

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560305

研究課題名(和文)位置と測定フレームの同時測定による大型三次元ステージの性能向上に関する研究

研究課題名(英文)Improvement of the performance of Three Dimensional large scale stage by simultaneous measurement of location and metrological frame

研究代表者

古谷 涼秋(FURUTANI, RYOSHU)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：50219119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：直交2軸をもつステージのそれぞれの軸に平面鏡を参照鏡として配置し、軸の形状と参照鏡の形状を含んだ変位信号を直交する2方向からレーザー干渉測長器により取得した。これにより、軸の形状偏差及び参照鏡の形状誤差がなかったならば、ステージの位置を測定することが可能となる。軸の形状偏差及び参照鏡の形状誤差を測定するために、ステージの位置を変えながらレーザー干渉測長器から変位信号を取得した。レーザー干渉測長器から得られた変位信号から、直交2軸の運動精度及び平面鏡の形状誤差を分離した。上の成果に、1軸を追加し3方向からの軸の運動精度及び平面鏡の形状誤差を分離した。

研究成果の概要(英文)：The reference mirrors are placed on each axis of the movable stage with two orthogonal axes. The displacement signal from the laser interferometers is detected, which include the shape of the axes and the profile of reference mirrors. If neither shape of axes nor profile of the reference mirrors exist, this mechanism can measure the tow directional location of stage. In order to measure the shape of axes and the profile of reference mirrors, the signal is detected by the laser interferometers, making the stage move. The shape of the axes and the profile of reference mirrors are separated in two dimensional direction from the signal from the laser interferometers. Moreover, adding one axis to the above results, The shape of the axes and the profile of reference mirrors are separated in three dimensional direction.

研究分野：精密測定

キーワード：三次元ステージ 運動軸の形状偏差 参照鏡の形状偏差 測定フレーム

1. 研究開始当初の背景

形状測定機により対象物の形状を測定する場合、測定対象物との間の距離が測定できるセンサをステージに固定し、センサを移動させながら、測定対象物との距離を測定することにより、測定対象物の形状は、

$$f(x) = s(x) + c \quad (1)$$

として得られる。ここで、 $f(x)$ は測定対象物の形状、 $s(x)$ はセンサの出力、 $c$ はセンサのゼロ点のオフセット、 $x$ はステージの移動量とする。

しかし、(1)式では、ステージの移動が直線状(真直)であることを仮定している。形状測定の精度が十分高くない場合は、この仮定は成立するが、高精度化が要求されている近年では、ステージの移動軸の形状が測定対象の形状精度と比べて小さいことは自明ではなくなっている。したがって、(1)式に加えて、ステージの軸の形状  $a(x)$  を考慮すると、

$$f(x) = s(x) + a(x) + c \quad (2)$$

として、測定対象の形状が得られる。ここで、(2)式では、未知数(未知関数)が、 $f(x), a(x)$  の2つとなり、(2)式を解き、 $f(x)$ を得ることができない。

この問題に対応するために、反転法やマルチセンサ法などが提案されている。

反転法では、(2)式においてステージを物理的に反転することによって、

$$f(x) = s1(x) - a(x) + ux + w \quad (3)$$

とし、(2)式と(3)式から未知数(未知関数) $f(x), a(x)$ を求める。しかし、ステージの反転という作業のために、装置が大規模化する点が問題である。

マルチセンサ法では、それぞれのセンサのゼロ点が調整することができず、最終的な形状に放物線形状の誤差が残留することが指摘されている。

2. 研究の目的

(1)反転法のように装置を大規模にせず、1つのセンサによって、(2)式のようにステージの軸形状の誤差を考慮にいれた上で、測定対象の形状を測定することを目的とした。

(2)1軸での測定では、条件が不足し(2)式を解くことができない。本研究では、直交する2軸の案内(ステージ)に問題を拡張し、2軸に関して測定対象の形状を測定する手法を開発することを目的とした。

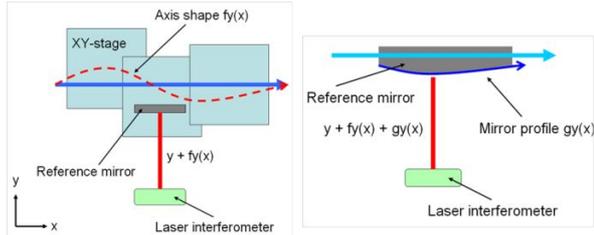
(3)2軸の案内に、さらに1軸を加え、直交3軸について同様に、ステージの軸の形状を考慮して、測定対象の形状を測定する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1)直交2軸による測定のモデル化

直交2軸をXYとする。図1(a)にX軸に沿って移動するステージに参照鏡(測定対象)を固定し、レーザー干渉測長器によって、参照鏡までの距離を測定しているモデルを示している。理想的には、移動軸は真直でなけ

