

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月26日現在

機関番号：33811
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：23656111
研究課題名（和文） 参照面不要を特徴とする微小非球面レンズ測定用波長走査干渉計の開発
研究課題名（英文） Development of reference-less wavelength scanning interferometer for micro aspherical lens
研究代表者 花山 良平（HANAYAMA RYOHEI） 光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教 研究者番号：20418924

研究成果の概要（和文）：本研究では参照面不要を特徴とする2つの干渉計の構築を行った。1つには光軸に対して回転方向と半径方向の直交する2方向のシアリング干渉計測を可能とする極座標系シアリング干渉計の構築に成功した。次に液晶空間光位相変調器を参照鏡に用いた零位法干渉計の構築を行い、測定のダイナミックレンジを向上させることが可能であることを示した。また、干渉縞位相検出手法のあらたな評価方法を開発し、位相検出手法の改良を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed two types of interferometer characterized in that reference surface is not necessary. One is polar coordinate shearing interferometer, which realizes wave front shearing for rotational and radial direction. Another is zero-method interferometer using spatial light modulator as a reference mirror. In the interferometer, the dynamic range was expanded by zero-methodology. Moreover, the evaluation method of phase detection algorithms were also developed. It is of assistance of improvement of phase detection algorithms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 生産工学・加工学

キーワード：精密位置決め・加工計測、光干渉計測

1. 研究開始当初の背景

微小径レンズは寸法が小さく取り扱いや測定・評価が容易ではない。また、組み合わせレンズを構成することが困難であり、単レンズで要求性能を満足させるためにしばしば非球面レンズが用いられ、正確な形状測定は困難である。レンズやミラーのような表面が滑らかな形状の測定には光干渉計が良く用いられるが、非球面を測定する場合、光干渉計が通常対象とするほぼ平面、あるいはほぼ球面であるような対象に対し、非球面形状は変化が大きく、ダイナミックレンジが不足する。これに対し、製品ごとにホログラフィ技

術を用いたヌルレンズを作成することが行われているが、その製作能力を有する企業は世界的に限定されている寡占状態にあり、費用が高い。非球面の測定にはこの他、測定しようとする面を分割して測定するステッチング干渉、測定面全体を2次元的に走査し、各点における傾き角や法線方向を調べる方法、3次元測定器やAFMによる各点の高さ測定による方法、などが用いられている。これらの内、面内を2次元走査する手法は測定時間が長い。また、ステッチング干渉計は装置が高価で、計算処理による合成を行うため測定の信頼性の検証が必要である。そこで、

1) ナノメートル程度の精度で測定可能、2) 面全体を同時に測定可能、3) 測定ごとに参照面やヌルレンズを製作する必要がない、等を満足する測定手法の開発を目指した。

2. 研究の目的

上述の背景の元、製品ごとに参照面を用意することなく、通常の球面参照面を使用、もしくは参照面を用いることなく、非球面形状を測定可能な干渉計の開発を目的とした。特に実産業において小型化が著しい微小径のレンズの形状と光学性能評価を行うことが可能な干渉計を目標とした。実際には

- 1) 極座標系シアリング干渉計による自己相関干渉計
 - 2) 液晶空間光変調器 (LCoS-SLM) を用いた任意波面生成による零位法干渉計
- の2つの実験光学系を構築し、優劣の判定を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 極座標系シアリング干渉計は回転シアリング干渉計と半径方向シアリング干渉計により構成されている。図1に模式的に示す。回転シアリング干渉計は測定しようとする波面と、それ自身を光軸を中心に僅かに回転させた波面とを干渉させる(図1上段)。波面の干渉には2個のダブプリズムが用いられる。ダブプリズムは台形の形状をしており、斜面から入射した像を屈折と反射により反対側の斜面から上下反転した像として出射する。このプリズムを光軸を中心に回転させると任意の角度に回転させた像を得ることができる。ダブプリズムのうち一方は静止しており、入射波面を上下反転させるのみであるが、他方は光軸周りに回転可能なホルダに搭載し、上下反転の上、任意角度に回転させた波面を得る。これにより入射波面の円弧方向に近接した2点間の位相差が測定され、入射波面の円弧方向の差分位相分布が測定される。従って、非球面度の大きな非球面レンズであっても、軸対称性を仮定すれば理想的には円弧方向には位相差は存在せず、形状異常があっても干渉縞が飽和することなく形状測定することが可能である。

