

## 画像を利用した工作機械の2次元位置決め誤差測定に関する研究

京都大学 ○谷澤佑介, 茨木創一, 松原厚

### 要旨

本研究では、カメラを工作機械主軸に取り付け、精度が既知である対象を撮影することにより工作機械送り系の2次元位置決め誤差を広い範囲に計測する手法を検討する。今回の論文では、直行2次元平面内のさまざまなX、Y位置で静的な真直度、直角度、位置決め誤差を測定する試験を行い、渦電流式変位センサと直角定規を用いた測定と比較することによってその測定精度を評価した。

### 1. 緒言

位置決め系の運動精度を向上させるためには、まずそれを正確に測定できることが重要である。通常、工作機械送り系の2次元平面内の真直度、直角度は、直定規、直角定規などの測定基準と変位センサを用いて測定される。それに対し、2次元平面内の任意の指令軌跡に対する運動誤差を直接測定できる測定器として、交差格子スケール<sup>1)</sup>が市販化されている。しかし、交差格子スケールには以下に示す原理的な問題点があると考えられる。

1. ヘッドとグリッドプレートの距離を1 mm以下にセットアップしなければならず、セットアップに手間がかかると同時に危険である。また、グリッドはガラス製で壊れやすい。
2. グリッドプレートが回転すると測定が行えず、例えば旋回軸の位置決め精度の測定などの目的には使用できない。

近年、画像による測定や位置決めが急速に普及している。本研究では図1のようにカメラを工作機械主軸に取り付け、精度が既知である対象（以下アーティファクト）を撮影することで、工作機械送り系の2次元位置決め誤差を広い範囲に計測する手法を検討した。画像による測定には上記の交差格子スケールの原理的な問題点と比較して、以下のような利点があると考えられる。

1. 測定対象と測定器の距離はレンズの作動距離によるが、一般に数十mm程度とることができるため、セットアップを安全に行うことができる。
2. カメラと対象の角度が変わっても測定可能であるため、旋回軸の測定等にも適用でき、測定対象の姿勢も含めて測定できる。

本論文の目的は、画像によるアーティファクトの位置認識を用いて、どの程度の精度で工作機械送り系の2次元位置決め誤差を測定できるかを実験的に評価することとする。

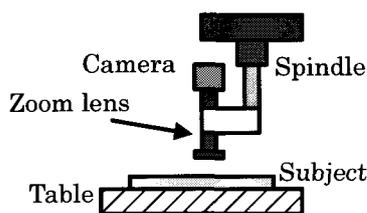


Fig. 1 Experimental setup

### 2. 測定方法およびエッジの定義と抽出

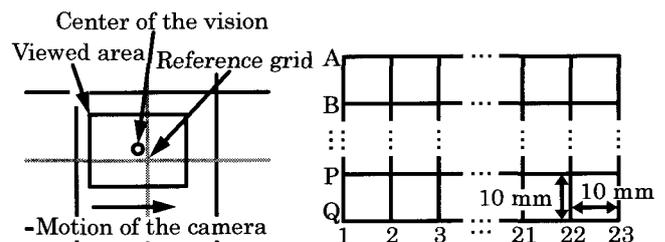
図2(b)のような水平、垂直方向の参照直線を一定間隔で組み合わせた格子を撮影する。画像中の水平、垂直方向の直線が交差する点を原点とし、水平、垂直方向の直線をX軸、Y軸とする座標系を定義する。図2(a)に示すように、この座標系上で画像上の一定の基準点（例えば画像の中心点）の座標を求め、送り系の2次元位置とする。

画像上のある直線上における輝度値を離散関数とみなし、各画素における輝度の1次差分の絶対値が極大となる点をその直線上のエッジ点と定義する。画像全体を走査し、エッジ点の集合を抽出し、エッジと定義する。

