

宮崎 大輔, 池内 克史,
"文化財のデジタル保存のための偏光を用いた透明物体形状計測手法,"
3D映像,
Vol.18, No.4 pp.12-22, 東京, 2004.12

文化財のデジタル保存のための 偏光を用いた透明物体形状計測手法

宮崎 大輔

池内 克史

東京大学情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻

<http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/>

Abstract Though there are many cultural assets which are made of glasses, most of the existing methods cannot estimate the shape of transparent objects with enough accuracy. We propose a novel method for estimating the surface shape of transparent objects by analyzing the polarization state of the light. We employ a method called Mueller calculus for calculating the polarization state of the light, and employ the ray-tracing method to track the path of the light rays. The polarization state of the object is measured by our acquisition system. By minimizing the difference between the obtained polarization data and the calculated polarization data, our proposed method estimates the surface shape of transparent object.

1. はじめに

世界にはガラスでできた美しい美術品が数多くあるが、それらはいつ何時損壊したり紛失したりするか分からない。特に、ガラス工芸品の場合、一度損壊してしまったら、修復しても継ぎ目が目立ってしまい、もとの美しさを復元することはできなくなる。そのため、そのような美術品の3次元データを計測してデジタル的に保存する技術の必要性が高まっている。しかし、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手法は数多く提案されているが、透明な物体の形状を計測する研究は少ない。接触型の計測装置でも透明物体の形状を計測できるが、装置が高価であり、平面に近い物体の形状しか計測できないという問題点がある。そこで、本論文では、平面以外の透明物体の形状が計測でき、装置が安価であるような計測装置ならびに計算手法を提案する。光は透明物体の表面で反射するだけでなく、物体内部に透過し、内部で何回も反射・透過する。この現象を内部反射(相互反射)という。本論文では、この内部反射を考慮することにより、既存の方法よりも高精度で透明物体の形状を推定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

¹Shape estimation method of transparent objects by using polarization for digitizing cultural assets
Daisuke Miyazaki and Katsushi Ikeuchi
Computer Science, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
Keywords: polarization, shape-from-X, transparent object, ray tracing, interreflection, Mueller calculus

偏光という。偏光を扱った研究は数多く提案されている [1] が、近年、偏光を用いて物体の形状を計測する研究も増え始めている。Koshikawa と Shirai [2, 3] 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。Wolff と Boulton [4, 5] は、2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 [6, 7] は、2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 [8] は、1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。Saito ら [9] 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 [10, 11] 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。これらの手法は内部反射(相互反射)を考慮していないため、十分な精度で透明物体の形状を計測できないという問題がある。偏光を用いたもの以外にも、透明物体の3次元形状を計測する手法がいくつか提案されている。Murase [12] は、水面の波を解析して水面の形状を推定した。Hata ら [13] 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 [14] 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 [15] は、動画像を用いて、パラメータで表現可能な曲面を持つ透明物体の3次元形状を計測した。これらの手法には、任意の形状をした透明物体の形状を推定できないという問題がある。

透明物体を扱った研究については、近年、推

定 [16–18] をさらに発展させた環境マッピング [19–24] という技術が話題になっている。これはまず、透明物体の周囲をテレビ画面などの光源で囲み、それぞれの光源を変化させながらカメラで透明物体を観察する。そして、どの方向にどれだけの光を物体に当てると、画像中のどの画素がどのように明るくなるかを計測する。この情報を用いると、別の光源環境が与えられたとき、その光源環境下での透明物体の見えを写實的に描画することが可能となる。また、Schechner ら [25, 26]、Szeliski ら [27]、および Farid と Adelson [28] は、ガラス面に奥のシーンと手前のシーンが重なって映っている場合に、その重なった画像からもとの2つのシーン、奥のシーンと手前のシーン、を分離する手法を提案した。その他にも、透明なロボットハンド [29] や透明物体の認識 [30] といった研究がある。ただし、これらの手法は透明物体の形状をほとんど推定していない。

その他に関連する研究としては、鏡面性の高い物体の3次元形状を計測する手法 [31–36] がいくつか提案されているが、いずれも透明物体を対象とした手法ではない。

以上の全ての手法には反射・屈折・透過を少し考慮した手法もあるものの、完全に内部反射を考慮した手法はない。本論文では、偏光を考慮したレイトレーシング法を使って、透明物体の内部反射の様子をシミュレートする。なお、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。提案手法は、背面形状と屈折率を既知とし、偏光を考慮したレイトレーシング法を用いて、任意の形状をした透明物体の正面形状をより高精度で推定する手法である。

以下に本論文の構成を示す。2章で提案手法を適用するにあたって必要となる仮定を示し、3章で偏光の基礎知識について述べ、4章で偏光を考慮したレイトレーシング法について述べる。5章では、偏光を考慮したレイトレーシング法の逆問題を解くことにより、透明物体の表面形状を推定する手法を提案する。6章で計測結果を示し、7章で結論を述べる。

2. 仮定

本論文では、以下の仮定のもと、透明物体の偏光データを計測し、それをもとに透明物体の正面形状を求める手法を提案する。ただし、1章で述べた通り、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。

