

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287038

研究課題名(和文)大型光学素子の超精密機上計測法の確立

研究課題名(英文)Development of precise on-the-machine measurement system for large optics

## 研究代表者

栗田 光樹夫(kurita, mikio)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20419427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：従来の干渉計では計測困難であった焦点を持たない大型光学素子や自由曲面を計測できる機械式計測器を開発した。この計測器は3点法の原理を採用し、3つのセンサユニットを計測曲面上を滑らせることで干渉計と同等の計測精度を達成する。また計測範囲に制限が無く、干渉計のように高精度な基準や大きなスペースも不要で、低コストな計測システムである。

また取得されたデータを弾性体とみなし、重複領域で矛盾するデータ同士を滑らかにかつより高精度に合成するデータ処理法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Interferometers do not work well for a convex or free form optics which does not have real focal point, and need precise reference surface meet with each test surface and large space for the system. A measurement having a capability of more large and free form testing is required for the optics in future astronomy. We developed a measurement system applying three-probe method, and confirmed its performance with measuring a concave mirror 800 mm in diameter. The result shows the good agreement with a result of Fizeu interferometer.

The method is based on the classical theory of least squares. This method regards serial data as elastic body and integrates individual serial data naturally by solving minimum energy problem. Excellent improvements are performed in data procedure. This method can be executed by conventional numerical algorithm: finite element method (FEM) and has potential to be applied for the various fields and numerous data obtained so far and in future.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：精密計測 データ処理 精密加工 光赤外線天文学

### 1. 研究開始当初の背景

2012年に開かれた国際光工学会 (SPIE) において、今後の観測天文学の発展にとって、フリー・フォーム (自由形状) の製作技術の重要性が広く訴えられた。フリーフォームで大型の光学素子の開発は超大型望遠鏡 (TMT: 口径が 30m を超える望遠鏡) 時代を迎え、喫緊かつ有意義な課題である。とくに非対称形状や凸形状の光学素子は干渉計での計測が困難でありながらニーズが極めて高い。フリーフォームの計測精度が低いために、理想的な光学素子の製作を断念することが多々あり、その結果装置の性能は低下する。例えば、単体では製作困難な光学素子を複数の素子で実現することがある。この場合、素子数が増えることによって散乱・吸収が増加し、光量の損失が発生する。これは望遠鏡の感度を直接低下させる (たとえば装置内の鏡が 2 枚増えると、TMT では 8m 級の望遠鏡 1 台分の光量損失に相当する)。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで干渉計で計測されてきた大型光学素子を加工機上で計測できる汎用な計測器を開発することである。その具体的な目標として、直径 1メートルサイズの非球面形状の鏡を  $RMS = 10nm$  の精度で計測し、修正加工を 1 日以内で行える計測システムを構築する。この研究は、多様な自由曲面の計測と加工を可能とし、天文観測装置の性能向上と光学素子の大量生産を実現する。この研究は我が国が有する超精密加工技術に高精度な計測技術を加えることで、日本の観測天文学の発展に寄与するだけでなく、一般の精密加工機に搭載され、広くものづくりに貢献する。

### 3. 研究の方法

本計画は大きく分けて、25 年度に計測器の開発部分を終了させ、26 年度にその実証試験とその改良を行い、27 年度に成果をまと

め報告する。主たる開発項目は変位センサ、計測の走査パス、形状生成のためのアルゴリズム、複数の検証試験である。各開発の責任担当者は開発内容に照らし合わせて十分な実績をもつ人員を配置した。計画の初期段階で最終的に獲得する技術の大半を包含する予備実験を十分に行い、想定外の問題を顕在化させる。その後は、本計画チームが有する加工と計測技術を堅実に統合することで、目標とする計測器および手法を確立する。

### 4. 研究成果

クリアセラム製のほぼ平面の研磨面  $\phi 300\text{ mm}$  の計測を行った。逐次間隔は 10 mm、変位計は干渉タイプの変位センサ SI-F (キーエンス) を用いた。走査速度は 20 mm/s、サンプリング周波数は 5 kHz で、1 mm おきに 1 mm に含まれるデータを加算平均した。以上より 1 本の計測パス上には逐次スタート地点が 1mm ずつずれた 10 本の逐次結果が得られるが、これらをすべて加算平均した。この際に 1 本の逐次結果は 10mm 間隔のデータであるので、直線補間をし 9 点の内挿点を生成し、走査方向に一致するデータごとで平均処理を行った。以上の計測を 22 回行い、安定性の評価も行った。

