

# 4 分割フォトセンサを用いた光計測技術

Optical Measuring Technology Using Quadrant Photocells

上 村 康 幸\*・谷 泰 弘\*\*

Yasuyuki KAMIMURA and Yasuhiro TANI

鏡面加工された加工面の非接触計測方法としては、主に光学的方法、特にレーザ光の直進性を利用して光計測方法が多用されている。最近その受光素子として4分割フォトセンサを用いた計測技術が多数報告されている。これは、高分解能が得られる、広いダイナミックレンジが得られるなどの特徴によるものである。本報では、著者らの研究成果も含めて、4分割フォトセンサを用いて表面粗さや形状精度などの表面形状を測定する光計測法について解説する。

## 1. 緒 言

急速に発展を遂げつつある先端技術分野に共通する要求事項として精密化、微細化あるいは大型化などが挙げられる。超精密加工分野においてもその要求は止まるところを知らず、より自由度のある形状、より微細なそしてより大きなサイズへと拡大し、その精度はナノメートル級の極限的加工領域に迫りつつある。これら精密加工部品の応用範囲としては、半導体部品をはじめ宇宙開発、ロケット、ロボット、光学部品、バイオ、材料、電子、光通信、およびVD等さまざまであるが、急激に進展する情報化の流れのなかで部品の高精度化、高機能化の要求に応えるためには、超精密加工技術および高精度計測技術がますます重要な要素となってきた。

超精密加工されたこれら部品の加工表面の評価要素としては、表面粗さや形状精度等が挙げられる。被加工物の計測装置としては、高い繰り返し精度や理論的に明確で高信頼性であることから、主に触針式粗さ測定器が多用されてきた。しかし、精密加工された高品位な部品を損傷することなく迅速に評価するためには、触針式より非接触計測技術、特に光学的方法により行われる傾向が強くなってきている。

本報においては光学的方法、特にレーザ光の直進性等の特性を利用した方法に、4分割フォトセンサ (QPD) を用いた種々の光計測技術、特に表面粗さ測定法、形状精度測定法、真直度測定法について概説し、これを工作機械の運動誤差補正法に応用した光計測方法について解説する。

## 2. 光学式センサの基本構成

光学式センサの基本は、微小変位の高精度測定である。これは、図1に示されるようなフォトセンサ (光電受光素子) と光源 (発光素子) との組み合わせで行える<sup>1)</sup>。

(a), (b), (c) はフォトセンサと光源との組み合わせで1軸方向の変位を、(d) は2分割フォトセンサとの組み合わせで、フォトセンサ相互の受光量の差から1軸の微小変位を高精度に計測する方法であり、温度変化等による光量や感度の変化が少ない。(e) は4分割フォトセンサとの組み合わせで2軸方向の微小変位を、(f) はレンズとピンホール等によって拡散光源を作り、距離変化による光量変化を測定するものである。(g) は (e) と (f) の組み合わせにより、3軸方向の微小変位が計測できる。しかし、(g) の場合にはセンサ面に平行な2軸方向と垂直な1軸方向の感度が大きく異なる。干渉成分が生じるなどの問題点がある。

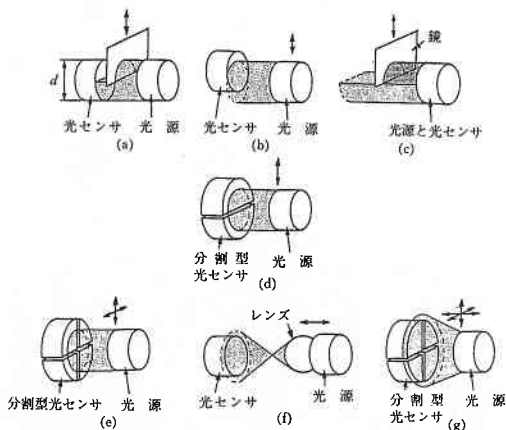


図1 光学式センサの基本構成<sup>1)</sup>

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

図 2 に、QPD を用いた光点二次元位置の検出方法を示す。QPD の中央に強度分布が点対称の円形ビームが照射されると、各セルからの出力は同一となるが、そのビームが垂直あるいは水平方向にずれると、上下あるいは左右のフォトセルからの出力は、一方が増加し他方が減少することになる<sup>1)</sup>。照射光の強度分布等の影響を補償するために、垂直および水平方向の出力信号を各セルからの出力の和で正規化すれば、次式で与えられる  $I_x$ 、 $I_y$  はビームの垂直、水平方向の照射位置に対応した値となる。ここで、1~4 は各セルからの出力を表す。

$$I_x = \frac{(1+2)-(3+4)}{1+2+3+4}, \quad I_y = \frac{(1+4)-(2+3)}{1+2+3+4} \dots\dots(1)$$

