

座標比較による CMM 校正システムの開発(第 1 報)*

試作システムの構成とその基本的な評価

阿部 誠** 高増 潔*** 大園 成夫***

Development of calibration system by spatial coordinate comparison (1st report)

- Design of prototype system and its primary evaluation result -

Makoto ABBE, Kiyoshi TAKAMASU and Shigeo OZONO

A new calibration system for up to a middle size CMM is developed. The spatial coordinate comparison method is realized for the practical system by applying direct coordinate comparison between the reference CMM and the object one through measurement of the sphere feature. The first report describes results from conceptual consideration of the method and evaluation experiment of the prototype system for confirming its primitive performance. The experiment is performed on a conventional CMM with measuring volume of 500x400x400 mm³ and resolution of 0.5 μm. The result shows that the prototype system is able to provide the complete parametric errors of the object CMM in the fully automated manner as the calibration result which minimizes the observed systematic deviation.

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

1. 緒 言

座標測定機 (Coordinate Measuring Machine, 以下 CMM) に幾何学的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おり, 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. 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ているが, 従来方法はこの要求にこたえているとは言いがたかった.

著者らは 2 台の CMM を直接に比較測定することによって, 校正される CMM (以下被校正 CMM) の幾何学的偏差をパラメトリックエラー⁴⁾ により校正する方法を提案した¹⁾. これにより CMM の生産現場に展開が可能な自動化された校正システムを構築し得る可能性があると考えている. この時, 比較測定の計測の不確かさを定量化することができれば, それが校正結果へ伝播する過程を統計的に記述することによって, 校正結果の不確かさを理論的に定量化することは可能である³⁾. 幾何学的な校正結果を評価する時, 客観的な基準に従った不確かさを定量化することの重要性は広く認知されている. 本研究の成果は単に校正の自動化をもたらすだけではなく, この不確かさの点においても, 近年の校正技術への要請にこたえたものであると考えている.

さて, 2 台の CMM を比較測定して得られる幾何学的偏差と被校正 CMM のパラメトリックエラーとの関係は, 既存の最小二乗法で一括して解くことが可能な線形モデルにより記述できることが明らかになっている²⁾. また, 線形系の誤差伝播則をこの線形モデルに応用することにより, 校正結果として算出されるパラメトリックエラー曲線の信頼性の幅を定量化することも

可能なことがわかっている³⁾.

これらの知見をもとに, 2 台の CMM の比較測定によって幾何学的偏差を校正する図 1 のシステムを開発したので, その概要と基本的な性能の評価結果について報告する.

2. 校正の標準

CMM の幾何学的偏差の校正には種々の標準が使われてきた⁵⁾. ゲージブロック, ステップゲージ等の端度器や, レーザ干渉測長機は, 長さの国際標準とほぼ直結した不確かさを保証できるので, 長い間 CMM の校正用基準器として主流を占めてきた. ところが近年検討が進められている CMM のトレーサビリティの確立にあたっては, これらと異なるアーティファクトによる校正技術が注目されている^{6,7)}. 後者は, 安価で容易な校正を実現するかわりに, 前者のように長さの標準に直結した校正の不

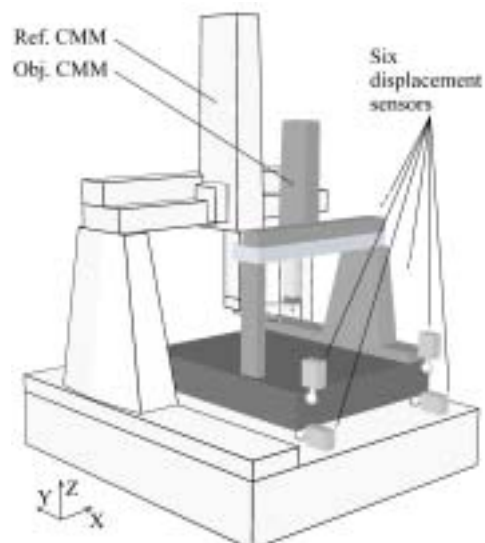


Fig. 1 Schematic of prototype system for spatial coordinate comparison

* 原稿受付 平成 12 年 6 月 5 日

** 正 会 員 (株) ミットヨ (川崎市高津区坂戸 1-20-1)

*** 正 会 員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

確かさの保証は期待できない。そこで、丁寧に校正された高精度な CMM とプロービングシステム等を使ってアーティファクト自身を校正し、その際の校正の不確かさを推定によって算定する方法が採用されようとしている⁸⁾。校正の標準自身の不確かさが重要であることに議論の余地はないが、校正作業の段取りや測定戦略が校正の不確かさに及ぼす影響もそれと同等に重要であることを確認する必要がある。

