

卒業論文題目

ハイライトの偏光解析にもとづく  
透明物体の表面形状測定

指導教授 栢木 寛 教授

慶應義塾大学理工学部電気工学科

平成9年度

学籍番号 69404078

齊藤 めぐみ

# 目次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>5</b>
1.1	光応用による形状測定	5
1.2	偏光の応用技術	7
1.3	研究の目的	9
<b>2</b>	<b>フレネルの法則に基づく反射光の仕組みと偏光の原理 [1]</b>	<b>14</b>
2.1	はじめに	14
2.2	反射の仕組みとハイライトの定義	14
2.3	フレネルの反射の公式	15
2.4	光と偏光	17
2.5	ハイライトの偏光	18
2.6	おわりに	18
<b>3</b>	<b>透明物体の表面形状測定</b>	<b>29</b>
3.1	はじめに	29
3.2	測定原理	29
3.3	シミュレーション及び検討	30
3.4	実験装置・実験方法	33
3.5	実験結果及び検討	35
3.6	おわりに	39
<b>4</b>	<b>球面状の面光源を用いた表面形状測定</b>	<b>52</b>
4.1	はじめに	52
4.2	測定原理	52
4.3	実験装置・実験方法	53
4.4	実験結果及び検討	54

4.5 おわりに . . . . .	57
<b>5 結論</b>	<b>65</b>
<b>謝辞</b>	<b>67</b>

# 第 1 章

## 序論

# 1 序論

## 1.1 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[1]。

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、ヘテロサイン法等があり、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。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、ヘテロサイン干渉計、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、ピエゾ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サ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 [2]。

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  $10 \text{ \AA}$  オーダの感度を得られるが、非常に微少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少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  $10 \text{ nm}$  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 [3]、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。

また、表面形状計測をさらに応用してより実用化させたものとして、きず検査、面精度検査、曲率半径及び真球度測定、非球面形状測定、平面度測定等があげられる。これらは

光学的測定に使われる光学部品の検査測定の項目として非常に重要であり、前述の光計測においても光学部品を使用するために、計測の土台ともいえるべきものである。これらの検査測定のうち、きず検査について述べる。

きずの検査には、簡便なものとしては、半暗室で疵見照明灯 (2000Lux 程度) で照明して肉眼で判定し、必要に応じ標準疵見本などと比較判定する方法や、集光照明器で光を当てて表面と内部の観察をする方法等がある。精密な検査には、暗視野顕微鏡や位相差顕微鏡等の顕微鏡を使う方法が実用化されているが [4]、数量的に自動的に検査を行う装置もある [2]。これは、レーザ光線のスポットを検査対象表面上でスキャンさせ、その後方にある反射スクリーンにより反射された走査光線がホトダイオードに入る仕組みになっているもので、きずがあると、光散乱を生じてホトダイオードの出力が変化することによって、きずの検査測定ができるものである。

しかし、前者の検査法は観察者が判定しなければならず、後者は前述の表面形状計測と同様にレーザ光源と多数の光学系を必要とする。そのため、簡便でなおかつ自動的に検査できる手法が望まれる。

## 1.2 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 [2]。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 [2]。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 [3][5]。

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 [6]。

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 [7]。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 [8]。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 [9]。

### 1.3 研究の目的

1.1 節で述べたように、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のが現状である。また1.2 節では、物体からの反射光が偏光されていることを利用して、物体の様々な情報を得ることができることを示した。そこで筆者は、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、CCD 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。ハイライトの定義と反射、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原理について述べる。システムの精度を調べるためのシミュレーションを行い、本手法の有効性を調べる。それから実験方法について述べ、実際に透明物体の形状を測定してその結果を示し、検討を行う。

第4章では、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。

第5章では、本論文の結論をまとめる。

## 参考文献

- [1] 谷田貝豊彦, “応用光学 光計測入門”, 丸善, 1988.
- [2] 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.
- [3] 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).
- [4] 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.
- [5] D.L.Jordan, G.D.Lewis, and E.Jakeman, “Emission polarization of roughened glass and aluminum surfaces,” *Appl. Opt.*, **35**, 3583, (1996).
- [6] 土井康弘, “偏光と結晶光学”, 共立出版, 1975.
- [7] L.B.Wolff, “Polarization-based material classification from specular reflection,” *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, **12**, 1059, (1990).
- [8] L.B.Wolff, T.E.Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, **13**, 167, (1991).
- [9] 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

# フレネルの法則に基づく反射光の仕組みと 偏光の原理

## 2 フレネルの法則に基づく反射光の仕組みと偏光の原理 [1]

### 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。ハイライトの定義と反射、偏光の原理について述べる。

### 2.2 反射の仕組みとハイライトの定義

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中で少なくとも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[2]。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。

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 $\parallel$ 、 $\perp$ で表す。

入射角 $\phi_1$ 、反射角 $\phi_1'$ 、透過角 $\phi_2$ 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、 $E_{a\parallel}$ 、 $E_{r\parallel}$ 、 $E_{t\parallel}$ は次のように表せる。

$$\begin{aligned} E_{a\parallel} &= A_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 + z \cos \phi_1)\}] \\ E_{r\parallel} &= R_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_1(x \sin \phi_1 - z \cos \phi_1)\}] \\ E_{t\parallel} &= T_{\parallel} \exp[i\{\omega t - k_2(x \sin \phi_2 + z \cos \phi_2)\}] \end{aligned} \quad (1)$$

$A_{\parallel}$ 、 $R_{\parallel}$ 、 $T_{\parallel}$ は振幅、 $\omega$ 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  $r_{\parallel}$ 、 $r_{\perp}$  が次のように求められる。

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

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、 $\mu_0$  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。

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

強度反射率  $F_{\parallel}$ 、 $F_{\perp}$  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、 $r_{\parallel} = 0$  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  $\phi_b$  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  $\rho$  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  $\rho$  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 ハイライトの偏光

ハイライトは 2.2 節であげた反射成分 1 と反射成分 2 の成分から成るが、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、ハイライトは鏡面反射成分のみであるものと仮定する。

そこで、ハイライトの偏光について考えることは鏡面反射の偏光について考えることと等価である。2.4 節で述べたように、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  $I_s$  とおくと次式が得られる。

$$I_{max} = \frac{F_{\perp}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s, \quad I_{min} = \frac{F_{\parallel}}{F_{\parallel} + F_{\perp}} I_s \quad (9)$$

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  $\rho$  は次のようになる。

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

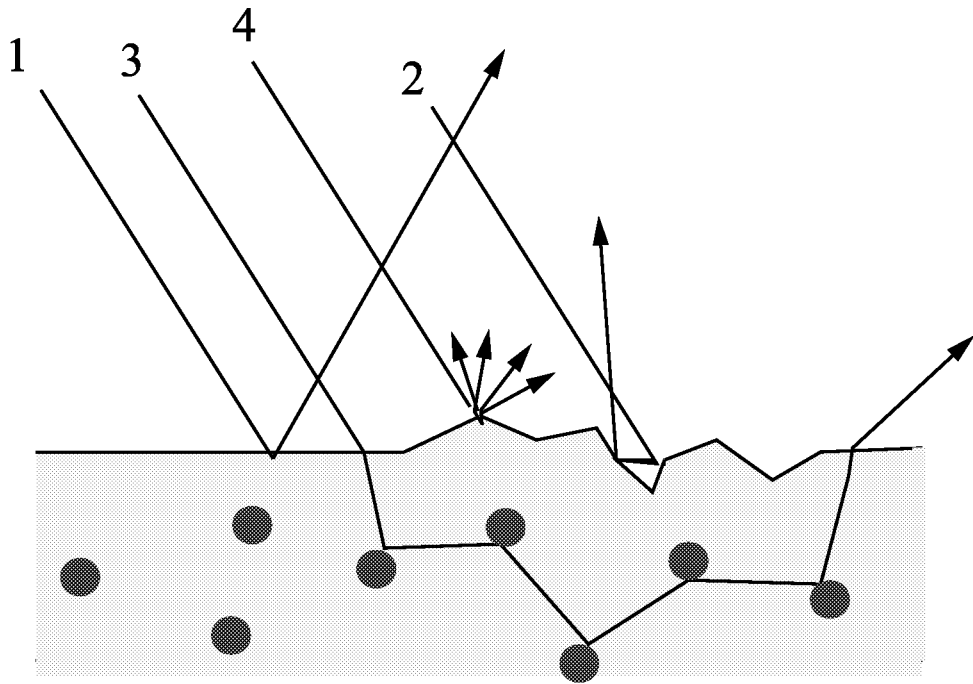
このように、偏光度  $\rho$  は屈折率  $n$  と入射角  $\phi$  の関数となっていることがわかる。屈折率 1.5 の場合の偏光度の入射角依存性を図 2.8 に示した。

## 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、ハイライトの定義と反射、偏光の原理について述べた。

## 参考文献

- [1] 大津元一, “現代光科学”, 朝倉書店, 1994.
- [2] L.B.Wolff, T.E.Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., **13**, 167, (1991).
- [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

