

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：33811

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820025

研究課題名(和文)位相計測ディフレクトメトリ法による干渉計測の測定精度の相互保証体系の構築

研究課題名(英文)Constraction of a reliable shape measurement system using interferometry and phase measurement deflectometry

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・講師

研究者番号：20418924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：広いダイナミックレンジが必要な非球面や自由曲面等の複雑曲面形状を数nm程度の高い分解能で測定可能な位相計測ディフレクトメトリ法を用いた形状測定装置の開発を行った。位相計測ディフレクトメトリと干渉計測は相補的な関係にあり、両者を融合することで高い信頼性を有する形状計測手法が構築可能である。

離散的な縞に基づく位相計測ディフレクトメトリでの位相検出制度について検討を行い、離散的な画素構造と輝度階調を有することによる位相計測誤差は1/1000波長程度であった。これは測定対象面により偏向された視線が見通す先の位置を液晶モニタの画素間隔の1/1000程度の分解能で決定可能であることを示している。

研究成果の概要(英文)：Phase measuring deflectometry is an emerging technique to measure specular complex surface, such as aspherical surface and free-form surface. It is very attractive for its wide dynamic range of vertical scale and application range. On the other hand, interferometry is accurate and well-known method for precision shape measurement. In interferometry, the original measured data is phase of interference signal, which directly shows the surface shape of the target. Then I proposed measuring method using both interferometer and deflectometry for reliable shape measurement.

One of the major difference of deflectometry against to interferometry is artificial, pixelated and quantized fringe. In phase detection for such a fringe, there are some limitation in the resolution. The resolution causes that of gradient of normal vector. However, it is expected that it can be achieved several thousandth of wavelength of phase resolution.

研究分野：精密計測

キーワード：形状計測 位相計測ディフレクトメトリ 金型 超精密計測 計測工学

1. 研究開始当初の背景

本研究課題では非球面レンズや非球面鏡、自由曲面を有する金型などを対象とした形状測定を行う。この様な複雑曲面の測定には3次元測定器、原子間力顕微鏡(AFM)などが用いられる。また光学部品の表面など鏡面が対象であれば特殊な干渉計が用いられる。これらの他、近年では測定対象表面を微小領域に分割し、各区分の法線方向を測定し、それを元に全体形状を導くディフレクトメトリと呼ばれる手法が高輝度X線用ミラーなどの精度を特に要したり、対象が大型であったりする場合に良く用いられる。この手法はAFMのカンチレバの計測などで用いられるような光てこと同様な原理で、微小な角度変化を大きな位置の変化に変換することにより高い精度の測定を実現している。また実際には法線方向測定ヘッドに測定対象上を2次元走査させることで実現しており、精度が確保可能なレールを用意することができれば測定対象の大きさに制限はない。一方で、2次元走査には有限の時間を要し、精度を追求するにつれて測定時間が長大となる問題がある。

これに対し、近年、ドイツを中心に位相計測ディフレクトメトリ法が注目されている。この手法は従来のディフレクトメトリと異なり、面計測を行うため広い領域を一度に測定可能であり高速である。ドイツでは自動車のボディやシリコンウェハなどの

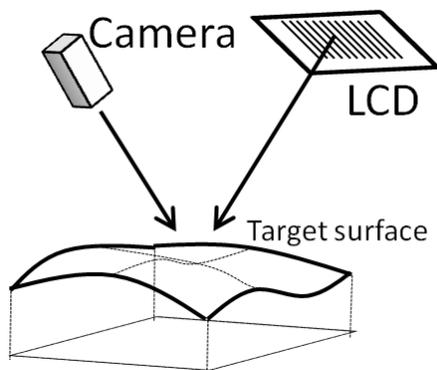


図1 位相計測ディフレクトメトリ法の概念説明図

形状や欠陥の検査に用いられている。具体的には、試料の周囲に縞模様を表示させた液晶モニタを置くと試料表面にその縞模様が反射して映ることを利用する(図1)。試料の平面度が高く表面粗さも小さければ試料表面を通して見える縞模様は元の縞模様の通りに規則正しく見える。しかし、試料にうねりや凹凸、欠陥などが存在する場合、縞模様は歪んで見える。これは経験的には良く知られた事実であるが、これを精密3次元計測に応用している。縞投影法とよく似ているが、縞投影法は縞模様を試料表面上に投影し縞模様の像が試料表面上に存在するのに対し位相計測ディフレクトメトリ法では試料の周辺に置かれた液晶モニタ上に縞模様の像が存在する。この手法も従来のディフレクトメトリ法と同様に光源から発射された光線が試料表面で偏向(deflection)される様子を観測することで表面形状を測定している。すなわち、いずれもこの手法は光干渉計測に匹敵する**数 nm 程度の分解能**が報告されている一方、大きな形状変化が存在する場合でも測定可能であり、**高精度・広ダイナミックレンジ**を実現可能である。一方、傾斜の計測は本質的に微分計測であり、形状導出には積分計算が欠かせないが、その計算過程で試料、液晶モニタ、カメラの相対位置の測定誤差に起因して形状誤差が大きくなることが報告されているなど測定の信頼性の向上が課題となっている。