2.1 空間座標の比較測定

2 台の CMM を対向させて設置し、それらの中で空間座標の比較測定を行うには、例えば、基準 CMM をある位置に位置決めしておき、その測定子として固定した、ある形体を被校正 CMM のプローブ等で測定する方法が考えられる。あらかじめ定めた測定戦略にしたがって基準 CMM を移動、順次位置決めし、形体の測定を繰り返す。これにより被校正 CMM の測定空間を網羅する幾何学的偏差の測定データを得る。得られたデータは文献 2, 3 で報告した線形モデルに代入することが可能であり、校正結果として 21 セットのパラメトリックエラーとその統計的な信頼性を一括して算出することができる。

空間座標の比較測定は測定子位置で検出される並進 3 自由度の情報を直接比較測定しようとする方法なので、それが支配的な形体を介して測定を行うことを考える。既に報告されている例を参照すると、アーティファクト上に設置された測定のための形体としては球が圧倒的に多い^{4, 10-13)}。ただし、その形体を特定の手順で測定し、さらに形体を表現するパラメータを推定した結果の信頼性の分布が等方に近いことが望ましいと考える。これは、その形体を表現するパラメータの信頼性がそのまま被校正 CMM の校正の不確かさに伝播するためである。

2.2 球形体のパラメータ推定

形体の計測の信頼性は測定点の配置により大きく影響を受ける¹⁴⁾。CMM によって球を測定する場合、この形体を表現する 4 つの未知のパラメータを推定することになる。ここで各測定点のばらつきが既知の場合、測定点の配置がパラメータの信頼性に及ぼす影響について考えてみる。

球の測定では赤道上に 90 度等配で 4 点、北極に 1 点の測定点を配置する 図 2 (a) の測定戦略を採用する場合が多い。この 5 点の測定点を用いて球の中心座標と直径を表す 4 つのパラメータを最小二乗法で推定すると 4 つのパラメータの信頼性を記述する誤差行列 S_β は式(1)の通りとなる。この式では各測定点の測定のばらつきが分散にして無次元数 1 の時、測定点の間に相関関係がない場合について、北極方向を Z 方向として計算している。

$$S_\beta = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.25 & -0.5 \\ 0.0 & 0.0 & -0.5 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)の対角成分は 1 行 1 列より、中心座標 X, Y, Z 成分、そして直径を表すパラメータ推定値の分散をそれぞれ示す。中心座標の X, Y 成分については等しい分散が得られているが、Z 方向成分の信頼性は 2 倍以上低い結果となる。この測定点配置で中心座標 3 成分を推定すると、Z 方向の信頼性に余裕を見込む必要のあることがわかる。

ここで、図 2 (b) に示す通り、球面上に均等に分布する 6 点を測定点として採用し、パラメータの推定を行うと、誤差行列 S_β は式(2)の通りとなる。X, Y, Z 方向に等方で、互いに相関のない信頼性の数値を得ることができる。球の測定におけるパラメータ推定の立場からは均等に測定点を配置することが望ましい

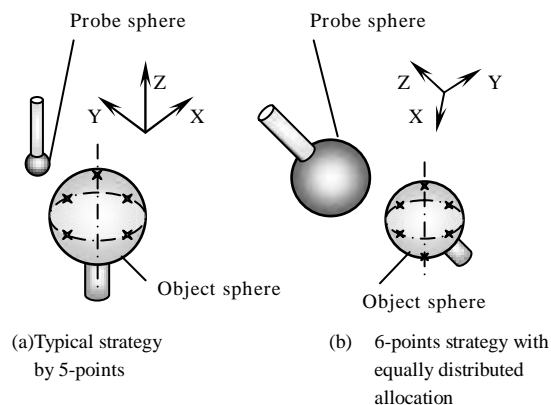


Fig. 2 Measurement strategy of sphere feature

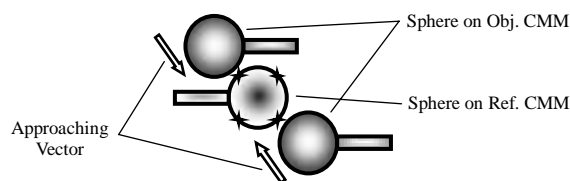


Fig. 3 Possibility of equally distributed allocation

ことがわかる。またこの場合、1 つの測定点のばらつきは、分散にして 1/2 に圧縮されてパラメータに伝播することがわかる。

$$S_\beta = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.67 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、現実の CMM において通常行なわれる球形体の測定では、プローブ球の径が測定される球形体に比べてかなり小さく、均等に測定点を配置することができない。例えば PTB によるバーチャル CMM⁶⁾ で指示されているボールプレートの測定においても、球形体の赤道 4 点、北極 1 点の合計 5 点で測定を行なうことが記されている。そこでは球の中心座標の推定を X, Y 、そして Z 方向すべてに対して行なってはいるが、Z 方向の情報はボールプレートのアライメント用の情報として扱われ、CMM の校正には使われていない。

