

交差格子スケールのセルフキャリブレーションに関する研究

京都大学工学研究科 ○後藤 渉, 茨木 創一, 松原 厚,
ハイデンハイン株式会社 越智 玉樹

A Self-Calibration Method for the Cross Grid Encoder

Kyoto university Wataru GOTO, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA,
HEIDENHAIN corporation Tamaki OCHI

There is no methodology established in today's industries to measure two-dimensional motion errors, such as the straightness error or the squareness error, of high-precision and ultra-precision machine tools. The cross grid encoder is a diffraction grating type optical encoder that can measure two-dimensional position of an optical head by using a grid plate where grids are aligned orthogonal to each other. As a basis to establish a measurement methodology of two-dimensional motion accuracy of high-precision and ultra-precision machine tools by using the cross grid encoder, this paper presents a self-calibration scheme of a measurement error of the cross grid encoder caused mainly by the misalignment of grids. The measurement error corresponding to the location on the grid plate is calibrated by comparing three measurements taken with different orientation of the grid plate. It is experimentally validated that the measurement error of the cross grid encoder is reduced by about 80% by applying the self-calibration and the compensation of measurement errors.

1. 緒言

光学部品などの精密金型や電子部品の加工に対する需要の増加を背景として、高精密工作機械、超精密工作機械と呼ばれる NC 工作機械が近年市場に多く投入されている。ただし本論分では、1~0.1nm オーダの位置決め分解能を持つ超精密加工機に対し、0.1 μ m~10nm オーダの位置決め分解能を持ち、より高い剛性、高速性、汎用性を持たせた加工機を高精密加工機と位置づける。従来、汎用の工作機械に対し、真直度や直角度といった 2 次元平面上での運動精度を測定するためには、直定規や直角定規といった物理的な基準に対し、変位センサなどを用いて機械の運動精度を測定するのが一般的であった。しかし、高精密工作機械、超精密工作機械に要求される精度に対しては、それ以上の形状精度が保証されている基準(及び測定機器)を準備するのは容易ではなく、このような機械の 2 次元運動精度を検定する手法は確立されていないのが現状である。

交差格子スケール(以下 KGM と略す)(ハイデンハイン株式会社製)は、干渉型のリニアスケールを格子状に組み合わせた構造を持つプレートを用いることで、機械の 2 次元平面上で運動精度を測定することができる光学測定器である。物理的な基準を用いる場合と比べ、高い測定精度を得ることは容易であり、また任意形状の軌跡に対する輪郭誤差を測定できるという強力な長所がある。しかし、KGM においても、格子の配置誤差などに起因する測定誤差が存在し、その大きさは高精密工作機械、超精密工作機械の運動精度と比較して、決して無視できない可能性がある。本研究では、KGM を用いて特に高精密工作機械の運動精度の検定を行うことを目的とし、その基礎として KGM の測定精度のセルフキャリブレーション法を提案する。

2. KGM のセルフキャリブレーション法

KGM プレートの格子の配置誤差は、例えば顕微鏡などで直接測定することは不可能ではない。しかし、より簡便に

KGM の測定誤差(及び測定対象の機械の運動誤差)を検定するために、測定対象の機械上で、以下の計測を行い、得られた誤差軌跡を比較することでセルフキャリブレーション(自己校正)を行う。

i) 機械を X 方向、Y 方向に駆動させた時の誤差軌跡を KGM で測定する。このセットアップを View0(基本)と呼ぶ。

ii) KGM プレートを i) に対し 90 度回転させて設置し、i) と同一の軌跡を機械に与えて測定を行う。このセットアップを View1(回転)と呼ぶ。

iii) KGM プレートを i) に対し Y 軸の正方向に 5mm 平行移動させて設置し、i) と同一の軌跡を機械に与えて測定を行う。このセットアップを View2(平行移動)と呼ぶ。

ここで、機械の運動及び位置決め誤差の繰り返し再現性は、運動及び位置決め誤差自体、及び KGM の測定誤差に対して十分小さいと仮定する。KGM の測定誤差が存在しなければ、3 つの測定結果は一致する筈である。セルフキャリブレーションの目的は、3 つの測定結果の差を利用して、KGM の測定誤差、及び機械の運動精度を分離することである。本研究では、文献⁽¹⁾で提案されたアルゴリズムを修正して用いた。

