空間座標の比較測定によるCMMの校正(第1報)*

ーパラメトリックエラーモデルの構成とそのシミュレーションー

阿部 誠** 高増 潔*** 大園成夫*** 沢辺雅二†

Geometric Calibration of CMM by Utilizing Spatial Coordinate Comparison (1st Report)

- Design of Parametric Model and Its Simulation -

Makoto ABBE, Kiyoshi TAKAMASU, Shigeo OZONO and Masaji SAWABE

A series of papers presents a new calibration method particularly for up to a middle size CMM. The method is able to provide the 21 parametric errors only by performing the coordinate comparison. An automated calibration system for the production stage of CMMs is realized. The first report describes basic structure of the linear parameter model which establishes relation between spatial displacement deviation observed by the coordinate comparison and the linearly combined parametric error components of the CMM. A simulation on a simple guide way example with six independent freedoms is performed to verify functionality of the model. The result shows that 96 parameters expressing six parametric errors are possible to be handled simultaneously. It is confirmed that the parametric errors are estimated with sufficient resolution to apply the model to the calibration of CMMs.

Key words: CMM, coordinate measuring machine, calibration, parametric error, compensation

1. 緒 言

座標測定機 (Coordinate Measuring Machine, 以下 CMM) に幾何偏差の数値補正技術が採用されるようになってから, CMM のコスト対パフォーマンスの比は大幅に向上している. この技術は今日の CMM のシステムを構成する要素として欠くことのできないものになっている. ところが校正前の CMM の幾何偏差は, 部品の加工や表面仕上げ, 更には組立ての履歴に依存して変化する. 結果として 1 台 1 台が異なる特性を示すことになる. よって, 能率が高く, 要求精度を満たした上で自動化が可能な校正の方法の実用化が望まれるが, 従来方法¹⁾はこの要求にこたえているとはいいがたかった.

例えばレーザ干渉測長機は CMM の校正に広く採用されている. その到達し得る精度は現在入手できる機器の中では高いものと考えられるが, 操作性の悪さと高価格等の負の要因は, 低価格化の進む汎用 CMM の校正に採用するのに妨げとなってきた. 一方, ボールプレート²⁾に代表されるアーティファクトを使用した方法が最近注目を浴びている. これは安価で操作性の良い校正を行うことができる利点を有する反面, CMM の測定空間内での測定点配置に自由度がほとんどない. この特性は CMM の校正事業者や使用者の要求にはこたえ得るとしても, 製造者の要求に対して十分であるとはいえない.

本研究は能率と品質が両立し, 生産現場に展開が可能なパラメトリックエラー⁴⁾による CMM の校正方法を提案するものである. ここで, パラメトリックエラーとは系統的にふるまう幾何学的な偏差を運動学的なパラメータにより記述したものと説明される. CMM の構造は 1 軸案内機構を互いに直交するよう

に 3 つ組み合わせたものといえるので, 1 軸あたり 6 自由度, さらに互いの姿勢に 3 自由度, 合計では 21 自由度の系と考えられる. 1 つの自由度は例えば真直度等を表し, これを複数のパラメータにより数式表現することは可能である. そこで本研究では 1 つの自由度を, 対応する 1 セットのパラメトリックエラーにより記述することにする.

まず校正される CMM (以下被校正 CMM) の幾何偏差の情報を空間座標の比較測定法により収集する. これは基準機として扱われる CMM と被校正 CMM の 2 台を図 1 に模式的に示すように対向して設置し, 後者の 3 次元的な指示偏差の情報を自動的に収集し得る方法であり, その詳細については別報で報告する. 次に得られた指示偏差と被校正 CMM の幾何偏差を関連付ける大規模なモデルを構築し, これを連立させて解くことを検討する. 校正結果としては 21 セットのパラメトリックエラーが一括して算出される. 得られた校正結果は被校正 CMM の構造に依存して決まるガイドウェイの形状偏差として幾何偏差を表現できるだけでなく, 数値補正にそのまま使用することが可能である. また, 2 台の CMM を使用して比較測定を行うの

