

# Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の 重力の影響を考慮したキャリブレーション法

## A Kinematic Calibration Method under the Cancellation of Gravity-induced Errors on a Hexapod-type Parallel Kinematic Machine Tool

○非 宜川 武史 (京都大)      正 茨木 創一 (京都大)      正 松原 厚 (京都大)  
非 中川 昌夫 (オークマ株式会社)      非 松下 哲也 (オークマ株式会社)

Takeshi YOKAWA<sup>1</sup>, Soichi IBARAKI<sup>1</sup>, Atsushi MATSUBARA<sup>1</sup>, Masao NAKAGAWA<sup>2</sup>, Tetsuya MATSUSHITA<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501  
<sup>2</sup>Okuma Corporation, Oguchi-cho, Aichi 480-0193

This paper presents a methodology to calibrate kinematic parameters in a Hexapod-type parallel kinematic machine tool. In general, the calibration error of kinematic parameters and the deformation of struts due to the gravity are two major causes of motion errors of a parallel kinematic machine tool. In other words, in order to accurately calibrate kinematic parameters from measured contouring error profiles, it is important to separate the effect of the gravity from them. We propose a calibration method under the cancellation of gravity-induced errors. Experimental comparison shows circularity errors measured in conditions where gravity effect is large are significantly improved by using the proposed calibration method.

**Key Words:** Hexapod-type Parallel Kinematic Machine Tool, Calibration, Gravity, Double Ball Bar, Positioning Error

### 1. 緒言

本研究ではパラレルメカニズム工作機械における機構パラメータのキャリブレーション法について考察する。特に、図1に示すスチュワートプラットフォームを用いた Hexapod 型工作機械を研究対象とする。

比較的容易に多自由度制御が実現できるという特長を持つパラレルメカニズム工作機械であるが、現在、幅広く活用されるには至っていない。パラレルメカニズム工作機械の運動精度を向上させるためには、機構パラメータの正確な同定が必要不可欠である。著者らは図2に示す DBB(Double Ball Bar)装置と DBB 測定用の治具を用いて測定された円弧運動誤差軌跡を基礎として、(1)各ストラットの初期設定長さの誤差、(2)ベースジョイントの位置の誤差、という機構パラメータのキャリブレーションを行う手法を提案した<sup>1)</sup>。その結果、主軸ユニットが作業領域の中心付近にある条件では真円度誤差を  $7\mu\text{m}$  以下に抑えられた。

また、パラレルメカニズム工作機械の位置決め誤差の主要因として、一般に機構パラメータのキャリブレーション誤差のほかに、重力によるストラットなどの部材の変形が挙げられる。著者らは、重力による変形誤差を予測するシミュレーションモデルを構築し、予測した位置決め誤差の分だけ指令値を補正する手法を提案した<sup>2)</sup>。それにより、特に主軸の位置が作業領域の端近くにある場合や主軸の姿勢変化(チルト角)が大きく、重力によるストラットの弾性変形の影響が大きくなる場合について、軌跡の真円度誤差を最大 85%程度低減した。

しかし、重力による変形誤差の補正後にも依然として運動誤差が存在する。その理由の1つとして、機構パラメータのキャリブレーション誤差の影響が考えられる。キャリブレーションを行うための DBB 測定において、重力の影響による運動誤差が測定結果に含まれるため、キャリブレーションによって得られる機構パラメータの値は重力の影響による誤差を含んでいる。すなわち、さらに精度良く機構パラメータのキャリブレーションを行うためには、重力の影響による運動誤差を DBB 測定結果から除く必要がある。

本論文では、重力による変形誤差の補正効果をさらに向上させるため、重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法を提案する。提案した手法を用いて実際にキャリブレーションを行い、その有効性を検証する。

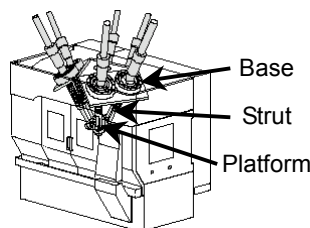


Fig.1 A Hexapod-type parallel mechanism machine tool, COSMO CENTER PM-600 by Okuma Corp.