この問題を回避するために、測定形体の球とプローブ球に同じ直径の球を採用する。簡単な説明のために図 3 に 2 次元的な模式図を示す。この図では、同じ直径の円プローブを採用して均等に配置された 4 つの測定点による円形体の測定を行う場合を示した。円プローブを支持するスタイラスが大きい特殊な場合を除けば 2 つの円プローブが x 印の 4 点で接触することが可能である。現実の CMM 同士の空間座標の比較測定において均等に配置された 6 点による球形体の測定を行う場合も同様であり、推定された球形体の中心座標の信頼性を X, Y, Z 方向に対して等方にすることができる。

2.3 測定戦略の自由度

既に校正された履歴を持つ CMM と異なって何らかの調整が行なわれた場合など、事前に校正された履歴がないとみなされる CMM の場合には、その幾何学的な振る舞いが未知であるから校正のための測定点配置は十分に高い空間的密度で配置される必要がある。レーザ干渉測長機やステップゲージはこの点での自由度が高く、CMM の校正において長い間主流を占めてきた

理由のひとつとなっている。逆にアーティファクトは測定点配置が疎なものほとんどであり、測定点配置の点では限界がある。

本研究は CMM の生産現場に展開が可能な CMM の校正方法を実現することを目的としている。そのためには求められる校正の不確かさを確保した上で自動化の可能性と測定点配置の自由度の高さを両立させる必要がある。そこで、既に校正された基準 CMM を、いわばプログラマブルな三次元ボールグリッドとして取り扱うことによって解決をはかることとする。この方法が実用化できれば単に自動化されたシステムが構築できるだけではなく、採用する基準 CMM の仕様が許す範囲において校正の不確かさが明らかで、かつ被校正 CMM の仕様に応じてプログラマブルな校正システムを構築し得る可能性がある。

3. 校正システムの試作

空間座標の比較測定による校正システムの試作を行なったのでその概要について述べる。CMM の構造については、その運動学的な構成によって数種類の分類がなされている¹⁵⁾。ここでは、最もポピュラーと考えられる門移動型を校正対象とする。基準 CMM、被校正 CMM 共に門移動型を採用すると、被校正 CMM の最大幅が基準 CMM の測定領域に収まるように 2 台の機種選定を行なう必要がある。この制限によって、被校正 CMM の寸法に対して比較的大きな基準 CMM を採用することになる。

今、対象とする測定範囲と、それを確保するために必要な機器の設置空間との比をスペース効率と呼べば、空間座標の比較測定による校正方法はこの点で不利なことが否めない。一般に、精度仕様が向上するにしたがって CMM 自体のスペース効率は低下する傾向にあるので、校正の信頼性の定量化を行なった結果に基づいて、精度仕様と経済性のバランスを検討することが求められる。試作システムに採用した基準・被校正 CMM について、諸元の代表値を表 1 に示す。

3.1 試作システムの概要

図 1 に試作した空間座標の比較測定システムを模式的に示す。基準 CMM の定盤上に被校正 CMM を、その仕様にしたがって 3 点支持により設置する。パーソナルコンピュータをホストとして 2 台の CMM の駆動・位置決めと測定信号の処理を行ない、測定に引き続いてパラメトリックエラーの推定を行なう。測定スピンドル部を拡大して図 4 に示す。被校正 CMM の測定スピンドルには 3 つの異なるプローブ突き出し量を与えるように配置された小球が 3 個取り付けられる。基準 CMM の測定スピンドルには測定用の小球と同径の小球を測定子とするタッチシグナルプローブを取り付ける。このタッチシグナルプローブの信号は 2 つに分岐されて 2 台の CMM コントローラに入力される。

3.2 測定の手順

次の通りの手順で球形体の測定を行う。まずタッチシグナルプローブが取り付けられた基準 CMM を測定戦略にしたがって目標座標に位置決めする。次に、固定された小球が取り付けられた被校正 CMM を移動し、基準 CMM の小球にアプローチして測定する。2 台の CMM のコントローラでラッチされた接触点座標をホストコンピュータに転送する。前述した通り、球面上に均等に配置された測定点を順次測定する。この測定法では固定された小球を支持する側がタッチシグナルプローブを支持する側にアプローチする。これは通常の座標測定のアプリケーションと逆であるが、得られる測定値に寄与する誤差要因とその内容は双方とも同一となる。

Table 1 Brief specification of CMMs for experiment

| | Reference CMM | Object CMM | Unit |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Meas. volume | 800 × 1500 × 600 | 500 × 400 × 400 | mm ³ |
| Resolution | 0.1 | 0.5 | μm |
| Meas. accuracy | 2.0+2.0/1000 × L[mm] | 2.9+4.0/1000 × L[mm] | μm |