Fig.1 Schematic of spatial coordinate comparison

* 原稿受付 平成 11 年 4 月 21 日

** 正 会 員 (株) ミットヨ (川崎市高津区坂戸 1-20-1)

*** 正 会 員 東京大学工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

† 名誉会員 (株) ミットヨ (川崎市高津区坂戸 1-20-1)

で、完全に自動化された校正システムの実現が期待される。

第1報は空間座標の比較測定で得られる被校正CMMの指示偏差とパラメトリックエラーとの関連付けを表現するモデルについて述べ、その効果をシミュレーションにより検証した結果について報告する。

2. 幾何偏差のモデル化

校正を目的としてCMMの幾何偏差を表現する方法には、例えばCMMの構造の運動学的特性に注目するか否かによって、大まかに次の2つの分類を考えることができる。

- (1) 偏差テーブルで測定空間をグリッド状に埋める⁸⁾。
- (2) 運動学的なパラメータ³⁾を自由度の数だけ組み合わせる。

前者は、測定機の構造に関する情報をほとんど必要としない反面、偏差テーブルの大きさゆえに比較的大きな記憶容量を要求する。後者は測定機の運動学的な構造についての情報をモデル化する必要があるが、少ない係数列で構成することが可能である。従来実用化されている例のほとんどは後者に属し⁵⁾、その理由として限られた計算機記憶容量の指摘されることが多かった。ところが、その計算機容量の限界が消滅しつつある現在でも座標測定機自身の測定スループットが大幅には向上しておらず、校正のためのデータ収集に費やされる時間が長いという問題は依然として残っている。校正のためのデータ収集には、偏差テーブルや係数列の容量に比例した点数、すなわち時間が必要とされることから、今後も後者の方法の優位性は続くものと考えられる。本研究でもこれに準じてパラメトリックエラーによるモデル化を採用することにした。

2.1 線形モデルの採用

ここで取り扱う座標測定機は、機械的に直線運動を行うように設計された直線案内機構を、互いに直角をなすように締結することによって直交3軸方向に移動可能とする機構、および各案内機構にリニヤエンコーダ等の1次元位置検出器を有するものである。このような機構は、3つの位置検出器の指示値を3次元位置ベクトルに機械的に代入するだけで、ほぼ直交座標に近い空間位置情報を出力することができる。これをノミナルモデルと呼ぶことにする。この事実からも明らかなが、直交3軸によるノミナルモデルは機構本体を構成する部品寸法の情報を全く含まない。その結果、校正すべき幾何学的偏差が比較的小さい時、21セットのパラメトリックエラーは3軸の位置検出器の指示値のみを入力として表現することができる。また、それぞれのパラメトリックエラーを線形独立な定数係数と基底関数の組合せとして記述しやすい条件が整っていると考えられる。ただしここでの線形独立とは、パラメトリックエラーの次数が1次という意味ではなく、未知の係数列に対して線形独立な性質を示す。未知の係数列に対して線形なモデルが構築できれば、統計的な特性が既に明らかにされている最小二乗法を適用してこれを解くことが可能となる。この点に着目し、CMMの幾何偏差をモデル化することを検討する。

2.2 線形な係数列によるパラメトリックエラーの記述

現実の座標測定機のノミナルモデル X_n は、各案内機構やそれらの締結の誤差によって幾何学的な偏差を示す。そこで理想的な直交座標の位置情報を X_p として予測する変換を、ノミナルモデルと偏差モデル X_e との線形結合を用いて式(1)のように表現することを考える。

$$X_p = X_n + X_e \quad (1)$$

1軸の案内機構は各々6つの自由度を有するので、これらを3

つの並進成分と3つの回転成分として表現すると、偏差モデルは式(2)のようにできる。

$$X_e = e + \varepsilon \times P \quad (2)$$

ただし、 $e = (e_x, e_y, e_z)$: 並進偏差成分

$\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$: 回転偏差成分

P : 有効アーム長さを表すベクトル

式(2)から明かなように、何らかの方法で e と ε を知ることができれば、この式を使ってCMMの測定子座標の校正、及びそれを応用した数値補正を行うことが可能である。有効アーム長さ P は該当する案内機構から出発して測定子位置にいたる位置ベクトルとなり、回転偏差に起因する測定子位置の変動に寄与する。 $\varepsilon \times P = 0$ を満たす測定はアッペの原理を満足するものと説明されるが、通常CMMはこの条件を満たすことができない。式(1)で仮定した線形性が成り立つ条件の下では、対象とするCMMの設計寸法等に従って P の数値をmm程度の確かさで与えれば十分である。この方法による校正や数値補正は、測定子の並進偏差と、回転偏差がもたらすアッペ誤差(並進成分)を予測可能とする。

