パラレルメカニズムのキャリブレーション方法 の研究 (第2報) *

— 順運動学による機構パラメータのキャリブレーション —

太田浩充 ** 渋谷哲郎 ** 遠山退三 ** 内山 勝 ***

Study of Kinematic Calibration Method for Parallel Mechanism (2nd Report)
— Kinematic Calibration Using Forward Kinematics —

Hiromichi OTA, Teturo SHIBUKAWA, Taizo TOOYAMA and Masaru UCHIYAMA

This paper describes a newly developed forward kinematic calibration method for parallel mechanisms which identifies the kinematic parameters using the pose data measured by a Double Ball Bar (DBB) system. The parameter identification procedure using forward kinematics does not require full pose data and, therefore, can make the measurement procedure simple. The measurement using the DBB system allows for large traveling plate orientations and enables simple and precise calibration. The principle of this method is first described, then the validity of this method is presented through simulations and experiments performed on a parallel mechanism based milling machine, named HexaM.

Key words: parallel mechanism, kinematic parameter, calibration, direct kinematics, HexaM, Double Ball Bar system

1. 緒 言

パラレルメカニズムの静的精度向上のため、工具先端の位置決め誤差から機構パラメータをキャリブレーションする方法を検討してきた。第1報¹⁾では、パラレルメカニズム応用加工機 HexaM²⁾ に対してモデル化を行い、トラベリングプレートに姿勢変化がない場合とある場合について2つのモデル、モデル36とモデル54を定義した。そして、逆運動学によるキャリブレーション方法を提案し、シミュレーションで両モデルについて有効性を示した後、モデル36に対して実際にキャリブレーションを行い、静的精度が向上することを示した。モデル54では、工具先端位置誤差の測定において、トラベリングプレートを姿勢変化させる必要があるが、姿勢変化させた状態での位置、姿勢の精密な測定は困難であり、実際のキャリブレーションは行っていない。

パラレルメカニズムでは逆運動学が解析的に解けるという特長から、逆運動学を何らかの形で用いるキャリブレーション方法が多く提案されている^{3)~7)}が、逆運動学を用いる限りは、逆変換を行うために必然的に工具先端の座標を6軸同時に知る必要があり、前述と同様の問題を生じる。

産業用ロボットに代表されるシリアルメカニズムでは順運動学を解析的に解くことができ、順運動学を用いたキャリブレーションが行われる。順運動学を用いる場合も、工具先端の位置、姿勢からキャリブレーションする方法が一般的に知られている⁸⁾⁹⁾。パラレルメカニズムでも、Masoryら¹⁰⁾が、位置、姿勢の6軸の測定値をもとに順運動学的にキャリブレーションする方法を提案している。しかし、順運動学を用いる場合には、順変換は、工具先端位置、姿勢の測定値とは関係無く行われるため、工具先端の座標を必ずしも6軸同時に知る必要はなく、この特長を生

かすことによって、測定の簡易化、姿勢変化させた状態での測定への対応を容易にすることができる。このような考えに基づき、本報告では、1次元の変位計である Double Ball Bar (DBB) の測定値から順運動学的に機構パラメータを同定する新しいキャリブレーション方法を提案する¹¹⁾¹²⁾。そして、本方法を用いて、モデル36、モデル54の両モデルについてシミュレーションおよび実験でその効果を検証する。

2. 順運動学によるキャリブレーション方法

第1報では、解析的に解くことができる逆運動学を用いてパラメータを同定した。この方法では図1に示すように工具先端座標の指令値と実際の差をアクチュエータ座標の差に置き換え、この差を最小化するように機構パラメータを同定する。したがって、アクチュエータ座標を計算するためには、工具先端の位置、姿勢のすべての座標値が必要であり、これを外部から計測する必要があった。