3. 検証実験

3.1 リニアスケール較正機を用いたセルフキャリブレーション法の検証

提案したセルフキャリブレーション法の較正精度を実験的に検証することを目的として 1 軸の送り系(機械 A と呼ぶ)に適用した例を示す。機械 A はリニアスケールの較正に用いられる機械であり、分解能が 1nm である高精度の基準スケールを備えている。

本実験では機械 A の駆動方向を X 軸方向として、機械 A の駆動部に取り付けた KGM の測定ヘッドを一定速度 600mm/min で駆動させ、 $X = -40, -35, \dots, 40$ の指令位置において、指令位置に対する X 軸方向の変位を KGM によって測

定した。同様の測定を 2 章で示した View0, View1, View2 について行う。本実験では View1 においては KGM プレート を 180 度回転させ, View2 においては X 軸方向に 5mm 平行移動させた。これらの測定結果を用いて, セルフキャリブレーション法を適用し, KGM の測定誤差及び機械の位置決め誤差を同定する。さらに, 基準スケールにより機械の位置決め誤差を直接測定した結果と比較し, 較正精度を検証する。

セルフキャリブレーションによって求めた機械の位置決め誤差, 基準スケールによって測定した機械の位置決め誤差, KGM の測定結果(View0)を図 1 に示す。基準スケールによって測定した機械の位置決め誤差が最大で $0.23 \mu\text{m}$ であるのに対し, KGM の測定結果は $1.1 \mu\text{m}$ となっている。キャリブレーションによって求めた機械の位置決め誤差は最大で $0.37 \mu\text{m}$ であり, 基準スケールの測定結果を基準とすると測定誤差を最大 85.6%低減することができた。

KGM の測定誤差をキャリブレーションによって求めた結果と基準スケールによって測定した結果を比較したものを図 3 に示す。基準スケールによって測定された KGM の測定誤差は最大で $1.05 \mu\text{m}$ であり, キャリブレーション結果は $0.71 \mu\text{m}$ であった。基準スケールの測定結果を基準とすると同定誤差は $0.34 \mu\text{m}$ であった。

これらの結果よりキャリブレーションにより測定誤差の結果を低減することができたと言える。

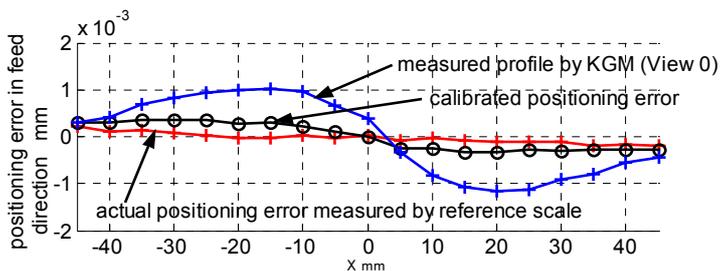


Fig.1 The feed drive's positioning error Comparison of the maximum positioning error (for the moving distance 90 mm) of measured KGM trajectories in View 0-2, the calibrated result, and the actual positioning error measured by the reference scale (Machine A).

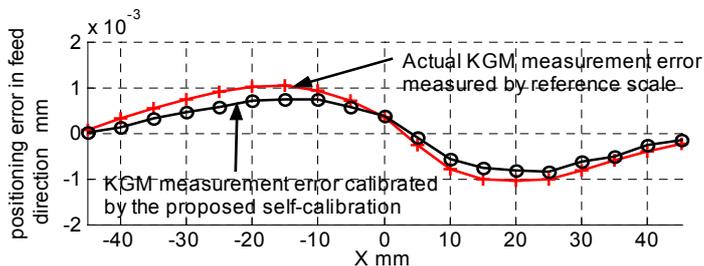


Fig.2 The KGM's measurement error (comparison between the measured profile by the reference scale, and the calibrated profile by the proposed self-calibration method (Machine A))

