

修士論文題目

偏光解析にもとづく透明物体の
形状モデリング

指導教授 小原 實 教授

慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻

平成11年度

学籍番号 89820057

齊藤 めぐみ

目次

1	序論	1
1.1	コンピュータ・ビジョンにおける実物体のモデリング	1
1.2	光応用による形状測定	1
1.3	偏光の応用技術	4
1.4	研究の目的	5
2	可視光領域における反射・偏光の原理	11
2.1	はじめに	11
2.2	光の反射の仕組み	11
2.3	フレネルの反射の公式	12
2.4	光と偏光	13
2.5	透明物体反射光の偏光度	15
2.6	おわりに	15
3	可視光の偏光解析による透明物体の表面形状測定	26
3.1	はじめに	26
3.2	測定原理	26
3.3	実験装置・実験方法	27
3.4	実験結果及び検討	29
3.5	可視光域での形状測定の問題点	31
3.6	おわりに	32
4	裏面反射を考慮した薄物体の形状測定モデル	43
4.1	はじめに	43
4.2	薄物体対象の表面・裏面反射光統合モデル	43
4.3	実験装置・実験方法	45
4.4	実験結果及び検討	47
4.5	おわりに	49

5	赤外光領域における偏光の仕組み	57
5.1	はじめに	57
5.2	物体の熱放射	57
5.3	熱放射光の偏光	59
5.4	赤外偏光測定値による解の判定	60
5.5	おわりに	61
6	赤外光・可視光の偏光解析による透明物体形状測定	67
6.1	はじめに	67
6.2	測定原理	67
6.3	赤外光測定実験装置・実験方法	68
6.4	実験結果及び検討	70
6.5	おわりに	72
7	結論	81
	謝辞	84

第1章

序論

1 序論

1.1 コンピュータ・ビジョンにおける実物体のモデリング

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盛んに行われている。コンピュータ・ビジョンにおけるモデリングとは、物体の形状情報や、色やハイライトなどの「見え」つまり反射率に依存する情報をモデル化することを指す。このモデルは画像処理による物体認識等への応用が考えられる一方、物体のパラメータがモデル化されていることを逆に利用して、物体の画像を生成することも可能となる。反射率、形状の両方がモデル化されていれば、ある任意の方向から見た画像、様々な光源下での見え方など、実際の物体を見る場合と同じような変化に対応することができる [1]。

このような実物体のモデリング技術は、実際に存在するものを画像上で見せる際に非常に有用であり、様々な用途への応用が期待される。例えば、重要文化財のデータ保存に大いに役立つ。特に木造建築や木製美術品の多い日本では、腐食、老朽化、損壊、火災などの心配を常にしていなければならないが、電子データとしてコンピュータの中に保存すると、そのような心配に捕らわれず半永久的に重要文化財の姿を後世に残すことができる。また電子図書館や仮想美術館など、最近になって現実化しつつある、コンピュータを使って書籍や絵画、美術品をディスプレイする必要があるものには大いに利用される可能性がある。他にも、インターネットの普及に伴って実用化されてきた電子モールやネットショッピングなどにも同様に需要が考えられる。

以上のように、コンピュータ・ビジョンの実物体モデリングは将来様々な応用が期待されるが、このモデリングを可能とするためには、実物体の形状のモデル化が必要不可欠である。

1.2 光応用による形状測定

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。主な形状測定法を表1に示した [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。これには光プローブ法や三角測量法があげられる。光プローブ法は、光ピックアップ用の光学的微小変位センサの感度が極めて高いことから、特に光学的表面粗さ計用に利用される。臨界角法、非点収差法、ナイフエッジ法、ヘテロダイン法等があり、いずれも微小スポットを対象物体面上に結び、その反射光を検出するものである。三角測量法は、レーザ光ビームを物体に投影して、物体表面に表れる輝点を観測し三角測量の原理にもとづいて輝点座標を計算する方法で、大型物体の形状測定によく利用される。

一方測定法は、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。干渉法は、光波の干渉原理を用いて鏡面形状を測定する方法で、光源からの光波を分割して一方を測定対象物に当て、他方の参照波と重ね合わせて干渉縞を作る装置、干渉計を使うものである。干渉計としては、トワイマン-グリーン干渉計、フィゾー干渉計、斜入射干渉計、ヘテロダイン干渉計、位相変調干渉計等が実用化されており、光源の波長の $1/2$ 程度 (約 $0.3 \mu\text{m}$) の精度が実現されている。また、 piezo素子を用いて参照面を微動させる位相変調干渉法では波長の $1/50$ 程度の精度、光検出器を走査するヘテロダイン干渉法では波長の $1/100$ 程度の精度が得られている。モアレトポグラフィは、平行等間隔の直線格子を物体の上に配置してこれを点光源で照明し、格子の影を物体表面上に作ってこれを格子を通して観測することにより、格子と歪んだ影の格子の間で発生した縞が物体の等高線になることを利用した形状測定法である。モアレトポグラフィには格子照射型と格子投影型があり、いずれも物体の等高線を得るものである [3]。

しかし、これら従来の表面形状測定法にはいくつかの問題点があげられる。まず従来の点測定法では、成型品に光スポットを照射する場合、感度は非常に高く 10^{-6} オーダの感度が得られるが、非常に微小なスポットを表面上に結ぶための光学系が必要であり、さらにスポットを走査するので微小物体の表面粗さ測定に向いており、大型物体の測定には向かない。また、この測定法は光源としてコヒーレンス性を要求する場合が多いので、レーザやそれに付随する光学系が必要となる。

次に従来の面測定法である、干渉法やモアレトポグラフィについて述べる。干渉法は非

常に高感度であり、サブミクロン程度のものから 10 nm 程度の感度を得られることを述べたが、コヒーレントな光源と光学系のアライメントが必要である。また、光学系のサイズによって測定範囲が限定されるために、精密加工品等の測定に向いている。

モアレトポグラフィは、光源と直線格子の配置のみで形状が測定でき、大型物体や人体等の測定に向いていて、光源も白色光等のインコヒーレント光源で測定できるが、測定範囲や感度が格子の大きさにより制限される。投影光学系を用いることで範囲や感度は改善されるが、モアレトポグラフィという測定法自体に、得られるモアレ縞の等高線は等間隔ではないという特徴があるために、モアレ縞の次数が高くなるにつれて感度は低くなる。この点は、光源を点光源の球面波ではなく、レンズを用いて平行波にして照明することによって改善することができるが [4]、光学系のサイズにも測定範囲が依存することになる。さらに、透明物体のように鏡面反射のみの場合には反射光の方向が決まってしまうので、反射方向に観測点を置くために表面方向が既知でなければならない。つまり、モアレトポグラフィは人体等の計測には向くが、透明物体においては、平坦度、歪み計測にしか用いることはできないと考えられる。

以上のような計測法が従来技術としてあげられるが、自然光等のインコヒーレント光を用いた簡便で正確な測定法は存在しないのが現状である。

コンピュータ・ビジョンの分野においても、画像処理にもと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 [6]、それを多数の点光源を用いた球状の面光源に拡張し、表面方向だけでなく反射パラメータも得ることができる手法が報告されている [7]。また、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 [11][12]。しかしこの手法は、非常に限定された特定の物体について適用されており、一般形状の物体への応用が考慮されていない。

ここで透明物体の形状測定に注目して見ると、以上の手法はどれも透明物体の表面形状への適用が不可能であったり、まったく対象として考慮されていないと言える。従って、コンピュータ・ビジョンにおける透明物体表面形状測定の技術の確立が望まれる。

1.3 偏光の応用技術

光を含む電磁波一般において、ある面内で波が振動する偏光という性質がある。物体からの反射光に偏光がかかり入射光に比べて変化するという現象が起きることがある。このとき偏光の変化の仕方は、その光を反射した物体の特性に依存している。このことから逆に、反射光の偏光には物体の様々な情報が含まれているとすることができる。このことは非常に有益であり、様々な応用が行われている。そのいくつかの例を示す。

まず、物体の表面で光が反射する際の偏光状態の変化を観測して、物体自身の光学定数、またはその表面に付着した薄膜の厚みと光学定数を知る方法として、エリプソメトリー (ellipsometry) がよく知られている [3]。この技術は、単分子吸着層の厚みの 10 分の 1 程度に相当する変化を検出できる感度を持つために、表面や薄膜の研究手段、品質管理等において有力である。エリプソメトリーは、光が反射される際の偏光状態の測定に使う装置、エリプソメータを用いて測定を行う。このエリプソメータは、装置の中心軸に試料の表面がくるように試料台があり、これを中心として二つのアームがある。このアームには、片方に光源、偏光子、 $\lambda/4$ 補償板が取り付けられ、もう片方には検光子と光検出器がある。そして、偏光子、検光子、補償板の方位角、補償板の位相差を操作することによって、反射光の偏光状態を調べる。入射角を設定できるので、ブリュースタ角に等しい場合屈折率を求めることができるという透明体の特性から、屈折率が求められる。また金属等の吸収体でも、偏光状態の変化を振幅反射率比や位相差として求めることによって、屈折率と吸収係数を計算することができる。このような方法を用いると基板の上に薄膜があるような場合でも、片方の屈折率が既知であり、透明で吸収のない等方均質な膜であれば、連立方程式を解くことによって屈折率、吸収係数、膜厚まで求めることができる [3]。また、このような方法を利用することによって、表面粗さの評価をすることも可能である [4][14]。

偏光を用いた装置として偏光顕微鏡が代表的なものである。これは結晶の光学的性質を調べるには非常に有力である。結晶の載片を透過光を利用して調べるばかりでなく、鉱物や金属表面を反射光を用いて観察することもある。この顕微鏡は通常のものに偏光板と検光子が鏡筒内に設置されており、試片は任意の方位角の偏光によって観察される。この装置は、結晶の形や色、液浸法による屈折率の評価、二色性の検出等が行えるばかりでな

く、さらに結晶の偏光による干渉色は結晶の位相差の評価に極めて重要な情報を与える。適当な補正器を併用して鋭敏色を利用するとその感度は極めて高くなる [3]。

また、反射光の偏光は上記のような光学的性質を調べるばかりでなく、画像処理技術においても非常に有益であり、応用が考えられている。その例としては、物体の反射光の偏光度を利用した材質判定があげられる。これは、吸収のない透明な誘電体と吸収のある金属とでは偏光度に著しく差があることを利用して、物体の反射光を測定し偏光度を計算することによって、測定した物体の材質を判定するものが報告されている [15]。この手法は、誘電体と金属だけではなく、金属の表面層が内部と異なる材質の場合、例えば錆びた鉄などの判定も行える。これにより、画像の撮影のみによる簡便な材質判定が可能となる。

同様な画像処理における偏光利用技術として、物体に映り込んだハイライト除去があげられる。これは、物体の反射光のうちの2種類の成分、ハイライトとそれ以外の光における偏光度が違うために、この違いを利用してハイライトを分離する技術である [1]。ハイライトが入ることによって物体自体が見えなくなってしまうので、画像処理での物体認識が困難となる場合が多く、この技術は非常に有用であるといえる。また、物体の色認識においてもハイライトが入ると処理が非常に難しくなるため、このハイライト除去の技術は有用である。そのため色の情報と偏光の情報を一緒に処理をすることによってハイライト除去を可能とする報告もなされている [17]。

1.4 研究の目的

1.1 節で述べたように、実物体のモデリングは盛んに行われているが、透明物体に関しては例外として除外され取り扱われないのが現状である。これは、モデリングに必要な形状測定が透明物体の場合むずかしく、現在の形状測定法には自然光等インコヒーレント光を光源として用いる簡便で正確なものが存在しないためと考えられる。そこで筆者は、1.3 節で示したように物体からの反射光が偏光されていることを利用して、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、高精度で行う手法を提案する。ハイライトの偏光を用いることを提案し、その測定と検討を行う。測定手法としては、まず測定手段に CCD カメラを用いる。そして、この CCD カメラでの観察により物体表面を微小面積の測定部位に分割し、それぞれの部位における表面法線方向を直接

求めることによって物体の表面形状を測定するものである。提案する手法により、透明物体の表面形状測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。

以下に本論文の章立てを示す。

第2章では、透明物体の表面形状測定を行うために必要である光学的原理を示す。可視光領域における反射、偏光の原理について述べる。

第3章では、第2章で述べた原理を踏まえ、表面形状を測定する方法を提案しそのアルゴリズムについて述べる。実験方法について述べ、実験装置として球面状の面光源を用いることを提案する。この装置を用いた透明物体の形状測定を行った結果を示し、検討を行う。

第4章では、表面反射光だけでなく裏面反射光も考慮したモデルを提案する。そのモデルにもとづいた測定結果を示し、検討を行う。

第5章では、可視光測定だけでは解が一つに定まらないという問題を解決するために、熱放射光の測定を併せて行うことを提案する。この測定のために必要である、熱放射の物理的原理を示す。赤外光領域における偏光の仕組みについても述べる。

第6章では、第5章で述べた原理を踏まえ、赤外光の偏光測定を行うための実験装置、実験方法について述べる。赤外光領域の測定値と可視光領域の測定値両方を併せて利用し、透明物体の形状測定を行った結果を示し、検討を行う。

第7章では、本論文の結論をまとめる。

参考文献

- [1] Y. Sato, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation”, *Comp. Graphics Proceedings*, 379, (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] 藤原久利, “LCD用ガラス基板平坦度計測法.” *三次元工学研究会資料集*, 8, 67, (1997).
- [5] 久保田広, 浮田祐吉, 會田軍太夫, “光学技術ハンドブック”, 朝倉書店, 1976.
- [6] K. Ikeuchi “Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method,” *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **3**, 661, (1981).
- [7] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade “Determining shape and reflectance of hybrid surface by photometric sampling,” *IEEE Trans. Rob. Auto.*, **6**, 418, (1990).
- [8] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade “Surface reflection: Physical and geometrical perspectives,” *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, **13**, 611, (1991).
- [9] S. Shafer, “Using color to separate reflection components,” *COLOR Research and Application*, **10**, 210, (1985).
- [10] K. E. Torrance, and E. M. Sparrow “Theory for off-specular reflection from roughened surfaces,” *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 1105, (1967).
- [11] K. Koshikawa “A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects,” *Proceedings of IJCAI*, 493, (1979).
- [12] L. B. Wolff “Spectral and polarization stereo methods using a single light source,” *Proceedings of ICCV*, 708, (1987).
- [13] 土井康弘, “偏光と結晶光学”, 共立出版, 1975.

- [14] D. L. Jordan, G. D. Lewis, and E. Jakeman, "Emission polarization of roughened glass and aluminum surfaces," *Appl. Opt.*, **35**, 3583, (1996).
- [15] L. B. Wolff, "Polarization-based material classification from specular reflection," *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, **12**, 1059, (1990).
- [16] L. B. Wolff, T. E. Boult "Constraining object features using a polarization reflectance model," *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, **13**, 167, (1991).
- [17] S. K. Nayar, X. S. Fang, and T. Boult, "Separation of reflection components using color and polarization," *Int. J. Com. Vision*, **21**, 163, (1997).

表 1: 形状測定法

	測定法	対象面	特徴	測定対象
点測定法	光プローブ法	粗面 鏡面	高感度、小型	小型部品、表面粗さ
	三角測量法	粗面	装置は簡単、大型物体、 低感度	人体、工業製品
面測定法	光切断法	粗面	装置は簡単、大型物体、 感度可変	自動車モデル、工業部品
	干渉法	鏡面	高感度	光学部品、精密加工品
	モアレトポグラフィ	粗面	装置は簡単、感度やや低	人体、工業製品
	ホログラフィ干渉法	粗面 鏡面	感度可変、小型物体	小型部品
	ステレオ法	粗面	装置特殊、高価、 大型物体、高精度	地図、大型構造物
傾斜測定	オートコリメーション	鏡面	感度やや高、解析装置要	ウエハ、光学部品
	シェアリング干渉法	鏡面	感度可変、解析装置要	光学部品

第2章

可視光領域における反射・偏光の原理

2 可視光領域における反射・偏光の原理

2.1 はじめに

本章では、前章で述べた背景を踏まえ、透明物体の表面形状測定を行うために必要である光学的原理を示す。一般に波長域 $300 \mu\text{m} \sim 800 \mu\text{m}$ 領域の可視光と呼ばれる光における反射、偏光の原理について述べる。

2.2 光の反射の仕組み

物体からの反射光は一様ではなく、物体の材質、形状によって様々な成分がある。不均質で透明な誘電体を考えた場合、反射光としては次の4つの成分が考えられる。

1. 入射光の波長よりも十分大きい平らな面から正反射方向に1回で反射する光
2. 入射光の波長よりも十分大きい微細面から成る粗い面の間で少なくとも2回以上反射してきた光
3. 物体表面を透過して、中で色素等の pigment のために反射を繰り返した後に再び空気中に透過してきた光
4. 入射光の波長と同程度か、より小さい微細面で回折された光

この4つの反射成分の様子を図 2.1 に示した。1の反射光を鏡面反射光と呼び、2-4の反射光を拡散反射光と呼ぶ[1]。ここで、4の成分は非常に小さいので、物体が波長オーダーの周期構造を持つ場合以外はほとんど無視できる。完全に平らな面を持つ物体では反射成分は1と3のみになるが、大抵の物体の反射光は上にあげた反射成分の和になっている。そのため、物体からの反射の様子を模式的に表してみると図 2.2 に示したように、3つのタイプに大別される。(a)は完全な鏡面の物体からの反射を表しており、一方、(c)は面が粗く完全拡散反射面の物体からの反射を表している。(b)は面の粗さが先の2つの中間であり、どの程度正反射方向に光が集中するかは、表面の滑らかさに依存する。以上の反射成分を考えると、3の反射成分は物体中で反射、屈折、吸収を繰り返し、物体の色を認識させる光となるのに対し、1の反射成分は1回で反射するためにエネルギーが最も大きく、光源の色とほぼ同じ色に見える。2の反射成分は、1に比べるとエネルギーは小さくなる

が1と同様に吸収はほぼないので光源の色と同じになる。1の反射成分に2の反射成分を合わせて、物体には正反射方向のまわりにほぼ光源の色と同じである強い光が見えることになる。この部分の光をハイライトと呼ぶ。ハイライトは、粗い面であれば2の成分が大きくなるので、広く見えるが光自体は弱くなり、完全に滑らかな面であれば1の成分のみになるので、非常に狭い領域で強い光となる。

2.3 フレネルの反射の公式

反射光の測定のために、正反射における反射と透過の原理について以下に示す [2]。

図 2.3 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 から平面の光が $x - z$ 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 に透過していき、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。入射光、反射光、透過光の $x - z$ 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 2.3 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 $\phi_1 = \pi - \phi'_1$ である。このとき、入射、反射、透過光の電界ベクトルのうち $x - z$ 面内に平行な成分、 E_{ap} 、 E_{rp} 、 E_{tp} は次のように表せる。

$$\begin{aligned} E_{ap} &= A_p \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 + z \cos \phi_1)\}] \\ E_{rp} &= R_p \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 - z \cos \phi_1)\}] \\ E_{tp} &= T_p \exp[i\{\omega t - k_2(x \sin \phi_2 + z \cos \phi_2)\}] \end{aligned} \quad (1)$$

