パラレルメカニズムのアーティファクト校正（第 1 報）*

– 緩い束縛条件を用いた運動学パラメータの校正 –

佐藤　理** 　下嶋　賢*** 　古谷涼秋† 　高増　潔††

Artifact Calibration of Parallel Mechanism (1st Report)
– Kinematic Calibration with a Priori Knowledge –

Osamu SATO, Ken SHIMOJIMA, Ryoshu FURUTANI and Kiyoshi TAKAMASU

Calibration of a parallel mechanism using a specified artifact is effective method. However, there are strong correlations between each parameter in an artifact calibration of a parallel mechanism. Therefore, it is difficult to identify all kinematic parameters included in a kinematic model of the parallel mechanism from measuring data. In this research, we propose to use a priori knowledge of the kinematic parameters and to improve mathematical condition of Jacobian matrix. Using the priori knowledge, all kinematic parameters of the parallel mechanism are identified in the artifact calibration with the least squares method. Firstly, the least squares method with the priori knowledge is formulated. Secondly, design values and tolerances of the kinematic parameters are used as the priori knowledge in the least squares method. Finally, the artifact calibration for the parallel mechanism with the priori knowledge is demonstrated. Using this method, all kinematic parameters are converged to adequate values. The simulation for this method directly implies that the kinematic calibration with a priori knowledge for artifact calibration of parallel mechanism in this research is useful to calibrate all kinematic parameters without divergence in the least squares method.

Key Words : Parallel Mechanism, Geometric Calibration, Kinematic Calibration, Artifact Calibration, Double Ball Bar, Priori Knowledge, Least Squares Method

1. 緒　言

多くの先行研究において，パラレルメカニズムの運動学モデルに含まれる全ての運動学パラメータを同定対象に含めた場合，計算の発散などを生じることが報告されている [1) 2)]．これはパラレルメカニズムの校正モデルに含まれるパラメータ同士の相関が非常に強いため，良い計算条件が得られないことが原因である．そのため実際の校正においては，いくつかの運動学パラメータを同定対象から除いて最小二乗計算を行うという手法がとられている [3)]．

筆者らは校正のトレーサビリティと校正時の測定誤差を考慮した，機構のアーティファクト校正について定式化を行った [4)]．ここでアーティファクト校正とは，ブロックゲージやダブルボールバーなどの校正アーティファクトを用いた運動学校正のことである．本研究ではこれをパラレルメカニズムの校正に適用し，Hexapod 型パラレルメカニズム [1)] などをダブルボールバーを用いて校正する場合に，全ての運動学パラメータを同定対象とした最小二乗計算に緩い束縛条件を与えることによってヤコビ行列の数学的性質を改善した．最小二乗計算に緩い束縛条件を与えると各パラメータ間の相関を解消することができる．また緩い束縛条件によってパラメータ同定値の変動を抑制することができる．その結果，最小二乗計算を発散させることなく全てのパラメータを同定できた．また校正時の測定誤差を考慮することにより，最小二乗計算の緩い束縛条件として各運動学パラメータの設計値を利用できることを確認した．

2. 最小二乗法による運動学校正

本報で行うパラメータ同定は順運動学を利用した運動学パラメータの同定 [5)] を改良したものである．最初に順運動学を利用したパラメータ同定について簡単に説明し，続いて本研究においてどのような改良を施したかを述べる．

2.1 順運動学によるパラメータ同定

運動学パラメータとは,「その機構の要素が幾何学的に誤差のない形状とみなせ，案内が完全である場合に，その機構の運動学を記述するのに必要な寸法パラメータ（長さ，位置，角度）」と定義できる [4)]．運動学校正とは，この運動学パラメータをなんらかの手法によって同定することである．

運動学パラメータベクトル $\boldsymbol{p} = {}^t\begin{pmatrix} p_1 & \cdots & p_n \end{pmatrix}$ と手元座標 $\boldsymbol{q} = {}^t\begin{pmatrix} q_1 & \cdots & q_m \end{pmatrix}$ があるとする．このときパラレルメカニズムの順運動学解を $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}, \boldsymbol{p})$ とする．ここで校正手法を決定し，校正に用いる測定点配置，すなわち $\boldsymbol{q_k}$ を選択することにより，以下の観測方程式ベクトル $\boldsymbol{c}$，ヤコビ行列 J，誤差行列 W が一意に決定される．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{c} &= {}^t\begin{bmatrix} c_1 & \cdots & c_r \end{bmatrix} \\
&= {}^t\begin{bmatrix} c(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q_1}, \boldsymbol{p})) & \cdots & c(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q_r}, \boldsymbol{p})) \end{bmatrix} \\
J &= \begin{bmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial c_1}{\partial p_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial c_r}{\partial p_1} & \cdots & \frac{\partial c_r}{\partial p_n} \end{bmatrix} \qquad (1) \\
W_{ij} &= \begin{cases} \sigma_c^2 + \sigma_q^2 \displaystyle\sum_{k=1}^{m} \left(\frac{\partial c_i}{\partial q_k}\right)^2 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}
\end{aligned}
$$