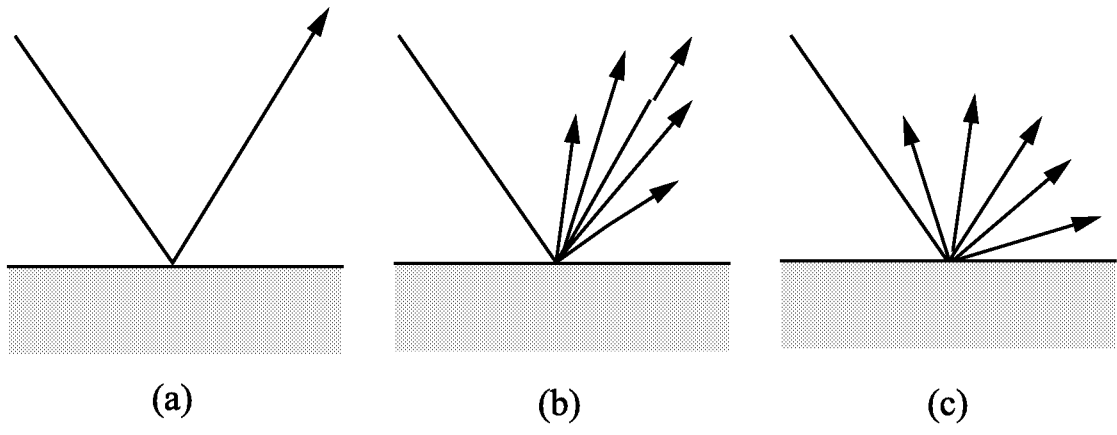


図2.2 表面粗さに依存した反射の様子

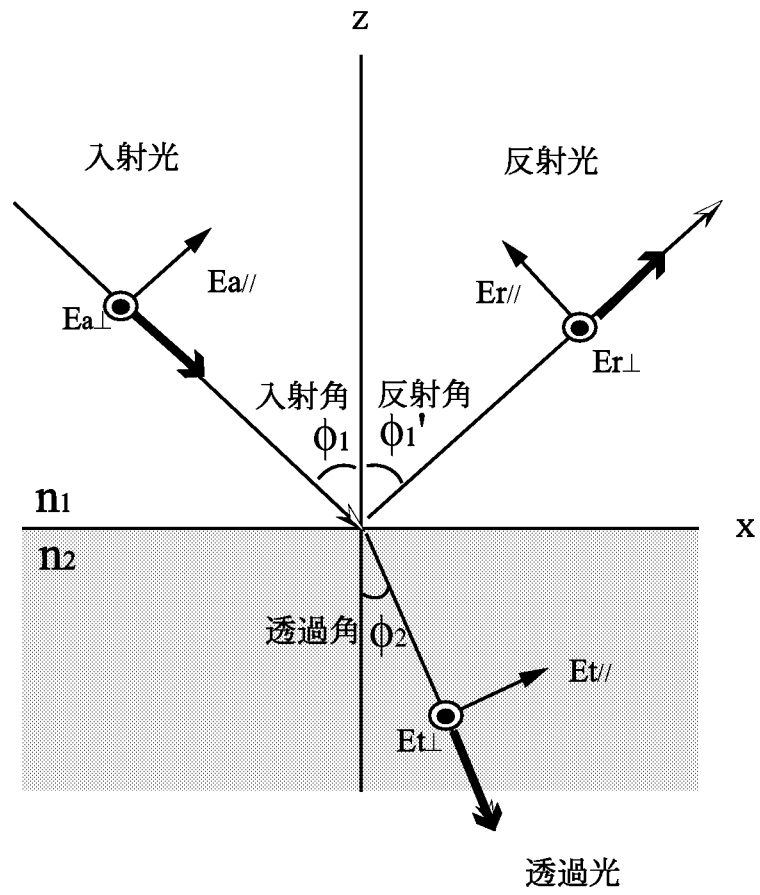


図2.3 フレネル反射

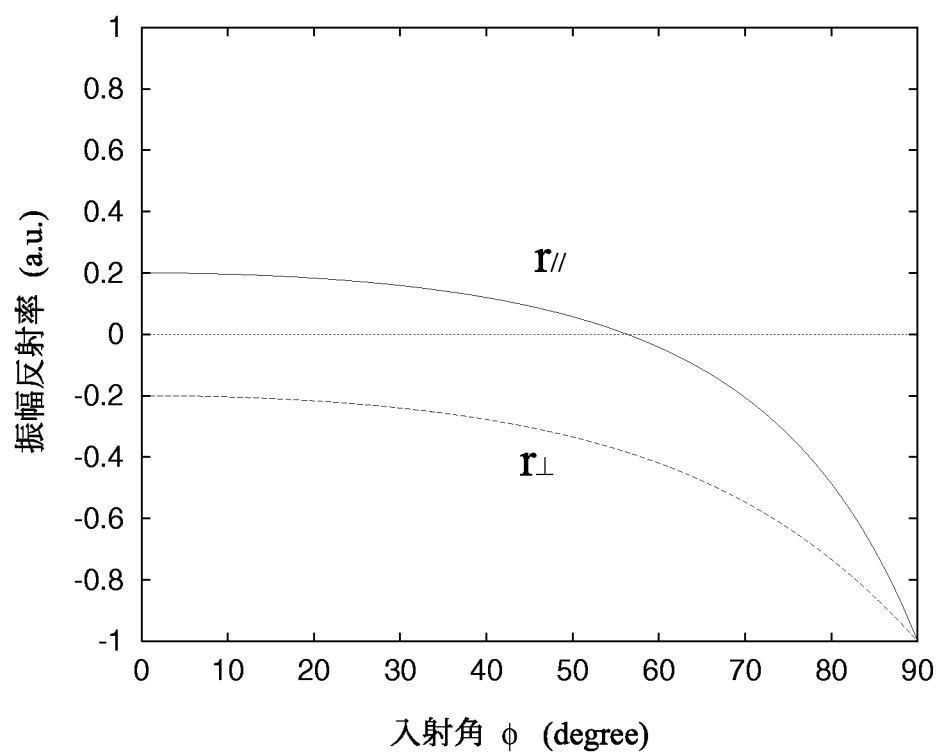
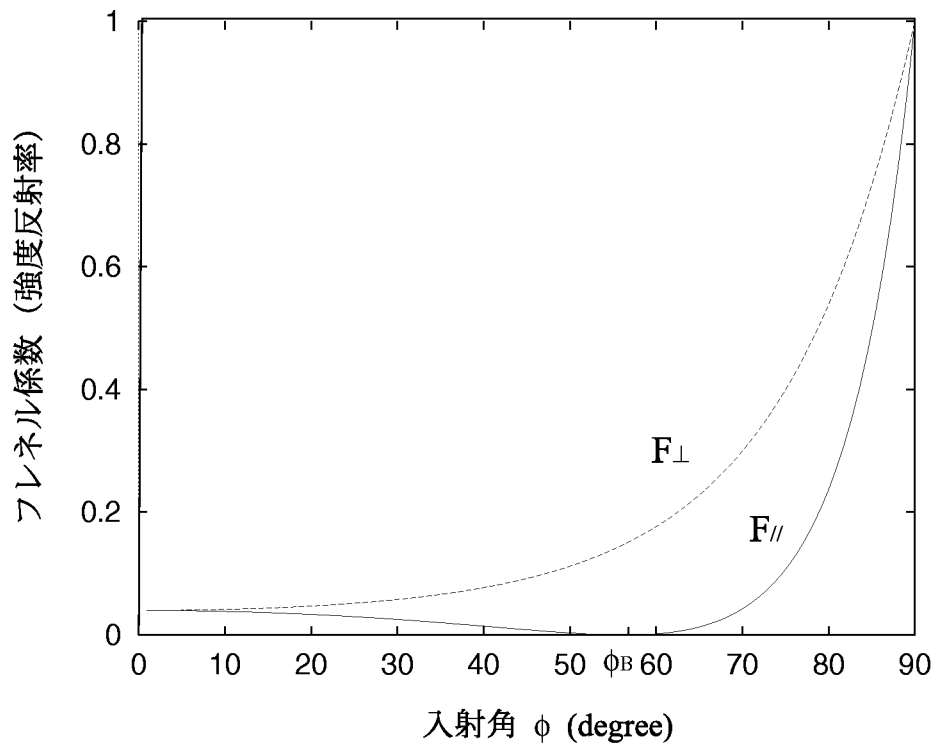