(2) 半径方向シアリング干渉計では入射波面に対しそれを光軸中心に拡大、あるいは縮小させた波面を生成し、互いに干渉させる(図1下段)。像の拡大・縮小はズームレンズを用いる。一方をズームレンズを透過させて拡大・縮小し干渉させる。これにより入射波面の半径方向に近接した2点間の位相差が測定され、入射波面の半径方向の差分位相分布が測定される。すなわち非球面形状を最も直接的に測定することが可能

である。これら2つの干渉計による測定結果は互いに直交する方向の差分測定である。これらを合成し、積分を行うことで測定しようとする波面の位相分布を測定する。

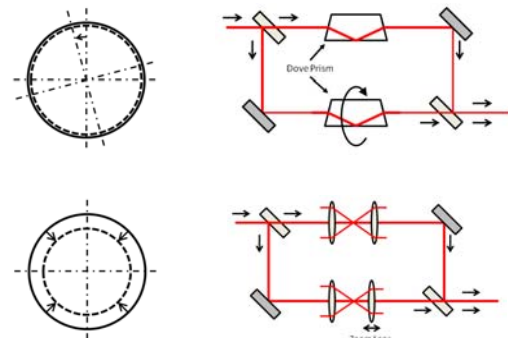


図1 極座標系シアリング干渉計
上段：回転シアリング干渉計
下段：半径方向シアリング干渉計

(3) 零位法干渉計の概念図を図2に示す。入射されたレーザー光は空間フィルタを通して平行光にされた後、ビームスプリッターで2つの光束に分割される。片方は信頼できるレンズにより集光され測定しようとするレンズに照射される。レンズからの反射光は集光レンズによりほぼ平行な光となりビームスプリッターに戻る。もう一方はSLMに照射される。SLMはコンピュータからの制御により入射光に対し任意の位相分布を付加して反射させる。この2つの光束ビームスプリッターで統合され干渉縞を形成する。干渉縞は輝度分布としてカメラで記録される。この干渉縞から位相検出を行い、2光束の波面の位相分布の差が求められる。この位相分布の差が無くなるようにSLMの制御信号にフィードバックし、最終的に位相差が無くなった時点でのSLMへの制御信号により測定対象の形状を決定する。

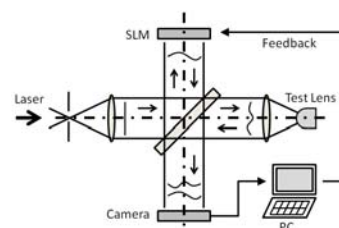


図2 LCoS-SLMを用いた零位法干渉計

(4) 両者に共通し、位相検出には波長走査干渉法を用いる。位相検出には波長走査干渉法を用いる。通常位相シフト法で用いられるピエゾ素子等により位相差を変化させる代わりに光源波長を僅かに(0.2nm程度)変化させることで位相差を変化させる。測

定対象が小さかったり、形状の変化率が大きかったりする場合は、測定中の位置ずれが誤差要因となる。波長走査干渉法を用いると機械的な可動部を排除可能である。図3に波長走査干渉法用に導入した波長走査レーザー光源を示す。外部共振器型の波長可変光源であり、波長可変幅は0.2nmである。



