パレレルメカニズムを用いた三次元座標測定機の 校正に関する研究*

一冗長パッシブジョイントを用いたキャリブレーションー

大 岩 孝 彰** 首 藤 圭 一***

A Calibration Method for Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism
-Calibration with Redundant Passive Prismatic Joint-

Takaaki OIWA and Keiichi SHUTOH

This study has proposed a new coordinate measuring machine (CMM) based on a three-degree-of-freedom parallel manipulator. This paper describes a kinematic calibration method using a redundant passive prismatic joint with a linear scale unit. The passive joint connects the moving stage to the machine frame. Change in the passive joint's length is measured during traveling of the end effector mounted on the moving stage. The least square method using Jacobian matrix corrects gradually 24 kinematic parameters so that the length errors of the passive joint are minimized. The above calculations have been repeated in numerical simulations. The length error approached a zero level. However, the error was not decreased to less than measurement errors of the scale unit. The calibration has improved the accuracy of the length measurement assuming the use of gauge blocks. Moreover, the influences of measuring point's arrangement and passive joint's configuration on the parameter's accuracy have been investigated in the simulation.

Key words: coordinate measuring machine, parallel mechanism, calibration, kinematic parameter, redundant passive joint

1. 緒 言

パレレルメカニズムは、複数の能動対偶を出力節に対して並列に配置した構造を持つ機構である。本研究では、図 1 に示すような空間 3 自由度パレレルメカニズムを用いた三次元座標測定機 (CMM) を提案してきた¹⁾。図中の 3 本の直動リンク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直動リンク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。

パレレルメカニズムの校正すなわち正しい機構パラメータを推定する方法については、幾つかの手法が提案されており、そのうち出力節の位置・姿勢誤差を求め、目標値との差がなくなるまで機構パラメータを修整する方法²⁾³⁾が多く研究されている。この位置誤差などを求める手法にもいくつかの方法があるが、著者らは複数の基準球を立体的に配した 3D ボールプレートや球間距離を固定したダブルボールバーを校正用アーティファクトとして用いてきた⁴⁾⁵⁾。一般に CMM ではエンドエフェクタとして 3D タッチプローブが搭載されているため、このような形体の測定は容易であり、さらにプローブの寸法や姿勢を含めた校正ができるという利点がある。しかしこのようなボールプレート自体は他の高精度な CMM 等で値づけしておく必要がある。さらに、用いる 3D タッチプローブのプロービング誤差や比較的長時間にわたる測定の間の室温変動がパラメータの推定の精度に大きく影響を及ぼす。

従来より CMM や工作機械の精度検定用に DBB (Double-Ball-Bar) 法⁶⁾⁷⁾が用いられ、パレレルメカニズムの校正においても多用されてきている^{8)~10)}。しかし一般的な DBB の使用方法では、

Fig. 1 Tripod-type CMM using 3-SPR parallel manipulator

タッチプローブなどのエンドエフェクタを取り外して DBB を取り付け、エンドエフェクタをある決められた半径で円運動させる必要がある。本研究では、DBB の代わりに高精度な測長器を内蔵した受動的な直動リンクをパレレルメカニズムに追加し、エンドエフェクタを測定空間内に移動した際に取得した長さ誤差を用いてメカニズム自体の機構パラメータを推定する。本報では、校正シミュレーションにより直動リンクの配置などについて検討した結果について報告する。

2. 原 理

2.1 冗長受動リンク

冗長リンクの取付け状態を図 2 に示す。ステージ上の球面ジョイントとフレーム上の球面ジョイントの間にアクチュエータを内蔵しない直動ジョイントを取り付ける。他の 3 本の能動的な直動リンクの伸縮により、この冗長リンクの直動ジョイントの伸縮は受動的に行われる。直動ジョイントには測長器 (リニ

* 原稿受付 平成16年6月29日

** 正 会 員 静岡大学工学部 (浜松市城北3-5-1)

*** 学生会員 静岡大学大学院 (現, CKD 株; 小牧市応時2-250)

Fig. 2 Kinematic parameters of the CMM consisting of three actuated limbs and one passive limb

