

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—

大 岩 孝 彰** 片 岡 順 洋***

A Calibration Method for Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism
-Calibration with Double Ball Bar and Touch Trigger Probe-

Takaaki OIWA and Yorihiro KATAOKA

This study has proposed a new coordinate measuring machine (CMM) based on a three degree-of-freedom parallel mechanism. This paper describes a kinematic calibration method using a double ball bar (DBB) system with fixed ball distance. The CMM with a touch trigger probe measures the moving ball of the DBB, and calculates position errors of the ball using kinematic parameters. The least square method using Jacobian matrix corrects gradually the kinematic parameters so that the position errors are minimized. The above calculations have been repeated in both numerical simulations and experiments. The position error approaches a zero level, but has never reached it. The calibration with 19 parameters decreased the position errors of the DBB from 168 μm to 9 μm in the experiments. Furthermore, accuracies of both length measurement with block gauges and profile measurement with an optical flat have been improved after the calibration. The measurement accuracy most improves when the repetitive operation is discontinued after three or five calculations.

Key words: coordinate measuring machine, parallel mechanism, calibration, kinematic parameter, double ball bar

1. 緒 言

パラレルメカニズムは、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自由度パラ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。

パラ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ボールプレートを校正用アーティファクトとして用いてきた⁴⁾。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可能となる。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。その校正の不確かさは用いたCMMのそれに依存するが、ボール数が増加すれば不確かさは増大し、パラレルメカニズムの校正においても正しいパラメータが推定できなくなる。

従来よりCMMや工作機械の精度検定用にDBB(Double-Ball-Bar)法⁵⁾⁶⁾が用いられ、パラレルメカニズムの校正においても多

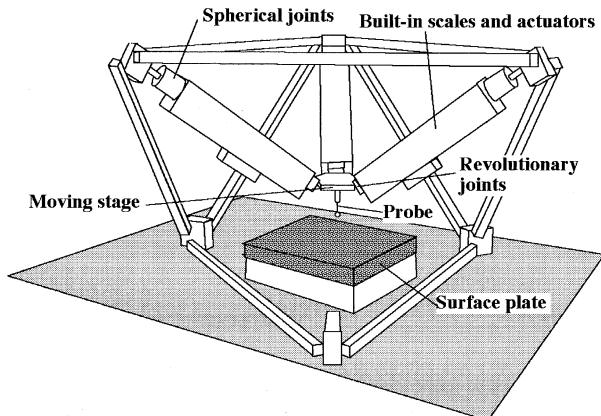


Fig. 1 Proposed CMM based on parallel mechanism

用されてきている^{7)~9)}。そこで本報でも、一次元の測長機による値づけが可能で構造がシンプルなDBBを用い、搭載したタッチトリガープローブで測定した座標誤差からプローブを含めた機構のキャリブレーションが可能かを検討する。

2. 原 理

2.1 ダブルボールバー

DBBは図2に示すようにボール間の距離が固定のもの⁵⁾と伸縮可能なバーの伸縮量を変位計で測定できる構造のもの⁵⁾¹⁰⁾がある。DBBは片方のボールの球面座部分を工作機械やCMMの定盤やワークテーブル上などに固定する。そして多くはもう片方をツールやプローブを取り外した機械のスピン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。そこで本報ではDBBの片方の球も定盤上に設置し、これをタッチプローブで測定するタイプ⁵⁾を採用することとした。図3に使用するDBBの概略を

* 原稿受付 平成14年6月26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、日本精工㈱):東京都品川区大崎1-6-3)

