

解説

非球面計測法

—原理を主体として—

横 関 俊 介

大阪大学工学部応用物理学教室 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1986年12月5日受理)

Aspheric Surface Measurement

Shunsuke YOKOZEKI

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamadaoka, Suita 565

1. はじめに

現在テレビ画像の拡大用大口径レンズから CD などの光ピックアップ用の口径の小さいレンズにいたる種々のレンズにおいて、高性能を維持したままの軽量化や低価格化(量産効率化)が強く望まれている。これらの要望すべてにこたえるのがレンズ面の非球面化である。その非球面も球面からの偏差が大きいものである。

非球面を採用した例^{1,2)}や球面レンズと非球面レンズとの計算による比較³⁾などによって、レンズ面の非球面化の効果が非常に大きいことがわかってきた。したがって、超精密加工技術の進歩とともにレンズ面の非球面化が進み、一部では量産化されるまでになっている。

非球面レンズを製造する際には製造工程の各段階で、非球面の形状計測や検査を行わなければならない⁴⁾。非球面の加工技術の進歩とともに非球面計測法も、ここ数年の間に大いに研究・開発が行なわれた。

一方、天体望遠鏡などにおいては、古くから放物面などの非球面が使われている。これらの非球面の計測法としては、フーコー法やロンキー法、ハルトマン法などが用いられてきた。これらのクラシックな計測法⁵⁾は、非球面による点物体の像が点になっているかどうかを検査するものである。現在考えられている非球面1面だけでは、点物体の像が点にならない場合が多い。したがって、クラシックな計測法をそのままで利用することはできない。たとえば、ロンキー格子として変形のあるものを採用することによって、ロンキー法を現在求められて

いる非球面の検査用に改良する提案⁶⁾がなされている。

ここでは、現在求められている非球面計測法として提案され、研究・開発されたものを原理を中心にして解説することにする。

非球面計測法を大別すると点計測法とパターン計測法の二つに分けることができる。被測定非球面上の各点における形状を表わす測定値を順次求めるのが点計測法である。被測定非球面全面の形状をパターン(縞図形)として表示するのがパターン計測法である。以下では、この二つの計測法に分けて解説する。

2. 点計測法

2.1 精密三次元座標測定機

2.1.1 接触式

接触式精密三次元座標測定機の基本的な測定原理を示してあるのが図1である。この例では、被測定物体(O)をY方向に移動できる測定テーブル(T)上に固定でき、プローブ(P)がZとX方向に移動できるとともに、それらの移動量XとY,Zの値を高精度に測定できる。指定した位置(X,Y)でプローブ(P)を降ろして、決まった測定圧で被測定面とプローブが接触したときのZの値を求める。XとY,Zの値はプローブと被測定面との接点の座標を示したものである。したがって、上に述べた操作を被測定面上の各点について行なえば、ある基準面からの被測定面の高さ、または、深さが測定できたことになる。高精度三次元座標測定機⁷⁾ではモアレ測長機で移動量が測定され、超高精度のもの⁸⁾ではレーザー干渉

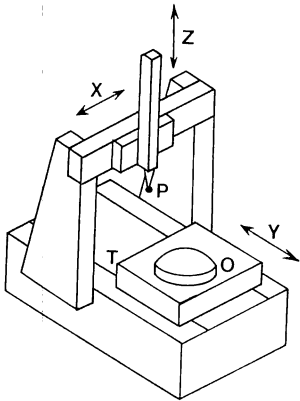


図 1 三次元座標測定機の測定原理

測長機で測定されている。

光学的非球面の形状には、光軸を軸とした回転体のものが多い。そこで、測定テーブルの直線移動を回転にしたものが提案されている^{9,10}。理論的にも実験的にも確かめているわけではないが、大きな直線移動より回転のほうが精度を出しやすいと聞いている。このことが事実であれば、回転をとり入れた計測法にはよりいっその測定精度の向上が期待できる。

2.1.2 非接触式

測定プローブの精度から接触式三次元座標測定機では光学的非球面の計測には精度が不足する場合やプローブの接触による被測定面の変形を嫌う場合がでてくる。そこで、レーザー干渉測長機のレーザー光をレンズで収束して、その収束点(焦点)をプローブとして用いた三次元座標測定機が開発されている^{8,11}。この場合、レーザー干渉測長機が正常に働くようにオートフォーカス機構と被測定面の傾きを補正する機構とが必要である。