アスケールなど)を内蔵し伸縮量を測定する。この測定は随時行うことができ、パラレルメカニズムによりエンドエフェクタを測定空間内に移動させた任意の座標値において伸縮量の取得を行う。既報で報告した3Dボールプレート⁴⁾およびDBB⁵⁾の測定ではそれぞれ2hおよび4hを要したが、本報の場合はエンドエフェクタを空間内に移動させるだけであるため、校正に必要な情報の取得時間を著しく短縮できる。またタッチプローブなどのエンドエフェクタを取付けた状態にできるため、冗長リンクを用いた機構校正終了後は直ちに通常のプローブ校正ができ、さらに被測定物の座標測定も開始できる。

2.2 機構パラメータ

本測定機の運動学計算に使用する機構パラメータは、図2に示すベース上の球面ジョイント B_i ($i=1, 2, 3$)の位置を円筒座標系で表す r_{Bi} および θ_{Bi} 、ステージ上の回転ジョイント S_i の位置・姿勢を表す r_{Si} 、 θ_{Si} 、 α_{Si} および γ_{Si} 、直動リンクの初期長さ l_i およびプローブ長さ l_s の合計22個存在する。さらに、冗長リンクのステージ側球面ジョイント位置 s_x, s_y および s_z 、ベース側の球面ジョイント位置 b_x, b_y および b_z 、冗長リンクの初期長さ l_p が加わる。これらのうち、ジョイントの位置角度 θ_{Bi} および θ_{Si} のうち $i=1$ は固定して推定対象から除外した。さらにプローブの寸法に関するパラメータ、すなわちプローブ長さ l_s の誤差などは冗長リンクの長さ誤差に伝搬せず本方法では推定できないため除外する。また、冗長リンクのベース側のジョイント位置のうち b_x および b_y は冗長リンクの直角方向に相当するため、やはり本手法では推定しにくいことが容易に推察できる。よって、このパラメータの推定は行わなかったが、このパラメータの誤差の影響を推定結果に含めるため後述のように ± 5 mmの誤差を与えた。以上のように、本報では24個のパラメータを推定する。図中の数字は試作したCMMの各部の寸法の設計値を示している。

2.3 最小二乗法によるパラメータ推定

本報では、冗長リンクの長さ誤差すなわち順運動学計算による冗長リンクの長ささと内蔵された測長ユニットから得られた長さの差を機構パラメータの誤差関数とみなし、最小自乗法を用いてその誤差が最小となるように機構パラメータを推定する。この方法は、一般の多関節型のロボットマニピュレータのリンクパラメータの同定に用いられるもの¹¹⁾と同一である。

微小運動学によれば、機構パラメータ $\phi = [r_{Bi}^T, \theta_{Bi}^T, \dots]^T$ に微小な誤差 $\Delta\phi = [\Delta r_{Bi}^T, \Delta\theta_{Bi}^T, \dots]^T$ が存在したときの冗長リンクの長さ誤差 Δl_p は

$$\Delta l_p = J_\phi \Delta\phi \quad (1)$$

である。ここで J_ϕ はパラメータ ϕ に関するヤコビ行列である。プローブを測定空間内で n 箇所に移動した際、 j 番目の位置での長さ誤差を Δl_{pj} 、ヤコビ行列を $J_{\phi j}$ とすると、

$$y = \begin{bmatrix} \Delta l_{p1} \\ \Delta l_{p2} \\ \vdots \\ \Delta l_{pn} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} J_{\phi 1} \\ J_{\phi 2} \\ \vdots \\ J_{\phi n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

