

Laser R-Test による多軸制御工作機械の幾何誤差同定に関する研究

東京農工大学 ○西澤 慶祐, 加藤 教之, 東京農工大学大学院 ©中本 圭一, 国立虎尾科技大学 覺 文郁

要 旨

多軸制御工作機械では、各制御軸間の直角度などの幾何学的な誤差が加工精度に大きな影響を及ぼす。そこで本研究では、直交する 2 つのレーザ変位計により運動精度を測定する Laser R-Test と呼ばれる機上測定器を用いて工作機械の幾何誤差を同定し、ボールバーやタッチプローブを用いた従来手法による同定結果と比較することで有用性について検証することを目的とした。複合加工機を例に幾何誤差を同定するケーススタディの結果から得られた知見を報告する。

1. 緒 論

加工形状の複雑化に対応するため、5 軸マシニングセンタや複合加工機といった多軸制御工作機械が広く普及している。一般に切削加工では、工具と工作物の相対運動によって加工形状が決定されるが、この相対運動には工作機械の各制御軸間の直角度や平行度といった様々な幾何学的な誤差が影響する。特に多軸制御工作機械では制御軸が多いため、これらの幾何学的な誤差が累積して多大な影響を及ぼす。従って、多軸制御工作機械に関する幾何学的な誤差の同定は、加工精度向上のために必要不可欠である¹⁾。

2. 工作機械と幾何誤差

工作機械を構成する各制御軸間の直角度や平行度などの幾何学的な誤差のことを幾何誤差と呼ぶ²⁾。工作機械の 2 つの制御軸間には、X 方向、Y 方向、Z 方向の位置に関する幾何誤差である δx , δy , δz と、X 軸、Y 軸、Z 軸周りの角度に関する幾何誤差である α , β , γ の計 6 つの幾何誤差が存在する。なお、位置誤差及び角度誤差の添字は関連する 2 つの軸を示している。しかし、工作機械の形状創成理論に従うと、各軸間の幾何誤差について全て考慮する必要はなく、省略できる幾何誤差が存在することが知られている³⁾。

本研究で測定対象とする多軸制御工作機械(ヤマザキマザック社製 INTEGREX i-200)の構造を図 1 に示す。この工作機械の軸構成は [w C' b Z Y X B t] であり、工具主軸側とテーブル側にそれぞれ 1 つの回転軸を備えた複合加工機である。この複合加工機が有する 30 の幾何誤差のうち、考慮すべき幾何誤差は図 2 に示す 13 個である。本研究では、特に影響が大きいとされている回転軸に関する 10 個の幾何誤差について同定する。

3. 幾何誤差の同定手法

幾何誤差を同定するために、ボールバー、タッチプローブ、R-Test などの測定器を用いた手法が考案されている。本研究では、これら接触式測定器ではなく、レーザ変位計を用いた非接触式測定器の Laser R-Test を用いて同定し、他手法の同定結果と比較する。

3.1 Laser R-Test を用いた幾何誤差の同定

図 3 に示した Laser R-Test は、直交する 2 つのレーザ変位計をもつセンサモジュールと、先端に直径 10 mm、真円度 5 μm のガラス球がついたガラスボールモジュールから構成される。ガラスボールモジュールには、軸の偏心を取り除くためのマイクロメータが取り付けられており、測定時にこれを調節することで、図 4 のようにガラスボールモジュールの心出しが行える構造になっている。また、センサモジュールのサンプリング周波数は 1 kHz であり、レーザの出力電圧は 3 V である。工作機械の構造によって取り付け方法は異なり、本研究で対象とする複合加工機のように工具側とテーブル側にそれぞれ回転軸がある場合、測定する回転軸に応じて各機器の取付けを変更する。例えば、工具側の回転軸に関する幾何誤差を同定す

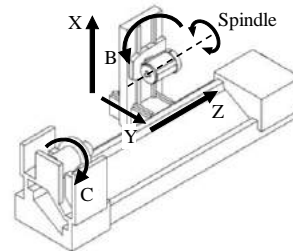


Fig. 1 Multi-tasking machine tool

Motion	Positional errors	Angular errors
C-axis	$\delta x_{cz}, \delta y_{cz}$	α_{cz}, β_{cz}
Z-axis		α_{zy}, β_{zy}
Y-axis		γ_{yx}
X-axis		$\alpha_{yx}, \beta_{yx}, \gamma_{xz}$
B-axis	$\delta x_{bs}, \delta z_{bs}$	α_{bs}
Spindle		