さらにここで e と ε を、線形な係数列を表す未知のパラメータ β で表示すると式(3)が得られる。

$$\begin{pmatrix} e \\ \varepsilon \end{pmatrix} = F\beta \quad (3)$$

ただし、 F : 適当な基底関数によるデザイン行列

β : 未知パラメータ

式(3)の右辺は21セットのパラメトリックエラーを構成するが、1つのパラメータが1つのパラメトリックエラーに対応する必要はない。例えば、区分多項式のような節点を有する補関関数を採用して基底関数を定義した場合、複数のパラメータが1つのパラメトリックエラーを表現することで式(3)はそのまま適用され得る。

今日まで数々の測定法が知られているが、式(3)にそのまま代入できる測定値を出力する測定法は見い出されていない。本研究で採用する空間座標の比較測定法の場合も同様であり、この測定法が検出し得る量をパラメトリックエラーと対応付ける方法を確立する必要がある。

2.3 解法の検討

式(3)を現実の測定値を使って解く方法には次の2つの分類を考えることができる。

- (1) パラメトリックエラーを1つ1つ分離して測定・計算し、結果を逐次積み重ねる。
- (2) すべてのパラメトリックエラーを一括して計算する。

座標測定機の測定空間において、測定の位置と測定の基準器を適切に選択すると、1つのパラメトリックエラーが支配的で、他のパラメトリックエラーの寄与を無視し得るような測定が可能となることは知られている。例えば有効アーム長さ P が最小となる位置で測定を行えば回転成分が測定値に与える寄与は最小となり、測定値は並進成分を反映したものとなる。このような操作を各パラメトリックエラーに対して順次行って最終的にすべてのパラメトリックエラーを求める方法が前者であり、ここでは逐次法と呼ぶことにする。一方後者では、まず何らかの指針に従ってすべてのパラメトリックエラーが計算によって分離可能な測定の組合せを決定する。これに従って測定値をまとめて収集した後、一括してすべての測定値からすべてのパラメトリックエラーを算出する方法であり、ここでは一括法と呼ぶこと

にする。

ボールプレートを用いた CMM の校正について述べた Balsamo ら²⁾によると、ドイツ PTB は逐次法を、一方イタリア IMGC とベルギーのルーベンカソリック大学は一括法を採用している。また、双方の計算方法から得られた校正結果に差は認められないとしている。ではモデルを解く過程におけるそれぞれの特徴はどうか、以下に列記してみる。それぞれ○は長所、●は短所と考えられる項目を示す。

逐次法

- 式(2)を分割した小規模なモデルで解析が可能。
- 一度に扱う未知数の数が少ない、せいぜい 10 個程度か。
- 測定値から計算結果への誤差の伝播過程が不明りよう。
- 測定は 1 つのパラメトリックエラーが支配的なものに限る。

一括法

- 大規模なモデルを構築する必要がある。
- 一度に扱う未知数の数が多い。
- 測定値から計算結果への誤差の伝播過程は明りよう。
- 結果として式(2)が解ける測定値を与えればよい。

このように一括法はモデルの構築とその解法の整備に労力を要する反面、今後ますます重要となる校正の不確かさの解析に適した特性を有しているといえる。更に、測定手段の選択に制限が少なく、対象とする CMM の構造に対して最適化された測定計画を立案しやすい特徴も備えている。本研究ではこれらの特性に着目して一括法を採用する。