非接触式においても、直線移動のかわりに回転をとり入れた測定機が開発されている^{12,13}。

2.1.3 接触式、非接触式に共通したことから

現在、微細形状測定機や表面粗さ測定機においては、接触式、非接触式ともに Z 方向の分解能が 1 nm から 0.1 nm のオーダーのものがすでに商品化されている¹⁴。さらに、横方向の分解能が改善されたものとして、走査電子顕微鏡¹⁵や走査トンネル顕微鏡¹⁶を用いた計測法が開発されている。したがって、 Z 軸方向の測定感度がこの程度までは可能であると考えられる。あとは、直線移動や回転の精度がどこまであげられるかである。

2.2 光の直進性と反射の法則を用いたもの

ここで述べる非球面形状計測法の基本的な測定原理を図 2 に示してある。レーザー光線 (R_i) を被測定非球面

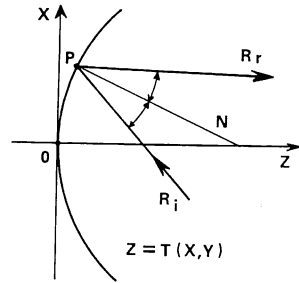


図 2 光の直進性と反射の法則を用いた非球面形状計測法の原理

へ入射すると反射の法則によって、入射点(P)における接平面の法線(N)に関して入射角と等しい反射角の方向に反射光線(R_r)が得られる。したがって、レーザー光線の入射方向と反射方向が測定できれば、入射点における法線の方向が求まる。この法線の方向と被測定面の形状を表わす関数 $T(X, Y)$ の 1 次微分との間には簡単な関係があるので被測定面の形状を求めることができる。

この測定原理を用いた非球面形状計測法がいくつか提案されている¹⁷⁻²⁰。大きな直線移動より回転のほうが精度を出しやすいということが事実であれば、参考文献 18) のタイプ 2 の計測法が有望ではないかと思われる。

2.3 点計測法に共通したことから

以上述べてきた計測法では、被測定面上の各点について 1 点ずつデータをとらなければならないので非常に手間がかかるように思われる。しかし、測定機のコントロールやデータの収集・整理などはコンピュータに行なわせるのが通例の現在においては、上に述べた問題点は容易に解決できる。

点計測法には、大口径の非球面や球面からの偏差が急激に変化するような非球面でも容易に計測できるものが含まれている。

3. パターン計測法

3.1 モアレトポグラフィによる場合

非球面の製造工程の途中で測定精度はそんなに要求しないが、粗面状の非球面を計測したいときがある。こんなときにピッタリの計測法がモアレトポグラフィである。モアレトポグラフィの基礎的な研究や応用の開発は、世界のトップをきって日本で行なわれ、現在では計測装置がモアレカメラとして商品化され、種々の目的に対応できるようになっている²²。

3.2 フィゾー干渉計などによる場合

球面計測、すなわち、球面の形状計測(曲率半径の計

測)や参照球面からの偏差を高精度に計測する際には、広く市販されているフィゾー干渉計やトワイマン・グリーン干渉計がよく使われている。しかし、ここで考えているような球面からの偏差の大きい非球面をこれらの干渉計で計測しようとする、干渉縞が細かくなりすぎて干渉図形の解析が困難となる。したがって、これらの干渉計による非球面計測は不可能と一般に考えられていた。

ところが、被測定非球面の位置をうまく選べば得られる干渉図形中の一部に粗い干渉縞を発生させることができるとともに、非球面の位置を光軸にそって移動すると干渉縞の粗い部分を半径方向に動かすことができる。この現象を利用して、非球面の位置をかえて得られた複数枚の干渉図形を解析することによって非球面の形状を求める方法が提案されている^{25,24)}。

最近では、CCDカメラによれば干渉図形を高分解能で高精度に映像信号に変換できる。したがって、干渉図形をCCDカメラでコンピュータに入力して、後述するパターンの自動解析を行えば、相当に細かい干渉縞を発生させる非球面まで形状計測や検査が行なえる^{25,26)}。