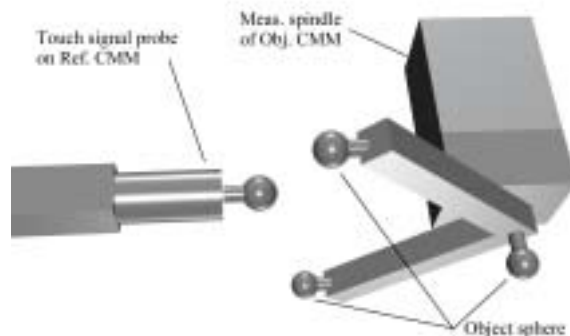


Fig. 4 Close up of meas. spindle of CMMs

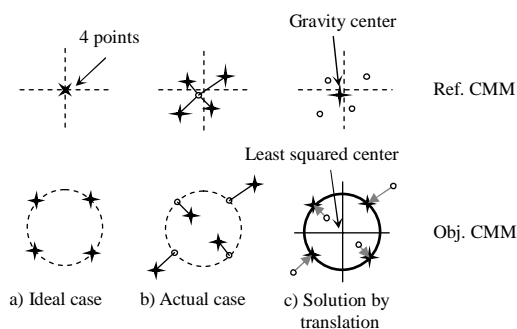


Fig. 5 Handling of positioning deviation of Ref. CMM

CMM の幾何学的偏差を運動学的に記述する 21 セットのパラメトリックエラーを算出する場合、空間中で 1 直線上に並ばない 3 つの異なるプローブ突き出し量を被校正 CMM に設定することが必要十分条件となる。上記の測定法はプローブ用の回転ヘッドや、精度の低下を招きやすいマルチスタイル等の複雑な機構を採用せずにこの条件をみたすことができる利点を持っている。

3.3 位置決め偏差の取り扱い

2 台の CMM による球形体の測定は、基準 CMM をある場所に位置決めした状態で行われるので、理想的には基準 CMM が完全に停止していることが望ましい。しかし現実には位置決め指令により停止した基準 CMM に被校正 CMM がアプローチして球形体の測定を行う場合、振動や測定子の接触力等、ゲインが有限である CMM コントローラの位置決めサーボ系にとって外乱となる要因が存在する。これによりリニヤスケールの分解能程度の位置決め精度を基準 CMM に対して常に期待することは難しい。そこで、球形体を表す 4 つのパラメータを推定する前にこの位置決め偏差の影響を低減することを考える。説明のために 2 次元的な模式図を図 5 に示す。

この図で円の外周を 4 点で測定すると、基準 CMM と被校正 CMM それぞれについて 4 つの測定値座標が得られる。基準 CMM の測定値座標は理想的な場合、図 5-a) のように 1 点に収束することが期待されるので、それらの重心を基準 CMM の球の中心座標とみなす。この時、各測定点から重心までの偏差ベク

トルを図 5-b)のように求め、これを用いて対応する被校正 CMM の測定点を図 5-c)のように補正する。そして最後に円形体をあらわすパラメータを最小二乗法により推定する。この処理は重心からの偏差ベクトルの長さオウダにおいては、空間のひずみが存在しない、局所的な等方性を前提としている。実測値によると偏差ベクトルの長さはたかだか $2\mu\text{m}$ に満たないので、この局所等方性の仮定は妥当と考えている。

3.4 被校正 CMM の重心移動と座標変換

被校正 CMM を基準 CMM の上に設置し、互いの空間座標を比較測定すると 3 次元的な幾何学的偏差の情報を直接得られる利点がある反面、通常の CMM の使用条件では問題にならない誤差要因が生じる。一定の質量を持つ CMM 可動部が移動すると、それにしたがって CMM 全体の重心が移動する。重心が移動すると、支持点に関わる剛性に依存して弾性変形量が変動し、結果として CMM 全体が微小に傾き、移動する。この微小な変動は 2 台の CMM 間の座標変換パラメータをそれらの位置決め座標と支持点の剛性に依存して変動させる。

この被校正 CMM の重心移動に伴う微小な座標変換の変動を検出するために、6 チャンネルの差動トランス型変位計を図 6 に示すように設置した。空間の 6 自由度を検出可能なように、Z 方向に 3 チャンネル、Y 方向に 2 チャンネル、X 方向に 1 チャンネルをそれぞれ設置する。それらの出力は A/D 変換器を介してホストコンピュータに取り込まれる。この変位データと変位計の設置位置の情報から 6 自由度の座標変換パラメータの変動成分が算出される。これを用いて校正中の各測定点を補正する。