2.4 座標比較測定値とパラメトリックエラーとの関連付け

従来行われた研究の中でこれらに言及している文献は散見される⁹⁾が、いずれもステップゲージ等による 1 次元変位の測定に関するものであり、3 次元的に変位を検出する測定法に関する記述は知る限り見当たらない。以下に検討を行う。まず、基準 CMM の座標系において何らかの方法で 2 台の CMM の座標比較を行うと、偏差ベクトル δX は式(4)の通りとなる。

$$\delta X = X_{ref} - X'_p \quad (4)$$

ただし、 X_{ref} は基準とする CMM の座標指示値、また X'_p は X_p を、被校正 CMM から基準 CMM の座標系へと座標変換した座標指示値である。

ところが、ここで取り扱う被校正 CMM は幾何学的な校正以前のものであり、 X_p や、それを座標変換した X'_p を正確に決定することができない。仮に、既知のノミナルモデルの情報を使い、大まかに決定した座標変換の情報に基づいて X'_p を求めて校正を行うと、パラメトリックエラーには本来含まれない回転と平行移動による等方変換を含むような解析を行うことになる。その解決法として、パラメータ β に加えて、未知の座標変換の情報も線形化してモデルに加えることを検討する。まず、ノミナルモデルに基づく大まかな座標変換は回転変換の行列 R_n と並進移動の位置ベクトル T_n を用いて式(5)の通りにできる。

$$X'_n = R_n X_n + T_n \quad (5)$$

この既知の座標変換によって、被校正 CMM の座標をほぼ基準 CMM のものに変換することができるが、さらに微小な未知の座標変換を導入して偏差モデルを含んだ座標変換を定式化すると、その回転変換の行列 R_d と並進ベクトル T_d により、

$$X'_p = R_d (R_n X_p + T_n) + T_d \quad (6)$$

と書ける。式(6)では未知のパラメータを含む X_p と未知の微小な回転変換を表す行列 R_d が積の形で含まれている。この式は求めるべき未知数に対して非線形となる。しかし、一般に校正されていない座標測定機の幾何学的な偏差量は、案内機構の移

動可能距離で正規化するとたかだか 100ppm のオーダーに満たない。この性質を利用して高次の項を無視し、式(6)をすべての未知数に対して線形となるように近似・変形する。まず回転変換の行列 R_d は式(7)のように線形近似してもさしつかえない。ただし、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ はそれぞれ、 X, Y, Z 軸周りの回転角度とする。また I は単位行列とする。

$$\begin{aligned} R_d &\approx \begin{pmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 1 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 1 \end{pmatrix} \\ &= I + \begin{pmatrix} 0 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 0 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 0 \end{pmatrix} \\ &= I + \delta R_d \end{aligned} \quad (7)$$

これを式(6)に代入すると式(8)が得られる。

$$\begin{aligned} X'_p &\approx (I + \delta R_d) R_n (X_n + X_e) + (I + \delta R_d) T_n + T_d \\ &= R_n X_n + R_n X_e + \delta R_d R_n X_n + \delta R_d R_n X_e + T_n + \delta R_d T_n + T_d \end{aligned} \quad (8)$$

高次の微小量を無視すると、

$$X'_p \approx (R_n X_n + T_n) + R_n X_e + \delta R_d (R_n X_n + T_n) + T_d \quad (9)$$

ここで、式(2)を次のように変形すると式(10)が得られる。

$$\begin{aligned} X_e &= e + \varepsilon \times P \\ &= e - P \times \varepsilon \\ &= e - U_{(P)} \varepsilon \\ &= (I - U_{(P)}) \begin{pmatrix} e \\ \varepsilon \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

なお $U_{(P)}$ は、 $U_{(P)} \cdot \varepsilon = P \times \varepsilon$ なる関係を満たす 3×3 行列である。

また、 $\delta R_d \cdot X'_n$ について、

$$\begin{aligned} \delta R_d X'_n &= \begin{pmatrix} 0 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 0 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X'_{nx} \\ X'_{ny} \\ X'_{nz} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & X'_{nz} & -X'_{ny} \\ -X'_{nz} & 0 & X'_{nx} \\ X'_{ny} & -X'_{nx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \\ &= U_{(X'_n)} \Theta \end{aligned} \quad (11)$$