エッジ抽出のために、Sobelオペレータを利用し、各画素における輝度の水平、垂直方向の1次差分を計算の後、合成することにより、エッジ強度を算出する<sup>2)</sup>。画素サイズ以下の単位でエッジを抽出するため、画素サイズ単位で抽出したエッジ点を中心として3×3画素のエッジ強度を抜き出し、エッジ強度を多項式平面で補間し、内挿を行う。改めて0.1×画素の単位でエッジ強度が極大を取る座標を抽出し、画素サイズ以下の単位でのエッジ点として算出する。

### 3. エッジ抽出による2次元位置決め精度測定

形状精度が既知であるグリッドを撮影対象として、エッジ抽出による2次元位置の測定を利用して、工作機械送り系の2次元位置決め精度をさまざまなX、Y位置で測定した。比較のため渦電流式変位センサ（分解能：0.3 μm）と直角定規を用いた測定も行った。本実験では、約200万画素の白黒CCDカメラを用い、レンズ倍率は0.75倍とした。このときカメラの有効範囲に対応する視野範囲は9.54 mm × 7.20 mmとなる。また、1画素に対応する範囲はおよそ5.8 μm × 5.8 μmとなるが、前節で示した内挿を利用した手法によって1 μmの分解能で変位を認識できることは別の実験で確認済みである。図2に測定に使用したグリッドプレートを示す。



(a) Measurement of two-dimensional position

(b) Grid plate

Fig. 2 Measurement of one-dimensional and two dimensional position of the camera by using reference grid

グリッドプレートはガラス板上に線幅8  $\mu\text{m}$ の金属のグリッドが蒸着されたものである。実験の際は図2(b)に示すグリッドのA~Qのラインが測定対象である汎用立型マシンニングセンタ送り系のY軸, 1~23のラインが測定対象である送り系のX軸とほぼ平行になるように機械のテーブル上に設置する。その上で主軸に取り付けたカメラをあるラインに沿って20 mm間隔で停止させ、グリッド点を撮影する。今回はN, L, C, 19, 10, 2について撮影をおこなう。測定は各ラインにつき5回おこなう。またグリッド自体の真直度, 直角度は画像測定器 (OGP社 SMARTSCOPE VANTAGE 600) で校正した。

計算した送り系の2次元位置決め誤差を図3に示す。図中において誤差は10,000倍に拡大されており, また座標系はグリッド自体の誤差を校正, 補正した上で, ラインLに沿って撮影を行った測定の結果の最小二乗近似直線が水平となるように定義している。図中の $\times$ のマーカは指令位置を示している。また図中の近似直線は平行度, 直角度誤差を示している。

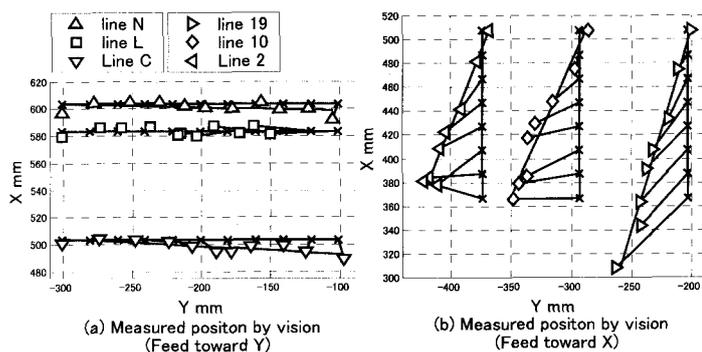


Fig. 3 Errors map (Errors are magnified by 10,000)

図4にラインLに沿って撮影した画像による測定と, 変位センサと直角定規を用いたY方向駆動時のX方向変位測定の結果を示す。ただし5回の測定の平均値を $\square$ のマーカで示し, その上下の線分は測定のばらつきを, 意味している。図中において変位の平均値が0となるように座標系を定義している。2つの測定の結果の差を計算すると, 平均で1.0  $\mu\text{m}$ , 最大で2.6  $\mu\text{m}$ であった。