Fig. 1 Parameter identification method

* 原稿受付 平成12年2月4日

** 正会員 豊田工機(株)(刈谷市朝日町1-1)

*** 正会員 東北大学大学院工学研究科(仙台市青葉区荒巻字青葉01)

一方、シリアルメカニズムのように順運動学を用いる方法では、通常、工具先端位置の指令値と実際のとの差を最小化するようにパラメータを同定する。この場合、すべての座標値を知る必要はなく、例えば x 座標だけでも計算は可能である。このことは、順運動学を用いることにより測定を簡素化できることを意味している。しかし、パラレルメカニズムでは順運動学を解析的に解けないという問題がある。

この問題は、次のように解決できる。順変換式から工具先端の位置誤差とパラメータの誤差の線形な関係を表す微分関係式を導き、同式の微分係数を差分に置き換えることによって計算可能な形に変換する。そして、変換した式に最小2乗法を適用してパラメータを同定する。

2.1 順運動学によるパラメータ同定方法

順運動学によりパラメータを同定するため、順変換式を次のように定義する。

$$x = g(d, P) \quad (1)$$

x は工具先端座標、 d はアクチュエータ座標 (U, u, V, v, W, w)、 P は機構パラメータ ($P_1, P_2, \dots, P_n$) を示す。ただし、関数 g は解析的に表現することはできない。次にこの式から微分関係式を導く⁸⁾。式 (1) を機構パラメータについて全微分すると

$$dx = \frac{\partial g}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial g}{\partial P_2} dP_2 + \dots + \frac{\partial g}{\partial P_n} dP_n \quad (2)$$

が得られる。ここで、偏微分係数 $\partial g / \partial P_i$ を $\Delta g / \Delta P_i$ に置き換える。 g の値そのものは、逆変換式からニュートン法等により数値計算できるので、 $\Delta g / \Delta P_i$ は、パラメータの微小変化量に対する g の変化量として数値的に求めることができる。さらに、 dx を工具先端の位置誤差 δx 、 dP_i ($i = 1, 2, \dots, n$) をパラメータの誤差 δP_i に置き換えれば、

$$\delta x = \frac{\Delta g}{\Delta P_1} \delta P_1 + \frac{\Delta g}{\Delta P_2} \delta P_2 + \dots + \frac{\Delta g}{\Delta P_n} \delta P_n \quad (3)$$

が得られる。この式はパラメータの誤差が十分小さい場合に成り立つ近似式である。この式にパラメータ誤差 δP_i を未知変数として最小2乗法を適用する。すなわち、

$$\sum ((g(d, P_N) - x_m) - \delta x')^2 \quad (4)$$

を最小化するようにパラメータ同定を行う。ここで P_N はパラメータのノミナル値、 x_m は測定値、 $\delta x'$ は、パラメータ誤差の推定値 δP_i から式 (3) を用いて計算される工具先端位置誤差を示す。求めるパラメータ誤差 E_P および k 回の測定から得られる工具先端位置誤差 E_x を、

$$E_P = \begin{bmatrix} \delta P_1 & \delta P_2 & \dots & \delta P_n \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$E_x = \begin{bmatrix} \delta x_1 & \delta x_2 & \dots & \delta x_k \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

とすれば、 E_P は、

$$E_P = (J^T J)^{-1} J^T E_x \quad (7)$$

より求められる。ここで J は、

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\Delta g(d_1, P_N)}{\Delta P_1} & \dots & \frac{\Delta g(d_1, P_N)}{\Delta P_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta g(d_k, P_N)}{\Delta P_1} & \dots & \frac{\Delta g(d_k, P_N)}{\Delta P_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

