微細格子パターンを用いた パラレルメカニズムのキャリブレーション*

田中 航^{*1}, 新井健生^{*2}, 井上健司^{*3}
田窪朋仁^{*4}, 朴忠植^{*5}

Calibration Method for Parallel Mechanism Using Micro Grid Pattern

Wataru TANAKA^{*6}, Tatsuo ARAI, Kenji INOUE,
Tomohito TAKUBO and Choong Sik PARK

^{*6} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi, Ibaraki, 312-0034 Japan

This paper investigates the calibration of the parallel mechanism stage which is set up under the microscope. The calibration method uses position data of the x and y-axis and orientation data of z-axis only using measurement method with the micro grid pattern. This paper discusses its calibration method with experiments for the stage constructed a fixed linear actuated parallel mechanism. The results show that the calibration using limited data is possible and has good performance.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Positioning, Measurement, Identification, Absolute Accuracy, Calibration, Parallel Mechanism

1. はじめに

近年, ナノメータ, マイクロメータといった微細領域における加工や計測, マニピュレーションなどにおいて, 高精度で位置決めできる6自由度ステージが求められている. 微細な領域での観察には顕微鏡を利用するのが一般的であり, 顕微鏡下で利用できるコンパクトなステージの需要は高い. 複数のリンクがベースとエンドエフェクタの間に並列に接続されるパラレルメカニズムは, 各リンクの誤差が平均化されるため, シリアルメカニズムと比較してより高精度な位置決めが実現しやすい. また, 機構をコンパクトに設計できる. 本報告では, パラレルメカニズムを顕微鏡下に設置するステージに適用することを想定し, 絶対位置決め精度を向上させるための機構パラメータのキャリブレーションについて考察を行う. 機構パラメータとは, 構成部品の長さや取り付け位置などであり, これには, 加工や組付けを行う際に誤差が発生する. この機構パラメータの誤差は絶対位置決め精度に大きく影響を与えるため, 機構パラメータを正確に推定することは重

要な課題である.

パラレルメカニズムのキャリブレーションを行うには一般的にエンドエフェクタの位置姿勢を測定する必要がある. 小関らは, レーザ測長器とリフレクタによって, エンドエフェクタの上の3点の位置を測定することにより位置姿勢を算出し, それらを用いて回転入力型パラレルメカニズムのキャリブレーションを行った⁽¹⁾. また近年, DBB(ダブル・ボール・バー)と呼ばれる測定器を用いたキャリブレーションが多く提案されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾. これらの測定方法の問題点としては, キャリブレーションのために新たに測定装置を設置しなければならない, その設置条件により誤差が生まれる可能性があることや, その測定器を基準の座標系としたキャリブレーションとなり, 実際に作業を行う場合に作業座標系との新たな座標合わせが必要となることなどがあげられる. 茨木らは絶対座標系で精度を評価するために再現性良くDBBの球を固定できる治具を製作し, その治具を絶対座標系としたキャリブレーションを行っている⁽⁵⁾. 実際の作業を行う場合は, 治具に設置された絶対座標系と作業座標系とを一致させる必要がある. また, 本報告で対象としている顕微鏡下に設置されたステージには, DBBやレーザ測長器のような測定装置は設備容積等の面で設置が困難である.

Renaudらはカメラを用いた測定法によるパラレルメカニズムのキャリブレーションを提案している⁽⁶⁾. しかし, 一般的な拡大率のカメラでは, マイクロメート

* 原稿受付 2008年2月28日.

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2).

^{*2} 正員, フェロー, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻システム科学領域(〒560-8531 豊中市待兼山町1-3).

^{*3} 正員, 山形大学大学院理工学研究科応用生命システム工学専攻(〒992-8510 米沢市城南4-3-16).

^{*4} 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻システム科学領域.

^{*5} 大阪府立産業技術総合研究所(〒594-1157 和泉市あゆみ野2-7-1).

E-mail: wataru.tanaka.rs@hitachi.com

ルオーダのような微細な変位は測定できない。顕微鏡を用いた測定によるキャリブレーションとしては、谷川らが二本指マイクロマニピュレータのキャリブレーションを行っている⁽⁷⁾。エンドエフェクタの変位とアクチュエータの変位の関係を線形近似し、その係数を推定するという手法を用いて、数マイクロメートルの絶対位置決め精度を実現している。しかし、この方法は、線形近似できる領域にのみ有効な手段であり、この報告では数百マイクロメートルの動作領域でのみ精度が保証されている。

本報告では、特別な測定装置を用いることなく、簡単にキャリブレーションを行う方法として、顕微鏡と微細格子パターンを用いたエンドエフェクタの位置姿勢測定法を提案する。これは、ステージのエンドエフェクタ上面に座標系や間隔、描画位置が既知の微細な格子パターンを描画しておき、それを顕微鏡で観察することにより、エンドエフェクタの位置姿勢を計測する手法である。顕微鏡はアプリケーションに使用するものであり、エンドエフェクタ上面に描画されたパターンはスケールや作業時の座標系として使用する。よって、それらを用いてキャリブレーションを行えば、キャリブレーションのための新たな測定装置や、実際の作業を行う際の作業座標との座標合わせが必要無い。現在までに我々は、測定の簡単化に対応したパラレルメカニズムのキャリブレーション法を提案している⁽⁸⁾。測定の簡単化とはエンドエフェクタの位置姿勢測定を6自由度のうち一部分のみとすることを意味する。この提案では測定が困難であると考えられる姿勢測定を簡単化したが、本報告では、さらに測定情報を限定し、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に簡単化したキャリブレーション法についての提案を行う。微細格子パターンを用いたエンドエフェクタの位置姿勢測定法とそれにより取得できるエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定データに限定したキャリブレーションにより、エンドエフェクタの位置姿勢測定作業を大幅に削減でき、実用性の高いキャリブレーション法となる。本報告では提案したキャリブレーション法を直動固定型パラレルメカニズムステージに適用し、シミュレーションおよび実験を通してその実現性、有効性を示す。

