

<正誤表>

産総研計量標準モノグラフ

第8号 座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報

第3章 ボールプレートの校正方法

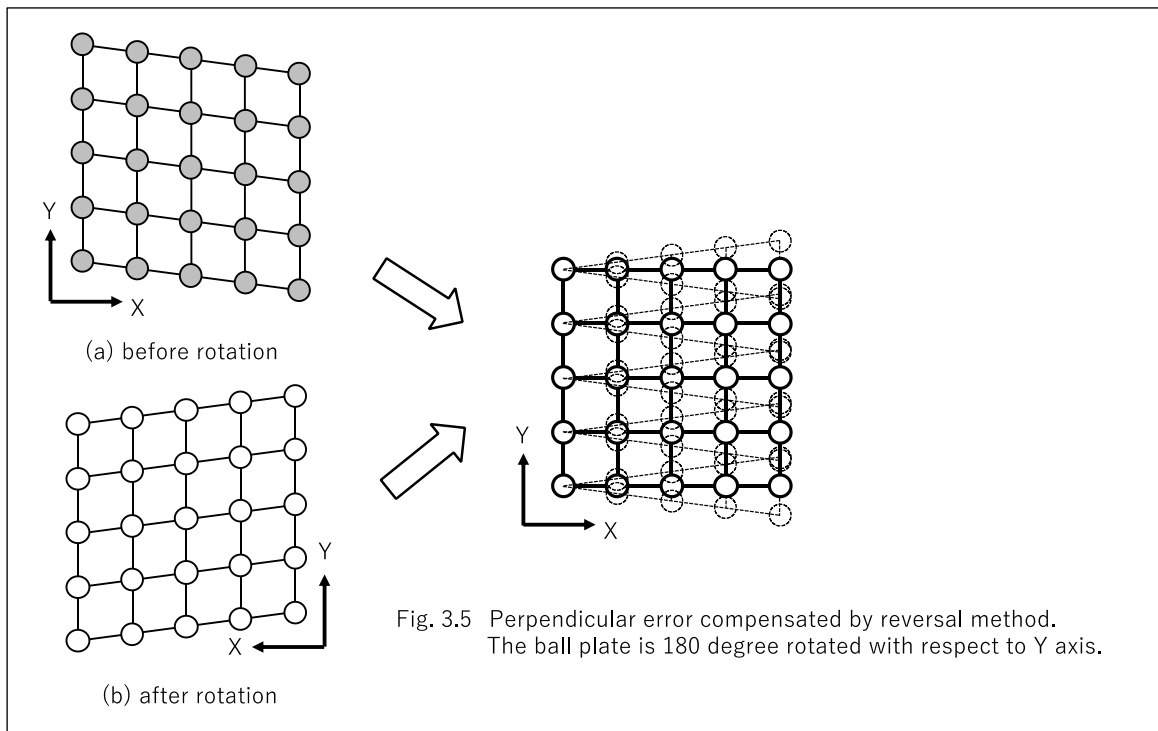
3.1 反転法による測定

10 ページ, 最初の段落, 4 行目

「Z 軸回りに」 → 「X 軸あるいは Y 軸回りに」

図 3.5

下図の通り.



はじめに

座標測定機（Coordinate Measuring Machines、以下CMMとする。）は、様々な分野、特に自動車産業等で万能測定機として使用されてきた。CMMは、被測定物に接触することによりその座標を検出するためのセンサであるプロービングシステム、三軸直交移動するためのガイド、移動量を検出するためのスケール（ものさし）などで構成されている。プロービングシステムに取り付けられたスタイラスが接触できる部分はすべて測定でき、単純な2点間の距離だけでなく、測定対象がもつ幾何形状の特徴量（例えば、円ならば直径、真円度）を測定点群から最小二乗フィッティングにより算出することも可能である。それゆえ、万能測定機と呼ばれている。CMMの大きさも様々なものがあり、300 mm立方程度の測定領域をもつものから10 m×5 m×2 mの測定領域を持つような大型なものまである。通常、800 mm×600 mm×600 mm程度の測定領域をもつCMMがよく使用される。これらCMMは、X軸の上にY軸が、Y軸の上にZ軸が載った構造になっており、ガイドが持つ真直性やスケールの取り付け方などにより測定値に誤差を生じる。また、被測定物の座標を検出する位置がCMMに取り付けられたスケール位置から離れているため、これら誤差が拡大されてしまう。これをアップ誤差と呼ぶ。このような誤差は、あらかじめ測定することにより補正することが可能である。現在、販売されているCMMのほとんどが補正機能を有しており、出荷前に上記誤差を何らかの方法で測定し、その誤差を補正テーブルとしてCMMの制御コンピュータ上に保存する。測定を行うと、その測定位置の誤差が呼び出され、自動的に測定値に補正が行われ、測定者には、補正された値が測定値として表示される。これら幾何学誤差を算出する方法は、以下のようなものがある。

