

赤外光の偏光解析とその透明物体形状モデリングへの応用

齊藤 めぐみ[†], 佐藤 洋一^{††}, 池内 克史^{††}

透明物体の形状を測定することは、コンピュータビジョンにおける実物体のモデリングに必要な不可欠である。しかし、簡便な計測法が存在しないことから、透明物体は例外として取り扱われないのが現状である。そこで本論文では、透明物体の反射光と熱放射光両方の偏光解析を、CCD カメラと偏光板を用いて行うことによって表面形状を測定する手法を提案する。反射光の偏光のみを用いると、2 価関数となる偏光度曲線を解くことになるため法線方向の解は一意に求まらないが、熱放射光の偏光を赤外領域で検出し、これを組み合わせることによって任意の透明物体形状の測定を可能とした。

Shape Modeling of Transparent Objects by Use of Polarization

MEGUMI SAITO,[†] YOICHI SATO^{††} and KATSUSHI IKEUCHI^{††}

This paper introduces a new method for obtaining surface orientations of transparent objects by analyzing a polarization state of reflected light both in visible and far-infrared wavelengths. The polarization state of reflected light in visible wavelengths is used for determining the surface orientation at a surface point up to two solutions. To solve this ambiguity, the proposed method uses the polarization state of the reflected light in far-infrared wavelengths with which the surface orientation can be uniquely identified.

1. はじめに

近年、コンピュータビジョンの分野において実物体のモデリングに関する研究がさかに行われている。このモデルは画像処理による物体認識や、実際に物体を見る場合と同じような変化に対応できる画像の生成など、様々な応用が期待される。このような実物体のモデルを生成するためには、その形状を表す幾何情報と色やハイライトなどを表す光学情報の 2 つが必要になる¹⁾。このうち幾何情報を取得するためには、正確な表面形状測定が必要不可欠である。

物体の表面形状測定を非接触で行う方法としては、光学的なものが多数実用化されている。光計測と呼べるこの測定法には大きく分けると 2 種類あり、点測定法と面測定法がある²⁾。点測定法は、物体の各点ごとの寸法や深さを測定して立体形状を測定する方法で、光スポットやビームを物体全面で走査することによって立体形状を計測するものである。一方、面測定法は

物体面の等高線を直接縞画像の形で得るものであり、この等高線図形をもとに縞解析を行って形状を求める。面測定法としては、干渉法やモアレトポグラフィ、ステレオ法が広く実用化されている³⁾。

コンピュータビジョンの分野においても、画像処理に基づく形状測定に関する研究はいくつか見られる。拡散光源を用いて画像を 3 枚撮像し、Photometric ステレオ法によって各点での表面方向を得る手法や^{4),5)}、形状測定に反射光の偏光を利用する手法も提案されている^{6),7)}。

ここで透明物体について考えてみる。実物体には、非透明な色を持つものと透明なものが存在するが、以上にあげた手法は非透明なものを対象としており、物体自身の色を表す成分を利用している。透明物体にはハイライトしかないためにこれらの手法では例外として除外され、測定が不可能であるのが現状である。したがって、コンピュータビジョンにおける透明物体表面形状測定技術の確立が望まれる。

本論文では、透明物体のモデリングを可能とするための表面形状測定法を提案する。筆者らが以前提案した反射光の偏光を利用する形状測定法⁸⁾が、可視光測定だけでは完全に形状を求めることができないため、さらに物体の熱放射光の偏光をあわせて利用することを提案する。この手法により、透明物体の表面形状測

[†] 慶應義塾大学大学院電気工学専攻

Department of Electrical Engineering, Keio University
現在、日本ヒューレットパッカード株式会社
Presently with Hewlett-Packard Japan, Ltd.