- 1 物体は画像平面に正投影されている。
- 2 対象物体は透明で固体の誘電体である。
- 3 物質は等方的で、屈折率は一定値で既知である。
- 4 物体は光学的に滑らかである（粗くない）。
- 5 物体は幾何学的に滑らかである (C^1 曲面)。閉じた物体である。
- 6 視線方向に対する正面形状の自己遮蔽 (self occlusion) は無い。正面形状の高さを1価関数で表現できる。
- 7 物体全体が全て画像内におさまられている。
- 8 背面形状が既知である。
- 9 正面の初期形状はあらかじめ与える。
- 10 正面に当たる光は一樣で非偏光であり、背面には光は当たらない。

仮定1は本手法の限界ではなく直線偏光板の限界である。本手法そのものは透視投影の場合に拡張できるが、直線偏光板は垂直に光が入射したときに最大の効果が発揮できるように製造されているため、透視投影の場合に拡張するには直線偏光板も改良しなければならない。なお、正投影を仮定しているため、カメラと物体の間の絶対的な距離を求めることはできず、物体の相対的な表面形状を推定する。

固体であることを仮定2で導入したが、これは本手法の限界ではなく計測装置の限界である。本実験では機械的に偏光板を回転させる装置を使用したが、リアルタイムで偏光板を回転させる装置 [37–39] を使えば液体の表面形状も計測可能である。また、不透明物体の形状は既存の手法で計測できるため、透明物体のみを扱うことにする。

物体表面が粗い場合は既存の不透明物体形状計測手法を適用できるため、仮定4を導入した。

仮定5は、表面形状を微分して法線を求めることができることを表している。

仮定9に関してであるが、初期形状として従来法 [9–11] の計測結果を用いても良いし、おおまかな形状が分かっているなら人手で与えても良いだろう。

3. 偏光

この章では偏光に関する基礎知識を概説する。なお、詳しい理論は参考文献にゆだねる [40, 41]。

図1は、2つの媒質の境界で光が反射と透過する様子が描かれている。この2つの媒質の屈折率をそれぞれ n_1, n_2 とする。表面法線ベクトルと入

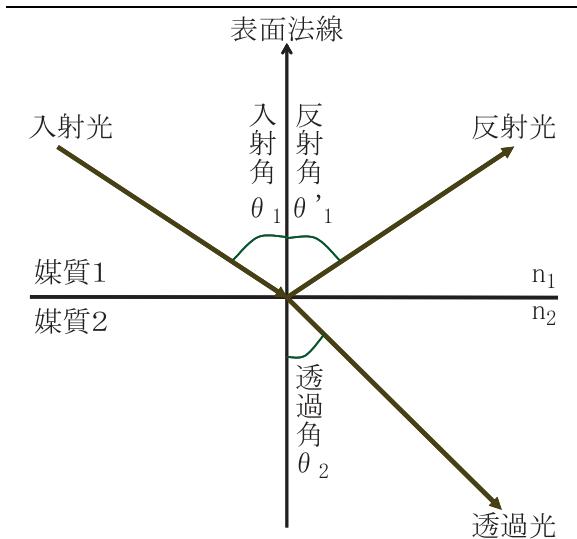


図 1: 反射・屈折・透過

射光ベクトルの逆方向との間の角度を入射角と呼び、 θ_1 と表記する．表面法線ベクトルと反射光ベクトルとの間の角度を反射角と呼び、 θ'_1 と表記する．透過光ベクトルと表面法線ベクトルの逆方向との間の角度を透過角と呼び、 θ_2 と表記する．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ので $\theta_1 = \theta'_1$ が成り立つ．入射角 θ_1 と透過角 θ_2 の間には以下の Snell の法則が成り立っている：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

反射光の入射光に対する輝度の割合を強度反射率と呼び、透過光の入射光に対する輝度の割合を強度透過率と言う．強度反射率と強度透過率を R と T で表す．光学的に滑らかな表面を扱っているので、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．入射面に平行な要素を添え字 \parallel で表し、入射面に垂直な要素を添え字 \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．これらの値は以下の通りである：

$$\begin{aligned} R_{\parallel} &= \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ R_{\perp} &= \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \\ T_{\parallel} &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2) \cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \\ T_{\perp} &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

光の偏光状態を計測するために直線偏光板をモノクロカメラの前に置き、物体を観測する．ある画

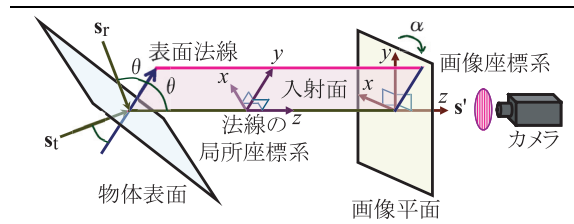


図 2: 光が反射・透過してカメラに観測される様子

素において、偏光板を回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．最大輝度値 I_{\max} が観測されるとき偏光板の角度を位相角 ψ と呼ぶ．この角度は、直線偏光板の向きを x 軸にそろえたときの角度を 0° として、 $+x$ 軸から $+y$ 軸に向かう角度として定義する．

いま、反射光をカメラで観測する配置を考える．このとき、入射面をカメラの画像平面に投影すると直線になる（図 2）．この直線と $+y$ 軸とのなす角を入射面角度 α と呼ぶ．この角度は $+y$ 軸から $-x$ 軸に向かう角度として定義する．