ビームの強度分布が正規分布であると仮定したときの、フォトセル 1 あるいは 3 からの出力変化のシミュレーション結果を図 3 に示す。これは隙間なく接する QPD の各セルが半無限の広さを持っており、ビーム径を 7 mm とした場合の結果である。これによれば、片方向の移動量が半径の約 1/3 に達するまでの広い範囲で、線形に変化する領域を持っていることがわかる。実際に、光点位置の移動に伴うフォトセルからの出力変化を測定した結果を図 4、図 5 に示す。図 4 は光点位置を X 方向に、図 5 は Y 方向に移動させた結果で、共にビーム径

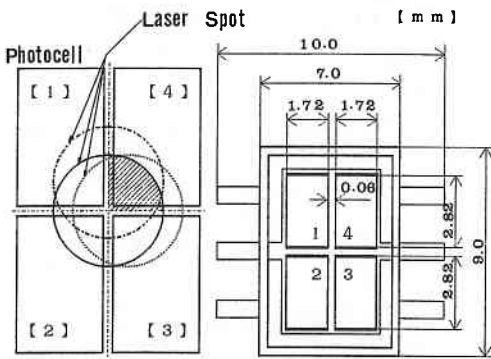


図 2 QPD を用いた光点二次元位置の検出方法

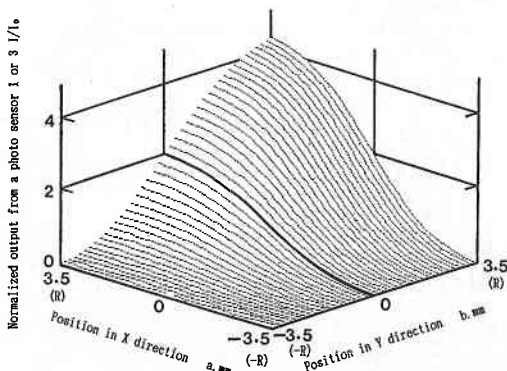


図 3 光点位置の移動に伴うフォトセルからの出力変化

3 mm の He-Ne レーザと図 2 に寸法を示した QPD を用いて測定した。X、Y 方向共に、±0.5 mm の広い範囲で線形に変化する測定結果が得られている。また、その

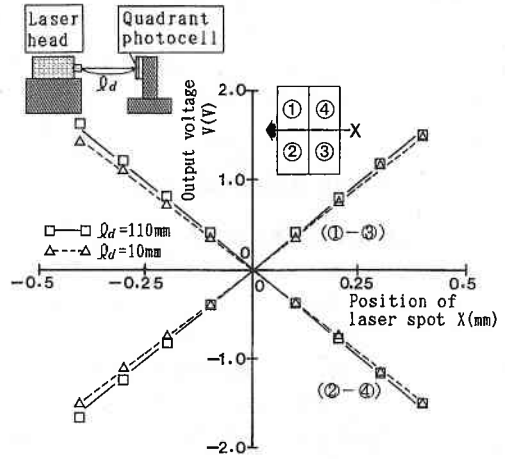


図 4 光点位置が X 方向に ±0.5 mm 変化したときの出力特性

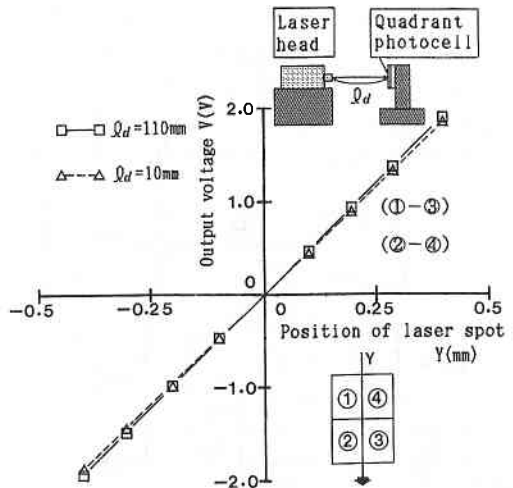


図 5 光点位置が Y 方向に ±0.5 mm 変化したときの出力特性

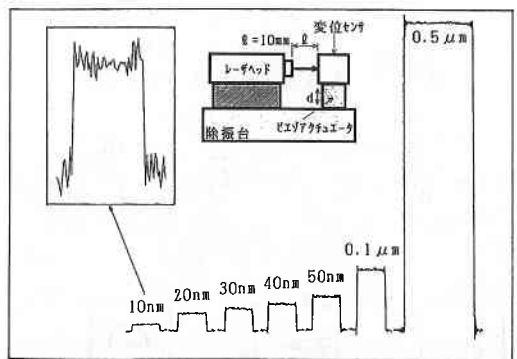


図 6 4 分割フォトセンサを用いた変位センサの上下方向の分解能測定結果

分解能は非常に高く、5 nm 以下の高精度で測定できることがわかった (図 6)。

この方法を用いて二次元変位を測定した例でも、nm レベルの分解能が得られると報告されている<sup>2)</sup>。

光学式センサの基本原理解を基に、光源にレーザ光を、受光素子に 4 分割フォトセンサ (QPD) を使用した種々の光計測法について、以下に述べる。

### 3. QPD を用いた光計測法

#### 3.1 焦点ずれによる表面粗さ検出方法

焦点ずれ (フォーカスエラー) を用いた表面粗さ測定法は、対物レンズと測定表面との微小な距離の変化を検出する方法で、主に図 7 のフーコー法、図 8 の非対称法 (ナイフエッジ法)<sup>3)</sup>、図 9 の臨界角法<sup>4)</sup>、図 10 の非点収差法<sup>5)</sup> の 4 方式を挙げることができる<sup>6)</sup>。