Fig. 2 Geometric errors

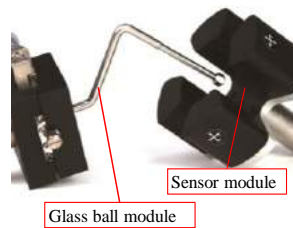


Fig. 3 Laser R-Test

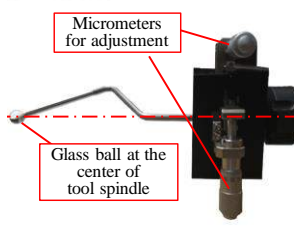


Fig. 4 Glass ball module

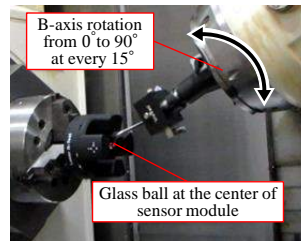


Fig. 5 B-axis measurement

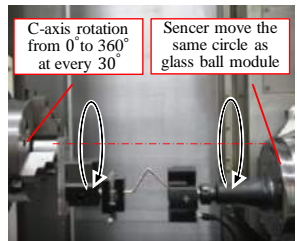


Fig. 6 C-axis measurement

る場合には、図 5 に示すように、工具側にガラスボールモジュール、テーブル側にセンサモジュールを設置し、センサに対するガラス球の相対位置を固定しながら工具回転軸を回転させることでガラス球中心の軌跡を測定する。一方、テーブル側の回転軸の幾何誤差を同定する場合には、図 6 のように逆に工具側へセンサモジュールを設置し、テーブル側はマグネットベースを用いてガラスボールモジュールを設置する。ガラスボールモジュールはテーブルの回転中心から一定距離離して、ガラス球がセンサモジュールのレーザ交点となるようにセンサを位置決めする。測定時には、テーブルの回転に合わせて工具側に取り付けたセンサを移動させ、ガラス球とセンサを同期させた円運動中のガラス球の軌跡を測定する。最終的に各測定で得られた軌跡を回転軸に対して軸方向および半径方向に分解し、その偏心量から幾何誤差を同定する。

3.2 ボールバーを用いた幾何誤差の同定

ボールバーは、精度が十分に保証された 2 つの剛球を両端に取り付けた伸縮機構をもつバーと、その 2 つの剛球を支持するための永久磁石内蔵のマグネットカップを持つソケットから構成されている。測定時は、ソケットをテーブル側と工具側のそれぞれに取り付

け、ボールバーの2球間の相対距離が一定になるように2つの並進軸と1つの回転軸の同時3軸制御運動を行う。時間経過と2球間の相対距離を記録することで基準長からの伸縮を測定できる。各回転軸について、軸方向と半径方向をそれぞれ異なる2つの工具長で測定することで幾何誤差を同定する。

3.3 タッチプローブを用いた幾何誤差の同定

タッチプローブを用いる場合には、テーブル側に設置した直径が既知の基準球に対し、工具側に取り付けたプローブを接触させることで、基準球表面の3次元座標を取り込む。工具側の回転軸に関しては、回転軸を一定角度ずつ変化させ、各角度における基準球中心を測定する。またテーブル回転軸に関しては、テーブルの回転中心から一定距離離れた位置に基準球を位置決めし、テーブル回転軸を一定角度ずつ変化させる。各テーブル角度における基準球中心の位置についてプローブを用いて測定し、基準球中心の円運動軌跡を得る。長さの異なる2つのプローブを用い、各回転軸でそれぞれ測定し、得られた4種類の結果から幾何誤差を同定する。

4. ケーススタディ

2章で示した10個の幾何誤差について、上記の手法を用いて同定した幾何誤差の結果を比較するケーススタディを行った。

なお各同定手法において、B軸に関する測定では、X軸、Z軸、B軸の同時3軸制御運動を行い、B軸の測定範囲は0°から90°とした。またC軸に関する測定では、X軸、Y軸、C軸の同時3軸制御運動を行い、C軸の測定範囲は0°から360°とした。また各同定手法では、2つの異なる工具長を使って測定した。

Laser R-Testを用いる手法では、図5に示すようにB軸を15°間隔で回転させながら、各回転角度でのガラス球の中心位置を測定し、7点の軌跡から偏心量を測定した。得られた測定結果を図7に示す。またC軸に関する測定では、ガラスボールモジュールをテーブル中心から100mm離れた位置にマグネットベースを用いて固定し、センサ交点がガラス球中心になるように位置決めした。その後図6のように、30°間隔でC軸を回転させ、各回転角度でのガラス球中心の位置を測定し、各C軸角度で得られた13個の中心位置のデータから偏心量を測定した。B軸とC軸の各測定で得られた4種類の測定結果から幾何誤差を同定した。

