既製のフィゾー干渉計を基礎としたゾーンプレート干渉計*

神谷和秀** 野村 俊** 宮代 裕*** 吉川和男†
田代発造† 大園成夫†† 小林富美男†††

A Zone-plate Interferometer Based on a Ready-made Fizeau Interferometer

Kazuhide KAMIYA, Takashi NOMURA, Hiroshi MIYASHIRO,
Kazuo YOSHIKAWA, Hatsuho TASHIRO, Shigeo OZONO and Fumio KOBAYASHI

A zone-plate interferometer based on a Fizeau interferometer is proposed to measure shape error of mirrors with spherical and aspherical surfaces. The proposed zone-plate interferometer has zone-plates which generate the wavefronts illuminating perpendicularly to the designed surface of the mirrors. Therefore the interferometer does not need illumination lenses. An analysis of the fringe pattern is performed by the fringe scanning method, because a reference flat mirror on the interferometer and the zone-plate are independent each other. The radial error appears on the shape measurement, when a zone-plate and a mirror under test are not located on the designed position in the interferometer. The procedure for adjusting the zone-plates and mirrors under test is investigated in detail. Experimental results show that spherical and paraboloidal mirrors are measured precisely by using proposed zone-plate interferometer.

Key words : Fizeau interferometer, zone-plate interferometer, shape measurement, aspherical surface, fringe scanning method, computer generated hologram

1. は じ め に

現在、市販されている実用的な干渉計の多くは、フィゾー型干渉計¹⁾であり、生産現場の検査部門などで広く用いられている。その理由として、光学系がシンプルのため小型軽量で取扱いが極めて簡単であり、さらに、位相シフト法²⁾を用いることで干渉じまの高精度解析が簡単に行えるとといった特徴が挙げられる。しかし、球面を測定する場合、球面波を発生させるためのレンズが必要となり、このレンズの精度が測定精度に大きな影響を与える。このため高精度のレンズが必要となり、コストの高いものとなっている。また近年、光学機器に非球面形状を持つ光学素子が多量に使用されるようになり、平面や球面のみならず非球面形状の測定も要求されるようになってきているが、フィゾー干渉計はこのような非球面の測定には適していない。

これまで、触針法、ヌルテスト法等が非球面形状測定法として提案され、研究されている。ヌルテスト法の一つにゾーンプレート原器（同心円状の回折格子）からの回折波面を利用するコモンパス・ゾーンプレート干渉法³⁾がある。ゾーンプレート干渉法は、Computer Generated Hologram (CGH) を用いた非球面測定法の一つであり、測定面の設計形状が既知であれば計算によってゾーンプレート原器の格子パターンを求めることができるため、多大な労力のかかる実際の原器を持つ必要がない。しかし、光学系が他の干渉計に比べて複雑なことや干渉じまの解析に位相シフト法を直接利用できないこと、測定面の中心に穴があると測定が困難になるなどの問題点が残っている。また、CGHを用いた非球面形状測定器を玄間が開発し⁴⁾、平面、球面と同等

な精度での測定を可能としたが、装置が高額なことから一般に普及するまでにはいたっていない。この問題を解決する方法として、橋本らは二波面MZP（マスターゾーンプレート）を用いた非球面の絶対測定法を提案している⁵⁾。この方法は、1枚の二波面MZPによって測定対象の高精度な位置決めと形状の測定が行える特徴を持つ。しかし、形状測定時に距離測定用の波面がノイズとなるため光路中に遮蔽物を挿入しなければならない、測定不能領域が生じる。また、二波面MZPの回折効率が低いためビジビリティの高い干渉じまを得るにいたっていない。

そこで著者らは、距離測定用のゾーンプレート原器⁶⁾と形状測定用のゾーンプレート原器とを分けることにより、ビジビリティの高い干渉じまを得て、実用的な測定を行う方法を提案する。また、絶対形状を測定するための干渉計の調整方法について詳しく検討する。そして、開発した干渉計によって得られた球面と放物面の測定例を挙げ、フィゾー干渉計による測定結果と比較する。

