S111043

**パラレルメカニズムを用いた高速・高精度 3 次元計測システム(第 26 報)*
(ダブルボールバーを用いた校正)**大滝 啓太^{*1}, 大岩 孝彰^{*2}, 朝間 淳一^{*2}, 寺林 賢司^{*2}**Coordinate Measuring Machine based on Parallel Kinematic Mechanism
(26th report, Kinematic calibration with double-ended ball bar)**Keita OTAKI^{*1}, Takaaki OIWA, Junichi ASAMA and Kenji TERABAYASHI^{*1} Shizuoka Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Jouhoku 3-5-1, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561 Japan

This study has proposed a new coordinate measuring machine (CMM) based on a three-degree-of-freedom parallel mechanism. This paper describes two kinematic calibration methods using a double-ended ball bar (DEBB) with a fixed ball distance. The CMM with a touch trigger probe measures the sun ball and the planet ball of the DEBB, and calculates position errors and distance errors between the two balls using kinematic parameters. The least square method using Jacobian matrices corrects gradually the kinematic parameters so that the errors are minimized. The above calculations have been repeated in both numerical simulations and experiments. After the calibration, the position errors of the DEBB decreased from 123 μm_{RMS} to 6 μm_{RMS} and the distance errors of two balls decreased from 123 μm_{RMS} to 19 μm_{RMS} in the experiments. Furthermore, accuracy of length measurement with gauge blocks have been improved after the calibration.

Key Words :Coordinate Measuring Machine, Parallel Mechanism, Calibration, Kinematic parameter, Double-Ball-Bar**1. 緒 言**

現在、複雑な形状をした機械部品の寸法や形状の測定機として直列機構（シリアルメカニズム）を用いた直交座標形三次元測定機（Coordinate Measuring Machine : CMM）が広く普及している。しかし、この直交座標形 CMM は高精度測定をするにあたり、構造上の多くの問題点を抱えている。そこで本研究では、図 1 に示すような並列機構（パラレルメカニズム）を用いたパラレルメカニズム形三次元座標測定機（PCMM）を提案してきた⁽¹⁾。図中の 3 本の連結連鎖の長さを変化させるとステージは空間内を移動し、プローブが測定対象に触れた瞬間の連結連鎖の伸縮量を内蔵の測長ユニットで測定し、プローブ先端の三次元座標位置を計算する。

PCMM の連結連鎖の初期長さ、ベースジョイント、ステージジョイントの位置・姿勢、プローブの長さ等を機構パラメータと呼び、このパラメータの誤差は絶対位置決め精度に大きく影響する。そのため、高精度測定を行う前にこのパラメータを正しく求める必要がある。本報では、校正用のアーティファクトとしてダブルボールバーを使用し、それを PCMM にて測定した結果により機構パラメータの校正を行う。

CMM や工作機械の精度検定用にダブルボールバー(DBB : Double-Ball-Bar)法⁽²⁾⁽³⁾が広く用いられ、パラレルメカニズムの校正においても多用されている⁽⁴⁾。しかし、従来の DBB は片方のボールをワークテーブル上に固定し、片方はツールやプローブを取り外した機械のス핀ドル部分に取り付けるため、CMM の校正を行う場合にはプローブを含めたパラメータの推定を行うことができない。そこで、今回はボール間の距離が一定で DBB の片方の球も定盤上に設置し、それをタッチプローブで測定するタイプのダブルボールバー(DEBB : Double-Ended Ball Bar)を採用し校正を行う（図 2）。

^{*1} 静岡大学 大学院 工学研究科^{*2} 正員, 静岡大学 (〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1)

E-mail: f0330015@ipc.shizuoka.ac.jp

Fig.1 Conception of the CMM using parallel mechanism

Fig.2 Specifications of Double-Ended Ball Bar

2. 原 理

2・1 パラレルメカニズム形三次元座標測定機

本研究にて用いる PCMM は、ベースプラットフォーム側に球面ジョイント、ムービングステージ側に回転ジョイント、中間にアクチュエータを内蔵した直動ジョイントを有する 3 本の連結連鎖を並列に接続した機構である。この 3 本の連結連鎖を伸縮させる事により、ステージを xyz 方向へ移動させることができる。ステージの中心にはタッチプローブが装着しており、測定対象物にタッチプローブの先端が触れた瞬間の連結連鎖の伸縮量を取得し、伸縮量と機構パラメータを用いた順運動学からプローブ先端の座標を求めることができる。

