982-987, Nice, France, Oct. 2003.
- [5] M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, and H. Kashiwagi, "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, Sept. 1999.
- [6] D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "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, April 2002.
- [7] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi, "Transparent surface modeling from a pair of polarization images," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.26, no.1, pp.73-82, Jan. 2004.
- [8] H. Murase, "Surface shape reconstruction of a non-

rigid transparent object using refraction and motion," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.14, no.10, pp.1045-1052, Oct. 1992.

- [9] S. Hata, Y. Saitoh, S. Kumamura, and K. Kaida, "Shape extraction of transparent object using genetic algorithm," *Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition*, pp.684-688, Vienna, Austria, Aug. 1996.
- [10] K. Ohara, M. Mizukawa, K. Ohba, and K. Taki, "3D modeling of micro transparent object with integrated vision," *Proc. IEEE Conf. Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp.107-112, Tokyo, Japan, July-Aug. 2003.
- [11] M. Ben-Ezra and S.K. Nayar, "What does motion reveal about transparency?," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp.1025-1032, Nice, France, Oct. 2003.
- [12] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, London, 1959.
- [13] W.A. Shurcliff, *Polarized light: production and use*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1962.
- [14] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1992.

(平成 16 年 10 月 6 日受付, 17 年 2 月 7 日再受付)

宮崎 大輔



情報処理学会, IEEE 各会員.

池内 克史 (正員)



1973 京大・工・機械卒. 1978 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程了. 工博. 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, 仮想現実感モデルの自動生成等の研究に従事. 論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, 日本ロボット学会誌-97, IEEE R & A 誌-98, MIRU-00, 日本 VR 学会論文誌-00, VSMM-00) 等受賞. IROS-95, ITSC-99, IV-01 実行委員長, CVPR-96, ICCV-03 プログラム委員長等. IJCV 編集委員長, IEEE TPAMI, IEEE R & A 誌, CVGIP, JOSA 編集委員など. 情報処理学会, 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
サイエティール Distinguished Lecturer.

Abstract There are few methods which easily measure the shape of transparent objects easily. In this paper, we propose a method to estimate the surface shape of transparent objects by analyzing the polarization state of the light. Previous methods do not provide enough accuracy because of the lack of deeply analyzing the light reflected, refracted, and transmitted inside the transparent object. Proposed method employs a polarization raytracing method to compute both the polarization state of the light and the reflection, refraction, and transmission of the light. Proposed iterative computation method, which minimizes the difference between the polarization data rendered by the polarization raytracing method and the polarization data obtained by a real object, estimates the surface shape of the transparent object with higher precision than previous methods.

Key words polarization, shape-from-X, transparent object, raytracing, Mueller calculus