

座標比較による C M M 校正システムの開発(第 2 報)*

校正の信頼性の統計的な評価

阿 部 誠** 高 増 潔*** 大 園 成 夫***

Development of Calibration System by Spatial Coordinate Comparison (2nd Report)

- Statistical Evaluation of Reliability of Calibration 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. Following to the first report describing the basic concept and its primary evaluation result, the second report studies a noble method to analyze statistically estimated reliability of the calibration result. The experimentally obtained parametric error on a real CMM is assessed by comparing it with that obtained by the laser interferometer. The assessment result shows that the proposed calibration system estimates the parametric error with in the statistically predicted reliability range. Meeting demand to recent calibration technology, the practical calibration system with indication capability of its uncertainty is realized.

Key words: CMM, coordinate measuring machine, calibration, parametric error, laser interferometer

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の可能な校正の方法の実用化が望まれているが, 従来の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。このとき比較測定の計測の不確かさを定量化し, それが校正結果に伝播する過程を統計的に記述することにより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²⁾。本研究の成果は, 単に校正の自動化をもたらすだけでなく, この不確かさにおいても, 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。

第 1 報では, 試作した座標比較による校正システムの概要を示し, その基本的な性能評価結果を報告した。それによると, 被校正 CMM の系統的な幾何学的偏差をほぼ最小化するパラメトリックエラーを実際の CMM 上で求めることが可能であった。ただし, この評価試験は既に校正された基準 CMM の座標指示値を参照し, 被校正 CMM の幾何学的偏差を表現するパラメトリックエラーを推定した結果とその推定残差により評価したも

のであった。校正の標準の精度が及ばず寄与が無視し得るほどには小さくないとき, この結果によって校正の不確かさを評価することは現実的ではない。

そこで本報告では, 空間座標の比較測定による校正値の信頼性を統計的に評価することを試みる。まず校正値の信頼性に大きく寄与する基準 CMM の座標指示値の不確かさを記述する新しい考え方を提案する。次に, これを用いて誤差伝播則による解析³⁾を行い, 校正値として得られたパラメトリックエラー曲線の信頼性を定量化する。そしてレーザ干渉測長機で求めたパラメトリックエラーを参照することによって空間座標の比較測定で求めた校正値の評価を行う。

2. 校正の不確かさ

CMM は複数の測定点を組み合わせ, ほぼ任意の形体の測定を行うことができるという, 他の測定機には見られない特徴を持っている。反面, このフレキシブルで多用途な機能はその不確かさを定量化するための統一された方法を確立しにくい原因の 1 つになっている。CMM の校正の不確かさに寄与すると考えられる主な要因を図 1 に示す。ここでは, 校正の標準や校正方法に起因するものと, 校正される CMM の特性やその設置環境に起因するものについておおまかに分類した。この中で最上段

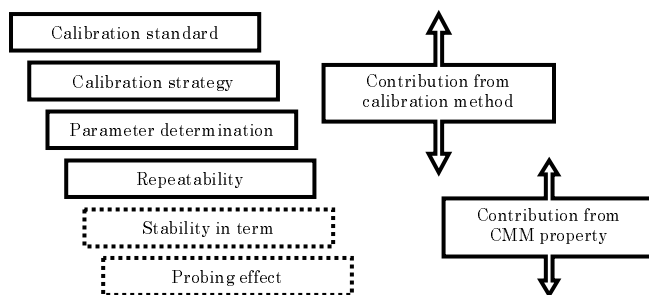


Fig. 1 Major uncertainty contributions on calibration of CMM

* 原稿受付 平成 12 年 10 月 13 日

** 正 会 員 (株) ミツトヨ (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

に記した校正の標準の不確かさは、特に長さの標準に対するトレーサビリティを議論する場合に重要な要因となる。空間座標の比較測定を行う場合、基準 CMM の不確かさがこれに相当する。ところが前述した通り、これについて既に確立された解析法は見い出されていない。そこで既知な長さ測定の不確かさの数値から、統計的に基準 CMM の座標測定の不確かさを導くことを 3 章で検討する。

2 段目の測定戦略については文献 3)において入力される測定点の不確かさとともに誤差伝播則による解析を行うことが可能なパラメトリックエラー推定法を提案し、その有効性を確認済みである 3 段目のパラメータ推定のアルゴリズムの不確かさは、文献 2)によると実在の CMM の校正においては無視し得るオーダであることがわかっている。またリピータビリティについては第 1 報で報告した、球形体を繰り返し測定した場合の中心座標の標準偏差 $0.4\mu\text{m}$ を適用する。以上の要因により、空間座標の比較測定による校正の不確かさの定量化を行う。