A_p 、 R_p 、 T_p は振幅、 ω は角周波数、 k_1 、 k_2 は媒質 1、2 中の波数である。垂直成分も同様に表せる。添字 a、r、t はそれぞれ入射光、反射光、透過光を表す。

ここで、光の反射率について考える。透過の際に光の進む方向が屈折することを表す、スネル (Snell) の法則を次に示す。

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2)$$

境界面において、電界と磁界の面内成分が連続でなければならないことから、媒質 1 側の入射光と反射光の振幅の和が媒質 2 側の透過光の振幅と x 、 y 方向で等しくなければなら

ない。このことから次式を得る。

$$E_{aj} + E_{rj} = E_{tj}, \quad H_{aj} + H_{rj} = H_{tj} \quad (j = x, y) \quad (3)$$

E、Hはそれぞれ電界、磁界を表す。以上の式(1)(2)(3)を用いて平行成分、垂直成分についての振幅反射率 r_p 、 r_s が次のように求められる。

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{\tan(\phi_1 - \phi_2)}{\tan(\phi_1 + \phi_2)} \\ r_s &= -\frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (4)$$

これを、フレネルの公式と呼ぶ。入射角に対する反射率の依存性を図 2.4 に示した。

次に、強度反射率を求める。光強度の大きさは次式で与えられる。

$$I = \frac{nE^2}{2\sqrt{\mu_0}} \quad (5)$$

n は各媒質の屈折率、 μ_0 は真空透磁率である。これより、式(4)を用いて強度反射率は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} F_p &= \frac{\tan^2(\phi_1 - \phi_2)}{\tan^2(\phi_1 + \phi_2)} \\ F_s &= \frac{\sin^2(\phi_1 - \phi_2)}{\sin^2(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

強度反射率 F_p 、 F_s をフレネル反射係数と呼ぶ。このフレネル反射係数の入射角依存性を図 2.5 に示した。

式(4)より、 $r_p = 0$ とする入射角が存在することがわかる。このような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、スネルの法則より次式で与えられる。

$$\tan \phi_b = \frac{n_2}{n_1} \quad (7)$$

2.4 光と偏光

電磁波は伝搬方向に垂直な面内で振動する横波であるので、その面内で方向性のある振動をする。この光波の振動の偏り、すなわち偏光の性質について考える。

偏光は、光の偏光の程度を表す偏光度と、偏光の性質を表す偏光状態の2つで表すことができる。偏光状態は、互いに直交する振動面の振動の振幅と位相関係によって、直線偏

光、円偏光、楕円偏光に区別することができる。本研究においてはインコヒーレント光を扱うため、位相関係はランダムであり、さらに直線偏光子を用いるために円偏光や楕円偏光を検出することはない。そこで偏光状態については、完全偏光はすべて直線偏光として扱う。

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。図 2.6 に示すように白色光等の自然光を直線偏光子に通した場合、出射光は直線偏光となる。任意の方向の偏光成分の明るさは入射光の $1/2$ の明るさとなる。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、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成っているが、拡散反射は一般に非偏光であるため正反射である鏡面反射のみについて考える。

2.3 節で示したように方向によって反射率が違うため、偏光子を回したとき明るさに変化が現れる。図 2.5 に示したように入射面に対して垂直である成分の反射率が最も大きく、平行成分の反射率が最も小さくなる。このため、偏光子を回していくと、観察される明るさの変化はこの二つの成分を最大最小として図 2.7 に示したような正弦波形となる。反射光は非偏光と完全偏光の和である部分偏光であるので、非偏光成分として直流成分が現れているのがわかる。全体の明るさ、光強度は $I_{\max} + I_{\min}$ 、一方完全偏光、つまり直線偏光の光強度は $I_{\max} - I_{\min}$ で表される。ここで、 I_{\max} 、 I_{\min} はそれぞれ光強度の最大値、最小値である。拡散反射成分も考慮に入れて、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。

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

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、2.3 節の図 2.5 から平行成分が 0 となって垂直成分のみになるときである。すなわちブリュースタ角で入射するときである。

2.5 透明物体反射光の偏光度

ここで、本研究で取り上げる完全な透明物体においては、表面からの拡散反射が少なく更に色を持たないため、反射光は 2.2 節であげた反射成分 1、つまり鏡面反射成分のみであるものと仮定することができる。

偏光している光の I_{\max} と I_{\min} の和が全体の光強度になるので、鏡面反射強度を I_{specular} とおくと、透明物体からの反射光の場合、次式が得られる。

$$I_{\max} = \frac{F_s}{F_p + F_s} I_{\text{specular}}, \quad I_{\min} = \frac{F_p}{F_p + F_s} I_{\text{specular}} \quad (9)$$

上の式と式 (6) を式 (8) に代入し、スネルの法則を考慮すると、偏光度 ρ は次のようになる。

$$\rho = \frac{2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi}}{n^2 - \sin^2 \phi + \sin^2 \phi \tan^2 \phi} \quad (10)$$

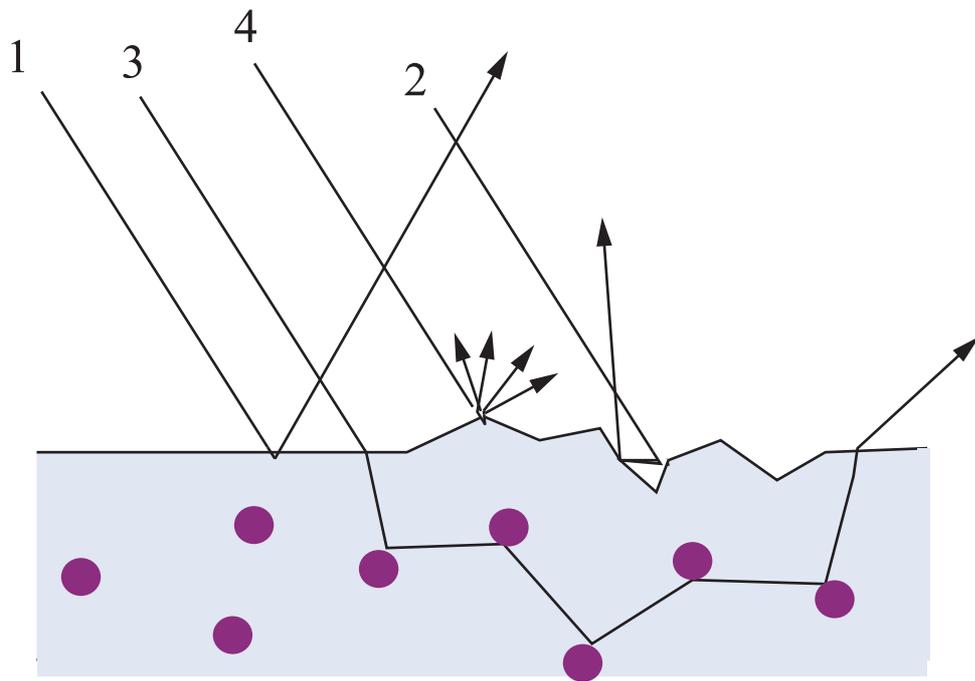
このように、偏光度 ρ は屈折率 n と入射角 ϕ の関数となっていることがわかる。屈折率 1.5 の場合の偏光度の入射角依存性を図 2.8 に示した。

2.6 おわりに

本章では、表面形状の光計測の背景を踏まえ、透明物体の表面形状測定を行うために必要である光学的原理を示した。具体的には、光の反射、屈折の公式、偏光の原理について述べた。

参考文献

- [1] L. B. Wolff, T. E. Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., **13**, 167, (1991).
- [2] 大津元一, “現代光科学”, 朝倉書店, 1994.
- [3] 土井康弘, “偏光と結晶光学”, 共立出版, 1975.



- 1: 鏡面反射成分
- 2: 表面で2回以上反射された成分
- 3: 媒質中を透過してくる成分
- 4: 微細面での回折光成分

図2.1 反射の仕組み

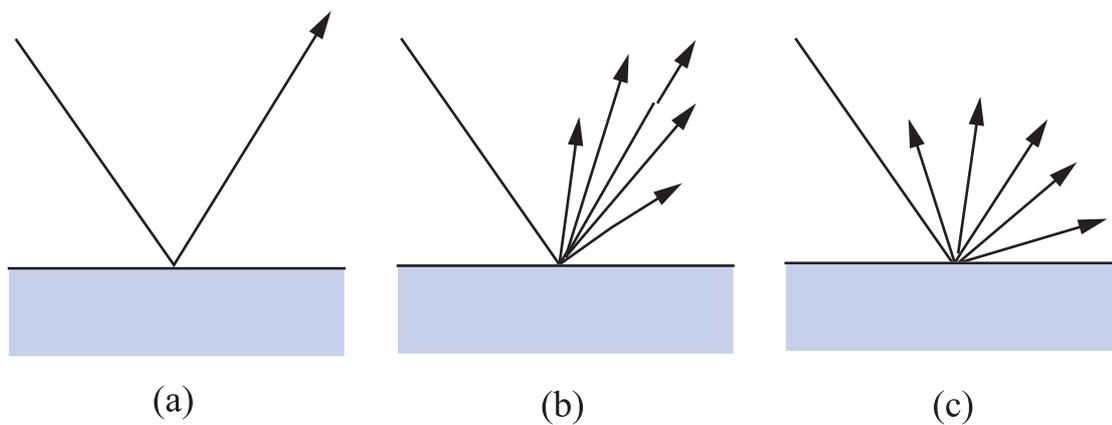


図2.2 表面粗さに依存した反射の様子

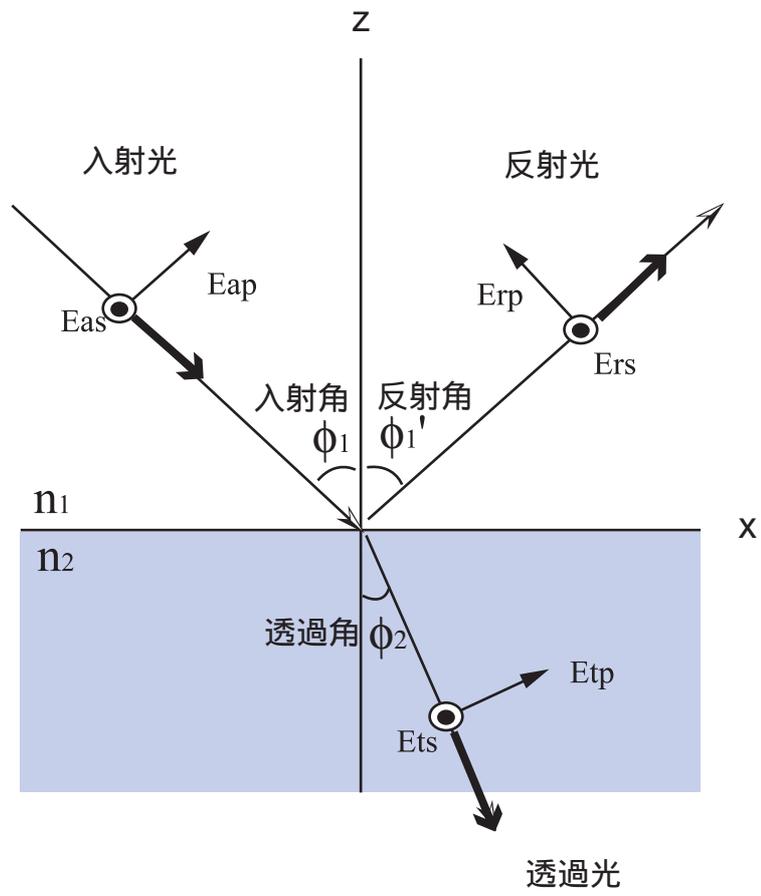


図2.3 フレネル反射

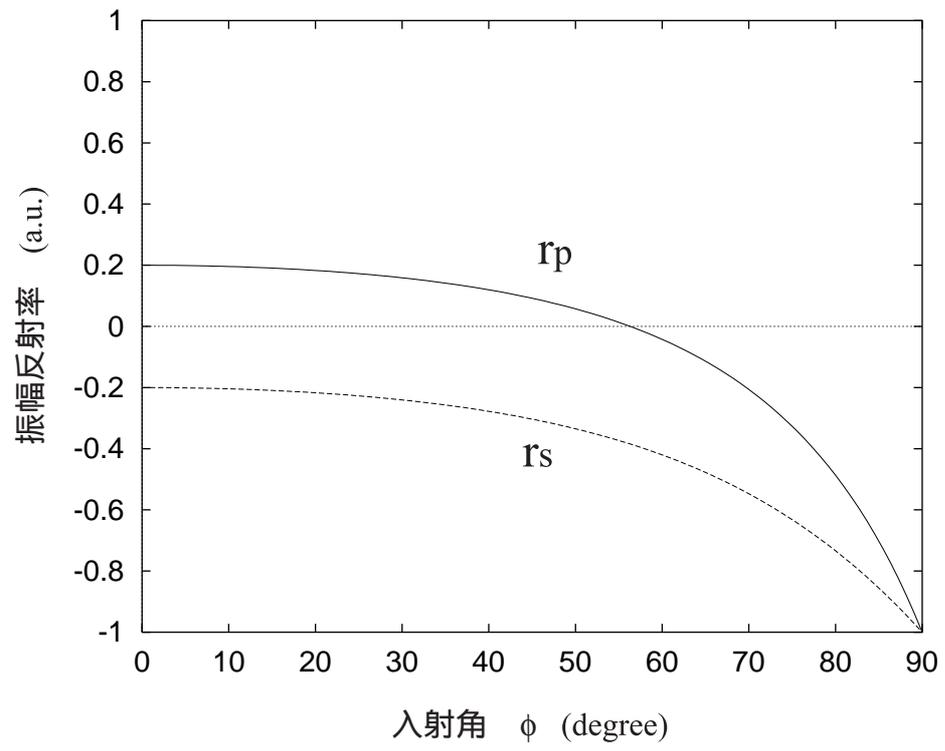
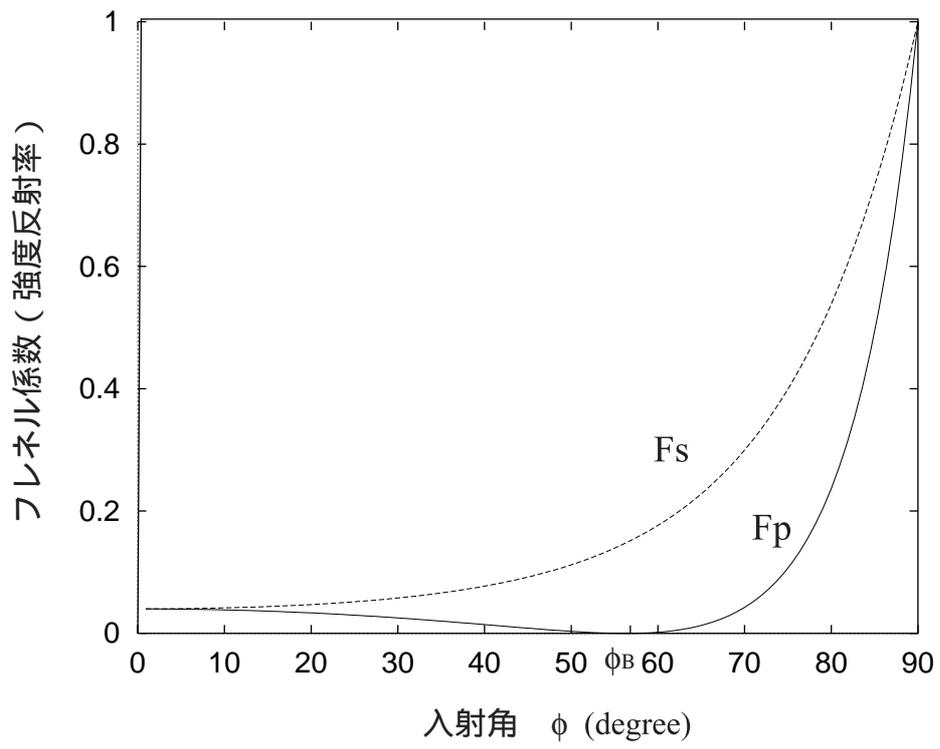