3.5 温度測定

今日の CMM の精度仕様は、その測定範囲で規格化すると数 ppm に到達している。これは CMM の構造部材やリニヤスケールの材質の線膨張係数と同じオウダに相当しているので、CMM が動作する温度環境への何らかの対策は欠くことができない。ここでは、リニヤスケールの温度測定データと線膨張係数に基づく線膨張の予測と補正を行なった。

4 校正実験

前章に概略を述べた試作システムを用いて校正実験を行なった。まず測定の繰り返し性について、球形体のパラメータによる評価結果を述べる。次に、空間座標の比較測定による CMM 校正のために立案した測定戦略にしたがった測定を行い、被校正 CMM のパラメトリックエラーを推定した結果について記す。

4.1 球形体の繰り返し測定

まず被校正 CMM の測定範囲のほぼ中央に二台の CMM を位置決めして球面上に均等に配置された 6 つの測定点により球形体の測定を行う。測定後、両方の CMM を、一度測定位置から十分に移動させる。以上の動作を連続して繰り返すことにより、空間座標の比較測定に伴ってランダムに観察される成分と、設置環境下における時間に対するドリフトの抽出が可能となる。

測定の繰り返しの条件は、現実の校正に必要な時間を考慮して球形体の測定の時間周期を 30 秒とし、200 回の繰り返し測定を行うことにする。測定で得られる 6 点の接触点座標に対して最小二乗法を適用して中心座標と直径、合計 4 つのパラメータを推定して測定結果とする。図 7 はこれら 4 つのパラメータを縦軸に、横軸には経過時間をプロットしている。上から順番に推定中心座標の X, Y, Z 座標成分、そして推定直径を示す。その下には、接触点座標から推定球面までの距離、すなわち推定残差の標準偏差を算出し、参考値として共にプロットした。な

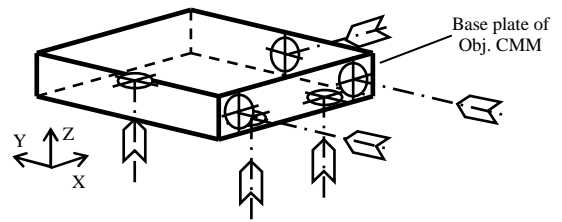


Fig. 6 Allocation of displacement sensors

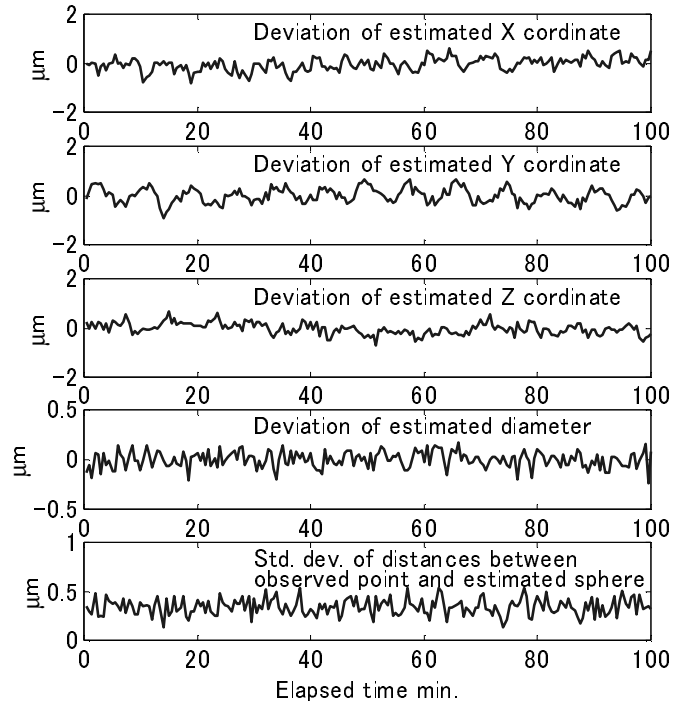


Fig. 7 Repetitive measurement result of sphere

お、推定中心座標は被校正 CMM の測定指令位置 (250,200,200)mm に対する偏差として、また、推定直径は推定値の平均値 7.999mm に対する偏差として図示している。

この図より、100 分程度の時間では、推定されたパラメータに顕著なドリフトは認められない。200 回繰り返した場合の推定残差の標準偏差は下段のプロットからおおまかに読み取れる通り $0.3\mu\text{m}$ であり、2 台の CMM の比較測定を行なっていること、特に被校正 CMM の測定分解能が $0.5\mu\text{m}$ であることを考慮すると、測定の繰り返し性は十分なものと考えられる。