2・2 ダブルボールバー

DEBB は測定領域中央に固定した太陽球と、固定長のバーの端に装着された遊星球からなり、遊星球は太陽球の周りを 2 つの球の中心間距離を半径として球面運動する。DEBB の遊星球は回転テーブル上に固定した磁石内蔵の V ブロックで固定する。DEBB は自身の校正が 2 つの球の中心間距離だけであるため容易である。また、プローブを装着したまま PCMM の校正を行う事ができるので、プローブの長さや位置などのパラメータの校正も可能である。

2・3 校正方法

初めに、DEBB の太陽球の周りを PCMM で測定し、中心座標を求める。次に遊星球を測定空間内で移動しつつ、それぞれで遊星球を測定し、中心座標を求める。ここで、PCMM の機構パラメータに誤差が無ければ、遊星球の中心座標は太陽球を中心とし、2 つの球の中心間距離を半径とする球面上に配置される。しかし、実際には遊星球の中心座標は球面上に配置されず、機構パラメータの誤差の影響によって生じた誤差を持つ。よって、最小二乗法を用いてこの誤差が最小になるように機構パラメータを推定し、校正する。

今回、DEBB を用いた校正において、2 通りの誤差関数の最小二乗計算を検討した。1 つは、PCMM で測定した遊星球の中心座標 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1 \sim m$) (m は遊星球の測定球数) と、球面との交点の座標 (x_{si}, y_{si}, z_{si}) とし、

$$\begin{cases} \Delta x = x_i - x_{si} \\ \Delta y = y_i - y_{si} \\ \Delta z = z_i - z_{si} \end{cases} \quad (1)$$

を位置誤差 (図 3(a)) として機構パラメータの誤差関数とみなし、最小二乗法を行う方法⁽⁵⁾である。

他方は、測定した太陽球の中心座標から遊星球の中心までの距離 l_i と、あらかじめ校正を行った 2 つの球の中心間距離 l_0 とし、

$$\Delta l = l_i - l_0 \quad (2)$$

を距離誤差 (図 3(b)) として機構パラメータの誤差関数とみなす方法である。

Fig.3 Explanation of two error functions

3. 数値シミュレーション

DEBB を用いた校正の妥当性を検証し、2通りの最小二乗計算を用いた校正方法を比較するために数値シミュレーションを行った。

3・1 シミュレーション方法

真の機構パラメータにそれぞれ $\pm 0.5\text{mm}$ 、 $\pm 0.5^\circ$ の範囲でランダムに誤差を与え初期パラメータとした。さらに、連結連鎖伸縮量の測長器の読み取り誤差や球面ジョイントの運動誤差等を想定した、連結連鎖方向の誤差(スケール誤差)を $\pm 1.0\mu\text{m}$ の範囲でランダムに与える。次に、DEBBの遊星球を上段・中段・下段のそれぞれで 30° 間隔に12ヶ所配置し、校正点とする。また、校正点の座標にプロービング誤差を想定し、 $\pm 2\mu\text{m}$ の範囲でランダムに誤差を与えた。校正点座標を順運動学で計算し、生じた誤差に対し上記の2通りの最小二乗計算を行い、機構パラメータを推定する。また、推定した機構パラメータを用いて10mmのゲージブロックの測定を想定したシミュレーションを行い、機構パラメータの妥当性を評価する。

3・2 シミュレーション結果

図4は校正前と2通りの誤差関数での校正後の機構パラメータの誤差を示している。この結果、距離誤差を用いた校正方法は位置誤差を用いた方法より機構パラメータ誤差が増加した。ただし、この結果は与えたプロービング誤差の大きさにより変化する。また、これらの機構パラメータを用いて、10mmのゲージブロックの測定を想定したシミュレーションを行った結果を図5に示す。この結果、長さ誤差のRMS値が、校正前と比較して位置誤差を用いた方法でx方向95.7%、y方向95.7%、z方向88.8%減少、距離誤差を用いた方法でx方向90.2%、y方向93.9%、z方向92.8%減少した。