2. 微細格子パターンを用いたエンドエフェクタの位置姿勢測定

2.1 直動固定型パラレルメカニズムステージ 本報告では図1に示す直動固定型パラレルメカニズム・ヒーハイスT製 F6005DE を顕微鏡下に設置するステー

Fig. 1 The fixed linear actuated parallel mechanism stage

Fig. 2 The experiment system

ジに採用した。本機構はボールねじによる駆動方式を採用しており、そのピッチは1.0[mm]である。またアクチュエータにはステッピングモータを使用しており、1ステップで0.72[deg]駆動する。つまり駆動関節の分解能は、 $(1.0/360) \times 0.72 = 0.002$ [mm]である。この値から見積もられるエンドエフェクタの並進の駆動分解能はおおよそ1.0[μm]である。

次にシステム構成を図2に示す。顕微鏡として対物レンズを付加したCCDカメラを用意し、その下に直動固定型パラレルメカニズムステージを設置した。アプリケーションでは顕微鏡下での作業における座標系や計測のスケールとして、ステージ上面に微細な格子パターンを描画する。しかし、本報告では実験のため、ステージのエンドエフェクタ上面に微細格子パターンを直接描画せず、微細格子パターンを描画したシリコン基板を作成し、エンドエフェクタ上面に設置した。

2.2 キャリブレーションターゲット 図3に示すような微細な格子点を描画した基板を作成した。これをキャリブレーションターゲットと呼ぶ。キャリブレーションターゲットには、サブマイクロの測定精度を目標とし、1.0[μm]間隔で格子点を描画した。パターンの描画は10×10[mm]の領域に行った。中心に描かれた十字は座標系を表している。

2.3 測定手順 まず、図4に示すように座標系を設定する。直動固定型パラレルメカニズムステージのエンドエフェクタ上面にキャリブレーションターゲットを設置する。カメラのレンズの中心に取った直交座標系を測定座標系 $x_c y_c z_c$ とし、その原点を o_c とする。

Fig. 3 The micro grid pattern of the calibration target

Fig. 4 The coordinate frame of the camera and the parallel mechanism stage

Fig. 5 The image of the end-effector position before and after movement

なお、カメラの光軸と z_c 軸の負の方向一致させた。また、キャリブレーションターゲットの中心に取った直交座標系をターゲット座標系 $x_g y_g z_g$ とし、その原点を o_g とする。測定座標系におけるターゲット座標系の原点 o_g の位置を ${}^c p_g = [{}^c p_{x_g} \ {}^c p_{y_g} \ {}^c p_{z_g}]^T$ と表す。なお、添え字 T は転置を表す。測定座標系におけるターゲット座標系の姿勢は、 ${}^c \Omega_{x_g}$, ${}^c \Omega_{y_g}$, ${}^c \Omega_{z_g}$ の 3 つの姿勢角で表すとし、測定座標系の各軸 x_c , y_c , z_c に関して、それぞれ ${}^c \Omega_{x_g}$, ${}^c \Omega_{y_g}$, ${}^c \Omega_{z_g}$ だけこの順番に回転させることとする。つまり、測定座標系におけるターゲット座標系の姿勢を表す姿勢行列 ${}^c R_g$ は、

$${}^c R_g = \text{Rot}(z_c, {}^c \Omega_{z_g}) \text{Rot}(y_c, {}^c \Omega_{y_g}) \text{Rot}(x_c, {}^c \Omega_{x_g}) \quad (1)$$

と計算する。Rot(α , β) は α 軸周りに β 回転することを表す。

${}^c p_{x_g}$, ${}^c p_{y_g}$ の測定は、測定座標系におけるターゲット座標系原点 o_g の位置を測定することで得ることができる。アクチュエータにある指令値を与えたときのエンドエフェクタの位置姿勢を図 5 に示す。このとき、カメラ画像の画像中心、つまりレンズ中心に

取った測定座標系原点 o_c に映っている点を点 M とする。そしてターゲット座標系における点 M の位置を ${}^g p_M = [M_{x_g} \ M_{y_g} \ 0]^T$, 測定座標系における点 M の位置を ${}^c p_M = [0 \ 0 \ M_{z_c}]^T$ と表す。このとき、測定座標系におけるターゲット座標系原点 o_g の位置 ${}^c p_g$ は次のように表すことができる。

$${}^c p_g = -{}^c R_g {}^g p_M + {}^c p_M \quad (2)$$

よって、

$$\begin{bmatrix} {}^c p_{x_g} \\ {}^c p_{y_g} \\ {}^c p_{z_g} \end{bmatrix} = {}^c R_g \begin{bmatrix} -M_{x_g} \\ -M_{y_g} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_{z_c} \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表される。ターゲット座標系における点 M の位置 ${}^g p_M$ は、描画された微細格子パターンの座標系、描画位置および間隔が既知であるために明確に定まる。具体的には、キャリブレーションターゲットの格子点をターゲット座標系の x_g 軸, y_g 軸に沿ってカウントすることで測定することができる。また、 ${}^c p_M$ の x_c 軸, y_c 軸の値は 0 であるので、格子点をカウントすることで求めた ${}^g p_M$ に姿勢行列 ${}^c R_g$ による補正を行うことで、 ${}^c p_{x_g}$, ${}^c p_{y_g}$ を求めることができる。

さらに、測定座標系の z_c 軸に関するターゲット座標系の回転 ${}^c \Omega_{z_g}$ は次のように求めることができる。ex, ey, ez が測定座標系におけるターゲット座標系の各軸を表す単位ベクトルであるとき、姿勢行列 ${}^c R_g$ は次のように表される。

$${}^c R_g = \begin{bmatrix} ex & ey & ez \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、式 (1) から ex は次のように計算される。

$$ex = \begin{bmatrix} \cos({}^c \Omega_{z_g}) \cos({}^c \Omega_{y_g}) \\ \sin({}^c \Omega_{z_g}) \cos({}^c \Omega_{y_g}) \\ -\sin({}^c \Omega_{y_g}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ターゲット座標系の x_g 軸を表す単位ベクトルを $x_c y_c$ 平面へ射影したときにできるベクトルと、測定座標系の x_c 軸とが成す角を η とすると次の式が成り立つ。

$$\tan(\eta) = \frac{\sin({}^c \Omega_{z_g}) \cos({}^c \Omega_{y_g})}{\cos({}^c \Omega_{z_g}) \cos({}^c \Omega_{y_g})} = \frac{\sin({}^c \Omega_{z_g})}{\cos({}^c \Omega_{y_g})} = \tan({}^c \Omega_{z_g}) \quad (6)$$

