

5 軸制御工作機械の運動誤差測定とその補正*

Measurement and Compensation of Error Motions of Five-axis Machine Tools

茨木創一**
Soichi IBARAKI

Key words

five-axis machine tools, error motion, measurement, compensation, volumetric accuracy, ball bar, R-test, touch-trigger probe

1. はじめに

工作機械の空間誤差という言葉を目にする機会が増えていく。例えば、工作機械の受渡し検査の規格を担当する ISO の TC39/SC2 分科委員会では、空間精度の考え方を新しい規格に取り入れようという動きが活発である。最近改定された ISO 230-1 規格¹⁾では、空間精度という用語が定義されるとともに、誤差パラメータや基準座標系の考え方などが、新しい附属書として追加された。また、空間誤差の補正に関する標準報告書も新しく提案されている²⁾。コンピューター数値制御 (CNC) の大手メーカの多くが、最近になって、空間誤差の補正機能を実用化したことも、空間誤差が最近注目されている理由のひとつである。

空間誤差の評価とは、工具端の指令位置と実際の位置との差を表す 3 次元ベクトルを、可動領域全体で評価することを指す³⁾。例えば、X 軸の位置決め誤差は、X 軸の姿勢誤差 (ヨーなど) が原因で、Y 位置が変わると変化する可能性がある。空間誤差の評価とは、「ある軸の誤差運動が、別の軸の位置によってどのように変化するか」を可動領域全体で評価すること、と考えることができる。

空間誤差の考え方は、5 軸制御工作機械の旋回軸にも拡張できる。例えば、傾斜軸 (B 軸) の上に回転テーブル (C 軸) が乗せられたテーブル旋回形の 5 軸制御加工機を考える。C 軸の割り出し精度、回転中心の位置誤差、振れなどの回転運動精度は、B 軸が水平の状態では検査されるのが一般的であろう。しかし、B 軸が垂直の状態になれば、重力によるベアリングの変形などが原因で、誤差が増大する場合がある。つまり、C 軸の運動誤差が、B 軸の角度によって変化する。

旋回軸の最も基本的な誤差要因は、旋回軸と直進軸の直角度や、中心の位置誤差など、旋回軸の組み立て誤差 (アライメント誤差) を表す誤差で、「幾何誤差」と総称さ

れる場合もある。これらは、旋回軸の軸平均線の位置・姿勢の誤差である。軸平均線とは「基準座標系に対して配置した、回転軸の平均位置を表す直線」と定義され⁴⁾、すなわち回転軸を 1 回転させたときの、位置と姿勢の「平均」の誤差といえる。幾何誤差の評価法は、ボールバーを使った補間運動試験法、静的精度試験などが普及しつつあり、ISO 規格化の動きも進められている⁵⁾⁶⁾。

幾何誤差は 5 軸運動の基本的な誤差要因であるが、それに加えて、「ある軸の誤差運動が、その軸、または別の軸の角度とともにどう変わるか」を評価することの重要性が認識されつつある。特に旋回軸の傾きは、旋回中心から離れるほど工具-ワーク間の相対変位に及ぼす影響は大きくなるので、特に大型機では重要である。

本稿では、5 軸制御工作機械の旋回軸の誤差運動の測定法に関する、最近の研究動向を紹介したい。なお、ISO 規格の動向に関しては、「精密工学会誌」78 巻 7 号の特集記事⁷⁻⁹⁾が詳しい。また、より広範囲の研究レビューは、文献³⁾を参照にいただければ幸いである。

2. ボールバー測定

ボールバーは両端に球を配置したバーの伸縮を測定する装置で、直進 2 軸による円弧補間運動の輪郭運動誤差を測定する円運動精度試験が、工作機械の精度検査に広く普及している¹⁰⁾。このボールバーを用いて、旋回軸の幾何誤差を評価する方法は、90 年代から活発に研究されてきた^{11)~14)}。日本の委員から ISO 規格化の提案が行われ、ISO 10791-6 の附属書として発行される予定である⁵⁾⁷⁾⁸⁾。

図 1 は、規格原案⁵⁾に示されたボールバー試験の一例である。回転テーブル (C 軸) の回転と同期して、ボールバーが常に C 軸の軸方向に向くように、X・Y 軸を円弧補間運動させる。この測定は、C 軸平均線と X・Y 軸の直角度が大きく影響する。同様に、ボールバーを C 軸回転の接線方向、半径方向に向くように同期運転すれば、C 軸中心の位置誤差などを評価することができる。

