ゾーンプレートの移動による凹面鏡の測定法*

野村 俊** 吉川 和男*** 田代 発造***
鈴木 正根† 薄木 雅雄†† 辻内 順平†††

A Measuring Method of a Concave Mirror by Moving a Zone-plate

Takashi NOMURA, Kazuo YOSHIKAWA, Hatuzo TASHIRO,
Masane SUZUKI, Masao USUKI and Jumpei TSUJIUCHI

In recent years, remarkable progress has been made in high precision machining for the production of metallic concave mirrors. However, to improve efficiency and precision in the cutting process, it is desirable to design a measurement device built into the cutting machinery and to be easy to handle. In this paper we propose a promising and practical innovation in measurement based on zone-plate interferometry. This method involves the operation of changing the curvature radius of the diffracted wave fronts by moving the zone-plate along the optical axis, and it has the merit of easy application to the measurement both spherical and aspherical mirror profiles.

Key words: zone-plate interferometry, profile measurement, spherical mirror, aspherical mirror, moiré fringe, speckle pattern

1. はじめに

最近、切削加工において超精密加工の研究が盛んに行われ、加工される表面はほぼ鏡面状態に達している。このような加工によって作成された凹面鏡の非接触形状測定を行う場合、通常の平面を参照面とする干渉計による測定法では、曲率半径の大きなものしか測定できず実用的ではない。さらに、最近では球面のみならず非球面の形状まで製作されるようになってきている。このため、非球面の形状も測定できる方法の開発が望まれており、最近多くの非球面測定法が盛んに報告されている¹⁾。しかし、実際に加工現場で工作機械に取り付けて測定することを考えると、外乱からの影響を受けにくい測定法でなければならない。また、コンピュータに取り込みやすくするためには、ビジビリティの高い干渉じまが得られる方法でなければならない。このような条件を満たす測定法の一つとして、ゾーンプレート干渉法が提案されている²⁾³⁾。ゾーン

プレート干渉法は球面の測定法であるが、非球面の測定を可能にする方法もいくつか報告されている⁴⁾。たとえば、リングダイレーザ（波長を可変することができ、レーザの一種）で光の波長を変え、ゾーンプレートからの回折波面の方向を変えることによって回折波の曲率半径を変化させて非球面を測定する方法が提案されている⁵⁾。この方法は精密に球面および非球面の測定が行えるという特長を持っているため、各光学学会社の球面の基準であるニュートンゲージに代わり、球面の基準となる可能性が考えられる。しかし、リングダイレーザが高価であるため、手軽に使用できる方法とはいえない。本研究は加工現場内で手軽に測定が行える測定法の開発を目的としており、本報告ではこの目的にあった方法を提案する。

2. 原理と方法

本実験におけるゾーンプレート作成時の光学系を図1に示す。レーザ光源を2つに分離して1つをビーム1、もう一方をビーム2とする。ビーム1をレンズ1, 2, 3によって収束光にする。また、レンズ4によってビーム2を球面波にする。2つの光束の中に乾板を入れて撮影すれば、2光束干渉じまとしてゾーンプレートが作成される。このときビーム1の焦点と球面波の中心との距離を測定物の曲率半径に一致させる。

ゾーンプレートの回折の様子を図2に示す。ゾーン

* 原稿受付 昭和62年11月26日。昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和62年3月29日）にて発表