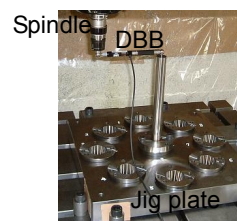


Fig.2 A DBB device and a jig for measurement

### 2. 重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法

DBB 法を用いてパラレルメカニズム工作機械の円弧補間運動試験を行う場合、測定半径  $R_i$  と実際の機構パラメータからなるベクトル  $\mathbf{K}$  との関係は、順運動学で与えられる関数  $f_i$  及び重力に起因する誤差(主軸の位置及び姿勢に依存する。)を表す関数  $g_i$  を用いて次式で表される:

$$R_i = f(\mathbf{K}) + g_i \quad (1)$$

キャリブレーションに用いる測定条件では重力に起因する誤差が十分に小さいと仮定すると、次式のように同定の対象とする  $M$  個の機構パラメータ誤差  $\Delta\mathbf{K}$  について線形近似することができる。

$$\Delta R_i = \frac{\partial f_i}{\partial k_1} \Delta k_1 + \frac{\partial f_i}{\partial k_2} \Delta k_2 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial k_M} \Delta k_M \quad (2)$$

$N$  個の異なる位置・姿勢でのデータを収集し、次式を得る。

$$\Delta\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \Delta\mathbf{K} \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{A}$  は感度行列である。式(3)より最小2乗法を用いて、

$$\Delta\mathbf{K} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \Delta\mathbf{R} \quad (4)$$

これが  $\|\Delta\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \Delta\mathbf{K}\|_2^2$  を最小化するパラメータである。

しかし、式(1)において、重力による変形の影響  $g_i$  は実際には決して無視できないのが一般的である。そのため、異なる位置での重力による変形誤差を表す関数のベクトルを  $\mathbf{g} = [g_1 \dots g_N]^T$  として、キャリブレーションは本来、式(3)の代わりに次式によって行われるべきである。

$$\Delta\mathbf{R} - \mathbf{g} = \mathbf{A} \cdot \Delta\mathbf{K} \quad (5)$$

式(5)より、重力の影響をキャンセルした上での機構パラメータ誤差を求めることができる。ただし、キャリブレーション後は全ての条件において指令値に補正を加え、重力の影響による誤差を補正する必要がある。

### 3. 重力による変形誤差を推定するモデルとその同定

2章で提案した手法において、式(5)に含まれる $g$ を推定するため、重力による変形誤差予測モデル<sup>2)</sup>を用いる。

このモデルでは、与えられた工具先端の位置及び姿勢に対し、各ストラットに作用する内力を力学モデルを用いて推定する。力学モデルは、主軸ユニット、プラットフォーム、ストラット、サーボモータなどに作用する重力、ボールねじ、ジョイントに作用する摩擦力、及び慣性力などをモデル化したものである。各ストラットの軸方向弾性変形量は、作用する内力に比例すると仮定する。この時の比例定数 $K_{stiff}$ はストラットの軸方向への負荷に対するコンプライアンスであり、これは実際の誤差軌跡を基に同定すべきパラメータである。各ストラットの変形量の重ね合わせにより、順運動学関数を用いて工具先端の位置決め誤差を推定することができる。また、推定した位置決め誤差 $g_{sim}$ を打ち消すように指令位置をずらすことで、重力による誤差を補正することができる。

一方、2章で述べたキャリブレーション法により機構パラメータ誤差 $\Delta K$ が求められたとき、キャリブレーション後の機構パラメータは $(K - \Delta K)$ となり、その時の軌跡 $R_i'$ は

$$R_i' = f(K - \Delta K) + g_i \quad (6)$$

と表される。ここで $g_i$ は機構パラメータの影響をほとんど受けない。したがって、式(6)から式(1)を差し引くと、

$$R_i' = R_i - \{f(K) - f(K - \Delta K)\} \Leftrightarrow \Delta R' = \Delta R - A \cdot \Delta K \quad (7)$$

となり、キャリブレーション前の測定軌跡から、機構パラメータの変化 $\Delta K$ が軌跡に及ぼす影響を差し引くことで、キャリブレーション後の軌跡を予測できる。この予測方法では重力の影響 $g_i$ の影響をほとんど受けないため、比較的高い精度で軌跡を予測できることが実験的に確かめられている。

そこで、式(7)を用いて求めたキャリブレーション後の予測誤差軌跡 $\Delta R'$ と、上記のモデルにより求めた重力に起因する誤差軌跡の推定値 $g_{sim}$ との差が最小になるように、重力による変形誤差予測モデルのパラメータ $K_{stiff}$ を同定する。