2. 光 学 系

提案する干渉計の概略を図1に示す。基礎となる光学系はフィゾー干渉計である。通常のフィゾー干渉計との違いは、参照面と測定面の間にゾーンプレート原器が挿入されていることである。ゾーンプレート原器（描画された格子パターン）は、平行光で照明されており、入射した波面は、ゾーンプレート原器で回折をする。ゾーンプレート原器は、回折光の一つが測定面に垂直に入射するように設計されており、測定面の設計形状から計算機によって計算され、製作される。回折光は測定面で垂直に反射し、再びゾーンプレート原器で回折して平行な測定光となる。参照面は平面であり、位相シフト法を行うために、ピエゾトランスデューサ（PZT）によって微動できるようになっている。参照面と測定面で反射した波面のうち必要な波面だけ

* 原稿受付 平成6年6月9日

** 正会員 富山県立大学工学部(富山県小杉町黒河5180)

*** 富山県立大学工学部

† 正会員 富山大学工学部(富山市五福3190)

†† 正会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

††† 正会員 富士写真光機(株)(大宮市植竹町1-324)

Fig. 1 Fizeau type zone-plate interferometer

を干渉させるため、ピンホール2を用いてフィルタリングする。非球面の観測時においても、ゾーンプレート原器を二度回折した光は、参照光と同じ平行光となり非点収差を生じないため、空間フィルタとしてのピンホールサイズを大きくしたり、その位置を移動する必要はない。

2.1 干渉じまのビジビリティ

フィゾー干渉計では、干渉じまのビジビリティを良好に保つため、測定面の反射率に合わせて参照面の反射率を変える。提案した干渉計では、干渉計の中に回折格子が入っているためその回折効率を考慮する必要がある。ゾーンプレート原器の回折効率を η 、参照面の反射率を α 、測定面の反射率を β とすると、干渉じまのビジビリティ V は、

$$V = \frac{2\sqrt{\eta^2\beta(1-\alpha)^2\alpha}}{\eta^2\beta(1-\alpha)^2 + \alpha} \quad (1)$$

で与えられる。参照光と測定光の強度が等しい場合、すなわち、以下の条件を満たす場合、 V は最大となる。

$$\eta^2\beta(1-\alpha)^2 = \alpha \quad (2)$$

2.2 ゾーンプレート原器の位置

本実験で用いるゾーンプレート原器は、格子の断面形状が矩形である。そのため、不要な回折光が発生して、これらがノイズの原因となる。不要な回折光はピンホール2によってフィルタリングされるが、以下に述べる二つの条件では、フィルタリングによってノイズ成分のみを空間分離することができなくなる。

図1において、ゾーンプレート原器からゾーンプレート原器によって収束する波面の収束点までの距離を a 、ゾーンプレート原器から測定面までの距離を b とする。第一の条件は、 a と b が等しいとき、つまり、測定面の曲率半径 R の半分的位置にゾーンプレート原器が置かれる場合である。このとき、ゾーンプレート原器からの回折光の収束点がミラー面上に局在し、測定面で反射して再度回折した波面が測定波面と同一の光路に戻る。戻った光は、ピンホールを通過するため干渉じまのノイズとなる。第二の条件は、 a と b の比が1対2のときで、ゾーンプレート原器を透過した平行光は測定面で反射し、測定面の焦点とゾーンプレート原器の収束点が一致する。反射光が再びゾーンプレート原器で回折すると、測定波面とほぼ同一の光路に戻ることに