** 正会員 富山県立技術短期大学（富山県射水郡小杉町黒河）

*** 正会員 富山大学工学部（富山市五福3190）

† 正会員 富士写真光機（株）（大宮市植竹町1-324）

†† 正会員 （株）不二越（滑川市大掛176）

††† 東京工業大学工学部（横浜市緑区長津田町4259）

Fig. 1 Configuration of the optical system for making a zone-plate

Fig. 2 Configuration of diffracted and transmitted lights of a zone-plate

プレートを撮影時の元の位置に置き、ビーム1の焦点面に凹面鏡の表面の中心がくるようにセットする。ここでは、回転対称の形状をした凹面鏡を扱うものとする。ビーム1をゾーンプレートに入射すれば、透過光と回折光（球面波）の2つの波面ができる。右方向から観測すれば、回折光（球面波）の中心から光が来るように見える。ゾーンプレート上の位置Bを通ったビーム1の透過光は、Oで反射してゾーンプレート上の位置Aで回折する。この回折波は参照光となる。一方、ゾーンプレート上の位置Aを通ったビーム1の回折光は凹面鏡上Cで反射して、再びゾーンプレート上の位置Aを透過光として通過する。これは信号光（物体光）となる。測定面が正確な球面であり、ゾーンプレートによる回折光（球面波）と正確に一致すると干渉じまがなくなる。このようにして、ヌルテストが行える。ゾーンプレート干渉計は信号光と参照光が共通の光路を通過するため、通常の干渉計に比べて外部からの振動や大気揺らぎに対して、あまり影響を受けない。作成されたゾーンプレートの精度を確かめるためには、同じ条件でゾーンプレートを2枚作り、2枚の乳剤膜面どうしを合わせてモアレじまを観測する。

光軸調整が不十分な場合、ゾーンプレートの精度が悪くなり、モアレじまが曲がって見える。光軸調整が正確であれば直線状のモアレじまが見える。モアレじまが直線となるように、光学配置を調整すればよい。

凹面鏡の測定は、図3に示す光学系で行う。ゾーンプレートが撮影された位置に正確にゾーンプレートを置く。このためには、ビーム1と2による干渉じまとゾーンプレートとの干渉によってできるモアレじまを観測する。元の位置に対してわずかにずれると図4のようにモアレじまが発生する。そこで、モアレじまが生じなくなるようにゾーンプレートの位置を調整すればよい。感光材料としてサーモプラスチックを使用する場合には、現像がその位置で行われるので調整の必要はない。

次に、凹面鏡の中心をビーム1の焦点に置き、ビーム2のレンズの前に平面鏡とピンホール3を置く。ピンホール3は不要な回折波を除去するためのものである。凹面鏡にカメラの焦点を合わせて、干渉じまを観測する。干渉じまがなくなれば、参照光と信号光とが一致したことになり、測定対象は正確な球面とみなせる。球面からの形状偏差が1し以下の場合、これを

Fig. 3 Configuration of the optical system for measuring a concave mirror by the zone-plate

(a) Correct position (b) Wrong position

Fig. 4 Moiré pattern generated by the replaced zone-plate and the interference fringes of beam 1 and beam 2

干渉じまで観測するには、ゾーンプレートに光軸に垂直に微小移動する方法をとる。ゾーンプレートの移動により、参照光である球面波と信号光である凹面鏡の測定面がわずかに横移動する。従って、もし凹面鏡が正確な球面であれば、直線上の干渉じまが観測できる。

非球面鏡の場合、球面からの偏差が大きくなりすぎる場合がある。そこで、ゾーンプレートを光軸方向に移動させ、回折光の曲率半径を変化させる方法を用い

る。ゾーンプレート移動後の回折波の中心を求め、これから回折波面を計算して、測定対象の非球面との偏差による干渉じまを予測することができる。回折波面の中心の位置は次のようにして求めることができる。

図5に示すようにゾーンプレートからビーム2の焦点までの距離を a 、ビーム1の焦点までの距離を b とし、ゾーンプレート移動後のそれぞれの値を a' , b' とする。ゾーンプレート上の任意の位置の高さを h 、波長を λ 、しま次数を N とすれば、回折の理論から次の式が導かれる。

$$(\sqrt{a^2 + h^2} \mp a) \pm (\sqrt{b^2 + h^2} - b) = N\lambda \quad (1)$$

$$(\sqrt{a'^2 + h^2} \mp a') \pm (\sqrt{b'^2 + h^2} - b') = N\lambda \quad (2)$$

したがって、

$$a' = \pm(h^2 - q^2)/2q \quad (3)$$

となる。ここで、

$$q = \sqrt{a^2 + h^2} \pm \sqrt{b^2 + h^2} \mp \sqrt{b'^2 + h^2} \mp (a + b) \pm b' \quad (4)$$