一方、干渉計測は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。図2には放物面鏡を球面原器を用いて光干渉計測を行った場合に観測される干渉縞画像のシミュレーション

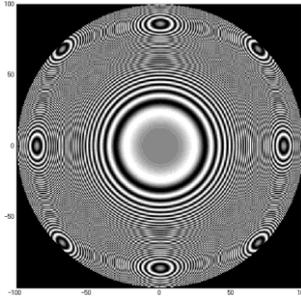


図2 放物面鏡の光干渉計測のシミュレーション

結果を示す。中央部付近の曲率がほぼ一致した領域では干渉縞が明瞭に観測されているが、周辺部に行くに従って干渉縞間隔は密となり、やがてエイリアシングによる偽の縞模様が観測されるようになる。実際にはこのような状況ではカメラの1画素内に複数本の干渉縞が存在することになり、輝度が画素内で平均化され縞模様は観測されない。これに対し、ホログラフィ技術によるヌルレンズを用いた干渉計測や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法などが行われている。

位相計測ディフレクトメトリ法と光干渉計測は測定原理は異なるが、測定範囲や測定分解能が同程度であり測定の信頼性確認のための相互比較に適している。また、光干渉計測は広ダイナミックレンジ化が課題であり、位相計測ディフレクトメトリ法では絶対的形狀導出が課題であることは互いに**相補的な関係**にある。そこで両者を組み合わせることで測定精度を相互に保証し、高精度・広ダイナミックレンジと高い信頼性を兼ね備えた複雑曲面の測定体系の構築を考案した。本課題の成果により、非球面形状を簡便かつ高信頼に測定可能になることが期待される。また、位相計測ディフレクトメトリ法は非常に簡便かつ多用途な3次元形状計測手法であり、これの国内への普及を図ることで国内の工業製品の品質向上に資することが期待できる。

2. 研究の目的

測定に広いダイナミックレンジが要求される非球面や自由曲面などの複雑な曲面の形状を数 nm 程度の高い分解能で測定可能なディフレクトメトリ法を用いた形状測定装置の開発を行う。ここでのディフレクトメトリ法とは従来行われている試料表面上での2次元走査を伴わない、面計測型の新たな手法であり、従来手法より高速である。開発する形状測定装置と光干渉計との間で測定結果を比較することにより、測定精度の相互保証を行う。これにより高精度・広ダイナミックレンジと高い信頼性を兼ね備えた複雑曲面の測定体系の構築を目指す。本課題では(1)位相計測ディフレクトメトリ法によるレンズやミラーなどの非球面光学素子の形状測定への適用可能性について明らかにし、(2)光干渉計測との測定データの高精度比較を実現する枠組みを構築し、(3)測定データの相互保証による測定の信頼性の向上についての検証を行う、これらのことを明らかにしていく。

3. 研究の方法

(1)本課題ではまず、位相計測ディフレクトメトリ測定装置の構築を行う。構築する装置は縞パターン提示用液晶ディスプレイ、画像取得用カメラ、および試料台からなる。液晶ディスプレイには縞模様などの単純な周期的パターンを提示する。試料が鏡面であればその表面に周囲の情景とともに液晶ディスプレイに提示された縞模様が映り込む。映り込んだ縞模様をカメラにより撮影する。この時、液晶ディスプレイに提示する縞模様の位相を僅かに変化させると試料表面に移り込んだ縞模様が変わる。これにより位相シフト法が適用可能となる。次に、構築した位相計測ディフレクトメトリ測定装置を用いた表面形状測定手法の確立を目指す。この測定装置で得られる縞画像は試料の形状のうねりや欠陥を表わして

いる。縞画像の解析により各点での法線ベクトルを計算する。それに対し積分計算を行い、測定しようとする形状を計算機上で再構築する計算手法を構築する。構築した測定装置を用いた非球面試料の測定実験を行う。

(2) 次に位相計測ディフレクトメトリ測定装置の測定結果と光干渉計の測定結果との相互比較を行い、提案手法を評価する。そして、実際の非球面レンズや軸外し放物面鏡などの形状測定を行う。ディフレクトメトリ法と光干渉計の双方を用いて測定を行う。多様な試料の測定により提案手法のダイナミックレンジについて評価と考察を行う。