プローブの出力データは  $RMS=0.2\text{ nm}$  の安定性を達成した。また 22 回の計測結果の平均を Zygo の干渉計 (基準面精度  $\lambda/20$ ) と比較した。干渉計との差は  $RMS=5.5\text{ nm}$ 、 $P-V=15.5\text{ nm}$  ときわめて高い一致を示し、この測定法の有用性を実証できた。

データを梁やシート状の弾性体とみなしたデータステッチング方法を提案した。なお梁の外力による変形は曲げエネルギーが採用の状態を実現し、これは補間法で良く用い

られるスプライン曲線と等価である。本手法はステッチング後の最適解を最小エネルギー問題と同様に扱えるため広く使われる有限要素法での処理が可能となる。この手法の力学的なイメージは竹ひごで竹を編む状況と同じである。編まれる前の竹ひごは様々な形状をし、交点ではねじれの関係であるが、編めば交点では交わりになる。このとき各々の竹ひごは弾性変形し、システム全体としては最小エネルギーの状態となる。この状態は最小エネルギー状態である算術平均と滑らかな補間を実現するスプライン曲線の特性を利用したものである。この問題において力学的要素である竹ひごの元形状と固さはそれぞれ数学的要素である系列データの値と重み（信頼度）と等価となる。

以上の手法では、データが可変であるため重複領域においてすべてのデータの値を一致させることができる。またそれによるひずみは重複以外の領域に伝搬することで、全データ領域において最小エネルギー状態の結果を得ることができる。これは自由度の設定などの煩雑な作業をすることなく、データの全自由度を用いるため、従来手法よりも真値に近い結果を出力すると考えられる。また、この手法は画像データに限らず、様々な3次元データにも適用できる。

走査型の形状計測を想定したシミュレーションを行った。解析にはフリーの有限要素ソフトウェアの Calculix を用いた。解析条件は以下のとおりである。系列データは高さ方向において強制変位により値が一致される。それ以外の方向には拘束しない。これは変位が十分小さく座屈や引張-圧縮がはたらない状態と同じである。システム全体としては任意の点を拘束することで6自由度を拘束した。各梁モデルの断面2次モーメントは一定値かつ同じであり、外周にある円環状の梁だけ10倍固い。以上の処理により、各系列デ

ータが変形し交わり関係となり、より滑らかで真値に近い結果が得られたことが分かった。この条件の場合、従来の方式に比べて P-V で 1/5, RMS で 1/3 の改善が見られた。また右側にあるこぶのようなローカルな形状の抽出にも成功した。

次により大型の自由形状の光学素子の計測を実証するために  $\phi 800$  mm の球面鏡の計測を行った。

開発した本計測器を図1に示す。10 mm 間隔で直線上に配置された3つのセンサ列はインバーによって相対位置が保持される。したがって、横方向の空間分解能は 10 mm となる。インバー基盤は3点で鏡面に接触し、スライダによって鏡面上を引きずられる。スライダは 20 mm/s の定速で運動し、時間を元にセンサの現在位置が算出される。鏡面に対する相対位置はセンサが鏡面の縁を検出することで判定される。センサは 5 kHz でサンプルし、横方向で 1 mm ごとに平均をとる。したがって、1回の走査でスタート位置が 1 mm ずつずれた 20本の逐次結果が得られるが、ズレを考慮して、加算平均をとる。

計測器の性能検証のために、前もって干渉計による計測で形状の分かっている  $\phi$

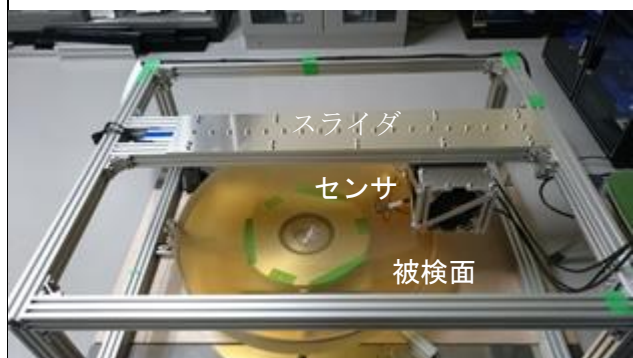


図1：本計測器と  $\phi 800$  球面鏡  
黄色の半透明な円盤が低熱膨張材でできた球面鏡。その鏡面に変位計がスライダによって直接引きずられる。鏡の下には3点の支持点があり、手動の回転テーブルで走査の方位角を変更する。

