

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 ○谷澤佑介, 京都大 茨木創一, 京都大 松原 厚

Vision-based Measurement of Two-dimensional Position Errors of a Machine Tool

Kyoto University Yusuke TANIZAWA Kyoto University Soichi IBARAKI Kyoto University Atsushi MATSUBARA

This research presents vision-based measurement of two-dimensional position errors for machine tools. In experiment, we attach a charge coupled device (CCD) camera to the spindle to view an artifact of the known form accuracy. The edge in the vision is detected by using the Sobel operator and the position of the camera with respect to the artifact is measured from it. In this paper, we use a grid evaporated on a glass plate as an artifact to measure straightness and squareness of the drive system. For comparison, we measure them with an eddy-current displacement sensor and a square edge. By using this measurement result, we evaluate the identification accuracy of this vision-based measurement

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次元平面内での真直度、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次元平面内で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¹⁾などが市販化されている。しかし、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。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、などの問題がある。

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。

2. 測定方法

2.1 測定方法

1次元位置を測定する場合、直線状の参照直線（例えば直線状エッジを持つアーティファクト）に沿ってカメラを走査し、画像中におけるエッジ位置の送りに垂直な方向への変位を測定する。

2次元位置の測定の際は、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。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、それをカメラの2次元位置とする。

2.2 エッジの定義および抽出

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、エッジ点の集合をエッジと定義する。

Sobelオペレータ²⁾を利用し、各画素の輝度の1次差分を計算した後、エッジ強度を算出する²⁾。画素サイズ以下の単位でエッジを抽出するため、エッジ強度が極大となる画素を中心として3×3画素を抜き出し、エッジ強度を多項式平面で補間して極大位置を算出する。

3. エッジ抽出による1次元位置の測定

3.1 実験1：1画素以下の移動に伴うエッジ認識

対象物の移動距離が1画素サイズ以下であるとき、エッジ認識により変位を計測する試験を行った。

汎用立型マシニングセンタ機械Aのテーブル上に載せた長方形のアーティファクトを、1 μmステップでX方向に計3 μm駆動し、停止状態でエッジを撮影した。本論文の実験ではすべて約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4.4 μm×4.4 μmとなるので、1 μmの分解能を得るためには、1画素の約1/4～1/5の分解能でエッジ抽出を行う必要がある。

図1に抽出したエッジおよび最小二乗法を用いて計算した近似直線を示す。図1より、各位置におけるエッジ点のパターンはほぼ同一であるため、撮影対象ワークのエッジの形状誤差を表していると考えられる。また1 μmステップで送り系を駆動させたのに伴い、近似直線もほぼ一定間隔で移動していることが確認できる。指令位置とエッジ位置の差を計算すると、距離に換算して0.4 μm以下であった。以上より1 μmの移動を認識できていることが分かる。

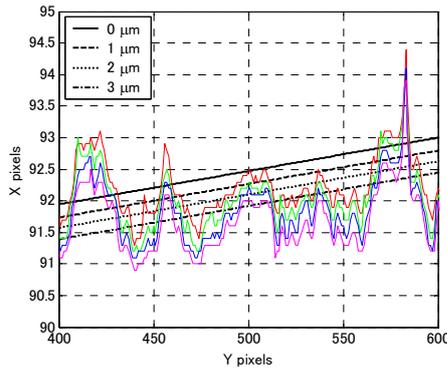


Fig. 1 Edges identified from images under $1\mu\text{m}$ step motion toward X. (straight lines indicate approximate line by least square fit)

3.2 実験2：1次元位置測定を利用した工作機械送り系の直角度測定

直角定規（真直度，直角度の校正値は全ての辺において $1\mu\text{m}$ 以下）の2辺を 20mm 間隔で撮影することで，工作機械送り系の真直度および直角度を調べた。測定は3回行った。比較のため渦電流式変位センサ(分解能： $0.3\mu\text{m}$)を用いた測定も5回ずつ行った。

X方向駆動時のY方向変位を，画像および変位センサを用いて測定した比較を図2に示す。ここでは，Y方向駆動時のX方向変位の平均値がゼロとなるように座標系を定義している。すなわち，図2中に示されている近似直線の傾きが，測定対象である送り系のX軸とY軸の直角度を示す。

画像および変位センサによる真直度測定の差は，Y軸駆動時において平均 $1.4\mu\text{m}$ ，最大 $3.1\mu\text{m}$ ，X軸駆動時において平均 $1.1\mu\text{m}$ ，最大 $2.7\mu\text{m}$ であった。直角度は画像による測定では $-4.1\mu\text{m}/180\text{mm}$ ，変位センサによる測定では $-6.8\mu\text{m}/180\text{mm}$ という結果であった。