上述した 4 方式のなかで、図 8、図 9 が 2 分割フォトセンサによる方法、図 10 が 4 分割フォトセンサによる方法で、現在粗さ測定に应用されている。図 11 は臨界角法の応用で、HIPOSS と名づけられた超精密焦点位置検出光学系を示す<sup>6)</sup>。この測定法は、触針法では困難とされていたインプロセス粗さ測定法<sup>7)</sup>に应用されている。図 10 の非点収差法は光を用いた非接触測定法で、ナノメータの分解能と触針法との相関性を有する優れた測定

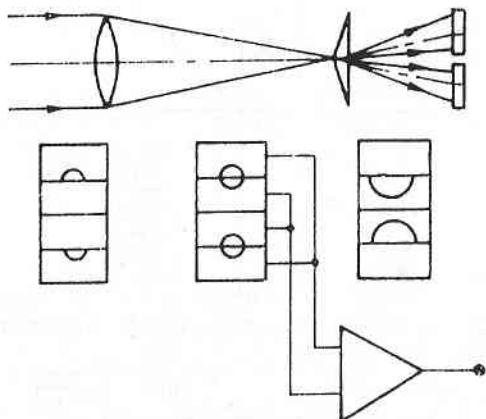


図 7 フーコー法による表面粗さ検出方法

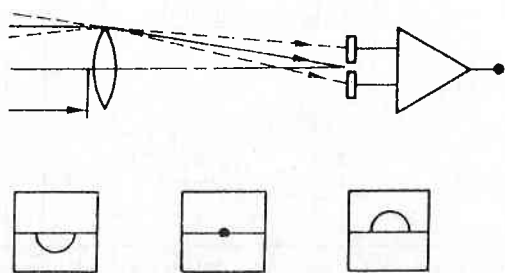


図 8 非対称法 (ナイフエッジ法) による表面粗さ検出方法<sup>3)</sup>

法<sup>8),9)</sup>である。図 12 に非点収差法の光学系を示す。

#### 3.2 オンマシン形状精度測定法

口径の小さい球面あるいは非球面ミラーの形状測定には、フィゾー法やトワイマン・グリーン法などのミラーの全域を光学的に一度に測定する種々の干渉測定法が用いられている<sup>10)</sup>が、口径の大きいミラーに対しては、光学系に要求される精度が高くなるために、このような全域を測定するのに適した方法がないのが現状である。

