

Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械のキャリブレーションと重力に起因する誤差の補正に関する研究

京都大学工学研究科 ○茨木 創一, 松原 厚, グローリー工業株式会社 宜川 武史
オークマ株式会社 中川 昌夫, 松下 哲也

Kinematic Calibration and Compensation of Gravity-induced Errors on a Hexapod-type Parallel Kinematic Machine tool
Kyoto University Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA, Glory Ltd. Takeshi YOKAWA
Okuma Corp. Masao NAKAGAWA, Tetsuya MATSUSHITA

This paper presents methodologies to calibrate kinematic parameters and to compensate motion errors caused by the gravity on a Hexapod-type parallel mechanism machine tool. In a conventional kinematic calibration method, two major sources of motion error, namely the calibration error of kinematic parameters and the deformation due to the gravity, cannot be explicitly distinguished. This paper presents a kinematic calibration methodology under the cancellation of gravity-induced errors, such that only the calibration error of kinematic parameters can be evaluated in the calibration process. The simulator of gravity-induced errors can be identified by using the prediction method of contouring error trajectories proposed in this paper. Experimental comparison shows the machine's contouring accuracy is significantly improved over the entire workspace by applying the proposed calibration method.

1. 緒論

従来の直交シリアル構造の工作機械に対して、まったく異なった回転ジョイントとリンクを用いたパラレルメカニズム構造の工作機械が提案されている。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、機構パラメータのキャリブレーション誤差、及び重力によるストラットなどの部材の変形の2つが挙げられることはよく知られている。著者らはこれまでの研究[1]において、DBB(Double Ball Bar)法を用いて測定された円弧運動誤差軌跡を基礎として、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同定する手法を構築した。その結果、主軸ユニットが可動領域の中心付近にあり、主軸の姿勢変化(チルト角)が小さい条件下では、真円度誤差で $7\mu\text{m}$ 以下の運動精度を達成できた、しかし、主軸のチルト角が大きい場合など、重力が運動精度に及ぼす影響が大きくなる条件では、位置決め誤差は急激に悪化し、特にパラレル機構の特異点に近い条件では真円度誤差は上記の数十倍にも達する場合がある。この重力に起因する位置決め誤差(以下、重力誤差と呼ぶ)を補正するために、著者らはパラレル機構の力学モデルを用いて重力誤差を予測し、指令軌跡を修正する方法を提案した[2]。以上の手法により、可動範囲の大部分において従来型のマシニングセンタと遜色ない位置決め精度が得られるようになり、また主軸の位置が作業領域の端近くにある場合やチルト角が大きい場合にも、位置決め精度を大幅に向上できた。

しかし、従来型の5軸制御マシニングセンタに対し工作機械としての優位性を明らかにし、また、3次元測定器やマイクロ・ナノ分野での精密マニピュレータなど、静的かつ高精度な位置決め精度が要求される分野へのパラレル機構の応用を考えると、さらに位置決め精度を向上させ、また主軸の位置・姿勢による位置決め精度の変動を最小化する方法を構築することは非常に重要である。本論文では、従来の機構パラメータのキャリブレーション法においては、運動誤差に対する機構パラメータのキャリブレーション誤差の影響と、重力の影響とが陽に分離されていないことに着目し、位置決め精度をより向上させるためのキャリブレーション法を提案する。

2. 従来のキャリブレーション法及び重力に起因する運動誤差の補正法

2.1 Hexapod 型工作機械の機械構造

本研究では、図1に示すスチュワートプラットフォームを用いたHexapod型パラレル機構工作機械を対象とする。本研究では、図2に示すオークマ(株)製のHexapod型パラレル機構工作機械 COSMO CENTER PM-600 を実験に用いる。実験

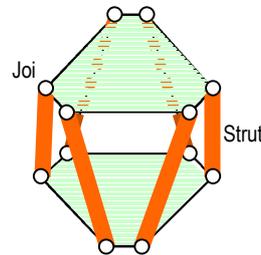


Figure 1 Stewart platform

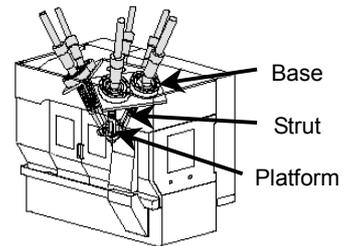


Figure 2 COSMO CENTER PM-600 by Okuma Corp.