- 1) レーザ干渉計を用いる。
- 2) スコヤ、直定規、ブロックゲージなどのゲージを用いる。
- 3) ボールプレート、ホールプレートのような二次元ゲージを用いる。
- 4) ステップゲージのような一次元ゲージを用いる。

これらの方法のうち、二次元ゲージを用いた方法は、他の手法と比べ、容易かつ測定量も少なく幾何学誤差を算出できる利点がある。この二次元ゲージは、CMMの精度よりも高精度に値付けられる必要がある。産業技術総合研究所（以下、産総研とする）では、これら二次元ゲージの値付け（校正）法について研究を行ってきた。本技術書では、二次元ゲージ校正法について国際比較等とおして産総研が得てきた知見、また、初めて行われた国内ボールプレート持ち回り測定比較の結果について記述する。

座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報

目 次

Abstract

第1章 座標測定機の不確かさ要因	1
1.1 座標測定機の概要	1
1.2 プロービングシステムの不確かさ	1
1.3 CMMの幾何学誤差	3
1.4 CMM測定の不確かさ要因	4
1.5 CMM測定の不確かさ算出法	5
第2章 二次元幾何ゲージによる座標測定機の幾何学誤差算出法	6
2.1 幾何学誤差算出法	6
2.2 二次元幾何ゲージによる幾何誤差算出	6
第3章 ボールプレートの校正方法	
3.1 反転法による測定	9
3.2 寸法標準器によるスケール誤差補正	9
3.2.1 ブロックゲージによる手法	10
3.2.2 ステップゲージによる手法	11
3.2.3 ボールステップゲージによる手法	13
3.2.4 レーザ干渉計による手法	13
第4章 ホールプレートの校正方法	15
4.1 反転法による測定	15
4.2 レーザ干渉計によるスケール誤差補正	15
第5章 ボールプレートの経年変化と測定の不確かさ	17
5.1 ボールプレートの経年変化	17
5.2 ボールプレート校正における測定の不確かさ	17
5.2.1 長さに依存しない項	17
5.2.2 長さに依存する項	18
5.2.3 不確かさの算出	20
第6章 ボールプレート校正国内持ち回り比較	21
6.1 概要	21
6.2 参加機関	21
6.3 測定結果	21
6.3.1 産総研における3回の測定結果	21
6.3.2 各機関の測定結果	21
6.4 まとめ	22
付属書1 ボールプレート持ち回り比較 テクニカルプロトコル	29
付属書2 ボールプレート持ち回り比較 最終報告書	57

Abstract

Coordinate measuring machines (CMM) have been widely used in various fields of science and engineering. Although CMMs are precise instruments, they have a lot of inherent geometrical errors and probing errors. Due to this reason estimation of measurement uncertainty is extremely difficult for CMM measurements. Virtual coordinate measuring machine (VCMM) which has been developed by Physikalisch-Technische Bundesanstalt (German national physical institute) is one of the methods of estimating the uncertainty of measurements using CMMs. The geometrical errors are required as an input to the VCMM software, and usually measured using a ball-plate or a hole-plate. We have calibrated the 2-D artifact used for the CMM calibration or checking the CMM performance in NMIJ/AIST. In this paper, we mainly describe the calibration method of the ball-plate and the hole-plate, and the results of the first domestic ball-plate calibration comparison. The calibration of the 2-D artifact is performed using a swing round method and a laser measurement for compensating the scale error of the CMM. The swing round method eliminates the geometrical errors of the CMM, systematic probing effects and so on. The method, however, does not eliminate the scale error of the CMM. Therefore, we need an additional measurement using a length standard, for example, gauge blocks, a step-gauge, an interferometer, etc.