ゆえに、

$$\eta = {}^c \Omega_{z_g} \quad (7)$$

となる。よって、ターゲット座標系の x_g 軸を表す単位ベクトルを $x_c y_c$ 平面へ射影したときにできるベクトルと、測定座標系の x_c 軸とが成す角を測定することにより、ターゲット座標系の z_c 軸に関する回転 ${}^c \Omega_{z_g}$ を

求めることができる。カメラの光軸と測定座標系の z_c 軸が平行となるよう座標系を設定しているので、ターゲット座標系を $x_c y_c$ 平面へ射影した状態の画像を取得することができる。つまり、画像中におけるターゲット座標系の x_g 軸と測定座標系 x_c 軸が成す角度を測定すれば $\angle \Omega_{z_g}$ を得ることができる。具体的には、カメラ画像に測定座標系の x_c 軸を表示させ、ターゲット座標系の x_g 軸との成す角度を格子点をカウントすることで求める。

${}^c p_{x_g}$, ${}^c p_{y_g}$ を求める際の姿勢による補正を行うためには、姿勢データが必要である。しかし、 x_c 軸、 y_c 軸に関する回転の測定は行っていない。よって、 x_c 軸、 y_c 軸に関する回転に関しては、機構パラメータの設計値を用いて計算された推定値によって補正を行った。

しかし、推定値と実現値には当然誤差がある。ここではその影響について検討する。実現値取得用の機構パラメータとして設計値を採用し、さらに、推定値取得用の機構パラメータとして、設計値に1%の誤差を含ませたものを用意した。この誤差はJISB0405に記載されている普通公差から想定される部品加工の誤差を考慮して設定したが、精密な位置決めを目的とした本機構では、普通公差よりさらに厳しい公差を規定し製作されていると考えられ、1%の誤差は十分大きな値と考えられる。そして、ある駆動関節変位において各々の機構パラメータを用いて順運動学計算を行い、設計値の機構パラメータから得られたエンドエフェクタの位置姿勢を実現値、誤差を含んだ機構パラメータから得られたエンドエフェクタの位置姿勢を推定値とした。さらに、各々の姿勢から計算された各軸の回転角度の差を計算したところ、平均で1.0[deg]程度の差となった。そこで、ここでは仮に推定値と実現値に1.0[deg]の回転角度誤差があったとする。このときの測定結果に表れる並進誤差を見積もる。姿勢の推定値が $[0\ 0\ 0]^T$ [deg]、点Mのターゲット座標系における座標値が $[4.0\ 4.0\ 0]^T$ [mm]とする。このときの、エンドエフェクタの姿勢の実現値が $[1\ 1\ 0]^T$ [deg]であったとし、そのときの並進誤差を見積もる。なお、 $[4.0\ 4.0\ 0]^T$ は、後述する実験時に取得する測定点のうちの、測定領域の一番外側の点のうちの1つである。点Mとターゲット座標系原点 o_g の距離が離れているときほど回転角度誤差の影響は大きい。よって測定領域一番外側に点Mを取ると回転角度誤差の影響が一番大きくなる。 x_c 軸、 y_c 軸、 z_c 軸に関する並進誤差をそれぞれ E_x , E_y , E_z と表す。このとき $[E_x\ E_y\ E_z]^T$ は以下のようになり、 x_c 軸、 y_c 軸に関する並進誤差は1.0[μm]に満たずその影響は小さいと考えられる。

Fig. 6 The kinematic parameters of the fixed linear actuated parallel mechanism

Fig. 7 The kinematic parameters of the base plate and the end-effector

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \text{Rot}(z_c, 0) \text{Rot}(y_c, 1) \text{Rot}(x_c, 1) \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix} \\ -\text{Rot}(z_c, 0) \text{Rot}(y_c, 0) \text{Rot}(x_c, 0) \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00061 \\ -0.00061 \\ 0.000011 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. 測定を簡便化したキャリブレーション法

3.1 機構パラメータの定義 図6, 図7に直動固定型パラレルメカニズムステージの機構パラメータの配置を示す。直動固定型パラレルメカニズムステージにおける基準となる座標系をベース座標系 $x_b y_b z_b$ とし、その原点を o_b 、エンドエフェクタにおける座標系をエンドエフェクタ座標系 $x_e y_e z_e$ とし、その原点 o_e とする。 $\Theta = [\theta_{11}\ \theta_{21}\ \theta_{12}\ \theta_{22}\ \theta_{13}\ \theta_{23}]^T$ は駆動関節変位、 l_{1i} , l_{2i} , l_{3i} はそれぞれ図6に示すリンクの長さ、 z_{1i} , z_{2i} はそれぞれ図6に示す方向を表す単位列ベクトル、 ${}^b \mathbf{p}_{bi}$ はベース座標系における各リンクの駆動関節の動作始点を表す列ベクトル、 ${}^e \mathbf{p}_{ei}$ はエンドエフェクタ座標系におけるエンドエフェクタとリンクの結合点を表す列ベクトル、 ${}^b \mathbf{a}_i$ はベース座標系における駆動関節の駆動方向を表す単位列ベクトルをそれぞれ表す。 $i = 1, 2, 3$ はリンクの番号を表す。

1組のリンクにおいて推定すべき機構パラメータは、リンクの長さ l_{1i} , l_{2i} , l_{3i} 、ベース座標系における駆動関節の動作始点を表す列ベクトル ${}^b \mathbf{p}_{bi}$ 、ベース座標系における駆動関節の動作方向を表す単位列ベクトル ${}^b \mathbf{a}_i$ 、エンドエフェクタ座標系におけるエンドエフェクタとリンクの結合点を表す列ベクトル ${}^e \mathbf{p}_{ei}$ の合計12

