

Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の高精度化

オークマ株式会社 ○中川昌夫, 松下哲也
京都大学 茨木創一, 垣野技術研究所 垣野義昭

The Improvement of Motion Accuracy of Hexapod-type Parallel Mechanism Machine Tool
Okuma Corporation Masao NAKAGAWA, Tetsuya MATSUSHITA
Kyoto University Soichi IBARAKI, Kakino Research Institute Yoshiaki KAKINO

This paper presents a methodology to calibrate kinematic parameters in a Hexapod-type parallel mechanism machine tool. In a conventional procedure of the DBB (Double Ball Bar) test to measure a machine's contouring accuracy in a circular operation, the center deviation in an error profile is ignored to cancel setup errors. We propose to use a specialized jig plate to fix a ball of a DBB device in order to evaluate the machine's positioning error in the global coordinate system. Experimental comparison shows the machine's positioning error is significantly improved by using the proposed calibration method. The improvement of the machine's motion accuracy is verified by both motion accuracy tests and machining tests.

1. 緒言

6軸加工機である Hexapod と称するパラレルメカニズム工作機械が, Ingersoll 社と Giddings & Lewis 社から 1994 年に最初に発表され, 非常に脚光を浴びることになった。欧米では, 継続的に研究開発が進められておりパラレルメカニズムを用いた実用的な工作機械が使用されはじめている。日本においても, パラレルメカニズム構造の工作機械, 三次元測定機, 産業用ロボットなどに適用され, 各所で研究開発と商品化も行なわれている。

工作機械として使用するには, 剛性と精度に課題がある。パラレルメカニズムの高精度な動作制御のためには, ストラットの基準長さ, ジョイントの位置などの機構パラメータを正確に同定することが必要不可欠である。

本論文では, より高精度なキャリブレーションを行うためには, DBB(Double Ball Bar) 装置の固定球を再現性よく取り付けられる測定用ジグを用いて, 円弧補間運動誤差軌跡を絶対座標系上で評価することが必要であることを示す。実際に測定用ジグを製作し, それを用いたキャリブレーションの有効性を検証する。さらに本機を用いて加工実験を行って, この提案した方法を用いることによって, どの程度加工精度が向上するかを確認する。

2. Hexapod 型工作機械の構造とキャリブレーション

2.1 機械構造

本研究では, 図 1 に示すスチュワートプラットフォーム¹⁾を用いた Hexapod 型工作機械を対象とする。これは伸縮する 6 本の軸を有し, それぞれの一端は 2 自由度のジョイントをもつベースに取り付けられている。他端は主軸を内蔵したプラットフォームに 3 自由度のジョイントで取付けた構造である。

図 1 は本研究で使用する Hexapod 型工作機械 COSMO CENTER PM-600 であり, その主な仕様を表 1 に示す。

2.2 DBB 測定のための測定用ジグ

DBB 測定の際に固定球を再現性良く固定する測定用ジグを用いることを提案する。それにより測定用ジグを基準とした座標系が定義され, その座標系上での絶対的な位置決め誤差が DBB 法により評価できるようになる。

製作された測定用ジグの外観を図 2 に示す。測定用ジグは同一平面上に 9 つの穴を持ち, そこに DBB 測定装置の固定球を先端に取り付けた支持ユニットをはめ込む構造としている。支持ユニットは 2 通りの高さを持ったものを用意し, 固定球の高さを 2 段階に変えられるようにする。高さの異なる 2 つの支持ユニットも図 2 に示されている。支持ユニットは,

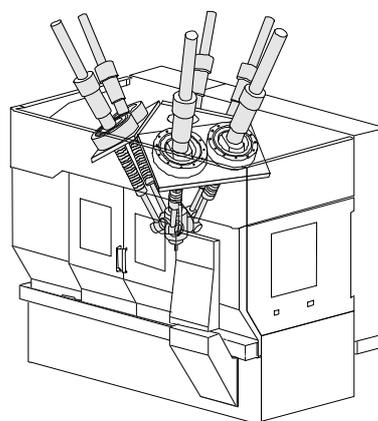


Fig. 1 The structure of COSMO CENTER PM-600

Table 1 Specifications of PM-600

Travels [mm]	$\phi 600(XY) \times 400(Z)$ (420 × 420 × 400)
Tilting angle [°]	± 25
Rapid traverse [mm/min]	100
Max. acceleration [m/s ²]	14.7
Spindle speed [min ⁻¹]	12000/30000
Spindle motor [kW]	6