2-D artifacts gradually have been used for checking the performance of the CMMs in Japan. In future, the ball-plate will be a popular gauge for checking or calibrating the CMM in Japan. Only National metrology institute of Japan (NMIJ) is possible to calibrate the ball-plate, now. There are no other institutes or calibration laboratories to be able to calibrate the ball-plate. Therefore, we made an opportunity to transmit our calibration technique to other institutes. This is first domestic comparison of a ball-plate in Japan. Sixteen institutes including NMIJ attended the comparison. In this comparison, we made two groups and supplied two ball-plates (KOBA 420×420 mm, RETTER 420×420 mm) and two material standards of length which made by NMIJ for this comparison. The comparison started from October 2003 and finished in September 2004. We describe the results and the consideration of the results in this paper.

第1章 座標測定機の不確かさ要因

1.1 座標測定機の概要

座標測定機（以下、CMM）は、**図1.1**に示すようにX、Y、Zの三軸がそれぞれ直交するように移動するガイド、先端に球（通常ルビー球）を持ちそれを被測定物に接触させその位置を検出するためのプロービングシステムと呼ばれるセンサ、移動量を測定するためのスケール（ものさし）、コンピュータなどから構成されている。**図1.2**にJIS¹⁾で定められているCMMの各種形式の例を示す。この図中の(a)ブリッジ、門移動型が他の形式に比べて多く製造されている。CMMは、コンピュータにより測定点を作成し、測定点から形状を評価することができる。CMMは寸法から形状まであらゆる幾何学的な特徴量を測定することができるので、万能測定機とも呼ばれている。

非常に便利な測定機であるけれども次のような欠点もある。

- 1) アップの原理を満たしていない。
- 2) 測定領域が測定機の大きさに対して小さい。
- 3) 測定の不確かさ算出が難しい。
- 4) 高価である。

1)の欠点は、測定の概念からすると測定機の精度を落とすものであり、高精度化を阻むものであるが、測定機自体の剛性を高め、ソフトウェア補正²⁾を行うことによって影響を小さくすることが可能である。現在のCMMのほとんどがソフトウェア補正を行う機能を有しており、

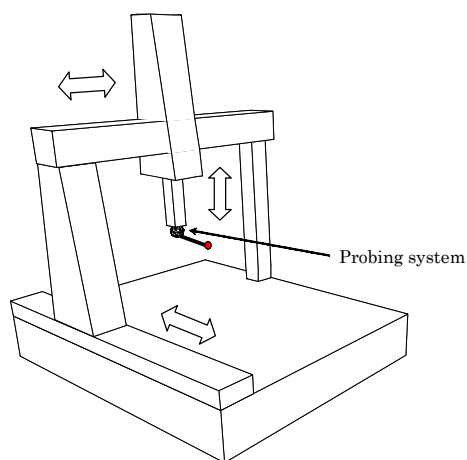
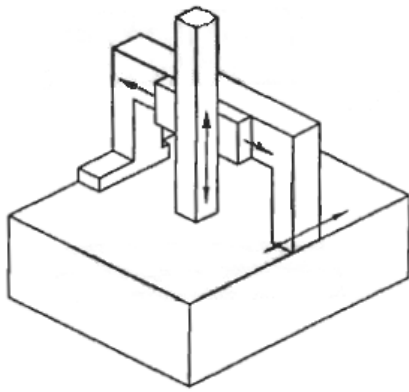


Fig. 1.1 Schematic of CMM

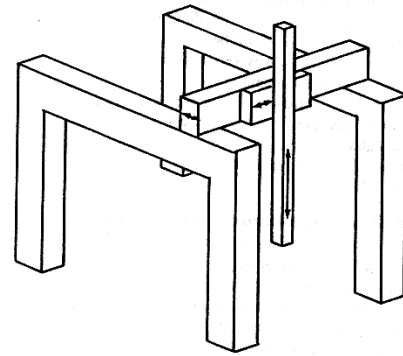
この補正を行うためのデータをあらかじめ算出する必要がある。このデータは、具体的に2種類のものがある。1つは、センサ部分の補正データで、校正球と呼ばれる直径の値が高精度に値付けられ、かつ形状誤差の非常に小さな（50 nm以下）球を測定することにより、そのセンサのもつ特徴（具体的には球の一断面を測定すると円ではなく四角になるような）を求めることができる。もう1つは、指示誤差、真直誤差、直角誤差といった測定機の運動誤差についてのデータである。これら誤差は、幾何学誤差（パラメトリックエラー）³⁾と呼ばれている。これら2種類の補正データにより高精度測定を実現している。

