S131022

画像を利用した工作機械の運動精度測定*

茨木 創一^{*1}, 谷澤 佑介^{*2}

Vision-based measurement of motion errors for machine tools

Soichi IBARAKI^{*1} and Yusuke TANIZAWA^{*2}^{*1} Kyoto University, Dept. of Micro Engineering
Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

This paper presents vision-based measurement of two-dimensional positioning errors of machine tools. A pre-calibrated grid plate is used as an artifact. The position of a grid point is measured in an image captured by a charge coupled device (CCD) camera attached to a spindle. Unlike conventional two-dimensional digital scales, the vision-based measurement can target the artifact in any orientation, and thus can be applied to error calibration of a rotary axis. The paper demonstrates experimental applications of the vision-based measurement to the measurement of 1) static error motions of linear axes, 2) static radial error motion of a rotary axis, and 3) dynamic radial error motion of a rotary axis.

Key Words : Vision-based measurement, volumetric accuracy, camera, grid, five-axis machining center.

1. 緒 言

位置決め系の運動精度を向上させるためには、運動精度を正確に測定できることが重要である。工作機械の送り系を主な対象として、2次元平面内での任意の指令軌跡に対する輪郭運動誤差を測定できる測定器として、交差格子スケール（2次元スケール）が市販化されている。交差格子スケールとは、測定基準に格子（グリッド）を用いて、リニアエンコーダと同様の原理で、2次元直交座標系での位置を測定するエンコーダである（図1参照⁽¹⁾）。しかし、交差格子スケールには以下に示す原理的な問題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短くしなくてはならず（市販の交差格子スケールの場合、推奨間隔は0.5mm程度⁽¹⁾）、セットアップに手間がかかると同時に、衝突の危険がある。
2. ヘッドとグリッドプレートの向きが厳密に調整されなくてはならず、グリッドプレートに対してヘッドが回転するような測定は不可能である。例えば、旋回軸の位置決め精度を測定などには使用できない。
3. グリッドの較正、および「値付け」による補正が極めて困難である。
4. グリッドプレートの製作上、大きな測定範囲を得ることが難しい。

近年、カメラの高性能化、低価格化を背景に、画像を用いた検査や位置決めは様々な分野で急速に普及している。本研究の目的は、任意の指令軌跡に対する工作機械送り系の2次元位置決め誤差を、画像を用いて計測する手法を構築し、その測定精度を実験的に評価することである。具体的には、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し、画像からエッジを抽出することにより、テーブルに対する主軸の相対位置を測定する。上記の交差格子スケールの持つ原理的な問題点と比較して、画像による測定法には以下のような長所があると考えられる。1) カメラと撮影対象とするアーティファクトの距離はレンズの作動距離によるが、一般に数十mm程度とすることが出来るため、セットアップを安全に行うことが出来る。2) カメラが撮影対象に対して回転しても測定可能であるため、旋回軸の測定等にも適用できる。3) 撮影対象の選択がある程度自由であり、その形状精度を較正することが比較的容易である。

^{*1} 正員、京都大学 工学部（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

^{*2} 非会員、京都大学 工学部

E-mail: ibaraki@prec.kyoto-u.ac.jp

Fig.1 Cross grid encoder (KGM182 by Heidenhain⁽¹⁾)

Fig.2 Schematics of vision-based measurement.