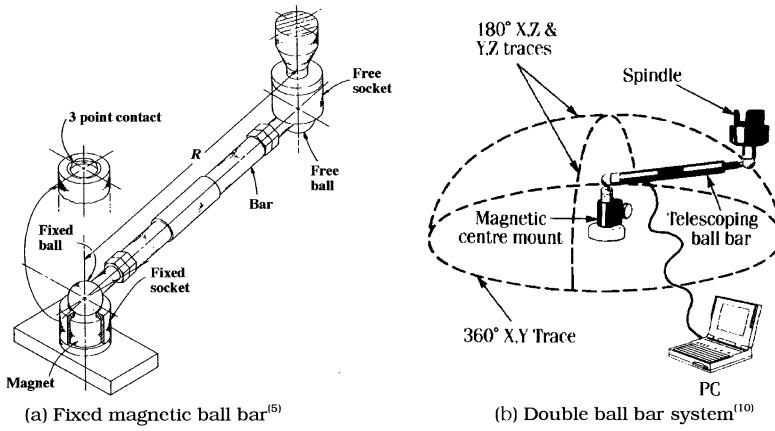


Fig. 2 Two type of double ball bar systems

示す。DBB は測定領域中央に固定した固定球と、固定長のバーの一端に接着された移動球からなる。バーの他端部分は円すい内面に加工されており、内蔵した磁石により固定球を吸着する。固定球および移動球は 1" の軸受用鋼球 (SUJ 2, グレード 5, 公称真球度 0.13 μm) を使用した。固定球を定盤上に固定する柱部分およびバーは、測定中の熱膨張の影響を少なくするために、低膨張材料にて製作した。まず、この DBB の二つの球の球径と中心距離 r を測長機により値づけしておく。この値づけには一次元の測長機を用いるため、CMM によるポールプレートの校正と比較して高精度に行うことができる。移動球は固定球の周りを球面運動する。この球面の半径は上述の r となる。移動球の固定のためには高さの調整のできるVプロックを用いる。

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 4 に示すベース上の球面ジョイントの位置を円筒座標系で表す r_{Bi} ($i=1, 2, 3$) および θ_{Bi} 、ステージ上の回転ジョイントの位置・姿勢を表す r_{Si} , θ_{Si} , α_{Bi} および γ_{Bi} 、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。これらのうち、既報¹⁾において回転ジョイントの円周方向角度のパラメータ θ_{Si} は推定が困難であった。そこでステージ全体の寸法が比較的小さいことから、高精度な直交座標型 CMM にて直接測定したものを用いることとし、本報では直接測定が困難な残りの最大 19 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、測定誤差すなわちプローブ先端の位置誤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¹¹⁾。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と同一である。はじめに、DBB の固定球の中心座標を測定し、つぎに移動球の中心座標を本 CMM にて測定する。さらに移動球を測定空間内で移動し、同様に移動球の中心座標の測定を行う。機構パラメータに誤差がない場合、移動球中心の座標測定値は固定球を中心とし半径 r の球面上に乗るはずであるが、実際には機構パラメータには誤差があるため、測定点は球面に対して偏差を持つ。この測定点の半径方向誤差すなわち球面に対する法線方向誤差を位置誤差 $\Delta r = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ とし、この誤差の自乗和が最小となるような機構パラメータを推定する。

微小運動学によれば、パラメータ $\phi = [r_{Bi}^T, \theta_{Bi}^T, \dots, l_s^T]^T$ に微小な誤差 $\Delta\phi = [\Delta r_{Bi}^T, \Delta\theta_{Bi}^T, \dots, \Delta l_s^T]^T$ が存在したときの位置誤差は

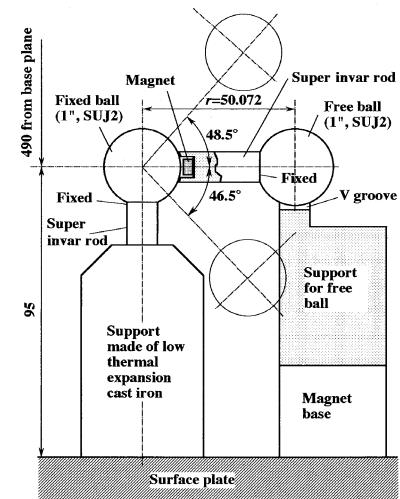


Fig. 3 Double ball bar system with fixed length bar

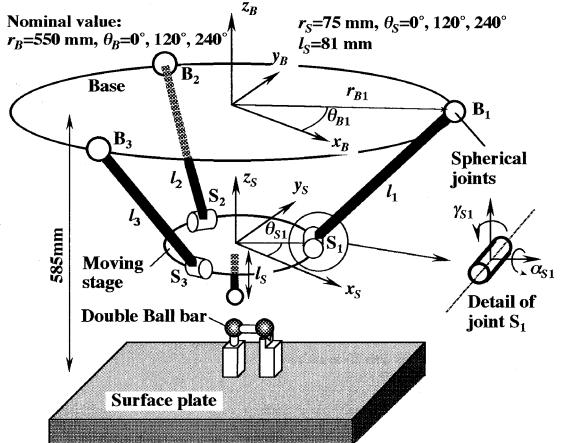


Fig. 4 Kinematic parameters of the CMM using 3-DOF parallel mechanism and DBB

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

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。 j 個目のボールでの位置誤差を Δr_j 、ヤコビ行列を $J_{\phi j}$ とすると、