1.2 プロービングシステムの不確かさ

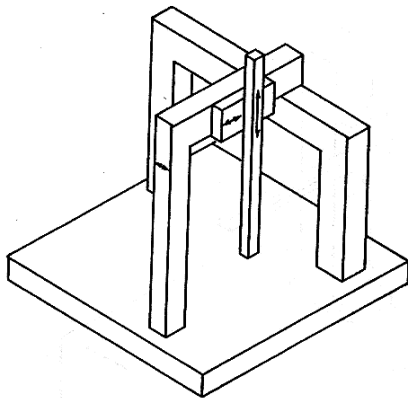
CMMは、プロービングシステムと呼ばれるセンサを用いて被測定物の座標を検出する。これには、接触式、非接触式の2種類があり、通常接触式のプロービングシステムがよく使用される。非接触式のプロービングシステムは、やわらかい材料の測定対象などには非常に有効である。接触式のプロービングシステムは、スタイラスと呼ばれる被測定物に接触する部品とプローブと呼ばれる接触判定を行うセンサからなっている。スタイラスの先端には、通常、ルビー球が取り付けられ、被測定対象面に垂直になるようにプロービングされる。プロービングした瞬間に電気信号が発生し、CMMの三軸に設置されたスケールの値を読み込み、座標値を算出する。プロービングシステムは、タッチトリガ式⁴⁾と呼ばれる機構をもつものが比較的安価でよく使用されている（**図1.3**参照）。高精度のものでは、平行板ばね式の機構⁴⁾をもつものもある（**図1.4**参照）。通常、CMMではスタイラス先端のルビー球の中心座標を算出するため、その先端球の直径や接触した際のスタイラスの曲げ量などは、高精度な測定をするにあたり、あらかじめ知っておく必要がある。これらプロービングシステムのパラメータ評価には、球が用いられる。球は安価でしかも容易に高精度な形状を作製することができる。球の直径が既知でかつ形状誤差が小さければそれを測定し、球の直径の校正値と実測した値を比較することによりプロービングシステムのパラメータを算出することが可能である。この作業をプロービ