ればならないが、実際のステージの軸は、軸の形状誤差及び運動誤差により、図1(a)のように形状誤差をもっているようにふるまう。このとき、軸の形状誤差を  $f_y(x)$  とすると、レーザー干渉測長器の出力は、本来の軸の位置  $y$  に軸の形状誤差  $f_y(x)$  を加えて、 $y+f_y(x)$  となる。



(a) Axes shape (b) Mirror shape

図1 ステージの軸, 参照鏡, センサの関係

参照鏡(測定対象)に形状誤差がある場合は、参照鏡の形状誤差を  $g_y(x)$  とすると、レーザー干渉測長器の出力は、の結果に  $g_y(x)$  を加え、 $y+f_y(x)+g_y(x)$  となる。

図2に2軸の場合のステージ, 参照鏡, レーザー干渉測長器の関係を示す。表1に記号を示す。

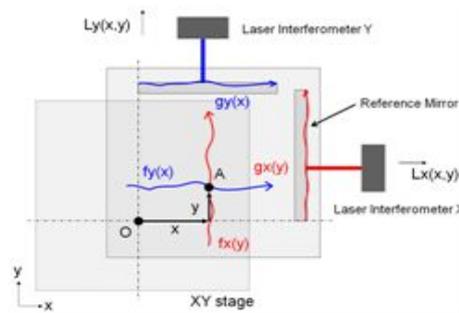


図2 2軸ステージの軸, 参照鏡, センサの関係

表1 記号と意味

記号	意味
$L_x(x,y)$ $L_y(x,y)$	レーザー干渉測長器による測定値
$x,y$	XYステージのそれぞれの軸に沿った移動量
$f_x(y)$ $f_y(x)$	軸の形状誤差(運動誤差)
$g_x(y)$ $g_y(x)$	参照鏡の形状誤差

図2から、レーザー干渉測長器による測定値は(4)式となる。

$$L_x(x,y) = x + f_x(y) + g_x(y+f_y(x))$$

$$L_y(x,y) = y + f_y(x) + g_y(x+f_x(y)) \quad (4)$$

## (2)シミュレーションによる検証

図2をモデル化した式(4)をシミュレーションモデルとし、ステージの軸形状  $f(\cdot)$ 、参照鏡の形状  $g(\cdot)$ を設定する。

ステージの軸形状、参照鏡の形状に従い、ステージをX軸方向に微小移動させ、レーザー干渉測長器の測定値を得る。X軸方向の微小移動をステージの一方から他方まで行う。

X軸方向の移動が終わると、ステージをX軸の原点に戻し、Y軸方向に微小移動させる。この状態でX軸方向の微小移動とレーザー干渉測長器による測定を繰り返す。この一連の測定をY軸方向の一方から他方まで行う。

2軸ステージをXY方向に微小移動させ、得られたレーザー干渉測長器からの測定値から、ステージの軸形状、参照鏡の形状を分離する。分離する際に次の方法を検討した。

(4)式の  $g_x(y+f_y(x))$  の  $f_y(x)$  を差分法により関数の外へ出し、最小二乗法により推定する。

軸の形状及び参照鏡の形状を区分多項式により近似すると定め、区分多項式の係数を最小二乗法により推定する。

## (3)測定器による検証

XYステージに参照鏡を固定する。参照鏡の平面度が高いと形状誤差の検出が困難な場合があるので、平面度の高い参照鏡と平面度が低い参照鏡を用意し、実験した。

XYステージの微小移動量を  $1\mu\text{m}$  として、実験した。

実験データを差分法により展開した式に最小二乗法を適用して形状を推定した。

軸の形状及び参照鏡の形状を区分多項式で表現し、区分多項式の係数を最小二乗法で推定した。

## (4)分解能の向上

XYステージの微小移動量を  $0.1\mu\text{m}$  として、実験した。

## 4. 研究成果

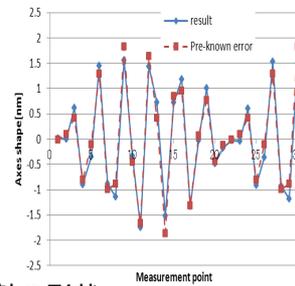
### (1)シミュレーションによる検証結果

差分法による結果を図3に示す。

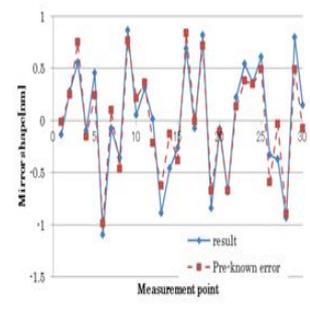
図3(a)はXYステージのX軸の形状誤差を差分法により推定した結果を示す。図3(b)はXYステージに固定した参照鏡の形状誤差を差分法により推定した結果を示す。軸形状、参照鏡形状共に概ね再現できているが、急な変化には追従できていないことがわかる。Y軸についての結果は同様なので省略する。以下同様。

