研究速報
特集 11
UDC 531.71/74：686.74

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

On-Machine Measurement of Form Accuracies Using Two Quadrant Photocells

上村康幸*・谷　泰弘**・佐藤壽芳*
Yasuyuki KAMIMURA, Yasuhiro TANI and Hisayoshi SATO

1. はじめに

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[1]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，本論文では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た．また，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．本論文では，この装置の測定原理と性能，さらにこの装置を凹面ミラーのオンマシン計測に応用した結果について報告する．

*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

2. 測定原理

2.1 オンマシン形状精度測定法

上述のように，オンマシンで被測定物の形状精度を測定しようとすると，走査軸の運動誤差を分離することが必要となる．そのために行われている方法には，運動誤差を他の基準線を参照して補正する方法[2]と計算上で仮想基準線を作り上げて形状精度の成分のみ抽出する方法[3),4)]がある．逐次2点計測法[3)]は後者に属する測定法で，同一の計測テーブルに固定された2本の変位プローブが位相を持ちながら被測定物上の各点を測定する方法であり，対象物の真直度と計測テーブルの真直度が同時に測定できることが大きな特徴である．一般にこのような計測テーブルの運動誤差には再現性のある誤差成分がほとんどであることから，空気のゆらぎ等の影響を受けるレーザ干渉を利用した方法に比較して再現性の優れた計測が可能になる．しかし，逐次2点法は，①計測テーブルの運動誤差の回転成分は非常に小さく無視できること，②2プローブが時間的にはずれるが同一線上の同一点を測定することの2条件を前提にしており，この逐次2点法を高精度の計測に応用しようとすると，後者の仮定である2検出器の測定点での同一性が問題となってくる．一つの点で得られる情報から仮想基準線を作り上げるには，その点の傾きの情報を計測すればよい[4)]．また，計測テーブルの運動誤差に関する情報を同時に測定した

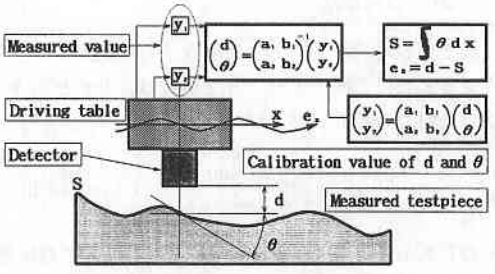

図1　表面形状と運動誤差の同時測定

研　究　速　報

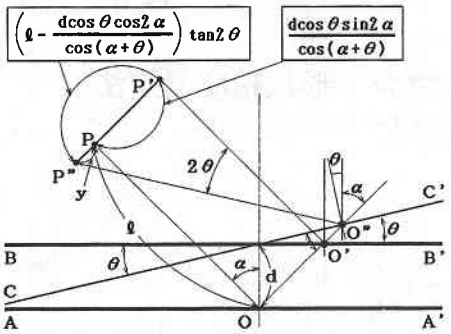

図2　光学的変位・角度同時測定方法

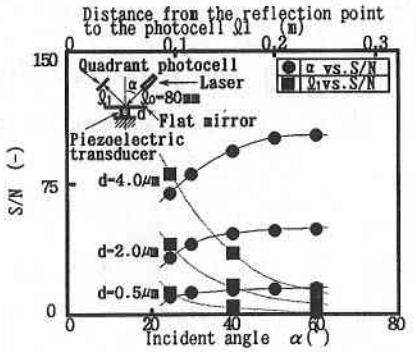

図3　入射角と反射面から受光面までの距離に対するS/N特性

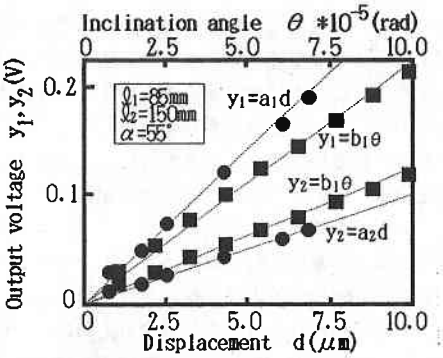

図4　変位と角度の較正結果

い場合には，傾きの情報と同時に**図1**に示されるように，計測テーブルと被測定面との距離を測定し，その2つの情報から算出すればよい．測定面の傾きと鉛直方向の変位を同時に測定する方法には，種々の方法が存在するが，ここでは以下のような三角測量と光てこの原理を応用した光学的な方法を用いることにした．

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きる．すなわち，**図2**に示されるように反射面の垂直方向変位dは三角測量の原理により測定を行い，傾きθは光てこの原理により測定を行った．

入射角αで照射されたレーザ光に対して，反射面AA′がdだけ変位してBB′に移動すると反射点は0から0′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θが加わりCC′に移動すると，反射点はさらに0′から0″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$y(\overline{PP''})$は，

$$y = l\tan2\theta - d\cos\theta\frac{\cos2\alpha\tan2\theta+\sin2\alpha}{\cos(\alpha+\theta)} \qquad (1)$$