*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)
***学生会員　東京電機大学大学院工学系研究科 (千代田区神田錦町 2-2)
†正 会 員　東京電機大学工学部
††正 会 員　東京大学大学院工学系研究科

ここで σ_c は観測方程式の観測値の誤差の標準偏差，σ_q は手元座標の誤差の標準偏差である．

通常の最小二乗法によるパラメータ同定では $\boldsymbol{c}$，J，W を用いて以下の繰返し計算を行うことにより機構パラメータを収束させる．

$$\boldsymbol{p}_{new} = \boldsymbol{p}_{old} + \left({}^{t}JW^{-1}J\right)^{-1}{}^{t}JW^{-1}\boldsymbol{c} \tag{2}$$

これまでにどの運動学パラメータを同定対象とするか [6]，どのような校正手法を選択するか [7]，あるいはどのように校正用の測定点を配置するか [8] [9] についての報告が多くなされている．これらは運動学パラメータベクトル $\boldsymbol{p}$ をどのようにとるか，観測方程式 $c(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}, \boldsymbol{p}))$ をどのような関数とするか，測定点集合 $\boldsymbol{q_k}$ をどのように選ぶかという議論をしており，これはヤコビ行列 J にどのような数学的性質を与えるかという議論と同値である．

2.2　緩い束縛条件を用いた最小二乗計算

パラレルメカニズムの運動学校正においては運動学パラメータ間の相関が非常に強く，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ため，全てのパラメータを含めた最小二乗計算を行うことが困難となる．そこで式（2）のヤコビ行列および誤差行列に「緩い束縛条件」を与えることで最小二乗計算の計算条件の改善を図り，全ての運動学パラメータを同定する手法を提案する．ここで「緩い束縛条件」とは，運動学パラメータ $\boldsymbol{p}$ に対して，十分な安全率を見込んだ測定誤差 σ を含む測定値 $\acute{\boldsymbol{p}}$ を与えたものである．これは統計学では「先験条件」と呼ばれるものである [10]．

式（1）に緩い束縛条件を与えると，式（2）における観測方程式 $\boldsymbol{c}$，ヤコビ行列 J および誤差行列 W はそれぞれ以下のように書き換えられる．

$$\begin{aligned}
\hat{\boldsymbol{c}} &= {}^{t}\left[\ {}^{t}\boldsymbol{c}\ \middle|\ \boldsymbol{p} - \acute{\boldsymbol{p}}\ \right] \\
\hat{J} &= \left[\begin{array}{c} J \\ \hline E_{n,n} \end{array}\right] \\
\hat{W} &= \left[\begin{array}{c|c} W & O \\ \hline O & \sigma^2 E_{n,n} \end{array}\right]
\end{aligned} \tag{3}$$

ここで $E_{n,n}$ は $n \times n$ の単位行列である．観測方程式 $\hat{\boldsymbol{c}}$ に運動学パラメータを直接測定した場合の観測方程式 $\boldsymbol{p} - \acute{\boldsymbol{p}}$ が含まれることにより，式（2）の繰返し計算において運動学パラメータの同定値 $\boldsymbol{p}$ と $\acute{\boldsymbol{p}}$ の差が高々 σ のオーダとなるように束縛され，計算を発散させることなく全ての運動学パラメータ同定が可能となる [11]．

2.3　設計値の利用

最小二乗計算に緩い束縛条件を与えるためには，計算に先立って各運動学パラメータの真値にある程度近い値が既知でなければならない．ここで実際の機械要素の製造および組立工程が管理されているならば，運動学パラメータの真値はその設計値近傍の値をとることが期待される．そこで本研究では運動学パラメータを直接測定した場合の測定誤差 σ を適切に見積もることによって，式（3）の観測方程式における運動学パラメータの測定値 $\acute{\boldsymbol{p}}$ にその設計値を用いることを提案する．この場合 σ は設計図などで指定されている許容寸法誤差の大きさを用いればよい．このことにより，大型パラレル工作機械など直接測定することが不可能な運動学パラメータが存在する機構でも，最小二乗計算に緩い束縛条件を与えることができる．また緩い束縛条件を得るための測定を行う必要がないという利点もある．