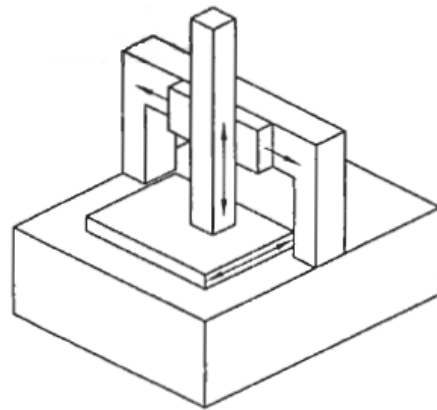
(a) Moving bridge CMM



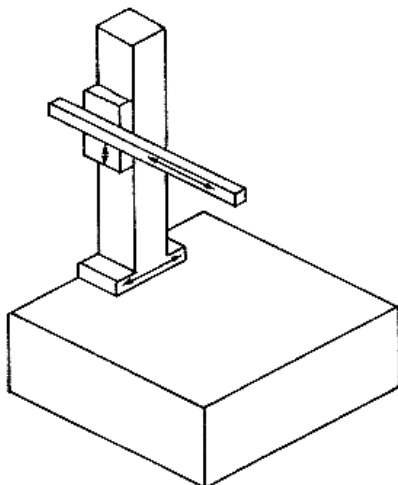
(b) Gantry CMM



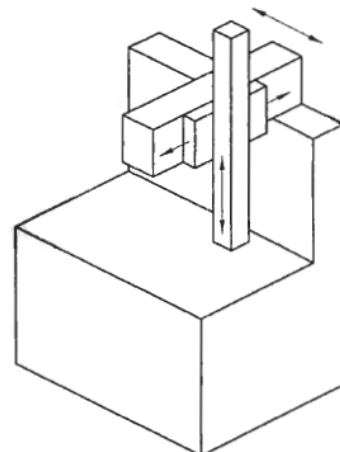
(c) L-shaped bridge CMM



(d) Fixed bridge CMM



(e) moving ram horizontal-arm CMM



(f) Fixed table cantilever CMM

Fig. 1.2 Example of CMM types

1.3 CMMの幾何学誤差

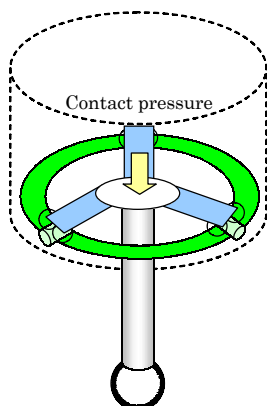


Fig. 1.3 Touch trigger type probing system

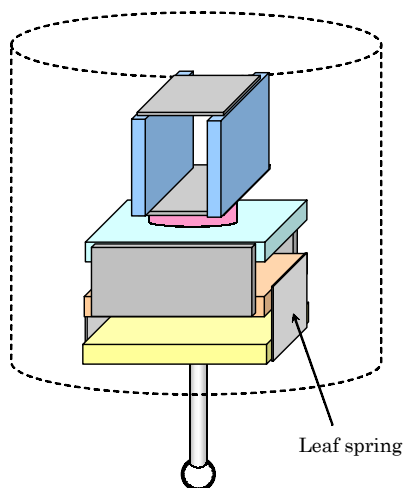


Fig. 1.4 Parallel leaf spring type probing system

ングシステムの校正作業と呼ぶ。この校正を行った後、被測定物を測定するためにプロービングを行い、座標値算出するわけであるが、同じ点を繰り返し測定してもその座標値がばらついてしまう。これは、プローブの機械的な誤差等により発生するものである。この他にも、スタイラスを回転することができる機構を持つプロービングシステムの場合、この回転誤差等により測定値に誤差を生じる。また、マルチスタイラスといって数本のスタイラスをプローブに取り付けた場合、それぞれのスタイラスの位置関係をあらかじめ球を使用して算出しておくが、そのずれなどによっても測定値に誤差を生じる。このようにプロービングシステムひとつをとっても、多くの不確かさ要因が存在する。

CMMが測定を行うには、スタイラスの先端を被測定物まで移動させ、プロービングを行わなければならない。CMMを簡略的にモデル化すると図1.5のように表され、第一軸となるX軸の上に第二軸のY軸、その上に第三軸であるZ軸が載ったような形になっている。この第三軸に検出器であるプロービングシステムが取り付けられており、第一軸で発生した誤差が伝播し、最終的にスタイラスの先端において拡大される。通常、CMMは剛性をあげるためグラナイトと呼ばれる石や鋳鉄などにより製作されており、重量物の移動により案内のたわみ等が変化するので、スケールの読み取りを行う位置とプローブの先端の位置との関係がずれ、誤差を生じる。あるいは、CMMの移動機構におけるガイド（案内面）の真直性が悪い、あるいは軸間が直角でない場合にも誤差を生じる。さらに、長いスタイラスを使用した場合には、軸の回転によって誤差を生じる（図1.6参照）。このようにCMMの運動により発生する誤差を幾何学誤差（パラメトリックエラー）と呼ぶ。これら誤差は、図1.7に示すように21個存在する。各軸に対して指示誤差、真直誤差（縦、横）、回転誤差（ピッチ、ロール、ヨー）があり、これに直角誤差が加わり、21個の誤差となる（表1.1参照）。これら幾何学誤差は、レーザ干渉計やゲージを利用することによりあらかじめ算出し、補正を行うことが可能である。