^{††} 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

定が高精度で行えることを示し、本手法の有用性を示すことを目的とする。

2. 偏光の原理と形状測定への応用

2.1 フレネルの反射公式

反射光の測定のために、正反射における反射の原理について以下に示す⁹⁾。

図 1 に示したように屈折率が n_1, n_2 なる媒質 1, 2 の境界面が $x-y$ 面内にあり、媒質 1 から光が $x-z$ 面内で媒質 2 に入射する場合を考える。このとき、光は境界面で屈折して媒質 2 に透過していく、同時に一部分は境界面で反射する。透明な誘電体を考えるので、可視域において吸収は無視できる。入射・反射・透過光の添字をそれぞれ a, r, t で表し、 $x-z$ 面に平行な成分、垂直な成分をそれぞれ添字 p, s で表す。入射角 ϕ_1 、反射角 ϕ'_1 、透過角 ϕ_2 はそれぞれ図 1 に示したように定義する。ただし入射光と反射光は同じ媒質中を通るので、 $\phi_1 = \phi'_1$ である。このとき、入射、反射光の光強度のうち $x-z$ 面内に平行な成分を I_{ap}, I_{rp} 、垂直な成分を I_{as}, I_{rs} とおくと、強度反射率 F_p, F_s は次のように表せる。

$$F_p = \frac{I_{rp}}{I_{ap}} = \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{\tan^2(\phi_1 + \phi_2)}$$

$$F_s = \frac{I_{rs}}{I_{as}} = \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} \quad (1)$$

この反射率はフレネル係数と呼ばれる。上式より $F_p = 0$ となる入射角が存在することが分かる。このときの入射角をブリュースタ (Brewster) 角 ϕ_B と呼ぶ。ブリュースタ角は、透過の際に光の進む方向が屈折することを表すスネルの法則 $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$ に、

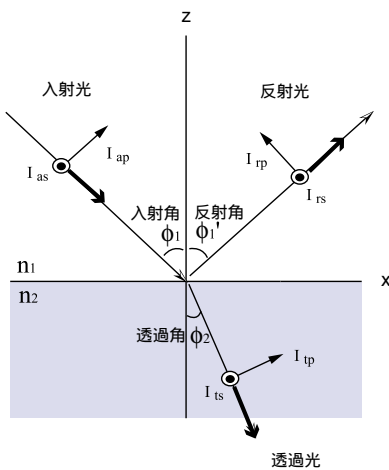


図 1 フレネル反射
Fig. 1 Fresnel reflection.

$F_p = 0$ を与える $\phi_1 + \phi_2 = \pi/2$ の関係を代入することで次のように与えられる。

$$\tan \phi_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

2.2 偏光を用いた法線方向測定

拡散反射がほとんど無視でき吸収がないと見なせる透明物体においては、反射光は鏡面反射であるハイライトのみと考えられ、正反射であるために反射角は入射角と等しい。そのため、物体表面上各点における入射面方向と反射角が分かれば表面法線方向を求めることができる。したがって、透明物体表面における法線方向の決定のためには、入射面方向と入射角を測定すればよいということになる。この様子を図 2 に示す。ここで入射面としては、カメラ視点から物体表面上の注目する点への軸を含む平面を考え、入射面の方向はその軸周りの回転角度により表すこととする。図 2 のように入射面方向を θ 、入射角を ϕ とし、これらを偏光を用いて決定する。

一般に自然光は非偏光であり、すべての方向に対してランダムに振動している。しかしこのような自然光でも、複屈折性のある結晶を透過したり、物体から反射されたりすると、偏光特性が現れてくる。このように自然光の一部が偏光されている光を部分偏光と呼ぶ。

ここで非偏光光源により照らされた物体からの反射光について考える。反射光は拡散反射と鏡面反射の和からなっているが拡散反射は一般に非偏光であり、さらに透明物体においては無視できるので、正反射である鏡面反射のみについて考える。

式 (1) で示したように振動方向によって強度反射率が違うため、図 2 にあるように偏光子を回したとき明るさに変化が現れ、観察される変化のしかたは正弦波形を示す。ここで、 I_{max}, I_{min} をそれぞれ光

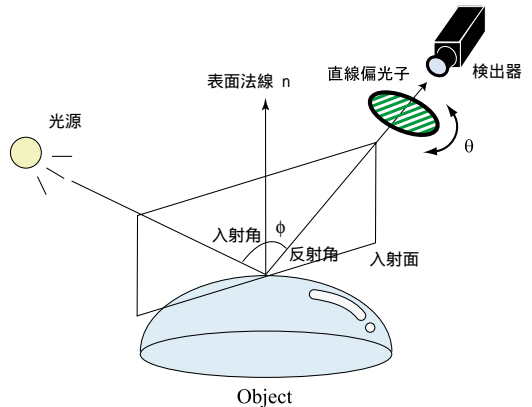


図 2 表面法線方向
Fig. 2 Surface normal of object.