2. 画像による2次元位置の計測

2. 1 撮影対象

テーブルを基準とした主軸の2次元位置を検出するために、本研究では図2に示す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（以下グリッドと呼ぶ）を撮影対象とする。簡単のため撮影された画像には水平、垂直方向の直線が交差する点（以下グリッド点と呼ぶ）が1点のみ含まれていると仮定する。画像の中心を原点として、グリッド点の位置を水平、垂直方向の直線のエッジ検出から測定する。

2. 2 エッジ抽出のアルゴリズム

エッジ（輪郭線）の抽出は、画像処理のなかでも基本的なオペレーションのひとつである。以下、エッジ抽出による2次元位置の測定のアルゴリズムを簡単に説明する⁽²⁾。エッジとは、輝度が一樣な領域の境界（例えば対象物と背景）をあらわす特徴量で、画像中の輝度値がもっとも急激に変化している部分とみなすことができる。

(a) ピクセルサイズを分解能としたエッジ抽出

画像上のある水平直線上の輝度の変化パターンを調べ、エッジ強度（水平、垂直方向の輝度の一次差分を合成したもの）が極大を示す点を、その直線状のエッジとして抽出する。同様の探索を、画像全体において行う。

(b) ピクセルサイズ以下の分解能でのエッジ抽出

上記の方法では、抽出されたエッジ位置の分解能は、ピクセル（画素）サイズと同じとなる。実際には、内挿を使ってピクセルサイズ以下（本研究では画素サイズの1/10）の分解能でエッジ抽出を行う。グリッドの画像のエッジ抽出から、グリッド点の座標を算出する。

3. ケーススタディ

本節の目的は、画像を用いた2次元位置測定の方法を応用し、工作機械の送り系の運動精度を測定するケーススタディを行うことである。また、他の測定器による測定結果と比較し、画像を用いた測定の精度評価を行う。

3. 1 測定のセットアップ

実験装置の構成を図3に示す。実験装置の写真を図7に示す。撮影対象はガラスプレートに10 mm 間隔でクロムの格子が真空蒸着されているもの（以下グリッドプレート）を使用する。グリッドは縦140 mm×横220 mmの領域に存在する。グリッド自体の真直度、直角度は画像3次元測定器（OGP社製 SMART SCOPE VANTAGE 600）

Fig.3 Schematics of experimental setup.

Fig.4 Experimental setup.

を用いて校正を行った。カメラの画素サイズに対し、0.75 倍のレンズを使用したので、1 画素のサイズは約 $4.6 \mu\text{m} \times 4.6 \mu\text{m}$ の領域に対応することになる。1 μm の測定分解能を得るためには、1 画素の約 1/5 から 1/4 の大きさでエッジ位置を認識しなければならない。映像出力は 12 bit、カメラの有効範囲に対応する視野範囲は約 11.3 mm(H) $\times$ 9.50 mm(V) である。なお、本研究では図 8 に示す軸構成を持つ 5 軸制御の立形マシニングセンタ（機械 A）を測定対象とした。

3. 2 実験 1：直進 2 軸の位置決め誤差の測定

グリッドプレートのライン間の距離は、縦方向、横方向ともに 10 mm である。グリッドの左上の角を原点 (X,Y)=(0,0) とする。3 つの Y 位置 (Y=-20, -100, -120 mm) において、X=0~220mm で 20mm 毎に停止し、その位置をグリッド点の画像から計測する。同様に、3 つの X 位置 (X=10, 90, 180 mm) において、Y=-140~0mm で 20mm 毎に停止し、その位置を計測する。以上の撮影を各々 3 回ずつ繰り返す。

各々の指令位置に対し、画像測定で得られた位置決め誤差の 2 次元ベクトルを、10,000 倍に拡大して表示したのが、図 5 に示す誤差マップである。

また、ライン Y=-100 と X=180 について、画像測定で得られた位置決め誤差と、交差格子スケール（ハイデンハイン社 KGM）を用いて測定されたものとで比較したのが図 6 である。X 軸、Y 軸の直角度で $3 \mu\text{m}/180\text{mm}$ 程度の差が見られるが、この程度の差は交差格子スケール自身の不確かさ、加工機の非再現性誤差、画像測定に用いたグリッドプレートの校正誤差の何れの可能性もある。