である ($j=1, \dots, n$)。 $\Delta\phi$ の最小二乗法による推定値は

$$\Delta\phi = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (3)$$

であり、更新されるパラメータ ϕ_{new} は次式で与えられる。

$$\phi_{new} = \phi_{old} + \Delta\phi \quad (4)$$

計算は $\Delta\phi$ が0に近づき、 ϕ_{new} が一定値に集束するまで繰り返す。各繰返しにおいてはヤコビ行列は最新の値で再計算する。

3. シミュレーション

前章で述べた冗長リンクと最小二乗法を用いた機構パラメータ推定法の有効性の確認と、冗長リンクの配置を検討する。

3.1 シミュレーション方法

シミュレーション方法を以下に示す。

- (1) 真の機構パラメータを用い測定空間内の n 個の座標値 $x_j = (x_j, y_j, z_j)$ にプローブ先端を移動する。
- (2) この測定点 x_j より逆運動学を用いて、リンク長さ l_{ij} および冗長リンク長さ l_{pj} を求める。
- (3) 真の機構パラメータに任意の誤差を与える。長さのパラメータについてはランダムに最大 ± 0.5 mm、 θ_{Bi} などの角度のパラメータは $\pm 0.5^\circ$ の誤差を与え、順運動学を用いて n 個の冗長リンク長さ l_{pj} を計算する(実機においては、測長ユニットからの測定値となる)。
- (4) 長さ誤差 $\Delta l_{pj} = l'_{pj} - l_{pj}$ を求める。
- (5) 最小二乗法を用いたパラメータ推定法により、繰返し計算を行い、修正量を求める。
- (6) 冗長リンクの長さ誤差とパラメータの修正が収束したときの各パラメータを機構パラメータとする。

3.2 シミュレーション結果

まず、冗長リンクに内蔵された測長ユニットに測定誤差がなく、さらにベース側球面ジョイント位置 b_x および b_y に誤差がないものとシミュレーションを行った。冗長リンク両端の球面ジョイントの配置はリンクが z 軸と同軸になるようにした。ベース面側の球面ジョイントの高さ b_z はベース面上50 mm、ステージ面側の s_z はステージ面から150 mmとした。冗長リンクの長さ誤差は、プローブ先端を測定空間内で45箇所(後述図9(e))に移動して取得した。繰返し計算中のパラメータ修正量と冗長リンクの長さ誤差の変化の例をそれぞれ図3および図4に示す。既報⁴⁾におけるボールプレートを用いたキャリブレーションのシミュレーションでは、2, 3回の繰返し計算で各値が収束し、ほぼ正しい機構パラメータが推定できたが、本報の場合も同様に冗長リンクの長さ誤差は0に収束し、正しい機構パラメータが推定できた。

Fig. 3 Correcting values of kinematic parameters during iteration in calibration simulation using passive limb

Fig. 4 Length error of passive limb during iteration in calibration simulation

3.3 推定しないパラメータと測長ユニットに誤差がある場合

実際に冗長リンクを用いた校正を行う場合、内蔵した測長ユニットには測定誤差が、さらに推定していないパラメータにも誤差が存在する。そこで本節では、それらの誤差を考慮してパラメータ推定シミュレーションを行った。測長ユニットには誤差を $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の範囲でランダムに与えた。さらに推定しないベース側ジョイント位置 b_x および b_y にも5 mmの誤差を与えた。繰り返し計算中のパラメータ修正量を図5に、冗長リンク長さの変化を図6に示す。パラメータ修正量および長さ誤差ともにほぼ0に収束しているが、測長ユニットの誤差が $\pm 0.1 \mu\text{m}$ と微小である場合でも推定したパラメータは正しい値とはならなかった。これは特に測長ユニットに与えた誤差が大きく影響していることがわかった(3.8節で詳述)。過去の研究においても、測定誤差を与えた際には正しい機構パラメータが推定できなかったが推定したパラメータを用いることによりCMM自体の測定精度は向上した。よって本報でも推定したパラメータが実用的に使用可能であるかを検証するため、次節のような長さ測定シミュレーションを行う。

3.4 長さ測定シミュレーション

推定したパラメータの妥当性を検証するために、本節ではブロックゲージの測定を想定した2点間の長さ測定のシミュレーションを行う。仮想ブロックゲージは、定盤上($z = -510$ および -530)の $x = -50, 0, 50$ および $y = -50, 0, 50$ の18箇所に長さ10 mmのブロックゲージをXYZ軸方向および対角線方向の4方向、合計7方向(JIS B7440)に設置するものとした(図7参照)。18箇所の測定値から得られた測定誤差の各測定方向の最大偏差を図8に示す。この結果から、推定前と推定後では誤差が平均で1/3程度となり、寸法測定精度の向上が確認できた。

Fig. 5 Correcting values of kinematic parameters in calibration simulation considering measurement error of scale unit built in passive limb

