

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 3 日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011 ～ 2012
 課題番号：23656106
 研究課題名（和文） 可干渉性 X 線による回転楕円面形状測定法の開発
 研究課題名（英文） Development of surface profile measurement method for ellipsoidal mirrors
 研究代表者
 三村秀和（MIMURA HIDEKAZU）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：30362651

研究成果の概要（和文）：回転楕円ミラーにより理想的な集光ビームを実現するためには、回転楕円ミラーの形状を高精度に測定し、それを元に形状を修正する必要がある。本研究では、可干渉性 X 線を利用した位相回復法による形状測定法を提案し、シミュレーションと可視光を利用した実験によりその可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a soft X-ray nanobeam by an ellipsoidal mirror, measurement of its surface profile is necessary. In this study, feasibility studies on application of phase retrieval with coherent X-rays were carried out. Several simulations and experiments using visible light indicate that the proposed idea is promising.

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	2,500,000	750,000	3,250,000

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：X 線ミラー、位相回復、形状計測

1. 研究開始当初の背景

高輝度放射光光源において、軟 X 線領域におけるナノビーム形成が可能な回転楕円 X 線集光ミラーの作製には、ミラー内面をナノメートルの精度で計測する必要がある。

しかしながら、測定形状は非球面の 3 次元形状であるため現在、高精度に測定する技術は存在しない。真円度測定器や CMM (Coordinate Measuring Machine) などの方法では、機械精度基準による方法のため、100nm レベルの精度での計測は可能であるが、理想的な集光性能を実現するために必要な計測精度は達成されていない。

2. 研究の目的

本研究では、こうした背景の下、回転楕円 X 線集光ミラーの形状計測を目的に可干渉性 X 線を利用した形状計測法を提案している。ミラーの持つ形状誤差により、集光波面が乱

れる。その集光ビームの波面の乱れを測定することにより、形状誤差を算出する。

本研究で採用した位相回復法とは、計測される光の強度情報のみからフーリエ変換をベースとした反復計算を繰り返すことで位相情報を回復させる手法である。本手法は、簡便であるために古くから提案されていたが、干渉計などに比べて測定精度が劣るために、宇宙望遠鏡や X 線顕微鏡など、通常の干渉計の構築が難しい光学系のみに使われていた。しかしながら、近年の計算科学の発達により、大量のデータの利用による高精度化が可能となったため、簡便かつ高精度な波面計測の開発が可能となった。

本研究の目的は、位相回復法による集光波面の波面計測を X 線の波長レベルの精度で計測し、本提案の可能性を示すことである。可視レーザーを利用した場合 $\lambda/200$ 程度となる。

3. 研究の方法

本研究では、可干渉性 X 線を想定し可視レーザーを利用し実証を行う。

1 年目では、波面決定のための位相回復シミュレーターを完成させ、誤差に関する系統的な解析を行い、実験光学系の設計を行う。精度向上のため、大量のデータの利用が可能なタイコグラフィ法の導入を行う。

2 年目では、可視レーザーを利用した実験光学系を完成させ、本手法の実証を行った。その際、既存の平凸レンズを回転楕円ミラーの代替とし実験を行った。

4. 研究成果

(1) 手法

本研究での位相回復による波面計測法を図 1 に示す。本計測法では、ナイフエッジを集光点近傍に挿入し得られる干渉強度分布から、フーリエ変換、逆フーリエ変換による繰り返し計算で集光波面を求める。

タイコグラフィ法では、大量の計測データを利用することにより、再現性、精度を向上させることが可能である。ナイフエッジを挿入する面において、オーバーラップ部分をお互いに伝播させることにより、すべてのデータの辻褃があうように、波面が回復される。

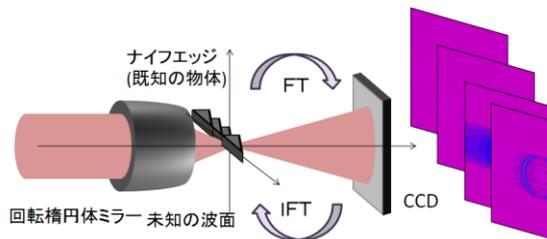


図 1 位相回復法による波面計測

本研究では、大量のデータを取り扱うので通常の PC での計算では長時間を要するために、大幅な時間短縮を目的に GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units) による計算の高速化を実施した。その結果 200 枚程度の大量の強度データを利用しても 1 時間程度で計算することが可能となった。