図2.4 振幅反射率の入射角特性



$\phi_B$  : 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



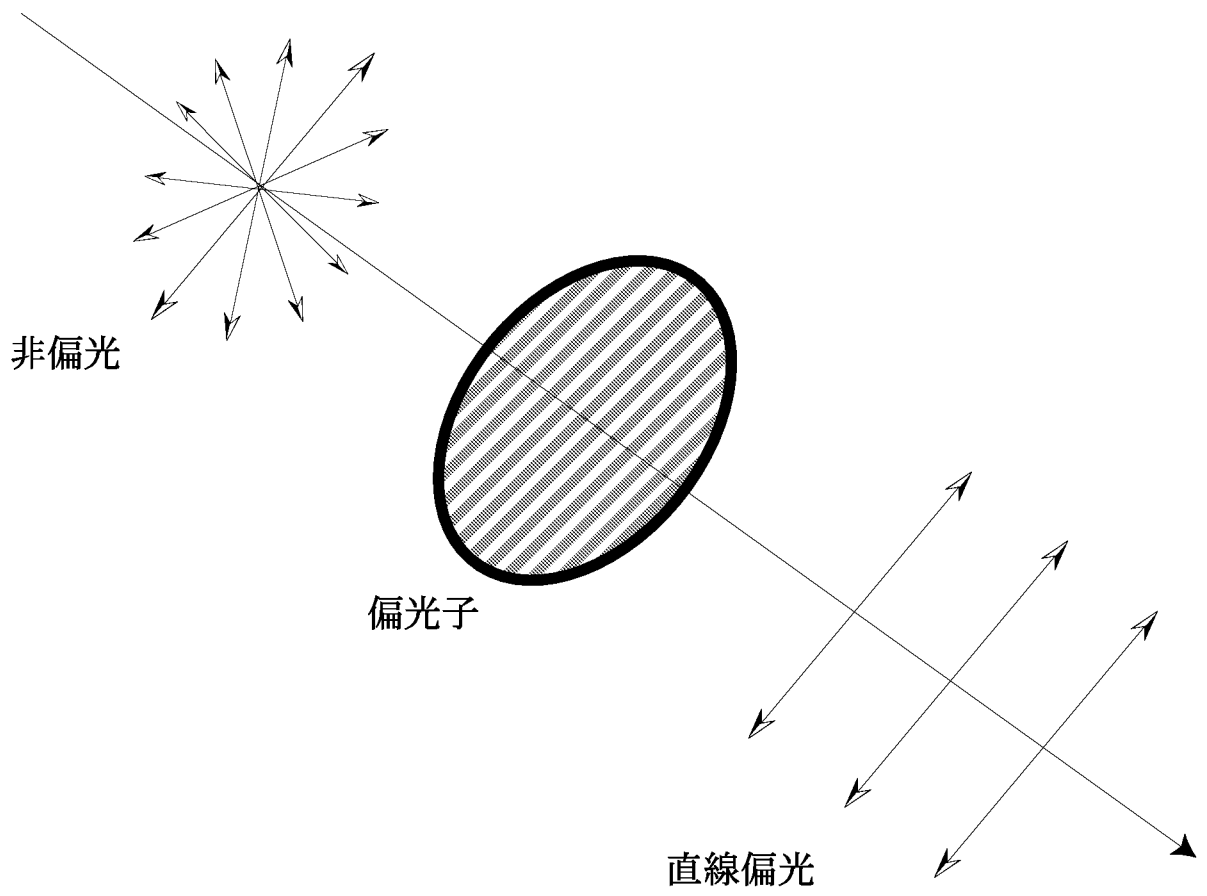


图2.6 偏光

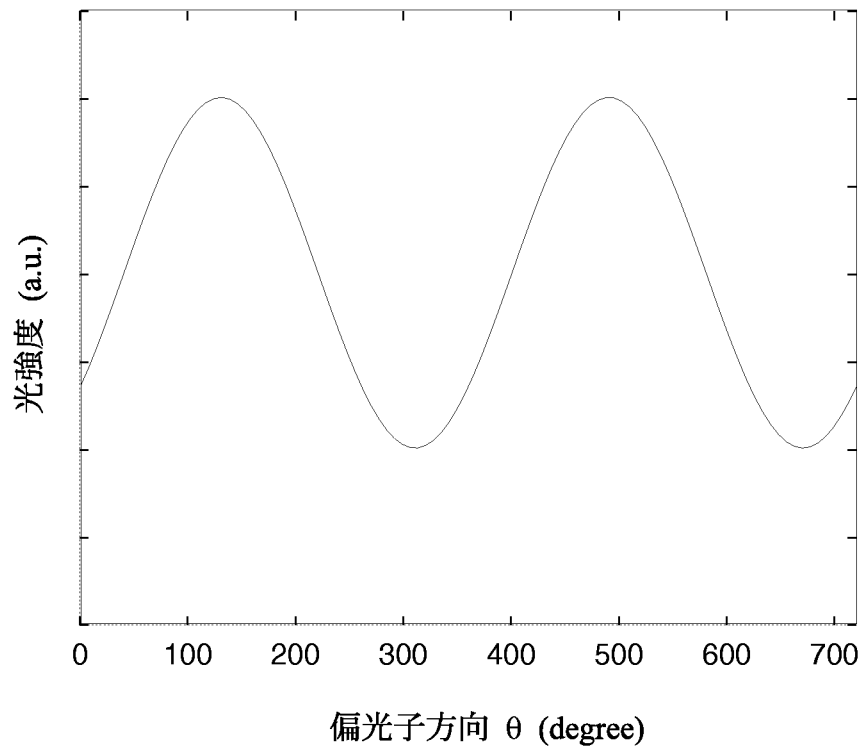


図2.7 反射光の偏光

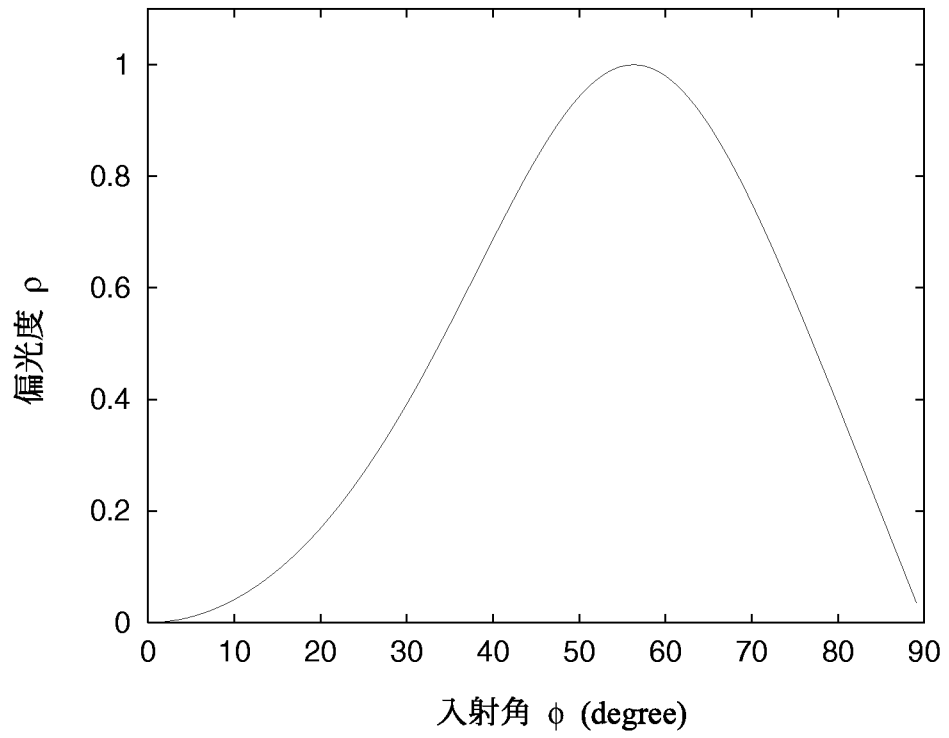


図2.8 偏光度の入射角依存性 ( $n=1.5$ )

## 第 3 章

### 透明物体の表面形状測定

## 3 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。本手法の有効性を確認するために、システムの精度を調べるためのシミュレーションを行う。それから実験方法について述べ、実際に透明物体の形状を測定してその結果を示し、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、ハイライトは偏光されている。物体に入るハイライト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 [1]。この入射面方向の方位角を $\theta$ 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  $\rho$  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  $\rho$  は屈折率  $n$  と入射角  $\phi$  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  $\rho$  と屈折率  $n$  が求ま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  $\rho$  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  $\phi$  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 シミュレーション及び検討

本研究において、物体の反射光の偏光解析を行うことによって、透明物体の表面形状を測定することを提案した。本節では、提案した手法の測定精度を評価するために行った、計算機上のシミュレーションについて述べる。

シミュレーションは、光強度の誤差に対する応答を調べる目的で行った。

ここでシミュレーションの方法について述べる。まず、測定対象物体の屈折率を指定し、計算する入射面方向と入射角を任意に指定する。前章で示した式 (6) より、反射光強度は入射角に依存することがわかるので、入射角に対する光強度の変化のデータをモデルにもとづき作成することができる。このとき  $I_{min}$  となる方向は、入射面方向から求める。実際に測定に使う値は各画素における  $I_{max}$  と  $I_{min}$  であるが、これはそれぞれ式 (6) における  $F_{\perp}$  と  $F_{\parallel}$  の反射率で反射された光強度に相当するので、入射光強度  $I_i$  を与えると、前章

の式(2)と式(6)から、光強度の理論値は次式で与えられる。

$$I_{max} = \frac{n^2 - \sin^2 \phi - 2 \cos \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \cos^2 \phi}{n^2 - \sin^2 \phi + 2 \cos \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \cos^2 \phi} I_i$$

$$I_{min} = \frac{n^2 - \sin^2 \phi - 2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \sin^2 \phi \tan^2 \phi}{n^2 - \sin^2 \phi + 2 \sin \phi \tan \phi \sqrt{n^2 - \sin^2 \phi} + \sin^2 \phi \tan^2 \phi} I_{max}$$

ここでの  $I_{max}$  と  $I_{min}$  は屈折率  $n$  と入射角  $\phi$  を指定し算出した。従って、この  $I_{max}$  と  $I_{min}$  から逆に入射角  $\phi$  が誤差なく求まることになる。本章で述べるシミュレーションでは、この  $I_{max}$  と  $I_{min}$  に意図的に誤差を加えることで、どの程度  $\phi$  に誤差を生じるかを調べる。これにより提案する手法の安定性を評価する。

上式から得られる理論値に、ガウシアン分布にもとづく乱数を加え合わせることで、誤差を含むデータを作成した。誤差の大きさを制御するために、この乱数の分散の大きさを操作した。そして、3.2節で述べた測定原理をもとに構築した計算アルゴリズムに、作成した光強度のデータと入射面方向を代入し入射角  $\phi$  を計算した。この計算を1000回繰り返し、算出された入射面方向と入射角の標準偏差を求めることにより、光強度の誤差と算出された角度の標準偏差の関係を求めた。

以上のような方法により、シミュレーションを行ったのでその結果を示す。測定対象物体の屈折率は1.5とした。入射面方向の標準偏差の光強度誤差依存性を図3.3示した。すなわち、光強度に誤差がある場合に入射面方向の測定結果にどれだけ影響があるかを示した。入射角の標準偏差の光強度誤差依存性を図3.4示した。これも図3.3と同様に、入射角の光強度の誤差に対する影響を示したものである。また、光強度誤差を10%と一定にして入射角を変化させた場合の入射角の標準偏差の変化を図3.5に示した。

この結果から、入射面方向は誤差15%において約2.2°の標準偏差、入射角は誤差15%で約1.1°の標準偏差という値を得た。標準偏差は線形に増加する傾向にあるので、光強度誤差をある範囲内におさえることにより計算精度を確保できることがわかる。具体的には、光強度の検出が8bitで行われるため、その量子化誤差が影響する。物体を十分明るく照明し光強度差を大きくすることによって誤差は小さくなり、誤差がここまで大きくなることは回避できる。従って、十分測定に耐え得る精度が得られた。

また、誤差を一定にして入射角を振ったときの結果から、60°において標準偏差が最

大となり、約  $3.1^\circ$  という値を得た。この特性は、光強度誤差を変化させた場合と違い、非線形なものである。この原因に関して検討を行った。

この特性は、作成した計算アルゴリズムに原因があると思われる。入射角は前章の式 (10) から算出するが、図 2.8 からわかるように偏光度はブリュースタ角のところで極大値をとる曲線の形で得られる。ここで、式 (10) は非常に難解な形になっており、解析的に入射角  $\phi$  について解くことは困難である。そこで、アルゴリズムから入射角  $\phi$  を求めるために、入射角に依存する偏光度曲線から、求めた偏光度  $\rho$  をとる入射角を数値解法 (Newton-Raphson 法) により求める方法を用いた [2]。この求め方の様子を図 3.6 に示す。

この数値解法は、曲線の任意の 2 点から、その点における微分係数の値を求めることを繰り返すことによって交点を求めるものである。そのため、図 2.8 の偏光度の入射角特性からわかるように、1 を超えると解を求めることができない。ブリュースタ角付近の角度を与えたときには、誤差を入れたために  $I_{min}$  がマイナスの値となる場合がある。その場合、式 (8) の  $I_{min}$  の特性から偏光度が 1 を超えてしまう。偏光度が 1 を超えたときには、値を 1 に直して計算するように設定したために、入射角の計算結果は偏光度 1 であるブリュースタ角となる。

$50^\circ$ 、 $60^\circ$  は屈折率 1.5 におけるブリュースタ角  $56.3^\circ$  に近く、このために精度が悪くなったものとする。しかし、この特性は、光強度にランダムに誤差を入れたために起こるものであり、実際の測定では、光強度がマイナスになることはない。ブリュースタ角付近において誤差に弱い傾向を把握することはできたが、実際には  $3^\circ$  も振れることはないと思われる。このシステムにおける精度としては、周囲の角度の傾向から約  $1.5^\circ$  以内に収まると考える。

以上の結果から、反射光の偏光解析を行うことによって透明物体の表面形状を測定することの有効性を確認し、その精度が十分測定に耐え得るものであることを示した。



### 3.4 実験装置・実験方法

3.3 節のシミュレーションにより、提案した透明物体表面形状測定法の有効性を示したので、実際に透明物体の表面形状測定を行った。測定対象物体の表面形状計測のための実験装置を図 3.7 のように構成した。

光源としては、白色光として 150W 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  $480 \times 512$  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。

測定対象物体としては、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ことと、屈折率が既知であったことである。

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。

この装置を、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  $480 \times 512$  pixel の 2 次元画像で、8 bit 256 階調のものである。

次に、この測定装置を用いた測定のための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 カメラで撮像することによって行った。偏光子の偏光角の回転は  $5^\circ$  おきに  $0^\circ$  から  $180^\circ$  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観測し、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  $5^\circ$  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の関数に非線形最小自乗法によって当てはめてから(以下フィッティングと呼ぶ)、その振幅における最大値、最小値を求めた。ある画素におけるデータを正弦波形にフィッティングさせた様子を図3.8に示した。

この  $I_{max}$  と  $I_{min}$  から、3.2節で示したように表面法線方向を計算することができる。

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て行った。図3.5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、入射面方向、入射角の測定結果の評価が行える。

回転ステージは  $10^\circ$  おきに回転させ、反射角を  $10^\circ$  から  $80^\circ$  まで設定した。ここで反射角は、検出器 CCD カメラの方向と測定対象物体の法線方向の成す角度である。このような範囲に角度を設定した理由は、本来ならば本手法の測定可能範囲は  $0^\circ < \theta < 90^\circ$  であるが、実際には、構成した実験装置では入射角  $0^\circ$  付近のときの光源が配置できないためと、 $90^\circ$  付近では測定対象面積が非常に小さくなってしまい測定に有効な画素が不足するためである。

ハイライト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。入射面方向は、図3.7に示したように回転ステージの載置方法により  $90^\circ$  に固定した。

以上のように測定したデータに、提案する計算アルゴリズムを適用し、各画素で表面法線方向を算出した。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。

### 3.5 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、透明物体としてソーダ石灰ガラスを使用し表面形状測定を行った。入射角を変化させたときの、入射面方向角と入射角の測定結果をそれぞれ図3.7(a)と図3.8(a)に示した。標準偏差の計算結果はそれぞれ図3.7(b)と図3.8(b)に示した。

まず図3.7の入射面方向の測定結果について見てみると、 $30^\circ$  から  $80^\circ$  までにおいて、設定値  $90^\circ$  と非常に良い一致を示した。しかし、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$  においては、設定値と測定値との間に誤差が見られる。特に  $10^\circ$  においては入射面方向  $118^\circ$  という値が得られており、非常に大きな誤差が現れている。同様な結果が、入射角の測定結果においても見られる。図3.8を見ると、 $30^\circ$  から  $50^\circ$  においては、設定値と測定値は非常に良い一致を示している。しかし、 $10^\circ$  においてのみ、標準偏差が非常に大きくなっていることがわかる。 $80^\circ$  において  $77.6^\circ$  という測定値が得られているのを最大として、 $70^\circ$ 、 $60^\circ$  でもやや誤差がある。さらにこの誤差について詳しく見てみると、入射角の大きいところ、つまり  $70^\circ$ 、 $80^\circ$  では入射角が大きい程、設定値より小さい値が得られているのに対し、入射角  $40^\circ$  以下においては、入射角が小さくなるにつれて設定値より大きい値が得られる傾向にあることがわかる。