3.2 高精度加工機に対する適用例

提案したキャリブレーション法を高精度工作機械の水平面(XY平面)送り系の2次元位置決め精度及びKGMの2次元測定精度の同定に適用した例を示す。実験に用いた機械(機械Bと呼ぶ)は, リニアモータ駆動で転がり案内の送り系を持ち, 位置決め分解能は10nmである。

本実験では $Y=0$ の線に沿って $X=-40, -35, \dots, 40$ で機械を

停止し, 次に $X=0$ の線に沿って $Y=-40, -35, \dots, 40$ で機械を停止した場合の, 指令位置に対する位置決め誤差を KGM により測定した。同様の測定を 2 章で示した View0, View1, View2 について行う。ただし, 本実験では View1 においては KGM プレートを反時計回りに 90 度回転させ, View2 においては Y 軸方向に 5mm 平行移動させた。

最初に, 送り計の再現性位置決め誤差を測定するために, X 軸に沿った指令位置を基準とした場合の位置決め誤差を View0 において 3 回測定した結果を図 3 に示す。指令位置からの X 及び Y 方向の誤差が 10000 倍に拡大してプロットされている。また, 実際の運動方向は Y 方向であるが以下では紙面の都合から横向きにして図を表示する。3 回の測定の位置決め誤差は最大で約 $0.1 \mu\text{m}$ であり, これは KGM の測定誤差と比べて十分小さいといえる。

セルフキャリブレーションによって求めた XY 平面上での機械の位置決め誤差の同定結果を図 4(a)に, KGM の測定誤差の同定結果を図 4(b)に示す。指令位置からの XY 平面上での誤差が 5000 倍に拡大してプロットされている。KGM の測定誤差は送り方向は最大で $1.1 \mu\text{m}$ であり, 送りと垂直な方向は約 $0.15 \mu\text{m}$ であった。送り方向の測定誤差が大きいのは移動距離が長いこと配列誤差の影響が累積されるためであると考えられる。ただし, このキャリブレーション結果について, 較正精度の検証等は行っていない。

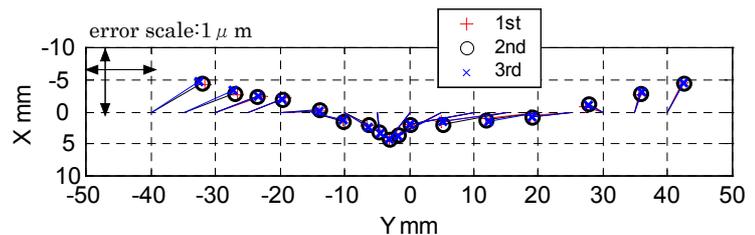
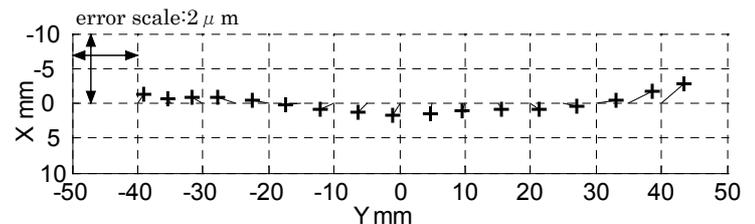
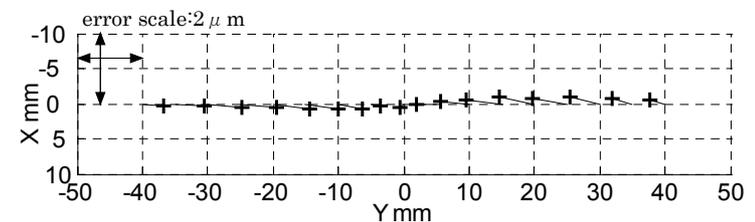


Fig.3 Error trajectories measured by using a KGM in View 0 (standard setup) (repeated three times)



(a) calibrated machine's positioning error



(b) calibrated KGM's measurement error

Fig.4 Calibration results by using the proposed self-calibration method

参考文献

- (1) Ye, J. Takac, M. Berglund, C.N. Owen, G. Pease, R.F. An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages, *Precision Engineering*, 20-1(1997), 16-32.