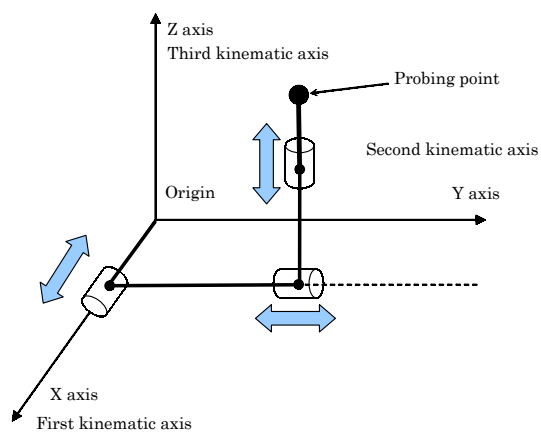


Fig. 1.5 Schematic diagram of CMM kinematic model

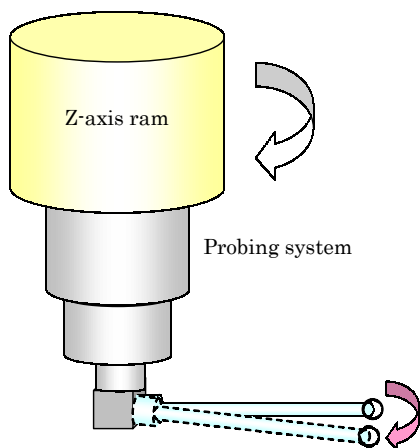


Fig. 1.6 Z-axis roll error

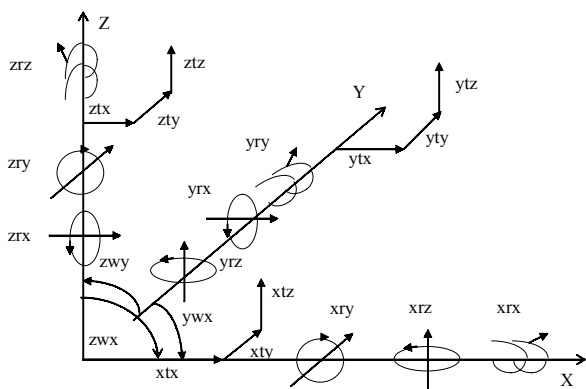


Fig. 1.7 21 parametric errors of CMM

Table 1.1 parametric errors of CMM

Parametric error	description
xtx	Position error in X-axis
xty	Straightness error in X-axis
xtz	Straightness error in X-axis
xrx	Roll error in X-axis
xry	Pitch error in X-axis
xrz	Yaw error in X-axis
ytx	Straightness error in Y-axis
yty	Position error in Y-axis
ytz	Straightness error in Y-axis
yrx	Pitch error in Y-axis
yry	Roll error in Y-axis
yrz	Yaw error in Y-axis
ztx	Straightness error in Z-axis
zty	Straightness error in Z-axis
ztz	Position error in Z-axis
zrx	Pitch error in Z-axis
zry	Yaw error in Z-axis
zrz	Roll error in Z-axis
ywx	Perpendicular error in YX
zwx	Perpendicular error in ZX
zwy	Perpendicular error in ZY

1.4 CMM測定の不確かさ要因

1.2、1.3節で説明した誤差要因は、CMMの測定において単に不確かさの要因の一部である。CMM測定の不確かさの要因として以下のようなものがある。

- 1) プロービングの不確かさ
- 2) 幾何学誤差による不確かさ
- 3) 環境による不確かさ (温度、湿度等)
- 4) 測定戦略による不確かさ (測定点の点数、配置等)
- 5) 測定物の保持による不確かさ (固定力、自重たわみ等)
- 6) 測定物自身による不確かさ (表面あらし、形状誤差等)

このように、様々な不確かさ要因が挙げられる。これらがどのように測定の不確かさとして寄与するのかを推定することは非常に難しい。単純な2点間の距離測定の

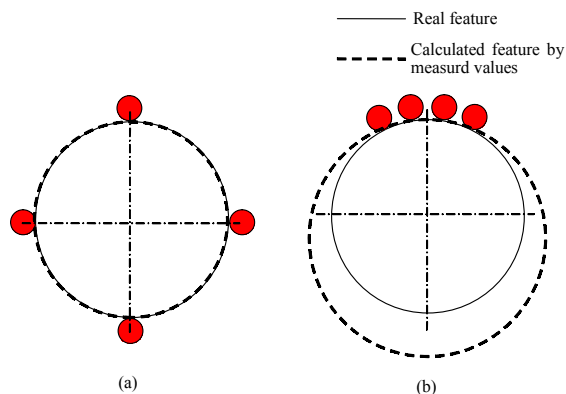


Fig. 1.8 The different measurement strategy on CMM measurement

場合は、計測における不確かさの表現のガイド (Guide expression of Uncertainty in Measurement: GUM) ⁵⁾にしたがって算出することは、可能である。しかし、**図1.8**のように円の中心座標を算出する際、4点の座標測定を行った場合、(a)のように測定対象に対して均等に4点測定した場合と(b)のように偏った4点測定をした場合には、測定誤差が生じると算出される中心座標や直径に大きな違いを発生する。これが、CMMの不確かさ要因のうち測定戦略による不確かさになる。このように測定点群から算出した円の中心座標等の不確かさを算出することは、GUMに従った手法では、非常に難しい。そこで、次項で示すような不確かさ算出法が提案されている。