3.　校正シミュレーション

ここではパラレルメカニズムのパラメータ同定において，従来の手法による結果と本研究で提案する手法による結果とを校正シミュレーションを通して比較し，本研究の手法の有効性を示す．

3.1　校正系

本報で運動学校正を試みる機構の校正系を**図 1** に示す．

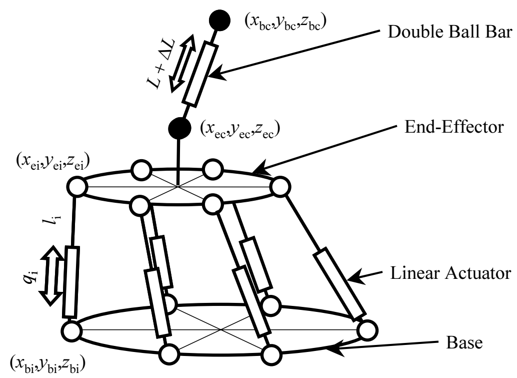

Fig. 1　Kinematic model for calibration of parallel mechanism

校正対象とする機構は 6 自由度 Stewart Platform を想定した．この機構のエンドエフェクタに伸縮可能でバーの伸縮量を変位計で測定可能なダブルボールバーを取り付け，その一端を固定し他端をエンドエフェクタにより機構の可動範囲内で移動させ，各位置での Stewart Platform の伸縮アクチュエータの伸縮量 q_i とそのときのダブルボールバーの伸縮量 ΔL とを取得することを想定する．

本報では前節で提案した緩い束縛条件を与えた最小二乗計算による運動学校正の有効性を確認するために，ダブルボールバーの端点は一ヶ所だけに固定し，エンドエフェクタには姿勢変化を与えず，かつ校正に用いる測定点数が少ない場合の校正シミュレーションを行う．

3.2　運動学パラメータ

図 1 の校正系において同定する必要のある運動学パラメータを以下に整理する．

3.2.1　ベース

Stewart Platform のベースは 6 個のベース側ジョイントの回転中心を頂点とする剛体として表現される．Stewart Platform 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ベース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_{bi}, y_{bi}, z_{bi}），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 個のパラメータはベース自体の位置，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，ベースの表現に必要となるパラメータ数は 12 となる．

3.2.2　伸縮アクチュエータ

Stewart Platform 順運動学解を求めるためには，伸縮アクチュエータの伸縮量に各アクチュエータの初期長さをオフセットとして与える必要がある．これはアクチュエータの伸縮量が 0 であるときのアクチュエータの長さであるから，アクチュエータ 1 機あたり 1 個（l_i），合計 6 個の運動学パラメータを同定する必要がある．

3.2.3　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．Stewart Platform 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となるパラメータ数は 12 となる．

これらに加えてエンドエフェクタ上でダブルボールバーが固定されている位置を表現する運動学パラメータが 3 個（x_{ec}, y_{ec}, z_{ec}）必要となる．よって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．

3.2.4　ダブルボールバー

本報の校正ではダブルボールバーの一方の端点を一ヶ所に固定することを想定しているため，ベース上の座標系でダブルボールバーの固定されている位置に関する運動学パラメータが 3 個（x_{bc}, y_{bc}, z_{bc}）必要となる．ダブルボールバーの初期長さ L については校正アーティファクトのトレーサビリティを考慮することによりノミナルに与えることができる．従ってダブルボールバーに関するパラメータ数は 3 となる．

以上を**表 1** に整理する．また図 1 に示した校正系の運動学パラメータの設計値および真値を**表 2** に示す．各項目の上段が設計値，下段が設定した真値である．

Table 1　Kinematic parameters for calibration of parallel mechanism

Components	Number of Parameters
Base	12
Actuator	6
End-Effector	15
Double Ball Bar	3
Total	36

3.3　順運動学解だけを利用した運動学校正

最初に順運動学解だけを利用した運動学校正のシミュレーションを行う．

ダブルボールバーの一端をベース中央上空に固定したとし，もう一端をエンドエフェクタの中央近傍に固定したとする．このときエンドエフェクタの姿勢を水平に保ったまま，エンドエフェクタ上のダブルボールバー端点が**図 2** に示す円軌道を描くように各アクチュエータを伸縮させる．このとき各位置での伸縮アクチュエータの伸縮量 $q_1, q_2, ..., q_6$ とダブルボールバーの伸縮量 $\triangle L$ を取得する．

