ラジアルシェア干渉計によるオンマシン測定*

河野嗣男**

松本大司***

細越剛史†

矢澤孝哲††

宇田 豊†††

Radial Shearing Interferometer for On-machine Measurement

Tsuguo KOHNO, Daiji MATSUMOTO, Takeshi HOSOGOE, Takanori YAZAWA and Yutaka UDA

A stable interferometer using two zone plates is developed for on-machine measurement of a concave mirror figure. The principle of measurement is based on the radial shearing interference in which the measuring wavefront from the entire mirror surface under test is referred to that from the central part. On-machine experiments showed that the interferometer is stable enough to be applicable to in-process measurement for diamond turning at about $0.06 \mu\text{m P-V}$ accuracy.

Key words: on-machine measurement, radial shearing interferometer, zone plate interferometer, concave mirror figure

1. はじめに

近年、様々な用途に使用される凹面鏡には高い形状精度が要求されている。精度良く仕上げるために、通常は加工と形状測定を繰返して行う。このため、製作に要する時間、コストともに膨大なものになってしまう。また大口径凹面鏡を製作する場合、加工機そのものの精度だけでは高精度に製作することは難しい。そこで、低コスト、短時間、かつ高精度で製作する方法の1つとして、インプロセス計測加工制御法、特に「加工面基準制御加工法」を提案した¹⁾。この方法は従来別々であった加工と計測を同時に行い、その測定データをもとに加工をリアルタイム制御して加工機械の精度向上や外乱除去などを実現する方法であり、これまでに、空間周波数で比較的高周波であるうねり成分に関して、光学式超精密変位センサを使用した実験により、それらの効果が実証されている^{2) 3)}。しかしながら、表面の低周波成分である形状成分のオンマシン/インプロセス形状計測による加工制御に関しては、加工現場で使用できる実用性のある計測システムの報告は、若干の例を除いてほとんど行われていないのが現状である^{4) 7)}。

インプロセス形状計測を行うための計測装置には、高精度、非接触、高速な測定、コンパクト、空気揺らぎや振動などの外乱に強い、等の条件が必要とされるが、フィゾー干渉計に代表される一般的な表面形状計測用の干渉計には、外乱に弱い欠点がある。外乱に強い干渉計であるためには、干渉するそれぞれの光が共通光路（コモンパス）であり、測定面と参照面が一体になっていることが望ましい。これらの条件を満たす干渉計の1つとしてシェアリング干渉計がある⁸⁾。一般にシェアリング干渉計にはラテラルシェア干渉計が広く用いられているが、軸対称凹面鏡のインプロセス計測に対してはラジアルシェア干渉計がより適切な手段であり、信号処理にもメリットがあると考

えられる。本報ではコンパクトで安定性の高いラジアルシェア干渉計を開発し、オンマシン測定を行って、インプロセス形状計測に適応できる可能性を追求する。

2. ラジアルシェア干渉計

ラジアルシェア干渉計は図1に示すように測定波面を2つに分割して、一方の波面に半径方向のずれ、すなわち倍率を与え、測定面で反射した光を干渉させる。つまりラジアルシェア干渉計は測定面の中心部を参照面とし、その波面を拡大して測定面全体の波面と重ね合わせて干渉させるものである。このことを極座標 (ρ, θ) を用いて式に表すと、測定波面を $W(\rho, \theta)$ とし、干渉する波面の光路差を $OPD(\rho, \theta)$ として、次式のようになる。

$$OPD(\rho, \theta) = W(\rho, \theta) - W(\beta\rho, \theta) \quad (1)$$

ここで、 β ($0 < \beta < 1$) は半径方向のシェア比で、測定波面と参照波面との倍率比である。

ラジアルシェア干渉計で形状測定を行う場合、問題となるのが、参照面に対応する測定面中心部の形状精度である。参照面は中心部を $1/\beta$ 倍に広げて測定面に重ねることになるため、面精度はそれだけよくなると考えられる。特に広げられた面が十分平面に近いが、 β が小さい場合には、ラジアルシェア干渉計における参照面、すなわち式(1)の $W(\beta\rho, \theta)$ は0に近似できるため、観測される干渉じまはそのまま測定面の形状を示していると考えて良い。