強度の最大値、最小値とする．この強度変化における I_{\min} は反射光における非偏光成分に相当しており、直線偏光子を透過して観察された光強度 I_{\min} は非偏光成分の光強度の $1/2$ となる．一方、反射光に含まれる直線偏光成分は直線偏光子を回転した際に観察される透過光強度の変化として観察され、直線偏光成分の光強度は $I_{\max} - I_{\min}$ により表される．また、鏡面反射による反射光全体の光強度 I_{specular} は非偏光成分と直線偏光成分との和となることより、 $I_{\text{specular}} = 2I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) = I_{\max} + I_{\min}$ となる．また、 I_{\max} と I_{\min} との比は光強度反射係数 F_s と F_p に依存し、かつ誘電体ではつねに $F_s > F_p$ となることより $I_{\max}/I_{\min} = F_s/F_p$ となる．これらのことより、 I_{\max} と I_{\min} に関して次式が得られる⁷⁾．

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \frac{F_s}{F_p + F_s} I_{\text{specular}} \\ I_{\min} &= \frac{F_p}{F_p + F_s} I_{\text{specular}} \end{aligned} \quad (3)$$

この式から分かるように、直線偏光子を透過した光の強度が I_{\min} と最も弱くなるのは、偏光子の方向が入射面に平行であり透過光として非偏光成分のみを観察した場合である．したがって、 I_{\min} を得るときの直線偏光子の方向として入射面方向 θ を求めることができる．

次に、反射光がどれだけ偏光されているかの目安として、偏光度 ρ を次のように定義する．

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

この偏光度 ρ は、0 のとき非偏光であり、1 のとき直線偏光であることを表す．反射光が直線偏光になるときは、入射光のうち平行成分が 0 となって反射光が垂直成分のみになるときである．このときの入射角はブリュースタ角と一致する．

式 (1) とスネルの法則を考慮すると、偏光度 ρ は次のようになる．

$$\rho = \frac{2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{n^2 - \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi} \quad (5)$$

このように、偏光度 ρ は屈折率 n と入射角 ϕ の関数となっていることが分かる．逆に偏光度を式 (4) より求めると、屈折率が与えられれば式 (5) より入射角 ϕ が求まる．

偏光度の入射角特性を図 3 に示した．この図から、偏光度 ρ を変数と考えた場合、偏光度曲線がブリュースタ角での値を極値とした 2 価関数であることが分かる．したがって、求める入射角の解が一意に決まらない．この問題を解決するために、熱放射光の偏光を利

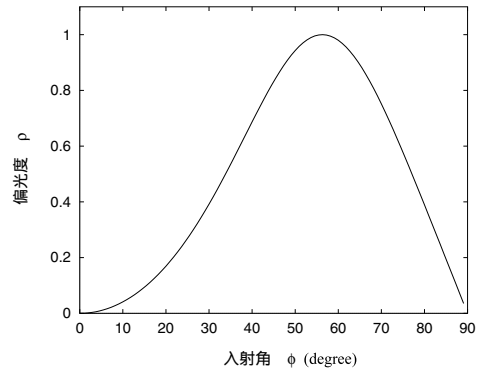


図 3 偏光度の入射角特性 ($n = 1.5$)
Fig. 3 Degree of polarization.