図2.4 振幅反射率の入射角特性



ϕ_B : ブリュースタ角

図2.5 フレネル反射係数 (強度反射率) の入射角特性

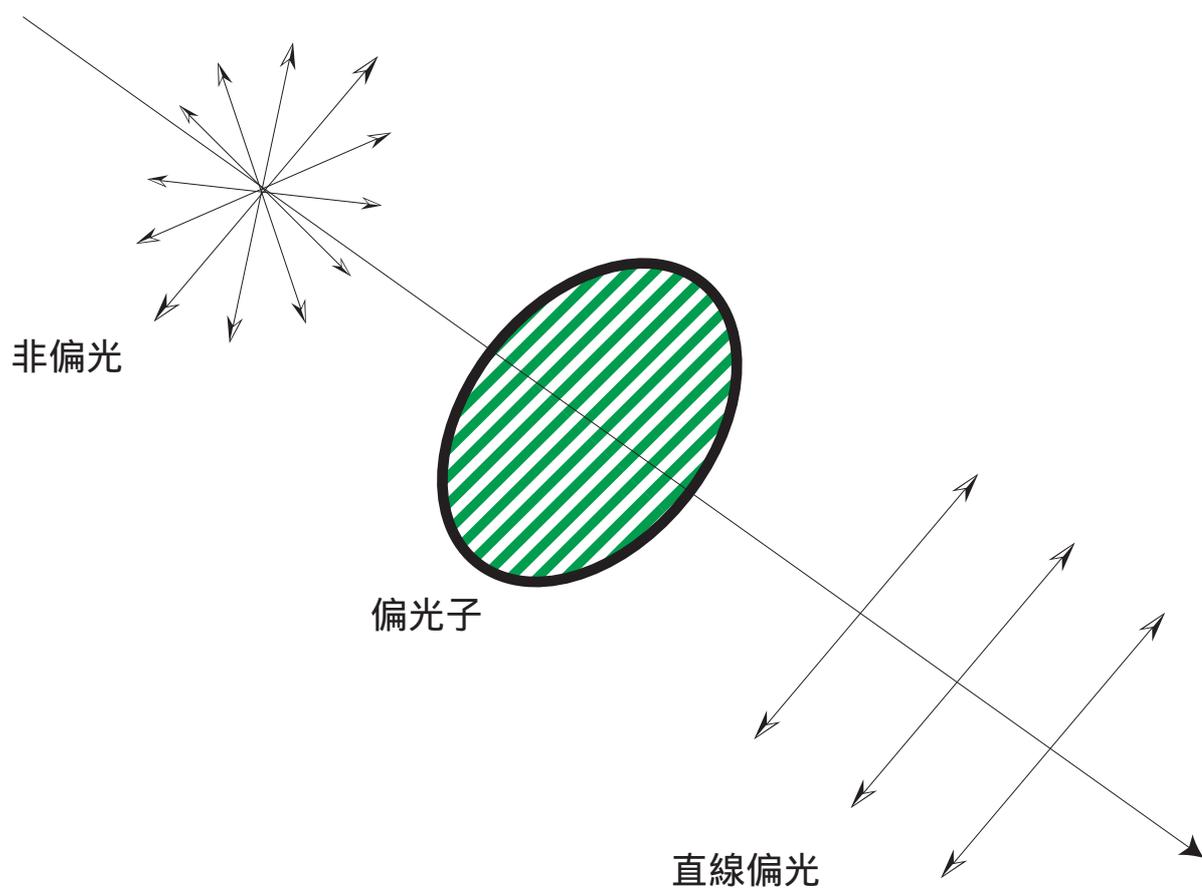


图2.6 偏光

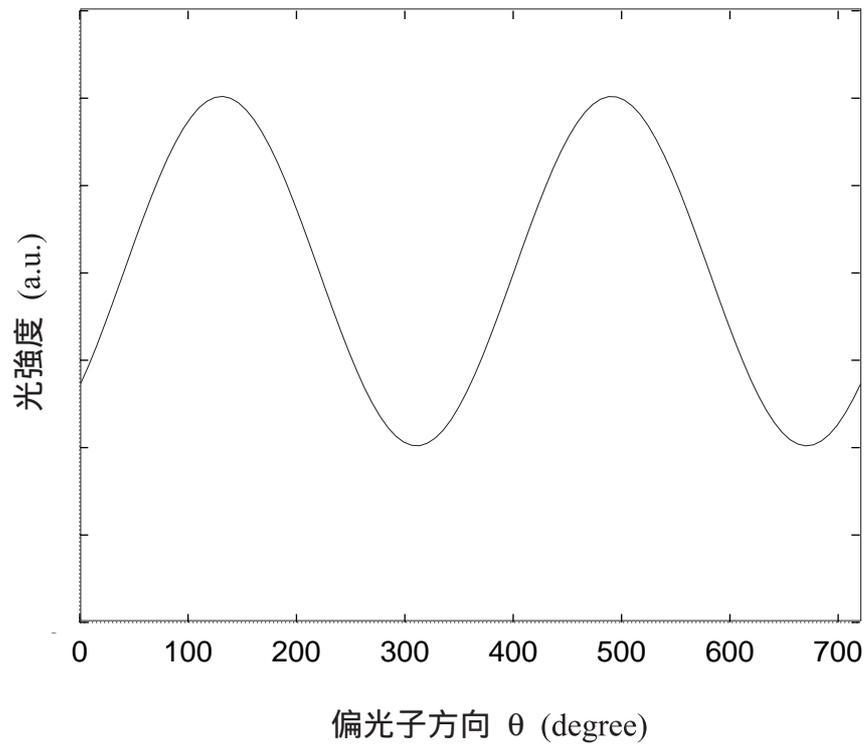


図2.7 反射光の偏光

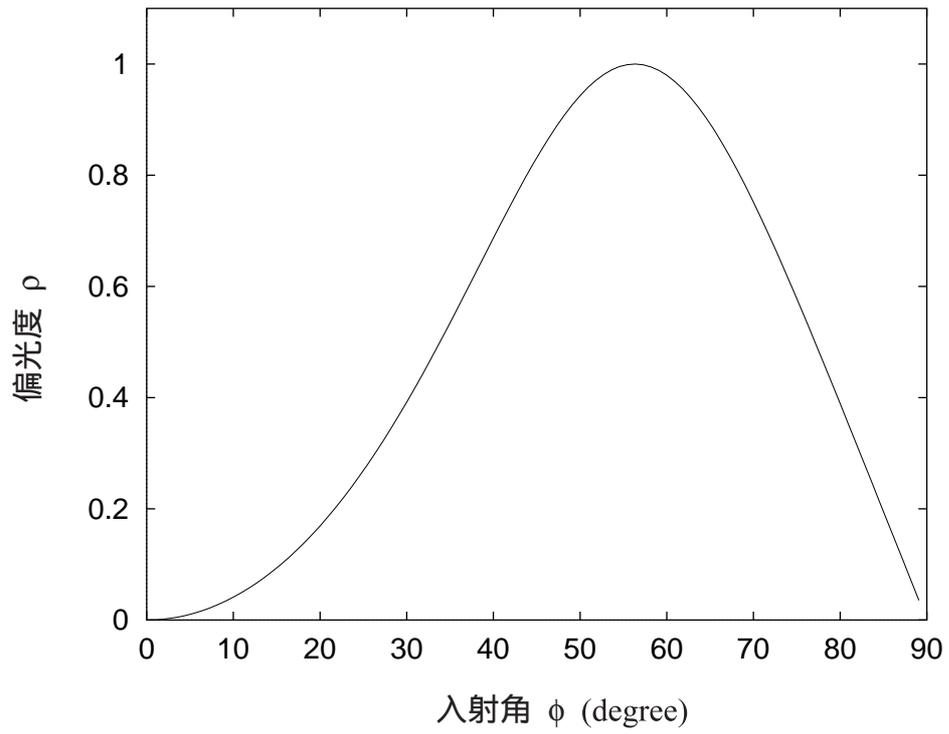


図2.8 偏光度の入射角依存性 ($n=1.5$)

第3章

可視光の偏光解析による透明物体の 表面形状測定

3 可視光の偏光解析による透明物体の表面形状測定

3.1 はじめに

本研究では、前章で述べた反射と偏光の原理を踏まえ、透明物体の表面形状測定法を提案する。本章では、まず最初に提案する測定方法の原理について述べる。表面形状測定を行うために球面状の面光源を用いることを提案し、この光源を用いた実験装置について述べる。そして、この実験装置を用いて行った測定結果を示し、検討を行う。

3.2 測定原理

表面形状の測定法としては、物体の各点の三次元座標、すなわち深さや高さを測定して立体形状を測定する方法と、物体の等高線、つまり物体各点における高さ分布を求めて形状を測定する方法があることは第1章で述べた。これらはいずれも物体各点の三次元座標値をもとに形状を求めるものである。ここで筆者は、物体表面を微小面積の測定部位に分割し、それぞれの部位で表面法線方向を直接求めることによって、物体の表面形状を測定することを提案する。

拡散反射がほとんど無視でき吸収がないとみ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わかれば表面法線方向を求めることができる。法線方向が求められる様子を図3.1に示した。よ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。

まず入射面方向の測定法について述べる。前章で述べたとおり、反射光は偏光されている。物体からの反射光を偏光子を間に置いて観察すると、偏光子を回すことで光強度に変化が見られる。その変化のしかたは、前章の図2.7に示したように正弦波形を示す。前章の図2.3の $x-z$ 面が入射面であるので、図2.5から、この正弦波形の最大値 I_{\max} と最小値 I_{\min} はそれぞれ入射面に対して垂直な成分と平行な成分を表していることがわかる。このことは、前章の式(9)でも示されている。従って、 I_{\min} を得るときの偏光子の方位角、偏光角がそのまま入射面方向の方位角である。これによって入射面方向を決定することができる[4]。この入射面方向の方位角を θ とし、この定義を図3.2に示す。

次に入射角の測定法について述べる。2.5 節において、ハイライトは鏡面反射成分のみで構成されると見なせるために偏光度 ρ は次のように与えられることを述べた。

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

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わかる。このことから逆に、偏光度 ρ と屈折率 n が求めれば入射角を求めることができ、これが提案する手法の基本となる。

本研究においては、測定対象物体の屈折率は既知であると仮定する。また、偏光度 ρ は前章の式 (8) から、偏光子方向を変化させた際に観察される I_{\max} と I_{\min} から求めることができる。従って、屈折率と偏光度を上式に代入することにより入射角 ϕ を決定することができる。以上のように、入射面方向と入射角を決定することができた後、透明物体表面形状として法線方向を求めることができる。

3.3 実験装置・実験方法

前節において、物体から反射したハイライトを利用することによって透明物体の表面形状を測定する方法について述べた。しかしハイライトは第 2 章で述べたように、表面が滑らかで拡散反射が無視できる程小さいような物体においては非常に狭い面の領域にしかなれない。そのために、測定対象物の表面形状を全面において 1 度に測定することが難しい。

そこで筆者は、表面形状測定に球面状の面光源を用いることを提案する。面光源とは、電球のように 1 点から周囲に向かって球面波を発生させる点光源と違い、ある程度広い面積を持った部分全体から光を発生させる光源のことである。面全体から光を発するので、物体に光の当たる範囲が広い。点光源の代わりに面光源を用いることによって、測定対象物体表面の広い領域にハイライトを生成させることができる。ハイライトは鏡面反射であるので本来光源方向と観察方向に強く依存する。しかし面光源を用いると広い範囲に光源が存在するのと同じであるので、光源方向に対する依存が少なくなり多方向からのハイライトを 1 度に観察することができる。さらに、この面光源を球面状に形成し、球内部中央に測定対象物を配置することによって全方向に光源を得るのと同じことになる。これに

よって表面全面にハイライトを生成させることが可能となる。

従って、測定対象物である透明物体の表面形状を全面において1度に測定することができ、カメラ走査を必要とせずに極めて簡便な装置により表面形状測定を行うことができる。

実験装置を図3.3のように構成した。この実験装置を撮影した写真を図3.4に示す。

光源としては、白色光として300Wの白熱灯を用いた。反射光検出器としては、SONY社製のモノクロCCDカメラXC-57を用いた。CCDカメラは、有効画素 480×512 pixel、セルサイズ $17.0 \mu\text{m} \times 13.0 \mu\text{m}$ 、撮像面積 $8.8 \text{ mm} \times 6.6 \text{ mm}$ 、レンズマウントがCマウントのものである。レンズは、Nicon社製CマウントレンズMicro - NIKKOR (焦点距離 $f = 55 \text{ mm}$)を用いた。偏光子としては、直線偏光子、オプトライン社製直径 $100 \text{ mm} \phi$ 偏光板POLAX-32Nを用いた。図の実験装置を、画像をコンピュータに取り込むために使用するA/D変換器につなぎ、コンピュータと接続してデータ処理を行う。画像は 480×640 pixelの2次元画像で、8 bit 256階調のものである。

白熱灯は同じものを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。面光源を得るために光拡散体を用いた。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、拡散体内部で光が拡散されほぼすべての方向の光線を得られるようになっている。この球状光拡散体の1個所に穴を開けて、そこに検出器のCCDカメラを配置した。また、CCDカメラのレンズの前に偏光子を配置した。拡散体の穴の位置は、対象物のセッティング方法によるが、最も簡便なものとして対象物を載置台の上に載置する方法をとったので、穴は対象物の真上、プラスチック球の頂部にあけ、その上方にCCDカメラと偏光子を設置した。

測定対象物体は、ほぼすべての方向からの光線を受けてそのすべての方向に光を反射する。このうち検出器を設置した方向を向いた反射光のみが検出される。そこで、測定対象として、屈折率1.5の亚克力から成る中空半球状物体、直径 5 cm のものを用いた。この亚克力半球を測定対象として選んだ理由は、面光源からの光線を全面で均等に受けられるためと、球状であるので入射面方向がわかり測定結果の評価がしやすいためである。また、同じ屈折率1.5の亚克力の円錐形状物体、直径 3 cm のものも同様に測定した。

次に、この実験装置を用いて測定を行う実験方法について述べる。測定は、偏光子を順次回していきながら画像を CCD カメラで撮影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、サンプリング間隔が大きく得られる最大値、最小値のデータは必ずしも真値と一致しない。そこで 36 個のデータを正弦波形に非線形最小自乗法によりフィッティングさせて、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。

3.4 実験結果及び検討

前節で述べた実験装置により、透明物体としてアクリル透明物体を使用して表面形状測定を行った。この測定結果について、半球形状のものを図 3.5、円錐形状のものを図 3.6 に示した。各画素ごとに算出された法線を 2 次元画面上に投影したものを、各図 (a) に示した。各画素の法線はすべて表示せず、20 pixel ごとに表示した。算出した表面法線をもとに、表面形状の面方向を計算して 3 次元的に可視化したものを各図 (b) に示した。

図 3.5(a) について見てみると、表面の法線方向はほぼ図中央と各画素とを結ぶ線上にあり、図中央部分を中心として 360 ° 回転した分布となっている。図中央には、測定対象の半球状透明物体の中心がある。従って、入射面方向の測定結果、表面法線方向の画面上の分布が半球面の法線方向と一致していることがわかる。また、図示した法線の長さは、実際の法線を投影しているために入射角の大きさに依存しており、入射角が大きい程図示された線の長さが大きくなる。これについて見てみても、半球面の法線分布と一致する形に分布していることがわかる。

この結果から、透明物体の表面形状測定において、偏光子の 1 回の回転のみで物体全面の測定が可能となることが示され、球面状面光源を用いて測定を行うことの有効性が示された。また入射面方向の測定が非常に精度良く行えることが分かった。

実際に測定した表面法線方向により求められる表面形状が、どのような形になっている

かを把握するために各図 (b) のように表面形状を計算した。これは、実際に計算アルゴリズムにより求められた法線方向から、物体の各画素の高さを計算したものである。この方法としては、relaxation 法を用いて計算を行った。法線方向から表面の傾きがわかるので、この傾きをもとに隣接する画素どうしで高さを比較する。これを繰り返すことによって各画素における高さを計算した。

結果を見ると、図 3.5 によって示された法線方向は半球面状のものと良い一致を示していることがわかる。測定された法線方向がすべての画素において連続的であり、半球面が得られていることがわかる。

次に、本手法における測定誤差について検討する。半球形状測定結果の誤差分布を図 3.7 に示した。図 3.7(a) は入射角測定値と真値との差を 2 次元的に可視化したもので、Grayscale 表示で表しており、より明るい画素がより大きい誤差を表している。測定画像の中で円を成す物体輪郭線を利用して半球の各画素での真値を求め、その真値からの誤差を計算している。ここで入射角が 50° 以上の領域においては、プリュースタ角よりも大きい角度の領域となり、測定精度が異なるため無視しており表示していない。図 3.7(b) は、その画像の中心を通る直線上に乗る pixel について、その誤差をプロットしたグラフを表示した。従って横軸は画像の column 数である。

図 3.7 について見てみると、入射角の小さい部分以外の誤差は非常に小さく、真値によく一致していることが分かる。全体として、入射角 0° 付近の誤差を含めても平均誤差 0.82° という非常に良い結果が得られた。

入射角の小さい部分において誤差が大きくなってしまう原因は、次のように考えられる。本実験で構成した実験装置においては、検出器の CCD カメラを配置するために、面光源として使用する光拡散体の頂部に穴を開けている。このために、面の頂部は面光源として機能せず、測定対象物体の上方からの入射光は他の部分に比べて著しく不十分であるという問題がある。従って、CCD カメラにより対象物体を撮像したとき、画面中央部分において、他の部分と比較して測定精度が大きく落ちると考えられる。提案する手法自体に起因するものではない。

この問題は、上方からの入射光がほぼないために起こるので、解決法としては、頂部からの入射光を少しでも増やすために CCD カメラに隣接した場所にも光源を置くことで拡

散光を増やし、測定可能な入射角の範囲を広げることが考えられる。本実験においては、光源として、球面拡散体の周囲に3つの白熱灯を配置したが、これでは上方からの入射光が十分に得られない。光源をさらに増やして各方向均等に配置することにより、測定精度が上がることを期待できる。

図3.7(a)において、誤差の分布が一様でないことが見てとれる。微妙な差ではあるが、半球の中心を中心として誤差の非常に小さい部分が3つの円のような模様を形成している。これは、球面状面光源の外側に配置した3つの白熱灯の位置に一致しており、光源の明るさに比例して誤差が小さくなっている。これは、光強度が大きいことによって I_{\max} と I_{\min} の差を検出しやすくなり、偏光度 ρ の精度が上がるためと言える。このことから、光源の明るさを十分にとることにより、より精度の高い測定が行えることがわかる。

3.5 可視光域での形状測定の問題点

ここで、本手法により算出される測定値に大きな問題がある。測定されたデータから入射角を算出する過程で、二つの解が得られるということである。第2章で述べた原理より、偏光度の入射角特性は2価関数の形で得られるため、偏光度を与えたときにはブリュースタ角を挟んで二つの入射角が求まることになる。そのため、入射角は一意には決まらないという問題がある。この様子を図3.8に示した。本実験のデータ処理において、構築したアルゴリズムではこの事を考慮することができず、何らかの仮定にもとづき二つのうち一方を解として出している。

二つの解を算出しているので、このうちのどちらかを選ぶ情報があれば正しい測定値は得られる。本実験のように、測定対象物体の形状が半球であるとわかっているような場合には解を選択することが可能になる。しかし、それでは未知形状物体の形状測定にはならず、次の円錐形状のような場合には正確な測定が行えないということになる。図3.6の円錐形状測定結果は実際の傾きよりも小さい方の解を選択してしまっており正しいものが得られていない。従って、この二つの解の選択方法を確立する必要がある。

それともう一つ、対象が透明であるため物体の表面を透過し、裏面で反射されて再び表面を透過してくる光、裏面反射光の存在が問題となる。これは透明物体の測定には必ずついてまわる問題であるが、この裏面反射光の影響を本実験のアルゴリズムでは考慮してい

ない。本来、裏面反射光は光が入射してから透過・反射・透過という3つのプロセスを経て感知されるものであり、特に透過される際に大部分の強度を失う。従って、無視できるくらい小さい場合も多く、また本実験でも裏面が平面であり、測定結果に裏面反射による影響は見られなかった。しかし裏面形状によっては測定に大きな影響を与え、測定誤差が大きくなっていくものと思われる。裏面反射自体を除去することはできないので、アルゴリズムの中でこの影響を考慮し、表面・裏面それぞれの反射光を合わせた光を解析し形状を測定する方法が必要となってくる。

3.6 おわりに

本章では、表面形状測定法を提案しその原理について述べた。また、これを行うために球面状の面光源を用いることを提案し、この光源を用いた実験装置について述べた。そして、この実験装置を用いて透明物体の表面形状測定を行い、以下の知見を得た。

1. 偏光解析を用いて透明物体の表面形状測定を行い、その結果測定値は真値と非常に良い一致を示した。本実験の半球形状の場合のように、プリュースタ角よりも小さい角度の傾きを持つ凸表面の測定に関しては、十分測定可能であることが示された。
2. 本手法による測定では、偏光度曲線が2価関数であるために、解が一意に求まらず、プリュースタ角をはさんで大小二つの角度を算出してしまうため、解が一意に求まらないという問題点がある。このため、大小様々な角度が混在するような任意の形状を測定することができないので、二つの解の選択方法を確立する必要がある。

参考文献

- [1] L. B. Wolff, T. E. Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., **13**, 167, (1991).