しかし、中心部の誤差が無視できない程度に大きい場合は、 $W(\beta\rho, \theta)$ を0と近似することができず、ラジアルシェア干渉計の干渉じまはそのままでは測定面の正しい形状を示さなくなる。そこで、中心部の誤差が比較的大きい形状でもラジアル

Fig.1 Radial shearing interferometer

* 原稿受付 平成 10 年 8 月 4 日

** 正 会 員 東京都立科学技術大学 (日野市旭が丘 6-6)

*** 東京都立科学技術大学 (現、隣ニコン; 熊谷市大字御稜威ヶ原 201-9)

† 正 会 員 東京都立科学技術大学 (現、富士通隣; 厚木市岡田 3065)

†† 学生会員 東京都立科学技術大学

††† 正 会 員 隣ニコン (品川区西大井 1-6-3)

シエア干渉計で高精度な測定が行えるようにするために、以下に示す2つの補正法を提案する。

2.1 収差の多項式展開による補正

測定波面 $W(\rho, \theta)$ をゼルニケ多項式に展開すると、各項は光学的な収差に対応していて、以下のように表される。

$$W(\rho, \theta) = Z_0 + Z_1 \rho \cos \theta + Z_2 \rho \sin \theta + Z_3 \rho^2 \sin 2\theta + Z_4 (2\rho^2 - 1) + \dots \quad (2)$$

また、式(1)、(2)より光路差 $OPD(\rho, \theta)$ は、

$$\begin{aligned} OPD(\rho, \theta) &= W(\rho, \theta) - W(\beta\rho, \theta) \\ &= Z_1(1-\beta)\rho \cos \theta + Z_2(1-\beta)\rho \sin \theta \\ &\quad + Z_3(1-\beta^2)\rho^2 \sin 2\theta + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

と展開できる。式(3)において、 β は1未満であるため、それぞれの項が0になることはなく、ラジアルシエアによって打ち消されてしまうような収差はない。すなわち、すべての収差成分に対する情報を得ることが可能であり、これらの展開式を利用して次のように補正を行う。

まず、干渉計から得られる干渉じま、つまり $OPD(\rho, \theta)$ を式(3)の多項式に最小二乗法を用いて展開する。ここで得られる式(3)の係数 Z_n は測定波面の展開式で示されている Z_n と同じものなので、求めた式(3)の係数 Z_n を式(2)に代入する。これより測定波面の展開式を得ることができ、正しい測定波面 $W(\rho, \theta)$ を求めることができる。

2.2 繰返しによる補正

ラジアルシエア干渉計で得られる光路差は点 (ρ, θ) に関して式(1)で与えられる。

同様に点 $(\beta\rho, \theta)$ については、

$$OPD(\beta\rho, \theta) = W(\beta\rho, \theta) - W(\beta^2\rho, \theta) \quad (4)$$

と表すことができる。この関係を点 $(\beta^i\rho, \theta)$ まで繰返し考え、これらの式をすべて足し合わせると、

$$W(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^n OPD(\beta^i\rho, \theta) - W(\beta^n\rho, \theta) \quad (5)$$

となる。この式で、 β は1未満であるので、 n が十分大きければ $W(\beta^n\rho, \theta)$ は中心の小さな点とみなすことができ、参照面の誤差の影響は無視できることになる。したがって、式(5)の操作を干渉じま全体にわたって行えば、参照面の誤差の影響を受けずに正しい測定波面を求めることができる。

2.3 補正に関するシミュレーション

2種類の補正法の有効性を確認するために、シミュレーションを行った。干渉じまのデータは、比較的中心部の誤差が大きい鏡面形状をフィゾー干渉計で測定してその干渉じまを利用し、式(1)を用いてラジアルシエア干渉計の干渉じまに変換したものを用いた。また、シミュレーションはシエア比 β をそれぞれ 0.1, 0.5, 0.9 の場合について行った。実際の計算においては、 ρ, θ で表される画面を 256×256 分割し、ゼルニケ多項式は36項まで、式(5)の n は100まで計算した。

P-V 値に関する結果を図2に、rms 値に関する結果を図3に示す。なお、参照面を理想面とした場合、P-V, rms はそれぞれ

Fig.2 Simulation results for P-V

Fig.3 Simulation results for rms

れ 2.60 λ, 0.51 λ である。

補正なしの結果では、 β が大きくなるにつれて、P-V, rms ともに小さい値になり、参照面の誤差の影響を受けていることがわかる。これに対して、収差の多項式展開、繰返しによる補正を行った結果では、両方式にほとんど差はみられず、 β の大きさにかかわらず、参照面の誤差の影響が $\lambda/10$ 以下に抑えられていることがわかる。