3.3 シアリング干渉計による場合

よく用いられる干渉計を大別すると、フィゾー干渉計などのように物体光と参照光との干渉による干渉図形から物体光の波面収差が直接求まるものと、波面収差をもっている光波を二つに分けて少しシアを与えてから重ね合わせて得られる干渉図形から波面収差の1次微分が求まるシアリング干渉計とがある。干渉縞ができるだけ粗くなるように調整したフィゾー干渉計などで得られる干渉縞の縞幅は、波面収差の大きさと使用する光波の波長によって決まってしまう。ところが、シアリング干渉計

においてはシア量を変えるだけで縞幅を自由に変わることができる。したがって、フィゾー干渉計などで干渉縞が細かくなりすぎる球面からの偏差の大きい非球面に対しても、シアリング干渉計によれば解析に適した縞幅の干渉図形を発生させることができる。

これまでに、平行平板によってシアを与えるシアリング干渉計によるもの²⁷⁾トルボット干渉計²⁸⁾によるもの²⁹⁾、ホログラフィ技術によって作られた二周波数回折格子を使うもの³⁰⁾などが提案されている。参考文献 27)のものは光学系が改良されたうえで商品化されている³¹⁾。

3.4 ホログラフィによる場合

3.4.1 二波長ホログラフィによる計測^{32,33)}

フィゾー干渉計などによって得られる干渉縞を粗くするためには、用いている光の波長を長くすればよい。しかし、光の波長を長くすると、干渉図形が目に見えなくなるとともに感光材料に記録できなくなってしまう。また、光波が光学要素に吸収されてしまったりする。したがって、干渉縞を粗くするために、光の波長を長くする方法はとれない。

ところが、ホログラフィ用高分解能感光材料には可視光によって発生する細かい干渉縞を記録することができる。そこで、可視光である波長が λ_1 の光波によって得られる非球面のイメージホログラムと波長が λ_2 の光波による非球面のイメージホログラムとを高分解能感光材料に記録してモアレ縞図形を発生させる。そのモアレ縞図形は、 $\lambda_{eq} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ で表わされる λ_{eq} を波長とする光波によって得られる非球面に対する干渉図形と同じものになる。 λ_1 と λ_2 とを近い値にすれば、 λ_{eq} の値は λ_1 や λ_2 に比べてずっと大きくすることができるので、

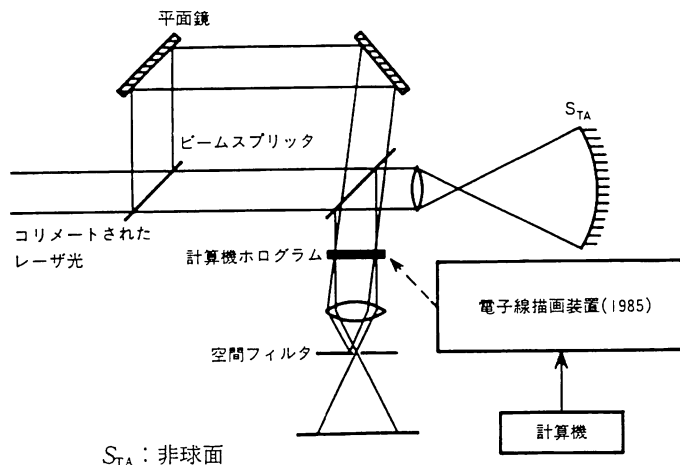


図3 計算機ホログラムによる非球面検査法の原理

縞図形の解析が可能となり、非球面計測ができるようになる。この場合、実際に使用している光波の波長は可視光である λ_1 と λ_2 なので、長波長の光波を使ったときに生ずる問題は起きない。

なお、ここでイメージホログラムと称しているものは像面に得られる干渉図形そのものなので、二波長ホログラフィはモアレ干渉法³⁴⁾の一種とみなすこともできる。

3.4.2 計算機ホログラムによる非球面検査

測定原理を図3に示してある。ここでは、原理がわかりやすいようにマッハ・ツェンダ干渉計を用いた例を示してある。参照平面波で計算機ホログラムを照明した時に生ずる回折光の波面形状が、被検非球面 (S_{TA}) の位置に理想的な形状の非球面をセットしたときにそれから反射されるであろう光波の波面形状 (ホログラム面上での) に等しくなるように計算機と描画装置でホログラムを作る。被検面の像面で S_{TA} からの反射光波と計算機ホログラムからの回折光波とを干渉させると、被検面と参照非球面との偏差を表す干渉図形が得られる³⁵⁾。