なお、4 つのパラメータの内、推定直径は基準 CMM 側のスタイラス球、被校正 CMM 側のスタイラス球に加えて、タッチシグナルプローブや信号処理系すべての系統的な誤差を含んだ数値として算出されるので推定直径の値そのものに意味はない。一方 3 つの中心座標は、その数値が CMM 校正のためのデータそのものとなるので、推定値、そのばらつきともに重要な要因である。ただし校正の間、球の上での測定点の配置などの条件を常に一定に保つので、そこに系統的に現れる誤差要因の中心座標データへの寄与は一定の値をとる。この一定の値はパラメトリックエラー推定の演算において相殺され、校正結果への寄与は発生しない。

均等に配置された 6 つの測定点により球形体の繰り返し測定を行ない、球の 4 つのパラメータを推定することによって試作した校正システムの基本的な繰り返し性を実験的に示した。そ

の結果、被校正 CMM の校正に十分な繰り返し性と時間に対する安定性が確認された。

4.2 測定戦略

CMM のパラメトリックエラー推定を行うとき、推定値の信頼性は採用する測定法だけでなく測定戦略にも強く影響を受ける。ところが測定戦略の構築は経験的なノウハウに基づいて行われており、定量的な指針に従った測定戦略に言及する報告はなされていない。本研究でも経験的に構成された、**図 8** に示す測定戦略を採用することにする。この例では一直線上に 20mm 間隔で等間隔に並ぶ点列を基本単位とし、主にこれを複数組み合わせ合わせて測定戦略を組み立てている。図中の 4 つのパターンは模式的に図示するために便宜的に分割したものであり、それぞれを独立させることに測定戦略上の意味はない。実際の校正では、すべての測定点を連続して測定することになる。この測定戦略に含まれる約 300 点の測定結果のみを用いて、21 セットのパラメトリックエラーを同時推定する。

4.3 被校正 CMM の姿勢変動

設置した 6 チャンネルの差動トランス型変位計を使用して被校正 CMM の重心移動による 2 台の間の位置変動を実測した結果の例を**図 9** に示す。採用した被校正 CMM は門移動型なので、その重心移動に大きな寄与を与えるのは、最も重い可動部を有する Y 軸となる。そこで、Y 軸をフルストロークにわたって移動・位置決めしたときの変動量について示す。なお、X 軸の移動によっても何らかの重心移動は生じるため、X 軸方向にも異なる位置決めを行って測定を行う。図中の + 印と実線は X=0mm における測定値を、また × 印と破線は X=500mm における結果をそれぞれ示す。

変位計を設置した 6 か所での一次元変位から 2 台の CMM の相対的な移動を推し量ることは容易でない。ここでは 6 か所の変位測定値から算出した座標変換パラメータの変動成分を回転 3 成分、並進 3 成分について、被校正 CMM の座標系で表示した位置(0.0,0.0,0.0) mm における結果を図示する。図中上から回転 3 成分について X, Y, Z 軸周りを、そして並進 3 成分について X, Y, Z 軸方向をそれぞれ示す。

被校正 CMM の Y 軸方向の位置決め位置にしたがって X 軸周りの回転と Y 軸方向の並進成分が主に変動していることがわかるが、それ以外の成分も無視できない程度に変動していることが読み取れる。

X 軸方向の位置決め位置の影響は Y 軸周りの回転と X 軸方向の並進成分に現れている。また、変動のデータには、Y 軸の移動の履歴に依存するエンベロップも観察される。これらの挙動は被校正 CMM を支持する 3 点における接触状態等によって容易に変化するので、リアルタイムなモニタリングを行ない、2 台の CMM の座標変換を補正した。

4.4 空間座標の比較測定値

図 8 の測定戦略にしたがって測定を行って得られた結果の一例を**図 10** に示す。ここでは**図 8** の左下図、X 軸に沿った測定点配置のうち、Z=400mm、および Z=0mm における結果を左側、右側にそれぞれ示す。図の上段より下段にむかって、X, Y そして Z 軸方向偏差についてそれぞれプロットしている。図中の印と 印はそれぞれ、往路と復路における測定値を表す。完全に自動化された環境下で 3 次元的な幾何学的偏差を高い空間密度で得られることがわかる。