用することを提案する．

2.3 物体の熱放射と赤外光の偏光

熱エネルギーは、電磁波として空間を伝えることができ、これを熱放射という¹³⁾．放射エネルギーを完全に吸収してしまうような理想的な媒質からなる物体を黒体 (Black body) という．一定温度における同じ波長の放射線に対する物質の吸収能力と放射能力の比は、物体の性質には関係なく温度のみに依存して一定の値を持つ、というキルヒホッフの法則から、放射線を最もよく吸収する黒体は同時に、同じ温度にある他のどのような物体よりもよく放射線を放出するということができ、その放射率は 1 と定義される¹⁴⁾．

この黒体の単位面積から単位時間あたりに放出する熱エネルギーを W 、黒体の絶対温度を T とすると、ステファン・ボルツマンの法則より次の式が成り立つ．

$$W = \sigma T^4 \quad (6)$$

ここで σ はステファン・ボルツマン定数と呼ばれる比例定数で $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$ である．物体は必ず温度を持っているため、あらゆる物体から必ず電磁波が放射されていることになる．

理想黒体の熱放射エネルギー分布を見ると、各温度に対し図 4 のような曲線が得られる．この図から、放射光の波長ピークが温度に依存しており、室温を含む広い範囲でこの放射光は主に赤外領域に含まれることが分かる．したがって、物体放射光を測定したい場合、赤外光の測定を行えばよいということになる．

ただし、一般には理想黒体のような物体は存在しないので、物体から放射される赤外光はその物体と同一温度の黒体とは異なる．そこで、一般の物体にはこの両者の比、放射率 ϵ を通常用いる．

次に熱放射光の偏光について考える．十分に滑らかな物体表面に入射してくる光を考えたとき、その光強

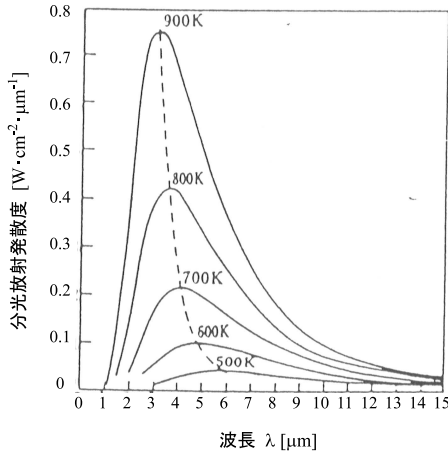


図 4 黒体の熱放射光波長依存性¹⁵⁾
Fig. 4 Heat radiation from black body.

度の入射面に対して平行な成分を I_{ap} , 垂直な成分を I_{as} とする . 角度 ϕ で入射したとき , 式 (1) で与えられるフレネル係数を用いて , その反射光強度は , 入射面に対して平行 , 垂直な成分がそれぞれ $F_p I_{ap}$, $F_s I_{as}$ で与えられる .

ガラスなどの透明物体では , 可視領域の光は物体を透過するのに対し , 遠赤外領域の光は透過されずに反射もしくは吸収される . よって一定の温度に達し定常的な熱状態にある透明物体を考えた場合 , エネルギー保存の法則により , 入射光から反射光を差し引いたエネルギー , それぞれ $(1 - F_p) I_{ap}$, $(1 - F_s) I_{as}$ が物体に吸収されることが分かる . ここで吸収率を α とすると , 各成分の放射率 ε は , キルヒホッフの法則より $\varepsilon = \alpha$ であることから , 以下の式が導ける .

$$\begin{aligned} \varepsilon_p(T, \lambda, \phi) &= 1 - F_p \\ \varepsilon_s(T, \lambda, \phi) &= 1 - F_s \end{aligned} \quad (7)$$

W を理想黒体での熱放射光強度とすると , 対象とする物体の熱放射光強度は εW となり , 式 (7) を用いて熱放射光の偏光状態は次のように表される . ここで , 可視光域の反射光の偏光度と区別するため ρ の代わりに ρ_{IR} を用いた .

$$\begin{aligned} \rho_{IR} &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\varepsilon_p W - \varepsilon_s W}{\varepsilon_p W + \varepsilon_s W} \\ &= \frac{F_s - F_p}{2 - F_p - F_s} \end{aligned} \quad (8)$$

I_{\max} と I_{\min} は前節と同様に検出される強度の最大値・最小値である . 式 (8) に式 (1) を代入することによって , 偏光度 ρ_{IR} と放射角 (熱放射光の場合 , 入射角つまり反射角を放射角と呼ぶ) ϕ の関係を求めることができる . この熱放射光の偏光度 ρ_{IR} と放射角