表面法線は極座標系 (θ, ϕ) で表される．ただし、 θ は天頂角で、 ϕ は方位角である．

4. 偏光レイトレーシング法

4.1. 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 3 次元形状が与えられたときに、2 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としてはミュラー計算法とジョーンズ計算法 [1,41]、コヒーレンス行列を用いた方法 [40] がある．本論文では、理解と実装と記述の簡便さから、ミュラー計算法を採用する．これら 3 つの計算法は機能がほとんど同じであるため、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 [1, 41]．ちなみに、Kagalwala と Kanade [42] はジョーンズ計算法でノマルスキー微分干渉顕微鏡のシミュレーションを行う一方、Koshikawa と Shirai [2, 3] は鏡面物体の表面法線を計測するためにミュラー計算法を使っている．また、偏光を計算で

きるレイトレーザーは市販されているもの [43-45] もある．また，ミューラー計算法やジョーンズ計算法を発展させた計算法も提案されている [46-48] ．

ミューラー計算法では光の偏光状態をストークスベクトル $s = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ で表す．ストークスベクトルは 4 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 は水平方向の直線偏光の強さを表し，3 番目の要素 s_2 は斜め $+45^\circ$ 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．ミューラー計算法では，物質が光の偏光状態をどのように変化させるかをミューラー行列 M で表す．ミューラー行列は 4×4 行列である．

ミューラー計算法での計算は線形であり，その計算例をいくつか紹介しよう．ストークスベクトル s を持つ光が，ある物質に反射または透過をして，その変化をミューラー行列 M で表した場合，結果として出てくる光のストークスベクトル s' は $s' = Ms$ と計算される．ストークスベクトル s が物質 1 と物質 2 に続けて反射か透過した際に，物質 1 に反射か透過したときの光の変化を M_1 というミューラー行列で表し，同様に物質 2 のミューラー行列を M_2 としたとき，結果として出てくる光のストークスベクトル s' は $s' = M_2 M_1 s$ と計算される．また，ストークスベクトル s_1 を持つ光とストークスベクトル s_2 を持つ光が重なったときの光のストークスベクトル s' は $s' = s_1 + s_2$ と計算される．

4.2. 回転ミューラー行列

図 3 では，光がある物質を透過して光の偏光状態が変わり，カメラで観測される様子を表している．この図は，ストークスベクトル s を持つ光が，ある物質と反射や透過などのインタラクションを行い，結果として s' のストークスベクトルになる様子を表している．この物質のミューラー行列は，あるカメラ座標系のときに M と定義されているものとする．この座標系で s' を計算すると，当然 Ms と計算される．しかし，もし，この物質を光の進行方向を軸として α だけ回転させたときの s' を計算したいとしたらどうすればいいだろうか．その場合は，回転行列を使って座標系を適切に回転させて M をかけることになる．この場合，ストークスベクトル s' は以下のように計算される：

$$s' = C(\alpha)MC(-\alpha)s \quad (3)$$

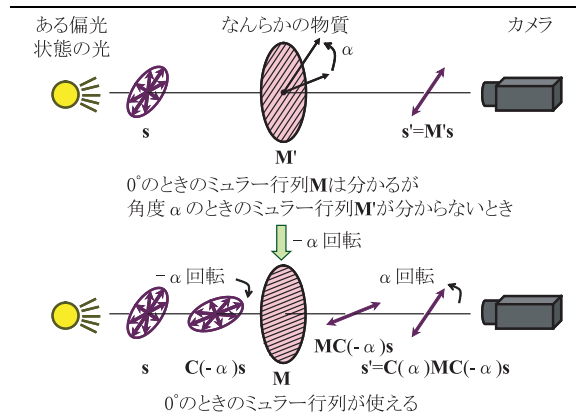


図 3: 回転ミューラー行列の計算例

ここで， $C(\alpha)$ は回転行列を表し，以下のように定義されている：

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

なお， α は回転角を表す．

4.3. 反射・透過ミューラー行列

まず初めに，入射面角度が 0° のときに反射光と透過光のストークスベクトルを計算する方法を示し，その次に，入射面角度が 0° ではないときの計算方法を示す．

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

$$R = \begin{pmatrix} (R_\perp + R_\parallel)/2 & (R_\perp - R_\parallel)/2 & 0 & 0 \\ (R_\perp - R_\parallel)/2 & (R_\perp + R_\parallel)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{R_\perp R_\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{R_\perp R_\parallel} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$T = \begin{pmatrix} (T_\perp + T_\parallel)/2 & (T_\perp - T_\parallel)/2 & 0 & 0 \\ (T_\perp - T_\parallel)/2 & (T_\perp + T_\parallel)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{T_\perp T_\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{T_\perp T_\parallel} \end{pmatrix} \quad (6)$$