1.5 CMM測定の不確かさ算出法

前節では、CMMの不確かさ要因について説明した。CMMの不確かさ要因は、複雑であるためそれを推定することは、非常に困難である。そこで、近年、コンピュータシミュレーションによる不確かさ算出法^{6)~9)}が開発され、ISOのCMMに関するワーキンググループ（ISO/TC 213/WG 10）においてCMM測定の不確かさについての規格¹⁰⁾が作成されてきている。以下にそのISOを示す。

- 1) ISO15530-1：概要、測定の特徴
- 2) ISO15530-2：アーティファクトの校正におけるマルチ測定法の使用
- 3) ISO/TS 15530-3：校正されたワーク又は標準の使用
- 4) ISO 15530-4：コンピュータシミュレーションの使用
- 5) ISO 15530-5：エキスパート判定の使用
- 6) ISO 15530-6：校正されていないワークの使用

これらISO規格の中でパート3のみ現在、出版されており、他のものは、審議中である。パート1は、CMMの不確かさ算出の概要。パート2は、パート4で使用されるソフトウェアの検証などに用いられるアーティファクト（ゲージ）の校正作業における不確かさ算出について記述している。パート3は、値付けられたワークを使用した測定の不確かさ算出法について記述している。パート

4は、コンピュータシミュレーションによる不確かさ算出法について記述している。パート5は、熟練したCMMユーザ等が不確かさを推定するに当たり、その熟練者の定義などを記述している。パート6は、値付けられていないワークを使用して、分散分析によって不確かさを算出する手法について記述している。

これら不確かさ算出法において、パート4のコンピュータシミュレーションによるものが現在最も現実的にCMM測定における不確かさを算出する手法として考えられている。このコンピュータシミュレーション法の1つに、ドイツ物理工学研究所（Physikalisch Technische Bundesanstalt）が提唱しているバーチャルCMM^{6)~8)}がある。バーチャルCMMは、CMMにおける測定で受ける様々な影響を計算機上に作り出し、その振る舞いをシミュレーションすることによって、不確かさの幅を算出するものである。図1.9にバーチャルCMMの概要を示す。バーチャルCMMは、算出されたCMMの幾何学誤差等を利用してコンピュータ上に仮想的なCMMを作り出し、200回程度の仮想的な測定をコンピュータ上で行う。この際、様々な不確かさ要因を各不確かさの範囲内でランダムに値を変化させ、算出したい要素の不確かさを決定する。バーチャルCMMを利用すればCMMを用いたあらゆる測定に関して不確かさを算出することができる。このバーチャルCMMの不確かさ算出において重要となるのがCMMの幾何学誤差の算出である。

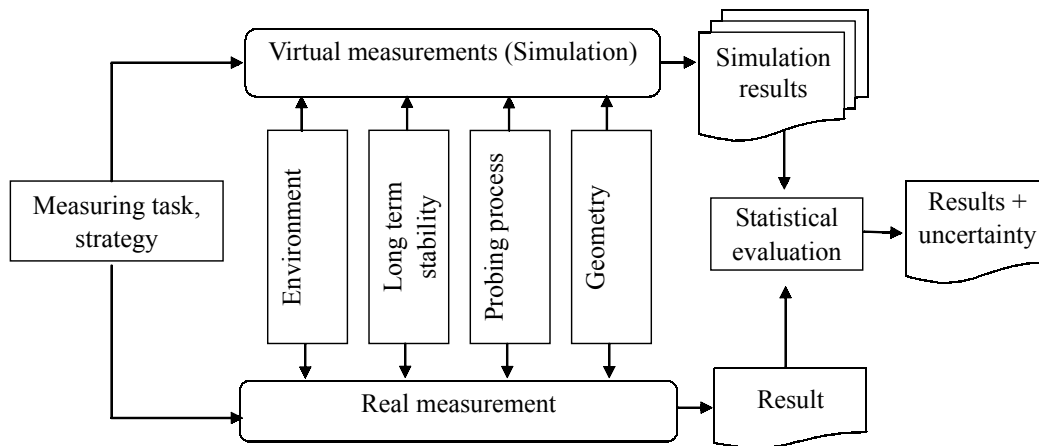


Fig. 1.9 Basic Virtual CMM concept

第2章 二次元幾何ゲージによる座標測定機の幾何学誤差算出法

2.1 幾何学誤差算出法

1.3節にて示したCMMの幾何学誤差を算出する方法としていくつかの方法^{11)~15)}がある。以下にその方法の例を示す。

- 1) レーザ干渉計を用いる。
- 2) スコヤ、直定規、ステップゲージなどのゲージを用いて個別のパラメータを求める。
- 3) ボールプレート、ホールプレートのような二次元幾何ゲージを用いる。
- 4) ステップゲージのような一次元幾何ゲージのみを用いる。