なお、本研究は校正の不確かさの明らかな校正方法の確立を目指しているため、この図の下側の長期安定度とプロ・ピングによる寄与については除外して検討を進める。

3. 座標測定の不確かさの推定

3.1 不確かさの表示に関する従来のアプローチ

今日の代表的な CMM の検査規格はテンプレートを用いた長さ測定の不確かさ表示を採用しているものが主流になっている。これは例えば式(1)に示すように、評価長さ l に依存しないランダムに振舞う成分 a 、評価長さ l に比例して増大する成分 b 、そして対象とする CMM に許容する最大偏差を表す成分 c によって長さ測定に関する最大許容誤差あるいは拡張不確かさを表現するものである。直感的・経験的にも CMM 上で観察される長さ測定の偏差を簡単に数値化できることから広く用いられている。以下、GUM⁸⁾との整合性を考慮して拡張不確かさ $U_{(K=2)}$ として取り扱う。

$$U_{(K=2)} = a + bl \leq c \quad (1)$$

本研究で採用する基準・被校正 CMM とともに、長さ測定の不確かさは製造者の製品仕様で定められている。代表値を表 1 に示す。

例えば、ゲージブロックに代表される端度器を使用した校正方法が古くから使われている⁴⁾。平行な面で構成された端度器は光波干渉計等を用いて長さの標準にトレーサブルな二次標準として校正し、取り扱われる。CMM はそのプロービングシステムを用いて端度器の長さを簡便な手順で評価することができるので、結果として長さの標準にトレーサブルな長さの校正結果が得られる。測定場所と方向を適切に設定すれば、CMM の幾何学的な偏差を一定の割合で評価することができる。しかし、長さ測定による評価結果はその特定の測定タスクに対してのみ有効であり、自由な測定タスクに対して適用することができない。

CMM の特徴のひとつは、離散的な座標測定点の集合を組み合わせることによって、自由度の高い測定タスクを構成することにある。この観点に立てば、CMM の基本的な測定値は空間中の 1 点を示す 1 つの座標測定値であると考えられる。1 点の座標測定の不確かさが定量化できれば、それを複数組み合わせることで誤差の伝播を計算することにより、複雑な任意の形体の不確かさを統計的に推定することが可能となる。そこで、CMM の不確かさに関する挙動をモデル化し、モンテカルロシミュレーション

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]	3.0 2.9+4.0/1000 × L[mm]	μm

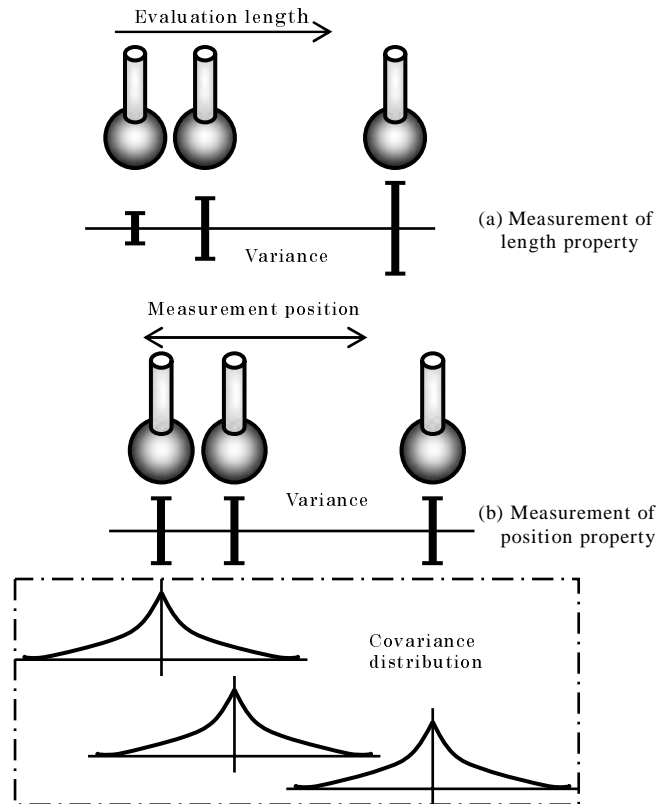


Fig. 2 Modeling of measurement uncertainty on CMM

で 1 点の座標測定の不確かさを推定する方法が既に提案されている⁵⁾。

校正された基準 CMM を使用して被校正 CMM との間で空間座標の比較測定を行う校正方法を検討しているため、この校正方法の不確かさを検証するためには何らかの方法によって基準 CMM の座標測定の不確かさを求める必要がある。ここではシミュレーションによらない新しい考え方を導入してこの解決を図る。