そこで、このような部品の形状測定に対しては、点あるいは局所的な領域の測定を行うローカルなセンサを二

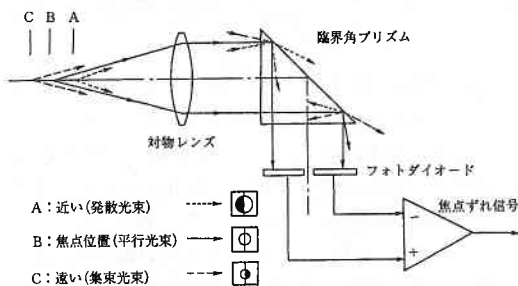


図 9 臨界角法による表面粗さ検出方法<sup>4)</sup>

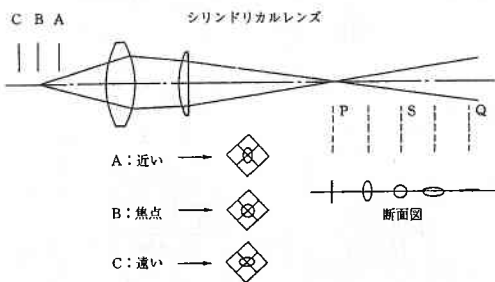


図 10 非点収差法による表面粗さ検出方法<sup>5)</sup>

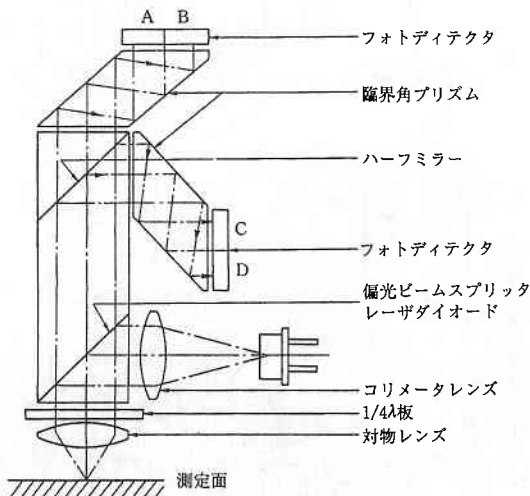


図 11 臨界角法 (HIPOSS) の光学系<sup>6)</sup>

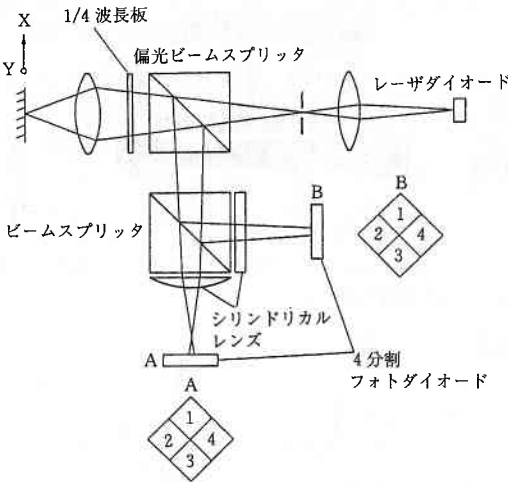


図12 非点収差法の光学系<sup>8),9)</sup>

次元的に走査させて測定する方法が採用されている。

また、最近高精度なミラーを製造するために、一度加工された形状を測定し、目的とする形状からのずれを修正加工する方法が採られている。この時、取り付け、取り外しによる測定位置の誤差の影響を少なくするために、オンマシンで形状を計測することが望まれている。そこで、加工機械はもともと走査するための軸を有しているために、一般的に、この軸を利用したオンマシン走査計測が行われている。

しかし、これらの走査型の測定法では、走査する軸が運動誤差を有しているために、高精度の測定値が必要となる場合は、形状データと走査軸の運動誤差データを分離して計測することが必要となる。

そこで、測定点の傾きとセンサ軸方向の変位を同時に測定するために、測定点での反射光を2個の4分割フォトセンサ (QPD) で受光する、高精度変位・角度同時測定装置を開発し、この装置を用いることで、1測定点の情報から形状データと走査軸の運動誤差データを分離して同時評価することが可能となった (図13)<sup>11)</sup>。

斜めに入射した測定点からの反射光を2個の光点位置を検出する光センサで受光すれば、光学的な方法<sup>12)</sup>で反射面の垂直方向変位と傾きを同時に計測することがで

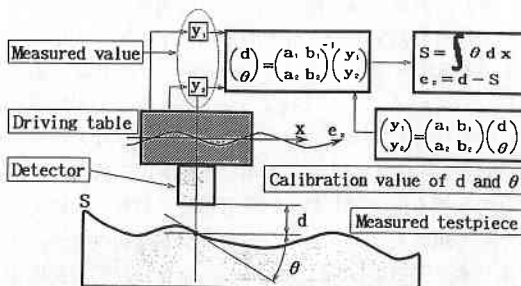


図13 表面形状と運動誤差の同時測定方法

きる。図14に光学的変位・角度同時測定方法を示す。反射面の垂直方向変位  $d$  は三角測量の原理により、傾き  $\theta$  は光てこの原理により測定を行った。

入射角  $\alpha$  で照射されたレーザー光に対して、反射面  $AA'$  が  $d$  だけ変位して  $BB'$  に移動すると反射点は  $O$  から  $O'$  に移動し、反射点から  $l$  の位置に置かれた光センサ上の光点位置は  $P$  から  $P'$  に移動する。この反射面  $BB'$  に回転  $\theta$  が加わり  $CC'$  に移動すると、反射点はさらに  $O'$  から  $O''$  に移動し、光センサ上の光点位置は  $P'$  から  $P''$  に移動する。

その結果、光センサで検出されるスポット点の移動量  $y (PP'')$  は、

$$y = l \tan 2\theta - d \cos \theta \frac{\cos 2\alpha \tan 2\theta + \sin 2\alpha}{\cos(\alpha + \theta)} \dots\dots\dots(2)$$

と求められる。ここで、 $\theta < 1$  の場合には、

$$y \approx 2l\theta - 2d \sin \alpha \dots\dots\dots(3)$$

と近似できる。したがって、反射点からの距離が  $l_1, l_2$  と異なる2点に2個の光センサを置けば、その出力  $y_1, y_2$  から反射点の変位  $d$  および傾き  $\theta$  は、

$$d \approx \frac{(y_1 l_2 - y_2 l_1) / 2 (l_1 - l_2) \sin \alpha}{\theta} \dots\dots\dots(4)$$

$$\theta \approx \frac{(y_1 - y_2) / 2 (l_1 - l_2)}{d}$$

と求められる。

ここでの  $\theta$  は、図14の紙面内での反射面の傾きを示しているが、センサとして2次元センサを使用すれば2次元情報が得られるため、傾きについては図14の紙面に直角な面内での値も同時に計測することができる。