個である。リンクの長さ l_{li} , l_{li} , l_{2i} は各組共通であり, ${}^b\mathbf{p}_{bi}$, ${}^b\mathbf{a}_i$, ${}^e\mathbf{p}_{ei}$ については, アクチュエータがベースプレート上に正三角形に配置されており, その辺上にリンクが構成されているので, $i=1$ の値を $2/3\pi$ ずつ位相をずらした値となる。推定すべき機構パラメータは全リンクで合計 36 個ある。

3.2 係数行列の分解 ベース座標系において, エンドエフェクタの位置を $\mathbf{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ と表す。エンドエフェクタの姿勢行列を $\mathbf{R}$ と表し, ベース座標系の x , y , z 軸の各軸に対しそれぞれ回転角 Ω_x , Ω_y , Ω_z だけこの順で回転させることとする。また, 位置の微小変位を $\delta\mathbf{p} = [\delta p_x \ \delta p_y \ \delta p_z]^T$, 姿勢の微小変位を $\delta\Omega = [\delta\Omega_x \ \delta\Omega_y \ \delta\Omega_z]^T$ と表し, それらをまとめて位置姿勢の微小変位として $\delta\mathbf{X} = [\delta\mathbf{p}^T \ \delta\Omega^T]^T$ と表す。さらに, 第 i リンクにおける推定すべき機構パラメータを次のように表す。

$$\dot{\mathbf{P}}_i = [{}^e\mathbf{p}_{ei}^T \ {}^b\mathbf{p}_{bi}^T \ {}^b\mathbf{a}_i^T \ l_{li} \ l_{li} \ l_{2i}]^T \quad (9)$$

全リンクをまとめて次のように表す。

$$\mathbf{P} = [\dot{\mathbf{P}}_1^T \ \dot{\mathbf{P}}_2^T \ \dot{\mathbf{P}}_3^T]^T \quad (10)$$

第 i リンクにおける推定すべき機構パラメータの微小変位を次のように表す。

$$\delta\dot{\mathbf{P}}_i = [\delta{}^e\mathbf{p}_{ei}^T \ \delta{}^b\mathbf{p}_{bi}^T \ \delta{}^b\mathbf{a}_i^T \ \delta l_{li} \ \delta l_{li} \ \delta l_{2i}]^T \quad (11)$$

全リンクまとめて次のように表す。

$$\delta\dot{\mathbf{P}} = [\delta\dot{\mathbf{P}}_1^T \ \delta\dot{\mathbf{P}}_2^T \ \delta\dot{\mathbf{P}}_3^T]^T \quad (12)$$

このとき, 直動固定型パラレルメカニズムステージの幾何的な関係から次の 2 式が求まる。

$$\mathbf{p} + \mathbf{R}^T \mathbf{p}_{ei} = {}^b\mathbf{p}_{bi} + \theta_{li} {}^b\mathbf{a}_i + l_{li} \mathbf{z}_{li} \quad (13)$$

$$\theta_{li} {}^b\mathbf{a}_i + l_{li} \mathbf{z}_{li} = \theta_{2i} {}^b\mathbf{a}_i + l_{2i} \mathbf{z}_{2i} \quad (14)$$

式 (13)(14) をエンドエフェクタの位置姿勢および機構パラメータについて微分し各成分にまとめると, 行列 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ を用いて次式のように求めることができる。

$$\mathbf{A} \delta\mathbf{X} + \mathbf{B} \delta\dot{\mathbf{P}} = 0 \quad (15)$$

各係数は以下のものである。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}'_1 \\ \mathbf{A}'_2 \\ \mathbf{A}'_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}'_i = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{li}^T & \lambda_{li}^T \\ \mathbf{z}_{2i}^T & \lambda_{2i}^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{B}'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}'_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B}'_i = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{li}^T \mathbf{R} & \mathbf{z}_{bi}^T & -\theta_{li} \mathbf{z}_{li}^T & -1 & 0 & 0 \\ \mathbf{z}_{2i}^T \mathbf{R} & \mathbf{z}_{bi}^T & \mu \mathbf{z}_{2i}^T & -\mathbf{z}_{2i}^T \mathbf{z}_{li} & \frac{l_{li}}{l_{li}} \mathbf{z}_{2i}^T \mathbf{z}_{li} & -\frac{l_{li}}{l_{li}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

ただし, $\otimes$ は外積を表し,

$$\lambda_{li} = (\mathbf{R}^T \mathbf{p}_{ei}) \otimes \mathbf{z}_{li} \quad (18)$$

$$\lambda_{2i} = (\mathbf{R}^T \mathbf{p}_{ei}) \otimes \mathbf{z}_{2i} \quad (19)$$

$$\mu = -\left(\frac{l_{li} - l_{li}}{l_{li}} \theta_{li} + \frac{l_{li}}{l_{li}} \theta_{2i}\right) \quad (20)$$

である。

$\mathbf{A}$ が正則のとき, 式 (15) を $\delta\mathbf{X}$ について解くと,

$$\delta\mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \delta\dot{\mathbf{P}} \quad (21)$$

となる。なお, 添え字 -1 は逆行列を表す。ここで, 要素が 36 の行ベクトル Γ_{px} , Γ_{py} , Γ_{pz} , Γ_{Ω_x} , Γ_{Ω_y} , Γ_{Ω_z} を用いて,

$$-\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \equiv [\Gamma_{px}^T \ \Gamma_{py}^T \ \Gamma_{pz}^T \ \Gamma_{\Omega_x}^T \ \Gamma_{\Omega_y}^T \ \Gamma_{\Omega_z}^T]^T \quad (22)$$

とすると, 以下のように表すことができる。

$$\delta p_k = \Gamma_{pk} \delta\dot{\mathbf{P}}, \quad \delta\Omega_k = \Gamma_{\Omega_k} \delta\dot{\mathbf{P}} \quad (23)$$

ただし, $k=x,y,z$ である。 $\mathbf{A}$ が正則でない場合, 式 (21) は成立しない。測定点によっては正則ではなくなる可能性もあるが, そういった測定点はキャリブレーションには使用しない。