測定誤差の低減化を考慮して光学系にフィゾー干渉計を採用するとともに回折次数の選び方も工夫を加えた提案が最近なされている³⁶⁾。また、電子線描画装置を用いることによって、実に、ホログラム面上での再生波面の波面収差が約 $2,000\lambda$ という計算機ホログラムが製作できるようになっている³⁷⁾。

計算機ホログラムによる非球面検査法の一つの変形と見なすことができるものに、ゾーンプレート・コモンパス干渉計による検査法がある³⁸⁾。これは、マーティヤスマートのコモンパス干渉計のフレネル・ゾーンプレートを非球面検査用原器ゾーンプレートに置きかえたものである。この原器ゾーンプレートは、球面波で照明したときにその回折波の波面形状が理想的な非球面の形状に等

しくなるように計算機と描画装置で製作される。この原器ゾーンプレートは円形格子型計算機ホログラム³⁹⁾の一種とも考えられる。

3.5 パターン計測法に共通する問題

3.5.1 パターン自動解析の基礎

ここで述べたパターン計測法によって直接得られるデータは、被測定量を表示した縞図形である。このパターンを人が目で見て判断する場合には、得られたパターンのままで十分である。しかし、測定結果を高精度な数値として得たい場合には、このパターンを解析しなければならない。最近では、パターンをコンピュータに入力して自動解析するのが通例となっている。コンピュータによって自動解析すると定量的な測定値が得られるとともに、一般に測定結果が高精度化される。ここでは、パターン自動解析法の種々の方法を示す⁴⁰⁾のではなく、なぜ、いまとられている方法が採用されたかについて解説^{41,42)}する。

ここで述べたパターン計測法によって得られる縞図形は二つの型に大別できる。それは contour 型と変形格子型とである。同じ干渉計で同じ位相物体に対して得られた二つの型の干渉図形を図4に例示してある。物体光と参照光との傾きをゼロにすると図4(a)のような波面収差の等高線を表示した contour 型の干渉図形が得られる。物体光と参照光との間に傾きを与えると図4(b)のように波面収差の大きさに比例した変形のある変形格子型の干渉図形が発生する。もちろん図4(b)の場合には傾いた参照波面に対する物体光波の等高線が得られているとも解釈できる。シアリング干渉計の場合には、シアを与えて干渉させる二つの物体光波に傾きも与えると変形格子型の干渉図形に、傾きをゼロにすると contour 型のパターンになる。モアレトポグラフィやモアレ技術

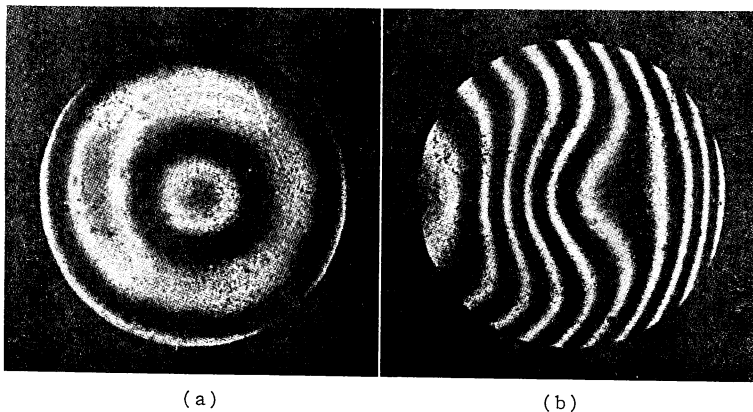


図4 同じ干渉計によって得られた同一の物体に対する干渉図形
(a) Contour 型, (b) 変形格子型

を用いたトルボット干渉計では、変形格子やフーリエイメージが変形格子型パターンであり、これらに変形のない同じ格子定数の格子を正しく重ね合わせると contour 型パターンになり、ミスマッチやミスアライメントすると粗い縞の変形格子型パターンとなる。

コンピュータでパターンを自動解析する際には、それぞれの型に特有の長所・短所を考慮して入力法や解析法を選ばなければならない。Contour 型パターンの縞幅は変形格子型のものに比べて一般に大きい。このことはパターンをコンピュータに入力する際にサンプル点が少なくてもよいことを意味し長所といえる。しかし、contour 型では隣の縞が被測定量の増加を示すのか減少を示すのかわからない。とくに閉曲線群で表示される縞図形が被測定量の凸状の分布をか凹状の分布を示しているのかわからないという欠点がある。一方、変形格子型のパターンにおいては、光学系の配置さえわかっているならば変形の方法によって被測定量の増減がわかる。たとえば、図 4(a)の黒い2本の縞は図 4(b)から同じ高さを表わしていることがわかる。