Fig. 6 Length error of passive limb in calibration simulation considering measurement error of scale unit built in passive limb

Fig. 7 18 Measurement points and 7 directions in length measurement simulation

3.5 測定点配置による影響

本節では、タッチプローブ移動する点の配置を変化させ、パラメータ推定結果に及ぼす影響について調査する。測定点の配置は以下の5つのパターンについて調査した(図9)。

- (a) 7点×7点×1平面=49点 (150mm×150mm内)
  - (b) 5点×5点×2平面=50点 (150mm×150mm×100mm内)
  - (c) 4点×4点×3平面=48点 (150mm×150mm×100mm内)
  - (d) 4点×3点×4平面=48点 (150mm×150mm×100mm内)
  - (e) 3点×3点×5平面=45点 (150mm×150mm×100mm内)
- (a)から(e)では、測定点を配置している面の数を1段から5段まで増加させた。また、全体の測定点の総数は45から50とし、(a)を除いて測定空間の大きさを統一した。

前節までと同様に、24パラメータを推定し、長さ測定シミュレーションを行った結果を図10に示す。測定面が1面であるパターン(a)の場合は、最小二乗法による繰り返し計算中にパラメータ修正量が増大し解が収束しなかった。このような平面的な場合は冗長リンクの伸縮の範囲が狭く、推定に必要な長さ誤差

Fig. 8 Results of length measurement simulation

Fig. 9 Arrangements of probe tip in calibration simulation

Fig. 10 Influence of measuring point arrangement on length measurement error

の情報が十分でなかったと思われる。図よりパターン(b)および(c)の場合に誤差が小さくなるのがわかる。その他、既報のボールプレートの場合と同様に、各平面および空間はできるだけ大きく取ったほうがよいという結果が得られた。本方式ではエンドエフェクタを作業領域全域に移動させることが可能であり、この点で測定領域に制約のあるDBB法より有利である。以下、測定点の配置はパターン(c)を用いることとする。

3.6 冗長リンクの球面ジョイント位置の検討

本節では、冗長リンクの配置の影響について検討する。まず、冗長リンク上端部の球面ジョイントのベース平面からの高さ b_z を0から400 mmまで変化させ、パラメータの推定を行った。このときステージ側の球面ジョイント位置は(0, 0, 50)とした。さらに長さ測定シミュレーションを行い、18箇所測定した7方向の長さ測定値の最大偏差の平均値を図11に示す。 $b_z = 40$ の位置ではパラメータ修正量が収束しなかった。 b_z の値は100 mm未満では推定結果が不安定であり、100 ~ 400 mmの範囲では徐々に誤差が増加する。結果、 b_z の値は100 mm以上離

Fig. 11 Influence of spherical joint position of passive limb on length measurement error

Fig. 12 Influence of spherical joint position of passive limb on length measurement error

せばよいが、あまり大きくするとフレームの熱膨張の影響を受けやすくなる。

次に、ステージ側の球面ジョイント位置 s_z を0から100 mmまで10 mm間隔で変化させ、パラメータの推定を行った。長さ測定シミュレーションの結果を図12に示す。 b_z の場合と同様に、高さ0 mmおよび10 mmの場合はパラメータ推定ができなかった。この図から、 s_z の値は20 ~ 50 mmの範囲で設計すればよいことがわかる。

3.7 冗長リンクの配置の検討

前節までは、冗長リンクは z 軸と同軸上に配置して検討を行ってきたが、本節では、図13に示すような5つの配置を検討した。(a)と(e)はそれぞれ z 軸と x 軸に平行、それら以外は斜めに設置されている。前節までと同様に45点の測定点のリンク長さ誤差からパラメータ推定を行い、長さ測定シミュレーションを行った。各方向での長さ測定値の最大偏差を図14に示す。図から冗長リンクを z 軸と同軸上に配したパターン(a)の場合が誤差が最小となり、次に(e)の場合が小さくなる。以上から冗長リンクの伸縮方向が他の能動リンクと平行にならないほうがよいことが推察できる。