4.5 パラメトリックエラー推定の結果

図 8 に示した測定戦略によって得られた測定結果を立体的に

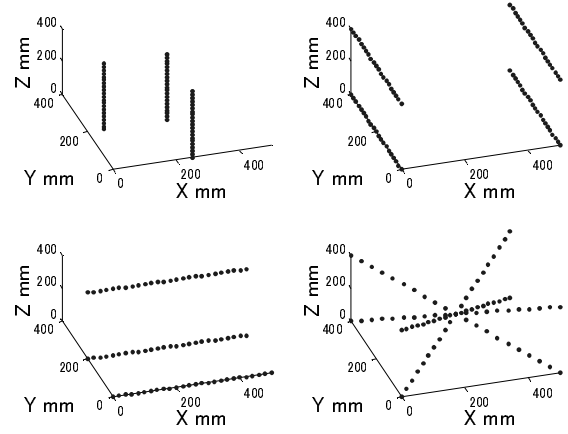


Fig. 8 Schematic of adopted measurement strategy

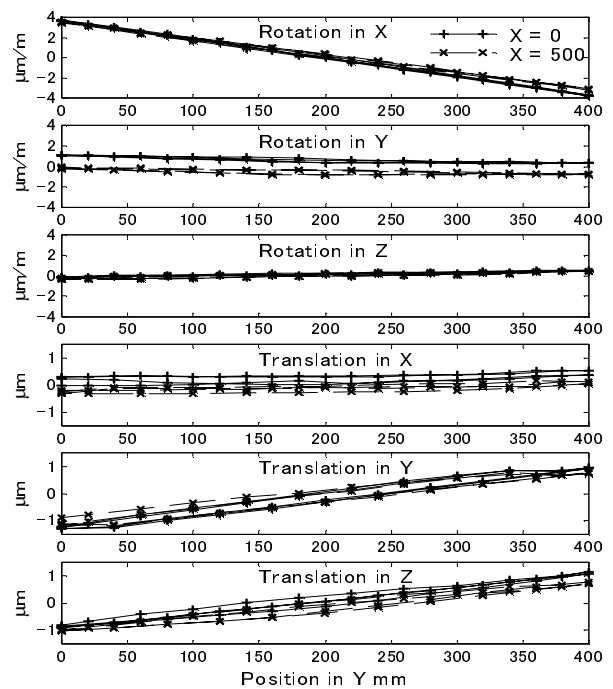


Fig. 9 Attitude variation due to movement of object CMM

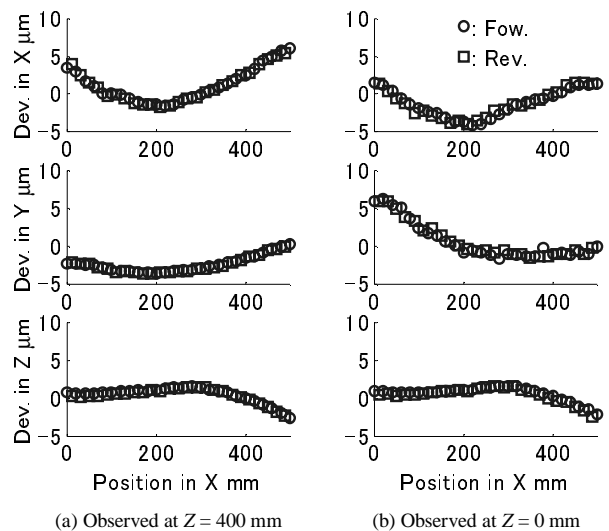


Fig. 10 Observed spatial deviation along X axis

プロットすると図 11 の通りとなる。図中、矢印は試作した校正システムにより実測した被校正 CMM の幾何学的偏差を 3 次元ベクトル表示している。また、これらの測定値を一括して文献 2 で報告した線形モデルに与え、被校正 CMM のパラメトリックエラーを一括して算出した結果がもたらす、推定された幾何学的偏差を * 印の直線でベクトル表示している。仮に、被校正 CMM の幾何学的偏差の実測値を完全に表現できるパラメトリックエラー推定値が算出されるとすると、測定値のベクトルと推定値により算出したベクトルは長さが等しく、互いに反対方向を向いたものとなる。

図 12 は、図 11 の実測値と推定値の差、すなわち推定残差をプロットしている。推定残差の最大値は $1.7\mu\text{m}$ であったが、目視で判断する限り推定残差に系統的な傾向は認められない。採用した測定戦略と試作したシステムによって、被校正 CMM の系統的な幾何学的偏差がほぼ忠実に推定できていることがわかる。なお、この残差の大きさを標準偏差で表現すると $0.4\mu\text{m}$ であった。4.1 節で示した、一点における繰り返し測定と比較して、標準偏差においてはほぼ同等なばらつきですべての測定とパラメトリックエラー推定を行なっていることがわかる。

5. 結 言

空間座標の比較測定による CMM の校正システムの構築を目指して試作したシステムについて基本的な検討を行ない、実際に被校正 CMM のパラメトリックエラー推定を行なった。得られた結論を以下に記す。

- (1) アーティファクト上の測定形体として球を選択した場合、測定点を均等に配置すると推定される中心座標のパラメータの信頼性が等方かつ独立になることを示した。このとき均等に配置した 6 点で測定を行うと、中心座標のパラメータに伝播する分散は $1/2$ に圧縮される。
- (2) 門移動型の CMM を対象として、空間座標の比較測定をプログラブルにかつ全自動で行い得る校正システムを試作した。
- (3) 実際に CMM の校正に適用した結果、系統的な幾何学的偏差を最小化するパラメトリックエラー推定の可能なことがわかった。