前述した contour 型パターンの欠点を補うのが広義の縞走査法である。以下に示す方法によって縞を移動させながら縞図形をよみとることを縞走査法という。モアレ技術を用いた計測法では、二つの格子のうち的一方のみを移動することによって縞走査ができる。干渉計やホログラフィでは参照光用ミラーを光軸方向に移動したり、また、光源に二周波数レーザーを用いたり光束の途中に周波数シフタを用いることによって少し周波数のずれた光波を発生してこれらの干渉によって縞走査を実現している。この縞走査を行なうと縞の移動方向から被測定量の増減や凹凸の識別ができる。さらに、縞と縞の間の測定値が得られるとともにその測定値を高精度によみとれる⁴³⁾。

以上のことから次のようなことがいえる。変形格子型のパターンを自動解析する際には、パターンを1枚だけコンピュータに入力すれば十分である。しかし、contour 型のパターンを自動解析する際には、縞走査をして複数枚のパターンをコンピュータに入力しなければならない。パターンをコンピュータへ入力する方法や解析の仕方については他の解説⁴⁰⁾を参照されたい。

3.5.2 干渉図形から非球面形状を求める際の問題点

これまで述べてきた干渉計による非球面計測法のほとんどでは、被測定非球面の像面で得られる波面収差から、直接、被測定面の形状や参照非球面からの偏差が求まるとしている。ここでは、像面で得られた波面収差か

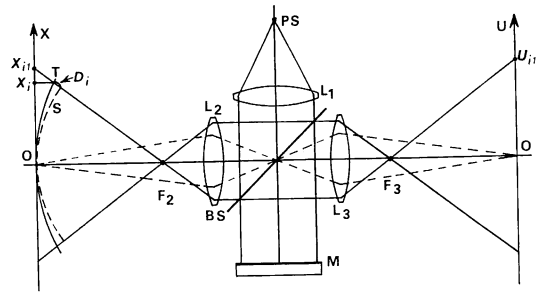


図5 干渉計による球面形状計測法における問題点

ら、直接、形状や偏差が求まるかどうかについて考察してみたい。

わかりやすい例として、トワイマン・グリーン干渉計による球面に近い被測定面の形状計測法をとりあげることとする。その光学系の例が図5に示されている。レンズ(L₂)の焦点(F₂)と被測定面(T)とを一致させた後、光軸方向に被測定面を移動して被測定面の曲率中心と焦点(F₂)とを一致させる。この移動距離に等しい曲率半径の参照球面(S)から被測定面までの偏差(D_i)が干渉図形から求まる。一見したところでは、干渉図形を解析して偏差が求まれば被測定面の形状が直接求まるように思える。

図5に示してあるようにレンズによるX軸の像をU軸とする。ここでは、わかりやすくするために被測定面が光軸を軸とした回転体であると仮定する。そして、被測定面の断面形状をX-Z座標を使って表わすことにする。この例で得られる干渉図形には数本の干渉縞が現われるだけである。そして、隣りあった干渉縞の表わす偏差の差は波長の2分の1である。したがって、被測定面(T)からの反射光は焦点(F₂)と(F₃)を通ると仮定できるので、点U_{i1}は点X_{i1}の像と考えられる。点U_{i1}での縞次数と光の波長からX=X_{i1}における偏差(D_i)が求まる。しかし、干渉図形からはこの偏差がX=X_{i1}に存在しているように見えても、X_{i1}の値を求めることができない。したがって、干渉図形から求まった波面収差からは、直接には被測定面の形状を求めることができない。その原因は、球面(S)からの偏差(D_i)の分布を平面である像面上で求めているためと思われる。上の考察からすぐ思いつく解決策の一例は、解析に幾何光学を用いることと、焦点(F₂)を原点とした極座標を使って被測定球面の形状を表わすことである。

ここで述べた問題は、球面からの偏差の大きい非球面計測においても同じように起こる。著者らの提案した干渉計による非球面計測法^{23,24,29)}では、ここで述べた問題