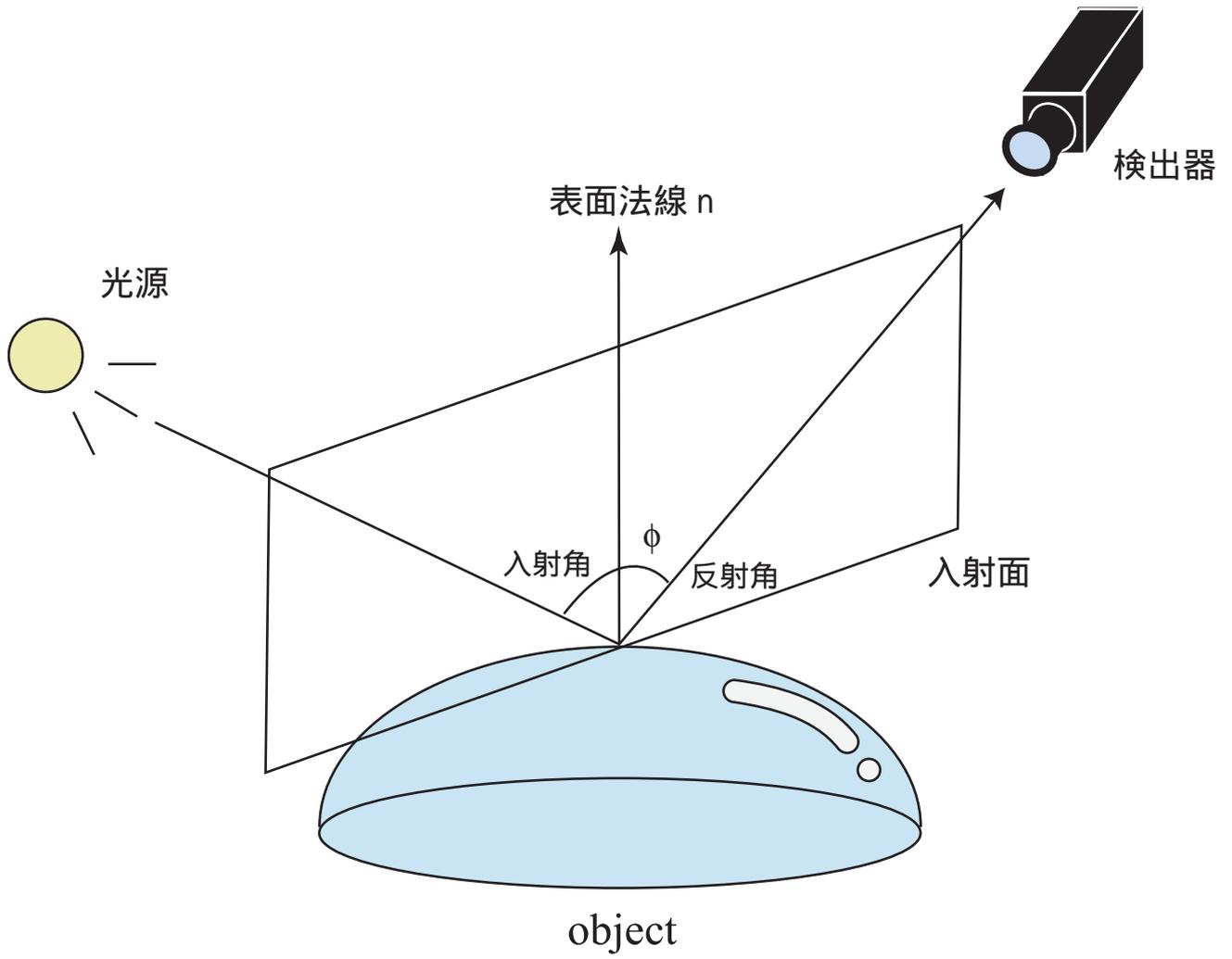


図3.1 表面法線方向

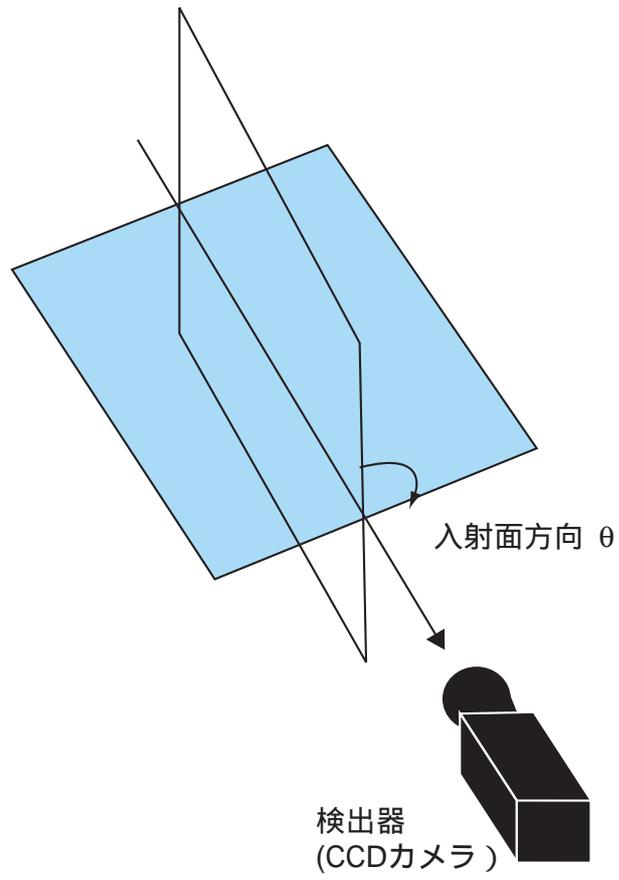


図 3.2 入射面方向の定義

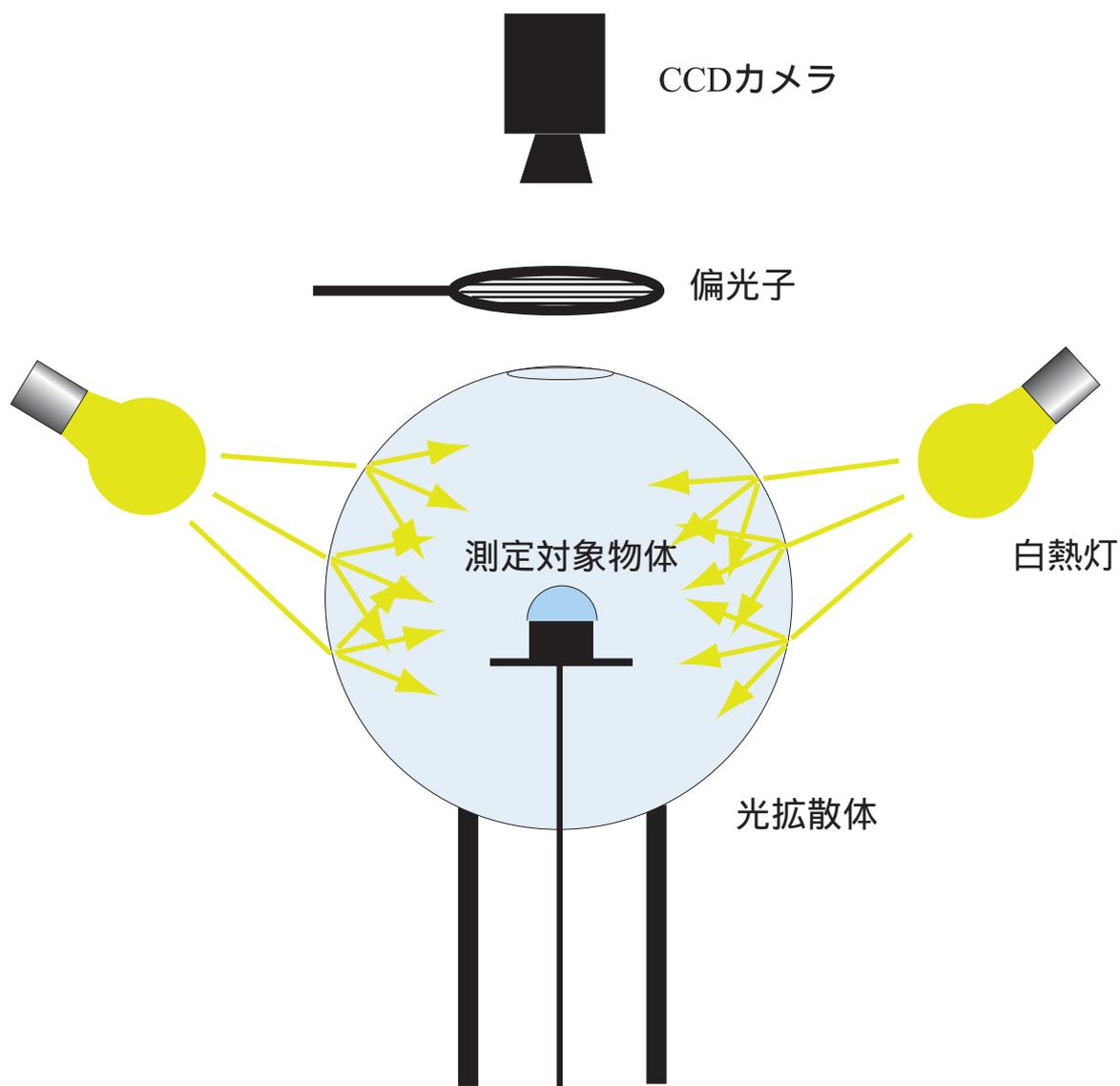


図3.3 実験装置図

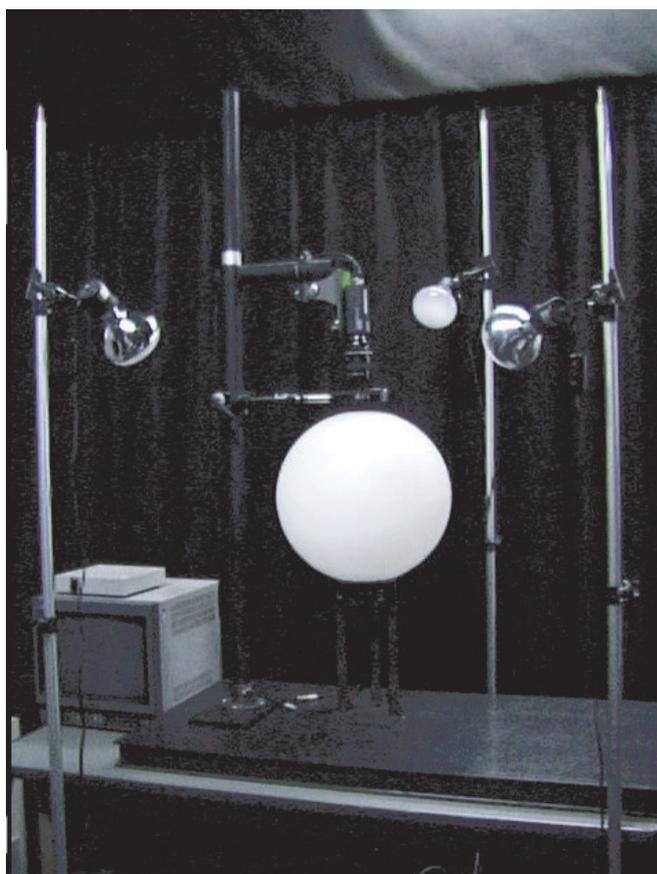
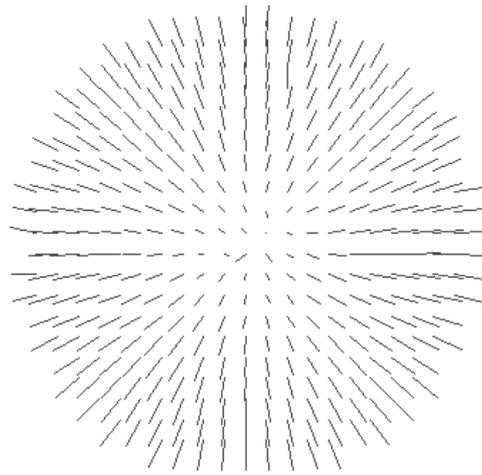


図3.4 実験装置の概観

(a)



(b)

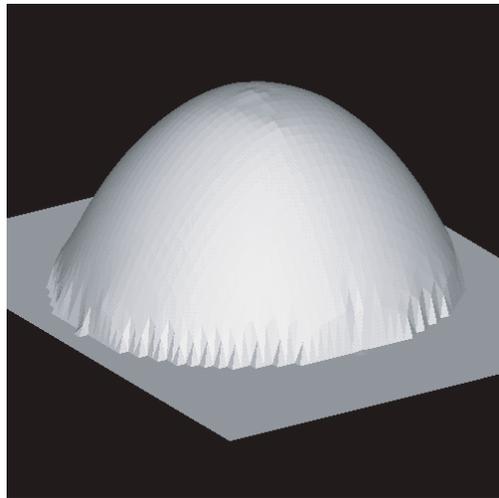
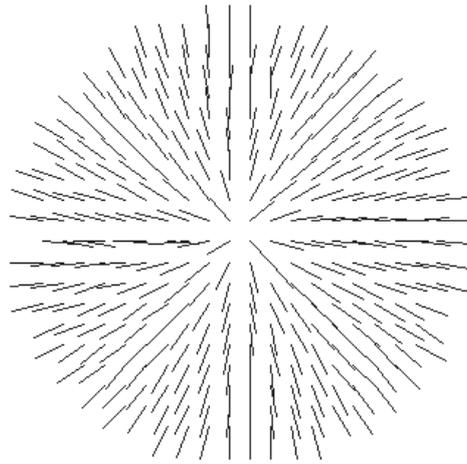


図3.5 アクリル半球形状測定結果

(a)



(b)

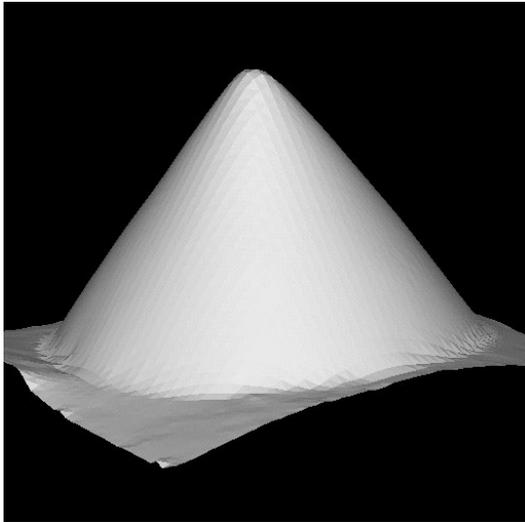


図3.6 アクリル円錐形状測定結果

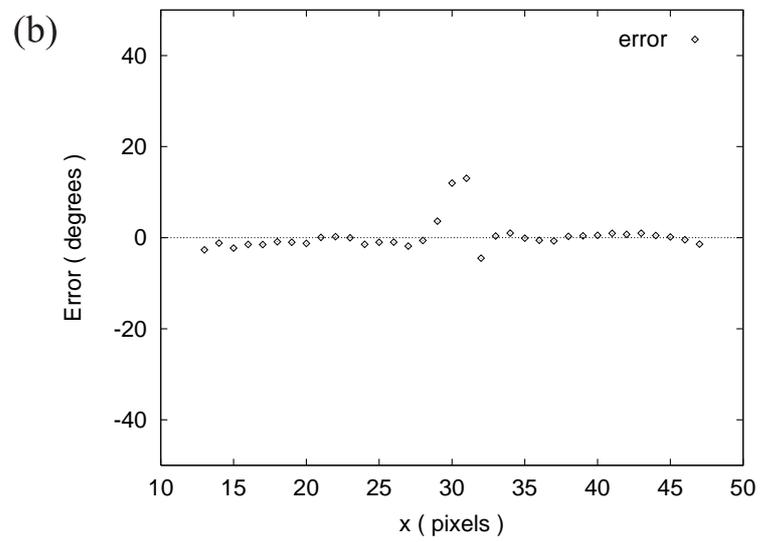
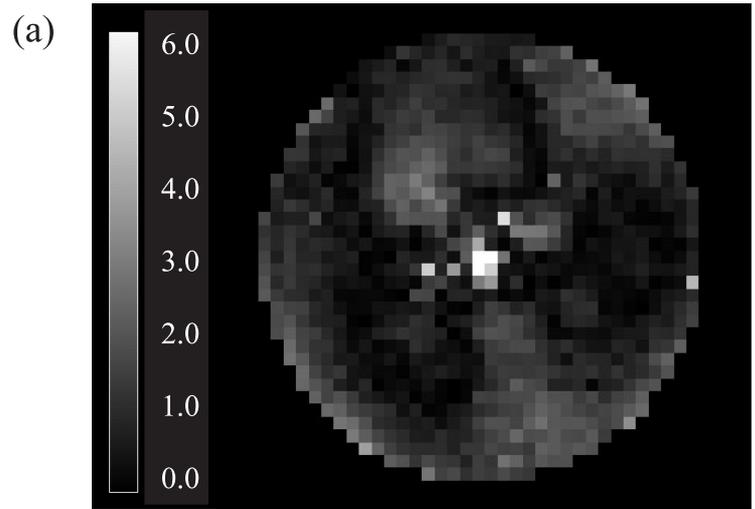


図3.7 半球形状の測定誤差分布

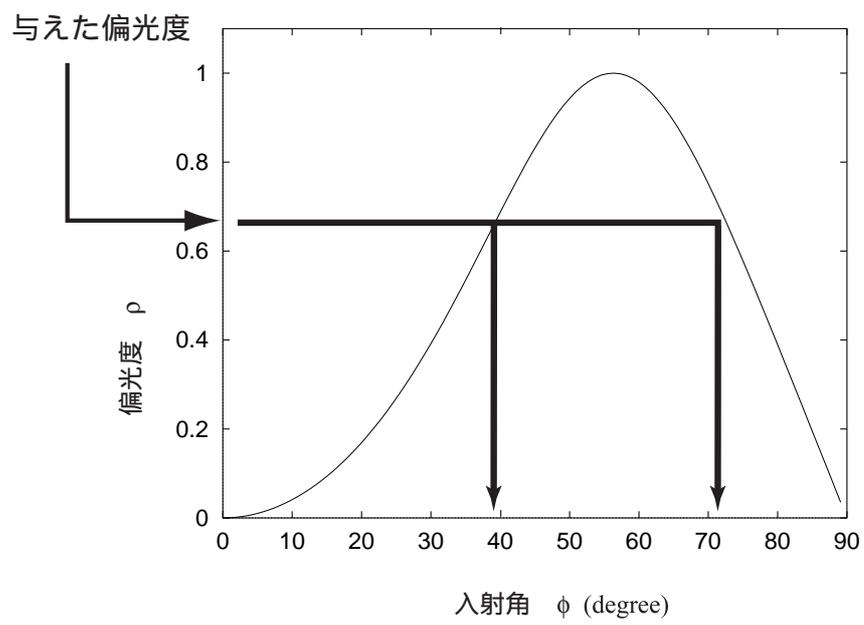


図3.8 入射角測定の Ambiguity

第4章

裏面反射を考慮した薄物体の 形状測定モデル

4 裏面反射を考慮した薄物体の形状測定モデル

4.1 はじめに

本章では、前章で述べた本手法の問題点・裏面反射についての考察を行う。前章までのモデルの改良方法、表面反射と裏面反射の統合モデルを提案し、これを検証する。具体的には、表面と裏面の法線方向が等しいと仮定できるような十分薄い透明物体について測定を行い、この実験結果に改良アルゴリズムを適用してその結果を示し、検討を行う。