これらの測定は、旋回軸の幾何誤差を同定することが主な目的である。しかし例えば、C 軸の誤差運動が傾斜軸

*原稿受付 平成 24 年 6 月 18 日

**正 会 員 京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻 (京都市左京区吉田本町)

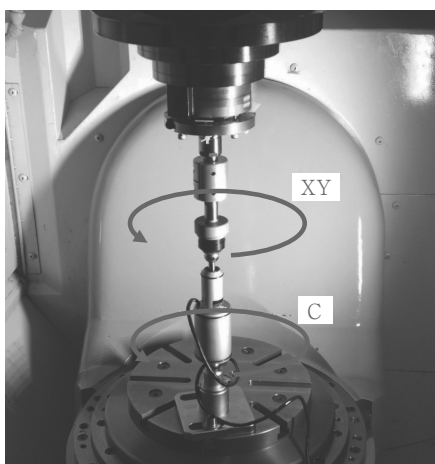


図1 ボールバー測定例

図2 R-test 測定器¹⁶⁾

(B 軸)の角度によってどう変わるか、という評価は、原理的には可能であるが、多くのセットアップの変更と複雑なプログラムが必要となり、現実的には難しい。

3. R-test 測定

上記の測定は、ボールバー装置を用いなくても、基準球と接触式変位センサを使っても行うことができる。実際、ISO/DIS 10791-6⁵⁾の試験の多くは、ボールバーを使っても、球と変位センサを使っても、さらに本章の R-test 装置を使ってもよい、という形になっている。

R-test 装置とは、Weikert¹⁵⁾が発表した測定器で、主軸につけた基準球と、テーブル側の3本の変位センサから成る。あらかじめ校正された3つのセンサの方向ベクトルを用いて、おのこのセンサの変位から、球のXYZ方向の変位を得る。図2は著者らが試作した R-test 測定器である¹⁶⁾。

球の相対変位を測定する、という原理はボールバー測定と共通であるものの、3方向の誤差を同時に測定できるため、測定の能率が高く、自動化に適していることが最大の長所である。IBS Precision 社(オランダ)などが同様の

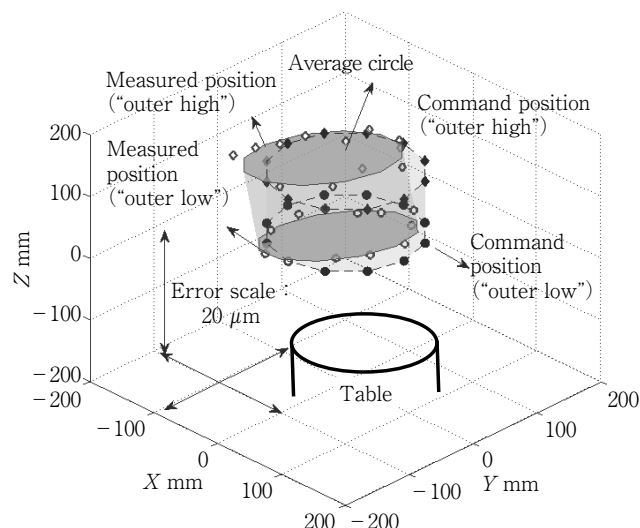
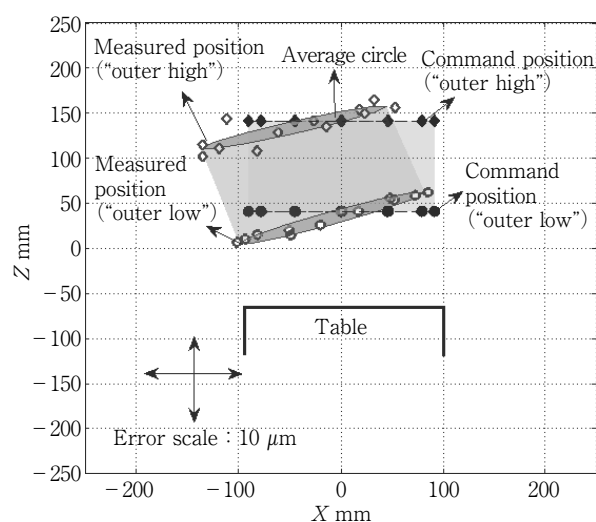
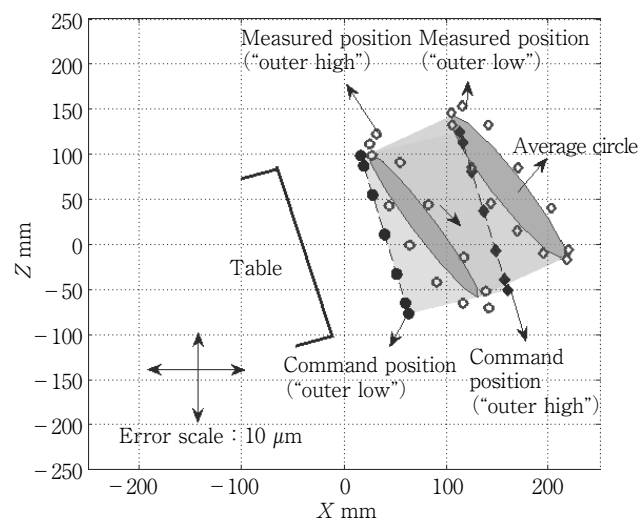
(a) 3次元表示 ($B=0^\circ$)(b) XZ 面への投影 ($B=0^\circ$)(c) XZ 面への投影 ($B=-75^\circ$)