なる変形を行い、これらを式(3)、(5)と共に式(9)に代入すると次式が得られる。

$$X'_p = X'_n + R_n (I - U_{(P)}) F \beta + U_{(X'_n)} \Theta + T_d \quad (12)$$

よって、

$$\delta X = X_{ref} - X'_n - (R_n (I - U_{(P)}) F \quad U_{(X'_n)} \quad I) \begin{pmatrix} \beta \\ \Theta \\ T_d \end{pmatrix} \quad (13)$$

式(13)はすべての未知数に対して線形である。この式において δX を最小化、すなわち基準 CMM と被校正 CMM の座標指示値の差異を最小化する問題は、既存の線形最小二乗法を使って解 β を求めることによって解くことができる。なお、 Θ, T_d はそれぞれ未知の微小な回転変換と並進移動を表すパラメータである。これらは式(1)が記述するモデルには含まれないが、 β を一括して計算するためには同時に未知数として取り扱う必要がある。

3. パラメータ推定シミュレーション

前章で述べたモデルの有効性を確認するためにシミュレーション実験を行う。ところで、実在の CMM の構造を対象にして前章のモデルを解くと連立方程式がかなり大規模なものになり、

その評価結果を明らかに示すことが容易ではない。例えば、パラメトリックエラーと未知数が 1 対 1 に対応する最小の場合には 21 の未知数となる。しかし現実の CMM では、案内機構の反りやうねり、1 次元位置検出器のリニアリティなど、パラメトリックエラーに直接に影響する要因の振る舞いは校正が終了するまで未知である。従って各軸案内機構の凹凸の分布や形状が未知といえるからパラメータの数は飛躍的に増大せざるを得ない。時に 1 軸あたり 100 元、3 軸では 300 元を超える方程式を取り扱う必要もあり得る。

そこで、単純化のために 1 軸 6 自由度からなる案内機構を評価対象として設定することにした。1 軸 6 自由度の系は 3 次元空間中の 6 自由度をすべて含んでいるので CMM の幾何偏差に寄与する基本的な機構の組合せであると考えてよい。そうすれば実際の CMM の場合はその構造が示すように、この 1 軸の系を 3 段に積み重ね、さらに互いの位置関係を決める直角度のパラメータを 3 つ追加したものと解釈することができる。ここでのシミュレーションの結果は、実際の CMM に線形モデルを適用した場合の有効性を確認するための十分な判断材料を与えるものと考えている。

3.1 シミュレーションの条件設定

シミュレーション対象を模式的に図 2 に示す、この真直案内の移動方向を X 軸方向とし、スライダがその上を移動する構造を想定する。案内機構にはリニアエンコーダ等の 1 次元位置検出器が取り付けられ、スライダの X 軸方向の位置を読み出すことができるものとする。スライダの幾何学的な挙動は位置検出器の直線性や案内機構の真直度等の要因によって影響を受ける。

スライダ上には、その挙動を観察するために小球が 4 個固定され、測定に供される。これらは YZ 面で観察するとガイドの中心に対して 4 象限等配に ($\pm 200, \pm 200$)mm の位置に固定されている。スライダの有効ストロークは 1000mm とする。1 軸案内機構の自由度を並進 3 と回転 3 による合計 6 自由度として表すことにしているが、正確にいうとガイドウェイが矩形である必要も、またスライダの支持点スパン等が既知である必要もない。取扱いの便利のためには、真直ガイドに沿ってスライダの重心等で代表される微小体が移動した軌跡をガイドの形状とみなし、前記自由度はこの微小体の振る舞いに適用され则认为ればよい。

ここで、既に校正され、無視し得る程小さい系統偏差しか発生しない座標測定機を基準器として使用できるものと仮定する。また、1 軸案内機構は一定時間の間、所定の位置に静止して位置決めできるものとする。まず、図 2 の機構をこの座標測定機の測定空間の任意の位置・方向に設置する。次に、座標測定機のタッチシグナルプローブ等を使用して前記した測定用小球の中心座標を測定・算出すると同時に 1 軸案内機構のリニアエンコーダの指示値を読み出す。この作業を 4 個の小球の各々について 1 軸案内機構の全ストロークにわたって適当なピッチで繰り返す。こうして得られた座標測定機の座標指示値と 1 軸案内機構の指示値の対からなるデータを座標の比較測定値としてファイルする。このファイルの内容は式(13)に直接代入が可能な数値である。これに既知の最小二乗法を適用してパラメータ β を同時推定することにした。

