

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560122

研究課題名(和文)画像計測を用いた多軸制御工作機械の空間精度の「自己最適化」の方法論

研究課題名(英文)"Self-optimization" of volumetric accuracy of five-axis machine tools by vision-based measurement

研究代表者

茨木 創一 (Ibaraki, Soichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80335190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：工作物・工具の姿勢を制御する回転軸を複数持つ工作機械は、多軸工作機械と呼ばれ、機械加工の高能率化と工程集約のためのキー技術と言える。多軸工作機械の運動精度を高めるために、工作機械が自ら、自分自身の精度、及び加工物を含む加工環境を測定し、それを最適に補正するという、工作機械の「自己最適化」という方法論を構築することを研究の目的とした。画像を用いた直進軸の運動精度の測定システム、及びR-testと呼ぶ測定法により回転軸の運動誤差を測定するシステムを構築し、それを用いて誤差原因の診断と、誤差補正を自動的に行うソフトウェアを開発した。

研究成果の概要(英文)：Machine tools with two rotary axes to control the orientation of a tool or a workpiece are collectively called five-axis machine tools. They play a key role in process integration for higher manufacturing efficiency. The objective of this research is to develop a methodology to "self-optimize" the motion accuracy of five-axis machine tools, where motion errors of five-axis machines, as well as errors in the machine setup, are measured by the machine itself and then compensated for. A vision-based measurement system for linear axis motions errors, and the R-test measurement system for rotary axis motion errors, were developed. A software to diagnose error causes, and then to numerically compensate for them, was developed.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：工作機械 運動精度 測定 画像 補正

1. 研究開始当初の背景

日本の工作機械業界は、1980年代から20年以上、生産高世界1位の座を守ってきたが、近年は新興国との厳しい国際競争にさらされている。その結果、多くの国内の工作機械メーカーは、マシニングセンタ型の5軸加工機や、旋盤型複合加工機といった、より付加価値の高い機種に主力を移しつつある。このような、工作物・工具の姿勢を制御する旋回軸を複数持つ加工機を、本研究では多軸工作機械と総称する。

多軸工作機械の更なる普及を促進するには、幾つか重要な技術的課題がある。そのひとつは、多軸工作機械は従来の専用機と比べて、軸が多く、またそれらが直列につながる構成となるため、加工精度の面でかなり劣る、というのが製造現場の共通認識と云ってよい点である。

これまで日本の工作機械メーカーは、機械の要素毎の機械的な調整、すなわち「すり合わせ」によって、工作機械の精度を確保することを得意としてきた。しかし、多軸工作機械は軸が多く構成も複雑なため、「すり合わせ」だけで精度を出すのは、熟練工にとっても困難である。また、製造コストを上げる要因となる。さらに、工作機械の運動誤差の大きな原因のひとつは、周辺温度などの環境の変化である場合が多い。たとえ工作機械の出荷時に十分な精度が出ていたとしても、ユーザが実際に加工を行う際に、十分な精度が達成できることは保証されない。

2. 研究の目的

本研究では、各々の工作機械が自ら、自分自身の精度、及び加工物を含む加工環境を校正し、それを最適に補正するという、工作機械の「自己最適化」という考え方を多軸加工機に適用する方法論を構築することを目的とする。

本研究は、「すり合わせ」だけで高い精度を出すことが難しい、多軸加工機にターゲットを絞り、工作機械メーカーによる「すり合わせ」に頼らない、工作機械の運動精度を維持するための新しい考え方を提案し、具体化することが目的と言える。

3. 研究の方法

(1) 工作機械の直進軸の2次元運動精度の測定システムの構築

工作機械が自律的に、自らの運動精度を測定できる測定技術を開発する。最初に、2次元平面内における任意の指令軌跡に対する輪郭運動精度の計測システムを開発した。

この計測システムに要求される仕様は以下の通り。1) 測定対象の2次元位置を、十分な精度(分解能1マイクロメートル)で測定できる。2) 測定対象と測定器が数mm~数10mm離れ、安全性が高い。3) 測定対象の位置と回転を測定できる。4) 測定精度の較正が比較的容易。5) 大きな測定範囲を取ることが