3.2 シミュレーションによらない座標測定の不確かさの定量化

ひとつの方策として式(1)で表現される不確かさを統計的に分散・共分散で表現することを考える。まず、長さ測定の不確かさが式(1)のようにテンプレート表現された場合について、それが表す意味を簡単に検討してみる。

CMM に限らず長さの測定において評価長さが大きくなるにつれて不確かさも大きくなる現象は、ガイド機構の運動やアッペ誤差、熱膨張の影響等を考慮すると自然なものに感じられる。その様子を図 2 (a)に模式的に表現してみた。この図で評価長さ l に依存しない非系統的な成分に着目すれば、その成分は分散が既知な乱数としてモデル化が可能であろう。一方の評価長さの増大にしたがって分散が大きくなる現象は、空間的にゆるやかに変動する曲線を想像するほうが乱数のマッピングよりも現実の姿に近い。長さ測定の不確かさをそのまま座標測定の不確かさとして取り扱うことには無理がある。

そこで図 2 (b)に示す座標測定モデルを提案する。これに従

例えば図 2 (a)では評価長さの増大と位置付けた量を，座標測定的位置の移動とみなす．よってそれぞれの位置における座標測定値のばらつきは一定の分散で表現される．ただし，空間的にある距離で隔たる複数の座標測定値の間には共分散で表される相互関係が存在するものとする．このようにすれば乱数的に振舞う非系統的な成分と，互いの距離の増大にしたがって増え，かつ空間的になだらかに振舞う，いわば未知の系統的な成分を統合してモデル化できると考えられる¹²⁾．

3.3 座標測定の不確かさのモデル化

モデル化にあたって，いくつかの前提条件をおく．

- (1) 1 点の座標測定の不確かさは，測定空間のどこに注目しても等しい．
- (2) 座標測定の不確かさを長さ測定の方向に投影するとその方向の 1 次元不確かさ成分を抽出することができる．
- (3) 評価長さが長くなるにしたがって長さ測定の不確かさが大きくなる現象は，離れた 2 点間の幾何学的偏差の間に観察される相関が減衰することとして説明する．
- (4) 分散・共分散の振舞いは評価長さのみに依存する．

特に(1)は，今日主流となっている規格では測定空間の自由な位置と方向における長さ測定に適用していることから導かれる．(2)は端度器を用いた長さ測定が，CMM の幾何学的偏差の測定方向への投影を捕らえていることによる．また，ひとつの測定点における分散に加えて，互いに離れた測定点の間の共分散を(3)の通り考慮することにより，空間的になだらかに変動する傾向についても解決を図る．(4)は従来の規格が時間に依存する成分を明確には取り扱っておらず，少なくともテンプレート表現においては空間的な成分と一緒に評価を行っていることにより導入する．

3.4 モデルの解析

今，CMM の測定空間中のある評価長さ l を 2 点 p_a , p_b の距離で表すと，

$$l = p_a - p_b \quad (2)$$

このとき l の分散 $Var(l)$ は次式の通りとなる．

$$\begin{aligned} Var(l) &= Var(p_a) + Var(p_b) - 2Cov(p_a, p_b) \\ &= 2Var(p_a) - 2Cov(p_a, p_b) \\ &= 2Var(p) - 2Cov(l) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし， $Cov(p_a, p_b) = Cov(l)$ は測定点 p_a , p_b により長さ測定を行った場合の共分散を表す．ここで共分散の空間的な振舞いを定式化する必要があるが，そのための資料となり得る実験的データは知る限り存在しない．そこで導入した前提条件(3)にしたがい，評価長さの増大にしたがって次第にゼロに近づく共分散を想定する．ただしゼロに漸近する拘束条件はつけない．仮に，式(4)に示す 2 次の形式をとるとすると，未知数 d_1 , d_2 , d_3 を用いて表現される．

$$Cov(l) = d_1 l^2 + d_2 l + d_3 \quad (4)$$

式(3)は次の通りにできる．

$$Var(l) = -2d_1 l^2 - 2d_2 l + (2Var(p) - 2d_3) \quad (5)$$

一方，長さ測定の拡張不確かさは，テンプレート表示によれば正の実数 a , b , c を用いて式(1)の通りに表されるから，これを分散の式にすると，

$$U_{(K=2)}^2 = (a + bl)^2 \leq c^2 \quad (6)$$

ここで，式(5)，(6)に注目すると， $a + bl \leq c$ の領域では，

$$\begin{aligned} U_{(K=2)}^2 &= 2^2 Var(l) \\ &= b^2 l^2 + 2abl + a^2 \end{aligned} \quad (7)$$

