

# パラレルメカニズムを用いた三次元測定機の校正\*

– 複数のリンクセットを用いた校正 –

佐藤 理\*\*

Gheorghe Olea\*\*\*

平木 雅彦†

高増 潔\*\*\*

Calibration of Parallel Coordinate Measuring Machine

– Kinematic Calibration with Multi-Links –

Osamu SATO, Gheorghe OLEA, Masahiko HIRAKI and Kiyoshi TAKAMASU

This article describes a geometric calibration method for a coordinate measuring machine based on a three degree of freedom parallel mechanism. In generally, identifying whole, necessary and sufficient, kinematic parameters included in kinematic models of parallel mechanisms is hard because of the strong correlation between each parameter. In this study, we propose to use some different links on the calibration to improve the mathematical condition of the Jacobian matrix on the least squares method. To use the different links, all kinematic parameters are estimated and the positioning accuracy of the parallel coordinate measuring machine is improved from 100  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$  in the experiments. Firstly, the pilot unit of the parallel coordinate measuring machine is introduced. Secondly, necessary and sufficient kinematic parameters of the parallel coordinate machine for calibration are formulated. Finally, kinematic parameters are estimated through the calibration experiment.

**Key Words** : Parallel Mechanism, Geometric Calibration, Kinematic Calibration, Coordinate Measuring Machine, Least Squares Method

## 1. 緒 言

従来の三次元測定機に対する大型化、高速化、高精度化をねらいとしてパラレルメカニズムを用いた3自由度三次元測定機(パラレルCMM)の研究が行われており<sup>1)~3)</sup>, 筆者らは3自由度直動型パラレルメカニズムを用いたパラレルCMMを試作した. パラレルCMMの高精度化においては機構の校正をどのように効果的に行うかが最大の課題である.

本研究におけるパラレルCMMの校正では, エンドエフェクタの手先座標とアクチュエータに取り付けたスケールの値とから最小二乗法によって順運動学による運動学パラメータの同定を行う<sup>4)</sup>. パラレルメカニズムの校正に関する先行研究ではパラレルメカニズムの機構モデルに含まれる全ての運動学パラメータを校正対象に含めた場合, パラメータの発散を生じることが報告されている<sup>5) 6)</sup>. これは同定対象である各運動学パラメータが互いに強い相関を持つからである. この相関のために最小二乗計算に用いるヤコビ行列の各列の一次独立性が弱くなり, 計算条件が悪化する. したがってパラレルメカニズムの全ての運動学パラメータを同定するためには, 何らかの方法によってこの相関を解消する必要がある. そこで本報では校正段階においてパラレルCMMを構成する固定長リンクに, 校正が有効に行えるように設計した複数の組合せのものを用意した. 本論文ではそれぞれのリンクの組合せをリンクセットと呼ぶ. 複数のリンクセットを用いることによって最小二乗法計算におけるヤコビ行列の数学的性質を改善し, 全ての運動学パラメータを同定した. またその結果パラレルCMMの絶対位置決め精度を向上させた.

## 2. パラレルCMM

最初に本研究で校正を行うパラレルCMMの構成図およびその順運動学モデルを図1に示す. また, 球面磁気対偶を採用したパラレルCMM試作機の概観を図2に示す.

本研究で製作したパラレルCMMは,

- (1) 120°対称に設計されたエンドエフェクタ
- (2) 120°対称に配置されたアクチュエータおよびスケール
- (3) 等しい長さに設計されたリンク
- (4) 磁石と三角穴ハウジング, 鉄球を用いた球面ジョイント

から構成される. 機構を120°対称に設計したことにより, 運動学パラメータに含まれる誤差がエンドエフェクタ手先座標に及ぼす影響を減少させている. これはパラレルメカニズムが基本的に同じ構成を持つ機械要素によって並列にエンドエフェクタを駆動するという構造をもつため, 120°対称に各要素を配置した場合にそれぞれの要素由来の誤差が打ち消しあうことを期待できるからである. 試作機のジョイントに採用した球面磁気対偶は高い真球度をもつ球をハウジング上の3点で支持する構造になっており, ジョイント球の中心位置が一意に定まる. このためパラレルCMM試作機は以下のような特長を持つ<sup>1)</sup>.

- (1) ジョイント由来のガタが存在しない.
- (2) リンクの組立, 再設置が容易.
- (3) 2  $\mu\text{m}$  の繰返し位置決め精度を実現.
- (4) 3  $\mu\text{m}$  の繰返し組立精度を実現.