3.8 冗長リンクの長さ測定誤差の大きさの影響

最後に、前節までで得られた冗長リンクの配置において、測長器の誤差の影響について調査した。冗長リンクの伸縮を測定する測長器に $0, \pm 0.1 \mu\text{m}, \pm 0.2 \mu\text{m}, \pm 0.3 \mu\text{m}, \pm 0.5 \mu\text{m}$ の範囲でランダムに誤差を与え、前節までと同様の方法でパラメータ推定を行った。パラメータ推定後、すなわちパラメータ修正量の変化が0となった後の全測定点における冗長リンクの長さ誤差の最大値は、測長器に与える誤差が0の場合は0となるが、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の場合は約 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ では約 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ では約 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の場合は約 $1.2 \mu\text{m}$ と、測長器の誤差以下には収

Fig. 13 Arrangements of passive limb in calibration simulation

Fig. 14 Influence of passive limb arrangement on length measurement error

Fig. 15 Influence of scale unit error on length measurement error

束しない。さらに長さ測定シミュレーションを行い、各方向の測定値の最大偏差を求めた結果を図 15 に示す。図 8 においてパラメータ推定前には平均 17 μm 程度あった偏差が測長器に与える誤差 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の場合でも 10.5 μm 程度に減少した。また、図から偏差は測長器の誤差に比例して増加していることがわかる。以上のことから推定後の CMM の精度を向上させるためには、冗長リンクの伸縮を高精度な測長器で測定することが重要であることになるが、同時に両端の球面ジョイントの回転誤差のリンク方向成分も小さくする必要があることがわかる。

4. 結 言

本研究の成果は以下のように要約できる。

- (1) 測長器を内蔵した 1 本の受動的な冗長リンクを用いて、パラレルメカニズムの機構パラメータを推定するシミュレーションを行った。
- (2) 冗長リンクの機構パラメータを含む 24 個のパラメータを推定した結果、冗長リンクの長さ誤差は測長器の測定誤差程度に収束することがわかった。
- (3) 長さ測定シミュレーションを行い推定したパラメータで測定を行った場合に測定誤差が減少することを確認した。
- (4) 冗長リンクは z 軸と同軸上に配置したときがもっとも測定誤差が小さくなった。

今後は、より測定精度を向上させるために、冗長リンクの方向を変化させて取得した長さ誤差情報を総合的に用いてパラメータを推定する予定である。

本研究の一部は科研費補助金平成 14 年度基盤研究 (C)、平成

14 年度基盤研究 (B) により行われた。

参 考 文 献

- 1) 例えば T. Oiwa : New Coordinate Measuring Machine Featuring a Parallel Mechanism, Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng., **31**, 3 (1997) 232.
- 2) 小関義彦, 新井健生, 杉本浩一, 高辻利之, 後藤充夫 : レーザ追尾式座標測定システムを用いたパラレルメカニズムの精度評価, 計測自動制御学会論文集, **34**, 7 (1998) 726.
- 3) 太田浩充, 洪川哲朗, 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.
- 4) 大岩孝彰, 京極正人, 山口浩希 : パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機 (第 5 報) — 立体的なボールプレートを用いたキャリブレーション —, 精密工学会誌, **68**, 1 (2002) 65.
- 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校正に関する研究 — ダブルボールバーとタッチプローブを用いたキャリブレーション —, 精密工学会誌, **69**, 2 (2003) 222.
- 6) J. B. Bryan : A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Precision Engineering, **4**, 2 (1982) 61.
- 7) 垣野義昭, 岩本祐一, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢 徹 : 誤差ベクトルによる三次元座標測定機の補正と DBB 検定法の評価, 精密工学会誌, **51**, 6 (1985) 148.
- 8) 太田浩充, 洪川哲朗, 遠山退三, 内山 勝 : 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 —, 精密工学会誌, **66**, 10 (2000) 1568.
- 9) Amit J. Patel and Kornel F. Ehmann : Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **40** (2000) 489.
- 10) 武田行生, 沈 崗, 舟橋宏明 : フーリエ級数を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション (第 1 報, キャリブレーション法および測定運動の選定法の提案), 機論 C 編, **68**, 673 (2002) 2762.
- 11) 川崎晴久 : ロボット工学の基礎, 森北出版, (1991) 98.