入射面角度が 0° のとき，ストークスベクトル s を持つ光が物体を反射した場合，反射光のストークスベクトルは Rs と計算される．透過光についても同様である．

図 2 は，入射面角度が α の場合に光が反射・透過

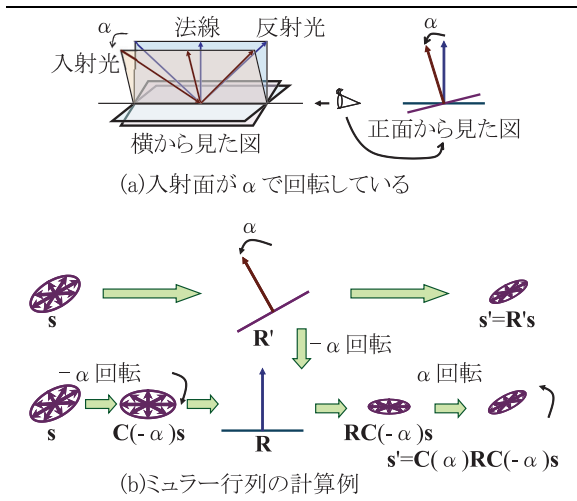


図 4: 反射における回転ミュラー行列の計算例

した様子を表している．この場合の反射における計算を図にまとめたものを図 4 に示す．反射ミュラー行列 R は，ストークスペクトルの入射面角度を 0° に変換した状態でかける必要がある．まず初めに，入射光のストークスペクトル s を $-\alpha$ の角度だけ回転する．次に，その変換されたストークスペクトルに R をかける．最後に再びストークスペクトルを α の角度だけ回転してもとの座標系に戻す．結果として出てくる反射光のストークスペクトル s' は以下のように計算される：

$$s' = C(\alpha)RC(-\alpha)s \quad (7)$$

ただし， C は回転ミュラー行列．図 2 の場合では，観測される光は反射光と透過光の和である．すなわち，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：

$$s' = C(\alpha)RC(-\alpha)s_r + C(\alpha)TC(-\alpha)s_t \quad (8)$$

ただし， s_r は，光が物体表面で反射する前の入射光のストークスペクトルであり， s_t は，光が物体表面で透過する前の入射光のストークスペクトルである．

4.4. 位相の変化

物体内部にある光が空気との境界で反射を起こすとき，入射角が臨界角より大きいと，光は透過せず，全反射を起こす．臨界角 θ_c とは以下のように定義される角度のことである：

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

ただし， n_1 と n_2 は媒質 1 と 2 の屈折率である（図 1）．

全反射においては反射光の位相がずれる現象が

起こる．そのずれは以下の式の δ で表される：

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\sin^2 \theta} \quad (10)$$

ただし， θ は入射角であり， n は物体の屈折率に対する空気の屈折率である．全反射の場合は，以下の行列を反射ミュラー行列として用いる：

$$D(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (11)$$

また，全反射において反射する位置がずれる現象（グース-ヘンシェン・シフトおよびアンペール・シフト）も発生するが，反射位置のずれは波長以下程度なので，本論文ではその影響は無視する．

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 $D(180^\circ)$ をかける必要がある．ブリュースタ角 θ_b とは以下のように定義される角度のことである：

$$\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (12)$$

ただし， n_1 と n_2 は媒質 1 と 2 の屈折率である（図 1）．

4.5. 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，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 $(s_0, s_1, s_2)^T$ は I_{\max} ， I_{\min} ， ψ （3 章）と次のような関係にある：

$$\begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & -\sin 2\psi \\ 0 & \sin 2\psi & \cos 2\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{\max} + I_{\min} \\ I_{\max} - I_{\min} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

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る：

$$\hat{\rho} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0} \quad (14)$$

しかし，直線偏光板で計測できる偏光度は縮退された以下の値となる：

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \quad (15)$$

以降では偏光度と言った場合は式 (15) で計算された値を指すものとする．

4.6. 光源分布

本論文では，物体の正面が全方向から様な輝度で照らされており，光源は非偏光であるとして計算した．ただし，物体の背面から光が内部に入射してこないとした．

5. 逆偏光レイトレーシング法

この節では，背面形状と屈折率は既知とし，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 [49]．

入力した偏光データを I_E と表記する．偏光データとは，各画素に偏光度の値が一つずつ当てはめられた画像（2次元的に配置されたデータ）のことである．4章の手法を使えば，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 と表記する．透明物体の形状は，各画素に高さ H の値が一つずつ割り当てられたものとして表現する．高さを x 軸と y 軸でそれぞれ偏微分した値を勾配と言い， p と q で表す：

$$p = H_x = \frac{\partial H}{\partial x}, \quad q = H_y = \frac{\partial H}{\partial y} \quad (16)$$

勾配は法線 $\mathbf{n} = (-p, -q, 1)^T$ を表している．

レンダリングした偏光データ I_R は，高さと法線に依存するので，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：

$$I_E = I_R(H, p, q) \quad (17)$$

Shape from shading の分野で使われる“画像イラディアンズ方程式”にちなんで，我々はこの方程式 (17) を“偏光レイトレーシング方程式”と名付けることにする．

誤差関数としてまず思いつく関数は以下のような式である：

$$\iint E_1(x, y) dx dy \quad (18)$$

ただし，

$$E_1 = (I_E - I_R(H, p, q))^2 \quad (19)$$

なお，表現の簡略化のため (x, y) という引数は適宜省略させていただく． I_R は H と p, q に依存しているが， H と p, q は互いに式 (16) で依存し合っている．よって，誤差関数を以下のように修正しなければならない：

$$\iint (\lambda E_1 + E_2) dx dy \quad (20)$$

ただし，

$$E_2 = (H_x - p)^2 + (H_y - q)^2 \quad (21)$$

ここで， λ はラグランジュの未定乗数である．

式 (20) を最小化する Euler 方程式は以下の通りとなる：

$$p = H_x - \frac{\lambda}{2} \frac{\partial E_1}{\partial p} \quad (22)$$

$$q = H_y - \frac{\lambda}{2} \frac{\partial E_1}{\partial q} \quad (23)$$

$$H = \bar{H} - \frac{1}{4}(p_x + q_y) - \frac{\lambda}{8} \frac{\partial E_1}{\partial H} \quad (24)$$