機的主要仕様は文献[1]を参照のこと。

2.2 従来のキャリブレーション法 [1]

上記の実験機において、キャリブレーションの対象とする機構パラメータ誤差は以下の計24個のパラメータとする：

- (1) 各ストラットの初期設定長さの誤差： ΔL_i ($i=1-6$)
- (2) ベースジョイントの位置の誤差： ΔQ_i ($i=1-6$)

円弧補間運動試験における測定半径 R_i ($i=1-N$)と、上記の機構パラメータからなるベクトル $K \in \mathcal{R}^{24}$ との関係は、次式のように書くことができる：

$$R_i = f(T, K) + g_i(T) \quad (1)$$

ここで、 f は順運動学で与えられる関数であり、工具先端の位置及び姿勢を表すベクトル $T \in \mathcal{R}^6$ 、及び機構パラメータ K に依存する。 g_i は重力誤差を表す。キャリブレーションに用いる測定条件では重力誤差が十分に小さいと仮定すると、次式のように機構パラメータ誤差 ΔK について線形近似できる。

$$\Delta R = A \cdot \Delta K \quad (2)$$

ただし、 $A \in \mathcal{R}^{N \times 24}$ は関数 f のヤコビ行列 $\partial f / \partial K$ であり、 $\Delta R \in \mathcal{R}^N$ は基準円に対する半径誤差を表すベクトルである。最小2乗法を用いて ΔK を同定する。

2.3 重力に起因する運動誤差の補正法

著者らは文献[2]において、パラレル機構の力学モデルを用いて重力誤差を予測する手法を提案した。このモデルは、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、及び慣性力などをモデル化したもので、各ストラットの内力から、その弾性変形量の重ね合わせとして工具先端の位置決め誤差 $\hat{g}(T)$ を推定する。また、推定した位置決め誤差を打ち消すように指令位置を補正し、重力に起因する運動誤

差を補正する（以下、重力補正と呼ぶ）。

3. キャリブレーション後の運動軌跡の予測法

最初に、ある機構パラメータを用いて機械を駆動した場合の運動誤差軌跡が測定された場合に、その機構パラメータを変更した後の運動誤差軌跡を予測する手法を示す。この方法は、4章に示すように、重力誤差を予測するための力学モデルの同定に用いられる。

パラレル機構の運動誤差の原因はキャリブレーション誤差だけではない。すなわち、式(1)における順運動学で与えられる関数 $f(K)$ 以外の要因は一般に決して無視できないため、 $f(K)$ だけを用いて運動誤差軌跡 R_i を推定することは困難である。しかし、機構パラメータを $K=K_1$ としたときの運動誤差軌跡 R_i^1 が測定されたとして、機構パラメータを $K_2=K_1+\Delta K$ と変更したときの運動誤差軌跡 R_i^2 は、式(1)より

$$R_i^2 = R_i^1 + \{f(K_2) - f(K_1)\} \approx R_i^1 + A \cdot \Delta K \quad (3)$$

により推定できる。式(1)において、重力の影響 $g(T)$ やその他の誤差要因は、機構パラメータが微小に変動してもほとんど影響を受けない。そのため、上式のように2つの誤差軌跡の差は順運動関数 f にのみ依存すると考えられる。

以上を実験により確認するために、2.1節に示した実験機を用いて、従来のキャリブレーション法により機構パラメータの同定を行った。変更前の円弧運動誤差軌跡から、式(3)により変更後の誤差軌跡の予測を行い、実測結果との比較を行った。円弧運動誤差軌跡の測定結果と推定結果の比較の一例を、図3に示す。その他の条件でも、同様に非常に良く一致することを実験により確認した。

4. 重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法

(1) 式(1)において、重力による変形の影響 $g(T)$ は一般に決して無視できない。2.3節に示した力学モデルを用いて得られた推定値 $\hat{g}(K)$ を代入し、式(2)の代わりに次式を用いて機構パラメータ ΔK を算出する。

$$\Delta R - \hat{g}(T) = A \cdot \Delta K \quad (4)$$

(2) 重力誤差を推定するための力学モデルに含まれるパラメータは、推定誤差軌跡と実際の誤差軌跡の差が最小化されるように同定する[2]。ここでは、(1)により得られた新しい機構パラメータを用いて、3.1章に示した方法によりキャリブレーション後の誤差軌跡を推定し、それと力学モデルによる重力誤差の推定軌跡との差が最小化されるように、力学モデルのパラメータを修正する。