と求められる．ここで，$\theta \ll 1$の場合には，

$$y \fallingdotseq 2l\theta - 2d\sin\alpha \qquad (2)$$

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θは，

$$\begin{aligned} d &\fallingdotseq (y_1 l_2 - y_2 l_1)/2(l_1 - l_2)\sin\alpha \\ \theta &\fallingdotseq (y_1 - y_2)/2(l_1 - l_2) \end{aligned} \qquad (3)$$

と求められる．ここでのθは，図2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2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．

2.2　反射型変位・角度同時測定装置の検定

図2に示される構成で，光源としてHe-Neレーザを，センサとしてQPDを使用した光学系の諸元を決定するために，入射角に対するS/N比と反射点からセンサまでの距離に対するS/N比の特性を測定した．その結果を**図3**に示す．同図より検討を行った範囲内では，入射角が大きい方が，また反射点からの距離が短い方が感度が高くなることがわかる．これは，反射点からの距離が短くなることで，空気流によるレーザ光の揺らぎの影響が少なくなったためと考えられる．図3より求められた測定可能な反射面の変位に対する分解能としては，入射角を60°，反射点からセンサまでの距離を95mmとした時に，25nmで，角度に対する分解能としては0.05角度秒（$2.36*10^{-7}$rad）であった．この値は，反射面からQPDまでの距離を短くすることで，さらに高めることが可能である．図3の結果をもとに，本論文ではレーザ光の入射角を55°に設定し反射面からAのQPDの受光面までの距離l_1を85.0mmとし，反射面からBのQPD

までの距離 l_2 を150.0mm と決定した．

実際の光学系において式(3)の α，l_1，l_2 を正確に計測することは困難であることから，変位と角度の較正装置を作成し，計測を行うのと同一の光学系で既知の d および θ を与えて y_1 および y_2 を測定し，較正を行った．その較正結果を**図4**に示す．この結果は，d，θ と y_1，y_2 の関係が，入射角と距離に対して線形と見なせることを示している．

3．球面ミラーのオンマシン測定

上述の測定原理を用い球面ミラーのオンマシン形状計測を行った．**図5**のように，曲率半径5mの凹面ミラーをワイヤ駆動されたエアスライドの側面に取り付け，横方向に0.459mm/s の一定速度で動かしながら形状の測定を行った．周波数安定化 He-Ne レーザの光源からの光を光ファイバで反射点から100mm 程度の位置まで案内し，入射角55°で測定面に照射した．反射光はビームスプリッタにより二光線に分割し，その一つをAのQPDに，もう一つをBのQPDに導いた．

フォトセンサ上の上下，左右の位置検出は，上下，左右のフォトセルの出力の差として求めた．出力は4個のセルの和により除算を行い，光源の出力変動や測定面の反射率変動の影響を取り除いた．2個のQPDからの出力は，A/D 変換した後パーソナルコンピュータ PC9801RA に取り込み，式(3)の計算を行い測定点の変位および傾きを求めた．その後積分計算を数値的に行い，測定面の表面形状およびエアスライドの真直度誤差を算出した．

図6は，5mmの範囲でエアスライドを左から右へ移動させて測定を行った際（正方向）と右から左へ移動させて測定を行った際（逆方向）の結果で，2個のQPDによって検出された生波形 y_1，y_2 を示している．両方向共数回の測定を行ったが，再現性のよい結果が得られた．

次に，図4の較正結果をもとに，図6の結果の y_1 および y_2 より算出した反射面の変位 d および傾き θ を**図7**に示す．d は，エアスライドを移動した際のエアスライドの側面に垂直な方向の反射面の変位を示しており，エアスライドの水平方向の真直度誤差と測定面の表面形状を含んでいる．一方，θ は反射面の傾きとエアスライドのヨーイング誤差を含んでいるが，使用したエアスライドのヨーイング誤差は非常に小さいことから，ほぼ反射面の傾きのみを示していると考えられる．

図8は，θ を数値積分して得られた表面形状 s と d より s を取り除いた残差 e_z を示している．e_z はエアスライドの水平方向の真直度誤差を示している．凹面ミラーの取り付け誤差は，本来 s に含まれた形で算出されるが，直線的に変化する成分は測定範囲の中央で θ の出力を0とすることで取り除かれている．ここで，真直度誤差 e_z の値をみてみると，3.0μm 前後と本来のエアスライ