である。この結果からパラメータの1回目の推定値 $P_{(1)}$ が次式より得られる。

$$P_{(1)} = P_N + E_P \quad (9)$$

次に得られたパラメータをノミナル値と置き換え、同様な計算を δx が十分小さくなるまで繰り返す。

以上の方法により、パラレルメカニズムにおいて順運動学によるキャリブレーションが可能になり、同時に測定の簡易化に対応できるようになる。

2.2 測定方法

工具先端位置の測定方法には、精度が高く、測定が容易かつトラベリングプレートに姿勢変化があっても測定可能であることが望まれる。本報告では、図2に示すように工作機械の運動精度測定に用いられる計測器 DBB (精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$) を用いた。DBB は、両端に球が取り付けられたバーの変位を測定するもので、テーブル上に取り付けた固定点とトラベリングプレート上に取り付けた可動点をそのバーで接続する。接続部は永久磁石による球面ジョイントであり、簡単に付け外しができる上、バーと干渉しない限りトラベリングプレートの姿勢を自由に变えることができる。

この方法では、移動指令値から計算されるバーの長さを実際の差からパラメータを同定する。したがって、工具先端の位置はバー長 r で表され、式 (1) は、次のように置き換えられる。

$$r = g(d, P) \quad (10)$$

測定値は、 r の1次元量であり、通常の DBB の運動精度測定のようにテーブル上の1点の固定点とトラベリングプレート上の1点の可動点を接続して測定しただけでは、パラメータ同定のために必要十分なデータは得られない。空間上のある点の座標は座標が既知の3点からの距離がわかれば決定できる。また、トラベリングプレート上の3点の座標がわかればその位置、姿勢は決定される。したがって、座標が既知の3点からトラベリングプレート上の3点を測定すれば十分なデータが得られると考えられる。

ここでは、テーブル上の3点 (固定点) とトラベリングプレートに取りつけたジグ上の3点 (可動点) をそれぞれ1か所ずつバーで接続して測定し、最低 3×3 の9回の測定が必要になる。実際には可動範囲全域にわたって測定するために、100 mm, 150 mm, 300 mm の3種類の長さのバーを用いる。モデル 54 の場合はさらにトラベリングプレートの姿勢を変化させる必要がある。姿勢は、3つの回転軸のうち2つの軸を回転させればよく、ここでは、 x, y 軸回りの回転軸、 A, B 軸を $\pm 5^\circ$ 回転させる。

Fig. 2 Pose measurement by DBB for parameter identification

測定点は、1 周あたり 60° 間隔で 6 点とし、動的な誤差が入らないように、各点で停止させて行く。なお、DBB はテーブル面に対し傾きを持たせ、 z 方向も感度をもつようにする。

キャリブレーションの基準は、テーブル上の 3 つの固定点になるため、その座標は、正確に知る必要があるが、次のように比較的簡単に座標を求めることができる。まず、1 点を基準点として既知の座標にとり、2 点目を基準点と結ぶ線分が x 軸あるいは、 y 軸と平行になるようにとり、3 点目は、他の 2 点と正三角形を作るようにとり、この三角形の 1 辺を DBB で測定可能な長さにすれば、各 2 点間の距離を実測して座標を正確に計算することができる。

また、トラベリングプレートに取り付けるジグ上の可動点 3 点の位置も同様に重要であり、本報では、ジグを取り外して、3 次元測定器で 3 点の位置関係を測定するとともに、トラベリングプレートに互いの位置関係が特定できるよう取り付けられている。

この測定方法の利点は、汎用の測定器である DBB を用いること、高精度な測定が可能なこと、セッティングが簡単なこと、トラベリングプレートの姿勢変化に対応できることにある。

3. 機構パラメータ

同定する機構パラメータは図 3 に示すように第 1 報と同じである。機械の動作にトラベリングプレートの姿勢変化が含まれる場合には、モデル 54 を使い、 $BO1, BO2, BO3, TPO1, TPO2, TPO3, RL, SA1, SA2$ の 1 軸あたり 9 個合計 54 個のパラメータを同定する。動作に姿勢変化が含まれず、 x, y, z の並進の場合にはモデル 36 を使い、各軸の $TPO1 \sim TPO3$ の誤差を $BO1 \sim BO3$ に統合することにより、1 軸あたり 6 個合計 36 個のパラメータを同定する。ただし、機械の改良のため、 $TPO1$ の寸法を 160 mm から 185 mm へ変更しているが、キャリブレーションの基本的な考え方は変わらないので、ここでは特にそのための考察は行わない。