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \Delta r_2 \\ \vdots \\ \Delta r_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} J_{\phi 1} \\ J_{\phi 2} \\ \vdots \\ J_{\phi n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

である。 $\Delta\phi$ の最小二乗法による推定値は

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

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} が一定値に収束するまで繰り返す。各繰り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DBB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、DBBの移動球の配置を検討する。

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) 測定領域中心に配置した仮想球面（半径 $r=50$ 、中心座標 $[0, 0, -490]^T$ ）に任意の n 点の測定点の座標 $\mathbf{r}_j = (x_j, y_j, z_j)^T$ ($j = 1 \sim n$) を決め、各点にプローブ先端を移動したときの

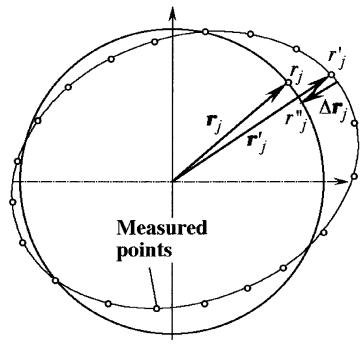


Fig. 5 Relation between measured points and position errors

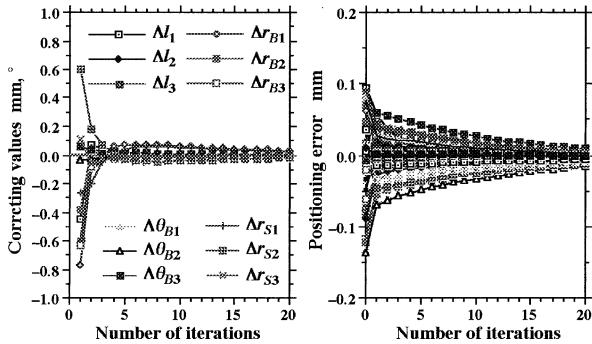


Fig. 6 Correcting values of kinematic parameters and position errors during iteration in DBB simulation

- 3 本のリンク長さの伸縮量 l_i を逆運動学計算で求める。
(2) 長さのパラメータについてはランダムに最大 $\pm 0.5\text{mm}$, θ_{Bi} などの角度のパラメータは $\pm 0.5^\circ$ の誤差をパラメータの設計値に与え, (1) で求めたリンク長さを用いて順運動学計算を行い, n 点の測定点座標値 $\mathbf{r}'_j = (x'_j, y'_j, z'_j)^T$ を計算する。
(3) パラメータの誤差により, 球面上の点 r_j は r'_j に移動するが, 実際の測定時には当然 r_j の位置を知ることはできなかったため, 測定点 r'_j を r''_j に戻すベクトル, すなわち r'_j から球面までの最短距離となるベクトル $\Delta \mathbf{r}_j$ を位置誤差とする(図 5 参照)。
(4) 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。
(5) プローブ先端の位置誤差とパラメータ修正量が 0 に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

2.3 節で述べた 22 個のパラメータのうち, まず 12 個 (r_{Bi} , θ_{Bi} , r_{Si} , l_i) を推定した。移動球の配置は 3.4 節で述べる $\psi = \pm 80^\circ$ の配置を用いた。繰返し計算中のパラメータ修正量と位置誤差の変化の例をそれぞれ図 6 に示す。既報⁴⁾における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, 本報の場合は収束の速度が遅く, 正しい機構パラメータは推定できなかった。

位置誤差の最大幅と計算繰返し数の関係を図 7 に示す。この図から位置誤差を $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下にするためには数百回の計算が必要であることがわかる。1000 回の繰返し計算後の位置誤差は約 $230\text{ }\mu\text{m}$ から $0.3\text{ }\mu\text{m}$ (0.13%) まで減少した。以上の収束の遅い理由は, 測定点を正しい座標値に戻していない, つまり図 5 において $\Delta r_j \neq r'_j - r_j$ としているからであると思われる。