このように, p_x , p_y , p_z , Ω_x , Ω_y , Ω_z それぞれと機構パラメータとの微小変位の関係を表す係数ベクトル Γ_{px} , Γ_{py} , Γ_{pz} , Γ_{Ω_x} , Γ_{Ω_y} , Γ_{Ω_z} が求まる。

3.3 キャリブレーション法の定式化 測定の簡単化に対応するため, エンドエフェクタの位置姿勢すべてのデータを必要としない順運動学に基づくキャリブレーション法を用いる。

順運動学に基づくキャリブレーション法の手順を以下に示す。まず, 入力値として適当な駆動関節変位を与える。その入力値に対応するエンドエフェクタの位置姿勢の測定値を得る。また, 入力値からモデルの機構パラメータを用いて順運動学計算により推定値を求める。測定値と推定値との差が小さくなるようにモデルの機構パラメータを変更し, 新たに変更された機構パラメータを用いて, 順運動学計算により推定値を求めなおす。これを測定値と推定値の差が十分小さくなるまで繰り返す。

順運動学に基づくキャリブレーションは以下のような更新式 (24) で行う。添え字 n は更新回数である。

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{P}_n + \mathbf{F}^+ \delta\mathbf{X}_{\Sigma n} \quad (24)$$

ここで, $\delta\mathbf{X}_{\Sigma}$ はエンドエフェクタの位置姿勢の測定値と推定値との差を測定点数分について縦に並べたベクトルである。これは, すべての測定点において位置姿

勢6自由度の測定値がそろっている必要は無い。また、 Γ^+ は機構パラメータとエンドエフェクタの位置姿勢の微小変位の関係を表す行列である。これは、係数ベクトル $\Gamma_{px}, \Gamma_{py}, \Gamma_{pz}, \Gamma_{\Omega_x}, \Gamma_{\Omega_y}, \Gamma_{\Omega_z}$ のうち、位置姿勢6自由度のうち得られた測定値によって使用するものが決定され、それらを縦に並べてできる行列の擬似逆行列をとることで求めることができる。

本手法におけるキャリブレーションによって機構パラメータを推定するためには、式(24)の方程式が解を持たなければならない。式(24)が解を持つためには、係数行列 Γ^+ のランクが低下しないことが必要である。つまり、エンドエフェクタの位置姿勢の微小変位が与えられたときにすべての機構パラメータの微小変位が決定されるという可観測性が必要である。しかし、位置姿勢6自由度の測定データが1点も与えられていないとき、キャリブレーションが成功しないことがわかっている⁽¹⁾⁽⁸⁾。これは、小関らが解析しているように⁽¹⁾、測定自由度を限定することで推定できない機構パラメータが現れて可観測でなくなり、係数行列 Γ^+ のランクが低下するためと考えられる。

よって、本報告におけるキャリブレーションでは、1点の測定点においては6自由度すべてを測定し、その他の測定点においては、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転を測定することとした。したがって、本報告で提案するキャリブレーションは、1点の測定点に関しては、係数ベクトル $\Gamma_{px}, \Gamma_{py}, \Gamma_{pz}, \Gamma_{\Omega_x}, \Gamma_{\Omega_y}, \Gamma_{\Omega_z}$ を使用し、その他の測定点に関しては係数ベクトル $\Gamma_{px}, \Gamma_{py}, \Gamma_{\Omega_z}$ を使用し、それらを組み合わせた行列の擬似逆行列を式(24)における Γ^+ に採用した。なお、本報告にて提案した微細格子パターンを用いたエンドエフェクタの位置姿勢測定では6自由度の測定はできない。そこで、5章で説明する実験において、1点必要な6自由度データのうち提案した測定方法で取得できないデータは、水準器による姿勢測定とカメラの焦点合わせによる位置測定により取得した。

4. シミュレーション

提案手法の実現性を検証するためシミュレーションを行った。

4.1 機構パラメータの値 本報告における位置決めは測定座標系におけるターゲット座標系の位置決めである。よって、測定座標系を上述したベース座標系に、ターゲット座標系をエンドエフェクタ座標系とすれば良い。このときの直動固定型パラレルメカニズムステージの各機構パラメータの設計上の座標値およ

び長さは以下のようなものである(単位は[mm])。

- リンクの長さ3種
 $l_{1i} = 87.0, l_{1i} = 62.0, l_{2i} = 62.0 \quad (i = 1, 2, 3)$
- 測定座標系における駆動関節の動作始点を表す列ベクトル
 ${}^bP_{bi} = [164.5 \quad -95.0 \quad -229.5]^T \quad (i = 1)$
- 測定座標系における駆動関節の動作方向を表す単位列ベクトル
 ${}^b\mathbf{a}_i = [-1 \ 0 \ 0]^T \quad (i = 1)$
- ターゲット座標系におけるエンドエフェクタとリンクの結合点を表す列ベクトル
 ${}^eP_{ei} = [0 \quad -65.0 \quad -43.5]^T \quad (i = 1)$

${}^bP_{bi}, {}^b\mathbf{a}_i, {}^eP_{ei}$ は、 $i = 1$ の値を $2/3\pi$ ずつ位相をずらした値となる。

4.2 シミュレーション手順 シミュレーションの手順は以下のようなものである。まず、実機に実現されている機構パラメータを真の機構パラメータと呼ぶ。この真の機構パラメータには設計値を用い、これにより、エンドエフェクタの位置姿勢の測定データを生成する。さらに、この機構パラメータに1%程度の誤差を与えた推定用の機構パラメータを用意する。その推定用の機構パラメータを初期値とし、提案したキャリブレーション法を用いて真の機構パラメータにどの程度近づけることができるかを検証する。

評価指標としては、エンドエフェクタの位置決め誤差 $|\delta p|$ 、姿勢決め誤差 $|\delta \Omega|$ 、さらに、真の機構パラメータと推定用の機構パラメータの間の最終残差を表す機構パラメータ残差 $|\delta \tilde{P}|$ を用いた。