同様に $a + bl > c$ の領域では，

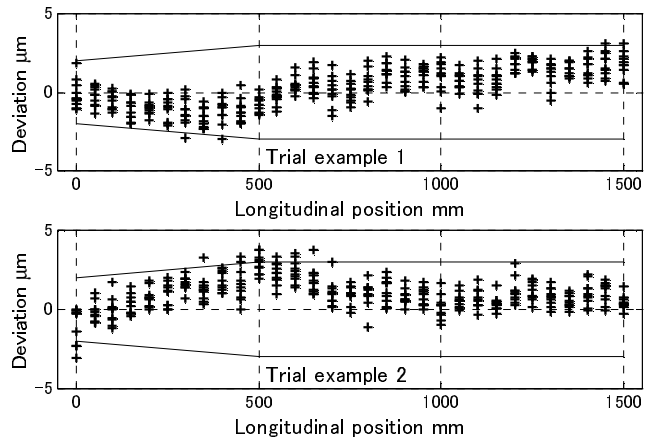


Fig. 3 Example of simulation result according to eq. (10)

$$\begin{aligned} U_{(K=2)}^2 &= 2^2 Var(l) \\ &= c^2 \end{aligned} \quad (8)$$

以上より，式(7)，(8)を代数的に解くことにより，テンプレート表現された長さ測定の不確かさから，1 点の座標測定の不確かさを導くことができる．

3.5 基準 CMM の座標測定の不確かさ

前節の式(8)は，評価長さが一定値以上になると長さ測定の分散も一定値になることを示している．この状態の評価長さにおける共分散 $Cov(l)$ がゼロと仮定すると，式(7)，(8)の未知数は次の通りに表される．

$$\begin{aligned} d_1 &= -b^2 / 8 \\ d_2 &= -ab / 4 \\ Var(p) &= c^2 / 8 \\ d_3 &= c^2 / 8 - a^2 / 8 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで，表 1 に記された基準 CMM に関する長さ測定の拡張不確かさを用いて実際に式(9)の各未知数を求めると式(10)の通りとなる．

$$\begin{aligned} d_1 &= -0.5 \quad [-] \\ d_2 &= -1.0 \quad [\mu\text{m}] \\ Var(p) &= 1.125 \quad [\mu\text{m}^2] \\ d_3 &= 0.625 \quad [\mu\text{m}^2] \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)の値を式(7)，(8)に代入して得られる不確かさは表 1 の基準 CMM の不確かさと同一になる．

ここでシミュレーション¹¹⁾によって式(10)がもたらす幾何学的偏差を確認した結果の 2 例を図 3 に示す．このシミュレーション手法は分散・共分散で指示された確率過程を満足する試行値を，固有値分解を含む代数演算によって一撃で与える特徴を持つものである．表 1 の基準 CMM の仕様を表すテンプレートを図中に実線で記した．規準 CMM の Y 軸に沿った指示精度の測定を 50mm ピッチの測定点間隔で 5 往復する測定をシミュレートした結果について，独立に試行した 2 回のシミュレーション結果を示した．

各々のグラフは 310 点の測定点からなり，テンプレートで囲まれた領域に 95% の確率で測定点が含まれることが精度仕様となる．上側のプロットでは 4 点が，また下側のプロットでは 15 点がテンプレートの領域外に存在する結果となった．ある測定位置に注目した場合の繰返し性，空間的になだらかに変動する傾向など，実際の CMM の測定で認められる特徴が現れていることがわかる．また，ほぼ精度仕様に沿った測定点の分布も確認できる¹²⁾．

4章では、2台のCMMの間で直接に空間座標の比較測定による校正を行う場合の校正標準の不確かさとしてこの値を代入し、校正結果として推定されたパラメトリックエラー曲線の信頼性を算出する。

4. 空間座標の比較測定で実測した校正値の信頼性

測定スピンドル先端で観察される変位の情報によりCMMの幾何学的偏差を評価する方法は広く用いられている。この場合不確かさが明らかな端度器等を用い、またユーザの使用状況と同等にタッチシグナルプローブ等を使用した評価が可能となる。反面、CMMの運動学的な特性に着目して評価を行いたい場合、この方法には以下の点で限界がある。

- ・ 測定スピンドル先端の変位では並進偏差に加え、角度偏差がもたらすアッペ誤差が測定位置に依存して異なる割合で重畳して観察される。
- ・ 幾何学的偏差を漏れなく検出するには、測定空間の様々な場所と方向について、並進・角度偏差のそれぞれに着目して測定を行う必要がある。
- ・ このようにしても単独では分離することができず、複数の寄与の合成値でしか抽出できないものがある。