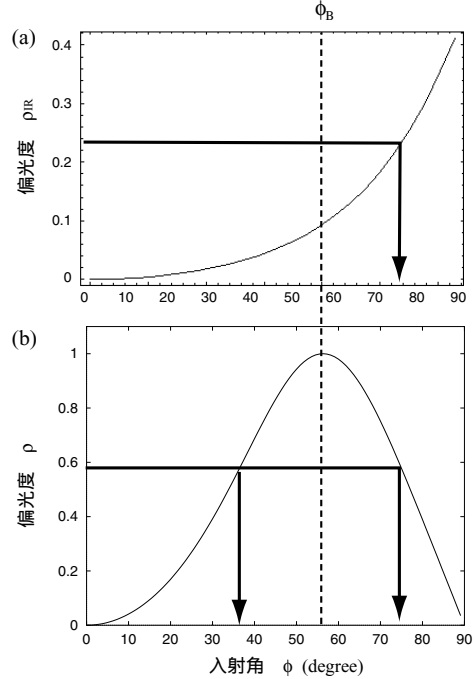


図 5 (a) 赤外光と (b) 可視光の偏光度曲線
Fig. 5 Degree of polarization for (a) infrared light and (b) visible light.

ϕ の関係を図 5 (a) に示す .

図 5 (a) を見てみると , こちらは前節の可視光の場合と異なり偏光度と入射 (放射) 角度が 1 対 1 対応をしていることが分かる . したがって , 熱放射光の偏光度を測定することによって , 一意に解を決定することができる .

熱放射の偏光度は可視光の場合に比べ , 全体的に値が小さいという特徴がある . 最も大きな値でも 40% 前後までしか到達せず , 角度の小さい部分においてはほとんどの部分が 10% 未満という値になっている . したがって , I_{\max} と I_{\min} の値に非常に緻密な正確さが求められることになるが , 256 階調の撮像系を考慮すると精度の高い測定を望むことはできない . そこで , 熱放射つまり赤外光測定による偏光度を , 可視光測定によって得られた 2 つの解の判定に用いることを提案する . プリュースタ角での偏光度をしきい値として , その値よりも大きいのか小さいかで可視光測定の 2 つの解のうちどちらの解が正しいかを判別する . この様子を図 5 に示した .

3. 偏光解析による透明物体形状測定

3.1 可視光測定の実験装置

実験装置は図 6 (a) のように構成し , 光源として球

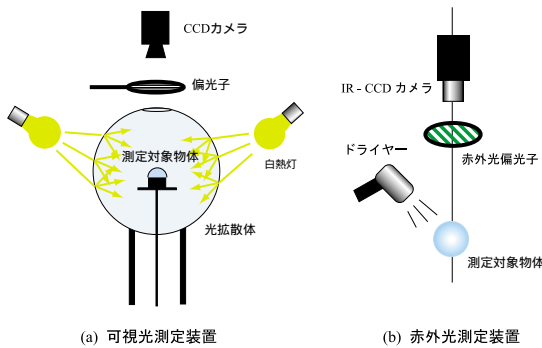


図 6 実験装置図
Fig. 6 Experimental setup.

面状面光源を用いた．この光源は，正反射光を検出しようとするときの光源方向の制限をなくし，全方向に光源を得ると同じ状態を作り出す．したがって，対象物体の表面全面で一度に反射光を検出することができる．なお，光拡散球の内面上における光強度は均一にはならないが，提案アルゴリズムにおける処理では問題とならない．これは，式 (4) から分かるように，偏光度 ρ を計算する際に I_{\max} と I_{\min} における絶対的な光強度の影響はキャンセルされてしまうためである．

白熱灯は 300 W のものを 3 個用いて，測定対象物体を中心とした円上に 120° おきに配置した．光拡散体としては白色半透明のプラスチック球，直径 40 cm のものを用い，この球の内部中央に測定対象物体をセッティングした．この光拡散体の周囲から複数の白熱灯によって光を照射することにより，拡散体が 2 次的な光源となつてほぼすべての方向の光線を得られ，球面状の面光源が得られる．検出器はモノクロ CCD カメラを使用し，偏光子は CCD カメラのレンズの前に配置した．