4. シミュレーション

4.1 測定誤差の影響評価

測定誤差を正規分布でばらつく誤差としてばらつきが 2σ で 1, 5, 10 μm の場合についてキャリブレーション精度を評価する。図 4 は、誤差を含む測定値から同定した機構パラメータを

用いたときの可動範囲全域における位置誤差、姿勢誤差の最大値を示す。10 μm の測定誤差に対し、モデル 36 では、23 μm , 0.014°, モデル 54 では、71 μm , 0.017° の位置、姿勢誤差が生じているが、第 1 報の逆運動学による方法に比べ、測定誤差の影響は、位置誤差は 1/5~1/9, 姿勢誤差は 1/2~1/4 に小さくなっている。これは、第 1 報の方法では、基準ジグとトラベリングプレートの干渉のため、測定点を多く取ることができないのに対し、本方法では、多くの測定点をとることができるためと考えられる。

4.2 モデル 36 とモデル 54 の違い

モデル 36 でキャリブレーションを行った場合、 x, y, z の並進動作のみで使用する限りは精度は保証されるが、姿勢変化を含む動作をさせると、統合したトラベリングプレートオフセットの誤差の影響で工具先端位置に誤差を生じる。

図 5 に、その影響をシミュレーションで定量的に検証した例

Fig. 4 Influence of measurement errors on the calibration accuracy

Fig. 3 Kinematic parameters of the HexaM

Fig. 5 Difference between model 36 and model 54 in circularity of loci with the traveling plate orientation

Fig. 6 Circularity of loci with traveling plate orientation

を示す。シミュレーションでは、まず、各機構パラメータに長さのパラメータでは $2\sigma = 0.5 \text{ mm}$ 、角度のパラメータでは $2\sigma = 0.05^\circ$ の誤差を設定する。そして、それによって生じる工具先端の位置誤差からモデル 36、モデル 54 についてパラメータを同定し、そのパラメータを用いて A 軸を 20° 傾けた状態で $x-y$ 平面上に直径 300 mm の円を描かせたときの軌跡の真円度を比較した。図中の誤差は 1000 倍に拡大表示してある。モデル 54 では、理論的に誤差は生じないが、モデル 36 では、最大 $20 \mu\text{m}$ 程度の誤差を生じることがわかる。これを、トラベリングプレートの傾き角度と軌跡の真円度の関係としてみると、図 6 のようになる。モデル 36 では、傾き角が大きくなると真円度が徐々に劣化していくことがわかる。すなわち、トラベリングプレートの姿勢変化を含む動作で高精度が必要な場合には、モデル 54 によってキャリブレーションする必要がある。

5. 実験

5.1 パラメータ同定

以上述べた方法で実際に HexaM のキャリブレーション実験をモデル 36、モデル 54 について行った。表 1 に求めた機構パラメータを示す。モデル 36 では、ベースオフセット (BO1~BO3) とトラベリングプレートオフセット (TPO1~TPO3) を統合して扱い、モデル 54 では分離して扱うため、これらのパラメータは異なった値になるが、ロッド長 (RL)、スライド取付角度 (SA1, SA2) は同じ値になるはずである。しかし、SA1, SA2 は比較的近い値になっているものの、RL は一致しているとは言えず、モデルと実体が完全には一致していないことが推測される。

5.2 効果の検証

キャリブレーションが有効かどうか確認するために、キャリブレーション前のパラメータ、モデル 36 について同定したパラメータ、モデル 54 について同定したパラメータの 3 つのパラメータについて精度評価を行った。評価はまず、キャリブレーション前後の精度比較のため、トラベリングプレートに姿勢変化を与えない状態で段差ブロックゲージ（ブロック間寸法誤差 $\pm 1.8 \mu\text{m}$ ）による位置誤差の測定、DBB による円軌跡の真円度測定を実施した。位置誤差の測定は、 x, y, z 方向について、真円度測定は $x-y$ 平面、 $y-z$ 平面、 $x-z$ 平面で直径 300 mm の円を描かせて行った。さらに、モデル 36 とモデル 54 の違いを明らかにするためにトラベリングプレートを傾けた状態でも円軌跡の真円度測定を行った。