運動学的な特性に着目して校正結果の評価を行うには、運動学的に記述された、例えばパラメトリックエラーそのものによる評価を行うことが望ましい。従来の研究に注目すると、ボールプレートを採用した校正において、異なるパラメータ推定アルゴリズムを用いて求めたパラメトリックエラー曲線を比較しようと試みた報告がある⁹⁾。複数の国立研究機関における数式表現の違いのためにこれは断念され、測定スピンドル先端での校正値ベクトルによって相互比較を行うにとどまっている。

ここでは、実在のCMMにおいてすべて実験的に得られた測定データをもとに、パラメトリックエラー曲線による校正値の信頼性の評価を試みる。

4.1 パラメトリックエラー曲線の比較による評価

図4に概略を示す方法によって、空間座標の比較測定で得られた校正値の信頼性を評価することとする。この評価により被校正CMMについて以下の2つの独立なパラメトリックエラー推定値を得る。

- (1) 本研究が提案する2台のCMMの空間座標の直接比較により得た校正値(以下、推定校正値とする)。
- (2) 校正されたレーザ干渉測長機を参照して得た校正値(以下、参照校正値とする)。

長さ標準にトレーサブルなレーザ干渉測長機を経由し、空間座標の直接比較による推定校正値を得る手順を図4の左側に示している。一方、被校正CMMにレーザ干渉測長機による校正を直接適用して参照校正値を得る手順は図の右側に位置する。

レーザ干渉測長機による校正は数多く提案されている方法⁷⁾の中でも高精度なものとして認められている。高精度型といわれるCMMの校正に採用される場合が多いこともそれを裏付けている。こうした背景にかんがみレーザ干渉測長機による校正値を参照する基準値として採用することにした。仮にレーザ干渉測長機によって求めた参照校正値の不確かさが推定校正値のそれに比較して無視し得る程度の大きさであれば、推定校正値はその校正の不確かさの範囲内で参照校正値と一致することが期待できる。しかし現実にはレーザ干渉測長機自身の不確かさは無視できるほどには小さくない。

レーザ干渉測長機を用いてCMMの指示偏差や真直度偏差の

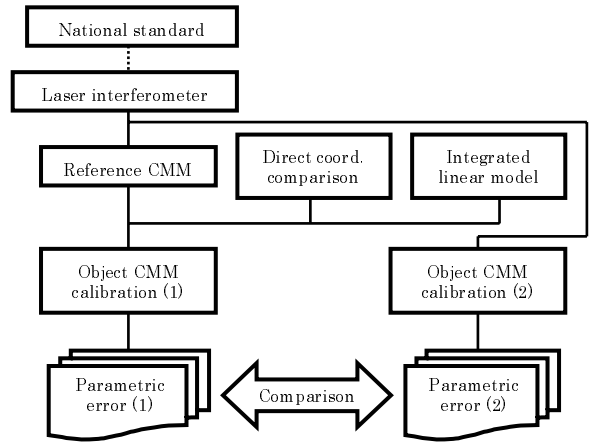


Fig. 4 Evaluation procedure of estimated parametric error

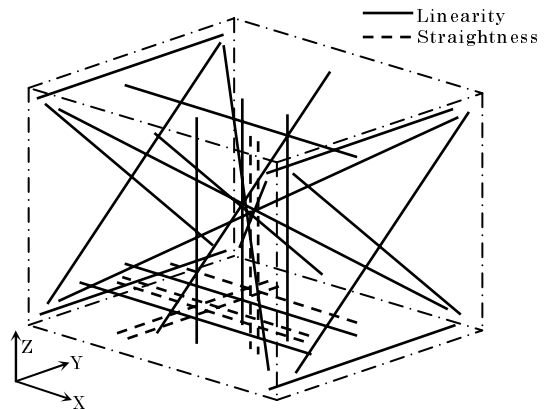


Fig. 5 Measurement strategy for laser interferometer

測定を行う場合、測定値の信頼性をGUM⁸⁾に従って算出することは可能である⁹⁾¹⁰⁾。またこれらの測定値の不確かさを用いて、推定されたパラメトリックエラー曲線の信頼性を統計的に算出することもできる¹¹⁾。そこで空間座標の比較測定により求めた推定校正値の信頼性と、レーザ干渉測長機により求めた参照校正値の信頼性から後述する合成の信頼性幅を算出し、それによって推定校正値の信頼性を評価することにした。