図3 R-test の測定結果²⁰⁾。●は球中心の指令位置、○は実測位置。両者の誤差は10000倍に拡大。実線の円盤は、実測軌跡の平均円を表す。

測定器を商品化している。ただし、球の相対変位を複数のセンサで同時測定する方法自体は、新しい考え方ではない¹⁷⁾。互いに直交する3つの変位センサを用いても、同等の測定が行える¹⁸⁾。

初期の研究では、R-test 測定を用いた幾何誤差の同定法が報告された¹⁹⁾。それに対して著者らは、数多くの割り出し角度で、自動的にデータを収集できるのが R-test の最大の長所であると考え、そのような多くの測定データを処理して、「ある軸の誤差運動が、角度とともにどう変わるか」を定量評価する方法を示した。

図3に R-test の測定例を示す²⁰⁾。B・C 軸をもつテーブル旋回形の5軸加工機(図1, 2 参照)で、 $B=0^\circ$ (テーブルが水平)の状態、C 軸(回転テーブル)を 30° ごとに割り出し、球の変位を静的測定する。X・Y 軸は、球を追従するように位置決めする。図3(a)は、球中心の指令位置と、実測位置の差を、拡大して3次元表示したものである。旋回軸の倒れを見るため、球のテーブル上面からの距離を2通りに変えて、同様の測定を繰り返している。XZ 面への投影を図3(b)に示す。同様の測定を、さまざまな B 軸角度で行う。例として、図3(c)は、 $B=-75^\circ$ のときの測定結果である。見やすいように、実測軌跡の平均円を実線の円盤で示している。

これらの測定結果から、この加工機の旋回軸の誤差運動の特徴の多くを、直感的に理解することができる。例えば、図3(b)では実測軌跡が Y 軸周りに傾いているが、これは C 軸と X 軸との直角度が原因である。同時に、わずかに X 軸周りにも傾いている。さらに、この C 軸の倒れは両方向とも、図3(c)では少し大きくなっている。すなわち、C 軸の倒れは B 軸の旋回とともに変化している。ここでは測定結果の視覚的表示だけを示したが、C 軸の誤差運動を定量的に表現することも容易である¹⁶⁾。

著者らは、R-test を用いた熱変形試験²¹⁾や、レーザ変位計を用いた非接触式の R-test 装置²²⁾も研究開発している。

4. プローブを用いたキャリブレーション

特に欧州メーカーの CNC では、タッチプローブを用いて、旋回中心の位置を自動設定するシステムが以前から実用化されている。最近、旋回軸の幾何誤差を全てキャリブレーションするシステムが、プローブメーカー(Renishaw 社など)や、国内の工作機械メーカーからも商品化されている。テーブル上に固定された基準球の位置を、幾つかの割り出し角度でプローブ測定を行う方法が多い²³⁾。タッチプローブは CNC との親和性も高く、計測と補正の自動化にも有利である。

著者らの測定例を示す²⁴⁾。測定のセットアップを図4、測定結果の例を図5に示す。テーブルが水平の状態、C 軸を 90° ごとに割り出したときに、ワークの位置と姿勢を測定する。図5は XY 平面への投影を示しているが、例えば C 軸を 180° 回転すると、指令位置から数 10 ミクロン