4.2 薄物体対象の表面・裏面反射光統合モデル

透明物体の場合、反射光は表面反射光の他に、表面を透過して裏面で反射されもう一度表面を透過して検出器まで到達する裏面反射光が含まれている。筆者が提案している形状測定法は、反射光の偏光度を解析することによって法線方向を求めるが、この反射光は表面から1回反射されてきたものという仮定がある。従って、この反射光に裏面からの反射光が含まれると多かれ少なかれ誤差を生み出してしまう。前章においては測定対象が単純な形状で、裏面反射光の影響がほとんど無視できるものであったが、任意の形状を測定した場合にはこの影響による誤差は大きくなるものと思われる。裏面反射も考慮したモデルを構築することは、任意形状の測定を可能にするという点で必要である。

裏面反射を考慮するためには、反射光全体のうち裏面反射光がどれだけの割合を占めるかを知ることが必要になってくる。しかし、対象物体が複雑な形状を持っている場合、裏面でどのように光が反射されてくるかを調べるのは非常に困難である。そこで筆者は、表面と裏面の法線方向が等しいと仮定できるような、表裏が非常に近い、つまり非常に薄い物体を対象に限定して裏面反射の影響を考える。具体的には、車のフロントガラスのような板状のものや、中空構造を持ち表皮のような形で透明物質が使われているもの等を対象として扱う。

表面と裏面の法線方向が等しいと仮定できる場合、つまり表面と裏面の形状が等しい場合の様子を図4.1に示した。この図の入射光が場所によらず一様な強度で入射していると仮定すると、裏面反射光はどのような反射角、屈折角で反射・透過され検出器まで到達す

るのかを調べれば、第2章の原理にもとづいて裏面反射成分を計算することができる。第2章図2.3と同様に、ある境界面で接する二つの媒質1と媒質2の屈折率が $n_1 < n_2$ のとき、それぞれ一方の媒質から他方の媒質に入射する場合の反射率・透過率の反射角特性を図4.2に示した。本研究の場合 n_1 は大気、 n_2 は透明物体の屈折率である。

図4.1より、検出器に入る光の反射角は視線方向を軸として ϕ_1 、透過光の屈折角は ϕ_2 である。この二つの角度はスネルの法則より $n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$ の関係がある。表面と裏面の法線方向が等しいという仮定より、裏面での反射角は屈折角 ϕ_2 と等しくなる。ここで第2章のように、入射面方向に対して平行な成分、p成分の反射率、透過率をそれぞれ F_{p1} 、 F_{p2} 、 T_{p1} 、 T_{p2} とおく。添字1、2はそれぞれ媒質1、2から入射する場合を表している。入射光強度、表面反射光、裏面反射光をそれぞれ I 、 $I_p(S)$ 、 $I_p(B)$ とおくと、次のように表すことができる。

$$I_p(S) = F_{p1}(\phi_1) \cdot I \quad (11)$$

$$I_p(B) = T_{p1}(\phi_1) \cdot F_{p2}(\phi_2) \cdot T_{p2}(\phi_2) \cdot I \quad (12)$$

括弧内は入射角を示している。裏面反射光は図4.1から分かるように、透過・反射・透過というプロセスを経てくるため上式のようになる。さらに、媒質1から2への振幅透過率 r_1 と媒質2から1への振幅透過率 r_2 はストークス (Stokes) の定理より次の関係がある。

$$r_1(\phi_1) = -r_2(\phi_2) \quad (13)$$

従って強度反射率 F については、 $F_1(\phi_1) = F_2(\phi_2)$ となり、 $F + T = 1$ の関係から $T_1(\phi_1) = T_2(\phi_2)$ となる。これを用いて、式(12)は次のように表せる。

$$\begin{aligned} I_p(B) &= T_{p1}(\phi_1) \cdot F_{p1}(\phi_1) \cdot T_{p1}(\phi_1) \cdot I \\ &= \{T_{p1}(\phi_1)\}^2 \cdot F_{p1}(\phi_1) \cdot I \end{aligned} \quad (14)$$

垂直な成分、s成分についても同様に考えることができる。よって、法線方向を求めるた

めに必要な偏光度 ρ は式 (8)(9) より次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} \\
 &= \frac{(I_s(S) + I_s(B)) - (I_p(S) + I_p(B))}{(I_s(S) + I_s(B)) + (I_p(S) + I_p(B))} \\
 &= \frac{(F_{s1} + \{T_{s1}\}^2 \cdot F_{s1}) - (F_{p1} + \{T_{p1}\}^2 \cdot F_{p1})}{(F_{s1} + \{T_{s1}\}^2 \cdot F_{s1}) + (F_{p1} + \{T_{p1}\}^2 \cdot F_{p1})} \quad (15)
 \end{aligned}$$

前章と同様に I_{\max} と I_{\min} を測定して偏光度を求め、上式を用いることによって、裏面反射光の影響を考慮した入射角を算出することができる。裏面反射も考慮された薄物体の偏光度曲線を図 4.3 に示した。この図を見ると、角度の大きい部分で特に、裏面反射の偏光度は表面反射のものと大きく差を生じてくるのが分かる。従って裏面反射が全くないと仮定して計算した場合の誤差は非常に大きくなってしまふ。本章においては、この表面・裏面反射を合わせた偏光度曲線を用いて入射角を計算する。

ここで、法線方向を得るためのもう一つのパラメータ、入射面方向について考える。偏光度がマイナスになるということは、s 成分と p 成分の大小関係が逆転することを表している。裏面反射光は、角度が 90° に近づくと反射光の平行成分と垂直成分の大きさが逆転することが、図 4.3 の裏面反射偏光度曲線から分かる。しかし、表面と合わせた全体の偏光度曲線を見ると偏光度がマイナスになることはない。従って、s 成分と p 成分の方向のみを利用する入射面方向測定には、裏面反射の影響を考える必要はない。

4.3 実験装置・実験方法

提案した手法を検証するために、表面・裏面反射光の統合モデルを用いて透明物体の形状測定を行った。実験装置は図 4.4 のように構成した。

測定対象としては、表面形状と裏面形状が等しく十分に薄い物体として、屈折率 1.523 のソーダ石灰ガラスからなる $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ の平坦なガラスプレートを用いた。このガラスプレートを測定対象として用いた理由は、表面すべての法線方向が同じであるために測定精度の評価がしやすいためである。

実験装置のうち、光源の白熱灯、CCD カメラ、偏光子はすべて前章で用いたものと同じものを使用した。前章とちがう点は光源で、本実験では白熱灯一つを用いて点光源とし

た。正反射光を観察するためには、光源位置方向と測定対象物体の法線方向の成す角、つまり入射角が反射角と等しくなければならない。そのため、光源も回転ステージの回転に合わせて位置調整を行った。物体の載置台としては、物体の法線方向を可変とするために回転ステージを用いた。これによって、物体の法線方向を任意に指定することができる。従って、法線方向の測定結果の評価ができるようにした。回転ステージは、ツクモ工学社製粗動回転ステージ RA-60F を用いた。

次に実験方法について述べる。測定は、前章と同様に、偏光子を順次回していきながら画像を CCD カメラで撮影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。そして 36 個のデータを正弦波形にフィッティングさせて、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、本章において構築した改良アルゴリズムを用いて表面法線方向を算出した。

以上に述べたような測定を、測定対象物体を載置した回転ステージを回転させて繰り返し行った。図 4.4 に示したように測定対象のガラスの入射角が変化する。これにより、実験する測定法の入射角依存性を求めることができると同時に、入射角の測定結果の評価が行える。

本実験では平面ガラスの表面形状を測定しているため、測定結果の表面法線方向はすべての画素で等しくなるはずである。そこで、各画素で算出された入射面方向と入射角をすべての画素で平均をとり、その平均値と標準偏差を計算した。この平均値を測定結果とした。

また、本手法で提案する球面状面光源を用いてこのモデルが有効であることを確認するために、この面光源下での測定も行った。このときの測定対象としては、屈折率 1.55 のガラス、外径 5 cm、内厚 1.6 mm、長さ 3 cm の半円筒形状のものを用いた。これを測定対象に選んだ理由は、面光源からの光線を全面で均等に受けられるためと、半円状であるので入射面方向が分かり測定結果の評価がしやすいためである。この実験装置と測定対象を用いて、同様に偏光子を順次回していきながら測定を行った。

4.4 実験結果及び検討

前節で述べた実験装置と実験方法により、ガラスプレートの表面形状測定を行った。入射角を変化させたときの、入射角測定結果を図 4.5(a) に示した。測定誤差結果は図 4.5(b) に示した。プロットは表面反射光のみを考慮したモデルのものと、裏面反射光と統合したモデルのもの、二つ表示してある。また (a) のグラフ中の直線は回転ステージの設定値を示しており、入射角の真値である。

図 4.5(a) について見てみると、全体的にプロットは設定値に非常によく一致していることが分かる。表面反射光のみのモデルと表面・裏面反射光統合モデルとの差を認識することはできない。ガラスプレートは表面と裏面の形状が全く等しく、裏面形状が平面であるため裏面反射光の影響はさほど小さくなく、ある程度正確な測定が行える。しかし、裏面反射光も考慮したモデルを用いればより正確な精度の良い測定が可能となることが、図 4.5(b) によって示されている。この図は、各入射角の測定値と真値との差を表示したものである。これを見るとすべてのプロットにおいて、表面反射光のみのモデルの場合よりも表裏統合モデルの場合の方が誤差が小さくなっていることが分かり、明らかに精度が改善されていることが分かる。従って、裏面反射光をモデルに組み込むことが有効であることがこの結果によって示された。

ここで図 4.5(b) の測定誤差についてももう少し詳しく検討する。表面光のみのモデルに比べ改良したモデルによる測定値の方が誤差が非常に小さくなることが示されているが、誤差の大きさには角度によってばらつきがある。60° における誤差が最も大きくなっていて、それより大きい角度においても順に誤差は小さくなっていくものの比較的誤差が大きい。数値データを見てみると、設定値 60° での測定値は統合モデルによるものが 63.4° で、誤差 3.4° となっている。それに比べ、角度の小さい部分、20°、30° での誤差は 0.2° 以下と非常に小さい。この理由として、まずブリュースタ角付近での精度が落ちることが考えられる。反射角がブリュースタ角のとき、反射光は完全直線偏光となり偏光度は 1 となる。よって I_{\min} の値が 0 になることを意味する。しかし CCD カメラで光強度を検出する場合、各画素値が 0 になることは不可能である。カメラのキャリブレーションによりオフセットはキャンセルされるが、ステージからの微少な光や環境光により各画素は微少な光強度を検出してしまう。 I_{\min} が 0 よりも大きい値になると、偏光度は下がる。するとブ

リュースタ角よりも大きい角度の場合、測定値は真値よりも大きくなる。従って、偏光度が1に近い場合、つまりリュースタ角周辺においては測定精度が悪くなってしまうのである。リュースタ角は屈折率1.523のとき 56.7° であるので、これに最も近い 60° の測定値は精度が落ちてしまったと考えられる。また、同じ理由により全体的に偏光度が微妙に下がっているとすると、図4.3の偏光度曲線を見ても明らかな通りリュースタ角よりも大きい角度部分は傾斜が大きいいため、小さい部分に比べて求まる入射角の解が大きくずれる。従って、リュースタ角をはさんで小さい角度部分に比べ大きい角度部分の方が偏光度の誤差に敏感であり、測定精度がそれに左右されると言うことができる。

この問題は、反射光が完全直線偏光に近くなったときに I_{\min} が0に近づくが、正弦波の値を全体的に大きくしてしまう直流成分により画素値に加えられた微少な値が影響するために起こる。言い換えると偏光度が微妙に小さくなってしまいうために起こる。つまりこの微少な直流成分の影響が無視できなくなってしまうためである。従って改善方法としては、光源を十分明るくし、また本実験で使用するA/D変換器の分解能を8 bit から12 bit 等に挙げて光強度の階調を256階調からさらに増やすことによって、微少な直流成分の影響を無視できるくらいに正弦波の振幅を十分大きくすることが挙げられる。

この結果を踏まえ、次に球面状面光源を用いた半円筒状物体の測定による検証を行う。図4.6に、半円筒形状ガラスの測定画像と、表面光のみの場合と表裏統合した改良モデルの場合それぞれの測定誤差のプロットを示した。このグラフは、測定画像の中心を横に走っている直線上に乗る画素の測定誤差をプロットしたものである。図中の直線は誤差がなく測定値が真値に等しい場合を表す。ここで、図4.5のガラスプレートの結果と図4.3の偏光度曲線より、入射角の大きい場合には、表面反射光のみとして計算した偏光度と裏面反射光も考慮して計算した偏光度に差が現れてくるため、結果は大きく改善されることになる。しかし入射角の小さい場合には、偏光度曲線はほぼ等しく、図4.5を見ても分かる通り、測定結果も多少の改善は見られるが大きな変化は見られない。そこで、半円筒ガラスの測定結果はリュースタ角付近以上の角度について検証を行った。

図4.6を見ると、やはりリュースタ角 56.7° 以上の角度になると多少誤差が大きくなるが、表面反射光のみのモデルの場合に比べ、表裏統合モデルの方が全体的に誤差が小

さくなっていることが分かる。このことから、球面状面光源を用いた場合の測定においても、表面・裏面両方を考慮したモデルが十分有効であることが示された。

以上の結果より、表面と裏面の形状が十分近くて薄い物体に関しては、ある程度複雑な形状をしていて裏面反射光の影響が無視できなくなる場合でも、提案したモデルを適用することで精度を向上させることができると思われる。従って、裏面反射光も考慮して表面・裏面反射統合モデルを適用し、薄物体の表面形状測定を行うことの有効性が示された。

4.5 おわりに

本章では、提案した透明物体形状測定法の問題点、裏面反射光について考察し、表面反射光と裏面反射光両方を考慮した統合モデルを提案した。具体的には、表面と裏面の法線方向が等しいと仮定できるような十分薄い透明物体を対象を限定し、アルゴリズムに裏面反射光成分の偏光度を考慮する部分を加えた。そして、このアルゴリズムを用いて透明薄物体の表面形状測定を行い、以下の知見を得た。

1. ガラスプレートを測定対象として形状測定を行い、表面反射光のみを扱ったモデルによる測定値よりも表面・裏面反射光両方を扱ったモデルによる測定値の方が真値に近づく結果を得た。裏面反射光を考慮してモデルを構築することが有効であることが示された。
2. 球面状面光源を用いて、半円筒形状ガラスの形状測定を行い、提案する面光源下でも点光源の場合と同様に裏面反射光を考慮したモデルが有効であることを確認した。これにより、裏面反射光によって精度が落ちることなく、薄物体の表面形状測定が行えることが示された。

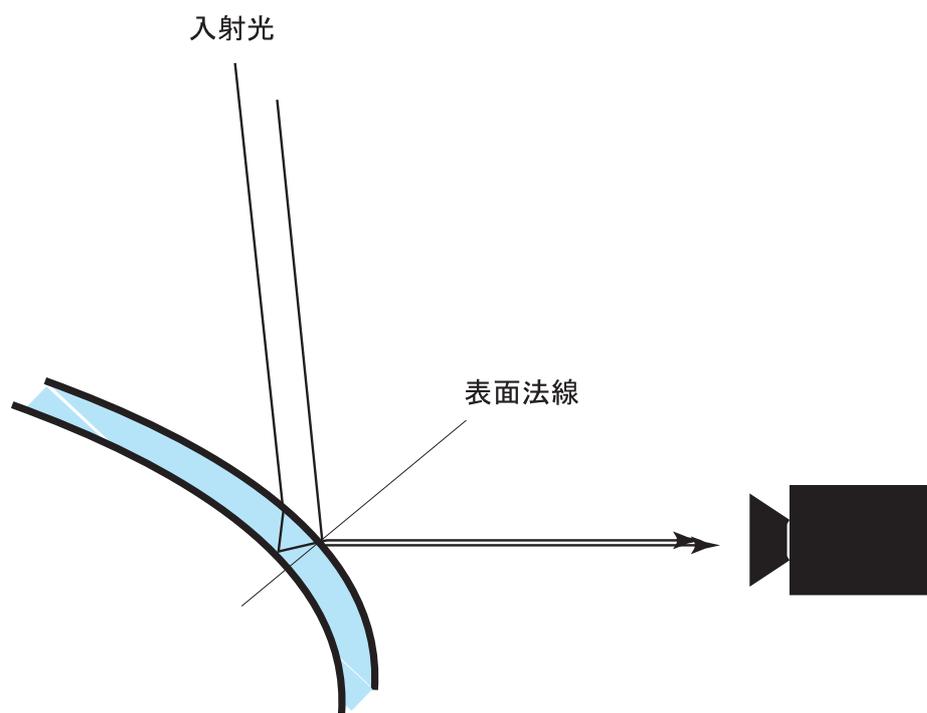


図4.1 薄物体の反射光の様子

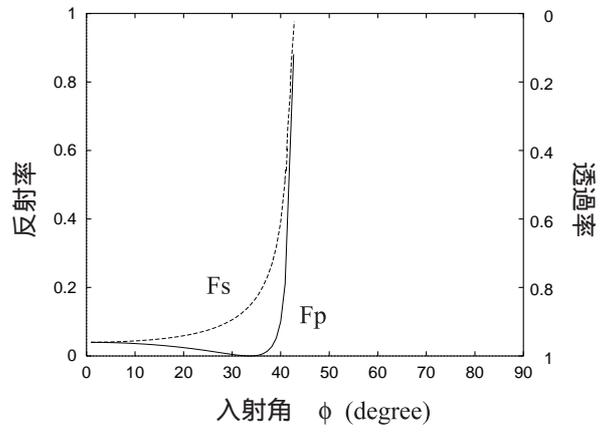
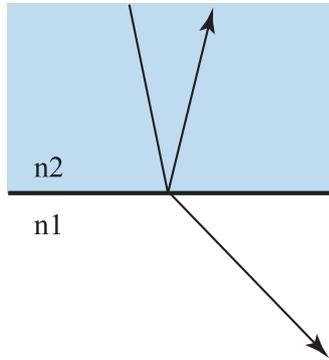
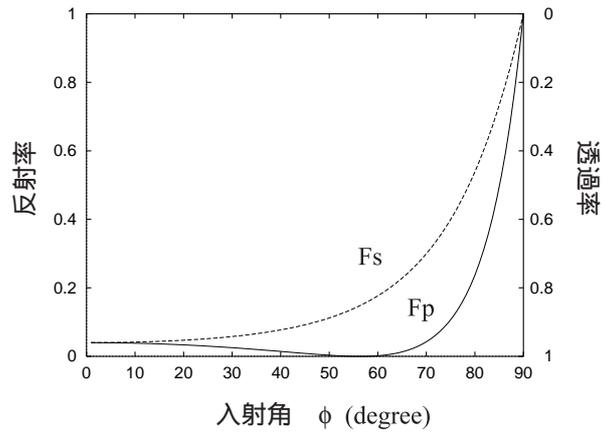
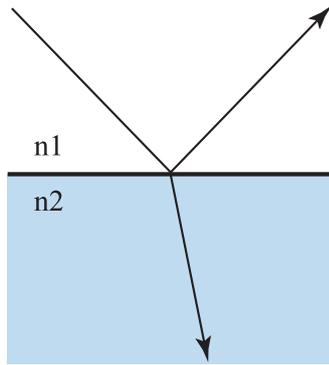