参 考 文 献

- 1) M. Abbe et al. : Geometric calibration of CMM by means of 3-dimensional coordinate comparison, Proc. of 6th ISMQC IMEKO symposium Wien, (1998) 3.
- 2) 阿部 誠ほか：空間座標の比較測定による CMM の校正 (第 1 報) - , 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 - , 精密工学会誌, **66**, 3 (2000) 483 .
- 3) 阿部 誠ほか：空間座標の比較測定による CMM の校正 (第 2 報) - , パラメトリックエラー推定値の信頼性 - , 精密工学会誌, **66**, 4 (2000) 578 .
- 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) P. Cauchick-Miguel and T. King : Co-ordinate measuring machines, -Concept, classification and comparison of performance tests-, Int. Journal of Quality & Reliability Management, Vol. **12**, 8, (1995) 48.
- 6) Traceability of coordinate measurements according to the method of the virtual measuring machine, PTB-Bericht, MAT1-CT94-0076, (1999).
- 7) A. Balsamo et al. : Results of the CIRP-Euromet inter-comparison of ball plate-based techniques for determining CMM parametric errors, Ann. CIRP, Vol. 46/1, (1997) 463.
- 8) 高辻利之ほか：ボールプレートの校正における不確かさについて, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1999) 440 .
- 9) Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, (1992).
- 10) S. Philips et al. : Properties of free-standing ball bar systems, Prec. Eng., **15**, 1, (1993) 16.
- 11) G. Peggs : Creating a standards infrastructure for co-ordinate measurement technology in the UK, Ann. CIRP, Vol. 38/1, (1989) 521.
- 12) L. Jones : Latin square three-dimensional ball plate (A practical approach to evaluation of coordinate measuring machine capability), Topical report BDX-613-2682, Bendix corporation, (1981).
- 13) I. Brezina : Metrological testing of coordinate measuring machines, VDI berichte, **761**, (1989) 55.
- 14) 高増 潔ほか：座標計測における形体パラメータの信頼性, 精密工学会誌, **63**, 11, (1997) 1594 .
- 15) 林 孝二：大型 3 次元座標測定機, 精密工学会誌, **58**, 5, (1992) 772 .

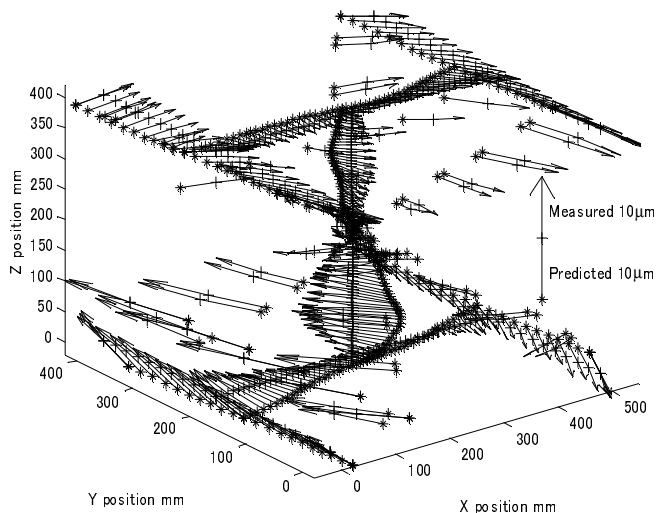


Fig. 11 Measured and predicted error by spatial coordinate comparison

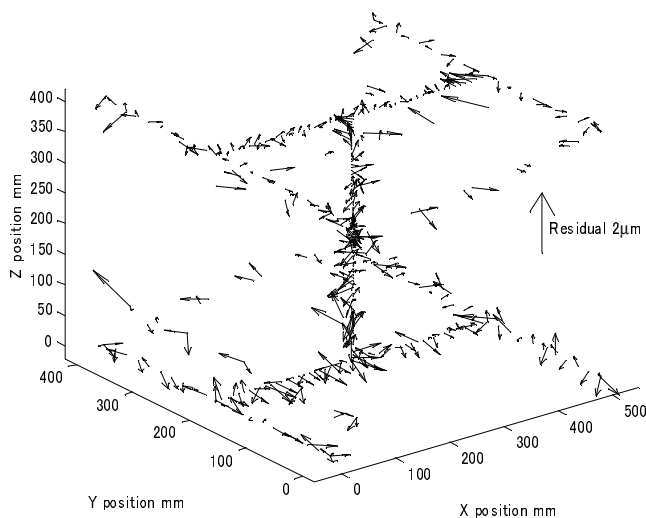


Fig. 12 Residual error predicted by spatial coordinate comparison