3.3 長さ測定シミュレーション

推定したパラメータの組合せの妥当性を検証するために, 本節ではブロックゲージを想定した 2 点間の長さ測定のシミュ

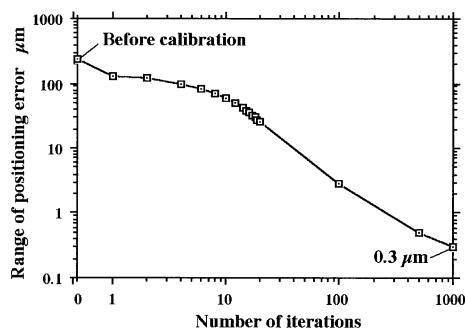


Fig. 7 Range of position errors during iteration in DBB simulation

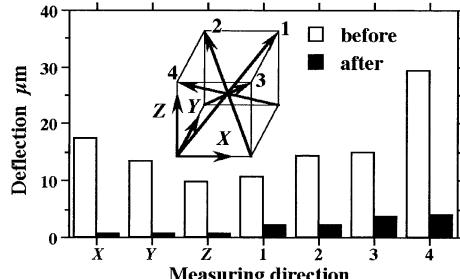


Fig. 8 Calculated simulation deflection in length measurement

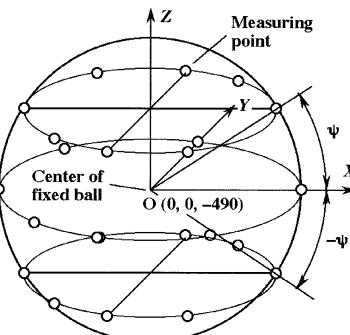


Fig. 9 Range of position errors during iteration in DBB simulation

レーションを行う。仮想ブロックゲージの配置は, 定盤上 ($Z = -490$ および -440) 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。18 箇所の測定値から得られた最大偏差の絶対値を図 8 に示す。長さ測定の精度が向上 (7 方向平均で $15.7\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 2.0\text{ }\mu\text{m}$) していることから, 推定したパラメータが妥当であることがわかる。

3.4 移動球測定点数と配置による影響

本節では, 移動球の測定点の数や配置を変化させ, パラメータ推定結果に及ぼす影響について調査する。ここで仮想球面上の測定点の配置に関するパラメータを図 9 のように設定し, 1 円周上の測定点の数を n_c とする。

まず, $n_c = 4$ で図 9 の円周が 3 段の場合について, $\psi = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, \psi = -40^\circ, 0^\circ, 40^\circ, \psi = -60^\circ, 0^\circ, 60^\circ, \psi = -80^\circ, 0^\circ, 80^\circ$ と変化させていった。この配置においてパラメータ推定と長さ測定のシミュレーションを行った結果を図 10 に示す。 ψ の範囲が広がるにつれて XYZ 軸方向の長さ測定誤差や 7 方向の標準偏差が減少することがわかる。対角線方向ではやや誤差が増加する傾向があるが, ψ の範囲は $\pm 40^\circ$ 以上が良いと考えられる。

次に, 最上段と最下段を $\psi = \pm 80^\circ$ とし, 測定円の数を増加させて同様のシミュレーションを行った。1 円周上の測定点の数は $n_c = 4$ としたため, 測定円の増加に伴い総測定点数は増加す

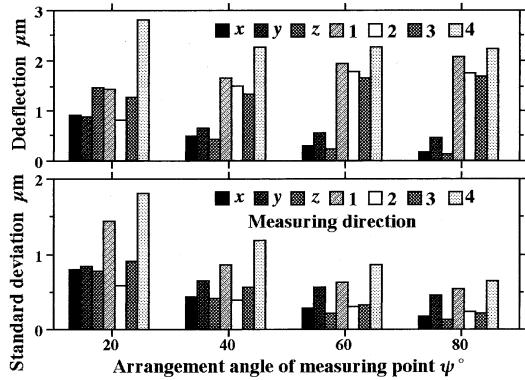


Fig. 10 Effect of angle ψ on length measurement accuracy in simulation

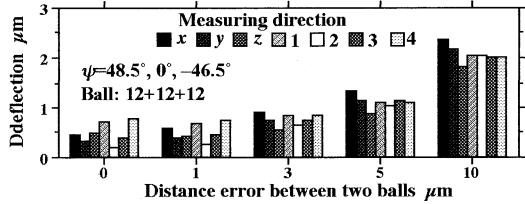


Fig. 11 Effect of distance error between two balls on length measurement accuracy in simulation