図4.2 反射率・透過率の反射角特性
 (屈折率 $n_1 = 1.0$, $n_2 = 1.5$)

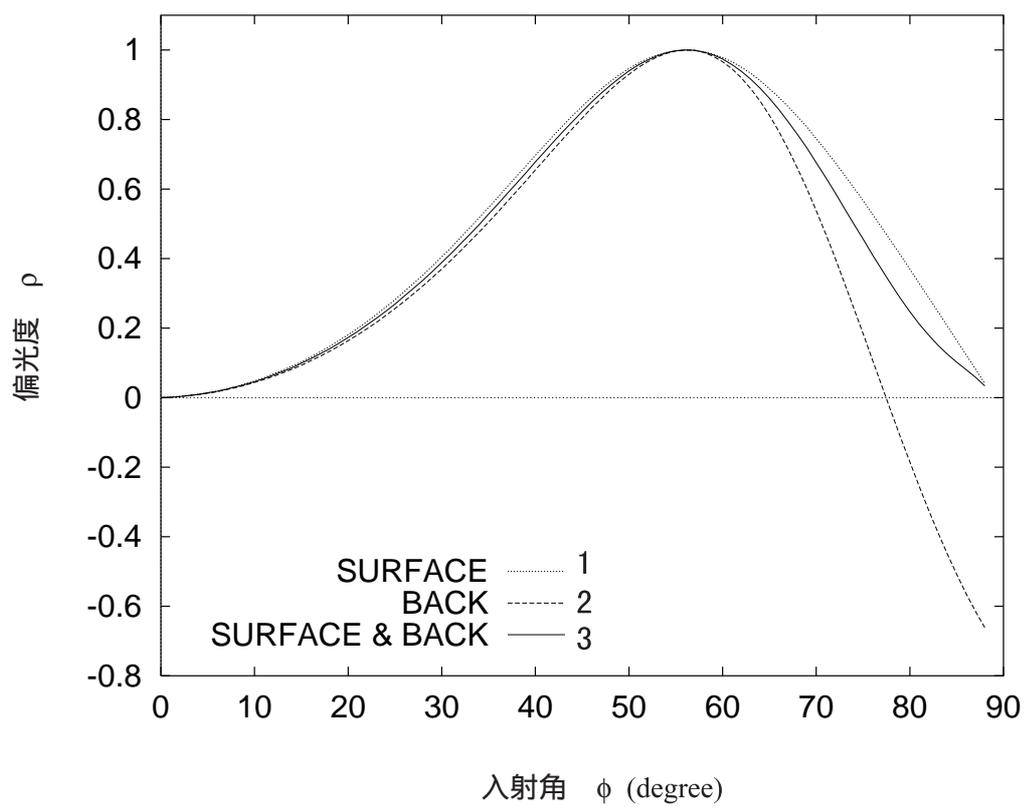


図4.3 偏光度の入射角特性

1. 表面反射光の偏光度
2. 裏面反射光の偏光度
3. 両反射光を合わせた偏光度

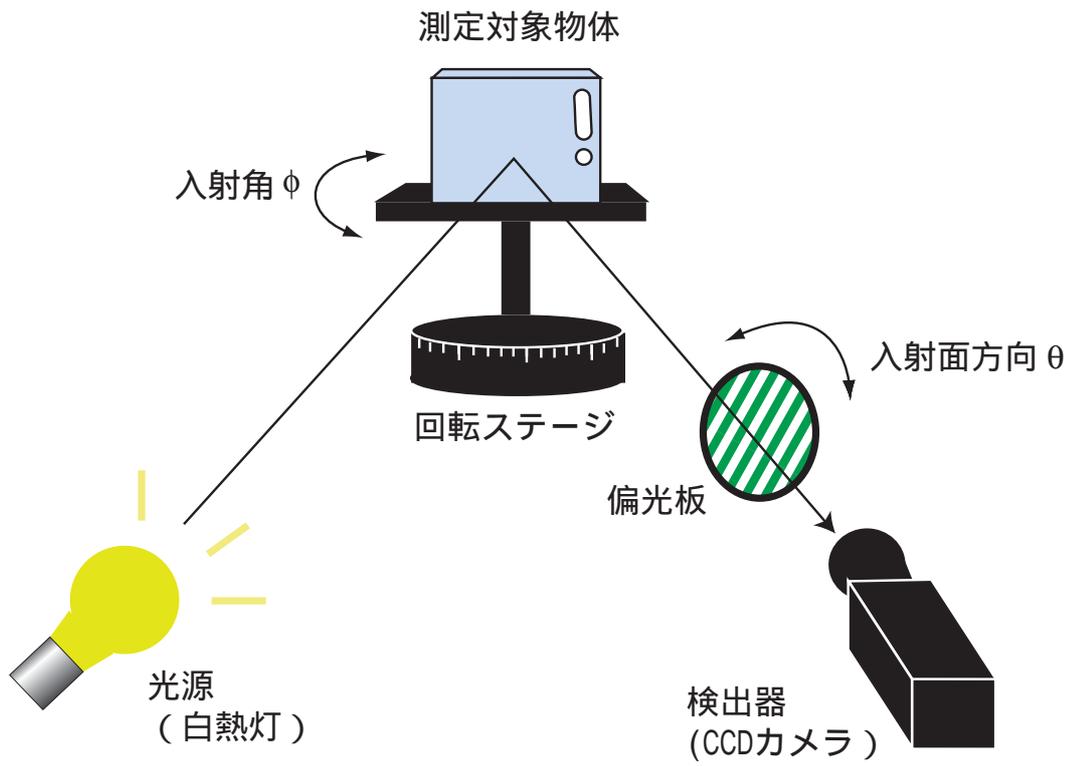


図4.4 実験装置図

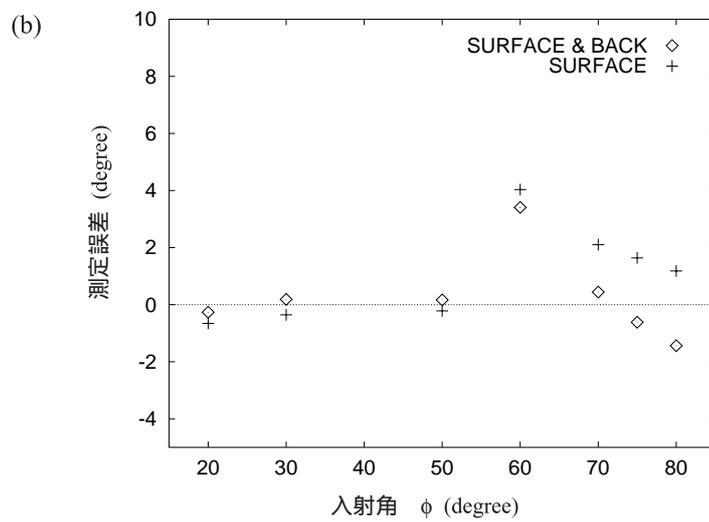
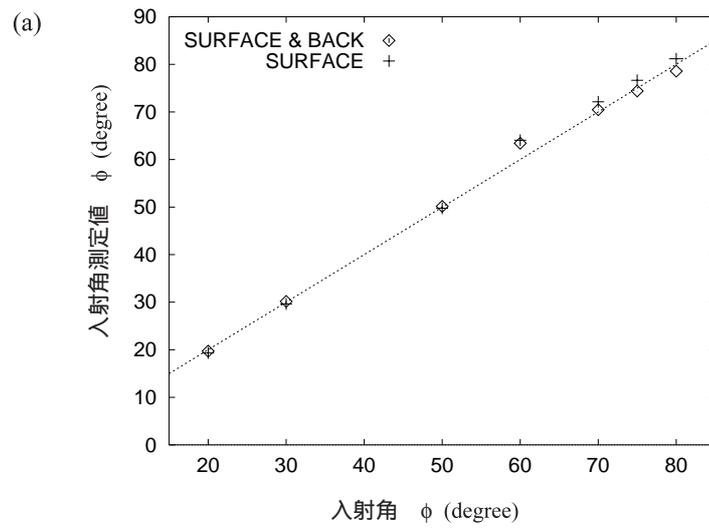


図4.5 裏面反射光を考慮したモデルによる形状測定精度の改善

(a) 入射角測定結果

(b) 測定誤差の入射角特性

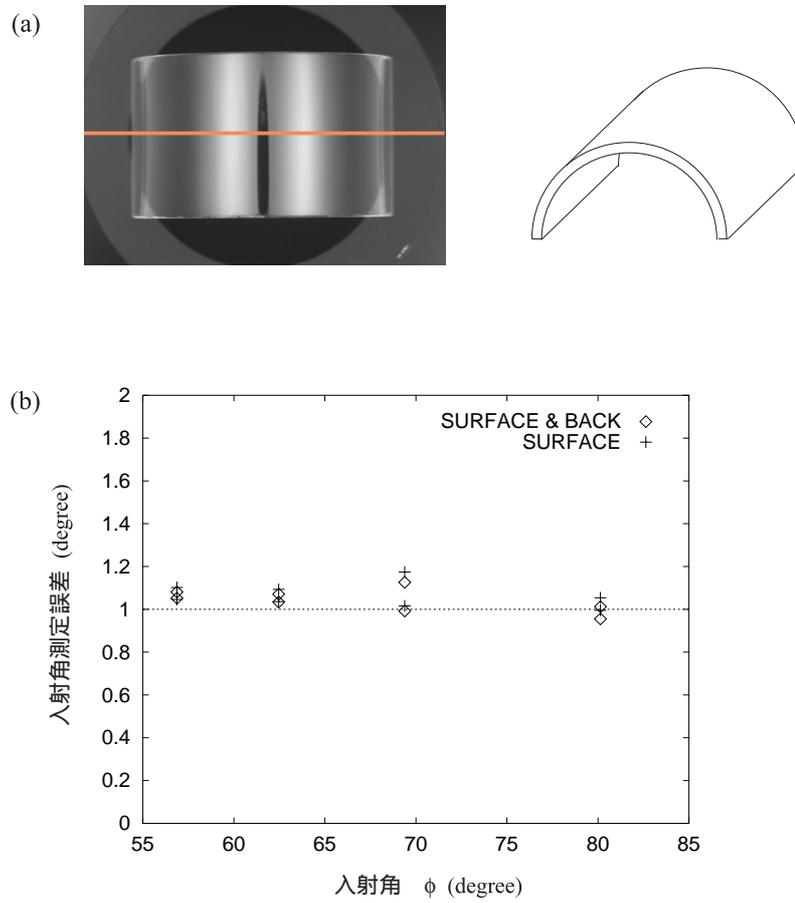


図4.6 裏面反射光を考慮したモデルによる形状測定結果
測定対象物体：半円筒形状ガラス（屈折率 1.523）

- (a) 半円筒物体測定画像
- (b) 形状測定結果の測定誤差入射角特性

第5章

赤外光領域における偏光の仕組み

5 赤外光領域における偏光の仕組み

5.1 はじめに

本章では、第3章で述べた本手法における解が一意に求まらないという問題を解決するために、前章までの可視光領域における偏光を利用した形状測定に加え、赤外光領域の偏光測定を行うことを提案する。この測定のために必要である、物体の熱放射などの物理的原理を示す。また、赤外光領域における偏光の仕組みについて述べる。

5.2 物体の熱放射

熱エネルギーは、電磁波として空間を伝わることができ、これを熱放射という。物体の温度をあげていくと、最初は暗赤色の光を出していたものがだんだん白っぽくなり、1500くらいで白色に見えてくる。これは、加熱された物体からエネルギーが電磁波として放出されていることを示しており、その波長のピークが高温になるにつれて短波長になっていることが分かる。

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、つまり「ある波長の放射線をよく吸収する物体は、それをよく放出する」というキルヒホッフ (Kirchhoff) 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ことができる。黒体は、表面に入射した光を100%吸収し、その放射率は1と定義される。

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 とすると、ステファン・ボルツマン (Stefan - Boltzmann) の法則から次の式が成り立つ。

$$W = \sigma T^4 \quad (16)$$

ここで、 T は黒体の絶対温度、 σ は比例定数で、ステファン・ボルツマン定数と呼ばれ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$ である。

理想黒体について、その熱放射エネルギーはプランク (Planck) の黒体放射と呼ばれる

法則から次式が与えられる。

$$W = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left\{\frac{ch}{k\lambda T} - 1\right\}} d\lambda \quad (17)$$

ここで、 c は光速、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 T は物体の絶対温度、 λ は波長である。この式は、理想黒体はその単位面積から単位時間あたりに波長 λ と波長 $\lambda+d\lambda$ との間にある放射光を放つときの放射エネルギーを表している。従って、測定する波長領域が限定されている場合、例えば $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ であるとき、理想黒体からの総合の放射エネルギーは次式で表される。

$$\begin{aligned} W(T) &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} W d\lambda \\ &= \int \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left\{\frac{ch}{k\lambda T} - 1\right\}} d\lambda \end{aligned} \quad (18)$$

この式から、物体から放射される電磁波はその物体の温度に一義的に関係づけることができる。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 5.1 のような曲線が得られる。このエネルギー分布の極大を与える波長を λ_p とすると、温度 T と λ_p との間に、次の関係が得られる。

$$\lambda_p T = \alpha \quad (19)$$

α は定数で $\alpha = 2.898 \times 10^{-3} \text{ [m}\cdot\text{K]}$ である。これはウィーン (Wien) の法則と呼ばれる。この関係と図 5.1 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。従って、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。

5.3 熱放射光の偏光

前節で述べたように熱放射も電磁波として扱えるので、第2章における可視光領域での光の振る舞いと同様に、熱放射光にも同じ反射の原理を当てはめて考えることができる。そこで本節では、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、その光強度の入射面に対して平行な成分を I_p 、垂直な成分を I_s とする。角度 ϕ で入射したとき、2.3 節 (6) 式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 $F_p(\phi, n)I_p$ 、 $F_s(\phi, n)I_s$ で与えられる。

エネルギー保存の法則より、入射光からこの反射光を差し引いたエネルギー、それぞれ $(1 - F_p(\phi, n))I_p$ 、 $(1 - F_s(\phi, n))I_s$ が物体に吸収される。ここで吸収率を α とすると、前節で述べたキルヒホッフの法則より、放射率 ε と吸収率 α は等しいと言えることから以下のように表せる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_p(T, \lambda, \phi) &= \alpha_p(T, \lambda, \phi) \\ \varepsilon_s(T, \lambda, \phi) &= \alpha_s(T, \lambda, \phi)\end{aligned}\quad (20)$$

従って、各成分の放射率 ε は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_p(T, \lambda, \phi) &= 1 - F_p(\phi, n) \\ \varepsilon_s(T, \lambda, \phi) &= 1 - F_s(\phi, n)\end{aligned}\quad (21)$$

この式から、p 偏光成分よりも s 偏光成分が大きくなる可視光の場合 (図 2.5 参照) とちがひ、熱放射光の場合は p 成分の方が大きくなることが分かる。

ここで、放射光の偏光を表現するためにコヒーレンス行列を用いる [1]。熱放射光の偏光状態は次のように表される。

$$\begin{aligned}J &= \begin{pmatrix} \langle E_p E_p^* \rangle & \langle E_p E_s^* \rangle \\ \langle E_s E_p^* \rangle & \langle E_s E_s^* \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{pp} & J_{ps} \\ J_{sp} & J_{ss} \end{pmatrix} \\ &= KI \begin{pmatrix} (1 - F_p(\phi, n)) & 0 \\ 0 & (1 - F_s(\phi, n)) \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (22)$$

E は光の振幅を表しており、* はその共役波を表している。K は全エネルギー $I = I_p + I_s$ となるように標準化するためのファクタであり、 $K = 1/(2 - F_p(\phi, n) - F_s(\phi, n))$ である。この係数を無視すると、上式は完全偏光と非偏光に分解することができる。

$$\begin{pmatrix} 1 - F_s(\phi, n) & 0 \\ 0 & 1 - F_s(\phi, n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_s(\phi, n) - F_p(\phi, n) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

これにより、熱放射光は $2(1 - F_s(\phi, n))$ に比例した強度の非偏光成分と、 $F_s(\phi, n) - F_p(\phi, n)$ に比例した強度の入射面に平行な直線偏光成分で構成されていることがわかる。偏光度 ρ はコヒーレンス行列の成分を用いて次のように表される。

$$\rho = \frac{\sqrt{(J_{pp} - J_{ss})^2 + 4J_{ps}^2}}{J_{pp} + J_{ss}} \quad (23)$$

従って、フレネル係数を用いると式 (22) より次式のようにになる。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。

$$\rho_{\text{IR}} = \frac{F_s(\phi, n) - F_p(\phi, n)}{2 - F_p(\phi, n) - F_s(\phi, n)} \quad (24)$$

上式に 2.3 節の式 (6) を代入することによって、偏光度 ρ_{IR} と放射角 (ここでは熱放射光の場合になるので入射角 = 反射角を放射角と呼ぶ) ϕ の関係を以下のように導き出すことができる。

$$\begin{aligned} \rho_{\text{IR}} &= \frac{2 \sin \phi \tan \phi (s - \cos \phi)^2}{(s + \cos \phi)^2 (s + \sin \phi \tan \phi)^2 + 2 \sin \phi \tan \phi (s - \cos \phi)^2} \\ s^2 &= n^2 - \sin^2 \phi \end{aligned} \quad (25)$$

この熱放射光の偏光度 ρ_{IR} と放射角 ϕ の関係を図 5.2 に示す。

5.4 赤外偏光測定値による解の判定

第 3 章において、可視光領域の測定では偏光度の入射角特性が 2 価関数となり、解が一意に求まらないという問題があることを述べた。また裏面反射光の影響について指摘し、これを考慮したモデルを第 4 章で述べた。だがここで、熱放射光の偏光度の放射角特性、図 5.2 を見てみると、こちらは可視光の場合と異なり偏光度と角度が 1 対 1 対応をしてい