点を考慮した上で、像面で干渉図形を求めることをやめるとともに、直角座標を使用したままでマリュースの定理⁴⁴⁾をよりどころにして幾何光学的手法を用いて干渉図形から非球面形状を求めている。

4. ま と め

最近提案され、研究・開発された非球面計測法を分類してその基本原理を示し、二、三の原理的な考察を行ってきた。ここでは、非球面計測法全体を見渡して検討してみることにする。

自動解析を行なうパターン計測法では、パターンをコンピュータに入力する際にパターン上の各点の明るさを読みとらなければならない。したがって、原理的には点計測法との違いがなくなってしまう。しかし、パターンのコンピュータへの入力はエレクトロニクスによって行なうが、点計測法では各点の測定値を求める際に機械的な移動が必要で測定時間が長くなる。

光波干渉を利用したパターン計測法では、被測定面上のすべての点への入射光線が被測定面とほぼ直交しなければならない。さらに、被測定面からの反射光が干渉計の光学系から外れてしまうと計測ができなくなる。これらの条件によって計測できる非球面の形状に限界ができる。点計測法のなかには、非球面形状に対する制限のゆるいものがある。

非球面計測法を非球面形状計測法と非球面検査法とに分けることもできる⁴⁵⁾。一方、すでに述べてきたように定量的で高精度な非球面計測を行なうためには、どの計測法においても測定機のコントロールやデータの収集・整理、解析などをコンピュータで行なう。コンピュータを用いるのであれば、形状計測法と検査法との実質的な差はなくなる。というのは、参照非球面の形状をコンピュータに入力しておけば、参照非球面からの偏差を形状から求めたり、形状を偏差から求めるのは非常に容易だからである。

なお、本稿ではあくまでも原理を主体として「非球面計測法」を解説してある。したがって、非球面計測法を具体的に求めている読者には不満足なものになっている。測定精度や測定限界について計測法の比較を行なった技術を主体とした解説が待たれる。しかし、計測法の提案と原理の確認だけが報告されていて実用測定機がまだ開発されていないものがいくつかある現時点では、計測法の比較はむずかしいのではないかと思っている。

文 献

- 1) 土肥寿秀, 道正田隆, 若菜勇次: “複合型非球面レンズに関する量産技術の確立”, 精密工学会誌, 52 (1986) 979-982.
- 2) 森 晶文: “光ピックアップの新しい流れ”, O plus E, No. 76, 3月号 (1986) 62-65.
- 3) 小島 忠: “CD 用非球面プラスチックレンズの開発と評価”, 光学技術コンタクト, 23 (1985) 465-470.
- 4) 鈴木正根: “非球面の加工と計測”, オプトロニクス, No. 51, 3月号 (1986) 53-56.
- 5) D. Malacara ed.: *Optical Shop Testing* (John Wiley and Sons, New York, 1978).
- 6) D. Malacara and A. Cornejo: “Null Ronchi test for aspherical surface,” *Appl. Opt.*, 13 (1974) 1778-1780.
- 7) たとえば, 三豊製作所の H 503 型, カールツァイスの UMM 500, 日本光学工業のトライステーションなど.
- 8) たとえば, アノラッドの ANOSCAN など.
- 9) J. G. Dil, P. F. Greve and W. Mesman: “Measurement of steep aspheric surfaces,” *Appl. Opt.*, 17 (1978) 553-557.
- 10) 河田耕一, 坂垣征雄, 山口勝正: “非球面形状測定装置”, 昭和 60 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1985) p. 63.
- 11) 吉住恵一, 村尾次男, 塩田雅美, 中今良一, 沖野芳弘: “超高精度三次元測定機”, 光学, 15 (1986) 496-503.
- 12) I. Powell: “Aspheric surface calibrator,” *Appl. Opt.*, 20 (1981) 3367-3377.
- 13) 袴塚康治, 加藤正彦, 小暮和雄: “非球面ガラスレンズの成形”, オプトロニクス, No. 51, 3月号 (1986) 77-83.
- 14) たとえば, ランク・テラー・ホブソンのタリスステップ, 小坂研究所のサーフコーダ, ファイコの TOPO-3D など.
- 15) たとえば, エリオニクスの PMS-1.
- 16) R. A. Dragoset, R. D. Young, H. P. Layer, S. R. Mielczarek, E. C. Teague and R. J. Celotta: “Scanning tunneling microscopy applied to optical surfaces,” *Opt. Lett.*, 11 (1986) 560-562.
- 17) F. M. Smolka and T. P. Caudell: “Surface profile measurement and angular deflection monitoring using a scanning laser beam: a noncontact method,” *Appl. Opt.*, 17 (1978) 3284-3289.
- 18) 田中康弘, 一岡芳樹, 鈴木達朗: “レーザービームを用いた急峻な非球面の形状測定”, 光学, 11 (1982) 616-624.
- 19) 本郷俊夫: “NC Elastic Emission Machining を利用したシンクロトン放射光反射ミラーの加工システム”, 光学, 13 (1984) 463-471.
- 20) 伊藤雅英, 高山浩治, 黒田和男, 小倉磐夫: “レーザービーム偏光法による非球面の形状測定”, 光学, 14 (1985) 304.
- 21) 高崎 宏: “モアレトポグラフィ”, 計測と制御, 12 (1973) 390-399.
- 22) 富士写真光機のカタログ.
- 23) 大西邦一, 横関俊介, 鈴木達朗: “複数枚の干渉図形を用いた非球面の形状測定法”, 光学, 12 (1983) 296-300.
- 24) 大西邦一, 横関俊介, 鈴木達朗: “被測定面の移動による非球面の干渉測定法”, 光学, 11 (1982) 471-477.
- 25) 小野 明: “縞走査位相検出法による非球面鏡の形状誤差測定”, 光学, 15 (1986) 328.
- 26) 小野 明: “移動格子 TV モアレ法による非球面測定”, 第 33 回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1986) p. 89.
- 27) 加納敏夫, 谷田貝豊彦, 斎藤弘義: “縞走査シェアリング干渉法による非球面の干渉測定”, 光学, 12 (1983) 455-459.