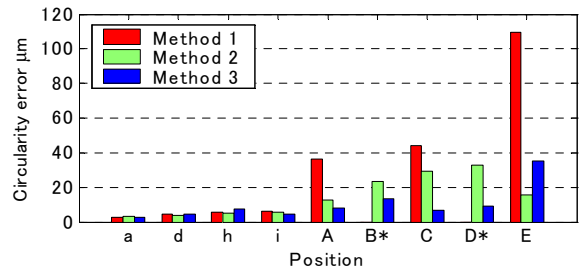
その後、2章で述べたキャリブレーション法に戻り、以降、機構パラメータ誤差 $\Delta K$ のキャリブレーションと、重力による変形誤差予測モデルのパラメータ $K_{stiff}$ の同定を繰り返す。

### 4. 検証実験

提案したキャリブレーション法の有効性を図1に示した実験機において検証する。以下に示す3通りの手法でそれぞれ機構パラメータのキャリブレーション及び重力による誤差の補正を行ったときのDBB軌跡の真円度誤差を比較する。なおDBB測定は全て図2に示した治具上で行う。本論文におけるDBB測定では基本的に、主軸のZ方向の変動を測定するためDBB装置のバーを僅かに傾け、すり鉢状に回転させる。このときの測定半径はバー基準長さ150mmに対して144mmとする。バーを傾けて測定することにより、機構パラメータのキャリブレーションによって主軸のZ軸方向の変動を補正できる。一方、バーを水平にし、測定半径150mmで測定する場合には重力の影響が特に大きいと考えられるZ軸方向の誤差の影響を最小化できる。各方法に応じて2つのDBB測定パターンを適正に選択する必要がある。

【方法1・従来のキャリブレーション】: 主軸の位置及び姿勢を変え、重力の影響が比較的小さいと考えられる15条件で測定を行う。15条件のうち10条件においてはDBB装置のバーを僅かに傾けて測定し、残り5条件では水平にして測定する。キャリブレーション後は、通常の指令で測定を行う。

【方法2・従来のキャリブレーション+補正指令】: 方法1と同一の15条件で測定を行う。ただし、キャリブレーション誤差を最小化するため、全ての条件でDBB装置のバーを



\* No data acquired for Method 1.

Fig.3 Comparison of circularity error

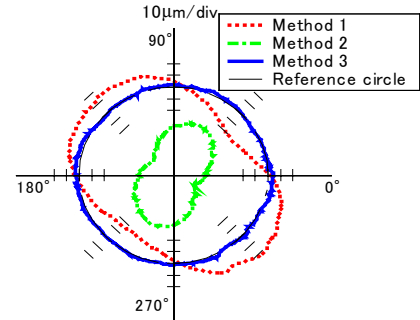


Fig.4 Comparison of contouring error trajectories at the position C

水平にして測定する。キャリブレーション後、指令値に補正を加えて測定を行う。

【方法3・重力の影響をキャンセルするキャリブレーション+補正指令】: 重力の影響が比較的大きいと考えられる2条件、及び方法1, 2の測定条件のうち10条件を選択し、計12条件で測定を行う。DBB測定パターンは方法1の条件に従い、重力の影響が大きいと考えられる2条件ではどちらもDBB装置のバーを傾けて測定を行う。提案した手法でキャリブレーション後、指令値に補正を加えて測定を行う。

各キャリブレーション結果を用いて、異なる9条件で同様の円弧運動試験を行い、その真円度誤差を比較した結果を図3に示す。条件a~iは重力の影響が比較的小さいと考えられる条件、条件A~Eは重力の影響が比較的大きいと考えられる条件である。DBB装置のバーはいずれの条件においても傾けて測定した。条件Cにおける軌跡を比較した結果を図4に示す。提案した手法により、従来の重力による変形誤差の補正(方法2)の場合と比較して、重力の影響の大きい条件でさらに真円度誤差が低減された。ただしキャリブレーションの条件に含まれていない条件Eにおいては方法2の方が真円度が改善した。

### 5. 結言

重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法を提案した。提案した手法により、特に重力の影響の大きい条件においてキャリブレーション後の真円度がさらに向上した。

### 参考文献

- 1) 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法)―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, Vol. 70, No.4, pp.557-561, 2004.
- 2) Soichi Ibaraki, Toshihiro Okuda, Yoshiaki Kakino, Masao Nakagawa, Tetsuya Matsushita, Tomoharu Ando, "Compensation of Gravity-induced Errors on a Hexapod-type Parallel Kinematic Machine Tool," JSME International Journal, Series C, Vol. 47, No. 1, pp. 160-167, 2004.