図3, 波長可変レーザー

4. 研究成果

(1)図4に構築した極座標系シアリング干渉計の概観を示す。サニャック干渉計として構築した。サニャック干渉計では偏光ビームスプリッタ (PBS) で偏光方向により2分割された光が図4中の線で示す閉じた経路を互いに逆向きに進行し、PBSで再結合する。開発した干渉計ではこの経路上に後述の波面回転機構、および波面拡大・縮小機構を設置し、回転方向と半径方向のシアリング干渉を実現した。この構成により振動等の外乱に頑強であるとされる同一経路干渉を実現した。また、波面回転機構と波面拡大・縮小機構を計画段階では2つつ用いる予定であったがこの構成により各1つで実現することができた。

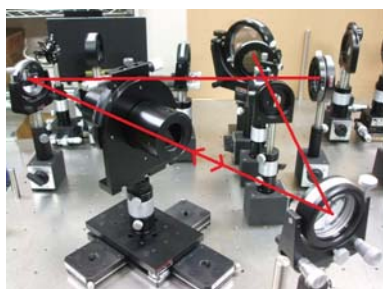


図4, 構築した極座標系干渉計

回転シアリング干渉計用波面回転機構と半径方向シアリング干渉計用波面拡大・縮小機構の外観写真を図5に示す。回転シアリング干渉計を実現する波面回転機構(図5左)はダブリズムと回転機構を有するプリズムホルダからなる。ダブリズムを用いると入射波面を光軸周りに回転させることが可能である。駆動にはマイクロメータヘッドを用いており、回転の表示分解能は5分である。一方、半径方向シアリング干渉計を実現する波面の拡大・縮小機構(図5右)は固定焦点カメラレンズとズーム機構付きカメラレン

ズをそれぞれの焦点が一致するように接続して構築した。電動ズームレンズの焦点距離を固定焦点レンズの焦点距離の前後で変化させることで波面を拡大、または縮小させることが可能である。

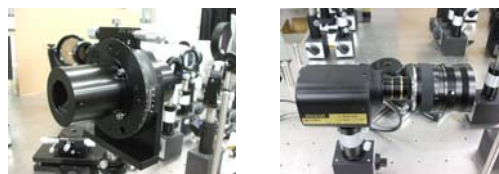


図5, 波面回転機構(左)と波面拡大・縮小機構(右)

構築した干渉計で取得した干渉縞画像を示す。図6左は回転シアリング干渉計で取得した干渉縞画像の例である。この例の試料はボールベアリング用のセラミクス球であり、市販の干渉計による測定では凹凸はλ/10以下であった。図6右は半径方向シアリング干渉の干渉縞の例である。この例の試料は市販の非球面レンズであり、その形状に起因すると思われる同心円状の干渉縞が観測された。このように極座標系干渉計を構築し、回転方向と半径方向の直交する2方向のシアリング干渉縞画像を取得することに成功した。

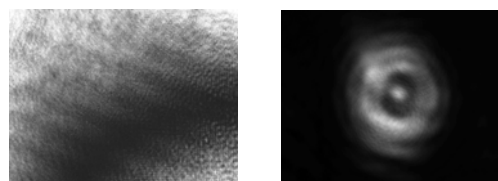


図6, 極座標系干渉計の干渉縞の例
回転シアリング干渉(左)、
半径方向シアリング干渉(右)

(2)次に構築した零位法干渉計の概観を図7に示す。

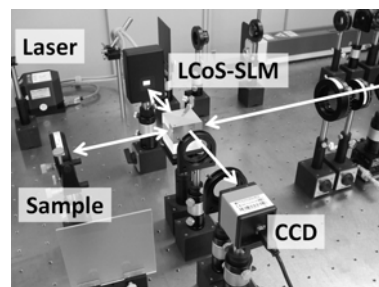


図7, 構築した零位法干渉計

この系は Twyman-green 干渉計を基本としている。コリメートされたレーザー光をビームスプリッタで分割し、片方は試料を照明し、他方は空間位相変調器 (SLM)

を照明する。試料からの反射光は試料表面形状の情報を保持し、他方は SLM により位相変調を受け、ビームスプリッタに戻り、互いに干渉し干渉縞が観測される。干渉縞画像から位相分布が計算され、その結果を元に SLM への制御信号を変化させる。この過程が、検出される位相分布が設定値以下となるまで繰り返され、最終的に測定対象の形状が参照波面に複写されることで測定結果が得られる。