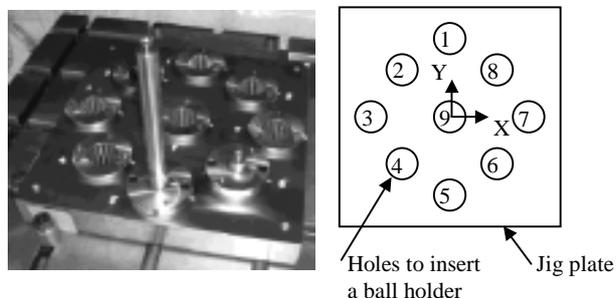


Fig. 2 The outlook of the jig plate and ball holders

測定用ジグへのはめ込み部に工具ホルダ用に用いるいわゆるビッグプラス式の 7/24 テーパー面を持ち, ねじを締めることでテーパ面と端面の 2 面拘束の状態となる。DBB 測定装置の固定球は接着剤を用いて支持ユニットの上部に固定する。

2.3 実験方法, 結果および考察

実際にキャリブレーションを行い, その精度を比較した. なお, 【標準的な DBB 法(Conv-A)】²⁾において, 固定球の取り付け誤差, 移動球の中心と主軸中心のずれはマイクロメータなどを用いて予め測定し, それらを補正を行うことは可能であり, この中心のずれを実際に測定することにより, 中心補正を行わない手法を【中心測定した DBB 法(Conv-B)】と呼び, 本研究で提案した【測定用ジグを用いた DBB 法(Proposed)】との比較も併せて行う.

円弧補間運動誤差軌跡を比較したものを図 3 に示す. Default はパラメータとして設計値を用いた場合を示す. なお全ての DBB 測定において, 送り速度は 1000mm/min, 円弧半径は 150mm とした. 測定用ジグを用いることでキャリブレーション後の中心位置決め誤差が平均 47.9 μm から平均 8.6 μm まで改善された. これは作業領域の全体で想定用ジグを基準とした座標系上の位置決め精度が大きく向上したことを示している. ただし, 真円度誤差については Conv-A が 4.6 μm に対して Proposed が 5.7 μm となるなど標準法の方が僅かに良い場合もあった.

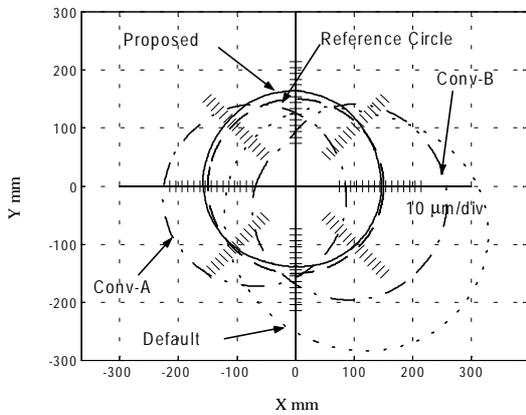


Fig. 3 Comparison of contouring error trajectories

3. 加工精度試験

3.1 実験方法

本機を用いて鋳鉄(FC250)製の素形材に対し, 図 4 に示す 9 箇所的位置で中ぐり加工を行う. 穴径が 20mm 以内で穴を繰り広げる. また図 4 に示した工作物の 4 側面 A, B, C, D についてエンドミル加工を行い, 加工された側平面の真直度と直角度を測定する. また, 直径 200mm のアルミニウム合金製の素形材については円形外周削削を行う. これらの加工をキャリブレーションの前と, 測定用ジグを用いたキャリブレーションの後でテーブル中央に置いて行う.