ここで， \bar{H} は H の4近傍平均を表す．

これをそのまま計算せずに，それぞれ二段階に分けて計算することにする．すなわち：

$$p \leftarrow H_x \quad (25)$$

$$p \leftarrow p - \lambda_1 \nabla E_1 \quad (26)$$

$$q \leftarrow H_y \quad (27)$$

$$q \leftarrow q - \lambda_2 \nabla E_1 \quad (28)$$

$$H \leftarrow \bar{H} - \frac{1}{4}(p_x + q_y) \quad (29)$$

$$H \leftarrow H - \lambda_3 \nabla E_1 \quad (30)$$

ここで， λ_1 と λ_2 と λ_3 は各点各ループごとに決まるスカラー値である．また，式 (26)，(28)，(30) における ∇ はそれぞれ，

$$\frac{\partial}{\partial p}, \quad \frac{\partial}{\partial q}, \quad \frac{\partial}{\partial H} \quad (31)$$

を意味する．式 (25)(27)(29) における A_x は例えば以下のように離散化することができる：

$$A_x(x, y) = \frac{1}{2}(A(x+1, y) - A(x-1, y)) \quad (32)$$

まず，適当は初期形状 H を正面の各点に対して与える．続いて，式 (25) と式 (27) により p と q を単純計算により求める．次に，式 (26) と式 (28) を解く．このとき， λ_1 と λ_2 を最適な値に設定したい．そこで，誤差関数 E_1 が最小となる λ_1 と λ_2 を Brent の方法で求める．全ての点で p と q が求まったら，高さ H を求めるため，式 (29) を弛緩法(緩和法)[51]で解く．Ikeuchi [50] は Jacobi 法でこれを解き，Horn [52] は SOR(successive over-relaxation) 法で解いた．計算時間を削減するため，本論文では ADI(alternating-direction implicit) 法で解く．

最後に式 (30) を Brent の方法などで解くことができるが，本研究ではこの式は解けなかった．これは，誤差関数 E_1 が高さの変化よりも法線の変化に大きく依存することと，誤差関数 E_1 は法線の変化

に対して滑らかに変化することが多いが高さの変化に対しては滑らかに変化しないことが多いためである。これはあらかじめ実験的に確かめられた。

以上、式 (25) ~ (29) を一通り解く作業を 1 ループとして、式 (18) 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 (22) ~ (24) ではなく式 (25) ~ (29) を解いた理由は、式 (22) ~ (24) では λ を最適な値にしないと安定に解を求めることができないというパラメータチューニングの問題があることと、式 (25) ~ (29) だと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という点である。

6. 実験結果

6.1. 計測装置

偏光データ取得のための計測装置（筆者らはコクーンと名付けた）は図 5 のようなものを用いた。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 40W 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ジオデジックドームにより空間的にほぼ均等に配置する。このジオデジックドームは Ikeuchi ら [53] が考案したものであり、正二十面体を 2 階ジオデセーションした、三角形から構成される 42 点 80 面 120 辺の多面体であるが、その下部は装置の設置上、三角形の面は張られていない。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、計測対象物体を全ての方向から照らすことができる。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、背面側から光が入らないようにした。カメラと物体と光源は固定する。偏光板を 0° 、 45° 、 90° 、 135° に回して 4 枚の画像を計測し、 I_{\max} 、 I_{\min} 、 ψ (3 章) を計算した。

6.2. シミュレーション結果

6.2.1. 2次元六角形

まず、シミュレーションで 2 次元形状を推定した結果を示す。解析の対象とするのは、屈折率が 1.5 の六角形の形状をした仮定の透明物体である。その図形を図 6 の点線で示した。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。光源は、どの方向からも同じ明るさの

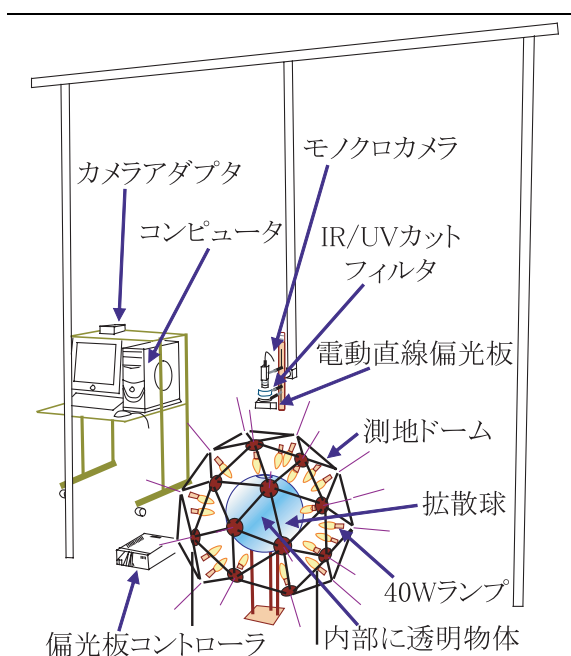


図 5: 計測装置 “コクーン”