4.2 参照校正値の信頼性

レーザ干渉測長機による幾何学的偏差の測定値を用いてCMMのパラメトリックエラーを計算することは従来から様々な測定戦略により行われている。しかし、その校正値の信頼性に言及した報告は著者らのもののみと思われる。

これは、ひとつには運動学的に記述されたパラメトリックエラーのなかには直接に測定することができず、複数の測定データの組合せから演算によって算出する必要がある要素が存在することが理由として挙げられる。またふたつには、21セットのパラメトリックエラーは互いに独立であるが、要素間に無視できない相関が存在するためと考えられる。単純な分散の加算で構成した誤差伝播則により信頼性を評価することは現実的ではない。

文献2)で提案したパラメトリックエラーの一括解法は、モデルに入力した測定値の信頼性の情報が既知であれば、上記した2つの問題点に依存せずに推定されたパラメトリックエラーの信頼性を統計的に求めることが可能な利点を有している。この特性を利用して参照校正値の信頼性を求める。

採用した測定戦略を図5に模式的に示す。この戦略は経験的

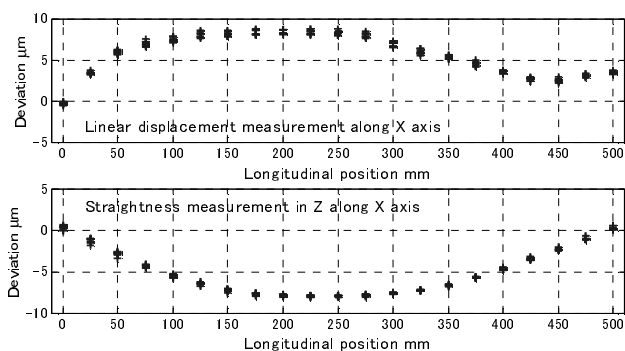


Fig. 6 Example of observed geometrical deviation by laser interferometer on object CMM before calibration

に構築されたもので、20本の指示偏差、7本の真直度偏差の測定からなっている。合計27本の測定値から21セットのパラメトリックエラーを推定した。このとき同時にパラメトリックエラーの信頼性を推定するために、指示偏差、真直度偏差をレーザ干渉測長機によって観測する場合の測定の不確かさを式(11)、(12)により与えた⁹⁾¹⁰⁾。ただし式中の l は評価長さを表す。

$$U_{Position(K=2)}[\mu\text{m}] = 0.2 + 0.7/1000 \times l[\text{mm}] \quad (11)$$

$$U_{Straight(K=2)}[\mu\text{m}] = 1.2 + 0.2/1000 \times l[\text{mm}] \quad (12)$$

被校正CMMにおいてレーザ干渉測長機により測定されたデータの例としてX軸の測定結果の一部を図6に示す。上側のプロットが指示偏差、下側のプロットがZ方向成分の真直度偏差の測定結果である。これらの測定は測定空間のほぼ下端でフルストロークの5往復について行われた。4.4節の図8に示すパラメトリックエラー曲線と比較すると、真直度偏差の曲線は対応するパラメトリックエラー T_{zx} とほぼ一致したものになっている。一方の指示偏差は、この測定がX軸ガイドから離れた位置で行われているためアッペ誤差の影響が大きく、対応する T_{xx} とは必ずしも一致していない。なお、この測定は被校正CMMの校正以前に行われるので表1の被校正CMMの精度仕様を適用することはできない。

4.3 空間座標の比較測定による推定校正値の信頼性

空間座標の比較測定で実測されたデータを用いて推定されたパラメトリックエラー曲線の信頼性を評価する。このときレーザ干渉測長機によって求めたパラメトリックエラーを参照する。空間座標の比較測定で求めた推定校正値の信頼性は3章で提案した座標測定の不確かさの導出結果等を用い、パラメトリックエラー推定と同時に求められる信頼性の推定を通して求める。

一般に、統計的に得られた推定値の信頼性は例えばスカラー量の場合、図7(a)に示すように白丸で描かれた推定値を中心に±両方向に分布する範囲として表される。基準として取り扱う参照値とその信頼性は同様に、黒丸とそれを中心とした範囲で表される。この状態で参照値と推定値を比較すると参照値自身の不確かさのために、推定値の信頼性を判定する際のグレーゾーンが現れる¹³⁾。そこで参照値を基準として信じることにすると、それにしたがって参照値と推定値との比較評価の信頼性を、合成の信頼性幅として図7(b)のように取り扱う必要がある。この図は、無視できない不確かさを持つ標準を参照して被校正値の信頼性を評価するとき、被校正値の信頼性のみでなく、標準自身の不確かさも考慮した信頼性幅で評価することの必要性を説明している。