以上のような測定結果について検討を行った。

まず、入射面方向の測定結果において、入射角が小さいときに誤差が大きくなる点について考察する。標準偏差を見てみると、入射角が  $30^\circ$  から  $70^\circ$  の間では、測定の標準偏差が  $0.2^\circ \sim 0.3^\circ$  であり、すべての画素でほぼ等しく入射面方向が精度良く求まっていることがわかる。入射角  $20^\circ$ 、 $80^\circ$  のときはややばらつきが現れており、標準偏差はそれぞれ  $1.3^\circ$ 、 $1.5^\circ$  という値が得られている。しかし、 $10^\circ$  における標準偏差だけは  $163.6^\circ$  という異常な値が得られた。これは、測定した光強度のデータを正弦波形にフィッティングすることがほぼ不可能だったことが考えられる。つまり反射光がほぼ非偏光で  $I_{max}$  と  $I_{min}$  の間に差がなかったために正常に実行できなかった。そのため全くランダムな値を算出してしまった画素が多かったためと考えられる。従って、入射角  $10^\circ$  のときの入射面

方向測定値はまったく信頼性のないものであると言える。入射角  $20^\circ$  においては、 $93.3^\circ$  という値が得られており、多少の誤差が含まれている。

このように、入射角が小さいときの測定が誤差を多く含むことの原因としては、まず、反射率の低さのためと偏光度が小さいため、という2点が考えられる。入射角が小さいということは直入射に近いということなので、入射光の大部分は透過してしまう。そのため前章の図 2.5 の反射率特性で示したように、非常に小さい反射率となり、反射光の光強度は測定に十分な大きさが得られない可能性が高くなる。さらに、図 2.5 の  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  付近の反射率を見てみると、入射面に対する平行成分と垂直成分の反射率の差があまりないことがわかる。このことは図 2.8 の偏光度の入射角特性からも読み取ることができ、偏光度が小さいということを表す。偏光度が小さい、つまり  $I_{max}$  と  $I_{min}$  との差が小さいということは、光強度の偏光子方位角に対する特性が示す正弦波形の振幅が小さいということである。従って、非線形最小自乗法による関数の当てはめが困難で  $I_{min}$  となる角度が得られなかった。

次に、図 3.8 の入射角の測定結果について見てみると、 $10^\circ$  において標準偏差が非常に大きい。 $10^\circ$  における値が  $3.0^\circ$ 、他はすべて  $0.55^\circ$  以内に収まっている。この理由も、入射面方向の測定結果の場合と同様に、フィッティングがうまくいかない程偏光度が小さかったためと考えられる。しかし、全画素の平均値が  $9.9^\circ$  と精度良く求まっていることから、フィッティングがうまくできなかった画素は少数であり、多数の画素においては正常に測定ができていると考える。入射面方向の測定に比べ、入射角の測定が比較的可能となっていることの原因は、正弦波形のフィッティングが困難で  $I_{min}$  を与える角度がうまく得られなくても、振幅については正弦波形の位相よりもフィッティングしやすいためと思われる。

このように入射角の小さいときにおける測定の問題は、フィッティングの限界に依存していると考えられる。この点に関する改善としては、本実験で使用する A/D 変換器の分解能を 8 bit から 12 bit 等に上げることによって光強度の階調、256 階調をさらに増やすことが挙げられる。

以上の結果から、本手法による測定において設定値と測定値は非常に良い一致を示して

おり、透明物体の表面形状測定手段としての有効性を示すことができた。ただし、入射角の小さいときの測定には限界があることが示された。

次に、図3.8の入射角の測定結果において、入射角の大きいところ、つまり $70^\circ$ 、 $80^\circ$ では入射角が大きい程、設定値より小さい値が得られているのに対し、入射角 $40^\circ$ 以下においては、入射角が小さくなるにつれて設定値より大きい値が得られる傾向にある理由について検討する。

数値について詳しく見ると、 $80^\circ$ においてもっともずれており、設定値より小さい $77.6^\circ$ という値が得られ、誤差が $2.4^\circ$ となっている。そして、 $70^\circ$ 、 $60^\circ$ ではずれが小さくそれぞれ $1.0^\circ$ 、 $1.8^\circ$ の誤差があり、 $50^\circ$ 、 $40^\circ$ においては設定値とほぼ等しい値が得られている。 $30^\circ$ 、 $20^\circ$ では逆に設定値より大きい値へずれており、それぞれ $1.0^\circ$ 、 $1.2^\circ$ の誤差がある。この測定値の傾向から、測定された偏光度が設定値のものより大きくなっていることが示される。

与える偏光度を大きくすると、ブリュースタ角よりも小さい入射角においては得られる解が大きくなり、逆にブリュースタ角よりも大きい入射角においては得られる解が小さくなることから、図3.6に示した偏光度の入射角特性からわかる。

設定した入射角の偏光度よりも大きな値が得られた理由として、2点考えられる。1点目は、屈折率の値が正しい値でなかった可能性があることである。屈折率が既知のガラスを用いているが、すべての部分で均一ではなく部分的に組成が違うという可能性がある。

2点目として、測定対象物体が透明であるために観察される裏面反射の影響が考えられる。本実験では、ガラスプレートを測定対象として用いているので、裏面反射がどのような振る舞いをしているかは大体把握することができる。裏面も測定対象表面と同じ角度を持つ平面であるため、裏面反射光は、まず入射光が表面の入射角と同じ角度で入射して表面を透過し、裏面で正反射されて再び表面を透過してくる光であることが容易に理解できる。このように、裏面反射光は透過、反射、透過と3つのプロセスがあり、プロセスが表面反射光よりも多い分、光強度は非常に小さいと推察される。この裏面反射光が表面反射光に足し合わされることにより、裏面反射にも偏光がかかっているために偏光度が微妙に変化するのではないかと考える。ブリュースタ角から遠い角度でより大きな誤差が観測さ

れるのは、偏光度が小さいので裏面反射の影響を大きく受けるためと考えられる。

また、図 3.8 の  $60^\circ$  の測定結果を見ると、その周囲に比べて設定値より上へのずれが大きい。これは、裏面反射光が入ることによって平行成分が増え偏光度が小さくなったのではないかと考える。ブリュースタ角の近くであるために逆に表面反射の偏光度が非常に大きく、入射面に対して平行な成分がほとんどない。そのために、誤差に敏感になったと思われる。

このことから、本手法により透明物体の表面形状測定を行う場合に、測定対象透明物体の裏面反射の振る舞いを把握する必要性があり、それによって精度の改善がはかれるのではないかと考える。

次に、標準偏差の意味について考察する。本実験においては、全画素で設定値が同じなので、理論的にはすべての画素で同じ法線方向値が得られ、本来ばらつきはないはずである。しかし、測定結果からは、約  $0.7^\circ$  から  $1.4^\circ$  の範囲の標準偏差が得られている。 $60^\circ$  においては  $2.3^\circ$  の範囲となっている。非常に精度良く結果が得られていると言えるが、微妙にばらついている理由について検討する。

本手法による表面形状測定は、検出器に入る光線がすべて平行に入射することを前提としている。すなわち平行投影を仮定している。しかし、実際には検出器の CCD カメラにレンズを取り付け、倍率を変化させて測定対象物体の像が CCD カメラのチップに最大に投影されるように調整している。そのために、厳密には平行投影ではなく斜影投影であり、検出器に入る入射光は検出器の投影中心に向かって入射する。従って、本手法によって計算される表面法線方向は場所により微妙に変化している。CCD のチップに投影された像は場所により微妙に入射光の方向が違うためである。

本実験では、ほぼ平行投影であると仮定して差し支えない範囲であると考えている。しかし、さらに精度の改善をはかるために、レンズをもっと焦点距離の長いものを使うことが考えられる。また、検出器と測定対象との距離を計ることによって計算できる斜影の角度を考慮に入れることも有効ではないかと考える。

以上、主に精度の改善について検討したが、ここで測定感度について考える。本実験では測定対象物体のサイズが 3 cm 角であるので表面形状測定における分解能は約  $60 \mu\text{m}$

である。このことから、法線方向のうち入射角測定値がもしも $1^\circ$ ずれていた場合、このずれを高低差に換算すると、 $20^\circ$ においては $1.2\ \mu\text{m}$ 、 $70^\circ$ においては $8.5\ \mu\text{m}$ である。これは $60\ \mu\text{m}$ の解像度であることを考慮すると、非常に小さく無視できる範囲である。従って、本実験において得られた測定結果は設定値と非常に良く一致しており、提案した透明物体の表面形状測定方法の有効性を示すことができた。また、レンズの倍率の変化により分解能が大幅に可変であることから、大小の物体にこの測定法が適用でき実用性に優れていることが予想される。

### 3.6 おわりに

本章では、前章で述べた原理を踏まえ、表面形状測定法を提案しその原理について述べた。まず本手法の有効性を確認するために、システムの精度を調べるためのシミュレーションを行い、光強度誤差に対する依存性と入射角依存性を調べた。また透明物体の表面形状測定を提案した方法により行った。そして以下の知見を得た。

1. シミュレーションを行った結果、入射面方向は誤差15%において約 $2.2^\circ$ の標準偏差、入射角は誤差15%で約 $1.1^\circ$ の標準偏差という値を得た。また、誤差を10%一定にして入射角を振ったときの結果から、 $60^\circ$ において標準偏差が最大となり、約 $3.1^\circ$ という値を得た。従って、本手法の精度が十分測定に耐え得るものであることが示された。
2. 測定を行った結果、入射面方向の測定結果は設定値 $90^\circ$ と非常に良い一致を示した。入射角の測定結果も、設定値と測定値は非常に良く一致した。 $10^\circ$ においてのみ誤差が大きく測定が困難であった。  
以上より、本手法による測定において設定値と測定値は非常に良い一致を示し、透明物体の表面形状測定手段としての有効性が示された。ただし、表面形状の入射角が $10^\circ$ 以下の測定には限界があることがわかった。

## 参考文献

- [1] Lawrence B.Wolff, Terrance E.Boult “Constraining object features using a polarization reflectance model,” IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., **13**, 167, (1991).
- [2] William H.Press, Saul A.Teukolsky, William T.Vetterling, Brian P.Flannery “Numerical Recipes in C,” Cambridge University Press, New York, 1988.