(3) 上記(1)(2)を収束するまで繰り返す。

5. 実験による検証

提案したキャリブレーション法の有効性を実験により検証する。以下に示す3通りの手法で機構パラメータのキャリブレーションを行った。なお、キャリブレーション及び検証のためのDBB測定は、文献[1]に示したDBB測定用の治具を用いて行った。

- (1) 従来のキャリブレーション法：従来のキャリブレーション法[1]によりキャリブレーションを行う。キャリブレーション後、重力補正は行わない。
- (2) 従来のキャリブレーション法+重力補正：従来のキャリブレーションを行った上で、キャリブレーション後は重力補正を適用する。
- (3) 重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法+重力補正：4章に示した重力の影響をキャンセルするキャリブレーション法により機構パラメータを同定した上で、重力補正を適用する。

各キャリブレーション結果を用いて、円弧軌跡の中心位置、主軸姿勢が異なる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はチルト角が

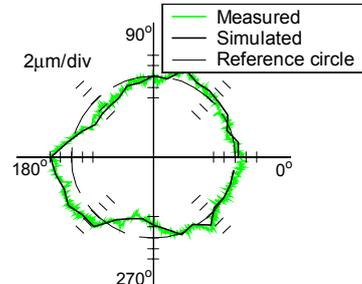


Figure 3 An example of comparison of measured and simulated trajectories after the calibration

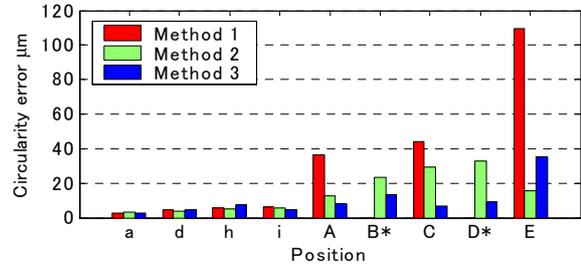


Figure 3 Comparison in circularity error of measured DBB contouring error trajectories.

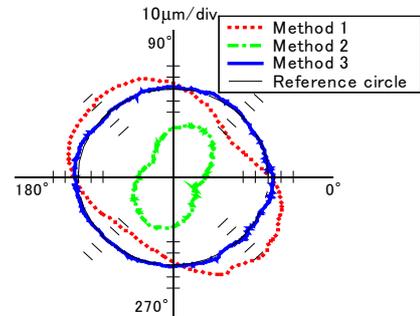


Figure 5 Comparison of measured DBB trajectories (position C)

大きく、また可動範囲の端に近く、重力の影響が比較的大きいと考えられる条件である。重力の影響が大きい条件 A~E では、重力補正を用いない場合(Method 1)、真円度は大幅に悪化する。従来のキャリブレーション法を用いた場合、重力補正の適用により真円度誤差は条件 A, C, E においてそれぞれ 64%, 33%, 86%低減された(Method 2)。さらに、提案したキャリブレーション法及び重力補正により、従来のキャリブレーション法と重力補正を用いた場合と比較して、条件 A~D において真円度がそれぞれ、38%, 43%, 77%, 72%低減され、条件 E を除く全ての条件で真円度誤差 15µm 以下を達成した(Method 3)。例として、条件 C における軌跡を比較した結果を図4に示す。

4. 結論

- (1) 実際に測定された運動誤差軌跡から、機構パラメータを変更した後の運動誤差軌跡を予測する手法を提案した。重力など機構パラメータ以外の誤差要因を排除できることから、極めて高精度な予測が可能である。
- (2) 力学モデルを用いて重力誤差を推定し、機構パラメータのキャリブレーションにおいて重力誤差の影響を除去する方法を提案した。提案したキャリブレーション法及び重力補正法の適用により、従来のキャリブレーション法及び重力補正を用いた場合と比較して最大 77%程度真円度誤差を低減でき、大幅に運動精度が向上できた。

参考文献

- [1] 茨木 他：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）、精密工学会誌、70, 4 (2004), 557.
- [2] S. Ibaraki, et al.: Compensation of Gravity-induced Errors on a Hexapod-type Parallel Kinematic Machine Tool, *JSME International Journal C*, 47, 1 (2004), 160.