ベース上の座標系における k 回目の測定点でのエンドエフェクタ上のダブルボールバー端点の位置を $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q_k}, \boldsymbol{p})$ とすると，観測方程式 c_k は,

$$c_k = |(x_{bc}, y_{bc}, z_{bc}) - \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q_k}, \boldsymbol{p})| - (L + \triangle L_k) \tag{4}$$

となる．

測定データは各円周上で 10° 刻み，合計 108 点のデータを取得するとした．ダブルボールバーの伸縮量測定の誤差の標準偏差 σ_c は 0.1 µm，伸縮アクチュエータの伸縮量測定の誤差の標準偏差 σ_q は 1 µm と与えた．この条件のもとで式（1）に示した観測方程式およびヤコビ行列を求め，式（２）によって 36 個の運動学パラメータの同定を試みたところ，残差ノルムが発散し校正に失敗した．このとき分散共分散行列の条件数は $6{\times}10^{45}$ であった．

3.4　緩い束縛条件を与えた運動学校正

次に緩い束縛条件を与えた運動学校正のシミュレーションを行う．ここでは前項のシミュレーションに用いた測定データを用いて緩い束縛条件を与えた最小二乗計算を行うことにより，全ての運動学パラメータを発散させることなく同定できることを示す．

3.4.1　緩い束縛条件

2.3 項で述べたように，機構要素の製造および組立工程が管理されている場合，誤差行列を適切に見積もることで各運動学パラメータの設計値を緩い束縛条件に用いることができる．そこで表 2 に示した各パラメータの設計値を緩い束縛条件 $\acute{\boldsymbol{p}}$ として式（3）に与えた．ここでは安全のために各運動学パラメータの測定値として設計値を用いた場合の測定誤差 σ を 100 µm と見積もり，誤差行列 $\hat{W}$ を計算した．

Table 2　Kinematic parameters: design values (upper) and true values (lower) for simulation

Base [mm]					
x_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)	z_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b2}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{b2}	100.000 100.074	z_{b2}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b3}	-86.603 -86.643	y_{b3}	150.000 150.086	z_{b3}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b4}	-173.205 -173.209	y_{b4}	100.000 99.845	z_{b4}	0.000 -0.107
x_{b5}	-173.205 -173.227	y_{b5}	0.000 -0.168	z_{b5}	0.000 -0.170
x_{b6}	-86.603 -86.613	y_{b6}	-50.000 -50.030	z_{b6}	0.000 -0.137
Actuator [mm]					
l_1	235.000 234.934	l_2	235.000 235.048	l_3	235.000 235.124
l_4	235.000 235.003	l_5	235.000 235.069	l_6	235.000 234.931
End-Effector [mm]					
x_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)	z_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e2}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{e2}	30.000 29.960	z_{e2}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e3}	-44.010 -43.941	y_{e3}	55.409 55.491	z_{e3}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e4}	-69.990 -69.919	y_{e4}	40.409 40.538	z_{e4}	0.000 0.067
x_{e5}	-69.990 -69.871	y_{e5}	-10.409 -10.529	z_{e5}	0.000 -0.002
x_{e6}	-44.010 -44.025	y_{e6}	-25.409 -25.569	z_{e6}	0.000 0.026
x_{ec}	-38.000 -37.881	y_{ec}	15.000 14.996	z_{ec}	60.000 60.033
Double Ball Bar [mm]					
x_{bc}	-86.603 -86.268	y_{bc}	50.000 50.063	z_{bc}	300.000 300.128

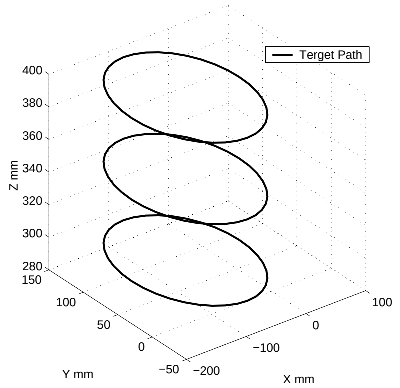

Fig. 2 Measuring circles (target paths) for calibration of parallel mechanism

3.4.2 同定結果

3.3 項で用いた測定データと表 2 に示した各運動学パラメータの設計値を用いて式（3）に示した観測方程式およびヤコビ行列を求め，式（2）による最小二乗計算を行ったところ残差ノルムは単調に減少し，全ての運動学パラメータを同定することができた．このとき分散共分散行列の条件数は 1×10^8 であった．このことから緩い束縛条件を与えることで最小二乗計算の計算条件を改善できることがわかり，発散していた校正系を収束する校正系に改良することができた．