なる。ピンホールでは除去できないノイズとなる。したがって、干渉計におけるゾーンプレート原器の位置は、前述した二つの条件を避け、設計すべきである。

2.3 測定誤差の要因

測定誤差の要因として、ゾーンプレート原器の基板を通る波面の精度、ゾーンプレート原器の格子の描画精度、ゾーンプレート原器の位置と傾きの位置決め精度が挙げられる。ゾーンプレート原器の基板を通る波面の精度は、ガラス基板の精度に依存する。本実験で用いたガラス基板は、透過波面精度（往復の波面の精度）が $\lambda/10$ よりも良い精度を持っている。したがって、光源の波長が $0.6328\mu\text{m}$ であるため、形状測定の誤差に現れる大きさは $0.06\mu\text{m}$ 以下となる。次に、ゾーンプレート原器の格子の描画精度は、 $0.1\mu\text{m}$ であり、周辺部に行くにしたがって格子間隔が狭くなるため、測定誤差に与える影響は大きくなる。本実験に用いた最小の格子間隔は $3.8\mu\text{m}$ であるため、最大で2.6%の誤差となる。 $\lambda/2$ ごとに1本の干渉じまが生ずるから、 $0.008\mu\text{m}$ の測定誤差となり、この誤差はほとんど無視することができる。ゾーンプレートの位置と傾きに関する誤差は、中島らによって解析されているが⁷⁾、本干渉計では、その誤差を次節の方法によって低減したため、この誤差もほとんど無視することができる。したがって、ゾーンプレート原器の基板の精度が測定精度に最も大きく影響を与えるため、精度の良い基板を用いなくてはならない。

3. 干渉計の調整方法

干渉計によって球面や非球面を測定する場合、干渉計自体の調整はもちろんのこと測定対象まで含めた系での調整が必要である。しかし、ゾーンプレート原器と測定面との距離を設計通りに配置することは難しい。これまで干渉計と測定面との距離の設定は、得られた干渉じまを観測することで行われてきた。そのため、測定結果の曲率や非球面係数に誤差が含まれる。

ここでは、絶対形状を測定するために必要な干渉計の調整手順について述べる。調整は、3段階に分けて行う。始めに測定面と光軸との真直度の調整、次に距離測定用のゾーンプレートを用いて測定用ゾーンプレート原器と測定面との距離の調整、最後に形状測定用のゾーンプレート原器と測定面の相対位置の微調整を行う。これらの光学系の調整は一見複雑に思えるが、測定面の光軸がただ一つである非球面の場合でも実際には2～3分で行うことができる。以下に詳細な手順を示す。

3.1 測定面の光軸調整

測定面の光軸調整は、図2で示すように測定面に製作された基準面にオプティカルパラレルプレートのをせ、オプティカルパラレルプレートの表面と参照面とで反射した波面の干渉を用いて行う。この基準面は、測定面の光軸と直交した平面であり、測定面の加工時に測定面の周辺に平面をわずかに残せばよい。

測定面の軸と光軸が合っていない場合、図3(a)のように直線の干渉じまが得られるため、測定面の傾きを調整することで図3(b)のようなヌルと呼ばれる状態の干渉じまにすることができ、測定面の光軸合わせが行える。

3.2 ゾーンプレート原器と測定面との距離調整

測定用ゾーンプレート原器と測定面の距離の調整は、平

行光を入射したとき測定面で収束するように設計した距離測定用ゾーンプレートを用いて行う。図2において距離測定用ゾーンプレートを干渉計のゾーンプレート台にセットし、測定面上のオプティカルパラレルプレートを、中心にピンホールを持つマスクAに取り替え、不要となる光を取り除き、参照面で反射する波面と干渉させて距離の誤差を示す干渉じまを得る。距離が不正確な場合得られる干渉じまは、図4(a)のように同心円状になる。また、距離測定用のゾーンプレートが光軸から外れている場合、得られる干渉じまの形状はキャリアとなる干渉じまによって変調されてひずむ⁸⁾。距離と光軸が一致すると干渉じまは図4(b)で示すようなヌルとなる。