表 2 は、トラベリングプレートに姿勢変化を与えない状態で

の評価結果を示す。モデル 36 の括弧内の値は、第 1 報で報告した逆運動学による方法の値である。また、図 7、図 8 にキャリブレーション前とキャリブレーション後（モデル 54）を比較したグラフを示す。これらの結果からまず、キャリブレーションによって精度が大きく改善されることが確認できる。特に、 x, y 方向の位置決め精度、 $y-z$ 平面、 $x-z$ 平面の真円度にその効果が大きく見られる。また、モデル 36 の結果を見ると、括弧内の逆運動学による方法とほぼ同等の効果が得られている。モデル 54 についても、モデル 36 とほとんど差はなく、姿勢変化を与えない状態ではモデル 36 と同程度の精度と言える。

次にトラベリングプレートに姿勢変化を与えた状態での真円度を図 9 に示す。キャリブレーション前、モデル 36 のパラメー

Table 1 Estimated kinematic parameters

(a) Model 36						
	U	u	V	v	W	w
BO1 mm	249.692	249.512	249.604	250.105	249.861	249.515
BO2 mm	88.850	90.833	89.661	90.005	89.472	89.809
BO3 mm	0.411	0.457	0.562	0.982	1.144	0.812
RL mm	1100.014	1100.403	1100.181	1100.322	1100.532	1100.489
SA1 $^\circ$	29.994	30.029	30.003	30.003	30.025	30.031
SA2 $^\circ$	-0.029	-0.019	-0.041	-0.041	-0.026	-0.016

(b) Model 54						
	U	u	V	v	W	w
BO1 mm	249.668	249.652	249.718	250.232	249.333	249.478
BO2 mm	89.320	90.716	89.941	89.965	89.933	89.862
BO3 mm	0.629	0.252	0.706	0.767	0.792	0.815
TPO1 mm	185.222	185.169	185.277	185.274	184.926	185.329
TPO2 mm	90.338	90.052	90.296	90.132	90.388	90.020
TPO3 mm	0.299	0.114	0.189	0.023	-0.161	0.174
RL mm	1100.042	1100.073	1100.040	1100.007	1100.262	1100.336
SA1 $^\circ$	30.001	30.015	29.997	29.999	30.031	30.037
SA2 $^\circ$	-0.008	0.003	-0.034	-0.024	-0.015	-0.011

Table 2 Verification results with no traveling plate orientation

		Before calibration	After calibration	
			Model 36	Model 54
Position error μm	x	174	17 (18)	17
	y	173	24 (29)	29
	z	4	8 (23)	12
Circularity of loci μm	$x-y$ plane	21	21 (21)	25
	$y-z$ plane	105	16 (17)	9
	$x-z$ plane	145	14 (19)	17

Fig. 7 Circularity of loci before and after calibration

Fig. 8 Position error before and after calibration

Fig. 9 Circularity of loci with traveling plate orientation

タがトラベリングプレートを傾けると真円度が悪くなっていくのが顕著なものに対し、モデル54のパラメータでは、シミュレーションと同様、真円度の劣化が少ないことがわかる。これは、モデル54によるキャリブレーションがトラベリングプレートの姿勢変化を含めた状態での静的精度向上に有効なことを意味している。傾斜角度が15°になると真円度がやや悪くなっているのは、構成部材のたわみ、省略しているパラメータの影響によるモデルからのずれが原因として考えられる。

今回の検証では、大きな角度変化に対して十分な精度をもつ測定器がないことから、回転方向の精度についての検証がなされていないが、姿勢が変化した状態においても、並進方向の精