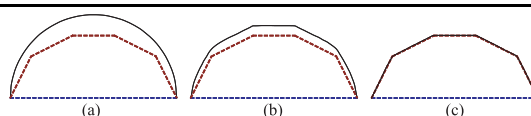


図 6: シミュレーション結果: (a) 初期値, (b) (c) それぞれ, 3, 30 ループした結果。

光が当てられているものとする。ただし、正面にのみ光が当たり、底辺には光が当たらないとした。

推定結果を図 6 に示す。点線が理論形状である六角形であり、実線が推定された形状である。図 6 (a) は初期値を表しており、(b), (c) は提案手法でそれぞれ 3 ループ, 30 ループした結果である。初期値は、半円状の図形を用いた。30 ループ目には理論形状とほぼ合致した。さらに反復計算を繰り返したが、これ以上形状は変化しなかった。

6.2.2. 2次元三角形

さらに、屈折率が 1.5 の二等辺三角形の形状をした仮定の透明物体に対しても解析を行った。二等辺三角形の 2 つの底角を 76.6° に設定した。光源は 6.2.1 章と同じ値に設定した。これを、二等辺三角形の頂角の方向から観測した偏光データを作成し、底辺の形状を既知として、その偏光データから二等辺三角形の表面形状を推定する。

推定結果を図 7 に示す。点線が理論形状である、二等辺三角形であり、実線が推定された形状である。図 7 (a) は初期値を表しており、(b) ~ (d) は提案手法でそれぞれ 1 ~ 3 ループ計算した結果である。初

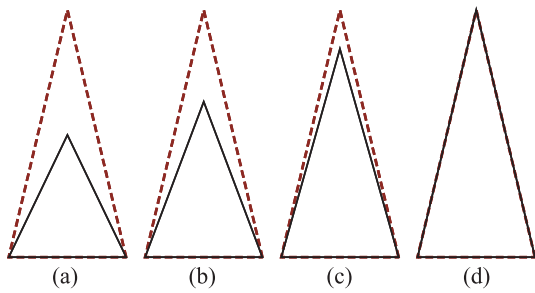


図 7: シミュレーション結果: (a) 初期値, (b) 1 ループした結果, (c) 2 ループした結果, (d) 3 ループした結果.

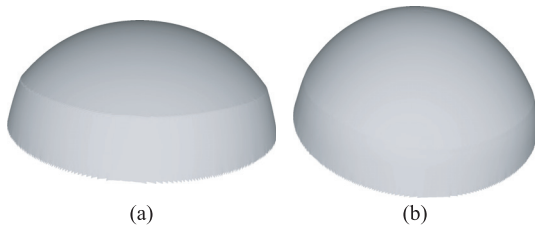


図 8: 3次元シミュレーション結果: (a) 初期値(従来法の結果), (b) 1ループした結果.

初期値は, 理論形状の半分の高さの二等辺三角形を用いた. 3ループ目には理論形状とほぼ合致していることが分かる. さらに反復計算を繰り返したが, これ以上形状は変化しなかった.

6.2.3. 3次元半球

次に, 3次元でのシミュレーション結果を示す. 解析の対象とするのは, 屈折率が 1.5 の半球の形状をした仮定の透明物体である. 推定結果を図 8 に示す. 図 8(a) は初期値ならびに, 従来法での結果を表しており, 図 8(b) は 1ループ計算した結果である. 3次元の場合は 2次元の場合と比べて計算時間がかかるとい問題があるため, 今回の実験では 1ループのみ計算した. 従来法での結果よりも形状が半球に近づいたことが見てとれる.

6.3. 実物体の計測結果

実物体を対象とした実験では, 屈折率 1.5, 直径 3cm の透明アクリル半球を曲面側から観測した(図 9). 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. 物体は, どの方向からも同一の輝度の非偏光光源で照らされていると仮定した. ただし, 半球の背面, すなわち円盤部分には光は当てていない.

今回, この 3次元物体の断面である 2次元平面で評価を行った. 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を使用

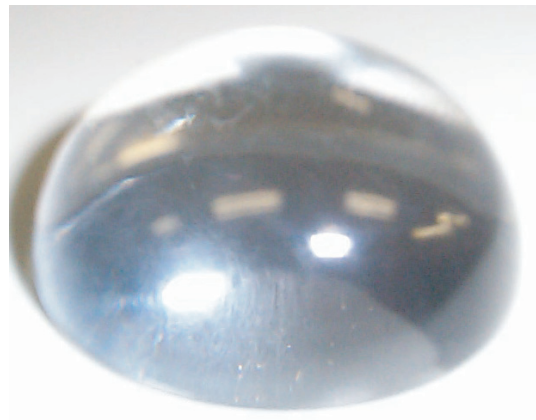


図 9: 透明アクリル半球.

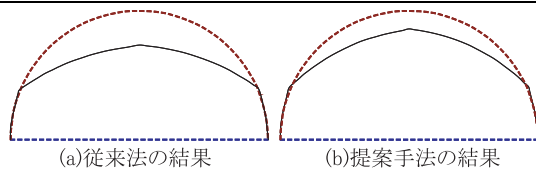


図 10: 推定結果: (a) 従来法の結果, (b) 提案手法で 5ループ計算した結果.

した. この平面内の光はこの平面を出ることはないし, この平面の外の光がこの平面の中に入ってくることはない. このようにして得られた 2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する.

提案手法を適用した結果を図 10(b) に示す. 比較のため, 従来法 [9-11] での結果を図 10(a) に示す. 図 10 では, 実線が推定された形状を表し, 点線が理論形状を表す. 図 10(b) の初期値としては, 従来法の結果(図 10(a))を用いた. 図 10(b) は, 反復計算で 5ループした結果であるが, これ以上反復計算してもほとんど形状が変化しなかった.