区分多項式による結果を図4に示す。

図4(a)はXYステージのX軸の形状誤差を区分多項式により推定した結果を示す。図4

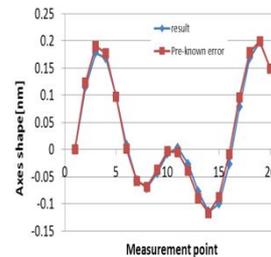


(a) X軸の形状

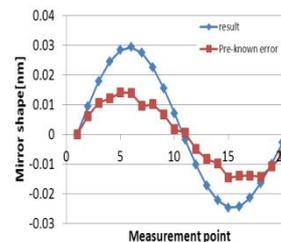


(b) X軸参照鏡の形状誤差

図3差分法による軸の形状、参照鏡の形状測定結果(シミュレーション)



(a) X軸の形状



(b) X軸参照鏡の形状誤差

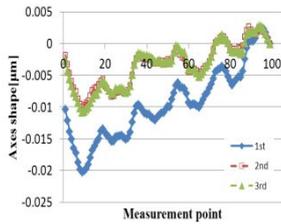
図4区分多項式による軸の形状、参照鏡の形状測定結果(シミュレーション)

(b)はXYステージに固定した参照鏡の形状誤差を区分多項式によって推定した結果を示す。参照鏡の形状誤差において元の形状との誤差が大きいが、図3(b)に比べてスケールが小さいので、微小な変化が拡大されて表示されているだけである。

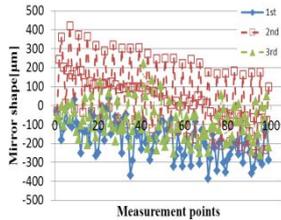
### (2)測定器による検証結果

差分法による結果を図5に示す。

実験の場合には、真の形状がわからないので、3回実験を繰り返し比較した。図5では、軸の形状誤差については3回とも似た形となったが、最初の位置が異なった。しかし、参照鏡の形状誤差については再現性がなかった



(a) X 軸の形状

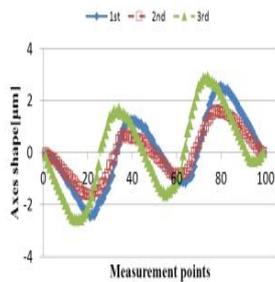


(b) X 軸参照鏡の形状誤差  
図5 差分法による軸の形状，参照鏡の形状測定結果（実測）

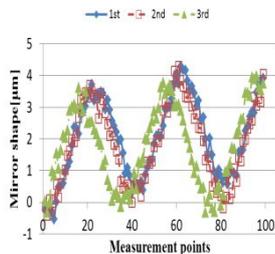
た．

区分多項式による方法も差分法同様に，軸の形状においては再現性があったが，参照鏡については再現性がなかった．

微小移動間隔を  $0.1\mu\text{m}$  としてデータを取得し，差分法を適用した結果を図6に示す．



(a) X 軸の形状



(b) X 軸参照鏡の形状誤差  
図6 差分法による軸の形状，参照鏡の形状測定結果（移動間隔  $0.1\mu\text{m}$ ）

と同様に軸形状，参照鏡の真の形状がわからないので，3回実験を繰り返し比較した．図6(a)から X 軸の形状は，の実験以上により再現性が得られた．また，X 軸の参照鏡の形状誤差については，では，再現性が確認できなかったのに対し，図6(b)では，

十分に再現性が確認できた．これは，差分法，区分多項式法の両方において，曲線の微分可能性を前提として解いているため，今回実験対象とした軸，参照鏡については，測定間隔  $1\mu\text{m}$  が大きすぎたものと考えられる．

測定間隔  $0.1\mu\text{m}$  と設定することにより，各軸につき1つのセンサを用いることにより，ステージの軸の運動精度と参照鏡（測定対象）の形状誤差を分離測定できることを示した．

しかし，測定結果の評価においては，ステージの運動軸と参照鏡の真の形状が未知であるため，繰り返し測定による比較によって測定結果を評価した．今後は，参照鏡を別の測定機により測定し，その測定結果と本研究の結果を比較し，絶対的な評価を行う必要がある．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

Keisuke IORI, Miyu OZAKI and Ryoshu FURUTANI, Evaluation of Straightness of Two-Axes Stage, Key Engineering Materials, 査読有,625, 2015, pp.47-52 DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.625.47

〔学会発表〕(計 2件)

Keisuke IORI, Miyu OZAKI and Ryoshu FURUTANI, Evaluation of Straightness of Two-Axes Stage, Asian Society of Precision Engineering and Nano Technology, 2013年11月12日, 「Taipei(TAIWAN)」

Ryoshu FURUTANI, Keisuke IORI and Miyu OZAKI, Identification of Shape of Axis in XY Stage, International Scientific Conference of Coordinate Measuring Technique, 2014年4月3日, 「Szczyrk(Poland)」

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

古谷 涼秋 (FURUTANI, Ryoshu)  
東京電機大学・工学部・教授  
研究者番号：50219119

(2)研究分担者

小崎 美勇 (OZAKI, Miyu)  
東京電機大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：80550590