比較的容易、6) 比較的安価。

以上の要求仕様を満たす計測システムとして、本研究では、CCDカメラを用いた画像撮影を基礎とした測定システムを開発した。テーブル上に設置したアーティファクトを撮影し、任意の指令軌跡に対する、静的、または動的な運動誤差を計測する手法を確立し、その測定性能の評価を行った。

(2) 多軸工作機械の旋回軸の運動精度の測定システムの構築

次に、多軸工作機械の旋回2軸の運動精度を、工作機械が自ら測定する技術として、R-testと呼ぶ新しい測定法に基づく誤差診断法を構築した。

R-testとは、主軸に基準球を取り付け、そのテーブルに対する3次元変位を、テーブルに固定した3つの変位センサで連続測定する測定器である。この測定器を使用し、多軸工作機械の旋回軸の組み立て誤差や、振れや重力による変形などの誤差運動を個別に、誤差診断する方法論を構築した。実際に試作器を製作し、様々な軸構成の多軸工作機械を対象とした、ケーススタディを実施した。

(3) 多軸工作機械の「自己最適化」アルゴリズムのソフトウェア化

上記で構築した、R-test測定を基礎とした「自己最適化」のアルゴリズムを、ソフトウェアとして実装する。これまでの研究成果をもとに、測定の実施、測定データの収集、誤差マップの構築、誤差原因の診断、誤差補正を行うためのデータの出力、を行うことがソフトウェアの主な機能である。

4. 研究成果

(1) 画像を用いた工作機械の直進軸の2次元運動精度の測定システムの構築

測定の基準となるアーティファクトとして、ガラスプレート上にグリッド(格子)状の金属線が蒸着されているガラス・グリッドを工作機械のテーブル上に設置し、それをCCDカメラで撮影することで、工作機械の直進軸の2次元運動精度を測定するシステムを提案した。実際にプロトタイプを製作し(図1)、その測定精度の評価実験を行った。

最初に、工作機械送り系の静的な2次元位置決め精度、すなわち工作機械を指令位置に停止したときの位置精度の測定実験を行った(図2に測定例を示す)。直定規と変位センサを用いた測定や、交差格子スケールなど、従来工作機械の精度検査に用いられている測定法と、同等の測定精度が得られることを示した。

さらに、工作機械送り系の動的運動精度、すなわち運動しているときの軌跡精度の測定実験を行った。画像を用いた測定では、ひとつのセットアップで様々な誤差の測定が行えることを、実験で示すことができた。一回のセットアップで多くの測定が行えるこ

とは、工作機械自体が自動的に精度キャリブレーションを行う「自己最適化」の考え方を表現するために、必要不可欠である。

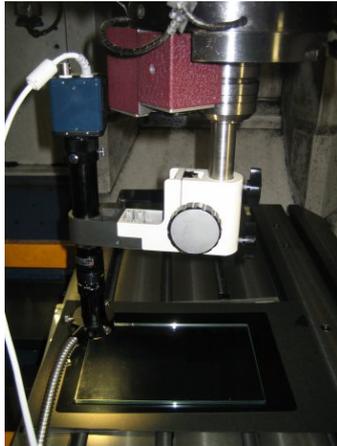


図1 画像を用いた2次元運動精度の測定システム

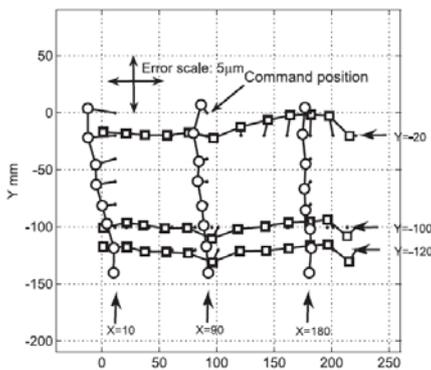


図2 画像を用いた測定システムの測定例. 2次元平面内の指令点と、実際に測定された主軸端の位置の差を、拡大して表示した直線2軸の「誤差マップ」.