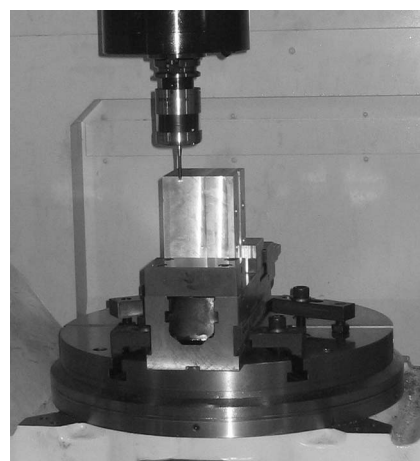


図4 タッチプローブを用いた測定²⁵⁾

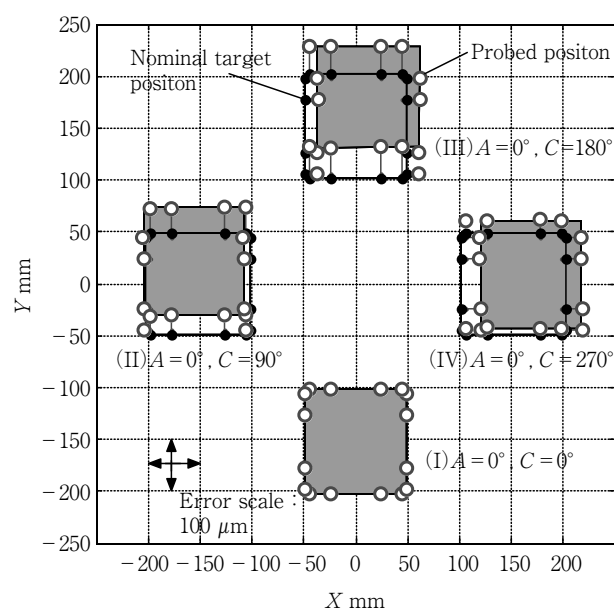


図5 タッチプローブによる測定結果²⁵⁾。C 軸を 90° ごとに割り出し、測定されたワークの位置、指令位置(黒丸)に対し、測定位置(白丸)を誤差を拡大して表示。

程度シフトしていることが分かる。この主な原因は、C 軸中心の位置誤差である。

さらに、同様の測定を A 軸角度を変えて行うことで、回転テーブルの誤差運動が、A 軸の旋回とともにどう変わるかを評価できる。

最初にワークの形状をタッチプローブで計測し、それが割り出しとともにどう変位するかを計測するので、ワークの形状精度は厳密に管理されている必要はない。したがって、例えば加工前のワークを計測することで、加工の直前に旋回軸の誤差運動をキャリブレーションし、可能であれば補正を行うような使い方も可能と考えている。

5. おわりに

空間誤差の補正機能のなかには、旋回軸の誤差運動を補

正できるものもある。そのような機能を使えば、幾何誤差はもちろん、本稿で示した旋回軸の空間誤差、つまり「軸の旋回とともに変化していく誤差運動」を補正することも、少なくとも幾何学的には可能である。

旋回軸の運動誤差は、旋回中心からの距離に応じてその影響が大きくなるため、特に大型部品や、部品の多数個取りをする場合には、影響が顕著となるのは明らかである。旋回軸ユニットの組み立て誤差を厳密に調整することは、一般に容易ではない。精度を高めるためには、計測と組み立て後の再調整を繰り返すしかないが、製造コストの観点との兼ね合いとなる。そのような場合には、ソフトウェア的な補正も有効な選択肢であると考えられる。ただし、言うまでもなく、補正が有効であるためには、位置決めの再現性が確保されていることが前提である。

補正を実装するには、工作機械メーカーが検査段階で、運動誤差を全数検査することが必要不可欠であり、その効率性が現状の一番の課題であろう。誤差測定、原因診断、補正マップの作成まで自動的に終わるようなシステムが必要となることは明らかで、本稿で紹介した計測法は、その目的に沿ったものといえるだろう。

また、このようなシステムが普及すれば、工作機械のユーザが定期的にキャリブレーションを実施し、常に工作機械の精度を最適に保つ、といった使い方も可能と思われる。そのためには、工作機械の幾何学モデルや、誤差パラメータの意味など、ユーザも最低限の知識をもつことが求められるだろう。