この特長を利用することにより, 異なる複数のリンクセットを用いてパラレルCMMの校正を効果的に行うことが可能となった. パラレルCMMの緒元を表1に示す.

\*原稿受付 平成15年5月29日

\*\*学生会員 東京大学大学院工学系研究科(文京区本郷7-3-1)

\*\*\*正会員 東京大学大学院工学系研究科

†正会員 高エネルギー加速器研究機構(つくば市大穂1-1)

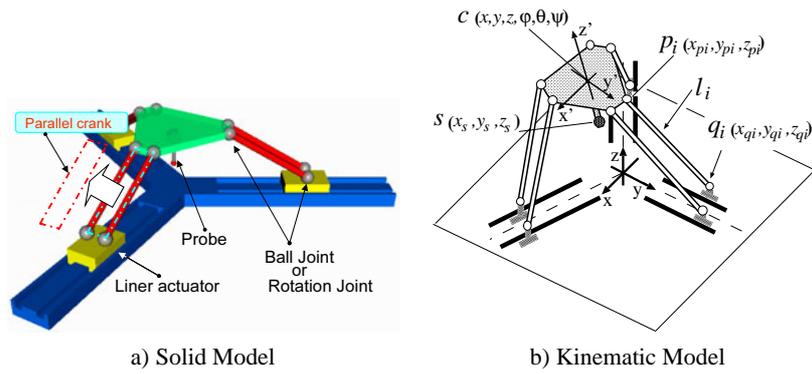


Fig. 1 Models of Parallel CMM

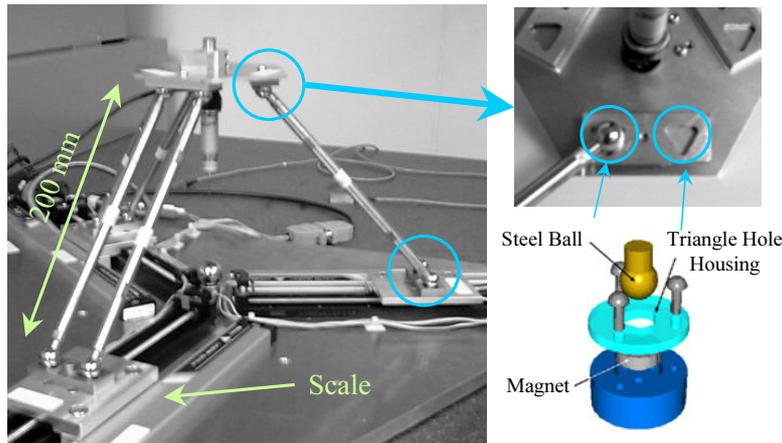


Fig. 2 Prototype of Parallel CMM

Table 1 Specification of Parallel CMM

|                              |                |
|------------------------------|----------------|
| Size                         | 400×400×250 mm |
| Measuring Range              | 170×170×110 mm |
| Resolution                   | 1 μm           |
| Repeatability of Positioning | 2 μm           |
| Set/Reset Accuracy           | 3 μm           |

### 3. 校正の分類とパラメータ

表 1 に示したようにパラレル CMM 試作機は高い繰返し位置決め精度を実現している．これはパラレル CMM の測定再現性が高いということを意味している．しかし試作機を三次元測定機として使用するためには繰返し位置決め精度が高いだけでなく，高い絶対位置決め精度を持つ必要がある．そこでパラレル CMM の絶対位置決め精度を向上させるためにパラレル CMM に対して校正を施す必要がある．

測定機の校正は，

- (1) 運動学を記述するのに必要な運動学パラメータの真値を推定する「運動学校正」
- (2) 直線案内の真直度や回転誤差など幾何偏差量を推定する「幾何偏差校正」
- (3) ジョイントのガタなどの補正式を導く「非幾何校正」

の各段階に分けられる<sup>7)</sup>．本報では図 1 に示した運動学モデルに含まれる運動学パラメータの真値を推定する「運動学校正」に限定して議論を進めていく．本研究ではパラレル

CMM の各要素を表現するのに必要十分な運動学パラメータを考察した．図 3 にパラレル CMM の各要素を示す．

以下，パラレル CMM の校正において同定する必要があるパラメータについて述べる．

#### 3.1 エンドエフェクタ

エンドエフェクタは 6 個のエンドエフェクタ側ジョイント球の中心を各頂点とする剛体として表現される．パラレル CMM の順運動学解を求めるためにはこれら 6 個の頂点の相対座標が分かればよい．各ジョイント中心はエンドエフェクタ上の座標系において点として表現されるので，これらを表現するためにはジョイント中心 1 つあたり 3 個  $(x_{ei}, y_{ei}, z_{ei})$ ，全体として 18 個の運動学パラメータが必要である．これらのうち 6 個のパラメータはエンドエフェクタ自体の位置，姿勢を表現するために用いられ冗長となる．よってこれらを除いて，エンドエフェクタ本体の表現に必要なパラメータ数は 12 となる．