この原理を基に、凹面ミラーのオンマシン形状計測を行った。図15に凹面ミラーのオンマシン形状計測の測定概略図を示す。図16、図17にその測定結果を示す。

図16の太線は光学系により算出された、凹面ミラーの

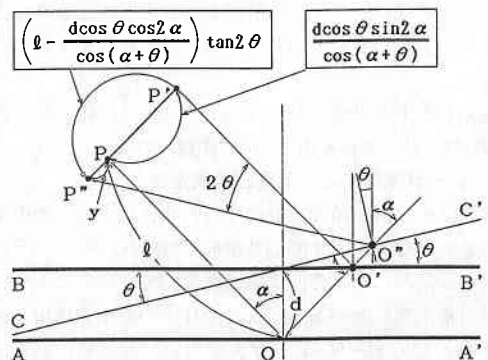


図14 光学的変位・角度同時測定方法

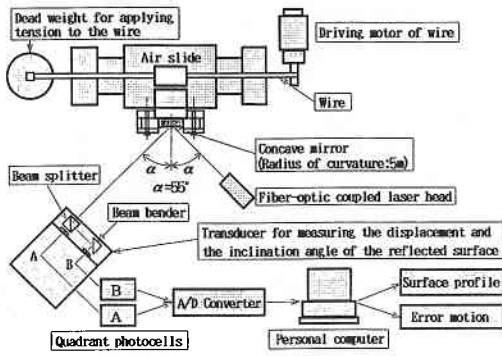


図15 凹面ミラーのオンマシン形状計測概略図

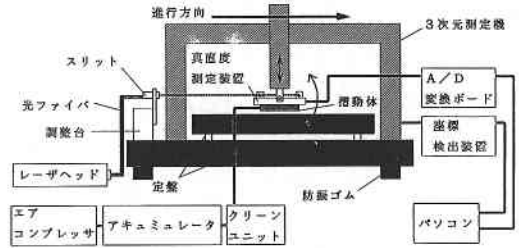


図18 三次元測定機を用いた摺動体重心位置の真直度と傾きの真直度同時測定装置

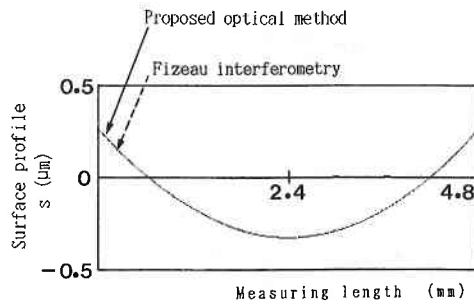


図16 凹面ミラーの表面形状sの比較測定

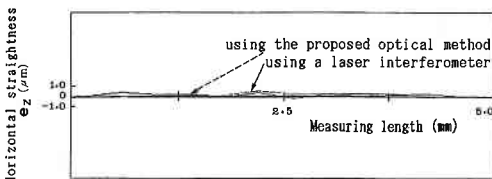


図17 エアスライドのエラーモーション e\_z の比較測定

表面形状を示している。細線は、非接触平面度粗さ形状測定機（㈱東京精密製）を使用した測定結果を示しているが、測定範囲4.8mmにおいて、共に一致した結果が得られた。

図17は、エアスライドの真直度誤差の比較結果を示したものである。太線は本方法の光学系により算出された結果で、細線はレーザー干渉計により真直度測定された離散結果を示したものであり、ほぼ一致した結果が得られた。

開発したセンサの変位分解能は25nmで、角度分解能は0.05角度秒 ( $2.36 \times 10^{-7}$  rad) が得られている<sup>11)</sup>。

3.3 レーザ光基準による真直度測定法

加工機械の運動精度を計測するためには、何らかの基準が必要となる。①すでに基準面（基準線）としてその精度が保証されたもの、②制御装置内で作られた仮想基準面（基準線）とがある。ここでは①の方法を採用し、基準線として He-Ne レーザ光を用い、石定盤の真直度測定を行った。

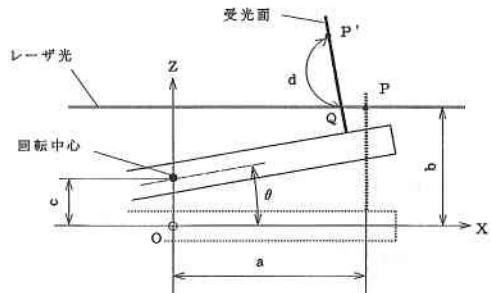


図19 摺動体の重心位置の真直度と傾きの真直度同時測定原理

石定盤の真直度測定には、(株)ミットヨ製の三次元測定機を使用し、三次元測定機上の空気軸受パッド（以下摺動体と記す）に4分割フォトセンサを2個使用した光点位置センサを組み込み、この摺動体の光点位置移動量から定盤の真直度測定を行った（図18）。