度については大きく改善できることがわかった。姿勢変化が大きい部分で精度が低下することについては、モデルと実体とのずれの影響が大きくなるためと考えられる。

6. 結 言

本報では、DBBの測定値から順運動学的に機構パラメータをキャリブレーションする方法を提案し、シミュレーションおよび実験でその効果を確認した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 順運動学によるキャリブレーションは、DBBのような1次元の測定データにも対応可能で、測定の簡易化、トラベリングプレートに姿勢変化がある場合の測定に有効であることを実証した。
- (2) モデル36、モデル54の2つのモデルに対してキャリブレーションを実施し、並進方向については実験で精度の改善を確認した。
- (3) トラベリングプレートに姿勢変化の無い状態ではモデル36、モデル54の差はなく、ほぼ同等の精度であった。
- (4) トラベリングプレートに姿勢変化のある状態では、モデル36の精度劣化が顕著なものに対しモデル54の劣化が少なく、モデル54が姿勢変化を含めた6軸パラレル機構のキャリブレーションに有効であることを示した。

ただし、モデル54でキャリブレーション後にトラベリングプレートの姿勢が15°以上になると精度が劣化する傾向が見られるように、部材のたわみ、省略しているパラメータ等の影響からモデルと実体とのずれが推測され、これについては今後の課題として検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 太田浩充, 渡川哲郎, 遠山退三: パラレルメカニズムのキャリブレーション方法の研究(第1報)―逆運動学による機構パラメータのキャリブレーション―, 精密工学会誌, 66, 6, (2000) 950.
- 2) 渡川哲郎, 遠山退三, 渡辺一樹, 鈴木基之, 木村裕郎, 三木一生: パラレルリンク形切削加工機の開発(1), 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1997) 119.
- 3) C.Innocenti: Algorithms for Kinematic Calibration of Fully-Parallel Manipulators, in Computational Kinematics, J.P.Merlet and B.Ravani, ed., Kluwer Academic Publishers, Netherlands, (1995), 241.
- 4) D.Kugumtzi and B.Lillekjendlie: Estimation Model for Kinematic Calibration of Manipulators with a Parallel Structure, J. Robotic Systems, 11, 5, (1994) 399.
- 5) H. Zhuang and Z.S.Roth: A Method for Kinematic Calibration of Stewart Platforms, Proc. 1991 ASME Ann. Winter Meeting, 29, (1991) 43.
- 6) H.Zhuang, O.Masory and J.Yan: Kinematic Calibration of a Stewart Platform Using Pose Measurements Obtained by a Single Theodolite, Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, Part 2, (1995) 329.
- 7) Z.J.Geng and L.S.Haynes: An Effective Kinematic Calibration Method for Stewart Platforms, Proc. 5th Int. Symp. Robotics and Manufacturing, (1994) 87.
- 8) K.Tamaki, M.Uno, T.Mita, K.Sugimoto, S.Sakaue and H.Onari: A Restructurable Assembly Center Employing Mobile DD-Robots, Proc. 24th Int. Symp. Industrial Robots, (1993) 119.
- 9) S.Sakakibara: An Automatic Calibration Method for Improving Absolute Positioning Accuracy of a Robot Arm, Proc. 24th Int. Symp. Industrial Robots, (1993) 905.
- 10) O.Masory, J.Wang and H.Zhuang: On the Accuracy of Stewart Platform—Part II Kinematic Calibration and Compensation, Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2, (1993) 725.
- 11) 太田浩充, 遠山退三, 久保俊哉: パラレルメカニズムの静的精度向上のための検討―(第2報 仮想的順変換式による機構パラメータのキャリブレーション)―, 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1998) 616.
- 12) 太田浩充, 大坪和義, 内山 勝: パラレルメカニズムの静的精度向上のための検討―(第3報 姿勢変化を伴う6軸パラレル機構のキャリブレーション)―, 1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) 343.