ただし、上の符号はビーム2の焦点がゾーンプレートよりも左にある場合 ($a > 0$) であり、下の符号は右にある場合 ($a < 0$) である。

Fig. 5 Diffracted light from the moved zone-plate

ゾーンプレートが移動することにより曲率半径は $(a'+b')$ となる。ゾーンプレートの高さ h によって、曲率半径が変わるため、回折波面は収差のある球面となる。この波面は、回折光の方向の垂直面を計算することによって求められる。 F ナンバーが大きいゾーンプレートの場合では、収差が少ないため、ゾーンプレートを薄いレンズとして近似して、薄いレンズの公式で曲率半径を求めてもよい。

非球面の一例として、放物面を取り上げる。図6(a)はゾーンプレートを元の位置に置いた場合である。(b),(c),(d)は0.2 mmずつ移動させた場合である。(d)は干渉じまの数が減少して読み取りやすいパターンとなっている。また、ゾーンプレートを移動させることによって、干渉じまの間隔の広い部分が変化することから、ゾーンプレートの位置とし、干渉じまの間隔の広い位置を測定し、測定面の形状を求めることができる。

3. 実験および考察

実際の光学系では凹面鏡の焦点距離が短いために、図7のようにした。ビーム1の焦点と球面波の中心との距離を測定物の曲率半径に一致させるために次の方法をとった。各々の焦点の位置にスリガラスを置くと、スペックルのボイリング現象が生じることを利用して、各々の焦点の位置を求める。その焦点間の距離が曲率半径と等しくなるようにレンズ3を移動させた。

日本光学測定機工業会の基準凹面鏡（ニュートンゲージ、曲率半径 100 mm）を使用して理論の確認の実

Fig. 6 Simulation of the fringes generated by the interference of the parabolic mirror and the diffracted wave fronts

験を行った。ゾーンプレートの直径は 12.8 mm、測定された凹面鏡の直径は 13.1 mm、 a は -98 mm、 b は 198 mm であった。

図8(a)はゾーンプレート干渉計によって、球面鏡を観測したときの干渉じまである。黒くむらに見えるのは1次以下の干渉じまが発生したためである。この

Fig. 7 Configuration of the experimental system

(a) Interferogram obtained before the zone-plate movement

(b) Interferogram obtained when the zone-plate is moved by 100 μm perpendicularly to the optical axis

Fig. 8 Experimental results

原因は5つ考えられる。1番目は、二つのビームの光軸が正確に合っていないこと。2番目は、ゾーンプレートガラス板の厚みと材質が不均一であること。3番目は、ビームスプリッタの厚みによってビーム1の収束光が非点収差を持つことである。4番目は凹面鏡自体の偏差である。ここではニュートンゲージを使用しているので、4番目は考えなくてもよい。5番目はレンズの収差である。ここではアクロマートレンズを使用したので、主要な原因ではなくなる。図8(b)は、ゾーンプレートを光軸に対して直角方向に100 μm移動させた場合であり、直線状の干渉じまが観測できる。しかし、若干の乱れがある。2枚のゾーンプレートを作成して、そのモアレじまを観測したところ、曲がったモアレじまとなった。このことから、光軸が正確に合っていないことがわかった。本実験ではレンズのセッティングに通常のXYステージを使用したため、高さ方向に微調整ができず、正確な光軸合わせをすることができなかった。XYZステージにレンズを載せて、正確な調整を行う必要がある。また、細かいひずみはゾーンプレートガラス板の不均一さによ

(a) Interferogram obtained when the zone-plate is moved by 2 mm along the optical axis

(b) Simulation of the interferogram when the zone-plate is moved by 2 mm along the optical axis

Fig. 9 Experimental result and the simulation

るものと考えられ、光学的に正確なものを用いる必要がある。図9(a)はゾーンプレートを光軸方向に2 mm移動させた場合である。干渉じまの数は10本程度観測できる。多少の非点収差が見られるのは光軸合わせの不正確さとビームスプリッタの厚みの影響と思われる。レンズの高さをわずかに変えることにより非点収差が変化することから、高さ方向に微調整ができる装置を導入することで非点収差は取り除けるであろう。また、ビームスプリッタをレンズ2と3の間に挿入すれば、ビームスプリッタの厚みによる非点収差は防げる。図9(b)は図9(a)と同じ条件によるシミュレーションであり、10.07本の干渉じまとなる。非点収差を除き理論と実験はよい一致を示した。いずれの実験でもビジビリティの高い干渉じまが得られた。これは、参照光と信号光が各々透過と回折を1回ずつ行って光強度が等しくなるためである。