図19に摺動体の重心位置の真直度と傾きの真直度同時測定原理を示す。光センサ面と回転中心との距離を  $a$  とし、摺動体が  $y$  軸方向に変位  $c$ 、回転中心回りに  $\theta$  回転した場合、角度変化が微小であれば光センサ面における光点位置のずれ  $d$  は、

$$d \doteq -a\theta - c \dots \dots \dots (5)$$

で表すことができる。すなわち回転中心からの距離の異なる光センサを2個使用すると、角度変化と  $y$  軸方向変位とを同時に求めることが可能となる。

図20に図19の測定原理を基に、摺動体の重心位置による摺動体の真直度測定結果を、図21に摺動体の傾きを積分して得られた定盤の真直度測定結果を示す。測定に使用した摺動体の底面は円形 ( $\phi 48\text{mm}$ ) で紋りは表面紋りになっている。これは通常  $6\mu\text{m}$  浮上させて用いるが、ここでは定盤に接地した状態、 $3\mu\text{m}$  浮上させた状態、 $6\mu\text{m}$  浮上させた状態の3通りで比較測定を行った。いずれの状態もほぼ同じ測定結果を示しており、参照データとして用いたランクテーラーホブソン(株)製タリベル1型電気水準器および(株)ミットヨ製石定盤自動平面度測定機についても、ほぼ同じ傾向が示されている。

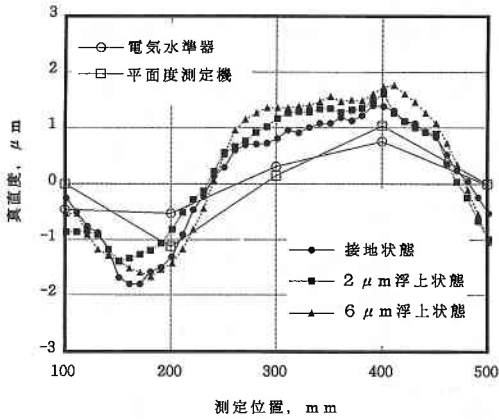


図20 摺動体の重心位置による摺動体の直度測定結果

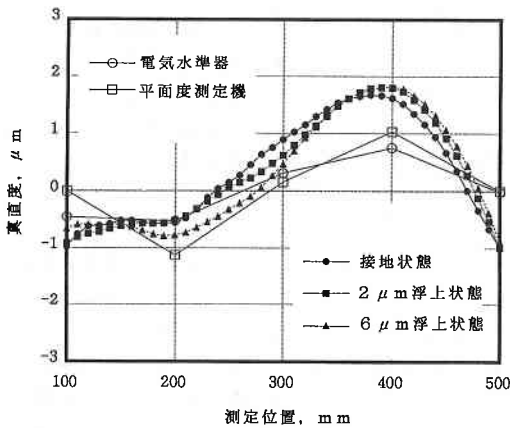


図21 摺動体の傾きの積分値による定盤の真直度測定結果

試作したセンサの重心位置方向の真直度測定分解能は45nmで、角度分解能は0.06角度秒 ( $2.8 \times 10^{-7}$  rad) であった<sup>13)</sup>。

4. レーザ光基準による工作機械の運動誤差補正法

工作機械の母性原理に基づく超精密加工技術において、加工精度を決定する第一的要因は、加工機械の運動精度である。超精密旋盤と称される加工機械の運動精度は、徐々に高くなってきているものの、現在まで10nmという精度は実現されていない。これはスピンドルの回転誤差、スライドの真直度誤差等によるものであり、これらの誤差要因を解決するには時間と費用を要す。

こうした加工機械の運動誤差を補償するためには、何らかの基準が必要となる。このことは3. 3節の中の①と②ですでに述べたが、その代表的なものとして、以下に説明する。

①のような制御方法の一つは、ローレンスリバモア国立研究所が行った、機械とは独立して設けた計測フレームを基準として、レーザ干渉計や変位計で工具台の位置

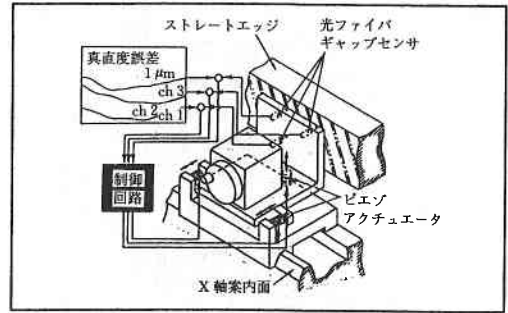


図22 直定規基準真直度補正法<sup>15)</sup>

を計測しフィードバック制御をするものであるが、この制御は部分的であり、主軸系などの誤差を取り除くことはできない。また、加工物が大型になるにつれて測定の精度を保つことが困難になってくる<sup>14)</sup>。

基準面の代表的なものとして直定規が挙げられる。内田らは、図22に示すように直定規を基準面として使用し、工具台と直定規とのギャップを光ファイバセンサで計測しながら、しかもあらかじめ測定した直定規の平面度誤差を考慮し、工具台の切り込み方向の位置制御を行っている<sup>15)</sup>。