各軸での真値と推定値との並進誤差を $\delta p_{rex}, \delta p_{rey}, \delta p_{rez}$ 、回転角度誤差を $\delta \Omega_{rex}, \delta \Omega_{rey}, \delta \Omega_{rez}$ と表す。このとき、位置決め誤差を、

$$|\delta p| \equiv \sqrt{(\delta p_{rex})^2 + (\delta p_{rey})^2 + (\delta p_{rez})^2} \quad (25)$$

姿勢決め誤差を、

$$|\delta \Omega| \equiv \sqrt{(\delta \Omega_{rex})^2 + (\delta \Omega_{rey})^2 + (\delta \Omega_{rez})^2} \quad (26)$$

と定義する。また、各機構パラメータに添え字 r, e でそれぞれ真値と推定値を表現する。このとき機構パラメータ残差を次のように定義した。

$$|\delta \tilde{P}| \equiv \left(\sum_i \left(\frac{|{}^bP_{bi,r} - {}^bP_{bi,e}|}{|{}^bP_{bi,r}|} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{|{}^b\mathbf{a}_{i,r} - {}^b\mathbf{a}_{i,e}|}{|{}^b\mathbf{a}_{i,r}|} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{|{}^eP_{ei,r} - {}^eP_{ei,e}|}{|{}^eP_{ei,r}|} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{|l_{1i,r} - l_{1i,e}|}{|l_{1i,r}|} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{|l_{2i,r} - l_{2i,e}|}{|l_{2i,r}|} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

直動固定型パラレルメカニズムステージの基準位置姿勢は ${}^eP_g = [0 \ 0 \ -10]^T, {}^e\Omega_g = [0 \ 0 \ 0]^T$ である。位置

決める領域を、直動固定型パラレルメカニズムステージの動作領域を考慮し、基準位置を中心とした $-5 \leq x_c \leq 5$ [mm], $-5 \leq y_c \leq 5$ [mm], $-15 \leq z_c \leq -5$ [mm] とし、この領域への位置決めを直動固定型パラレルメカニズムステージのタスクとする。この領域において満遍なく選択した 100 点の位置、およびランダムに選択した姿勢に対して位置決めを行い、その時の機構パラメータ残差、位置決め誤差、姿勢決め誤差それぞれの平均値を求め、評価を行った。

4.3 結果と考察 はじめに、アルゴリズムの実現性を検証するために測定誤差を考慮せずシミュレーションを行った。ここでは、位置データは位置決めを行う領域から満遍なく与えた。姿勢データはランダムに与えた。エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転のみの測定を 100 点とし、位置姿勢すべてを測定する測定点を 1 点とした。このときキャリブレーション計算は成功し、その結果、機構パラメータ残差と位置決め誤差、姿勢決め誤差の平均値はそれぞれ以下のようなオーダとなった。

$$\begin{aligned} |\delta \tilde{\mathbf{P}}| &\leq 1.0 \times 10^{-10} \\ |\delta \mathbf{p}| &\leq 1.0 \times 10^{-10} \text{ [mm]} \\ |\delta \boldsymbol{\Omega}| &\leq 1.0 \times 10^{-12} \text{ [deg]} \end{aligned}$$

与える測定点の組み合わせを変化させ、シミュレーションを 100 回繰り返したがいずれも同様のオーダの結果を得た。十分収束しているため、アルゴリズムとして、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化したキャリブレーションにおいて、1 点の 6 自由度データを与えることで、完全に機構パラメータを推定できることを示せた。

なお、100 点の測定点においてエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転のみの測定データに限定し、キャリブレーションを行った結果、キャリブレーション計算が成功せず、機構パラメータが求まらなかった。このとき、収束演算において係数行列 $\mathbf{\Gamma}^+$ のランクが低下し、方程式が解を持つ条件を満たしていなかった。一方、エンドエフェクタの位置姿勢すべてを測定する測定点を 1 点与え、その他の点に関してはエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定データに限定したキャリブレーションにおいては、収束演算において係数行列 $\mathbf{\Gamma}^+$ のランクが低下することはなく、方程式が解を持つ条件を満たしていた。

次に、本手法によるキャリブレーションにおいて測定誤差の影響を考察するために、測定誤差を考慮したシミュレーションを行った。微細格子パターンを用い

たエンドエフェクタの位置姿勢測定法を想定し、位置に平均 0 [mm]、標準偏差 1.0×10^{-3} [mm]、姿勢に平均 0 [deg]、標準偏差 1.0×10^{-1} [deg] の正規分布に従う測定誤差を考慮した。測定誤差を考慮した測定点は、推定用の機構パラメータから作成されたエンドエフェクタの位置姿勢データに正規分布に従い設定された乱数を足し合わせることで作成した。

まず、与える測定データをエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転に単純化したキャリブレーションと、測定を限定せずに 6 自由度すべての測定データを与えたキャリブレーションとの比較のシミュレーションを行った。位置データは位置決めを行う領域から満遍なく与えた。姿勢データはランダムに与えた。以下の 2 種類のキャリブレーションについて、その結果の比較を行った。まず、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化した場合として、1 つの測定点 (基準位置姿勢) に関しては位置姿勢すべてを、残りは水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定点数を 0 から 100 まで 10 ずつ変化させキャリブレーションを行った。また、測定を限定せずにすべての測定点にて 6 自由度すべてのデータを使用した場合として、位置姿勢測定点数を 0 から 100 まで 10 ずつ変化させキャリブレーションを行った。以上 2 種類の場合について、機構パラメータ残差、位置決め誤差、姿勢決め誤差の平均値を取得した。図 8 は、縦軸に機構パラメータ残差の平均値を、横軸に、測定を単純化した場合は水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定点数を、測定を単純化していない場合は位置姿勢測定点数を表したグラフである。図 9 は、横軸は図 8 と同様で、縦軸に位置決め誤差の平均値を表したグラフである。図 10 は、横軸は図 8 と同様で、縦軸に姿勢決め誤差の平均値を表したグラフである。

これらの結果から、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化したキャリブレーションは、測定を単純化しないキャリブレーションと比較すると、測定誤差の影響を大きく受けており、機構パラメータ残差、位置決め誤差、姿勢決め誤差それぞれにおいて、精度が劣る結果となった。しかし、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化していても、測定データ数を増やすことで測定誤差の影響を小さくすることができ、精度が改善されることがわかった。