謝 辞

図1～3に示した実験は、Machine Tool Technologies Research Foundation (MTTRF) から貸与された工作機械を用いて行った。記して、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) ISO 230-1:2012, Test Code for Machine Tools-Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Quasi-static Conditions.
- 2) ISO/WDTR 16907:2012, Machine Tools-Numerical Compensation of Geometric Errors.
- 3) S. Ibaraki, and W. Knapp: Indirect Measurement of Volumetric Accuracy for Three-Axis and Five-Axis Machine Tools: A Review, Int. J. Automation Technology, **6**, 2 (2012) 110.
- 4) JIS B 6190-7:2008, 工作機械試験方法通則—第7部: 回転軸の幾何精度試験.
- 5) ISO/DIS 10791-6:2012, Test Conditions for Machining Centres-Part 6: Accuracy of Speeds and Interpolations.
- 6) ISO/DIS 10791-1:2012, Test Conditions for Machining Centres-Part 1: Geometric Tests for Machines with Horizontal Spindle (Horizontal Z-axis).
- 7) 堤正臣: 工作機械検査規格の標準化研究 (特集記事), 精密工学会誌, **78**, 7 (2012).
- 8) 井原之敏: 5 軸マシニングセンタの精度検査規格 (特集記事),

- 精密工学会誌, **78**, 7 (2012).
- 9) 上野滋: 工作機械関連の ISO 規格, その制定と背景 (特集記事), 精密工学会誌, **78**, 7 (2012).
- 10) ISO 230-4:2005, Test Code for Machine Tools-Part 4: Circular Tests for Numerically Controlled Machine Tools.
- 11) 垣野義昭, 井原之敏, 佐藤浩毅, 大坪寿, NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第7報): DBB 法による 5 軸制御工作機械の運動精度の測定, 精密工学会誌, **60**, 5 (1994) 718.
- 12) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本顕彦, 市来崎哲雄: ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集 (C), **63**, 605 (1997) 262.
- 13) Y. Abbaszadeh-Mir, J.R.R. Mayer, G. Clotier and C. Fortin: Theory and Simulation for the Identification of the Link Geometric Errors for a Five-axis Machine Tool Using a Telescoping Magnetic Ball-bar, Int. J. Production Research, **40**, 18 (2002) 4781.
- 14) M. Tsutsumi and A. Saito: Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to 5-axis Machining Centers, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **43**, 8 (2003) 771.
- 15) S. Weikert: R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals-Manufacturing Technology, **53**, 1 (2004) 429.
- 16) S. Ibaraki, C. Oyama and H. Otsubo, Construction of an Error Map of Rotary Axes on a Five-axis Machining Center by Static R-test, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **51** (2011) 190.
- 17) ISO 230-7:2006, Test Code for Machine Tools-Part 7: Geometric Accuracy of Axes of Rotation.
- 18) 田島和也, ムディタ・ダサナヤカ, 崔成日, 堤正臣: 3D プロープによる回転テーブルの振れ精度測定システムの開発, 日本機械学会第8回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2010) 277.
- 19) B. Bringmann and W. Knapp: Model-based 'Chase-the-Ball' Calibration of a 5-axis Machining Center, CIRP Annals-Manufacturing Technology, **55**, 1 (2006) 531.
- 20) C. Hong and S. 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, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **59** (2012) 24.
- 21) C. Hong and S. Ibaraki: Observation of Thermal Influence on Error Motions of Rotary Axes on a Five-Axis Machine Tool by Static R-Test, Int. J. Automation Technology, **6**, 2 (2012) 196.
- 22) S. Ibaraki and C. Hong: Non-Contact R-Test for Error Calibration of Five-Axis Machine Tools, Proc. ASME/ISCIE Int. Sympo. Flexible Automation, (2011).
- 23) 松下哲也, 沖忠洋: タッチプローブを用いた 5 軸制御工作機械の幾何誤差同定方法の検証, 精密工学会大会学術講演会講演論文集, (2010).
- 24) S. Ibaraki, T. Iritani and T. Matsushita: Calibration of Location Errors of Rotary Axes on Five-axis Machine Tools by on-the-machine Measurement Using a Touch-trigger Probe, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **58** (2012) 4.



茨木 創一

2000 年カリフォルニア大学バークレー校機械工学科修了。Ph. D. 2001 年京都大学工学研究科精密工学専攻 (2005 年にマイクロエンジニアリング専攻に改組) 助手。2006 年より准教授。工作機械の運動精度計測や制御の研究に従事。