3.2 赤外光測定の実験装置

赤外光測定の実験装置は図 6 (b) のように構成した．熱放射光の測定を行うため，物体自身からの放射光を検出する．反射光を検出するわけではないので，光源は使用しない．本来どのような物体でも熱放射光を放出しているが，室温 (20°C 程度) の放射光の場合， $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域では放射光は非常に小さいだけでなく大気放射光の反射が多く含まれる．そのため I_{\max} と I_{\min} の差を感知しにくくなり，偏光度の測定が困難になる．そこで，本実験においては対象物体の温度を約 30° から 40° に上げて大気からの放射光と区別し，大気放射光の反射成分を差し引くことによって，物体自身の放射光成分のみを得て偏光度を求めている．

対象物体の温度を上げるのには，一般に用いられているドライヤーを用いて熱風を当てる形で行った．ま

た，赤外光 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域に透過域を持つ偏光子と，この領域の赤外光を検出する IR-CCD カメラを使用した．使用した IR-CCD での各画素値は，設定されたゲインでの測定温度範囲を 256 階調にあてはめ，検出光強度が温度に換算された値として得られる．したがって，偏光度を計算する際には，アルゴリズムの中で式 (6) を用いて逆に温度値から光強度に変換する．

3.3 実験方法

可視光測定は，偏光子を順次回していきながら画像を CCD カメラで撮像することによって行った．偏光子の偏光角の回転は 5° おきに 0° から 180° まで行った．これによって得る 36 枚の画像から，各画素ごとの光強度変化を測定し，光強度の最大値と最小値， I_{\max} と I_{\min} を各画素で得た．ここで，偏光角 5° おきにデータを測定しているため，得られる最大値，最小値のデータは必ずしも真値と一致しない．そこで非線形最小自乗法による正弦波形へのフィッティングを行い，その振幅における最大値，最小値 I_{\max} と I_{\min} を求めた．この I_{\max} と I_{\min} から，構築したアルゴリズムを用いて表面法線方向を算出した．

次に赤外光測定の実験方法について述べる．まず測定対象物体に熱を一定時間当てて物体温度を 30°C から 40°C 程度に上がるまで温めた．熱吸収が飽和し，ほぼ一定の温度に定まったことを確認してから，可視光測定とまったく同様に測定を行った．ただし各画素値は温度を表しているため，その最大値と最小値， T_{\max} と T_{\min} を光強度に変換した I_{\max} と I_{\min} から偏光度を計算した．

さらに，可視光測定と赤外光測定にはそれぞれ別のカメラを利用しなければならないために，可視光測定画像と赤外光測定画像の位置合わせを行わなければならない．そこで本実験においては，物体を固定する台にあらかじめ目印となるマーカーを 2 つ取りつけておき，それらのマーカーの位置をもとに可視光測定画像と赤外光測定画像との間で 2 次元画像平面上での平行移動・回転移動・拡大縮小による位置合わせを行った．これにより可視光測定から求めた各画素での 2 つの法線方向を，マッチングされた赤外画像の各画素の偏光度を用いて 1 つに選択することができる．選択方法は，放射角がブリュースタ角のときの赤外偏光度 ρ_{IR} をしきい値として，偏光度がそれ以上かそれ以下かで 2 つの解の大小を選択する，というものである．

測定対象として，屈折率 1.5 のアクリル素材の半球，直径 5 cm のものを用い，測定の評価を行った．さらに任意形状物体の測定が可能であるか検証するために，貝殻形状をしたオブジェ，屈折率 1.5 のアクリル素材

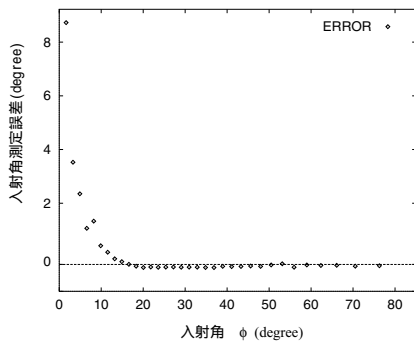


図 7 半球形状測定誤差の入射角特性
Fig. 7 Estimation error of incident angle.