次に、位置データを取得する領域の大きさについてのシミュレーションを行った。位置データを、基準位置から $x_c y_c$ 平面において、 $-\frac{W}{2} \leq x_c \leq \frac{W}{2}$ [mm], $-\frac{W}{2} \leq y_c \leq \frac{W}{2}$ [mm] の領域で各軸 1.0 [mm] 刻みで与え、 z_c 軸にお

Fig. 8 The residual error of kinematic parameters and the number of the pose measurement

Fig. 9 The position error and the number of the pose measurement

Fig. 10 The orientation error and the number of the pose measurement

いて7種類 $z_c = -4.5, -3, -1.5, 0, +1.5, +3, +4.5$ [mm] を与えることで、合計567点を与えた。つまり、基準位置を中心とした各辺が $x_c y_c z_c$ 軸に平行な直方体領域の中から位置データを与え、その直方体の x_c 軸方向、 y_c 軸方向の1辺の長さ W を変化させてキャリブレーションを行い、得られた機構パラメータによる機構パラメータ残差、位置決め誤差、姿勢決め誤差の平均値を取得した。姿勢データはランダムに用意し、どの W においても同じものを与えた。図11は、縦軸に機構パラメータ残差の平均値を、横軸に W を表したグラフである。図12は、横軸は図11と同様で、縦軸に位置決め誤差の平均値を表したグラフである。図

Fig. 11 The residual error of kinematic parameters and the size of the measurement area

Fig. 12 The position error and the size of the measurement area

Fig. 13 The orientation error and the size of the measurement area

13は、横軸は図11と同様で、縦軸に姿勢決め誤差の平均値を表したグラフである。

これらの結果から、エンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化したキャリブレーションにおいて、測定点を取得する領域を大きく取ることによって、機構パラメータ残差、位置決め誤差、姿勢決め誤差を改善できることがわかった。

5. 実験

提案手法の有効性を検証するため実験を行った。微細格子パターンを用いた測定法によって、エンドエフェクタの567点の位置姿勢について測定を行った。それ

らの測定結果のうち、500点をキャリブレーションに、残りの67点を評価に用いた。位置データは、基準位置から $x_c y_c$ 平面において、 $-4 \leq x_c \leq 4$ [mm]、 $-4 \leq y_c \leq 4$ [mm]の領域で各軸1.0[mm]刻みで与え、 z_c 軸において7種類 $z_c = -4.5, -3, -1.5, 0, +1.5, +3, +4.5$ [mm]を与えることで、合計567点を取得した。姿勢データはランダムに与えた。

すべての機構パラメータを推定するためには最低1点の位置姿勢すべての測定データを必要とする。そこで本実験では基準位置姿勢の6自由度の測定データを以下のように取得した。 x_c 軸、 y_c 軸に関する並進と z_c 軸に関する回転は微細格子パターンを用いた測定法にて取得する。 x_c 軸、 y_c 軸に関する回転は、測定精度 ± 0.1 [deg]の水準器を用いて測定した。また、エンドエフェクタが基準位置のときに、顕微鏡の対物レンズを動かし焦点が合うところで測定座標系を固定した。このとき、カメラの焦点合わせの機能により計測した結果、測定座標系からキャリブレーションターゲットまでの距離が8.8[mm]であり、これを z_c 軸の測定値とした。 z_c 軸の測定に誤差があっても、本実験では測定座標系における z_c 軸方向の直動固定型パラレルメカニズムステージの設置位置が上下するだけで、その他の機構パラメータの推定には影響が無いと考えられる。基準位置姿勢を除く566点に関しては微細格子パターンを用いた測定法により x_c 軸、 y_c 軸に関する並進、 z_c 軸に関する回転の測定を行った。

キャリブレーション用500点の ${}^c p_{x_g}$ 、 ${}^c p_{y_g}$ 、 ${}^c \Omega_{z_g}$ (内1点は位置姿勢すべて測定)によりキャリブレーションを行い、得られた機構パラメータを用いて評価用67点の位置姿勢に位置決めしたときの位置決め誤差を求めた。ただし、本実験でいう位置決め誤差とは x_c 軸、 y_c 軸に関する並進の値に関する誤差である。評価の指標として以下のものを用意した。 j 番目($j=1, 2, \dots, 67$)の評価用の測定点について、測定値の x_c 軸、 y_c 軸に関する並進をそれぞれ p_{xmj} 、 p_{ymj} 、順運動学によって求めた推定値の x_c 軸、 y_c 軸に関する並進をそれぞれ p_{xnj} 、 p_{ynj} と表す。 x_c 軸に関する誤差を d_{xj} 、 y_c 軸に関する誤差を d_{yj} とする。つまり、

$$d_{xj} = p_{xnj} - p_{xmj}, \quad d_{yj} = p_{ynj} - p_{ymj} \quad (28)$$

である。このとき、 x_c 軸に関する誤差 d_{xj} 、 y_c 軸に関する誤差 d_{yj} の平均値をそれぞれ、

$$e_x = \frac{\sum_{j=1}^{67} e_{xj}}{67}, \quad e_y = \frac{\sum_{j=1}^{67} e_{yj}}{67} \quad (29)$$

と表す。ここで $\mathbf{e} = (e_x, e_y)$ とすると、これは誤差の分布の中心を表している。また、分布の中心のノルムを

Fig. 14 Error distribution

ea とし次のように求めた。これが位置決め誤差の平均値と考えることができる。

$$ea = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (30)$$

さらに誤差の分布のばらつきの指標として、 x_c 軸、 y_c 軸の各軸ごとの標準偏差 es_x 、 es_y から、そのノルム es を求めた。

$$es = \sqrt{es_x^2 + es_y^2} \quad (31)$$

これは誤差の分布の広がりを表している。

キャリブレーション前つまり設計上の機構パラメータによる位置決め誤差の分布の中心は $\mathbf{e} = (0.0128, 0.0030)$ [mm]、位置決め誤差の平均値は $ea = 0.0131$ 、分布の広がり $es = 0.170$ [mm]であった。キャリブレーション後つまりキャリブレーションによって得られた機構パラメータによる位置決め誤差の分布の中心は $\mathbf{e} = (-0.0221, 0.0110)$ [mm]、位置決め誤差の平均値は $ea = 0.0248$ 、分布の広がり $es = 0.0054$ [mm]となった。また、各評価用の測定点における x_c 軸に関する誤差 d_{xj} の値を横軸に、 y_c 軸に関する誤差 d_{yj} の値を縦軸にプロットしたグラフを図14に示す。