測定用ゾーンプレート原器の傾きは、距離の調整に用いたマスクAをマスクBに取り替え、測定面からの反射光を完全に除去し、ゾーンプレート原器で反射した光と参照面での反射光との干渉じまを観測することで容易に調整できる。傾きがある場合、測定面の傾きと同様に直線状の干渉じまが得られる。ただし、この干渉じまは、ゾーンプレート原器の格子に描画されている面の周辺部分に得られる。この干渉じまは、ゾーンプレート原器の描画されている面の周辺部分からの反射(4%)と参照面での反射光とによるも

Fig. 2 Adjustment of optical system

Fig. 3 Fringe pattern expressing a tilt of an optical axis

Fig. 4 Fringe pattern expressing an error of distance between the zone-plate and the mirror under test

のである。

3.3 測定用ゾーンプレート原器の微調整

距離測定用ゾーンプレートで得られる干渉じまが完全にヌルとなり、距離が正確に決まった後、距離測定用ゾーンプレートと形状測定用ゾーンプレート原器とを入れ換え、マスクを取り除く。入れ換えによって生じたゾーンプレート原器のわずかな傾き(干渉じまで1~2本)を前述の方法で調整し、光軸に対して垂直に置かれた測定面のXYステージを移動させてゾーンプレート原器の中心軸と測定面の光軸を合わせる。測定面が光軸に対して垂直方向にずれていると直線状の干渉じまが得られる。このずれの量を干渉じまから求めて補正を行うと、測定面の形状誤差のみを表す干渉じまを観察することができる。

4. 実験装置

図5に実験装置を示す。実験には富士写真光機製のフィゾー干渉計FUJINON・F601を用いた。干渉じまの解析には、画像解析装置FX-03を用いた。参照面をPZTで微動し、位相シフト法により形状誤差を解析した。ゾーンプレート原器の基板には、透過波面精度が $\lambda/10$ よりも良いオプティカルパラレルを用いた。この基板にフォトレジストを塗布し、レーザで格子の書き込みを行い、この基板を現像した後、 SiO_2 の蒸着を行った。蒸着時間により膜厚の調整をして位相制御を行い、フォトレジストを除去して、位相型のゾーンプレート原器を製作した。フォトレジストは外力に弱く、膜厚の制御が難しい。そこで、外力に強く、膜厚の制御が比較的容易な SiO_2 を蒸着することで実用的なゾーンプレート原器が実現した。本実験では、測定に不必要な透過光が最小となるように、位相格子の位相差を π 、すなわち SiO_2 を通過する透過光と空気を通過する透過光の光路差を $\lambda/2$ とした⁹⁾。 SiO_2 の屈折率が1.5、光源の波長 λ が $0.6328\mu\text{m}$ であるから、蒸着する SiO_2 の膜厚は $0.6\mu\text{m}$ となる。実際の膜厚の調整は、 SiO_2 を蒸着したゾーンプレート原器の格子の位相差をモノクロメータによって測定することで行った。したがって、0次の回折光はほとんど出ず、1次の回折効率は40%になる。また、裏面には、反射防止膜を蒸着した。

干渉じまのビジビリティが高くなる条件として、ゾーンプレート原器の回折効率を40%とした場合、式(2)によって参照面の反射率は12%となる。通常、フィゾー干渉計では、繰返し干渉によって干渉じまのフィネスが上がるが、提案した干渉計の場合、2回目の反射強度が1回目の反射の約1.6%となるためフィネスは上がらない。したがって、位相シフト法による縞解析に与える誤差の影響は少ない。

Fig. 5 Experimental setup

5. 実験結果

超精密旋盤によって切削された、曲率半径140mm、直径30mmの凹球面鏡を本干渉計とフィゾー干渉計で測定し、比較を行った。始めに従来通り干渉計を調整し形状を解析した。この方法で干渉計を調整すると、測定波面と測定面との光軸方向のずれ成分（パワー成分）による収差が解析結果に含まれる。この収差は、ミラーの中心からの距離の2乗に比例するため、この収差が最小となるような測定波面の位置を最小自乗法によって算出し、計算上、測定波面が移動したように補正（パワー除去）を行った。