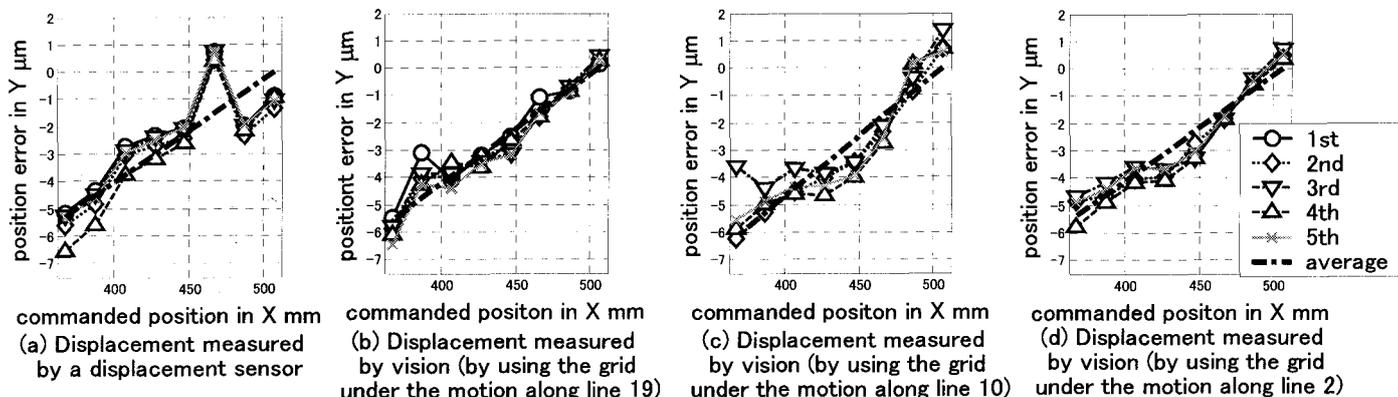


Fig. 5 Measured displacement by a displacement sensor and by using grid under the motion along line 19, 10, 2 in Y under the motion toward X direction (squareness error)

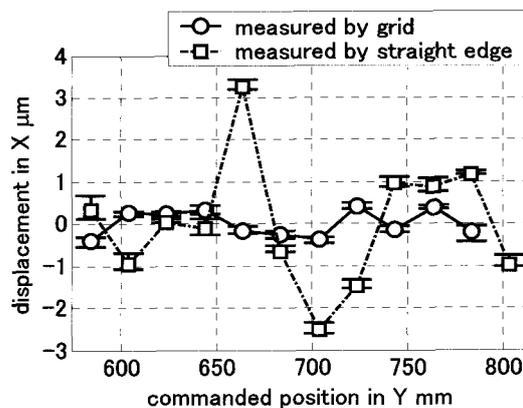


Fig. 4 Measured displacement in the direction normal to the feed direction (straightness error)

図5にX方向駆動時(ライン19, 10, 2)のY方向変位を示す。図5(b)にライン19に沿って撮影を行った際の測定結果を示しており, 同じ位置における真直度(直角度を含む)を変位センサと直角定規を用いて測定した結果を図5(a)に示す。参考までに図5(c), (d)には同様にそれぞれライン10, ライン2に沿って撮影した画像による測定の結果を示している。図中の近似直線は測定対象機械のX軸とY軸の直角度を意味している。直角度の値は-5.9  $\mu\text{m} / 140 \text{mm}$  (ライン19に沿って撮影した測定), -6.5  $\mu\text{m} / 140 \text{mm}$  (ライン10), -5.7  $\mu\text{m} / 140 \text{mm}$  (ライン2)。図5(a)と(b)を比較すると直角度の差は0.3  $\mu\text{m} / 140 \text{mm}$ 程度であった。

#### 4. 結言

本論文では画像を用いた工作機械送り系の真直度, 直角度誤差の測定について述べた。この測定結果を直角定規と渦電流式変位センサを用いて行った測定の結果と比較すると140mmに対して真直度測定に関しては3  $\mu\text{m}$ 以下, 直角度測定に関しては0.3  $\mu\text{m}$ 程度という結果であり, 今回の測定対象に関しては有効な測定手段であるといえる。

#### 参考文献

- 1) 産業技術サービスセンター: 実用精密位置決め技術辞典, (2008)558.
- 2) 株式会社リンクス: HALCON活用法, (2004)76.