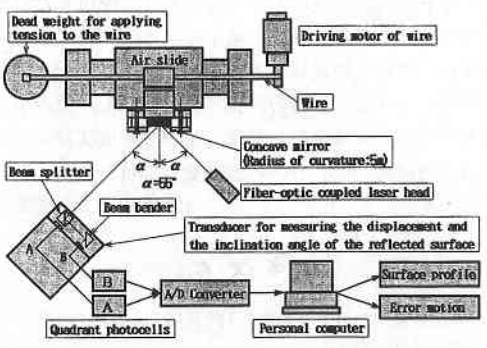

図5　凹面ミラーのオンマシン形状計測

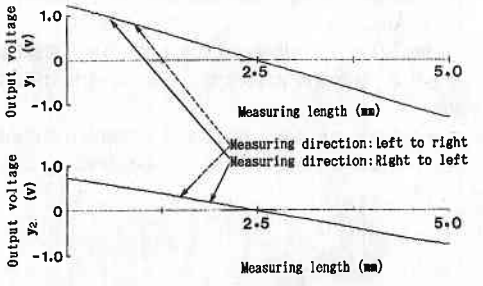

図6　2個のQPDによって検出された生波形 y_1，y_2

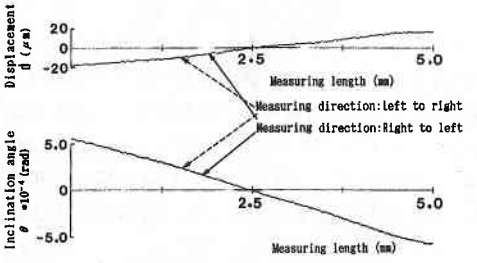

図7　y_1，y_2 から算出された反射面の変位 d と傾き θ

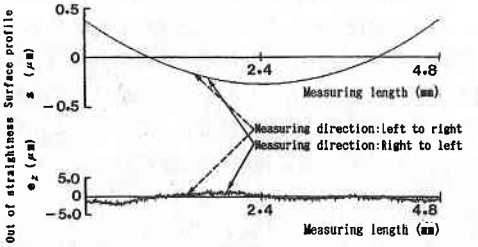

図8　θ の積分による凹面ミラーの表面形状 s とエアスライドのエラーモーション e_z

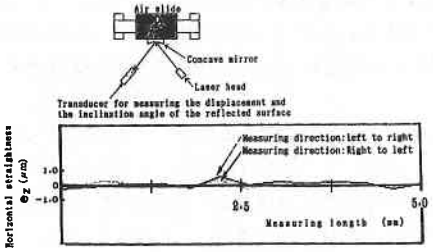

図9　エアスライドを離散的に動かしたときのエラーモーション e_z

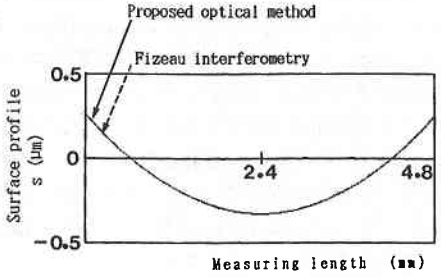

図10　凹面ミラーの表面形状 s の比較測定

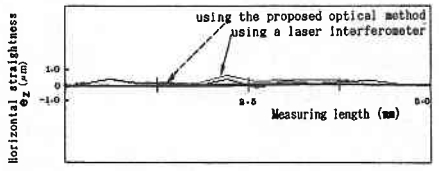

図11　エアスライドのエラーモーション e_z の比較測定

ドのエラーモーションより大きく算出されている．これはエアスライドをワイヤ駆動する際のモータの速度変動とエアスライドの軸方向の振動が影響していると考えられたため，エアスライドを離散的に0.2mm おきに動かし，e_z の算出を行ってみた．その結果を**図9**に示す．エアスライドの真直度誤差として，0.7μm 前後まで減少した e_z が算出された．

上記の球面ミラーの表面形状 s とエアスライドの水平方向の真直度誤差 e_z の算出値の妥当性を検討するため，従来の測定装置にて行ったデータと比較した結果を，**図10**，**図11**に示す．図10の太線は光学系により算出された，凹面ミラーの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，共に一致した結果を得ることができた．

図11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．

4．おわりに

加工物のオンマシン形状計測を行うためには，測定系と被測定物を相対的に走査させる軸の運動誤差を分離することが必要である．そこで，本論文では測定点の変位と傾きを同時に測定できる光学系を試作した．すなわち，変位は三角測量の原理で測定し，傾きは光てこの原理により測定を行い，以下のような結論を得た．

(1)　開発した反射型変位・角度同時測定装置での反射面の変位および角度分解能は，25nm および0.05角度秒（$2.36*10^{-7}$rad）の高い値が得られた．

(2)　測定面の傾きを積分することにより測定面の表面形状が求められ，変位から表面形状を差し引くことで走査軸の運動誤差を算出することができ，再現性に優れた結果を得ることができた．

(3)　反射型変位・角度同時測定装置によって得られた表面形状と運動誤差の結果は，凹面ミラーの表面形状の比較測定として使用したフィゾー干渉計とエアスライドの真直度誤差の比較測定として使用したレーザ干渉計とほぼ一致した結果を得ることができた．

最後に，本研究の遂行にあたり，計測装置の一部を提供して頂いた㈱東京精密の関係各位に記して，深謝申し上げる．なお，本研究の一部は，平成3年度文部省科学研究費一般研究(B)02452106の援助を得て行われた．

(1993年3月10日受理)

参考文献

1)　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.

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)　戸沢幸一ほか：工作機械の真直度と加工精度の関連に関する研究，日本機械学会論文集（C編）47-419（1981-7）909.

4)　佐藤壽芳ほか：走査電子顕微鏡による表面粗さ測定の研究，日本機械学会論文集（C編）49-438（1983-2）227.