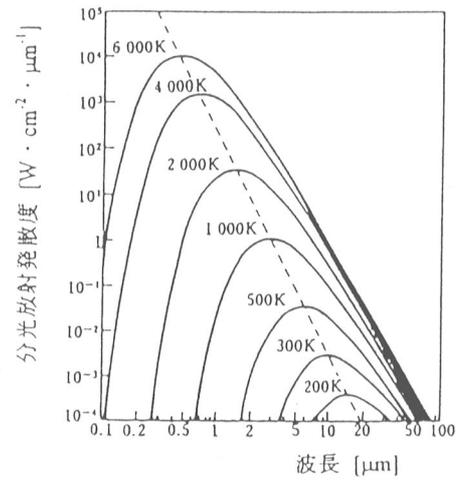
ることがわかる。従って、熱放射光の偏光度を測定することによって、一意に解を決定することができる。また、熱放射は物体自身が放射している光であり反射光ではないため、原理的に裏面反射というものは存在しない。ただし、熱放射の偏光度は可視光の場合に比べ、全体的に値が小さいという特徴がある。最も大きな値でも40%前後までしか到達せず、角度の小さい部分においてはほとんどの部分が10%未満という値になっている。従って、 I_{\max} と I_{\min} の値に非常に緻密な正確さが求められることになるが、256階調のCCD素子の光検出能力を考慮すると可視光測定の場合のような精度を望むことはできない。そこで、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二つの解の判定に用いることを提案する。図5.3のように赤外光のブ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小さいかで可視光測定の二つの解のうちどちらの解が正しいかを判別する。

5.5 おわりに

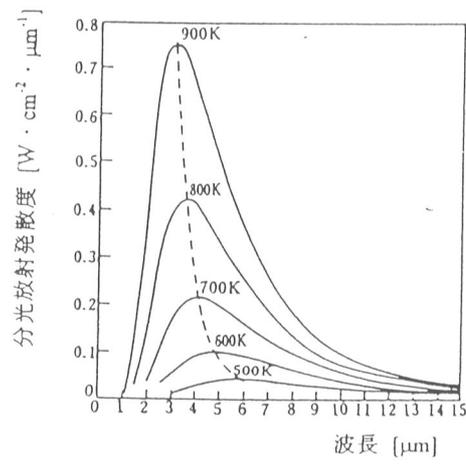
本章では、可視光測定による形状測定結果を踏まえ、この問題点を解決するために赤外光領域の偏光測定を行うことを提案した。そして、赤外偏光度を可視光測定結果の二つの解の判別に用いることを提案した。この測定のために必要である物理的原理、具体的には物体の熱放射、赤外光領域における偏光の仕組みについて述べた。

参考文献

- [1] M. Born, E. Wolf, “Principles of Optics,” Pergamon Press, 1959.
- [2] 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.
- [3] 赤外線研究会編, “赤外線光学 - 基礎と応用 - ”, オーム社, 1991.
- [4] L. B. Wolff, T. E. Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., **13**, 167, (1991).
- [5] L. B. Wolff, A. Lundberg, R. Tang, “Image understanding from thermal emission polarization”, Proceedings of IEEE Conf. on CVPR, 625, (1998).



(a) 対数スケール



(b) リニアスケール

図5.1 黒体の熱放射光の波長依存性

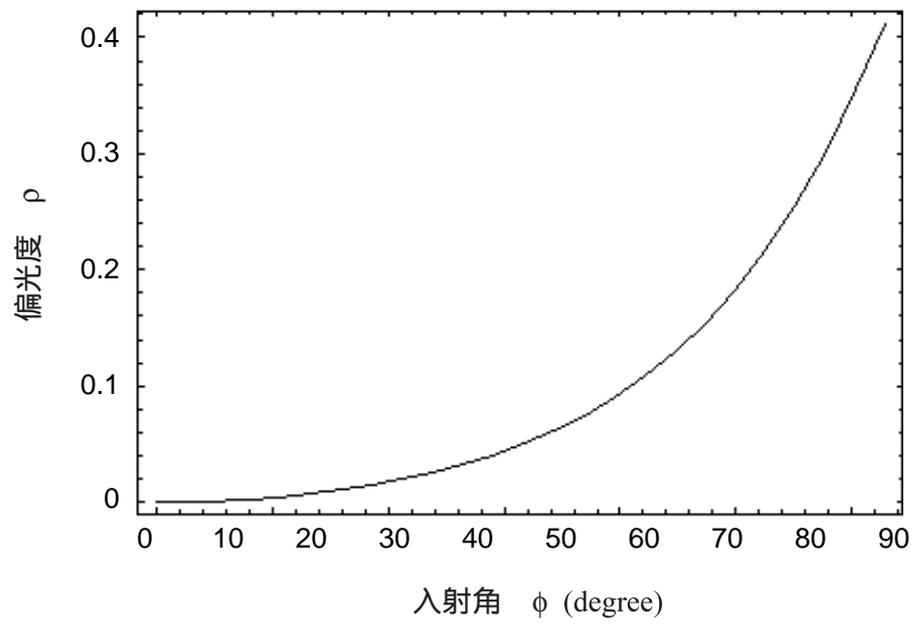


図5.2 赤外光 (3 - 5 μm) の偏光度曲線 ($n = 1.5$)

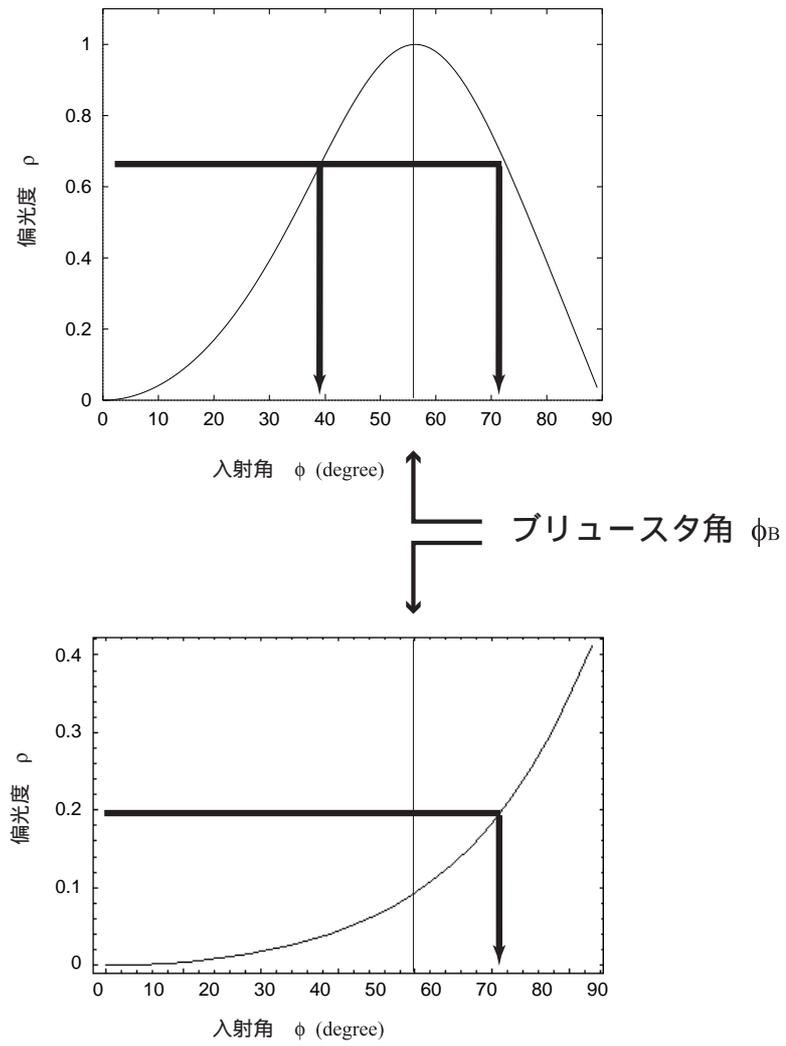


図5.3 可視光と赤外光の偏光度曲線

第6章

赤外光・可視光の偏光解析による 透明物体形状測定

6 赤外光・可視光の偏光解析による透明物体形状測定

6.1 はじめに

本章では、前章で述べた原理を踏まえ、赤外光の偏光測定を行うための実験装置、実験方法について述べる。赤外光領域の測定値と可視光領域の測定値両方を併せて利用し、透明物体の形状測定を行った結果を示し、検討を行う。

6.2 測定原理

前章で述べた原理にもとづき熱放射光の偏光、すなわち赤外光の偏光測定を行う。このときの測定原理は、第3章の可視光領域の測定のとおりとまったく同様である。ただし、アルゴリズムの中で用いる偏光度 ρ が、式(10)の代わりに前章の式(25)の ρ_{IR} となる。このため、入射面方向を与える方向角は I_{min} ではなく I_{max} となる。偏光度をフレネル係数で表したものを下に示す。

$$\begin{aligned}\rho_{\text{IR}} &= \frac{F_s(\phi, n) - F_p(\phi, n)}{2 - F_p(\phi, n) - F_s(\phi, n)} \\ &= \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}\end{aligned}\quad (26)$$

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、室温程度の範囲ではどのような物体でも熱放射光を放出している。だが室温にある物体の測定には多少の問題点がある。一つは大気自身の室温放射光も一緒に検出してしまうという問題がある。また室温(20 程度)の放射光の場合、ピーク波長は約 $9.89 \mu\text{m}$ であり $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域での検出では放射光は非常に小さくなってしまふ。そのため I_{max} と I_{min} の差を感知しにくくなって精度が落ちてしまうので、偏光度の測定が困難になるという問題もある。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る。これを式で表すと、CCD 検出光強度を W_{CCD} 、対象物体温度を T 、環境温度を T_b 、光学系の透過率を τ

とにおいて次のようになる。

$$W_{\text{CCD}} = \tau\{\varepsilon W(T) + (1 - \varepsilon)W(T_b)\} \quad (27)$$

物体温度 40 の場合、放射光のピーク波長は約 $9.25 \mu\text{m}$ と短くなり、このシフトで $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域での放射光強度は十分測定可能範囲まで大きくなる。

赤外光の偏光度と可視光の偏光度を併用するため、可視光領域の測定も行う。これは第 3 章で述べた実験装置、実験方法と全く同様で、測定対象に対する視線方向を赤外光測定の場合と揃えるように対象物体を配置する。そして赤外画像と可視画像のマッチングを行い、測定対象となる画素、つまり画像の中で対象物体が現れている部分を二つの画像で合わせる。これにより、赤外偏光度による解の判定を各画素で行えることになる。

本実験では、測定波長範囲を $3 \sim 5 \mu\text{m}$ に設定した。この波長域を用いる理由は、次の通りである。測定対象物体から放射された赤外光は、カメラに入射するまでに伝搬系を通過する。通常、この伝搬系は大気である。そこには水蒸気、 CO_2 等があり、これらの吸収を受ける。この大気中における赤外光伝搬中の減衰は観測される画像に著しい影響を及ぼす。大気の組成は場所、高度、気象、四季、時刻によって異なり、減衰の主因である吸収や散乱もそれにより変化する。また波長による選択性が著しい。以上のような要因を避けるため、この大気の影響を最小限に抑えられる「大気の窓」と呼ばれる、赤外光を良く透過する波長域を利用する。この大気の窓は 2 種類存在し、一つは $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、もう一つは $8 \sim 13 \mu\text{m}$ であり、本研究で使用する装置では $3 \sim 5 \mu\text{m}$ を採用している。

6.3 赤外光測定実験装置・実験方法

赤外光測定の実験装置を図 6.1 のように構成した。

測定対象の載置台としては、第 4 章で用いた回転ステージを使用した。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。本実験で作成している実験装置では、実験対象は $3 \sim 5 \text{ cm}$ 程度のものが適当であり、これを均等に熱するために必要な熱風断面積は、一般のドライヤーで十分満足される。赤外光 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域に透過域を持つ偏光子として、スペカック社製直径 $75 \text{ mm } \phi$ (71 mm C.A.)

Polarizer、材質 CaF_2 の IGP227-71 を使用した。赤外光 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 領域を検出する CCD カメラとして、ニコン社製のサーマルビジョン LAIRD-S270 を用いた。この IR-CCD カメラは、使用ディテクタが 27 万画素 PtSi ショットキー型 IRCCD、有効画素 475×442 pixel である。各画素値は設定されたゲインでの測定温度範囲を 256 階調に当てはめ、温度に換算されて表示される。従って偏光度を計算する際には、アルゴリズムの中で前章の式 (16) を用いて温度値から光強度に変換する。

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 から 40 程度に上がるまで温めた。そして撮像する画像の画素値が温度に換算されて表示されることを利用して、この間連続ビデオモードで対象を撮影し画素値の変動を調べた。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、その後第 3 章と同様に、偏光子を順次回していきながら画像を IR-CCD カメラで撮像した。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、各画素ごとの明るさを測定した。各画素値は温度を表しており、その最大値と最小値、 T_{\max} と T_{\min} を各画素で得た。そして 36 個のデータを正弦波形にフィッティングさせて、その振幅における最大値、最小値 T_{\max} と T_{\min} を求めた。この温度値を光強度に変換した I_{\max} と I_{\min} から偏光度を計算した。

そして最後に、可視光領域の測定画像とマッチングをとった。このマッチングはアルゴリズムの中で行った。計算機に読み込んできた可視光測定画像と赤外光測定画像をもとに、セットアップに組み込んだ特徴点 2 点を検出したそれぞれの画素の位置を使って、平行移動、回転、拡大縮小の順で赤外光測定画像の対象物体を可視光測定画像のものに合わせる作業を行った。これにより可視光測定から求めた各画素での二つの法線方向を、マッチングされた赤外画像の各画素の偏光度を用いて一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、それ以上の偏光度を持つときには二つの解のうち大きい方を解とし、それ以下のときには小さい方を解とする、というものである。

可視光域での測定は、第 3 章で述べた装置とまったく同様に、球面状面光源を用いて実験を行った。

測定対象は、まず第 4 章で用いたものと同じガラスプレートを用いた。これを載せた回

転ステージの角度を設定して測定することによって、赤外光測定系の検証を行った。具体的には、赤外光偏光度のみを利用して法線方向を算出したとき、どのような傾向が現れるかを調べた。ただし、赤外偏光度はブリュースタ角以上の角度を判定するために用いるので、測定する設定角度範囲は 50° から 80° とした。

次に、赤外光測定と可視光測定両方を行い、完全な形状測定を行う測定対象として、屈折率 1.5 のアクリル素材の半球、直径 5 cm のもの、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 のアクリル素材のものを使用した。

6.4 実験結果及び検討

図 6.2 に、ガラスプレートを測定対象として実験した赤外光測定の検証測定結果を示した。図 6.2(a) は入射面方向 θ の各入射角での測定結果、図 6.2(b) は入射角 ϕ の測定結果である。

図 6.2(a) から、 70° 、 80° と角度の大きいところで設定値と非常によい一致を示した。しかし、 60° 、 50° と小さくなるにつれ誤差が大きくなってきている。これは、前章で述べた通り図 5.2 から赤外偏光度が角度の小さいところで非常に小さい値をとるため、測定精度が落ちていると考えられる。本実験で用いた屈折率 1.523 のガラスプレートの場合、ブリュースタ角は 56.7° となり、そのときの赤外偏光度理論値は 0.0815 である。つまり 10% 以下となり非常に小さい値であると言える。従って、設定値 50° での偏光度はますます小さな値となり、 I_{\max} と I_{\min} の差がなくなってくる。そうすると、検出される強度の正弦波形へのフィッティングがむずかしくなって、入射面方向、つまり熱放射光においては I_{\max} を得る方向角が正確に分からなくなってしまう。

以上の結果から、赤外光測定による入射面方向の測定には限界があることが分かった。このことから、赤外光測定の結果は可視光域での二つの入射角測定値の選択に利用することが妥当であることが分かった。

次に図 6.2(b) を見ると、 50° 以上の角度においては入射角測定値は設定値とよい一致を示した。しかし、 40° で少し誤差が目立つようになり 40° 未満の角度では測定がまったくできていないと言える。角度の大きい部分を詳しく見てみても、 70° 、 80° と角度の

大きいところで設定値と非常によい一致を示している一方、 60° 、 50° と角度が小さくなるにつれ誤差が多少大きくなってきている。誤差の数値データを見てみると、 50° 、 60° 、 70° 、 80° でそれぞれ誤差 2.5° 、 2.0° 、 1.2° 、 0.1° となっており、角度が大きくなるにつれて精度が上がっていることが分かる。角度が小さくなってくると誤差が大きくなる原因としては、これも前章で述べた通り偏光度の値の影響が挙げられる。赤外偏光度 ρ_{IR} は 50° で理論値 0.0609 という値になる。画像各画素の検出強度が他にも環境要因に多少影響される可能性があり、なおかつ 256 階調の分解能では、このように低い偏光度を正確に測定することは非常に難しい。従ってこの結果は、小さい角度の測定信頼性は低く、ある程度信頼のおける測定が可能であるブリュースタ角以上の偏光度を、測定に利用するのが適当であることを示している。

次に、赤外光測定と可視光測定両方を行い、前章で提案した赤外偏光度を利用する手法の検証を行う。図 6.3 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。第 3 章と同様に、測定画像の中で円を成す物体輪郭線を利用して半球の各画素での真値を求め、その真値からの誤差を計算している。半球形状の場合、角度が大きくなるにつれて解像度が悪くなるため、プロットは角度の大きいところで多少粗い間隔となる。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。

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ブリュー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ブリュースタ角、 56.7° 以上の角度での測定誤差も非常に小さい。従って、提案した手法、可視光測定に加えて赤外偏光度を利用する測定法が有効であることが示された。

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、第 3 章での半球の実験結果とまったく同じであり、同章で考察した通り、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 6.4 には、貝殻形状オブジェの写真、測定画像、可視光域のものと赤外光域のものをそれぞれ (a)(b)(c) に示した。図 6.5 では赤外光偏光度の分布を見るために、各画素での

赤外偏光度 ρ_{IR} を Grayscale 表示した画像を示した。図 6.6 に測定結果の表面形状を可視化したものを示した。第 3 章と同じように、形状の可視化のために各点の傾き・高さを relaxation 法により計算している。

図 6.6 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、つまりブリュー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 に近い値をとるため、正確に 90° という値を測定できないだけでなく、入射面方向を与える I_{\min} の方向角を求める精度が急激に落ちるためと思われる。しかしこの問題は 90° となっているエッジ部分にのみ起こるもので、画像の輪郭線のカーブを見てその法線方向を入射面方向とすることで解決できる。

また、貝の左側やや上の部分、画像中心から 10 時の方向上に実際の形状にはない多少の凹凸が見られる。この原因は、熱放射光と熱反射光のちがいによる影響を測定値が受けたものと考えられる。図 6.4(c) を見ると、この部分の画素値が飽和していることが分かる。この部分は、熱風が直接当たっている部分であり熱放射光に加えて熱反射光を検出している。熱反射光は熱放射光とちがい、可視光の反射とまったく同じ振る舞いをするので、p 成分ではなく s 成分で最大の光強度 I_{\max} を与える。熱放射光は p 成分で I_{\max} を与えるので、二つの光のそれぞれ最大を与える方向角が直交していることになり、結果として二つの光が重なると偏光が相殺される方に働くことになる。従って、この部分の測定値は信頼できるものではなく、測定可能範囲外となってしまう。この問題は、物体を温める方法として熱を外から当てる方法ではなく、ステージから熱を加える方法をとることで解決できると思われる。