これらの結果から分かるように、位置決め誤差の分布の中心にオフセットが出たが、分布の広がりが大きく改善されており、微細格子パターンによるキャリブレーションの有効性を示すことができた。

しかし、オフセットの発生することにより、位置決め誤差の平均値が24.8[μm]という結果となった。これは、本手法が1点の測定点を除き、エンドエフェクタの6自由度の測定データを使用せず、測定データをエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転に単純化したものであることと、測定データを取得した領域が 8×8 [mm]と限られていたことによって、与えられたデータに偏りが生じたことが原因として考えられる。このように、本手法では測定データを限定することによってキャリブレーション精度の劣化を招く可能性がある。しかし、大掛かりな測定装置を必要とせず、エンドエフェクタの位置姿勢測定を単純化でき

る。キャリブレーションにおいては、エンドエフェクタの位置姿勢測定が最も労力を必要とする作業であると考えられる。よって、測定を単純化することでキャリブレーション精度の劣化の原因となっても、簡単に測定できることに有用性があると考えられる。また、顕微鏡と微細格子パターンはアプリケーションで使用するものであり、これらを利用すれば、キャリブレーションのために新たな測定装置や、実際の作業を行う際の作業座標系との新たな座標合わせが必要無い。

本実験ではキャリブレーションターゲットとして、 10×10 [mm] の領域に 1.0 [μ m] のピッチの格子パターンを描画したものを使用した。格子パターンのピッチをより細かなものにすれば測定の分解能は向上し、測定精度が向上する可能性がある。また、より広範囲で測定できるように描画面積の大きなキャリブレーションターゲットを使用することで、シミュレーションで示したように、精度の改善が望める。さらに、本実験では 500 点の測定データを使用した。これもシミュレーションで示したように、より多くのデータを用いれば精度を改善できる可能性がある。格子間隔をより細かなものとする、使用する測定データを増やすこと、測定領域(格子パターンの描画面積)を拡大することは、高精度な測定装置の開発や大掛かりな測定装置の利用に比べると、比較的簡単に行うことができる。

6. お わ り に

本報告では、顕微鏡下に設置するパラレルメカニズムステージを対象に、微細格子パターンを用いたエンドエフェクタの位置姿勢測定によるキャリブレーション法を提案し、シミュレーションおよび実験によってその実現性および有効性の検証を行った。本報告の結論は以下の通りである。

- 微細格子パターンと顕微鏡を利用したエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定方法の提案を行った。顕微鏡と微細格子パターンはアプリケーションに使用するものであり、これらを利用すれば、キャリブレーションのための新たな測定装置や実際の作業を行う際の作業座標との座標合わせが必要無い。
- 直動固定型パラレルメカニズムステージを対象に、1 点の測定点においてのみエンドエフェクタの位置姿勢 6 自由度の測定を行い、その他の測定点では水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定に単純化したキャリブレーションについてシミュレーションを行い、その実現性を示した。また、測定を単純化しても、その測定データ数を増やす

こと、また測定領域を大きく取ることで、より高精度なキャリブレーションを行うことができることを示した。

- 直動固定型パラレルメカニズムステージを対象に、微細格子パターンを用いた測定によりエンドエフェクタの水平方向の並進と垂直軸周りの回転の測定を行った。得られた測定値を用いて実験を行い、提案手法の実現性、有効性を示した。提案手法の実現性を理論的に示すことはできていないが、測定の単純化が図れること、実験により位置決め精度向上を確認できていること、などにより実用上は有効な手法である。

文 献

- (1) Yoshihiko Koseki, et al.: "Accuracy Evaluation of Parallel Mechanism Using Laser Tracking Coordinate Measuring System", *Keisoku Jido Seigyo Gakkai Ronbunshu (Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers)*, **34-7**, (1998), 726-733
- (2) Hiromichi Ota, et al.: "Study of Kinematic Calibration Method for Parallel Mechanism -2nd report, Kinematic Calibration Using Forward Kinematics-", *Seimitsu Kogakkaishi (Journal of the Japan Society of Precision Engineering)*, **66-10**, (2000), 1568-1572
- (3) Yukio Takeda, et al.: "Kinematic Calibration of In-Parallel Actuated Mechanism Using Fourier Series -1st Report, Calibration Method and Selection Method of the Set of the Measurement Paths-", *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)*, **68-673**, (2002), 2762-2769
- (4) Gand Shen, et al.: "Kinematic Calibration of In-Parallel Actuated Mechanism Using Fourier Series -2nd Report, Experimental Investigations", *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)*, **69-682**, (2003), 1691-1698
- (5) Soichi Ibaraki, et al.: "A study on the Improvement of Motion Accuracy of Hexapod-type Parallel Mechanism Machine tools -2nd report, A Calibration Method to Evaluate Positioning Errors on the Global Coordinate System-", *Seimitsu Kogakkaishi (Journal of the Japan Society of Precision Engineering)*, **70-4**, (2004), 557-561
- (6) Pierre Renaud, et al.: "Experimental Evaluation of a Vision-based Measuring Device for Parallel Mechanism-tool Calibration", *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2002), 1868-1873
- (7) Tatsuo Arai, et al.: "Mechanism Design and Motion Control of Finger Module for Micro Hand", *Nihon Robotto Gakkaishi (Journal of the Robotics Society of Japan)*, **15-3**, (1997), 402-407
- (8) Wataru Tanaka, et al.: "Calibration Method with Simplified Measurement for Parallel Mechanism", *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)*, **71-701**, (2005), 206-213