図6は、本干渉計を用いて形状を測定したヌルの状態の干渉じまを示している。干渉じまを解析するため、干渉じまの位相を $\pi/2$ ごとに变化させたものが図7である。図8に測定面の形状誤差の鳥瞰図を示す。図8(a)はパワー除去を行っていない場合、図8(b)はパワー除去を行った場合を示している。比較のため、同じ試料をフィゾー干渉計を用いて測定した。得られた干渉じまを図9に、形状誤差を図10に示す。パワー除去を行い、収差の補正を行った結果を比較すると、球面用フィゾー干渉計で得られた形状誤差のP-V値が $0.12\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.022\mu\text{m}$ に対して本方法ではP-V値が $0.13\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.021\mu\text{m}$ となり、良い一致が見られた。また、提案した干渉計での干渉じまのビジビリティは高く、球面用ゾーンプレート干渉計と比較して、同程度の画質が得られた。測定面と回折光による測定波面とが可能な限りフィッティングするように調整を試みたが、パワー除去の前後をそれぞれの解析結果で比較すると、測定面の形状が明らかに違い、測定波面が測定面に有効にフィッティングしていないことがわかる。

次に、距離測定用のゾーンプレート原器を用いてゾーンプレート原器と測定面との距離を調整し、形状の測定を行った。得られた干渉じまを図11に、形状誤差を表す鳥瞰図を図12に示す。図12(a)と図12(b)の両者とも形状誤差のP-V値が $0.19\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.031\mu\text{m}$ となり、パワー除去の前後で測定結果は一致した。つまり、測定面と測定波面との光軸方向のずれがなく、良好に測定波面のフィッティングが行われたことがわかる。また、本方法による結果とフィゾー干渉計による結果を比較すると、フィゾー干渉計で得られた形状誤差のP-V値が $0.12\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.022\mu\text{m}$ に対して本方法ではP-V値が $0.19\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.031\mu\text{m}$ となり、 $\lambda/10$ 程度の違いが見られる。図8の補正後の測定との比較でも、P-V値が $0.13\mu\text{m}$ であったものが同一の原器で $\lambda/10$ 程度異なった結果となった。これは、提案した干渉計がフィゾータイプであるため、振動や空気の擾乱による誤差が原因の一つとして考えられる。しかし、それだけで $\lambda/10$ もの誤差が出るとは考えにくい。今回、それぞれの実験を数日に分けて行ったため、測定対象が室温の変化にともない、熱変形したことが最も大きな原因であろうと考える。提案した方法で干渉計の調整を精度よく行うことができ、パワー除去を行うことなく形状を測定することができた。以上のことから、距離測定用ゾーンプレート原器の有効性を確認した。

ここで、本干渉計で測定できるミラーの開口数（NA）の限界について考察する。本干渉計は、同心円状の回折格子であるゾーンプレート原器を用いているため、NAの限界は

Fig. 6 Fringe pattern obtained by the proposed zone-plate interferometer

Fig. 7 Phase shifted fringe pattern obtained by the zone-plate interferometer

(a) Bird's-eye view without power removal

(b) Bird's-eye view with power removal

Fig. 8 Bird's-eye view of the shape error of a spherical mirror analyzed by the zone-plate interferometer

Fig. 9 Fringe pattern obtained by the Fizeau interferometer

(a) Bird's-eye view without power removal

(b) Bird's-eye view with power removal

Fig. 10 Bird's-eye view of the shape error of the spherical mirror analyzed by the Fizeau interferometer

その格子の描画可能な最小ピッチに依存する。現在、著者の研究室で製作可能なゾーンプレート原器の最小ピッチが $2\mu\text{m}$ であるため、ゾーンプレート原器を平行光によって照明していることを考慮すると、0.3程度のNAを持つミラーまで測定することができる。