- 28) 横関俊介: “タルボ干涉計とその応用”, O plus E, No. 71, 10月号 (1985) 59-67.
- 29) 西村哲也, 石黒敬三, 横関俊介: “トルボット干涉計による非球面形状測定法”, 光学, **14** (1985) 462-467.
- 30) J. C. Wyant: “Double frequency grating lateral shearing interferometer,” Appl. Opt., **12** (1973) 2057.
- 31) 加納敏夫: “非球面干涉計測システムの開発”, 光学技術コンタクト, **23** (1985) 889-896.
- 32) J. C. Wyant: “Testing aspherics using two-wavelength holography,” Appl. Opt., **10** (1971) 2113-2118.
- 33) J. C. Wyant, B. F. Oreb and P. Hariharan: “Testing aspherics using two-wavelength holography: use of digital electronic techniques,” Appl. Opt., **23** (1984) 4020-4023.
- 34) 横関俊介: “モアレ干渉法”, 光学, **12** (1983) 501-509.
- 35) 小野 明: “コンピュータ・ホログラムによる非球面の測定”, 光学技術コンタクト, **23** (1985) 564-573.
- 36) 小野 明: “コンピュータ・ホログラムによる非球面の測定(2)”, 光学技術コンタクト, **23** (1985) 627-634.
- 37) 橋本礼耳, 玄間隆志, 佐藤卓司, 横倉 隆: “ホログラフィ干涉計用計算機ホログラムの開発”, 第46回応用物理学会学術講演会予稿集 (1985) p. 54.
- 38) 中島一敏: “非球面検査のためのゾーンプレート干涉計”, 光学, **14** (1985) 365-376.
- 39) Y. Ichioka and A. W. Lohmann: “Interferometric testing of large optical components with circular computer holograms,” Appl. Opt., **11** (1972) 2597-2602.
- 40) G. T. Reid: “Automatic fringe pattern analysis: A review,” Opt. Lasers Eng., **7** (1986/7) 37-68.
- 41) 横関俊介: “縞走査”, 光学, **10** (1981) 202.
- 42) 横関俊介: “新しい干涉計—モアレ技術とデジタル処理の利用—”, 第18回サマーセミナー「最近の光計測技術」第六章, 応用物理学会光学懇話会 (1980).
- 43) 武田光夫: “サブフリンジ干涉計測基礎論”, 光学, **13** (1984) 55-65.
- 44) 辻内順平: 光学概論 I (朝倉書店, 東京, 1974) p. 79.
- 45) 横関俊介: “非球面計測の現状と動向”, オプトロニクス, No. 51, 3月号 (1986) 64-71.