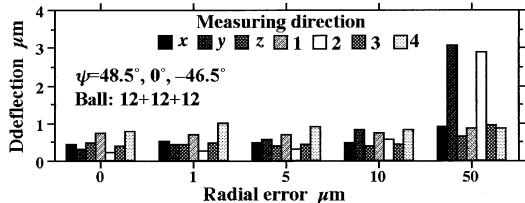


Fig. 12 Effect of radial motion error of ball and radial probing error on length measurement accuracy in simulation

るが、長さ測定シミュレーションでは精度の向上は見られなかった。したがって、測定円の数を増加させるよりも広い領域に配することが重要であると思われる。

さらに測定点を上下の極点 2 点 ($\psi = \pm 90^\circ$) と赤道上 ($\psi = 0^\circ$) に配した場合において、赤道上に配する測定点数を 12 点から 36 点まで変化させて計算を行った。測定点の増加に伴い、長さ測定誤差および標準偏差とも 2 割程度減少することがわかった (7 方向平均で $2.55 \rightarrow 2.00 \mu\text{m}$, 標準偏差: $1.09 \rightarrow 0.85 \mu\text{m}$)。以上をまとめると、測定円の数は 3 で、 n_c は多い方がよいことがわかった。

3.5 ポールバーの誤差の影響

DBB はあらかじめ測長器などで値付けをしておく必要があるが、その誤差がパラメータ推定に及ぼす影響を調査するために、ポール中心間距離 r に $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の大きさの誤差を与えた。長さ測定シミュレーションの結果を図 11 に示す。誤差は徐々に増加するが、球中心間距離誤差は $1 \mu\text{m}$ 以下であれば、パラメータ推定結果への影響は考えなくてもよいと思われる。

つぎに、DBB の移動球の回転運動誤差、および移動球をタッチプローブで測定して求める場合に発生するプローピング誤差の影響を調査するために、測定点座標に種々の大きさの誤差を半径方向にランダムに与えた結果についてパラメータ推定と長さ測定シミュレーションを行った。結果を図 12 に示す。誤差を $\pm 10 \mu\text{m}$ 与えた場合でも長さ測定誤差の影響が増大しないことがわかる。誤差の方向を半径方向だけではなく、XYZ 方向にランダムに与えた場合についても同様の結果を得た。 r の誤差とは異なり、ランダムに発生するプローピング誤差は、測定点が多

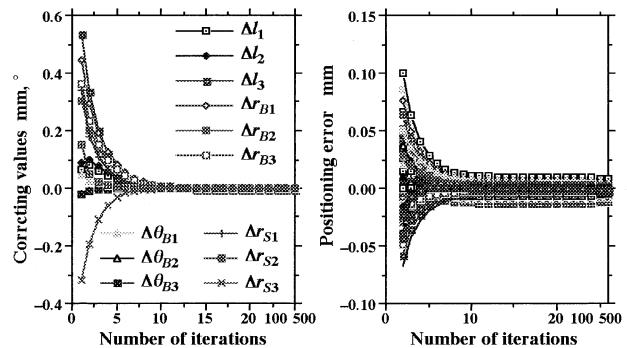


Fig. 13 Correcting values of kinematic parameters and position errors during iteration in experiments