3. ゾーンプレートを用いたラジアルシエア干渉計

オンマシン・インプロセス形状計測を行う場合、その測定器は外乱に強く、コンパクトであることが望まれる。ラジアルシエア干渉計ではゾーンプレートを用いることでこれらの条件を満たすことができる⁹⁾。ゾーンプレートは1枚でレンズとビームスプリッタの2つの作用を持つことができるため、干渉計を構成する光学素子の数を減らし、干渉計をコンパクトにすることが可能である。また、ゾーンプレートによって回折される光は透過する光と同じ光軸上を通るため、干渉計は共通光路(コモンパス)となり、空気揺らぎ等の外乱に対して強くなる。

ゾーンプレートを用いてラジアルシエアを行うには、図4に示すように2枚のゾーンプレートを必要とする。1枚目のゾー

Fig.4 Radial shearing by zone-plates

ンプレートを透過する光は2枚目のゾーンプレートで回折され、参照光となる。また、1枚目のゾーンプレートで回折した光は2枚目のゾーンプレートを透過し、物体光となる。これらの光は互いに干渉し、干渉縞を形成する。また、物体光、参照光ともにゾーンプレートによる回折、透過は各1回ずつのため光量はほぼ等しくなり、ビジビリティの高い干渉縞が得られる。

以上の原理を利用して図5に示す光学系をもつ干渉システムを構成し、凹面鏡の形状測定を行った。被測定鏡には口径100mm、曲率半径1000mmの凹球面鏡、光源にはHe-Neレーザを使用し、ゾーンプレートはプロッタによって描画したパターンを写真により縮小して作製した。この際、シェア比 β は0.55とした。また、CCDカメラによって取込まれた干渉縞は画像処理ボードを通してコンピュータに取込み、解析にはフーリエ変換干渉法¹⁰⁾を用いた。測定結果の鳥瞰図を図6に、比較のため同じ測定物を市販のフィゾー干渉計で測定した結果を図7に示す。ラジアルシェア干渉計の測定結果には2.1節で示した収差の多項式展開による補正が行われている。また、測定結果はある程度セッティング誤差を含んでいると考えられるため、測定データをゼルニケ多項式に展開し、セッティング誤差と考えられるピストン、ティルト、フォーカスの収差の項を0にすることで取除いた。これによりラジアルシェア干渉計と

Fig.5 Measurement system of radial shearing interferometer

Fig.6 Measurement result of radial shearing Interferometer

Fig.7 Measurement results of Fizeau interferometer

フィゾー干渉計の測定結果はセッティング誤差の影響を受けずに、形状のみの比較を行うことができる。

ラジアルシェア干渉計とフィゾー干渉計の測定結果を比較すると、定性的には両結果ともに形状の特徴である中心部の出っ張り等が良く似ており、定量的にはP-V、rmsともに差が $\lambda/10$ 以内である。この結果からゾーンプレートを用いたラジアルシェア干渉計の測定精度は定性的、定量的に市販精密干渉計に近い水準にあることが確認できた。

4. オンマシン測定装置

オンマシン測定とは加工機と測定器の場所的ない体化を意味し、加工機上で測定が可能なることをいう。オンマシン測定は生産効率を上げることができ、また、被測定物を保持具から取り外さずに測定が行え、再取付けの際の誤差や手間を避けることができるため、有用な技術である。また、オンマシンとインプロセスは計測形態が近いため、オンマシン測定が実現できることは、インプロセス計測への可能性を示すことにもなる。

Fig.8 Radial shearing interferometer for on-machine measurement

オンマシン測定には加工機に容易に載るようなコンパクトな測定装置が必要である。そこで、図8に示す測定装置を製作した。この測定装置は1枚の板を台に対して垂直に立て、その両面を利用している。大きさは350×350×350である。この寸法は著者らの研究室所有の超精密旋盤に搭載可能な大きさである。

5. オンマシン測定実験

オンマシン測定のシステム構成を図9に示す。被測定鏡には前述の曲率半径1000mm、口径100mmのガラス凹面鏡を用い、スピンドルには専用の保持具で固定した。また、スピンドルには回転周期を検出するセンサが取り付けられており、その信号を基準にして所望の角度で干渉縞をパソコンに取り込むことができる。