ボールバーを用いる手法は、B軸軸方向とB軸半径方向および、C軸軸方向とC軸半径方向の4種類の測定の結果から、得られた偏心量から幾何誤差を同定した。

また、タッチプローブによる測定では、B軸に関する測定では各B軸角度について16、C軸に関する測定では各C軸角度について21の基準球表面の座標を取得し、基準球中心を算出した。各角度で得られた基準球中心の軌跡から偏心量を求め、幾何誤差を同定した。

各同定手法によって同定された幾何誤差を表1にまとめて示す。なお、タッチプローブでは、内蔵されている自身のセンサ機能によって工具長を測定し、ボールバーやLaser R-Testでは、複合加工機の工具長測定機能を用いて測定した。Laser R-Testで同定された幾何誤差を従来の各手法で同定された幾何誤差の結果と比較すると、C軸半径方向に関わる幾何誤差である δx_{BS} や α_{BS} について近い値を示していることが分かる。しかし、その他の幾何誤差は各同定手法によって大きく異なる結果となった。また、 δz_{BS} 、 α_{XB} 、 δx_{CZ} 、 α_{CZ} については、タッチプローブで同定された幾何誤差のみ大きく異なった。 δz_{BS} はB軸測定におけるZ方向の誤差であることから、工具長の測定方法の違いと、タッチプローブで測定する基準球のセッティング誤差が主要因と考えられる。また、タッチプローブを基準

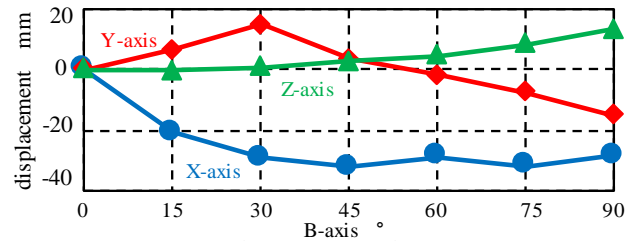


Fig. 7 B-axis measurement using Laser R-Test

Table 1 Identified geometric errors

	Laser R-Test	Ball bar	Touch probe
δx_{BS} [μm]	15.09	36.65	13.15
δz_{BS} [μm]	97.28	136.00	2.74
α_{XB} [$^{\circ}$]	-11.37	-21.54	38.77
β_{XB} [$^{\circ}$]	35.92	-2.04	8.39
γ_{XB} [$^{\circ}$]	-7.05	9.17	32.46
α_{BS} [$^{\circ}$]	-54.77	-68.35	-41.91
δx_{CZ} [μm]	75.71	42.92	-113.31
δy_{CZ} [μm]	-77.82	-222.50	-1.32
α_{CZ} [$^{\circ}$]	2.05	3.92	-1.47
β_{CZ} [$^{\circ}$]	-6.02	-16.29	-4.25

球に接触させた際にプローブがたわんでしまった結果、正確な位置情報が測定できず、他の2手法と差異が発生したと考えられる。

一方、 β_{XB} 、 γ_{XB} 、 δy_{CZ} 、 β_{CZ} では各同定手法において異なる幾何誤差が同定された。この原因として、各測定によって測定するデータ数の違いが考えられる。また、ボールバーで測定された円運動軌跡の真円度が最大5 μm であったのに対し、Laser R-Testでは最大25 μm であったことから、同定手法によって測定された軌跡から近似円の近似度が異なることも分かる。

また、Laser R-Testやタッチプローブではデータ測定の際に全ての制御軸が止まっているのに対し、ボールバーでは並進2軸に加え回転1軸が駆動している状態で測定している。そのため、Laser R-Testやタッチプローブを用いる手法では工作機械の構造的な幾何誤差を同定できる一方、ボールバーによる測定では幾何誤差の他にサーボモータによる誤差やバックラッシ、駆動軸の真直度といった本研究で対象としている幾何誤差以外の誤差が同定結果に影響を与えていると考えられる。

以上のように、Laser R-Testを用いて幾何誤差を同定する手法では、他の測定器を用いた従来手法とほぼ同じ結果も一部の幾何誤差で得られるが、大きく異なる結果も同定された。この差異の原因について今後さらなる検証が必要である。

5. 結 論

2つの直交するレーザ変位により運動精度を測定するLaser R-Testと呼ばれる機上測定器を用いて複合加工機を例に多軸制御工作機械の幾何誤差を同定した。また、ボールバーやタッチプローブを用いた従来手法による同定結果と幾何誤差を比較することで有用性について検証した。

参考文献

- 1) JIS B6194, 工作機械—数値制御による円運動試験方法通則, 日本規格協会, (1997)
- 2) 茨木創一: 工作機械の空間精度—3次元運動誤差の幾何学モデル・補正・測定, 森北出版, (2017), 13-39.
- 3) 稲崎一郎, 岸浪健史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基: 工作機械の形状創成理論-その基礎と応用-, 養賢堂, (1997), 95-103.