運動学パラメータの同定値とその標準偏差を**表 3** に示す．各項目の上段が同定値，下段が標準偏差である．運動学パラメータの標準偏差は緩い束縛条件として与えた各運動学パラメータの測定誤差よりも小さくなった．また運動学校正を行うことで図 1 の Stewart Platform の絶対位置決め精度がどのように向上したかを**図 3** に示す．校正によって機構の絶対位置決め誤差は最大 500 μm から最大 200 μm に減少した．

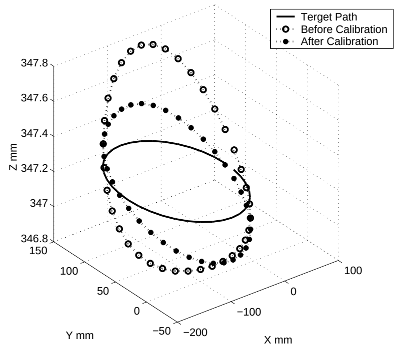

Fig. 3 Positioning errors before and after calibration on target path

Table 3 Results of calibration: identified values (upper) and standard deviations (lower)

Base [mm]					
x_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)	z_{b1}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b2}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{b2}	100.464 0.070	z_{b2}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b3}	-86.666 0.074	y_{b3}	159.934 0.077	z_{b3}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{b4}	-173.322 0.073	y_{b4}	100.087 0.078	z_{b4}	-0.278 0.074
x_{b5}	-173.112 0.074	y_{b5}	-0.201 0.078	z_{b5}	-0.231 0.074
x_{b6}	-86.429 0.074	y_{b6}	-49.822 0.077	z_{b6}	0.029 0.077
Actuator [mm]					
l_1	235.316 0.030	l_2	235.378 0.034	l_3	235.017 0.027
l_4	235.466 0.035	l_5	235.284 0.032	l_6	234.782 0.034
End-Effector [mm]					
x_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)	z_{e1}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e2}	0(Nominal) 0(Nominal)	y_{e2}	29.586 0.073	z_{e2}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e3}	-43.903 0.075	y_{e3}	55.488 0.077	z_{e3}	0(Nominal) 0(Nominal)
x_{e4}	-69.894 0.074	y_{e4}	40.302 0.077	z_{e4}	0.402 0.080
x_{e5}	-70.128 0.074	y_{e5}	-10.221 0.077	z_{e5}	0.231 0.080
x_{e6}	-44.145 0.075	y_{e6}	-25.555 0.077	z_{e6}	-0.179 0.081
x_{ec}	-37.984 0.088	y_{ec}	14.592 0.081	z_{ec}	59.896 0.072
Double Ball Bar [mm]					
x_{bc}	-86.603 0.086	y_{bc}	50.364 0.083	z_{bc}	300.094 0.073

4. 結　　言

本論文ではアーティファクトを用いたパラレルメカニズムの運動学校正において，全ての運動学パラメータを校正対象として最小二乗法による運動学校正を行った．以下に本論文の内容を要約する．

(1) パラレルメカニズムの運動学校正において緩い束縛条件を与えた最小二乗法を用いることを提案した．
(2) 最小二乗計算の誤差行列を適切に見積もることにより，緩い束縛条件として運動学パラメータの設計値を利用できることを提案した．
(3) 運動学校正における最小二乗計算に緩い束縛条件を与えることにより，パラレルメカニズムの校正系を最小二乗計算が発散する系から収束する系に改良できることを示した．
(4) 緩い束縛条件を与えた最小二乗法によ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した．

本報で提案した手法によってパラレルメカニズムの全ての運動学パラメータを発散させることなく同定できる．この手法はトレーサビリティが確保されているアーティファクトを用いることで，大型のパラレルメカニズムの校正にも適用可能である．今後は複数のアーティファクトを用いた場合やエンドエフェクタに姿勢変化を与えた場合についての解析を行い，実機を用いた校正実験を通して本研究の手法の有効性を確認する．

参　考　文　献

1) 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.

2) 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.

3) 太田浩充, 渋川哲郎, 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.

4) 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.

5) 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.

6) 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.

7) Shaoping Bai, Ming Yeong Teo. Kinematic Calibration and Pose Measurement of a Medical Parallel Manipulator by Optical Position Sensors. Journal of Robotic Systems, **20**, 2 (2003) 201.

8) O.Sato, M.Hiraki, K.Takamasu and S.Ozono. Calibration of 2-DOF parallel mechanism. Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium, Kluwer academic publishers (2001) 734.

9) 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, **68**, 673 (2002) 2762.

10) 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).

11) 佐藤理, 無類井格, G.Olea, 高増潔. パラレルメカニズムを用いたマイクロフライス盤の開発（第 3 報）–試作機による加工–. 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2003) L05.

12) 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.