3.2 参照偏差とそれを含むシミュレーションデータの発生

まず作業に先立ち、参照すべきパラメトリックエラーを発生する必要がある。実在する、ある真直案内機構の測定結果を参

Fig.2 Schematic of linear guide way model

Fig.3 Reference parametric errors for simulation

Table 1 Notations of parametric errors for linear guide way

Notation	Description	Popular name
Txx	Translation in X	Indication error
Tyx	Translation in Y	Straightness in Y
Tzx	Translation in Z	Straightness in Z
Rxx	Rotation in X	Roll
Ryx	Rotation in Y	Pitch
Rzx	Rotation in Z	Yaw

Fig.4 Enhanced deformation of modeled guide way by reference parametric error

考にして図 3 のパラメトリックエラーを参照値とすることにした。図中上段の Txx から下段の Rzx までの表記の内容を表 1 に記す。また、検討する案内機構の幾何偏差に対して、図 3 に示すパラメトリックエラーが及ぼす影響を概観するために各エラーの寄与を拡大して図 4 に示す。おおまかに述べると上下方向に反り、X 軸方向にねじれている様子が認められ、図 3 の Ryx、

R_{xx} からその傾向を読み取ることができる。

ある位置に 1 軸案内機構が停止する時、4 つの小球の中心座標は上記パラメトリックエラーによって理想的な位置に対して幾何学的な偏差を示す。なお、パラメトリックエラーの角度成分はアッペ誤差をもたらす他に小球の姿勢自体をも変化させるが、小球の中心座標推定値への寄与は無視し得る。スライダを X 軸に沿って 40mm ごとにインクリメンタルに位置決めする時、パラメトリックエラーがもたらす球の中心座標の幾何偏差を 4 つの小球各々について逐次計算する。案内機構のフルストロークにわたってこの操作を行った結果の例を図 5 に示す。

もし $P=(0, 0, 0)$ mm の有効アーム長さで計算を行えば、その結果となる図 5 が描く曲線は図 3 の並進 3 成分に 1 対 1 で対応する形状を示す。しかし、この図は $P=(0, 200, 200)$ mm の例であるから、パラメトリックエラーの並進成分だけでなく、回転成分と有効アーム長さの積によるアッペ誤差が重畳した結果となる。一見して図 3 のパラメトリックエラーの並進 3 成分との違いが認められる。

図 5 に示すデータを含めて合計 4 組のシミュレーション用の入力データを生成した。各々の入力データは異なる有効アーム長さにおける参照パラメトリックエラーを含んでいる。このことをある X 位置に注目してみると、並進成分は 4 組のデータに対して同一に寄与する。しかし一方の回転成分は有効アーム長さとその方向に依存した、異なった影響を及ぼす。この性質を利用すれば、4 組の入力データのみから式(13)を利用して未知のパラメータを一括して推定することができる。

3.3 パラメトリックエラーの同時推定

ここでは分散を含まない、いわば理想的な入力データによるパラメータ推定を行う。これは前節で発生した 1 軸案内機構の 4 組の入力データを式(13)に代入した結果が期待する有効けたの範囲で図 3 の参照パラメトリックエラーに一致することを確認するためである。実際の CMM の校正を想定すると、未知パラメータの数は 300 個程度に達する場合が予想される。これに従い、1 軸あたり 100 個に近い 96 個の未知なパラメータ β を推定することにする。このパラメータと採用する基底関数の組み合わせによって連続条件が制御された節点を持つ区分多項式を構成すれば、各々の区分多項式のプロファイルは該当するパラメトリックエラーを表現することができる。