応用実験として、放物面用に製作したゾーンプレート原器を用いて、直径50mm、焦点距離70mmの放物面ミラーの測定を行った。図13が得られた干渉じまである。図14に干渉じまを解析して得られた形状誤差を鳥瞰図で示す。形状誤差のP-V値が $0.12\mu\text{m}$ 、RMS値が $0.012\mu\text{m}$ となった。非球面の測定であっても球面と同じように簡単に測定が行えることを確認した。ここで、非球面のミラー頂点とそのミラーの口径を通る球面を近似球面と定義し、その近似球面と非球面の光軸方向における最大ずれ量を非球面度と定義すると、測定を行った放物面の非球面度は $4.45\mu\text{m}$ となる。この放物面を一般のフィゾー干渉計（光源の波長は λ

$=0.6328\mu\text{m}$ とする）を用いて、球面のフィッティングを行い干渉じまを観測したとすると、測定範囲に28本の同心円状の干渉じまが現れることになる。得られる干渉じまが極端に密になり、干渉じまを解析することが困難なため、この放物面の比較測定は行っていない。

6. ま と め

本報告では、既製のフィゾー干渉計にゾーンプレート原器を用いた簡単なシステムで球面ならびに非球面を測定可能な干渉計を提案した。以下にその特徴をまとめる。

- (1) 測定面に対応したゾーンプレートで、球面のみでなく非球面も測定できる。
- (2) 距離測定用ゾーンプレートを使用することで、測定面と干渉計の距離の調整が正確にかつ容易に行え、絶対形状測定ができる。
- (3) 得られた干渉じまは位相シフト法によって高精度に解析できる。

以上のことから、球面のみならず非球面測定のための有力な干渉計の一つとして用いられることが期待される。

謝 辞

最後に、測定試料を提供いただいた（株）不二越の薄木雅雄氏、および、実験・解析に協力いただいた富士写真光機（株）肥塚正敏氏に感謝する。また、本研究の一部は、平成5年度文部省科学研究費補助金（奨励研究A No.05750126）を使って行われた。ここに深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) D. Malacara: Optical Shop Testing, Wiley-Interscience, N.Y., (1992) 18.
- 2) J.H.Bruning, D.H.Herriot, D.J.Gallagher, D.P.Posenfield, A.D.White and D.J.Brangaccio: Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses, Appl.Opt., 13, 5, (1974) 2693.
- 3) R.N.Smartt: Zone Plate Interferometer, Appl.Opt., 13, 5, (1974) 1093.
- 4) 玄間隆志：計算機プログラムを用いた非球面形状測定器，光学，16 (1987) 147.
- 5) 橋本清文，佐藤 彰：MZPを用いた非球面の絶対形状測定技術の開発，光技術コンタクト，31, 8 (1993) 66.
- 6) 神谷和秀，野村 俊，宮代 裕，吉川和男，田代発造，鈴木正根，大園成夫：ゾーンプレートを用いた距離測定法，1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1993) 445.
- 7) 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.
- 8) 神谷和秀，野村 俊，宮代 裕，吉川和男，田代発造，大園成夫，鈴木正根，小林富美男：ゾーンプレート干渉稿の生成について，1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1992) 289.
- 9) 神谷和秀，野村 俊，宮代 裕，吉川和男，田代発造，葛 普治，大園成夫，鈴木正根，小林富美男：高次回折光によるゾーンプレート干渉法（位相型ゾーンプレートの回折効率について），1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1993) 227.

Fig. 11 Fringe pattern obtained by the zone-plate interferometer

(a) Bird's-eye view without power removal

(b) Bird's-eye view with power removal

Fig. 12 Bird's-eye view of the shape error of the spherical mirror analyzed by the zone-plate interferometer

Fig. 13 Fringe pattern obtained by the zone-plate interferometer

Fig. 14 Bird's-eye view of the shape error of a paraboloidal mirror analyzed by the zone-plate interferometer