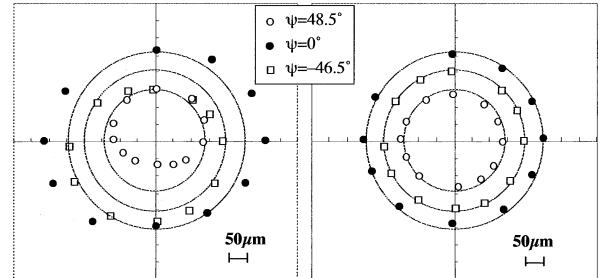


Fig. 14 Position errors before/after calibrations in XY plane

いために平均化されていると推察される。

4. 実機によるキャリブレーション

4.1 推定結果

実際に CMM の試作機⁴⁾にて図 3 で示した DBB の移動球の座標値を測定し、2.4 節で示した方法にてパラメータ推定を行った。移動球の配置は $\psi = -46.5^\circ, 0^\circ, 48.5^\circ$ の 3 円周上とし、各円周あたり 11~12 点の測定点を測定した。まず 3.2 節と同様にパラメータを 12 個として推定を行った。計算は最大 500 回まで行った。繰返し計算中の修正量と位置誤差の変化を図 13 に示す。図 6 に示したシミュレーションの場合と同様に、修正量と位置誤差ともに減少する。位置誤差は $167.9 \mu\text{m}$ から $19.25 \mu\text{m}$ (11%) へ減少した。

また図 14 は推定前と計算終了後の測定点の座標を XY 平面内で表したものである。位置誤差は 200 倍に拡大して示してある。推定前にはだ円状に測定点が配置されているが測定後ではほぼ球面上にあり、パラメータが修正された結果、位置誤差が減少していることが確認できる。

4.2 パラメータの数の影響

実際に機械のキャリブレーションを行う場合、メカニズムの持つすべてのパラメータを推定しなくても、位置決め精度が向上することが知られている³⁾。そこで、本節では推定するパラメータの数を徐々に増加させて、キャリブレーションの精度を調査することにした。2.3 節および前節で用いた 12 パラメータに、図 4 に示す回転ジョイントの位置角度 γ_{Si} ($i=1, 2, 3$) を加えたものを 15 パラメータ、さらにそれに α_{Si} を加えたものを 18 パラメータ、最後にプローブ長さ l_s を加えたものを 19 パラメータとした。パラメータ数とパラメータ推定後の位置誤差の大きさの関係を図 15 に示す。パラメータ数が増加するにつれ、位置誤差も徐々に減少する。さらなるパラメータの増加も試みたが、既報と同様に、回転ジョイントの位置角度 θ_{Si} を加えると計算は収束せず発散した。

4.3 球面部品によるパラメータ推定

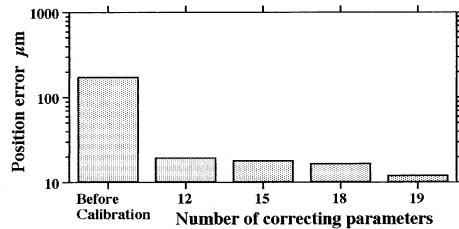


Fig. 15 Relation between number of parameters and position error before/after calibrations

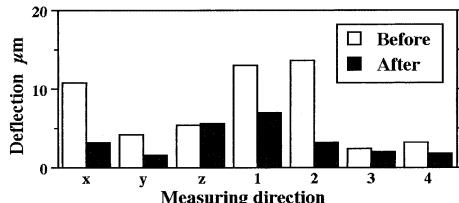


Fig. 16 Measured deflections of block gauge before/after calibrations

ここまで DBB による移動球の運動によって得られた仮想球面を基準面としてパラメータ推定を行ってきたが、本節では高精度な球面部品による推定の可能性を検討した。DBB の代わりとして、径4" (101.6 mm) の軸受用鋼球 (SUJ 2, グレード 100, 公称真球度 2.5 μm 以下、実測 0.7 μm 以下) を用いた。測定点数 31 点、19 パラメータにて推定を行った結果、推定前に 129.4 μm だった位置誤差が 21.4 μm に減少した。DBB では 167.9 μm → 11.6 μm であり、4" 球より良い結果となった。この理由として、DBB では比較的小径な固定球自身を測ることにより仮想球面の中心座標を比較的高精度に得ることができるのに対して、4" 球では大径球の表面を測定して得たデータから中心座標を推定しているため誤差が生じやすいことが挙げられる。