これらに加えてパラレル CMM を用いて座標測定を行う際に必要となるプローブの先端位置を表現するパラメータと，校正を行うためにエンドエフェクタに取り付ける参照球の中心座標を表現するパラメータがそれぞれ 1 つあたり 3 個  $(x_c, y_c, z_c)$  必要となる．本報の場合はプローブを取り付けておらず参照球を 1 つ取り付けたので，エンドエフェクタに関するパラメータ数は合計 15 となる．

#### 3.2 リンク

リンクは両端に取り付けた球の中心間距離  $l_i$  の長さを持つ線分として表現できる．よってリンクに関するパラメータはリンク 1 本あたり 1 個  $(l_i)$  となる．リンク長は測定に用

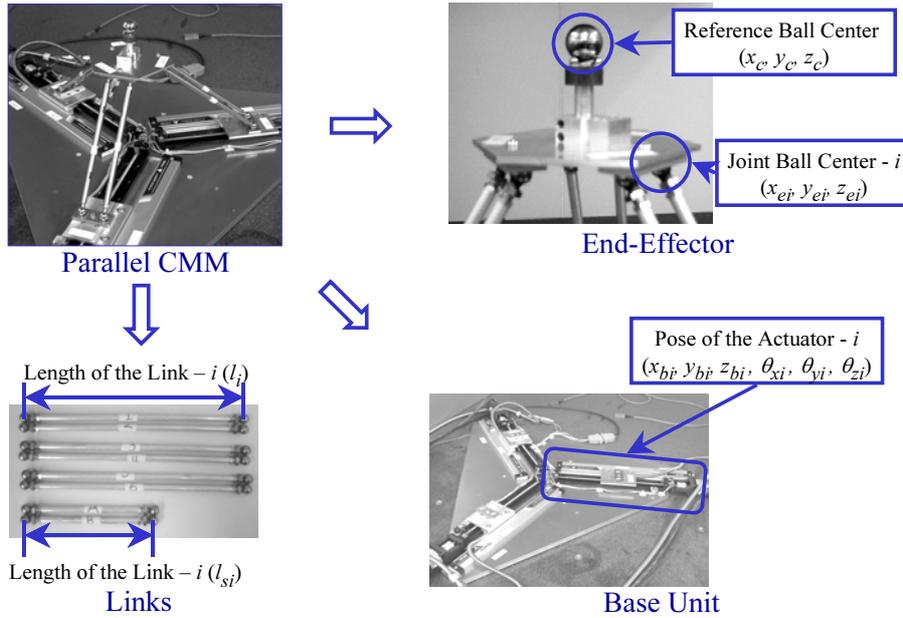


Fig. 3 Classification of Each Component of Parallel CMM

いるリンクおよび校正に用いるリンクのそれぞれを同定する必要がある。本報の場合は同じ長さに設計された6本のリンクからなる測定用リンクセットとこれらのうち2本を短いリンク ( $l_{si}$ ) と交換した校正用リンクセットを用いて校正を行うため、リンクに関するパラメータ数は8となる。

### 3.3 ベースユニット

本研究では三次元測定機の校正に関する過去の研究<sup>8)</sup>を踏まえて、各アクチュエータの位置、姿勢に関するパラメータのみを校正対象とした。一般的な直交型三次元測定機の運動学校正では、幾何偏差量の校正された3つの各軸測定用のアクチュエータ間の直角度の同定を行っている。これを拡張し、各アクチュエータの位置、姿勢を表現するために、アクチュエータ1つあたり6個 ( $x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$ )、全体として18個の運動学パラメータを導入した。これらのうち6個のパラメータはベースユニット自体の位置、姿勢を表現するために用いられ冗長となるので除くと、ベースユニットの表現に必要なパラメータ数は12となる。

### 3.4 座標系変換

本報ではエンドエフェクタ上の参照球の中心座標に関して各アクチュエータに取り付けたスケールの読み取り値からの計算値と外部三次元測定機による測定値とから観測方程式を立て、最小二乗法によって各パラメータを同定する。このとき計算される参照球中心の位置は平行CMMの座標系(内部座標系)における位置であり、外部三次元測定機の座標系(外部座標系)における位置ではない。よって平行CMMの校正においては内部座標系から外部座標系への変換を表す6個 ( $M_x, M_y, M_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ ) のパラメータも同定する必要がある。