6 つのパラメトリックエラーの同時推定を行った結果の中から、 T_{xx} の推定結果を参照パラメトリックエラーと共に図 6 に示す。図中、上側には、シミュレーションで推定されたパラメータ値により描かれた T_{xx} の曲線を実線で、またそれと重なっているが参照パラメトリックエラーを破線で描いている。一方下側の図には推定値による曲線と参照パラメトリックエラーとの差を残差としてプロットしている。ここに示した T_{xx} を含めて並進成分については T_{yx} , T_{zx} 共に、残差の最大値は $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ であった。回転成分を代表して R_{xx} の推定結果を図 7 に示す。ここに示していない R_{yx} , R_{zx} を含めた 3 つの回転成分の残差の最大値は $1.8 \times 10^{-2} \mu\text{m/m}$ であった。推定で得られた 6 つのパラメトリックエラーはすべて図 3 に示した参照パラメトリックエラーとよく一致するとの結果を得ることができた。

3.4 シミュレーション結果の検討

まず、パラメータ推定を行った時の最大残差に注目してみる。並進成分の最大残差 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ と回転成分の $1.8 \times 10^{-2} \mu\text{m/m}$ との間には単位の違いはあるものの、デザイン行列の構成を考慮することで数値のオーダーでのおおまかな比較は可能と考えら

Fig.5 Derived displacement by reference parametric error on sphere with effective arm length $P=(0, 200, 200)$ mm

Fig.6 Example of predicted parametric error component T_{xx} and its residual against the reference value

Fig.7 Example of predicted parametric error component R_{xx} and its residual against the reference value

れる。式(2)より、[基準 CMM の並進測定値]は、[パラメトリックエラーの並進成分]と、[パラメトリックエラーの回転成分]×[有効アーム長さ]との和で与えられる。シミュレーションで代入した有効アーム長さは 0.2m であるから、パラメトリックエラーの回転成分に限って言えば、デザイン行列の数値条件は、並進成分の数値条件の 5 倍悪い値に相当すると考えられる。こ

れに従えば、並進成分の残差が $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ の時に期待される回転成分の残差は $1.5 \times 10^{-2} \mu\text{m/m}$ となり、シミュレーションで実際に得た $1.8 \times 10^{-2} \mu\text{m/m}$ とほぼ一致する。

ここで検討しているように、並進変位の測定値のみから回転成分を含むパラメトリックエラーを求めるには、有効アーム長さを通して検出された並進変位と回転成分を関連付ける必要がある。よって計算の都合を考えれば有効アーム長さはなるべく長いほど回転成分の演算の条件は改善される。実際には機構部品の剛性や質量の制限がこれとトレードオフの特性となるので、対象とする機構に適切な有効アーム長さが存在する。

ところで、選択する基底関数や採用する計算手法の特性にも依存するが、通常はパラメータ数の増加にしたがって最小二乗法に伴う数値演算の条件は悪化することが知られている。この数値演算の条件の悪さをデザイン行列の条件数で評価すると、本シミュレーションの場合は 2×10^5 であった。おおまかに述べると入力データの数値を計算機の内部表現に従って取り扱った場合、その丸め誤差等の影響が 10^6 倍されてパラメータに伝播することになり、得られるパラメータの有効けたがその分だけ減少することを意味する。ここでのシミュレーション結果を見る限り、式(13)は、その数値的な条件は決して良好ではないものの、CMM のパラメトリックエラーの同時推定を行うには十分な計算精度を持っていると判断して良いと考えられる。

4. 結 言

空間座標の直接比較測定による CMM の校正システムを検討するにあたり、CMM の指示値とパラメトリックエラーとの関係を記述するモデルを提案した。また、1軸6自由度の案内機構を対象としてシミュレーション実験を行い、このモデルの基本的な検証を行った。なお、この1軸の系はCMMの幾何偏差に寄与する3次元空間中の6自由度をすべて含むので、提案したモデルを実在のCMMに適用する際の有用な判断材料を与えるものと考えている。得られた結論を以下に記す。

- (1) CMM の 21 セットのパラメトリックエラーを表現する一般的な線形モデルを示した。
- (2) パラメータの線形性を保ちながら、座標の比較測定で得られる測定値を上記の線形モデルに代入可能とする方法を示