4. ま と め

本方法の特長を以下に示す。

(1) 共通光路系であることから、外部からの振動や

雰囲気の流れによる影響が少ない。このため、加工現場での測定方法としての使用に耐えうる。

- (2) 参照光と信号光が、各々透過と回折を1回ずつ行っているため、干渉じまのビジビリティが高い。
- (3) 参照波面を変化させることができるため、球面鏡だけでなくパラボリックミラーなどの非球面鏡の測定が可能である。
- (4) 通常の方法ではゾーンプレートを正確に配置するには技術を要する。本法の場合ゾーンプレートがホログラムであるため、正確に元の位置にホログラムを配置しない場合、ビーム1と2の波面とホログラムが干渉してモアレじまを作る。このモアレじまをなくすように調整すれば、簡単に、しかも正確にゾーンプレートを配置することができる。

以上のことから本法はオンマシン測定法としての応用が期待できる。

なお、本研究は精密工学会産学共同プロジェクト超精密切削加工金属鏡のインプロセス計測と加工制御の研究の一部として行われたものである。本研究を行うにあたり、東京工業大学工学部像情報工学研究施設の大山永昭氏にご助言をいただいた。また富山県立技術短期大学機械専攻科学生の寺西豊、野尻三郎両君の協力をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、オプトロニクス, No. 53, 1986以降で連載されている。
- 2) M. V. Murty: Common Path Interferometer Using Fresnel Zone Plates, J. Opt. Soc. Amer., 53, (1963) 568.
- 3) R. N. Smartt: Zone Plate Interferometer, Appl. Opt., 13, (1974) 1093.
- 4) 中島一敏, 谷川英夫, 松浦 茂: 非球面検査のためのゾーンプレート・コモンパス干渉計, 光学, 10 (1981) 174.
- 5) N. Ohyama, I. Yamaguchi, T. Honda and J. Tsujiuchi: A Dynamic Zone-Plate Interferometer for Measuring Aspherical Surfaces, Opt. Commun., 54, (1985) 257.

—精密工学会刊行図書のご案内

「精密工学シリーズ」

精密工学会編・(株)オーム社発行

工学における精密工学の役割がますます重要になり、すべての工学分野の基礎として位置付けられる時代をむかえつつあります。本シリーズは、学会として精密工学分野を新しい視点で体系化し、かつ幅広く理解されることが必要と考え、精密工学・工業に携わる人々に有効な知識をわかりやすく提供しようとするものです。

「精密機構」(大輪武司ほか著) A5判・216ページ・発行62年4月・定価3000円

目次 1章・序章/2章・精密位置決め機構/3章・情報機器の精密機構/4章・光学機器の精密機構/5章・精密回転機構/6章・精密機構のための超精密測定法

「研削工学」(竹中規雄ほか著) A5判・206ページ・発行62年5月・定価3200円

目次 1章・研削工学の概説/2章・研削力学/3章・研削表面工学/4章・研削砥石工学/5章・研削動力学/6章・研削技術/7章・研磨加工

「自動組立の基礎」(牧野 洋ほか) A5判・180ページ・発行62年6月・定価2700円

目次 1章・自動組立システム/2章・製品設計と工程設計/3章・移送/4章・部品自動供給装置/5章・部品の整列・選別の技法/6章・装入/7章・結合/8章・計測/9章・組立機械の制御/10章・自動車用メータゲージの組立/11章・腕時計の自動組立

お申込みは書店にして下さい。

なお、会員の方で、一括して10部以上購入される場合は、定価を1割引きに致します。その場合は本会へお申込み下さい。発送、代金の請求はオーム社より行います。

また、大会、講習会開催時等に、期間限定割引販売を予定しています。