4. 研究成果

まず、位相計測ディフレクトメトリ装置の構築を行った。構築した装置の外観を図3に示す。この装置では液晶モニタに高い解像度と階調が要求される。このような液晶モニタは医療のX線透視画像等の読影用の液晶モニタが適していることがわかった。この装置でも医療用モニタを採用している。この他、高解像度画像取得用カメラ等も装備した。縞提示用液晶モニタと縞画像取得用カメラは同じPCに接続されている。カメラとPCは大容量高速通信が必要であり、ギガビットイーサ回線にて接続している。

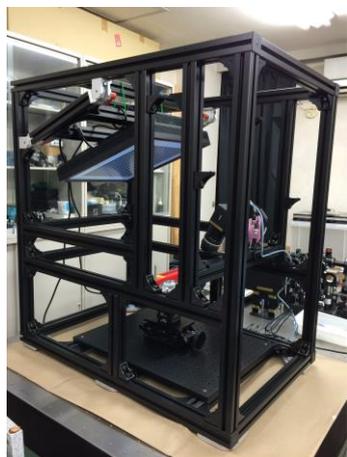
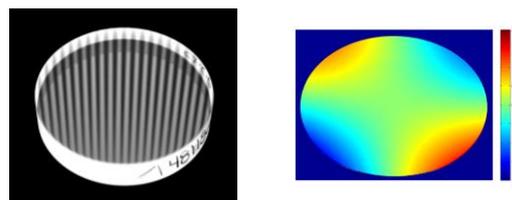


図3 構築した位相計測ディフレクトメトリ装置の外観

次に位相計測ディフレクトメトリ装置における位相解析方法における量子化に起因した誤差の検討を行った。

両者は互いに縞模様を基準とするが、干渉計測での縞は光の干渉現象に基づくアナログ的で連続な縞模様であるのに対し、位相計測ディフレクトメトリでの縞は液晶モニタ上に表示されたデジタル的で空間と輝度において離散的な縞であるという差異がある。これにより位相解析の精度に制限が生じる。検討の結果、液晶モニタが離散的な画素構造を有することによる位相計測誤差は構成により 1×10^{-3} 波長程度であった。一方、液晶モニタが離散的な輝度値を取ることに伴う位相検出誤差は液晶モニタの輝度階調が 8bit の時、 1×10^{-3} 波長程度であったが輝度階調が 10bit の時は 0.4×10^{-3} 波長程度に向上することがわかった。これは測定対象面により偏向された視線が見通す先の位置を液晶モニタの画素間隔の 1/1000 程度の分解能で決定可能であることを示している。

これらの検討の後、位相計測ディフレクトメトリの測定を行った。測定例を示す。図4は平面ガラス板の測定を行った例である。図4(a)は試料に映った縞模様、図4(b)は位相検出結果である。この図は横方向の光線の偏向を測定したものであり、横方向の面の傾きを示している。同様に縦方向の面の傾きの計測も行い、それらの結果から測定対象の面の小区分毎の法線ベクトルを算出し、積分操作により形状の測定結果が導かれる。また、ここ

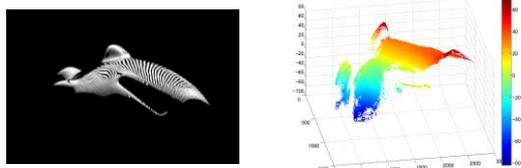


(a) 試料に反映した縞模様 (b) 位相検出結果

図4 位相計測ディフレクトメトリの測定例
試料：平面ガラス板

で示した位相分布には画像取得に用いたカメラのレンズの歪みによる項が含まれている。これらの誤差要因は校正等により除去される必要がある。なお、光干渉計測との相互比較の評価には至っていない。この点については今後、研究を継続する。

次に金型の形状測定を想定し、金属光沢を有する装飾品（ブタの形をし、金属メッキが施された貯金箱）の形状計測を行った結果の例を示す。図 5(a)は試料に映った縞模様、図 5(b)は位相検出結果である。この図も図 4と同様に横方向の光線の偏向を測定したものであり、横方向の面の傾きを示している。このように複雑な形状を有しながら、表面性状が滑らかで光沢を有するような対象の形状測定は一般に困難であるが、この装置を用いれば測定可能である。



(a) 試料に反映した縞模様 (b) 位相検出結果
図 5 位相計測ディフレクトメトリの測定例
試料：金属光沢を有する装飾品

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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

花山 良平, “位相計測ディフレクトメトリと干渉計測による高信頼性精密形状計測の試み,” 第 53 回光波センシング技術研究会, (2014/6/18-19), 東京

Ryohei Hanayama, “A trial for a reliable shape measurement using interferometry and deflectometry,” Interferometry XVII, (2014/8/17-29) San Diego.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

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・講師
研究者番号：20418924