以上より変位センサを用いた測定と比較して，測定距離 220mm に対して平均 $3\mu\text{m}$ 程度の誤差で，画像を用いて1次元位置の測定を行うことができたといえる。

3.2 実験3：2次元位置測定を利用した工作機械送り系の2次元位置測定

形状精度が既知であるグリッド（ガラスプレート上にクロムの線（線幅 $8\mu\text{m}$ ）が 10mm 間隔の格子状に真空蒸着されているものであり，格子の直角度はメーカーによって 5arcsec 以

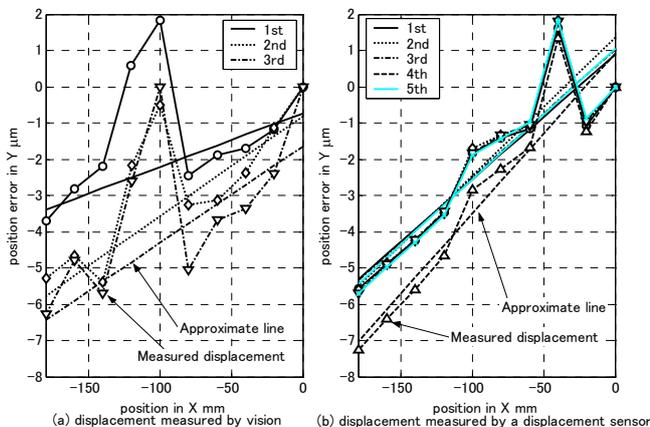


Fig. 2 Measured displacements in Y under the motion toward X direction

下と校正されている)を撮影対象として，工作機械送り系の2次元位置決め誤差を測定した。測定は3回行った。Y方向，X方向それぞれにおいて 20mm 間隔で停止して撮影を行った。3.1節同様に送りに垂直な方向の変位とX方向駆動時のY方向変位を計算した。測定結果を図3に示す。座標系の定義は図2と同様である。

真直度の測定結果を3.1節における変位センサによる測定結果と比較すると，両者の差はY軸駆動時で平均 $1.0\mu\text{m}$ ，最大 $3.7\mu\text{m}$ ，X軸駆動時で平均 $1.6\mu\text{m}$ ，最大 $2.8\mu\text{m}$ であった。

3.1節同様X方向駆動時のY方向変位の近似直線から直角度を計算した。5回の測定を平均すると $0.45\mu\text{m}/140\text{mm}$ であった。これは，3.2節での結果： $-3.2\mu\text{m}/140\text{mm}$ （画像による測定）， $-5.3\mu\text{m}/140\text{mm}$ （変位センサによる測定）と比べると差が大きいう結果であった。

真直度測定は直角定規を撮影対象とした場合と同程度の結果が得られ，直角度測定では，変位センサによる測定結果と比較すると， 140mm で $5\mu\text{m}$ 程度の差が生じているということになる。この一部はグリッド自体の直角度誤差に起因すると考えられる。また，図3の測定結果に最大 $2\mu\text{m}$ 程度のばらつきがみられるが，機械Aの非再現性の位置決め公差の他，カメラの固定が十分でなく微小な変位が生じていた可能性があるためである。

4. 結 言

本論文では以下のような結論を得た。

- (1) エッジ抽出を利用した1次元位置測定によって， $1\mu\text{m}$ の移動を 0.1 画素以下の分解能で検出することができることを示した。
- (2) 送り系の真直度，直角度を測定する実験を行った。直角定規，グリッドを撮影対象とした測定と直角定規と変位センサを用いた測定との差はそれぞれ，測定距離 220mm に対して平均 $3\mu\text{m}$ 程度の誤差，測定距離 140mm に対し平均 $5\mu\text{m}$ 程度の誤差であった。

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。

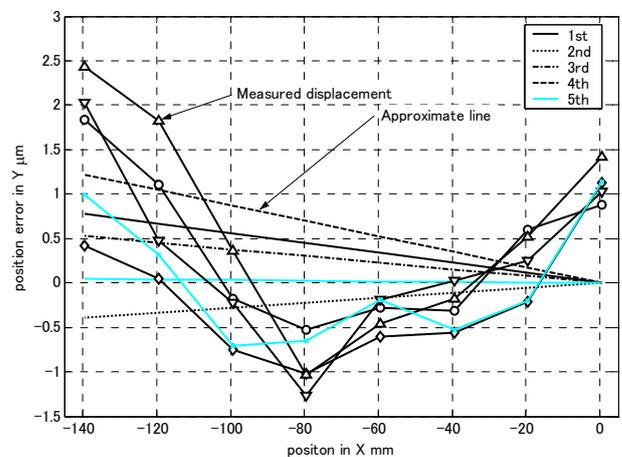


Fig. 3 Measured displacement in Y under the motion toward X direction