(2) 「R-test」測定を用いた多軸工作機械の旋回軸の運動精度の測定システムの構築

R-test とは、主軸に基準球を取り付け、そのテーブルに対する3次元変位を、テーブルに固定した3つの変位センサで連続測定する測定器である。多軸工作機械の旋回軸と、直進軸を同期運動させ、その同期誤差を測定する。その測定結果から、旋回軸の組み立て誤差や、振れや重力による変形などの誤差運動を、定量的に評価するアルゴリズムを構築した。

R-test 測定器の試作機を製作し (図2)、実際に多軸工作機械の精度測定実験を行った (図3)。図4に測定例を示す。本研究で提案したアルゴリズムでは、まず、図4のように誤差軌跡を視覚的に表示することで、工作機械の誤差原因を診断することを支援する。「自己最適化」の考え方の中心となるのは、各軸の「誤差マップ」を工作機械が自動的に取得し、(4)の誤差補正につなげることである。

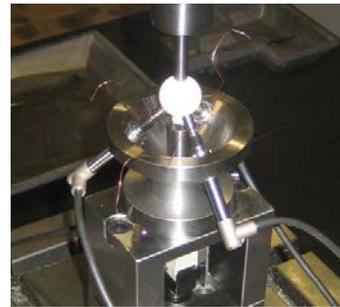


図2 R-test 測定器の試作機



図3 主軸旋回形の5軸加工機でのR-test 測定

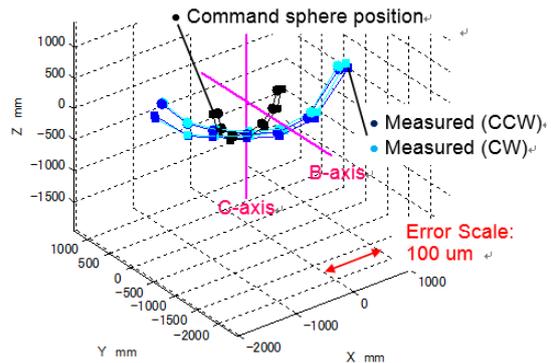


図4 R-test 測定例. 主軸旋回形5軸加工機の旋回軸を旋回したときの、主軸につけられた基準球の軌跡を測定したものの。

(3) 非接触 R-test 測定器の開発

従来の R-test 装置は接触式の変位センサを用いるのに対し、よりセットアップが容易で、安全で、より自動化に適している非接触式の R-test 装置を試作した (図5)。3つのレーザ変位計を用いて、測定誤差などの要因を補正した上で、R-test 測定を行うためのアルゴリズムを構築し、測定性能を確認するための実験を行った。

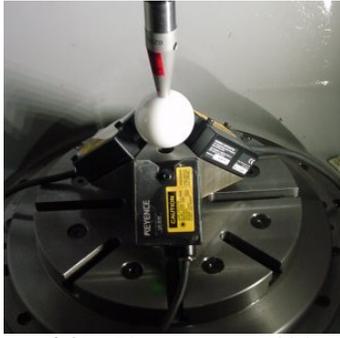


図5 レーザ変位計を用いた非接触 R-test 装置の試作機

(4) 多軸工作機械の「自己最適化」アルゴリズムのソフトウェア化

本研究で構築した、R-test 測定を基礎とした 5 軸加工機の「自己最適化」のアルゴリズムを、ソフトウェアとして実装した。ソフトウェアの主な機能は、以下の通り。

1. R-test 測定の実施

センサの方向ベクトルなど、測定に必要なパラメータの同定や、測定用の NC プログラムを作成し、オペレータの作業をサポートする。

2. 測定結果の表示

回転軸の誤差運動を直感的に理解しやすいように、測定データを 3 次元空間内での軌跡に変換して、表示する。

3. 回転軸の運動誤差の数値化

回転軸の軸平均線の位置・姿勢の誤差（幾何誤差）や、回転軸の「誤差マップ」も同定する。

4. 誤差補正

最新の CNC システムのなかには、回転軸の誤差運動を補正する機能を持つものがある。測定結果に基づき、補正データを作成する（図 7 参照）

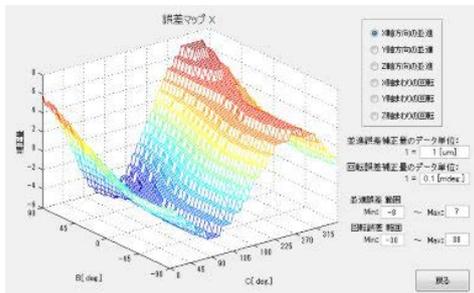


図7 誤差補正のマップ。構築したソフトウェアの画面。

(5) ケーススタディ

様々な軸構成の多軸工作機械を対象として、構築したソフトウェアを使って、測定・補正実験を行った。工作機械が自ら運動誤差を測定し、補正を行うという「自己最適化」の考え方の有効性を、実験で示した。軸構成が異なると、異なった工作機械の幾何学モデ