零位法干渉計による測定可能範囲拡大を確認するために、大きな傾斜を有する試料に対する干渉計測を行った。試料には平面ミラーを大きく傾斜させて用いる。参照波面制御前の干渉縞画像（図 8 左）では画像横幅全幅 7mm に対し 160 本の干渉縞が観測され、傾きは 7.2mrad.であったのに対し、参照波面制御により干渉縞は 7 本に減少した（図 8 右）。これは密な干渉縞が観測されるような大きな傾斜を有する試料に対し、干渉計が適応的に応答し、干渉縞密度を低下させることで測定を容易にすることができたことを示す。すなわち、測定可能範囲の拡大に成功した。

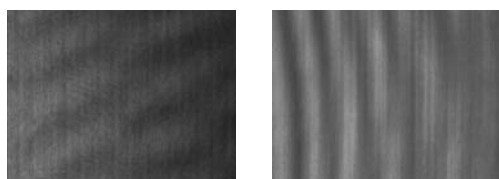


図 8, 零位法干渉計で得られた大傾斜試料に対する干渉縞
(左)初期状態、干渉縞 160 本
(右)補償操作後、干渉縞 7 本

また、SLM 上で人工的に形成した形状欠陥に対する測定においても、構築したフィードバックシステムにより SLM が制御され、測定対象の形状が参照波面に転写されたことを意味するほぼ平面の位相分布を有する干渉縞画像が観測された。このことは天秤ばかりで分銅を測定対象と同じ質量になるように操作することで対象の質量を測定することと同様の関係であり、零位法を干渉計に導入することを成功した。

(3) 本研究では非球面等の複雑形状の干渉形状計測のための参照面不要を特徴とする 2 種類の干渉計の構築を行った。

極座標系シアリング干渉計では回転方向と半径方向の直交する 2 方向のシアリング干渉計測を実現するダブプリズムを利用した波面回転機構とズームレンズを利用した波面拡大・縮小機構を構築した。これらを用いてシアリング干渉縞画像の取得に成功した。

零位法干渉計では参照鏡として任意の位

相分布を有する参照波面を生成可能な空間位相変調器を用い、計測した干渉縞の位相分布により参照波面を適応的に変化させ、最終的に測定対象の形状を参照波面に複写することにより形状測定とする、これまでにない新たな様式の干渉計測手法を構築した。これにより大きな傾斜を有する試料に対する測定可能範囲を拡大できることを実証した。このことは球面からの乖離が大きな非球面形状の測定に有用である。

極座標系シアリング干渉計は光軸に対し軸対称性を有するレンズ等の光学素子の計測に適している。一方、零位法干渉計は自由曲面等の任意の複雑形状にも適用可能である。これらの長所・短所を組み合わせることで非球面形状計測の信頼性向上に寄与する干渉計が構築可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 3 件)

(1) Ryohei Hanayama, Katsuhiro Ishii, "Development of a zero-method interferometer by means of dynamic generation of reference wave front," SPIE Optical Metrology 2013, Munich.

(2) 花山良平, 石井勝弘, "空間位相変調器を用いた零位法干渉計の開発," 第 50 回光波センシング技術研究会講演論文集, 59-64(2012) 東京.

(3) R. Hanayama and K. Hibino, "Error estimation of phase detection algorithms and comparison of window functions Error analysis of phase detection algorithms in the frequency domain," Interferometry XVI, (2012) San Diego.

[その他]

ホームページ等

<http://www.gpi.ac.jp/research/teacher/professor-16.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花山 良平 (HANAYAMA RYOHEI)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・助教

研究者番号：20418924

(2) 研究分担者

石井 勝弘 (ISHII KATSUHIRO)

光産業創成大学院大学・光産業創成研究科・准教授

研究者番号：30311517