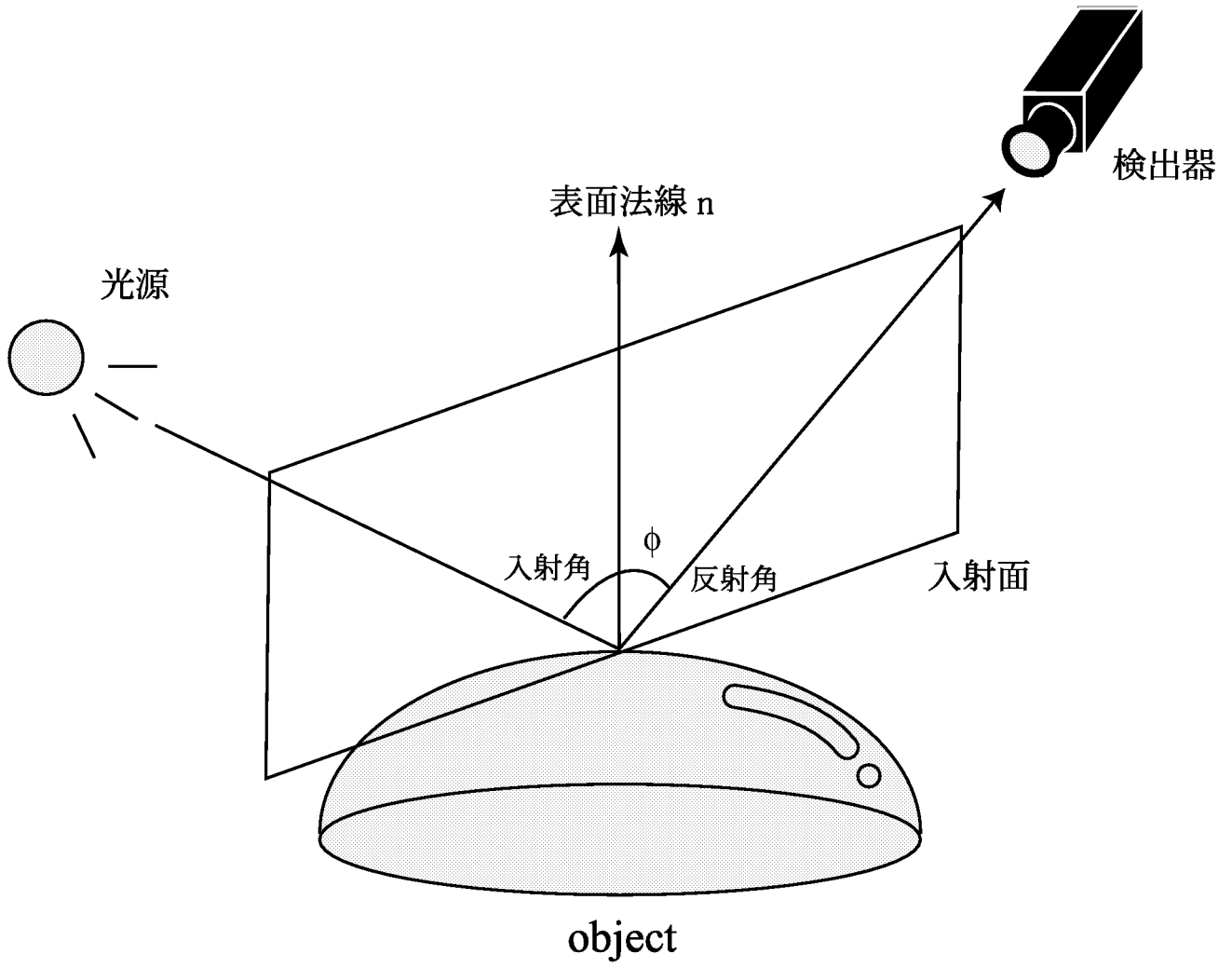


図3.1 表面法線方向

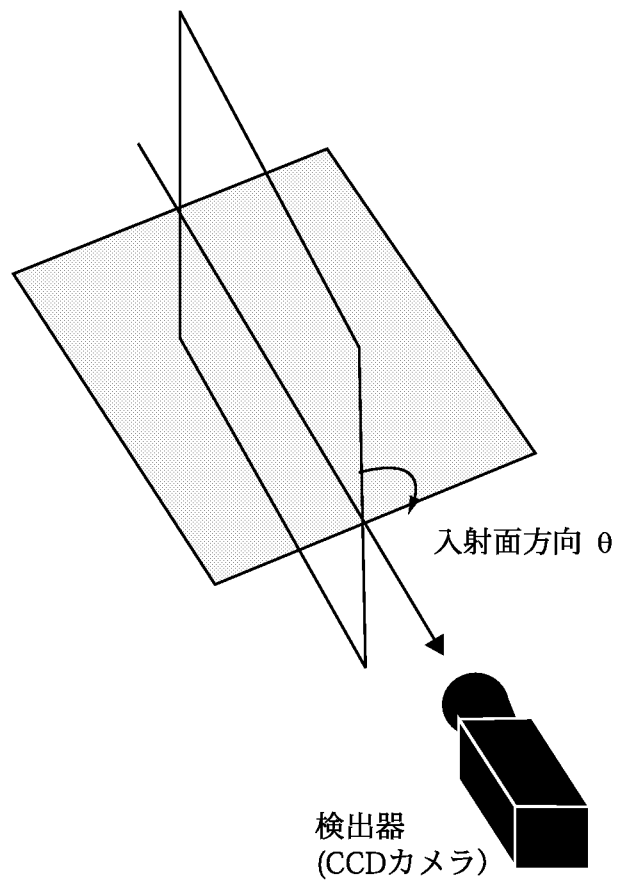


図 3.2 入射面方向の定義

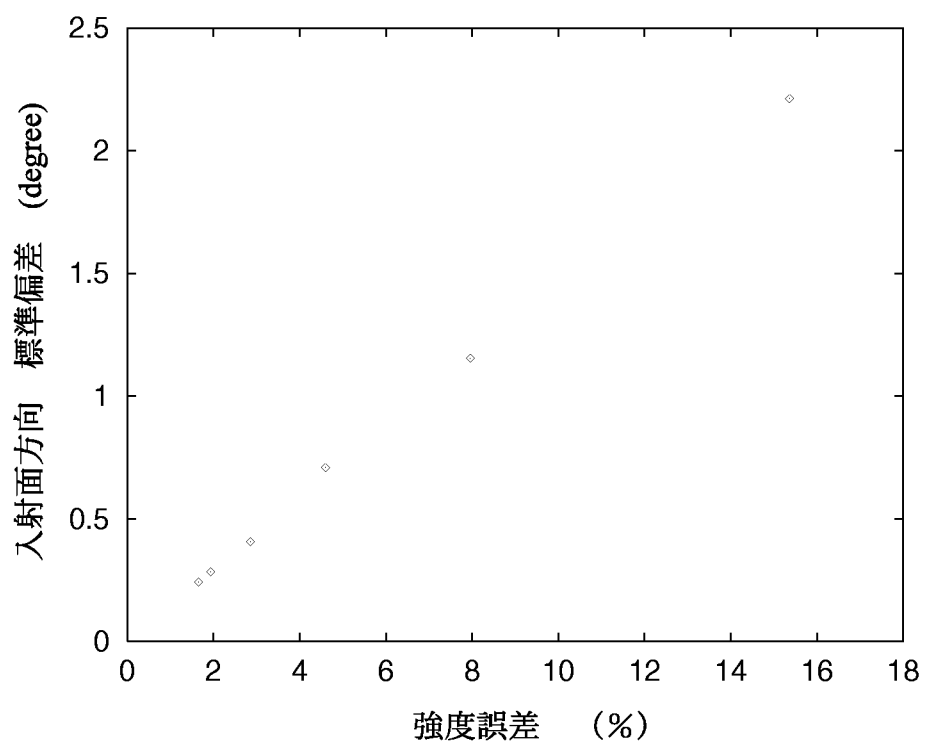


図3.3 入射面方向  $\theta$  標準偏差 の光強度誤差依存特性

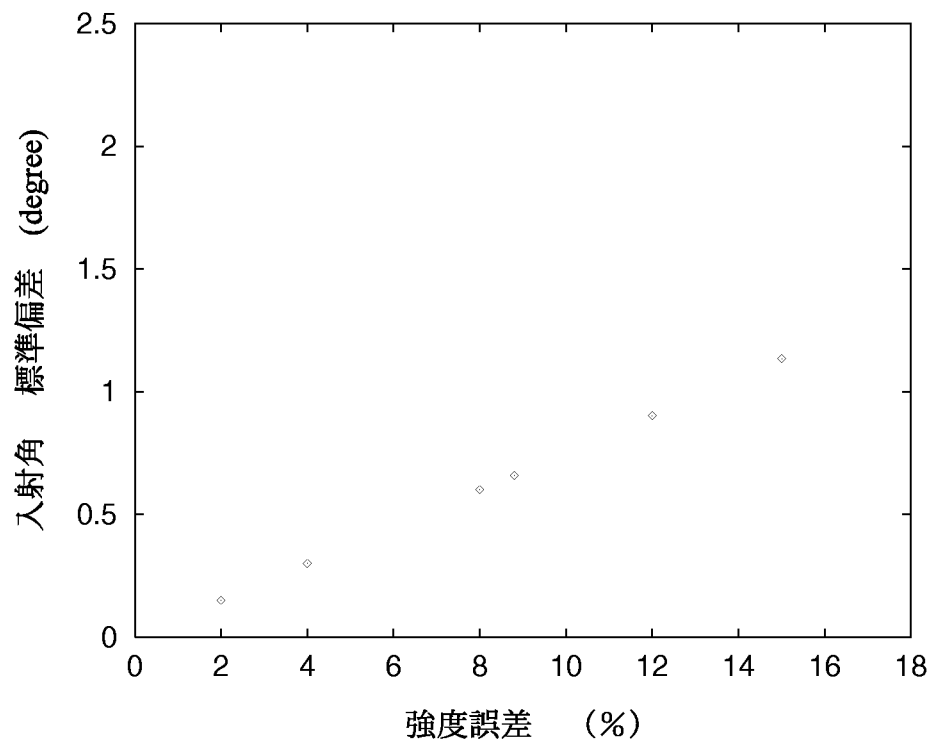


図3.4 入射角  $\phi$  標準偏差の光強度誤差依存特性

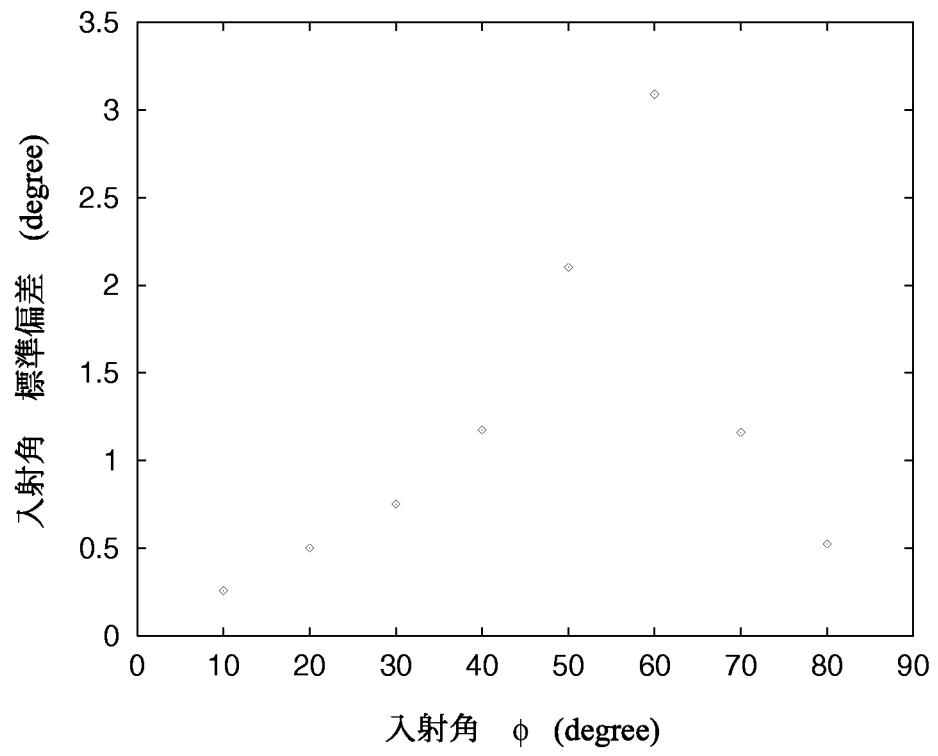