本研究では、タイコグラフィによる位相回復シミュレーターを完成させ、CCD のノイズ、ミラーのアライメント、などの誤差を系統的に調べた。ここでは、意図的な波面誤差を集光波面に乗せ、純方向計算により CCD 上での強度分布を計算する。そして、それらの強度データを利用し、逆に、想定した波面誤差を計算により求め、インプットした波面誤差と比較した。

図 2 にその結果を示す。回転楕円集光ミラーの場合、中心部分は光が照射されないため輪体状の開口となる。

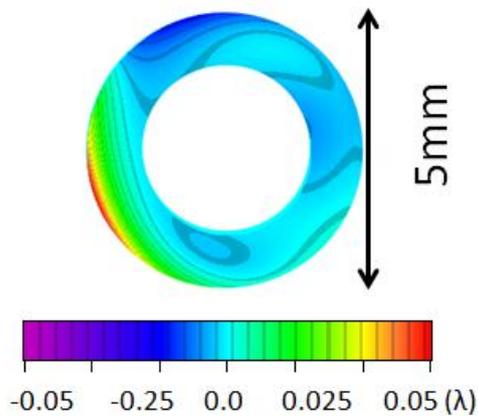


図 2 シミュレーションで得られた集光波面の位相分布

本検討結果から、CCD のノイズレベルが最大強度の 5%程度であったとしても、 $\lambda/200$ レベルの精度での計測が可能であることがわかった。

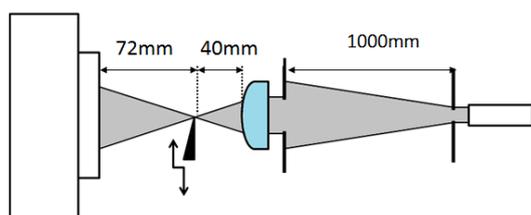
アライメント精度では、ナイフエッジを挿入する位置の光軸に対する位置ずれの誤差が波面の計算結果に影響する。意図的に光軸方向に、ナイフエッジをずらし、その条件で得られた強度分布を用いて、波面を回復させることでその影響を調べた。その結果、 $10 \mu\text{m}$ 程度の位置ずれであったとしても、波面を Zernike 展開することで、非点収差よりも高次の波面誤差の決定には影響が少ないことがわかった。

(2) 可視レーザーを利用した実証光学系

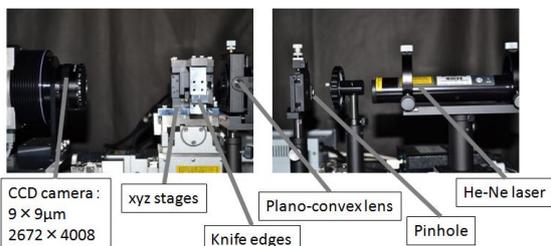
本研究では、シミュレーションによる検討結果をベースに、図 3 に示す光学系を構築した。

光源として、波長 635nm の He-Ne レーザーを利用し、ピンホールによる光源の大きさの制限を行った。集光レンズには平凸レンズを採用し、ナイフエッジとしては、ダイヤモンドバイトを利用し、そのバイトは 250nm の精度を持つ XZ ステージにより走査させた。ダイヤモンドバイトは 2 つ準備し、垂直方向、水平方向へ独立に走査可能とした。CCD は $9 \mu\text{m}$ の pixel 長の、高分解能であり光の強度に対してリニアリティが保証された CCD を採用している。

走査ステージと CCD は一台の PC により制御されており、走査と CCD による強度取得を自動で繰り返しながら動作させることができ、大量の強度分布を蓄えることができる。



(a) 光学系



(b) 写真

図 3 位相回復による波面計測光学系

(3) 波面計測実験

タイコグラフィーによる波面計測実験では、焦点近傍においてナイフエッジであるダイヤモンドバイトを挿入する。そして、各位置においてナイフエッジによる回折の影響を受けた背面の光の強度分布を CCD により計測する。

図 4 は、測定された強度分布の例である。ナイフエッジが挿入されるにつれて、強度が変化している様子がわかる。X 方向、Z 方向 120 回位置を変化させながら、強度を測定することで、240 枚の強度データを利用して、それらの辻褄があうように位相を回復する。