実際の測定では、ランダムな誤差の低減、インプロセス計測時のバイトなどの障害物が測定面を隠してしまう影響を考え、一定の角度ごとに数枚のしま画像を取り込み、その画像をそれぞれに解析して合成した。各角度の画像はそれぞれ独自のセッティング誤差をもっていると考えられるため、ただ単に足し合わせただけでは正確な合成を行うことは出来ない。このため、合成は各角度ごとのセッティング誤差を取り除いて行った。

Fig.9 On-machine measurement system by radial shearing interferometer

測定は実際の凹面鏡の切削条件に近い回転速度 1000rpm で、画像の取り込み角度は 90° ごとに 4 枚取込み、それぞれの画像を解析、合成した。測定結果を図 10 に示す。なお、測定結果には 2.1 節で述べた補正を行っている。また、フィゾー干渉計では、振動などの外乱に弱く、オンマシン測定が行えないため、ラジアルシェア干渉計でオンマシン測定を行った後、スピンドルから専用保持具ごと凹面鏡を取外し、除振台の上で測定を行った。

両結果を比較すると、定性的には形状の特徴がほぼ一致しており、定量的には差が $\lambda/10$ 以内である。ラジアルシェア干渉計によってオンマシン測定が十分な測定精度で行えることが確認できた。

(a) Radial shearing interferometer

(b) Fizeau interferometer

Fig.10 Results of experiments

6. ま と め

インプロセス形状計測に用いる干渉計には外乱に強いことが

望まれ、これに適合する干渉計として、ゾンプレータを用いたラジアルシェア干渉計を開発し、測定精度の確認およびオンマシン測定実験を行った。

ラジアルシェア干渉計で形状測定を行う場合、被測定物の中心部が参照面となるため、中心部の形状誤差が大きいと十分な精度で測定が行われない。このため、参照面の誤差の影響を排除するための 2 つの補正法を考え、その有効性を示した。

ゾンプレータを用いたラジアルシェア干渉計で凹面鏡のオンマシン測定を行い、実際の切削条件に近い回転速度である 1000rpm で安定した測定を行うことができた。また、フィゾー干渉計の測定結果と比較することで測定精度の確認をした。その結果、十分な精度で測定が行えることを確認し、この干渉計をインプロセス計測に適用することが可能であることを示すことができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、富山県立大学野村俊氏をはじめ、(社)精密工学会「インプロセス計測加工制御技術専門委員会」の委員の方々には多大なご協力をいただいた。心より感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 河野嗣男, 面田学, 岡崎祐一, 小澤則光, 三井公之: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.
- 2) 内田出, 河野嗣男, 尾西隆, 岡崎祐一, 小澤則光, 竹内喜代松: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.
- 3) 河野嗣男, 宇田豊, 森田昌彦, 永野浩量:インプロセス計測加工精度補償の研究 (第 3 報), 精密工学会誌, 59, 6 (1993) 951.
- 4) 坪井暉, 前田幸雄: AHNIO・CNC 超精密非球面加工機, 豊田工機技報, 30, 2 (1989) 1.
- 5) 清野慧, 高偉:混合法による大型凹面形状のオン・マシン測定に関する研究, 日本機学会論文集 (C 編), 58, 550 (1992) 1987.
- 6) T.Nomura, H.Miyashiro, K.Kamiya, Y.Yoshikawa, H.Tashiro, M.Usuki and F.Kobayashi: Shape Measurement of Workpiece Surface with Zone-plate Interferometer during Machine Running, Prec. Eng., 1993, 15, (1993) 86.
- 7) 河野慎一, 河野嗣男, 矢澤孝哲, 宇田豊, 鈴木尚:ファイバークレーティングハレットマンテストによる鏡面形状計測, 砥粒加工学会誌, 41, 5 (1997) 190.
- 8) D.Malacala: Optical Shop Testing, John Wiley and Sons, Canada, (1978), 145
- 9) J.C.Fouéré and D.Malacara: Holographic Radial Shear Interferometer, Appl. Opt., 13, (1974) 2035.
- 10) 武田光夫:サブフリンジ干渉計測基礎論, 光学, 13, 1 (1984) 55.