ルが必要となるため、それに応じた誤差診断・補正アルゴリズムが必要となる。

以下の 5 軸加工機の軸構成に対して、実験を行った。① 主軸旋回形の 5 軸加工機（図 3）、② テーブル旋回形の 5 軸加工機（図 7）、③ 旋盤形複合加工機（図 8）、④ テーブル・主軸旋回形の 5 軸加工機（図 9）。

すべての機種で、構築したソフトウェアを使って、自動的に誤差原因診断が行えること、補正によって誤差が低減することを実験により確認した。

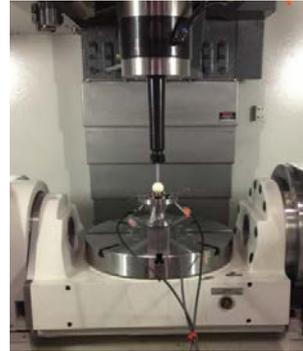


図7 テーブル旋回形の 5 軸加工機での R-test 測定



図8 旋盤形複合加工機での R-test 測定

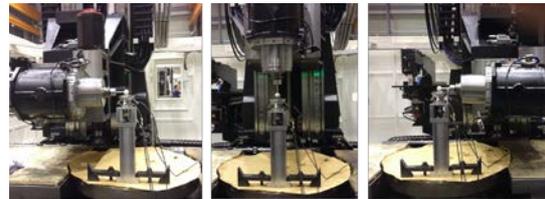


図9 テーブル・主軸旋回形の 5 軸加工機での R-test 測定

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 7 件）

- ① Soichi Ibaraki, Yusuke Ota, Error Calibration for Five-Axis Machine Tools by On-the-Machine Measurement Using a Touch-Trigger Probe, International Journal of Automation Technology, 査読有, vol. 8,

- No. 1, pp. 20-27, 2014.
- ② Soichi Ibaraki, Takeyuki Iritani, Tetsuya Matsushita, Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 査読有, vol. 68, pp. 21-29, 2013.
DOI: 10.1016/j.ijmactools.2013.01.001
- ③ Cefu Hong, Soichi Ibaraki, Non-contact R-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools, Precision Engineering, 査読有, vol. 37, No. 1, pp. 159-171, 2013.
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2012.07.012
- ④ Soichi Ibaraki, Cefu Hong, Thermal Test for Error Maps of Rotary Axes by R-Test, Key Engineering Materials, 査読有, vol. 523-524, pp. 809-814, 2012
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.809
- ⑤ Cefu Hong, Soichi Ibaraki, Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-test with separating the influence of squareness errors of linear axes, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 査読有, vol. 59, pp. 24-33, 2012.
DOI: 10.1016/j.ijmactools.2012.03.004
- ⑥ Cefu Hong, Soichi Ibaraki, Observation of Thermal Influence on Error Motions of Rotary Axes on a Five-Axis Machine Tool by Static R-Test, International Journal of Automation Technology, 査読有, vol. 6, no. 2, pp. 196-204, 2012.
- ⑦ Soichi Ibaraki, Yusuke Tanizawa, Vision-Based Measurement of Two-Dimensional Positioning Errors of Machine Tools, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.5, No. 4, pp. 315-328, 2011.
DOI: 10.1299/jamdsm.5.315

[学会発表] (計 6 件)

- ① 長井 優, R-test を用いた旋盤型複合加工機の運動誤差の測定と補正, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会, 東京大学, 2014 年 3 月 19 日.
- ② Soichi Ibaraki, Thermal Test for Error Maps of Rotary Axes by R-Test," 14th International Conference on Precision Engineering (ICPE2012), 淡路島, 2012 年 11 月 8 日.
- ③ Soichi Ibaraki, Non-contact R-test for error calibration of five-axis machine tools," ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation (ISFA 2012), St. Louis (米国), 2012 年 6 月 19 日.

- ④ 茨木 創一,画像を利用した工作機械の運動精度測定評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会. 東京工業大学, 2011 年 9 月 12 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

茨木 創一 (IBARAKI, Soichi)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80335190

(2)研究分担者

なし.

(3)連携研究者

なし.