座標比較により求めたパラメトリックエラー曲線の信頼性を評価するためにこの考え方を採用する。ただし推定校正値の誤

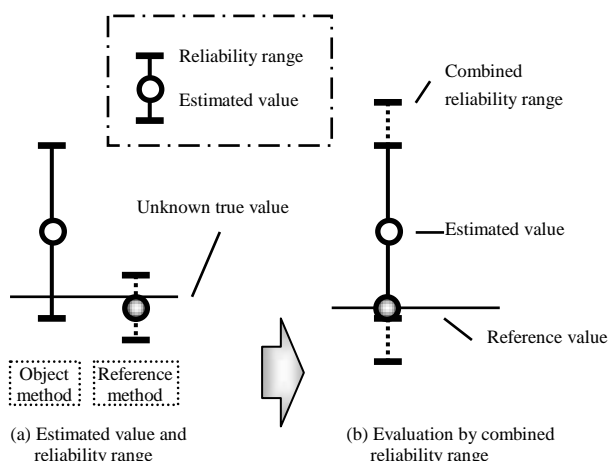


Fig. 7 Reliability range of predicted result

Table 2 Notations of parametric errors

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

差の振舞いと参照校正値の誤差の振舞いは互いに依存関係が希薄であり、相関関係は無視して問題ないと考えられる。それぞれの標準偏差の根二乗で合成の信頼性幅を計算することとした。

4.4 測定結果の検討

被校正CMMにおける21セットのパラメトリックエラーの中で、X軸に関する6つのパラメトリックエラー曲線について解析した結果を図8にグラフ化して示す。パラメトリックエラーの名前は表2に示す。

それぞれのパラメトリックエラー曲線について、上側の図はレーザ干渉測長機によって求められた参照校正値を破線で、また空間座標の比較測定により求められた推定校正値を実線で描いた。一方下側の図は、参照校正値と推定校正値の偏差を実線で記した。この図には空間座標の比較測定で求めた推定校正値の信頼性幅を一点破線で示した。さらにレーザ干渉測長機による参照校正値を基準とみなして評価を行うために、上記した合成の信頼性幅を計算して破線で示した。パラメトリックエラーによって推定校正値の信頼性幅と合成の信頼性幅の差が大きいものと小さいものがある。これは、同一のパラメトリックエラーを同一の演算アルゴリズムで推定しても、測定値の信頼性と採用した測定戦略によってパラメトリックエラーに及ぼす寄与が異なることによる。

ここには示していないが、Y、Z軸についても同様のグラフを作図して目視で判断した限り、推定校正値と参照校正値は誤差伝播測で予測した信頼性幅でおおむね一致した。このことから空間座標の比較測定により得た幾何学的偏差をパラメトリックエラーにより校正するシステムを構築した結果、校正の不確かさの明らかな校正手段を実現できたものと考えている。従来の研究においてCMMの校正の不確かさを定量的に示した報告は認められない。本報告の成果はこの点で近年の校正技術に対する強い要請にこたえたものと考えている。