以上の考察の結果を表2に整理する。

## 4. 複数のリンクセットによる校正実験

校正実験は平行CMMのワークスペース中の数ヶ所に位置決めした際のエンドエフェクタ手先座標を外部三次元測定機で測定し、その測定値とスケールの値とから最小二乗法により各パラメータを同定するという手法によって行った。

Table 2 Kinematic Parameters of Parallel CMM

| Components                 | Number of Parameters |
|----------------------------|----------------------|
| End-Effector               | 15                   |
| Links                      | 8                    |
| Base Unit                  | 12                   |
| Coordinates Transformation | 6                    |
| Total                      | 41                   |

校正に用いるリンクセットは、対称なリンクセットの場合は同じ長さに設計された6本の長リンクから構成し、非対称なリンクセットの場合は同じ長さに設計された2本の短リンクと、同じ長さに設計された4本の長リンクとから構成した。対称なリンクセットを用いる段階では一度組み立てたリンクセットの組換えを行わないとし、非対称なリンクセットを用いる段階では、まず最初に短リンクがベースユニット上のアクチュエータI上のジョイント台座に取り付けられ、長リンクがアクチュエータII, III上のジョイント台座に取り付けられた状態で測定点の採取を行った後、短リンクをアクチュエータII, アクチュエータIII上に載せ換え、同様の測定点の採取を行うこととした。測定データは位置決め点一点あたり一回採取した。校正の諸条件を表3に示す。またそれぞれのリンクセットを組立てた様子を図4に示す。

Table 3 Condition of Parameter Identification

| Link Set                   | Symmetric | Nonsymmetric   |
|----------------------------|-----------|----------------|
| Number of Measuring Points | 27×1      | 9×3            |
| Error of Outer CMM         |           | 3 μm           |
| Error of Scales            |           | 3 μm           |
| Length of Links            | 235 mm    | 135 mm, 235 mm |

### 4.1 最小二乗法によるパラメータ同定

$i$  番目の測定点を  $x_i = (x_i, y_i, z_i)$ 、そのときのアクチュエータの位置を  $q_i = (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i})$  とする。校正モデルに含まれる運動学パラメータを  $p = (p_1, p_2, \dots, p_j)$  とすると観測方程式



Table 4 Results of Experiment

| End-Effector [mm]                    |                 |               |               |               |                |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| $x_{e1}$                             | 0(Nominal)      | $y_{e1}$      | 0(Nominal)    | $z_{e1}$      | 0(Nominal)     |
| $x_{e2}$                             | 0(Nominal)      | $y_{e2}$      | 29.986±0.003  | $z_{e2}$      | -0.218±0.265   |
| $x_{e3}$                             | -41.046±0.558   | $y_{e3}$      | 57.020±0.323  | $z_{e3}$      | 0(Nominal)     |
| $x_{e4}$                             | -67.006±0.561   | $y_{e4}$      | 42.070±0.321  | $z_{e4}$      | 0.553±0.244    |
| $x_{e5}$                             | -67.083±0.441   | $y_{e5}$      | -12.470±0.438 | $z_{e5}$      | 0(Nominal)     |
| $x_{e6}$                             | -41.101±0.444   | $y_{e6}$      | -27.323±0.440 | $z_{e6}$      | 0.606±0.269    |
| $x_c$                                | -34.129±1.025   | $y_c$         | 15.966±0.609  | $z_c$         | 68.147±1.093   |
| Links [mm]                           |                 |               |               |               |                |
| $l_1$                                | 235.750±0.010   | $l_2$         | 235.376±0.011 | $l_3$         | 236.326±0.010  |
| $l_4$                                | 236.343±0.010   | $l_5$         | 236.188±0.010 | $l_6$         | 236.243±0.013  |
| $l_{s1}$                             | 135.506±0.014   | $l_{s2}$      | 135.312±0.013 |               | —              |
| Base Unit [mm, deg]                  |                 |               |               |               |                |
| $x_{b1}$                             | 96.000(Nominal) | $y_{b1}$      | 0(Nominal)    | $z_{b1}$      | 0(Nominal)     |
| $\theta_{x1}$                        | 0(Nominal)      | $\theta_{y1}$ | 0(Nominal)    | $\theta_{z1}$ | 0(Nominal)     |
| $x_{b2}$                             | -44.622±0.564   | $y_{b2}$      | 84.744±0.309  | $z_{b2}$      | -1.556±0.732   |
| $\theta_{x2}$                        | -1.006±0.440    | $\theta_{y2}$ | -0.088±0.241  | $\theta_{z2}$ | 119.995±0.004  |
| $x_{b3}$                             | -44.116±0.456   | $y_{b3}$      | -84.671±0.452 | $z_{b3}$      | -2.199±0.674   |
| $\theta_{x3}$                        | 2.801±0.372     | $\theta_{y3}$ | 0.109±0.241   | $\theta_{z3}$ | -119.977±0.004 |
| Coordinates Transformation [mm, deg] |                 |               |               |               |                |
| $M_x$                                | -97.484±0.474   | $M_y$         | -0.353±0.227  | $M_z$         | -4.482±0.852   |
| $\theta_x$                           | -0.081±0.279    | $\theta_y$    | -0.004±0.001  | $\theta_z$    | -0.010±0.003   |