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であることを示し、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。

6.5 おわりに

本章では、赤外光の偏光測定を行い、可視光測定だけでは解決できない解の不定性を解決するために赤外偏光度を利用する手法を示した。透明物体の赤外光測定と可視光測定両

方を行い、ブリュースタ角の赤外偏光度をしきい値として、二つの解が求まる可視光測定値の判定を行った。これによって形状を求めた結果を示し、以下の知見を得た。

1. ガラスプレートを測定対象として赤外光測定を行い、赤外偏光度による法線方向測定がどのような測定精度で行えるかを調べた。その結果、入射面方向の測定には限界があり、入射角の測定も 50° 以上でのみ可能であることが示された。しかし、可視光測定値の二つの解のうちどちらが正しい値かを判定するために必要な精度は十分あることが分かった。
2. 半球形状の亚克力ル物体を測定対象として赤外光・可視光両測定を行い、可視光測定値2つから正しい方を判定した完全な形状測定の測定誤差について調べた。解の判定が有効に働いていることを確認した。
3. 任意形状を持つ物体として貝殻形状の亚克力ル物体を測定対象とした。可視光・赤外光測定の結果、複雑な形状も測定可能であることが示された。

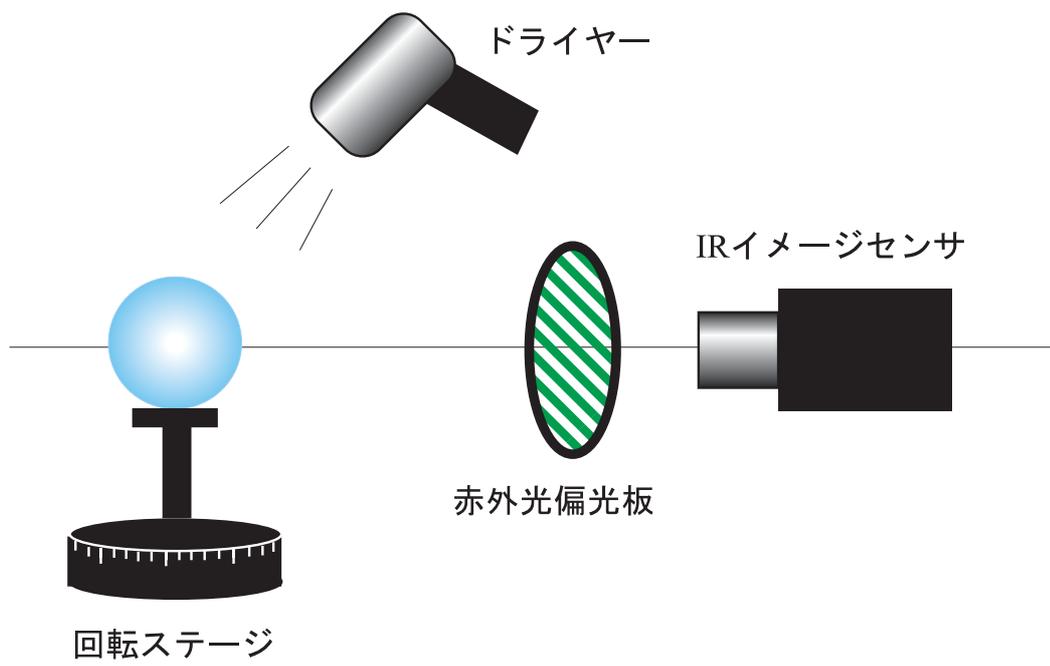


図6.1 実験装置図（赤外光測定）

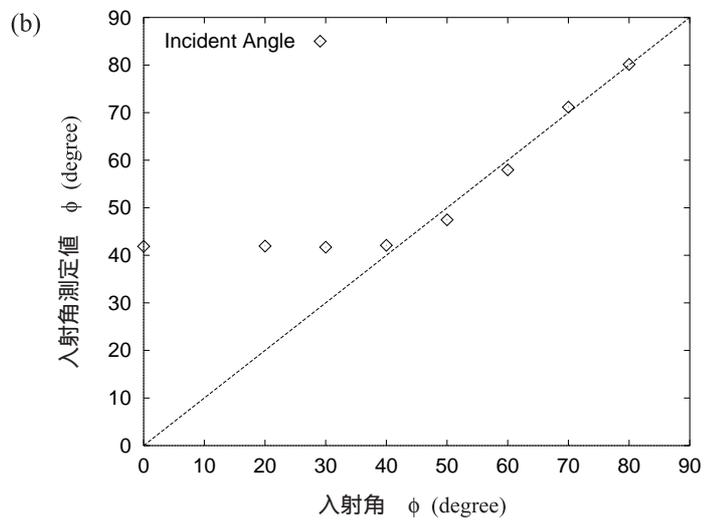
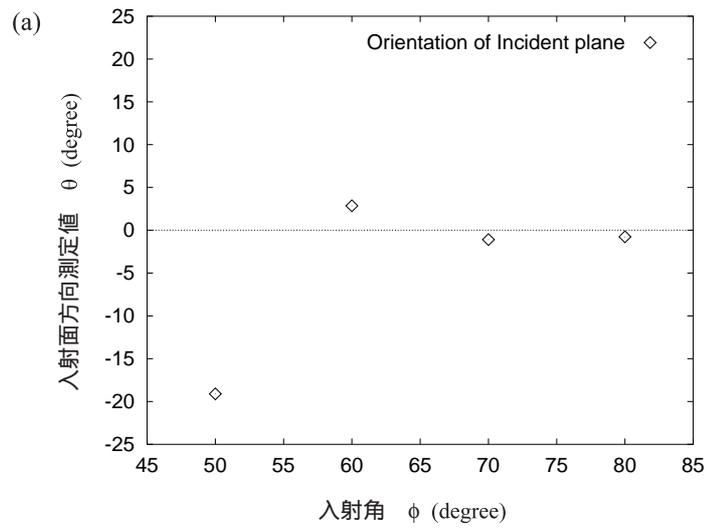


図6.2 赤外光 (3 - 5 mm) 測定による法線方向測定結果
 (a) 入射面方向測定結果
 (b) 入射角測定結果

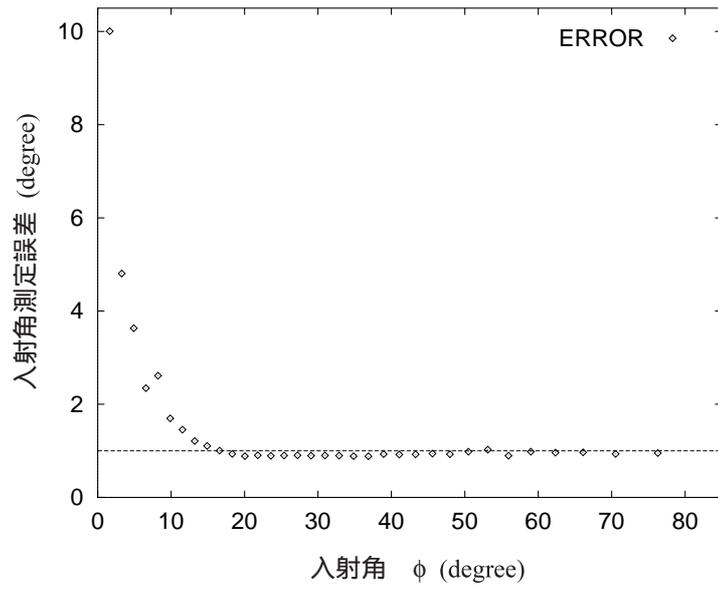
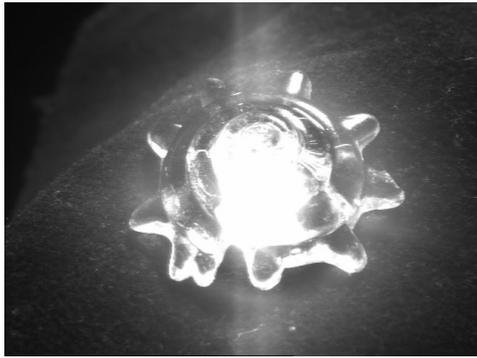
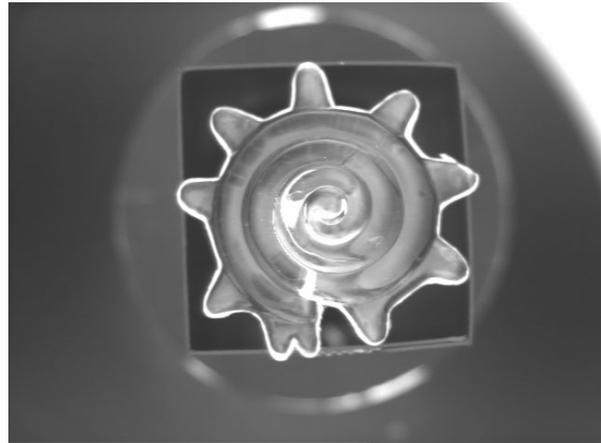


図6.3 可視光測定に赤外光 (3 - 5 mm) 測定を組み合わせた半球形状測定誤差の入射角特性



(a)

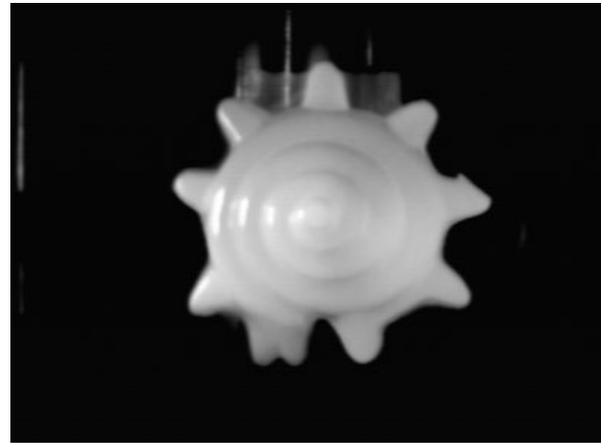


(b)

(a) オブジェクト写真

(b) 可視光域測定画像

(c) 赤外光域測定画像



(c)

図6.4 測定対象物体の概観、測定画像

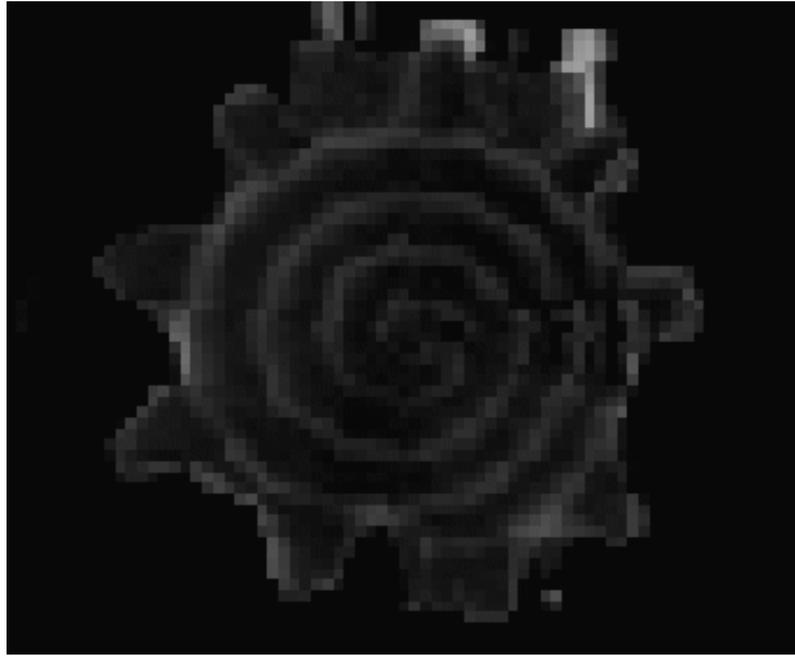


図6.5 貝殻形状の赤外偏光度分布 (Grayscale 表示)

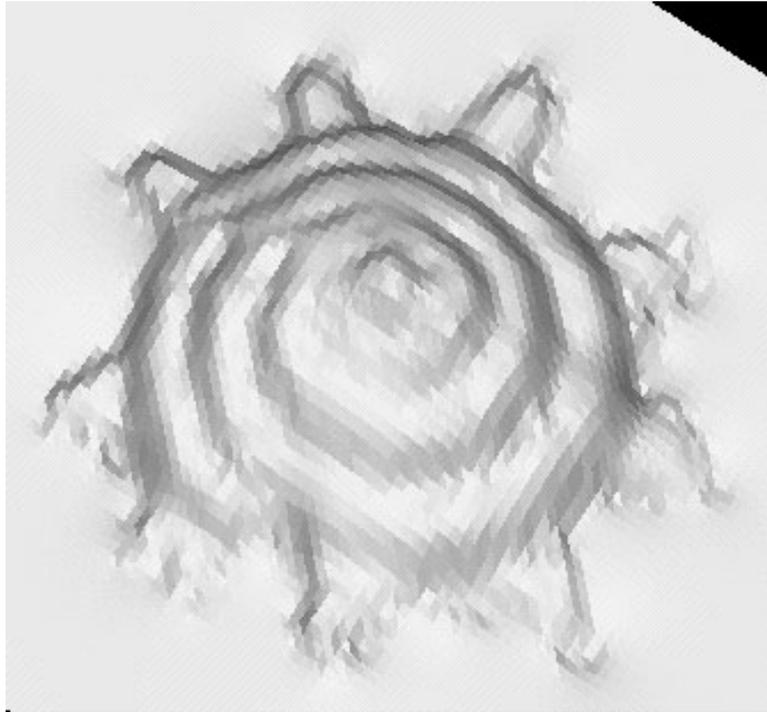


図6.6 貝殻形状の表面形状測定結果

第7章

結論

7 結論

本研究において、筆者は透明物体の表面形状測定を非接触、高精度で行うための手法としてハイライトの偏光を用いることを提案し、その測定と検討を行った。測定法としては、CCDカメラで測定を行うので物体表面を微小面積の測定部位に分割し、それぞれの部位、CCDでの各画素で表面法線方向を直接求めることによって物体の表面形状を測定するものを提案した。

またこの測定法は、可視光のみの測定を行った場合、裏面反射光の影響を考えなければいけないという問題と、偏光度曲線が2価関数であるために法線方向の解としてブリュースタ角をはさんで大小二つの角度を算出してしまい、解が一意に求まらないという問題が生じる。この問題をそれぞれ解決するための手法を提案した。

複雑な形状での裏面反射の振る舞いを考察することは非常に困難であるため、表面形状と裏面形状がほぼ等しいと仮定できるような薄い透明物体に測定対象を限定して、裏面反射を考慮したモデルを構築した。

また、測定値を一意に求められない解決法として、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、可視光測定値の二つの解の判定に用いることを提案した。

以上に述べた表面形状測定法をもとに測定を行い、以下の結果を得た。

1. 球面状の面光源を用いてアクリル製の半球状透明物体の測定を行った結果、法線方向、表面形状の計算結果は半球面状のものと非常に良い一致を示した。ただし、入射角の小さい 0° 付近の部分での測定には限界があることが示された。しかし、半球形状の中心部の場合のように、ブリュースタ角よりも小さい角度の傾きを持つ凸表面の測定に関しては、十分測定可能であることが示された。
2. 裏面反射光を考慮したモデルを用いて、ガラスプレートを測定対象として形状測定

を行った。表面反射光のみを扱ったモデルによる測定値よりも表面・裏面反射光両方を扱ったモデルによる測定値の方が真値に近づく結果を得た。裏面反射光を考慮してモデルを構築することが有効であることが示された。また、球面状面光源を用いて、半円筒形状ガラスの形状測定を行い、実際に透明物体の測定を行う実験装置である面光源下でも点光源の場合と同様に裏面反射光を考慮したモデルが有効であることを確認した。これにより、裏面反射光によって精度が落ちることなく、薄物体の表面形状測定が行えることが示された。

3. 赤外光測定の検証実験としてガラスプレートを測定対象とし、赤外偏光度による法線方向測定がどのような測定精度で行えるかを調べた。その結果、入射面方向の測定には限界があり、入射角の測定も 50° 以上でのみ可能であることが示された。しかし、可視光測定値の二つの解のうちどちらが正しい値かを判定するために必要な精度は十分あることが分かった。そして次に、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、二つの可視光測定値から正しい方を判定する完全な形状測定の測定誤差について調べた。解の判定が有効に働いていることを確認した。
4. 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、測定を行った。可視光・赤外光測定の結果、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た。

ここで、提案した手法の中にはまだ考慮されていない成分が存在する。本研究において扱った対象物体では大きな影響が見られなかったが、これらについての検討は透明物体形状測定を行う上で今後必要になってくると考えられる。本論文では可視光域での検出光は表面反射光のみとしているが、対象物体の形状によっては裏面反射光、相互反射光が含まれる。裏面反射光に関しては第4章で考察しているが、板状に近似できる薄物体に測定対象を限定しており、任意の形状への拡張が望まれる。また、凹形状が含まれる物体ではそのくぼみの大きさによっては相互反射の影響が大きくなっていくと考えられる。これらの影響を除外する方法として、本論文の中で提案した赤外光偏光測定が利用できる可能性が大きい

にある。検出する赤外光は物体自身が放射する熱放射光であり、裏面反射も相互反射も存在しない。しかし第5章でも述べたように、赤外偏光測定の精度は法線方向の測定を単独で可能とできるほどは望めないが、信頼性の高い測定が可能な領域も存在することから、可視光測定値と加重平均をとる等の方法を用いて両者の信頼性の高い部分のみを統合し、誤差要因となる成分を排除した形状測定法を確立できるのではないかと考える。このように、可視光測定と赤外光測定のセンサ・フュージョンとも呼べる統合によって、さらに高精度な測定が期待できる。

以上、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

本研究を行うにあたりご指導いただきました慶應義塾大学理工学部電気工学科の小原 實教授に深く感謝申し上げます。

また、東京大学生産技術研究所第3部の池内 克史教授、佐藤 洋一講師には数々の貴重なご助言をいただき、研究を導いてくださったことに心から感謝申し上げます。特に佐藤 洋一講師には常日頃から大変多くのことを細やかにご指導いただき深く感謝しております。東京大学生産技術研究所第3部池内研究室の皆様には、研究生活をともにする中で大変お世話になり、多くのご配慮、ご協力をいただいたことに心から感謝いたします。

そして、慶應義塾大学理工学部電気工学科小原研究室の先輩方、同輩の皆様には多くのご助言をいただき、公私にわたって楽しく生活できるようご協力をいただいたことに心から感謝いたします。

最後に、研究を行うにあたり内面から支えてくれた両親と妹に深く感謝いたします。