した。このモデルは既存の最小二乗法で解くことが可能である。

- (3) 1軸6自由度のシミュレーションを設定し、6セットのパラメトリックエラーを表現する 96 個のパラメータを 4 組の座標比較測定のデータ列のみから同時推定できることを示した。
- (4) 幾何学的な偏差が 100ppm に満たない案内機構にこの線形モデルを適用する場合、実用上十分な計算精度でパラメータが推定可能なことを示した。
- (5) 並進に加えて回転成分を含むパラメトリックエラーを並進変位の測定値のみから推定する場合、なるべく長い有効アーム長さを複数組み合わせると、回転成分については数値演算の条件が改善されることを示唆した。

本報告では入力データに分散を含まない、理想的な場合のパラメータ推定をシミュレーションした。入力データにばらつきを含む場合のシミュレーション結果とその考察について次報に報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) P. Cauchick-Miguel et al. : CMM Verification: A Survey, Measurement, 17, 1, (1996) 1.
- 2) A. Balsamo et al. : Results of the CIRP-Euromet Intercomparison of Ball Plate-based Techniques for Determining CMM Parametric Errors, Ann. CIRP, Vol.46/1, (1997) 463.
- 3) K. Busch et al. : Calibration of Coordinate Measuring Machines, Prec. Eng., 7, 3, (1985) 139.
- 4) H. Kunzmann et al. : A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects, Ann. CIRP, Vol.39/1, (1990) 561.
- 5) S. Sartori et al. : Geometric Error Measurement and Compensation of Machines, Ann. CIRP, Vol.44/2, (1995) 599.
- 6) J. A. Soons et al. : Modeling the Errors of Multi-axis Machines: A General Methodology, Prec. Eng., 14, 1, (1990) 561.
- 7) G. Zhang et al. : A Displacement Method for Machine Geometry Calibration, Ann. CIRP, Vol.37/1, (1988) 515.
- 8) 大矢 誠ほか：三次元座標測定機の精度向上に関する基礎的研究、(誤差ベクトル分布の測定法)、日本機械学会論文集(C編), 52, 473, (1986) 336.

編 集 後 記

昭和40年代生まれの私にとって、テレビは物心がついたときからすぐそばにあった最も身近な友達であり、当時、我が家にあった真空管とよばれる電球を細長くしたようなガラス玉がたくさん入ったタンスのようなテレビは、インテリアの一部であると同時に冬場には暖房器具としても活躍しておりました。一方、絵本にでてくる未来予想図では、壁掛けテレビが、夢の超特急（当時新幹線は走っていたのでリアモーターカー）、空飛ぶ自動車、腕時計型テレビ電話などと並び、必須のアイテムのひとつでした。数年前、某ファミリーレストランでプラズマディスプレイが壁に掛かっているのを見たときには、もう少しで21世紀なんだなと思って大変感動いたしました。また、最近都心の駅前で、辺り一面が明るくなるような明るさの巨大なテレビ（おそらくはLEDディスプレイなのでしょう）を見かけることが多くなりましたが、画面の前で青色を含めた高輝度LEDの光に照らされていると、不景気な世の中も少しずつ明るくなっていくのかなぁなんて、単純に思ってしまう。不景気といえば、80年代には生活を豪華にするために様々な投資を

行ってきた日本の産業は、バブル景気の終焉を迎えると同時に、豪華さよりも省力化や合理化などの節約をすることに重きを置かざるを得なくなってきました。牛丼屋さんのコピーをお借りすれば「うまい・やすい・はやい」の3つの価値観の重点が、「うまい」から「やすい」に移動してきているような気がするのです。もちろん、節約は普遍的な美德ではありますが、個人的には生活を改善する新しいシーズの創出のほうが魅力的なのではないかと思います。そういう観点からすると、今回特集を担当させていただいた新しい画像出力装置はまさに、生活の「うまさ」を向上する素敵な技術であり（最近のテレビよりも彫刻様の装飾が施された大きな箱に入った昔のテレビの方が豪華だというご意見もあるかとは思いますが）、このような特集を担当できたことをとても光栄なことだと感じております。また、私も工学者の一員として絵本に描いてあったような素敵な未来の創造に貢献できればと思っております。

末筆となりましたが、今回の特集をまとめるにあたり、ご執筆をいただいた方々はもちろんのこと、いろいろな面でご協力を下さった皆様に感謝の意を表したいと思います。どうもありがとうございました。

（新野俊樹）