800 mm の球面鏡を用意した。球面鏡は干渉計での計測時は等圧支持された形状誤差の少ない鏡である。球面成分以外の大きな空間スケールの形状の検出を確認するために意図的に 3 点支持によって、鏡面形状をひずませた状態で本器による計測を行った。鏡面全面の形状を得るために、図 2 に示すように放射状に合計 60 本の計測走査を行った。鏡の方位方向の回転を鏡の下に設置した回転テーブルで行った。

計測結果と 3 点支持による鏡面変形の結果を図 3 に示す。鏡面が完全に理想的で、支持点による境界条件が FEM 解析で良く再現されていれば、左右の図は完全に一致するべきである。FEM の結果 3 点支持の変形は振幅 900 nm のテリフォイル状であり、計測結果でもほぼ同様の結果を得た。

事前の干渉計による計測結果から、球面鏡は同心円状のより高周波な形状誤差を有することが分かっていた (図 4 右)。それが検出できているかを確認するために、FEM 解析の結果を計測結果から差し引いた結果を図 8 の左に示す。テリフォイル状の残存成分が顕著であり、これは FEM 解析の境界条件と実際の支持条件の不一致が原因と考えられる。より空間周波数の高い成分に注目すると、干渉計の結果と同様に同心円状の形状誤差を検出できたことが確認できる。中心付近の方が外周部より干渉計の結果とより一致する要因は、中心部ではデータ密度が高いことが挙げられる。また、今回のセンサ列の間隔が 10 mm であることから 20 mm 以下では検出感度が低下することも挙げられる。

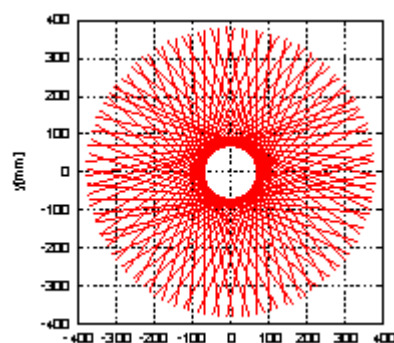


図 2 : 走査パス

合計 60 回の走査を前面に対して行った。中央部分は鏡面として用いない領域であるため計測を行わない。

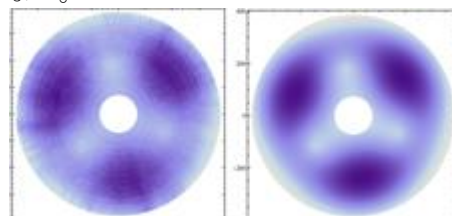


図 3 : 計測結果の比較 (P-V=900 nm)

左 : 本計測器による結果。右 : FEM による 3 点支持の変形結果。

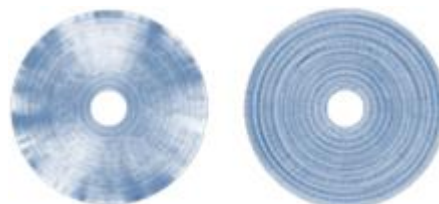


図 4 : 計測結果の比較 (P-V~100 nm)

左 : 本計測結果から FEM の解析結果を差し引いた高周波成分。右 : 理想的な支持方法で支えられた鏡の干渉計による形状結果。

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：20419427

[雑誌論文] (計 0 件)

(2) 研究分担者

( )

[学会発表] (計 7 件)

研究者番号：

[図書] (計 0 件)

(3) 連携研究者

[産業財産権]

( )

○出願状況 (計 1 件)

研究者番号：

名称：データステッチング装置、データステッチング方法、及びコンピュータプログラム

発明者：栗田光樹夫

権利者：京都大学

種類：出願

番号：PCT/JP2014/080802

出願年月日：2014年11月20日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：経緯台式反射望遠鏡及び経緯台式反射望遠鏡の駆動機構

発明者：栗田光樹夫

権利者：名古屋大学、アストロエアロスペース

種類：特許

番号：5794495

登録年月日：平成27年8月21日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/psmt/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

栗田光樹夫 (KURITA, Mikio)