図3.5 入射角  $\phi$  標準偏差の入射角特性

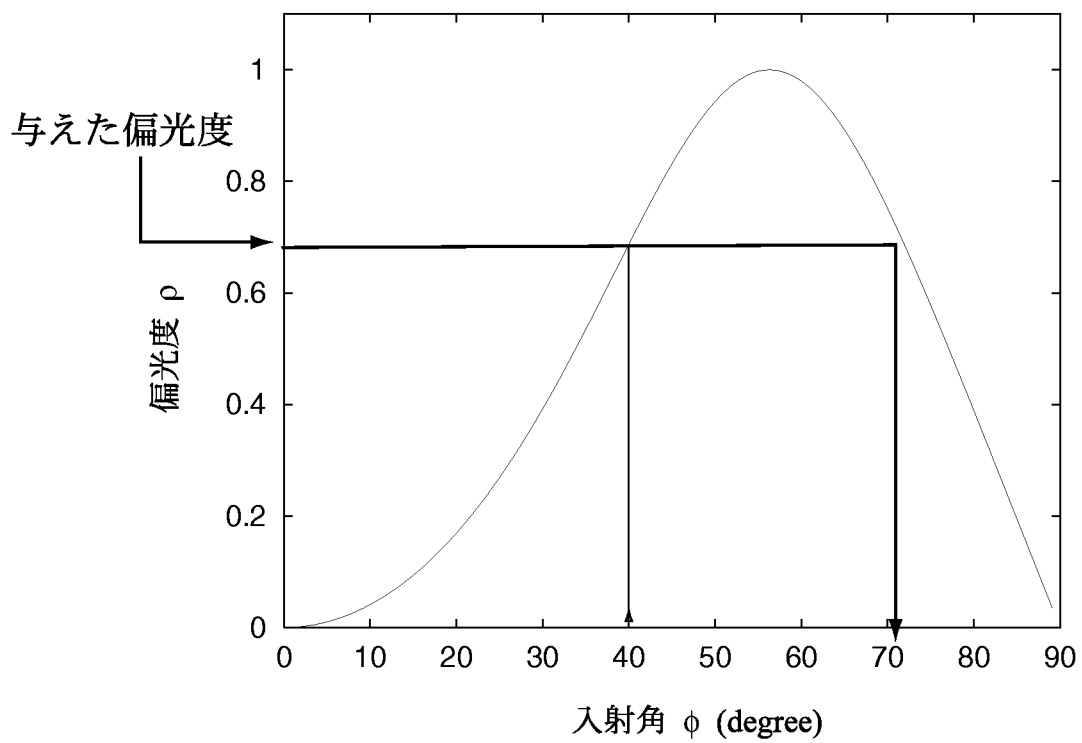


図 3.6 入射角の決定法

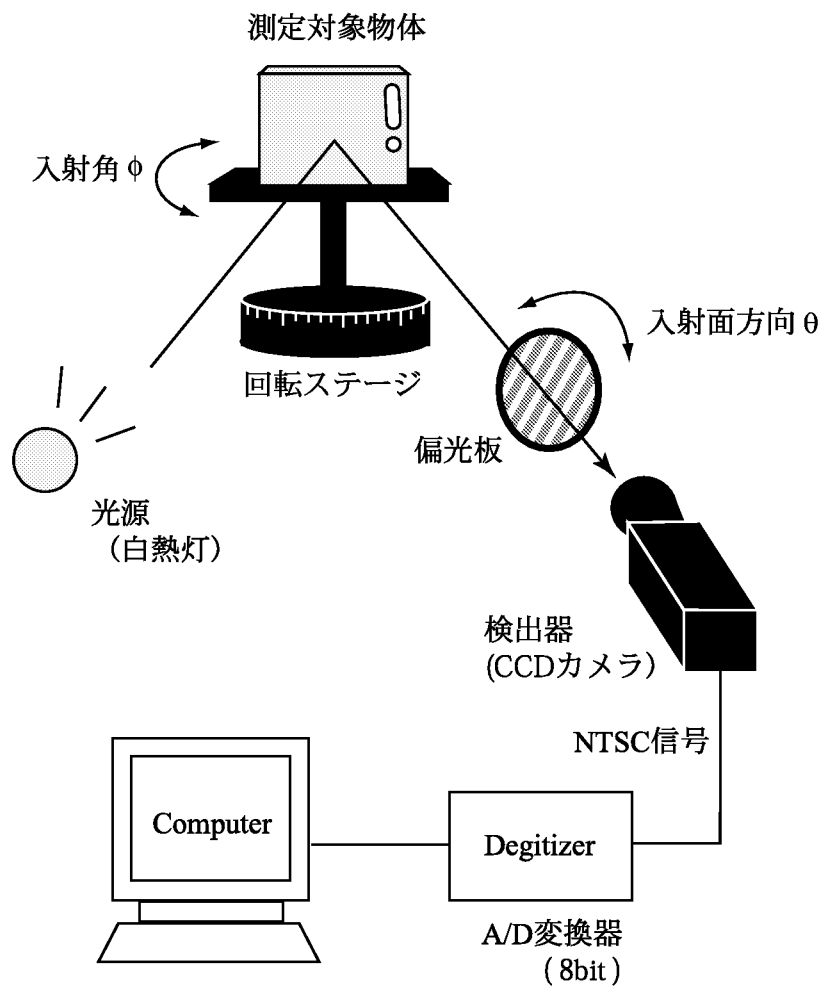


図3.7 実験装置図

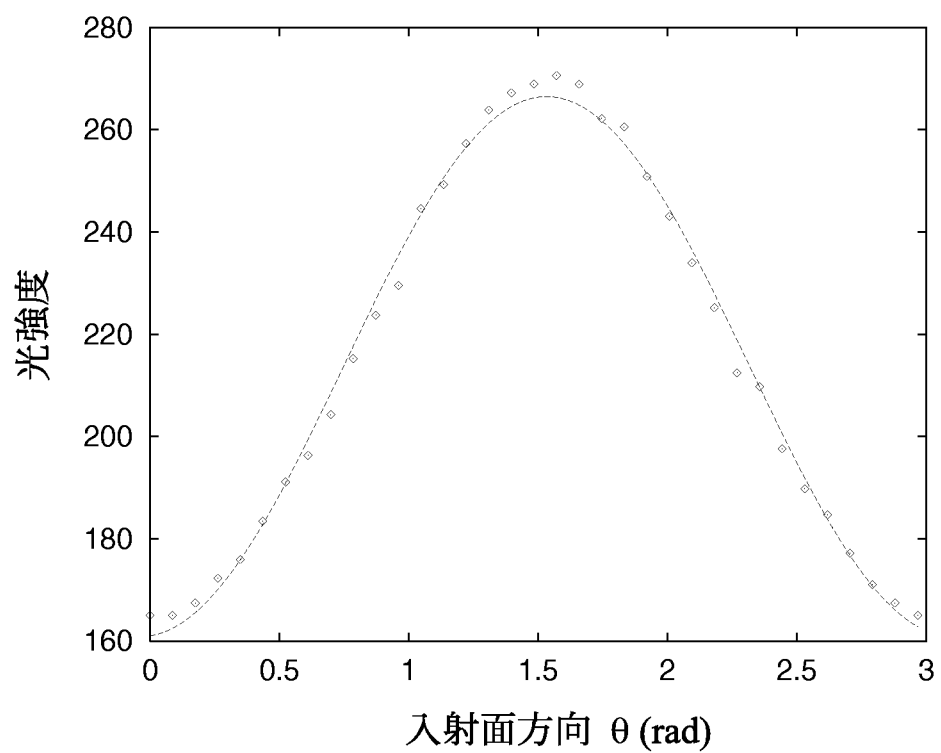
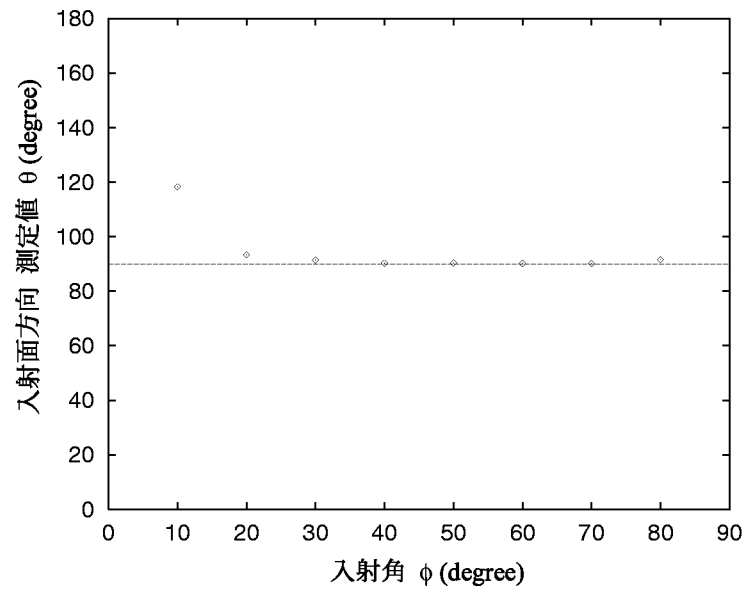
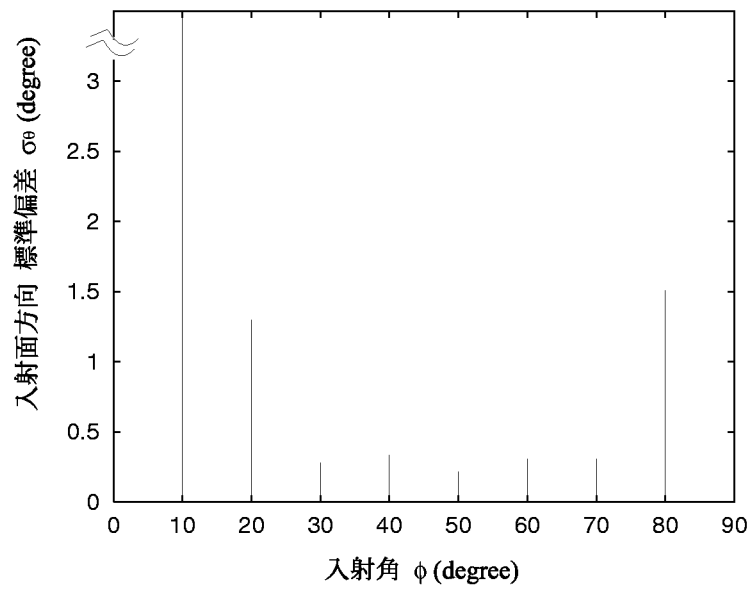


図3.8 実験データのフィッティング





(a)



(b)