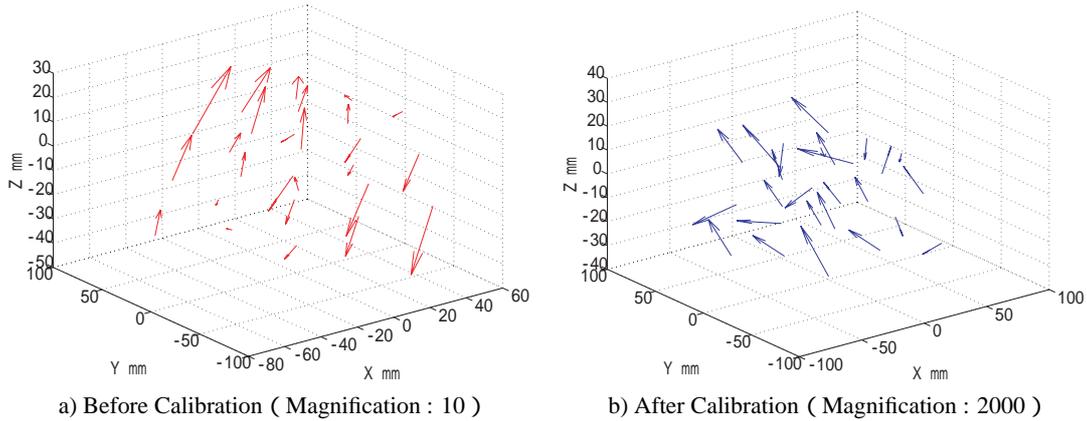


Fig. 6 Positioning Accuracy

謝 辞

本論文の執筆にあたって東京電機大学工学部，古谷涼秋教授の助言を得たことを記し，ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高増潔, 平木雅彦. パラレルCMM (パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機). 精密工学会誌, **63**, 12 (1997) 1676.
- 2) 大岩孝彰. パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機—基本原理と運動学—. 精密工学会誌, **64**, 12, (1998) 1791.
- 3) 大岩孝彰, 久利直道, 馬場周平. パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機 (続報)—リンク配置の検討と誤差解析—. 精密工学会誌, **65**, 2 (1999) 288.
- 4) 太田浩充, 渋川哲郎, 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.
- 5) 中川昌夫, 松下哲也, 梨木政行, 垣野義昭, 井原之敏. 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1報)—

重力の影響の少ない条件下での精度キャリブレーション—. 精密工学会誌, **67**, 8 (2001) 1333.

- 6) 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.
- 7) 高増潔, 古谷涼秋, 下嶋賢, 佐藤理. 座標測定機のアーティファクト校正 (第1報)—運動学パラメータの校正—. 精密工学会誌, **69**, 6 (2003) 851.
- 8) M. Abbe, K. Takamasu, S. Ozono. Reliability of Parametric Error on Calibration of CMM, IMEKO-XVI World Congress, (2000) 180.
- 9) G. Calafiore, M. Indri, B. Bona. Robot Dynamic Calibration: Optimal Excitation Trajectories and Experimental Parameter Estimation. Journal of Robotic Systems, **18**, 2 (2001) 55.
- 10) 増田峰知, 藤原基芳, 新井健生. アクチュエータ配置の違いによる直動型パラレルメカニズムの運動特性変化. 機論 C, **67**, 659 (2001) 2252.
- 11) 石井優. 最近のロボットキャリブレーション技術. 日本ロボット学会誌, **15**, 2 (1997) 164.
- 12) 中川徹 小柳義夫. 最小二乗法によるデータ解析, 東京大学出版会 (1982).