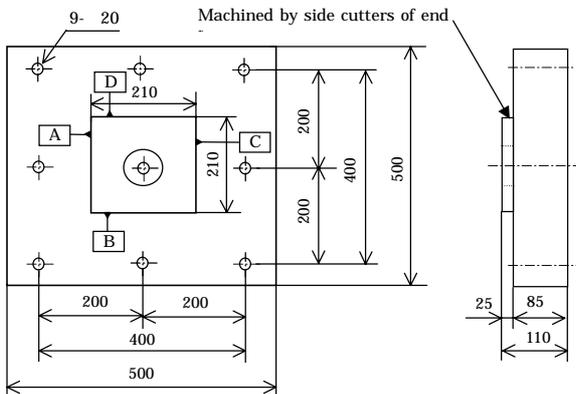
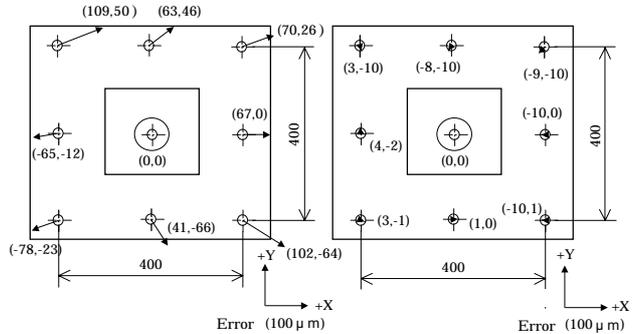


Fig. 4 Workpiece for accuracy test

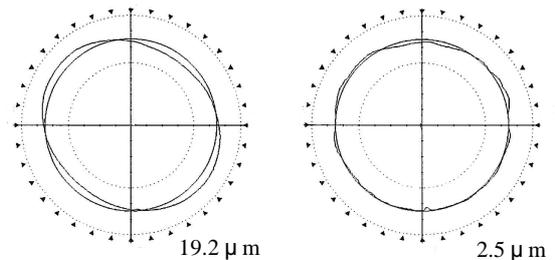
3.2 測定結果と考察

キャリブレーションの前と後で加工された工作物の穴の位置を 3 次元測定機で測定された位置誤差を図 5 に示す. キャリブレーションを行う前では (図 5(a)参照) の点で最大 109 μm も存在した位置誤差が, キャリブレーションを行った後は同じ (図 5(b)参照) の点で最大でも 10 μm と大きく減少した. このキャリブレーション後の加工された穴の位置精度 10 μm は, 従来型の立形マシニングセンタの加工精度に匹敵するほど位置誤差が小さい.



(a) Without calibration (b) With calibration
Fig. 5 The positioning errors with/without the calibration

キャリブレーションの前と後で加工された形状精度を 3 次元測定機で測定した. キャリブレーションを行う前では最大 5 $\mu\text{m}/200\text{mm}$ 存在した真直度誤差がキャリブレーションを行った後は最大では 3 μm になった. また, キャリブレーションを行う前では最大 37 μm 存在した直角度誤差はキャリブレーションを行った後は最大でも 4 μm と大きく減少した. テーブル中央で加工された円板の真円度プロフィールを図 6 に示す. 同図(a)はプラットフォームを傾けないでキャリブレーションを行う前に加工した場合の真円度誤差は 19.2 μm であった. 同図(b)はキャリブレーションを行った後であり, 真円度誤差は 2.5 μm と大きく減少した.



(a) Without calibration (b) With calibration
Disk (200mm) Feedrate:1000 mm/min
Fig.6 The out-of-roundness profiles of the machined plates

4. 結論

本研究では, Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の運動精度を DBB 法により測定し, 測定用ジグを用いた機構パラメータ誤差のキャリブレーション方法を提案し, 運動精度と加工精度実験によりその有効性を確認できた.

参考文献

1) Stewart, D., A Platform with six degree of freedom, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Vol. 180, Part 1, No. 15, (1965) 371-386.
2) 茨木創一 宜川武史 垣野義昭 中川昌夫 松下哲也: Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の精度向上に関する研究 (第 2 報) - 絶対座標系上での位置決め誤差を評価するキャリブレーション法 -, 精密工学会誌, 70,4 (2004) 557-561.