図3.9 入射面方向  $\theta$  の測定結果 (a)平均値 (b)標準偏差

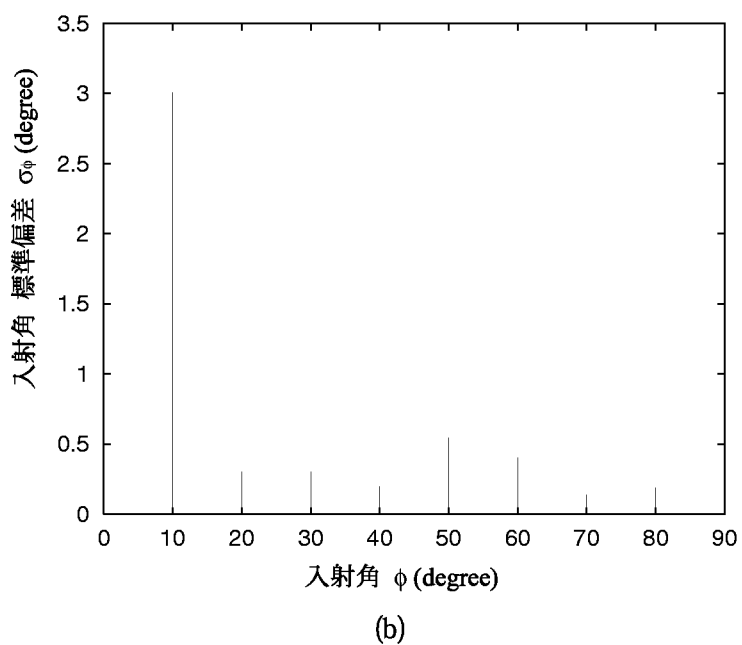
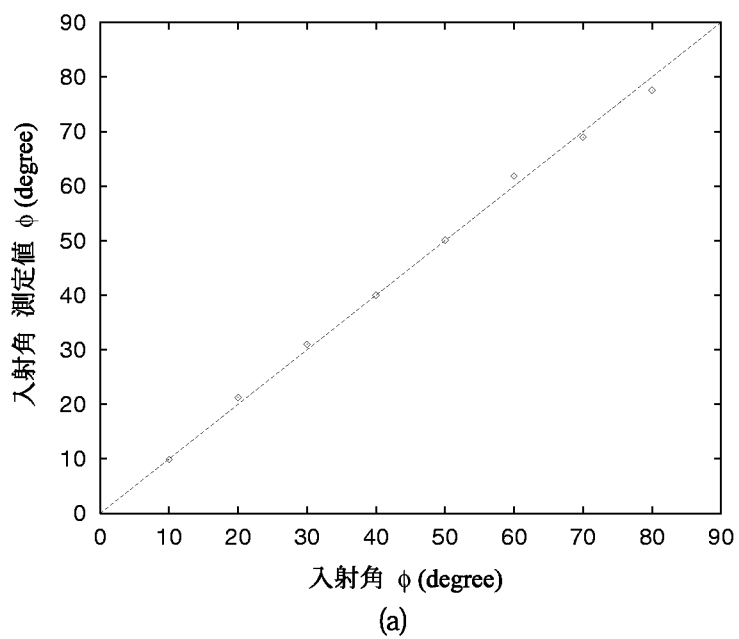


図3.10 入射角  $\phi$  の測定結果 (a)平均値 (b)標準偏差

## 第 4 章

### 球面状の面光源を用いた表面形状測定

## 4 球面状の面光源を用いた表面形状測定

### 4.1 はじめに

本章では、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。

### 4.2 測定原理

前章において、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現れない。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。

### 4.3 実験装置・実験方法

表面形状計測を行うための実験装置を図 4.1 のように構成した。この実験装置を撮影した写真を図 4.2 に示す。

実験装置のうち、CCD カメラ、偏光板、白熱灯は、すべて前章の実験で用いたものと同じものである。ただし、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  $120^\circ$  おきに配置した。前章の実験系との相違として、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 40cm 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 のアクリルから成る半球状物体、直径 3cm のものを用いた。このアクリル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。

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、第 3 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  $5^\circ$  おきに  $0^\circ$  から  $180^\circ$  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、第 3 章と同様に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。

アクリル半球の測定とは別にこの面光源を用いて、提案する透明物体の表面形状測定法の評価のために、きず検出に関する実験を行った。第3章で使用したガラスプレートに意図的にきずをつけ、同様に測定を行った。

#### 4.4 実験結果及び検討

4.3節で述べた実験装置により、透明物体としてアクリルの透明半球状物体を使用し、第3章で述べた実験方法で表面形状測定を行った。この測定結果について、図4.3、図4.4、図4.5を示した。検出器のCCDカメラによって撮像した36枚の画像のうちの任意の1枚の上に、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、図4.3に示した。各画素の法線はすべて表示せず、30pixel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次的に可視化したものを図4.4に示した。図4.4と同様に計算された表面にメッシュをかけて表示したものを図4.5に示した。

図4.3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、入射面方向において得られた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た。また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。

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図4.4.と図4.5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り、各画素における高さを計算した。

結果を見ると、図 4.3 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。図 4.5 から同様に、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。

しかし、この結果を詳しく見てみると、半球面の裾、境界線付近において面の傾きがややなだらかになっており、厳密な半球面から少しずれがあることが観察される。この理由は、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ことによる。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。本実験のデータ処理において、構築したアルゴリズムはこの事を考慮しておらず、無条件にブリュースタ角よりも小さい方の解を選んで入射角としている。従って、この二つのうちのどちらか一つを選べるような情報があれば測定は可能である。

半球面における面の傾きの大きい部分、つまり半球の端の、ブリュースタ角  $56.3^\circ$  よりも大きい入射角の部分においては、正常な測定値は得られていない。しかし、二つの解を算出しているな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。

また、入射面方向の算出過程においても二つの解が得られている。これは、入射面方向の測定可能範囲が  $0^\circ$  から  $180^\circ$  までであり、 $360^\circ$  の測定が不可能であるためである。従って入射面方向においても、 $\theta$  と  $\theta + 180^\circ$  の二つが解として得られ、一意には決まらない。測定対象物体が点対称、または線対称であるという情報があれば、二つのうちの一つを選択できるということになる。そこで、構築したアルゴリズムにおいては、この点対称であるという情報をもとに入射面方向を決定している。

このように本手法では、入射角と入射面方向を合わせて 4 つの解の選択性がある。従って、透明物体の表面形状測定において任意の形状を測定することは、本実験のように最低

限の測定対象物体の情報があれば測定が十分可能である。すなわち、既知の形状の物体における形状検査手法として、例えば、きずや歪みの検出方法として有効であると思われる。

そこで、本手法のきず検出能力に関する実験結果を図 4.6 に示した。第 3 章で使用したガラスに約  $100 \mu\text{m}$  のきずを画面中央縦方向につけて、同様に測定を行い法線方向を算出した。図 4.6 では、縦方向は画素を間引いて表示しているが、横方向は各画素すべて法線を表示した。この法線は図の上方向を向いているものである。これを見ると、図中央で短い法線が連なって縦の線上に乗っていることがわかる。従って、きず部分でその他の部分の法線と異なる結果を得ており、きず検出が可能であることが示された。

次に、本手法における測定誤差について検討する。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。図 4.4 の結果を見てみると、画面中央に位置していた半球の頂点部分において大きな誤差は見られないが、これは半球の頂点付近の入射角が  $0^\circ$  付近であるためと思われる。入射角  $0^\circ$  付近においては、反射光の偏光度は非常に小さくほぼ非偏光で、 $I_{max}$  と  $I_{min}$  の差はあまりない。このことは、画面中央において光強度の差をあまり検出できなかった結果と一致する。

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。また、上方からの入射光を必要とするのは、入射角が  $0^\circ$  に近い、非常に小さい入射角を持つ部位である。従って、既知の形状を持つ物体を測定する場合を想定すると、この部分を画面中央から外れたところに配置することにより、面光源



頂部の穴による影響を少なくすることができる。

## 4.5 おわりに

本章では、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た。そして、この実験装置を用いて前章と同様な方法で透明物体の表面形状測定を行い、以下の知見を得た。

1. 透明物体の表面形状測定において任意の形状を測定することは、本実験のように最低限の測定対象物体の情報（点対称、線対称等）があれば十分測定可能であることがわかった。
2. 本手法により既知形状の物体におけるきず検出を目的とする実験を行った結果、形状検査手法として有効であることが示された。