推定値が理論形状である半円に収束しなかった原因としては, 光源環境を考慮していなかったことが考えられる. 計測対象物体が全ての方向から同じ明るさで照らされていると仮定したが, 実際にはそうっていないのが原因であろう. 光源環境の違いを考慮することは今後の課題である.

推定値と理論値の間の RMS (root mean square) 誤差を指標として従来法と提案手法の精度を比較する. 従来法の法線の RMS 誤差は 13.4° であったのに対し, 提案手法は 8.99° と大幅に減り, 精度の向上を確認できた. 従来法は高さの RMS 誤差が 3.22mm であったのが, 提案手法は 1.95mm となった. この実験から, 提案手法は従来法よりも高い精度で透明物体の表面形状を計測できることが分

かった。

7. むすび

本論文では、透明な文化財の3次元形状を計測するための手法を提案した。提案手法は、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させることにより、透明物体の表面形状を推定するものである。論文の最後で、現実の透明物体を計測し、その物体の表面形状を従来法のおよそ2/3の誤差で推定することに成功した。

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撮影を行ったが、Hataら [13] は光源をパターン化し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 [15] 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。多視点から物体形状を計測する方法であるシルエット法 (shape-from-silhouette, visual hull, 視体積交差法) には凹形状を求めることができないという欠点があるが、不透明物体の凹形状を反復計算により求める方法が、Nayarら [54], Wadaら [55], Yangら [56] によって提案されている。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。

本研究は、透明な文化財の形状を計測して保存しておくことにより、実物の破壊・紛失に備える他、インターネットなどのバーチャル美術館で多くの人に鑑賞してもらうことを目的として行われた。しかし、本研究には他にも幅広い応用が考えられる。例えば、インターネットのオンラインショッピングにおける3次元カタログの製作、透明な製品の組み立てのための工業用ロボットの目としての役割、ガラスなどのリサイクルのための物体認識、水面を計測しての水害調査、クラゲの生態調査、などである。

透明物体を塗料で塗って不透明物体にしてから既存の装置で計測する方法は以上のような応用には向かない。接触型の計測装置やSEM (電子顕微鏡による形状計測) や光触針法では、計測に時間がかかることや装置が高価である場合が多いことや動的な物体を計測できないという問題がある。オートコリメーションでは、凹凸の少ない物体しか計測で

きない。干渉法は、滑らかな透明物体を計測できなかったり、凹凸の少ない物体しか計測できないなどの欠点が存在する場合が多い。

ほとんど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・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、全ての場合においてその仮定が成り立つわけではないので、今後は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予定である。

また、リアルタイムで偏光データを計測 [37-39] して、動的な物体の形状を計測することも考えている。

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。著者の一人、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。

参考文献

- [1] W. A. Shurcliff, Polarized light: production and use, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1962.
- [2] K. Koshikawa, "A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects," Proc. Int'l Joint Conf. Artificial Intelligence, pp. 493-495, Tokyo, Japan, Aug. 1979.
- [3] 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.
- [4] L. B. Wolff, "Polarization-based material classification from specular reflection," IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., vol. 12, no. 11, pp. 1059-1071, Nov. 1990.
- [5] L. B. Wolff and T. E. Boult, "Constraining object features using a polarization reflectance model," IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., vol.13, no.7, pp.635-657, July 1991.
- [6] 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.
- [7] S. Rahmann, "Reconstruction of quadrics from two polarization views," Iberian Conf. Pattern Recognition and Image Analysis, pp. 810-820, Mallorca, Spain, June 2003.
- [8] 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.