のものを使用した。

なお、提案手法による処理では平行投影を仮定した。これは、可視光画像と赤外光画像を測定するために使用したカメラには比較的焦点距離の長いレンズを装着して用いており、そのため平行投影を仮定しても誤差は十分無視できる範囲であると判断したためである。

3.4 実験結果および検討

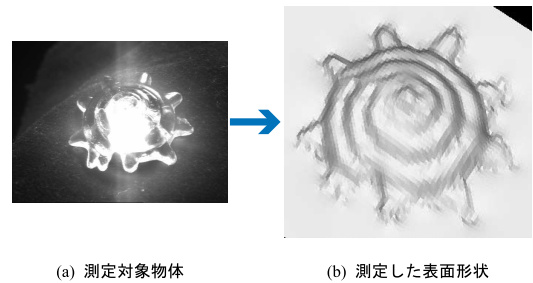
図 7 には、半球形状の測定結果をもとに計算した測定誤差特性を示した。このグラフの横軸は入射角であり、縦軸は誤差を表している。図中の直線は誤差がなく測定値が真値と等しい場合を表している。なおここでは、測定対象物体の形状が球であることから、画像の中で円をなす物体輪郭線を利用して半球の各画素において表面法線方向の真値を計算した。

この結果を見ると、角度の小さい部分を除いて非常に誤差が小さく測定精度が高いことを示している。赤外光偏光度を利用してプリユスタ角以上の角度の判定を行った結果、本実験で使用した半球の材質アクリルのプリユスタ角、 56.7° 以上の角度での測定誤差も非常に小さい。

入射角の小さい部分で測定誤差が大きくなっているのは、球面状面光源の天頂部に測定用に穴をあけていて、天頂部分の光源が存在しないためと考えられる。

図 8 には、貝殻形状オブジェの写真、測定結果の表面形状を可視化したものをそれぞれ (a)、(b) に示した。ここでは形状の可視化のために、得られた法線方向分布から弛緩法¹⁷⁾により 3 次元形状を計算している。

図 8 (b) の結果を見ると、実際の形状をよく再現できており、角度の大きいところ、つまりプリユスタ角以上の角度を判定できている。対象物体のエッジ部分でやや形状が乱れて見えるのは、エッジ部分の入射角が 90° であり、このときの偏光度は限りなく 0 に近



(a) 測定対象物体 (b) 測定した表面形状

図 8 貝殻形状の表面形状測定結果
Fig. 8 Recovered shape of shell-like object.

い値をとるため、正確に 90° という値を測定できないためと思われる。

以上の結果から、任意形状の物体でも可視光測定に赤外光測定を加えることにより、複雑な形状が測定可能になることを示し、提案した手法が透明物体の表面形状測定に有効であることを示した。

4. 結 論

本研究において、透明物体のモデリングを可能とするために、その表面形状測定を非接触、高精度で行う手法として偏光を用いることを提案し、その測定と検討を行った。また、赤外光偏光度を利用することを提案した。物体の熱放射光は赤外光として検出でき、この赤外光も可視光と同様に偏光する特性を示すことを述べた。このとき、赤外光の偏光度曲線は可視光の場合とちがい 1 価関数であるため、一意に解を決定できる。しかし、赤外偏光度の値が全体的に低く測定精度を上げることが困難であるため、この赤外偏光度を、可視光測定値の 2 つの解の判定に用いることを提案した。

この提案した手法をもとに測定を行い、次の結果を得た。まず半球形状のアクリル物体を測定対象として赤外光・可視光両測定を行い測定誤差について調べた。提案した手法の精度が十分測定可能なものであることを確認した。また任意形状を持つ物体として貝殻形状のアクリル物体を測定対象とし、非常に精度の良い測定結果を得た。これにより複雑な形状も測定可能であることが示された。