この方法を用いて、(株)日立製作所中央研究所のグループが非軸対称非球面加工機を作成している<sup>15)</sup>。この方式によると、500mm~600mm長に対して制御前は0.7μm~0.8μmあったテーブルの運動誤差が、制御をかけることで20nm~30nmに改善されている。しかし、この構成においては送りテーブルの誤差については補正されるものの、スピンドルの回転誤差に関してはいずれの補正も行われていない。

井川らは図23に示すように、レーザ光の特性である直進性を基準線として用いている<sup>2)</sup>。レーザ光の直進性を用いて、真直度測定を行おうとする光学システム(図24)は古く、20年近く前にイギリスのNEL<sup>16)</sup>と旧西ドイツのアーヘン工科大学<sup>17)</sup>において行われている。この頃示されている分解能はせいぜい0.1μmであるが、フォトセンサ等の電子回路部品向上により現在の分解能はnmレベルまで達している<sup>2)</sup>。しかし、光路における空気のゆらぎや光源の強度・周波数変動等の光計測に共通する問題が残されている。

これに対し②のような制御方法としては、図25に示すような加工面と工具との距離を直接計測し、切り込み量を制御することによって加工精度を上げようという、前加工面基準の運動誤差補正法を機械技術研究所が開発した<sup>14)</sup>。これはダイヤモンドバイトで加工された面からの工具台の変位を光学式変位センサで測定し、この変位を常に一定に保つように切り込み量を決定する。これにより加工機の運動誤差によらない加工、母性原理に従わ

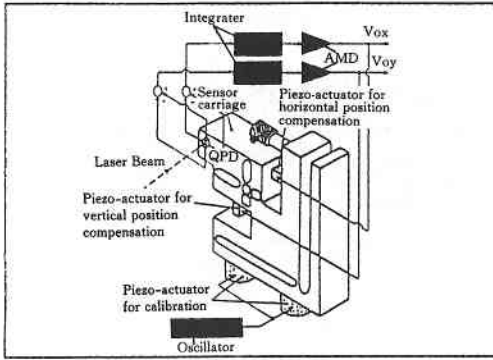


図23 レーザ光基準真直度補正法<sup>2)</sup>

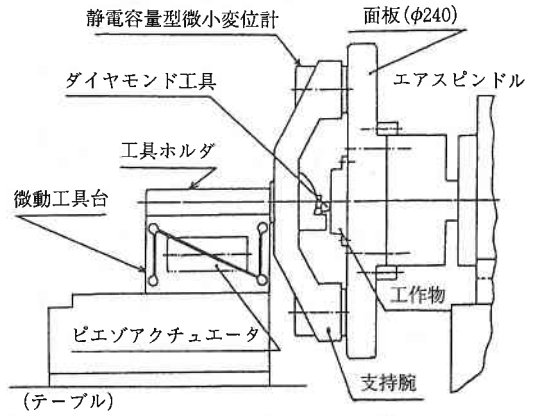


図27 参照面基準運動誤差補償法<sup>19)</sup>

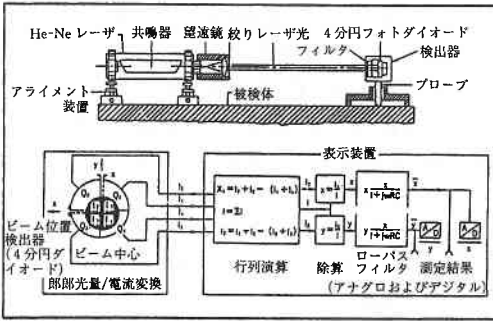


図24 レーザ光基準真直度計測法<sup>16),17)</sup>

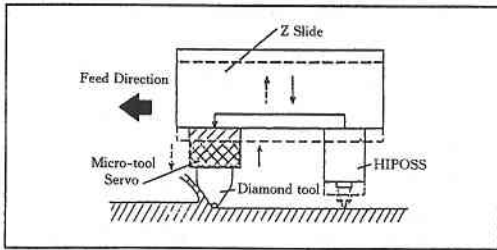


図25 加工面基準運動誤差補正法<sup>14)</sup>

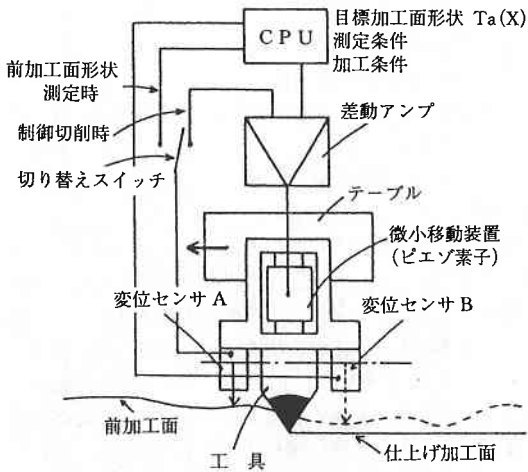


図26 逐次2点方式運動誤差補正法<sup>18)</sup>

ない加工が実現できる。しかし、前加工面の仕上げ程度が悪い場合には、工具-加工物間の接触剛性が存在するために、制御の遅れが顕著になり、高精度な加工面を得ることが難しいとされ、逐次2点計測法を负荷したインプロセス除去量制御法という運動誤差補正法<sup>18)</sup> (図26) や参照面基準運動誤差補償法<sup>19)</sup> (図27) が考案されている。