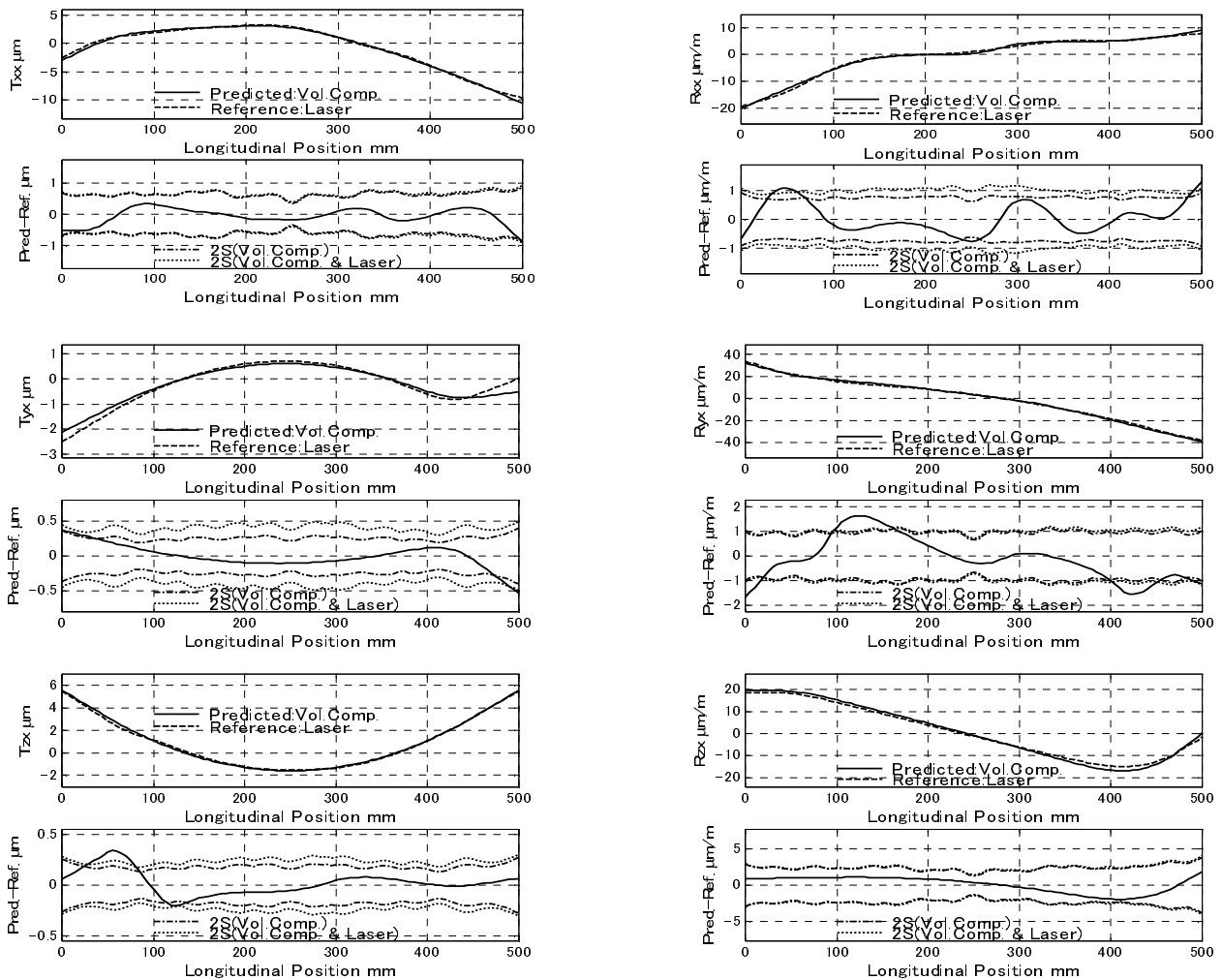


Fig. 8 Predicted parametric error and its residual with reliability range

5. 結 言

空間座標の比較測定による CMM の校正システムにより，校正の不確かさの明らかな手法の確立を試みた．得られた結論を以下に記す．

- (1) パラメトリックエラー曲線とその信頼性により校正値を評価する方法を提案した．
- (2) テンプレート表現された長さ測定の不確かさから，シミュレーションによらず，統計的に 1 点の座標測定の不確かさを導く方法を提案した．
- (3) レーザ干渉測長機を用いて求めた校正値を参照し，空間座標の比較測定により推定した校正値を評価した結果，統計的に期待される信頼性でパラメトリックエラーによる CMM の校正が行い得ることを実測値により確認した．
- (4) 近年の校正技術に対する要請にこたえた，校正の不確かさが明らかな校正方法を他に先駆けて実用化した．

参 考 文 献

- 1) 阿部 誠ほか：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，精密工学会誌，～
- 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) 例えば，ISO 10362-2, GPS -Acceptance test and reverification test for coordinate measuring machines (CMM)-, Part 2 : CMMs used for measuring linear dimensions, (1997).
- 5) Traceability of coordinate measurements according to the method of the virtual measuring machine, PTB-Bericht, MATI-CT94-0076, (1999).
- 6) 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.
- 7) P. Cauchick-Miguel et al. : CMM Verification: A Survey, Measurement, 17, 1, (1996) 1.
- 8) Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO, (1992).
- 9) Mitutoyo Nederland B.V., Calibration service quality manual for NKO accreditation, MD-CS-04-01, Uncertainty of linear displacement deviation measurement, (1996).
- 10) Mitutoyo Nederland B.V., Calibration service quality manual for NKO accreditation, MD-CS-04-03, Uncertainty of straightness deviation measurement, (1996).
- 11) 阿部 誠ほか：CMM 校正の不確かさに関する 1 考察(第 1 報) 1 次元変位測定によるパラメトリックエラー推定値の信頼性，1999 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1999) 439．
- 12) 阿部 誠ほか：CMM 校正の不確かさに関する 1 考察(第 3 報) 長さ測定の不確かさによる座標測定の不確かさの統計的な推定，2000 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2000) 71．
- 13) ISO 14253-1, GPS, -Inspection by measurement of work-pieces and measuring instruments-, Part 1 : Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications, (1997).