以上の結果から、本手法による測定において非常に精度の良い結果が示され、提案した手法が透明物体の表面形状測定手段として有効であり、偏光解析を用いた透明物体の形状モデリングを行うことの有用性を示すことができた。

謝辞 本研究の一部は、文部省研究プロジェクト：科学研究費・創成的基礎研究「人間主体のマルチメディ

ア環境形成のための情報媒介機構の研究」(09NP1401)の研究助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Sato, Y., Wheeler, M.D. and Ikeuchi, K.: Object shape and reflectance modeling from observation, *Proc. SIGGRAPH 97*, pp.379-387 (1997).
- 2) 谷田貝豊彦：応用光学光計測入門，丸善（1988）.
- 3) 田幸敏治，辻内順平，南 茂夫：光測定ハンドブック，朝倉書店（1994）.
- 4) Ikeuchi, K.: Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method, *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, Vol.3, No.6, pp.661-669 (1981).
- 5) Nayar, S.K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Determining shape and reflectance of hybrid surface by photometric sampling, *IEEE Trans. Rob. Auto.*, Vol.6, No.4, pp.418-431 (1990).
- 6) Koshikawa, K.: A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects, *Proc. IJ-CAI*, pp.493-495 (1979).
- 7) Wolff, L.B. and Boulton, T.E.: Constraining object features using a polarization reflectance model, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol.13, No.6, pp.167-189 (1991).
- 8) Saito, M., Sato, Y., Ikeuchi, K. and Kashiwagi, H.: Measurement of surface orientations of transparent object using polarization in high-light, *Journal of Optical Society of America A*, Vol.16, No.9, pp.2286-2293 (1999).
- 9) 大津元一：現代光科学，朝倉書店（1994）.
- 10) 土井康弘：偏光と結晶光学，共立出版（1975）.
- 11) Torrance, K.E. and Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, *Journal of Optical Society of America*, No.57, pp.1105-1114 (1967).
- 12) Jordan, D.L., Lewis, G.D. and Jakeman, E.: Emission polarization of roughened glass and aluminum surfaces, *Appl. Opt.*, Vol.35, No.19, pp.3583-3590 (1996).
- 13) Born, M. and Wolf, E.: *Principles of Optics*, Pergamon Press (1959).
- 14) 藤岡知夫，小原 實，齊藤英明：光・量子エレクトロニクス，コロナ社（1991）.
- 15) 赤外線研究会（編）：赤外線光学—基礎と応用，オーム社（1991）.
- 16) Wolff, L.B., Lundberg, A. and Tang, R.: Image understanding from thermal emission polarization, *Proc. IEEE Conf. on CVPR*, pp.625-631 (1998).
- 17) Horn, B.K.P. and Brooks, M.J.: The variational approach to shape from shading,

Computer Vision Graphics Image Processing, Vol.33, No.2, pp.174-208 (1986).

(平成 12 年 3 月 23 日受付)

(平成 12 年 9 月 14 日採録)

(担当編集委員 横矢 直和)



斉藤めぐみ

1998 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2000 年同大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在、日本ヒューレットパッカード(株)。コンピュータビジョン，特に反射物理モデルに基づく画像処理手法等に関心を持っている。OSA 学生会員，レーザー学会学生会員。



佐藤 洋一(正会員)

1990 年東京大学工学部機械工学科卒業。同大学院情報工学専攻を経て，1991 年から CMU ロボティクス学科博士課程に在籍。1997 年 1 月 Ph.D. in Robotics 修了。1997 より東京大学生産技術研究所研究機関研究員，講師を経て現在同研究所助教授。コンピュータビジョン，ヒューマン・コンピュータ・インタラクション，およびコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。平成 11 年山下記念研究賞，Int. Conf. Shape Modeling and Applications '97 最優秀論文賞，MIRU2000 最優秀論文賞，平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会，ACM，IEEE 各会員。



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 計算機科学部を経て，1996 年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能，明るさ解析，物体認識，人間による組み立て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, MIRU2000, 平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌) 受賞。電子情報通信学会，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各会員。OSA 会員，IEEE 会員 (Fellow)。