このように超精密計測法の観点から、レーザ光基準の光計測法について述べたが、インプロセス制御法による非接触計測法など、いずれの方法においても、加工中の切削液や切り屑等の影響を受け、これらの誤差要因が解決されない以上、高精度な光計測法の応用としては難しいという問題も残されている。

## 5. 結 言

超精密加工されたこれら部品の加工表面の評価要素としては、表面粗さや形状計測等が挙げられるが、非加工物の計測装置としては、繰り返し精度あるいは理論的に明確で高信頼性であるとした理由から、主に触針式粗さ測定器が多用されていた。

しかし、精密加工された高品位な部品を損傷することなく迅速に評価するためには、触針方式より非接触方式による傾向が強くなってきていることから、本報においては、この非接触方式による評価方法に着目した、レーザ光基準の光計測法について概説し、受光素子にフォトセンサ、特に4分割フォトセンサ (QPD) を用いた種々の光計測方法について解説を行った。

また、これらの光計測法を応用したレーザ光基準運動誤差補正法、インプロセス測定法についても解説を行ったが、いずれの方法においても、加工中の切削液や切り屑等の影響により、現状においての高精度な光計測法の応用としては難しいという問題が残されている。

しかし、工作機械の母性原理に基づいた超精密加工技術においては、これを制御により解決しようとする試み

は重要であり、これに高精度な光測定法を応用したインプロセス測定法、オンマシン測定法も、現状での超精密加工における精密化、微細化、大型化に対応した評価技術の一つであると考えている。(1993年9月6日受理)

#### 参考文献

- 1) 米田 完：光応用センサとその活用，機械の研究，43，12 (1991) 1322.
- 2) N. Ikawa et al: Laser Beam as a Straight Datum and Its Application to Straightness Measurement at Nanometer Level, Annals of the CIRP, 37-1 (1988) 523.
- 3) 水野定夫ほか：平面度測定機，昭和58年度精機学会秋季大会講演会講演論文集 (1983) 413.
- 4) 河野嗣男ほか：超精密金属鏡加工技術の開発—非接触光学式微小変位形ヘッド，昭和58年度精機学会秋季大会講演会講演論文集 (1983) 391.
- 5) 三井公之ほか：高精度インプロセス粗さ形の開発，昭和59年度精機学会春期大会講演会講演論文集 (1984) 393.
- 6) 河野嗣男：表面粗さと形状測定の現状と展望，超精密加工マニュアル (1989-9) 144.
- 7) 内田出ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究 (第2報)，精密工学会誌 56-1 (1990) 134.
- 8) 三井公之：インプロセス粗さ測定法とその応用，精密機械学会誌 51-4 (1985) 681.
- 9) 亀井明敏ほか：非点収差法による粗さ測定，機械と工具 (1987) 27.
- 10) 本田捷夫：光学系のテスト (1) 干渉による方法，O Plus E, 143, (1991-10) 109.
- 11) 上村康幸ほか：4分割フォトセンサを用いたオンマシン形状精度測定法，日本機械学会論文集 (C編) 59-557 (1993) 105.
- 12) S.Yanabe et al: Measurement of Sliding Behaviours of a Magnetic Head Slider in CSS Test, The 4th Joint MMM-Intermag Conf., (1988).
- 13) 谷泰弘ほか：石定盤の光学式真直度測定法，日本機械学会秋季大会講演会講演論文集 (1993).
- 14) 河野嗣男ほか：インプロセス計測加工精度補償の研究 (第1報)，精密工学会誌 54-8 (1988) 1463.
- 15) E. Seya et al: An Accurate Linear Tool-Slide System with Straightness Compensation Control for a Precision Diamond Cutting Machine, Proc. of 6th ICPE, (1987) 569.
- 16) L. J.Coates: Alignment Techniques Conference on "Making inspection Techniques Aid Quality Assurance and Productivity", NEL (1972-2).
- 17) C. A. Schneider: Entwicklung Eines Laser-Geradheits-Mess-Systems. Ph.D. Thesis, Technische Hochschule, Aachen. (1978).
- 18) 小寺直ほか：インプロセス除去量制御切削法の開発 (第3報)，精密工学会秋季大会講演会講演論文集 (1989) 135.
- 19) 堀内宰ほか：超精密加工機の工具—工作物間運動誤差補償法，精密工学会秋季大会講演会講演論文集 (1989-11) 131.