Fig.4 Parameter error before/after calibration

Fig.5 Result of 10-mm gauge block measurement simulation

Fig.6 CMM using parallel mechanism

Fig.7 Double-Ended Ball Bar

4. 実機の校正

4・1 校正方法

PCMMの実機(図6)を用いて、DEBB(図7)の遊星球の周囲を5点測定する。この5点より、遊星球の中心座標を計算し、校正に使用する。また、遊星球の配置はシミュレーションと同様にとり、太陽球を含めた全37球を測定し、校正を行った。

4・2 校正結果

図8にDEBBの評価点における校正前後の誤差のRMS値とP-P値を示す。位置誤差は二乗和の平方根をとり、距離誤差に変換して評価した。位置誤差を誤差関数として用いた場合の方が校正後の誤差のRMS値、P-P値が減少している。また、校正後のパラメータの評価を行うために、測定領域の中央で10mmゲージブロックを9ヶ所測定した。xyz方向に測定した結果を図9に示す。この結果、長さ誤差のRMS値が校正前と比較して位置誤差を用いた方法でx方向75.9%, y方向92.2%, z方向97.4%減少, 距離誤差を用いた方法でx方向54.5%, y方向85.5%, z方向98%減少した。

Fig.8 Distance error of the calibration points

Fig.9 Result of 10-mm gauge block measurement

4・3 考察

シミュレーションと比べ実機での校正後のゲージブロックの測定精度が悪い。これは、DEBBの球測定中に発生する測定誤差がパラメータ推定に影響を与えているからであると推察される。次に、それぞれの校正におけるヤコビ行列の条件数⁽⁶⁾を調べた。このヤコビ行列 J は、校正する機構パラメータ誤差 $\Delta\theta$ と、校正に使用する点における位置誤差・距離誤差 Δe の関係を表す。つまり、

$$\Delta e = J \Delta \varphi \quad (3)$$

である。また、条件数とは行列を用いた線形連立方程式の解の精度を表す指標であり、

$$\text{cond}J = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (4)$$

と表記される。ここで $\sigma_{\max}$ および $\sigma_{\min}$ はヤコビ行列を特異値分解することで得られる最大特異値、最小特異値を表している。条件数は小さいほど良く 1 が最も良いという性質を持つ。

表 1 はそれぞれの誤差関数を用いた校正におけるヤコビ行列の条件数を示している。これより、距離誤差を最小化する校正は条件数が位置誤差を最小化する校正よりも大きい。よって、実機の校正に使用するパラメータの推定精度は距離誤差を用いた場合の方が悪く、ブロックゲージの測定精度にも影響したと考えられる。

Table 1 Condition number of Jacobian matrices

Error function to be minimized	Condition number
Position errors	6882
Distance errors	85563

5. 結 言

本研究では、パラレルメカニズム形三次元座標測定機の校正において、校正器としてダブルボールバーを用いた方法を検討した。シミュレーションと実機での検討を行った結果、実機における 10mm のゲージブロックの測定誤差の RMS 値が、校正前より位置誤差を用いた方法で x 方向 75.9%、 y 方向 92.2%、 z 方向 97.4% 減少、距離誤差を用いた方法で x 方向 54.5%、 y 方向 85.5%、 z 方向 98% 減少した。また、2 通りの誤差関数を比較したところ、位置誤差を誤差関数に用いた場合の方が校正後の 10mm ゲージブロックの測定精度は良好であった。

文 献

- (1) 例えば Oiwa, T., “New Coordinate Measuring Machine Featuring a parallel Mechanism”, *International Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.31, No. 3 (1997), pp.232-233.
- (2) Bryan, J.B., “A simple method for testing measuring machines and machine tools part 1: principles and applications”, *Precision Engineering*, Vol.4, No.2, (1982), pp.61-69.
- (3) Zargarbashi, S.H.H., Mayer, J.R.R., “A model based method for centering double ball bar test results preventing fictitious ovalization effects”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.45, (2005), pp.1132-1139.
- (4) Matsushita, Tetsuya, Ueno, Hiroshi, and Matsubara, Atsushi, “Elastic Deformation Error Model for Calibration and Compensation of Parallel Kinematic Mechanism Machine Tool”, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.6, No.2, (2012), pp.188-195.
- (5) 大岩孝彰, 片岡頼洋 “パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機の構成に関する研究”, 精密工学誌, Vol.69, No.2, (2003), pp.222-226.
- (6) 川上一郎, “数値計算の基礎”, <http://www7.ocn.ne.jp/~kawa1/>, (2009), pp.56-57.