5. 測定精度評価

本章では 3.3 節と同様に、4 章で推定した機構パラメータを用いて実際に座標測定を行い、測定精度の向上を確認する。

5.1 ブロックゲージとオプティカルフラットの測定

まず、定盤中央部にブロックゲージ (0 級、長さ 10 mm) を置き、XYZ 軸に沿った 3 方向の長さ測定を行って偏差の絶対値を求めた結果を図 16 に示す。7 方向の平均値で 7.51 μm が 3.24 μm へ半減 (-57%) した。さらに、面精度 $\lambda/4$ のオプティカルフラット (BK7, 130 × 130 mm) の形状を測定した結果では、校正前に 18.0 μm 程度 (標準偏差 : 3.35 μm) あった Z 方向偏差が 5.16 μm (標準偏差 : 1.08 μm) へと減少 (-71%) した。以上のように推定したパラメータを用いれば、CMM の測定精度が向上されることが確認できた。しかし、既報にて報告した 3D ポールプレートによる校正では、XYZ 方向のブロックゲージの長さ測定で、18~21 パラメータでの平均値で 1.7 μm 程度が得られている (DBB では 3.4 μm)。オプティカルフラットの測定では、12.8 μm (標準偏差で 3.2 μm) → 3.9 μm 程度 (標準偏差で 0.7 μm) であり、既報のデータより良い精度は得られなかった。この理由として、DBB のほうが値づけは簡単であるが、校正時に移動球を手作業にて 30箇所以上移動する際に時間を要した (DBB : 約 4 h, 3D ポールプレート : 約 2 h) ため、機構やフレームの熱変形の影響を大きく受けたと推察される。

5.2 繰返し計算回数の影響

既報における実機によるパラメータ推定では、繰返し計算を 3 回で打ち切った場合に最も測定精度が良好なパラメータが得ら

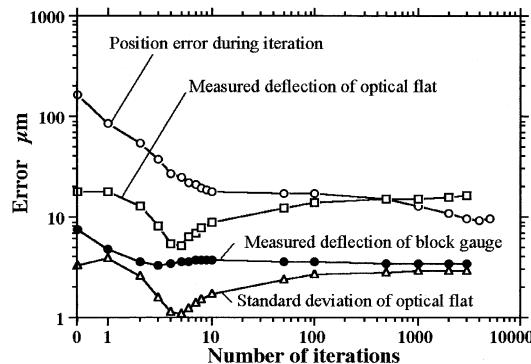


Fig. 17 Relation between number of iterations and position error before/after calibrations

れた。そこで、繰返し計算中の位置誤差とその時点のパラメータを用いてブロックゲージおよびオプティカルフラットの測定誤差を再計算したものを図 17 に示す。繰返し計算中の移動球の位置誤差は計算回数が多いほど減少するのに対して、ブロックゲージなどの測定誤差は既報と同様に 3~5 回程度で計算を打ち切ったほうが良好な結果が得られることがわかる。

6. 結 言

本研究の成果は以下のようによ約できる。

- (1) DBB とタッチトリガープローブを用いて、パラレルメカニズムの機構パラメータを推定した。
- (2) シミュレーションおよび実機において DBB の位置誤差は繰返し計算中に 0 に近付くが、収束の速度は遅い。
- (3) 実機にて最大 19 個のパラメータを推定した結果、DBB の移動球の位置誤差が 0.17 mm から 9 μm へ減少した。
- (4) ブロックゲージの長さ測定とオプティカルフラットの形状測定を行い、測定精度の向上を確認した。
- (5) 実機では、最小二乗法の繰返し計算回数を 3~5 回で終了した場合が最も測定精度が向上した。

本研究の一部は科研費補助金平成 13 年度基盤研究 (C)、平成 13 年度基盤研究 (B) により行われた。DBB の校正には株浅沼技研にご高配頂いた。以上記して謝意を表する。

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 3 次元測定器を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集、A (1997) 463.
- 3) 太田浩充、渋川哲朗、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) 大岩彰彦、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) —立体制的なポ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) J. B. Bryan : A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools, Precision Engineering, 4, 2, (1982) 61.
- 6) 堀野義昭、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.
- 7) 太田浩充、渋川哲朗、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.
- 8) Yukitoshi Ihara, Takahiro Ishida, Yoshiaki Kakino, Ziye Li, Tetsuya Matsushita and Masao Nakagawa : Kinematic Calibration of a Hexapod Machine Tool by using Circular test, Proc. 2000 Japan-USA Flexible Automation Conference, 2000JUSFA-13100.
- 9) 沈崗、武田行生、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法、日本機械学会第 1 回機械潤滑設計部門講演会講演論文集、(2001) 133.
- 10) レニショーカタログ。
- 11) 川崎晴久 : ロボット工学の基礎、森北出版、(1991) 98.