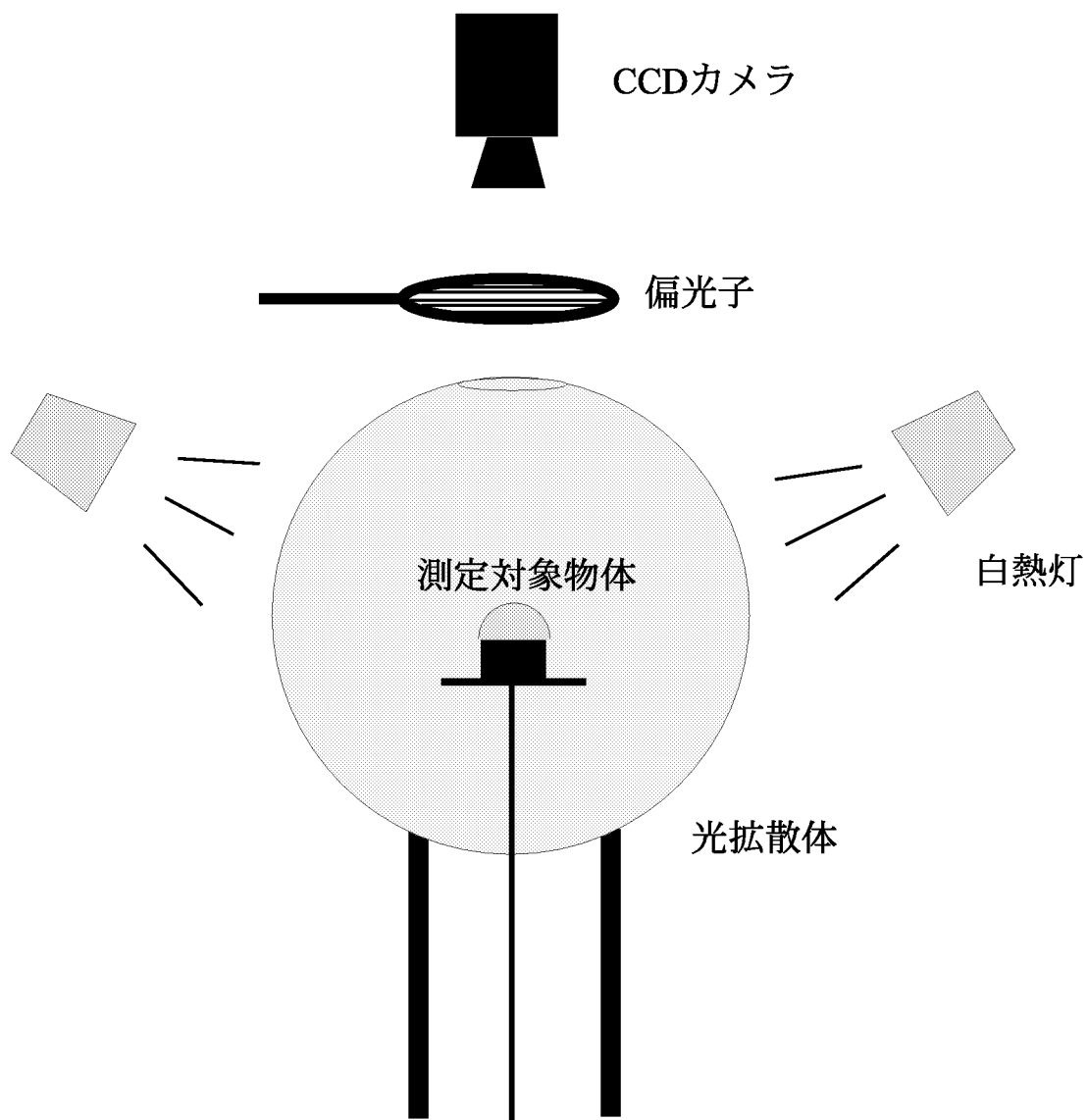


図4.1 実験装置図

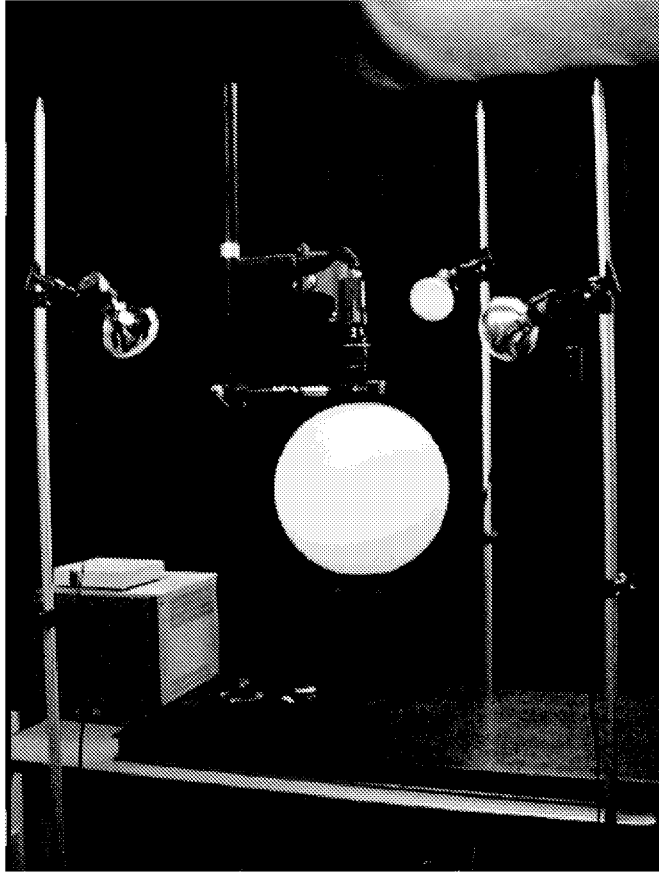


図4.2 実験装置の概観

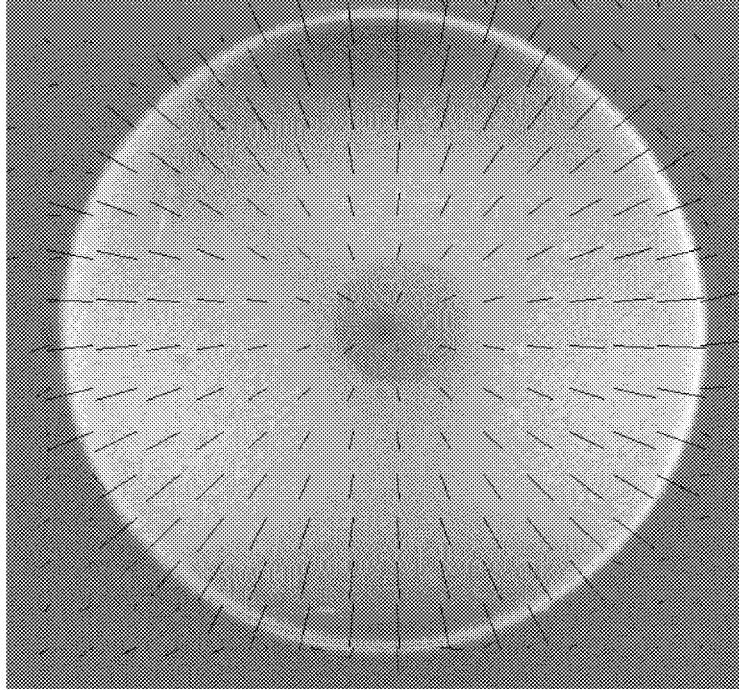


図4.3 表面法線の計算結果

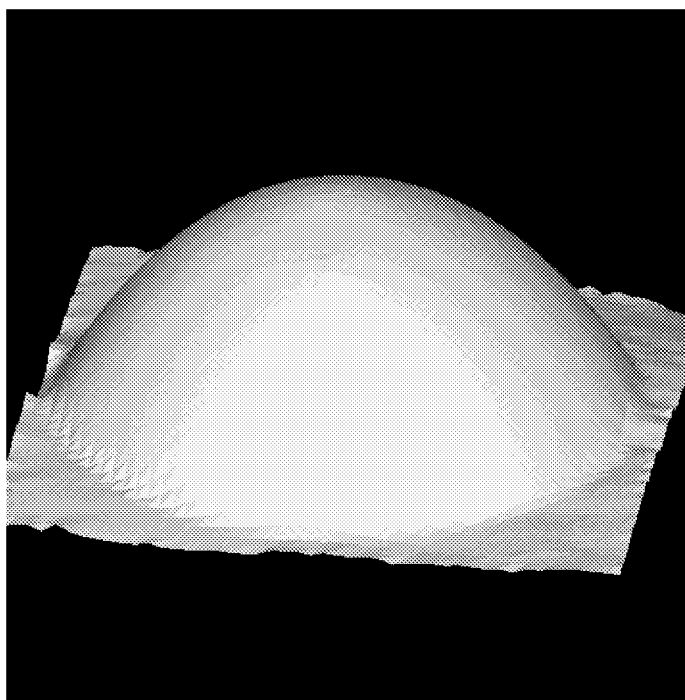


図4.4 表面形状の計算結果

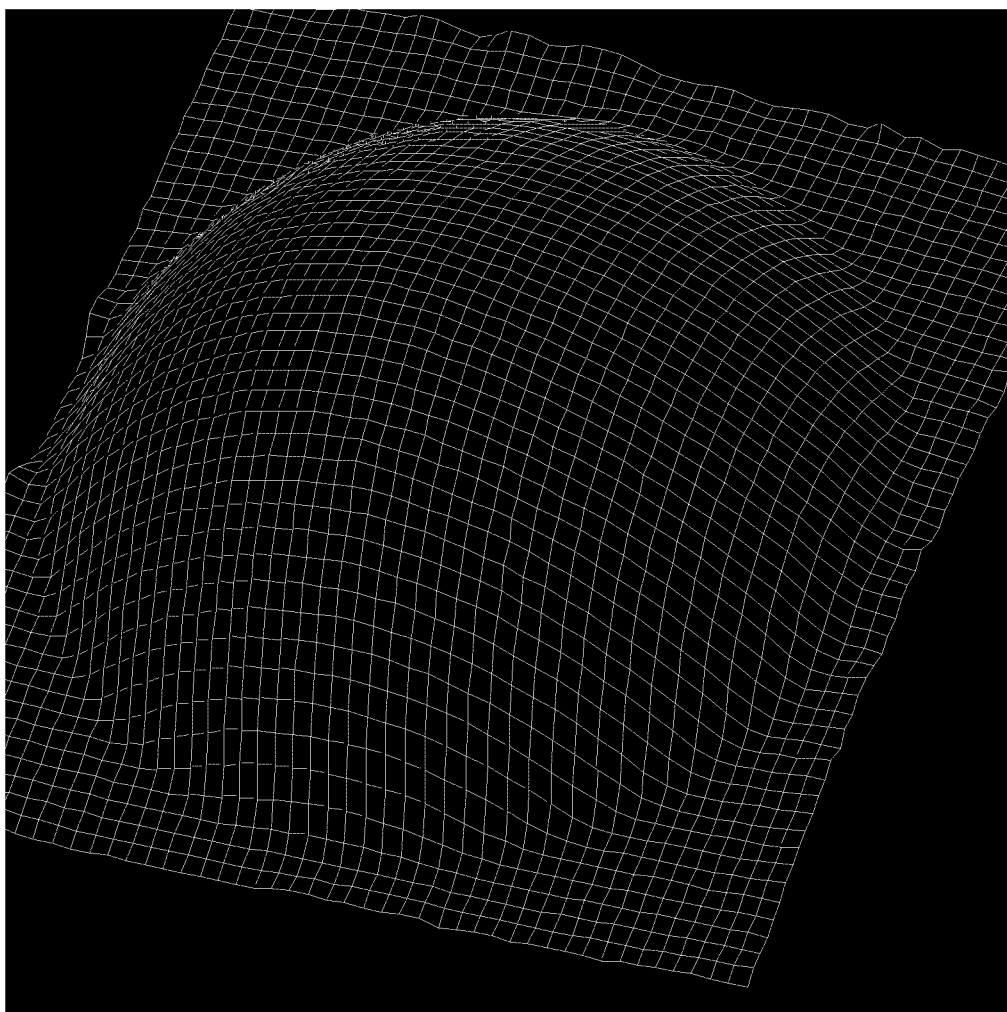


図4.5 表面形状の計算結果

(ここにきず検出実験結果を入れる)

## 第 5 章

### 結論



## 5 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、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、表面形状測定においてさらに球面状の面光源を用いることを提案した。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、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ことと等しい状態ができる。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。このことを利用して、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る。従って、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える。

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. 提案した測定法において、高精度での測定が可能であるかを把握するためのシミュレーションを行った結果、入射面方向は誤差15%において約 $2.2^{\circ}$ の標準偏差、入射角は誤差15%で約 $1.1^{\circ}$ の標準偏差という値を得た。また、誤差を10%一定にして入射角を振ったときの結果から、 $60^{\circ}$ において標準偏差が最大となり、約 $3.1^{\circ}$ という値を得た。
2. 透明物体として板状のソーダ石灰ガラスを使用して測定を行った。入射面方向の測定結果は、入射角 $30^{\circ}$ から $80^{\circ}$ までにおいて、設定値 $90^{\circ}$ と非常に良い一致を示した。 $20^{\circ}$ においては設定値と測定値との間に誤差が見られたものの、その誤差範囲は小さい。入射角の測定結果も、 $30^{\circ}$ から $50^{\circ}$ において設定値と測定値は非常に良い一致を示した。 $80^{\circ}$ 、 $70^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ では $2^{\circ}$ 以内の誤差が見られたが、全体のシステ

ムの精度から見ると非常に小さいと言える範囲である。10°においてのみ誤差が大きく測定が困難であった。

3. 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良い一致を示した。測定対象物体の最低限の情報があれば、任意の形状の透明物体の形状検査手法として利用できることがわかった。
4. 本手法によりきず検出を目的とする実験を行った結果、約100  $\mu$  mのきずの部分における表面法線方向は、その他平坦な部分の法線方向と違う結果が算出された。

以上の結果から、本手法による測定において設定値と測定値は非常に良い一致を示しており、透明物体の表面形状測定手段としての有効性を示すことができた。ただし、入射角が10°以下の測定には限界があることが示された。また、球面状面光源を使用した透明物体の表面形状測定においては、任意の形状を測定することも最低限の測定対象物体の情報があれば十分可能であることを示した。透明物体におけるきずの検査能力もあることが示され、形状が既知の物体であれば、形状検査手法としてきずや歪みの検出に有効である。

従って、ハイライトの偏光を解析することによって、透明物体の表面形状測定を行うことの有効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栢木寛教授、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、楽しく研究生活を送れるようにお取り計らいいただいたことに深く感謝いたします。

そして、慶應義塾大学理工学部電気工学科小原研究室・栢木研究室の先輩方、同輩の皆様には多くのご助言、ご配慮をいただき、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。