- [9] 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, Sep. 1999.
- [10] 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, Apr. 2002.
- [11] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi, "Transparent surface modeling from a pair of polarization images," *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, vol.26, no.1, pp.73–82, Jan. 2004.
- [12] H. Murase, "Surface shape reconstruction of a nonrigid transparent object using refraction and motion," *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, vol.14, no.10, pp.1045–1052, Oct. 1992.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] A. R. Smith and J. F. Blinn, "Blue screen matting," *Proc. SIGGRAPH*, pp. 259–268, New Orleans, Louisiana USA, Aug. 1996.
- [17] H. Matsuoka, T. Takeuchi, H. Kitazawa, and A. Onozawa, "Representation of pseudo inter-reflection and transparency by considering characteristics of human vision," *Proc. Eurographics*, pp. 503–510, Saarbrücken, Germany, Sep. 2002.
- [18] R. Szeliski and P. Golland, "Stereo matching with transparency and matting," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp. 517–526, Bombay, India, Jan. 1998.
- [19] D. E. Zongker, D. M. Warner, B. Curless, and D. H. Salesin, "Environmental matting and compositing," *Proc. SIGGRAPH*, pp. 205–214, Los Angeles, California, Aug. 1999.
- [20] Y. Chuang, D. E. Zongker, J. Hindorff, B. Curless, D. H. Salesin, and R. Szeliski, "Environment matting extensions: towards higher accuracy and real-time capture," *Proc. SIGGRAPH*, pp. 121–130, New Orleans, Louisiana, July 2000.
- [21] Z. S. Hakura and J. M. Snyder, "Realistic reflections and refractions on graphics hardware with hybrid rendering and layered environment maps," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 289–300, London, United Kingdom, June 2001.
- [22] W. Matusik, H. Pfister, R. Ziegler, A. Ngan, and L. McMillan, "Acquisition and rendering of transparent and refractive objects," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 267–278, Pisa, Italy, June 2002.
- [23] Y. Wexler, A. W. Fitzgibbon, and A. Zisserman, "Image-based environment matting," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 279–290, Pisa, Italy, June 2002.
- [24] P. Peers and P. Dutré, "Wavelet environment matting," *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 157–166, Leuven, Belgium, June 2003.
- [25] Y. Y. Schechner, J. Shamir, and N. Kiryati, "Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 17, no. 2, pp. 276–284, Feb. 2000.
- [26] Y. Y. Schechner, N. Kiryati, and R. Basri, "Separation of transparent layers using focus," *Int'l J. Computer Vision*, vol. 39, no. 1, pp. 25–39, Aug. 2000.
- [27] R. Szeliski, S. Avidan, P. Anandan, "Layer extraction from multiple images containing reflections and transparency," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 246–253, Hilton Head Island, South Carolina, June 2000.
- [28] H. Farid and E. H. Adelson, "Separating reflections from images by use of independent component analysis," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 16, no. 9, pp. 2136–2145, Sep. 1999.
- [29] A. Nikolaev and S. K. Nayar, "Transparent grippers: seeing while grasping," *Proc. Image Understanding Workshop*, pp. 1333–1338, Palm Springs, Feb. 1996.
- [30] M. Osadchy, D. Jacobs, and R. Ramamoorthi, "Using specularities for recognition," *Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision*, pp. 1512–1519, Nice, France, Oct. 2003.
- [31] K. Ikeuchi, "Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 3, no. 6, pp. 661–669, 1981.
- [32] S.K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surface by Photometric Sampling," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 418–431, Aug. 1990.
- [33] S. Hata, "Shape Detection of Small Specular Surface using Color Stripe Lighting," *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition*, pp.1:554–557, 1992.
- [34] Y. Sato and K. Ikeuchi, "Temporal-Color Space Analysis of Reflection," *J. Optical Soc. Am. A*, vol. 11, no. 11, pp. 2990–3002, Nov. 1994.
- [35] M. Oren and S.K. Nayar, "A Theory of Specular Surface Geometry," *Int'l J. Computer Vision*, vol. 24, no. 2, pp. 105–124, Sept. 1997.
- [36] D. N. Bhat and S. K. Nayar, "Stereo and Specular Reflection," *Int. J. Comput. Vis.*, Vol.26, No.2, pp.91–106, 1998.
- [37] L. B. Wolff, T. A. Mancini, P. Pouliquen, and A. G. Andreou, "Liquid Crystal Polarization Camera," *IEEE Trans. Rob. Autom.*, Vol.13, No.2, pp.195–203, 1997.
- [38] H. Fujikake, K. Takizawa, T. Aida, H. Kikuchi, T. Fujii, and M. Kawakita, "Electrically-Controllable

- Liquid Crystal Polarizing Filter for Eliminating Reflected Light,” *Opt. Rev.*, Vol.5, No.2, pp.93-98, 1998.
- [39] C. K. Harnett and H. G. Craighead, “Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging,” *Appl. Opt.*, Vol.41, No.7, pp.1291-1296, 2002.
- [40] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, London, 1959.
- [41] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 2002.
- [42] F. Kagalwala and T. Kanade, “Computational model of image formation process in DIC microscopy,” *Proc. SPIE*, vol. 3261, pp. 193–204, San Jose, CA USA, Jan. 1998.
- [43] LightTools, <http://www.opticalres.com/>.
- [44] ZEMAX, <http://www.zemax.com/>.
- [45] OptiCAD, <http://www.opticad.com/>.
- [46] R. A. Chipman, “Mechanics of polarization ray tracing,” *Optical Engineering*, vol. 34, no. 6, pp. 1636–1645, June 1995.
- [47] L. B. Wolff and D. J. Kurlander, “Ray tracing with polarization parameters,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 10, no. 6, pp. 44–55, Nov. 1990.
- [48] C. Gu and P. Yeh, “Extended Jones matrix method. II,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 10, no. 5, pp. 966–973, May 1993.
- [49] 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.
- [50] K. Ikeuchi, “Reconstructing a depth map from intensity maps,” *Proc. Int’l Conf. Pattern Recognition*, pp.736–738, Montreal, Canada, Aug. 1984.
- [51] B. K. P. Horn, *Robot vision*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1986.
- [52] B. K. P. Horn, “Height and Gradient from Shading,” *Int’l J. Computer Vision*, Vol. 5, No. 1, pp. 37-75, 1990.
- [53] T. Kiuchi, K. Ikeuchi, “Roughness and shape of specular lobe surfaces using photometric sampling method,” *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 765–766, New York, June 1993.
- [54] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, “Shape from interreflections,” *Int’l J. Computer Vision*, vol.6, no.3, pp.173–195, Aug. 1991.
- [55] T. Wada, H. Ukida, and T. Matsuyama, “Shape from shading with interreflections under a proximal light source: distortion-free copying of an unfolded book,” *Int’l J. Computer Vision*, vol.24, no.2, pp.125–135, Sep. 1997.
- [56] J. Yang, D. Zhang, N. Ohnishi, and N. Sugie, “Determining a polyhedral shape using interreflections,” *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.110–115, San Juan, Puerto Rico, June 1997.