3. 3 実験 2：旋回軸の半径方向誤差運動の静的測定

グリッドを撮影対象として、工作機械旋回軸（C 軸）の静的な誤差運動を測定する実験を行った。カメラの撮影対象は、C 軸の旋回中心軸上にあるグリッド点とする。主軸に取り付けたカメラは固定のまま、C 軸を指令割り出し角度に位置決めし、そのときのグリッド点の変位を測定する。図 7 は測定のセットアップを模式的に示したものである。

測定の結果得られたカメラの 2 次元位置のうち、円弧の半径方向成分を 50 倍に拡大して表示したものが図 8 である。本実験では、カメラの 2 次元位置に対し最小二乗近似を用いて円弧近似を行い、主軸がグリッドプレートに対して描く円弧軌跡の半径と中心座標を算出する。このような測定は、交差格子スケールでは行うことができない。

3. 4 実験 3：旋回軸の半径方向誤差運動の動的測定

次に、送り系を運動しながら撮影を行う、動的運動誤差の測定実験を行った。例として、動的な C 軸の半径方向誤差運動の測定実験の結果を示す。

カメラ及び画像キャプチャードの性能から、本章の測定では、カメラのシャッタースピードは 1/2,000 sec

Fig. 5 Two-dimensional error map by vision-based measurement ("·" represents command position. "○" and "□" represent actual position with the error from command position magnified 10,000 times).

(a) Measured by using a vision-based system

(b) Measured by using a cross grid encoder.

Fig. 6 Two-dimensional positioning errors at Y=-100 mm and X=180 mm (the error is magnified 10,000 times).

Fig. 7 Schematic of vision-based measurement of radial error motion of a rotary table.

Fig. 8 Static radial error motions of C-axis by the vision-based measurement.

Fig. 9 Dynamic radial error motions of C-axis by the vision-based measurement.

以上、送り速度は 100 mm/min 以下で実験を行うこととする。この設定であれば、シャッタースピードの設定時間の間に対象の移動距離は $1\mu\text{m}$ 以下となる。

一般的な工作機械送り系の送り速度が 100 mm/min というのは極めて遅く、実際の加工での送り速度における運動誤差を評価するためには、1/10～1/100 倍のシャッタースピードが必要である。本研究では、所有している撮影システムの性能に応じて、低速で試験を行い、画像による動的運動誤差の測定の基礎的な性能評価をする。

グリッドプレートは、あるグリッド点がほぼ C 軸の巡回中心軸上となるように機械 A のテーブル上に設置する。カメラの初期位置は C 軸巡回中心軸上から +X 方向に 2.5 mm 移動させた位置とする。+Z 方向からカメラを固定したまま 1 秒間に約 4 枚の画像を撮影する。巡回軸の送り速度は 2300 deg/min とした。

画像測定されたカメラの 2 次元位置を図 9 に示す。3.3 節と同様、最小二乗近似によって得た半径を基準に、半径方向の誤差を 500 倍に拡大している。

3. 結 語

形状が既知であるグリッドプレートを、主軸に取り付けたカメラで撮影することにより、グリッドプレートを基準としたカメラの位置を画像測定し、工作機械送り系の 2 次元位置決め精度の評価を行う方法を提案し、その測定性能の実験による評価を行った。リニアエンコーダの原理を応用した光学式の交差格子スケールと比べて、テーブルが主軸に対して回転しても測定が行える、測定器と対象の距離が長い、などの原理的な利点がある。本論文では測定例として、1) 直進軸の誤差運動の静的測定、2) 巡回軸の誤差運動の静的測定、3) 巡回軸の誤差運動の動的測定、の 3 つをデモンストレーションした。より短いサンプリング時間で動的測定を行うためには、撮影システムと画像処理技術の高速化が必要である。

謝 辞

本研究の実験では、Machine Tool Technologies Research Foundation(MTTRF)より貸与された 5 軸制御工作機械を用いた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Measuring systems for machine tool inspection and acceptance testing (catalog).
- (2) A. Hornberg (editor), Handbook of Machine Vision, Wiley-VCH, (2006).