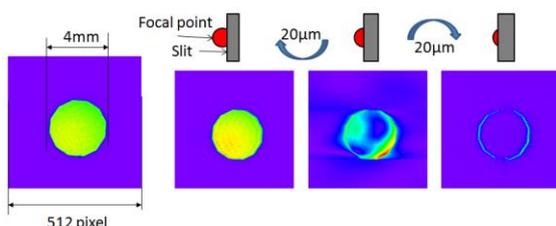


図 4 測定された透過光の強度分布

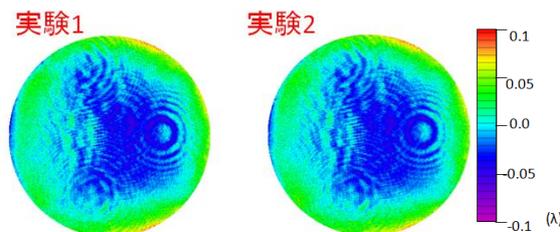


図 5 繰り返し計算により求めた波面分布 (直径 3mm)

図 5 に、測定したデータを元に位相回復計算を行った波面分布を示す。本実験結果から、軟 X 線の波長と同程度である $\lambda/200$ レベルの精度での波面計測が可能であることを実証した。

(4) まとめと今後の予定

本研究により、シミュレーションと実験の両方から、大量のデータを利用するタイコグラフィー法を利用した位相回復法を適応することで高精度な波面計測が可能であることを実証した。以下に成果をまとめる。

- ・タイコグラフィーを利用した位相回復シミュレーターを開発し、本手法により高精度な波面決定が可能であることを示した。

- ・H-Ne レーザーを光源とした実験装置を完成させ、平凸レンズによる集光波面計測において、軟 X 線の波長に相当する $\lambda/200$ レベルの精度での波面分布の計測に成功した。

今後、回転楕円ミラーへの適応に向け、実験研究において、輪帯開口への適応が必要となる。また、更なる位相回復法の精度向上のために、アルゴリズムの改善を予定している。波面の空間上での位相分布を直接回復させている方法から、波面の Zernike 展開係数を回復させる方法とすることで、大幅な計算時間の短縮が期待できる。その分、更に大量のデータの利用が可能となり、測定精度の向上が見込まれる。また、現在は強度計測と位相回復計算を別々に行っているが、同時に行うことにより In-situ での波面計測が可能となる。これらの改善を行うことによる更なる精度の向上が見込まれる。

現在、他の研究プロジェクトにおいて、回転楕円 X 線集光ミラーの開発を進めており、2013 年度において回転楕円ミラーが入手できる予定である。最終的には、本成果を、回転楕円ミラーの形状計測に活用していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. T. Saito, Y. Yoshinori, H. Mimura, Development of Surface Profile Measurement Method for Ellipsoidal X-ray Mirror using Phase retrieval, Proc. SPIE, 8501, 850103

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 齋藤貴宏、本山央人、三村秀和、回転楕円 X 線集光ミラーのための位相回復による波面計測法の開発、2013 年精密工学会春季大会、東京工業大学、2013 年 3 月 13 日～3 月 15 日、2013 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.197-p.198.

2. 齋藤貴宏、本山央人、三村秀和、回転楕円 X 線集光ミラーの形状計測法の開発、第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、名古屋大学、名古屋市、2013 年 1 月 12 日～1 月 14 日、14P014

3. 齋藤貴宏、三村 秀和、位相回復法による回転楕円型軟 X 線集光ミラーの形状計測 -光学設計と理論的検討-、2012 年度精密工学会春季大会、首都大学東京南大沢キャンパス、八王子市、2012 年、3 月 14 日～3 月 16 日、2012 年度精密工学会春季大会学術講演論文集 p.1157-p1158.

4. 齋藤貴宏、武井良憲、J. R. Fienup、三村秀和、回転楕円型軟 X 線ミラーの光学設計と形状計測法の開発、第 25 回日本放射光学会年会、放射光科学シンポジウム、鳥栖市民文化会館、鳥栖市、2012 年、1 月 6 日～1 月 9 日

5. T. Saito, Y. Takei, H. Mimura , Development of Surface Profile Measurement Method for Spheroidal X-ray Mirror using phase retrieval, 2012 Optics + Photonics, San Diego, USA, 12-16 August, 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://www.edm.t.u-tokyo.ac.jp/7MimuraGr/MimuraGr.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三村秀和 (MIMURA HIDEKAZU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30362651