1)のレーザ干渉計による手法は、それぞれの幾何学誤差をレーザ干渉計の光学系を用いて1つずつ測定を行い、算出するものである。確実な手法ではあるが、測定環境を選ばないと高精度な測定が期待できない。また、測定のための光学系を配置する知識を必要とする。それぞれの幾何学誤差毎に測定を行わなければならないため、測定に労力を要する。

2)のスコヤ、直定規、ステップゲージなどのゲージを用いて、直角度、真直度、指示誤差などを求めていく手法である。これについてもそれぞれのゲージに対して測定プログラムを作成し、測定を各軸について行っていくため、測定に労力を要する。

3)の二次元ゲージを用いた手法では、測定は測定領域にもよるが6回の測定ですべての幾何学誤差を算出することができ、比較的容易に幾何学誤差を算出することが可能である。また、ゲージは被測定対象となるものと同様な材質でできていることから熱膨張の観点からも良いと考えられる。

4)のステップゲージのような一次元幾何ゲージによる幾何誤差測定では、直角誤差等が十分に算出できないため二次元幾何ゲージと比べると良いとはいえない。

以上のようにCMMの幾何学誤差算出には、いろいろな手法があるが産総研では、二次元幾何ゲージを使用した方法を用いている。

2.2 二次元幾何ゲージによる幾何誤差算出⁶⁾¹⁵⁾¹⁶⁾

二次元幾何ゲージを使用した幾何学誤差算出法は、他の手法に比べ比較的容易かつ高精度である。ただし、ゲージが高価であることが難点である。以下に二次元幾何ゲージによる幾何誤差算出法について説明する。

例えば、ボールプレートの各球が少しの誤差もなく等間隔に製作されているとすると、それをX軸方向に真直誤差を持つCMMで測定を行った場合、その結果は、**図2.1(a)**のように完全な格子がX軸方向の真直誤差によって**図2.1(b)**のように変形する。また、直角誤差がある場合は、**図2.2**のようになる。

CMMのスタイラス先端の座標 E は、測定機に誤差がないとすると三軸に設置されたスケールの読み X がそのまま座標として表される。しかし、**図1.6**に示すような幾何学誤差が発生するため、その座標値 C は、以下のようなモデル式で表される。

$$C = P + A \cdot X + A_p \cdot X_p \quad (2.1)$$

このとき、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -ywx & +zwx + xry + yry \\ 0 & 1 & -zwy - xrx - yrx \\ 0 & +xrx & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 1 & -xrz - yrz - zrz & +xry + yry + zry \\ +xrz + yrz + zrz & 1 & -xrx - yrx - zrx \\ -xry - yry - zry & +xrx + yrx + zrx & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad X_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} xtx + ytx + ztx \\ yty + xty + zty \\ ztz + xtz + ytz \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

上記、モデルを二次元幾何ゲージの測定値から算出する。

次にその測定方法について述べる。

CMMの測定空間における幾何学誤差を算出するためには、**図2.3**に示すように最低6回の測定を必要とする。XY、YZ、ZX平面内でそれぞれ2回ずつの測定を行う。測

定は、CMMの測定領域のすべてをカバーするように行わなければならない。もしゲージよりも大きな測定領域をもつ測定機の場合は、ゲージをずらしてさらに測定を行う必要がある。データのつなぎ合わせを行う都合上、実際には、図2.4のように数ヶ所の重なりが発生するようにずらし、測定を行う必要がある。また、Z軸のロール誤差

を算出するため、YZ及びZX平面における測定では、150 mm以上の長さをもつスタイラスの使用が推奨される。図2.5にこれら測定の様子（例）を示す。以上のように測定を行い、モデル式に基づいて幾何学誤差を算出することができる。

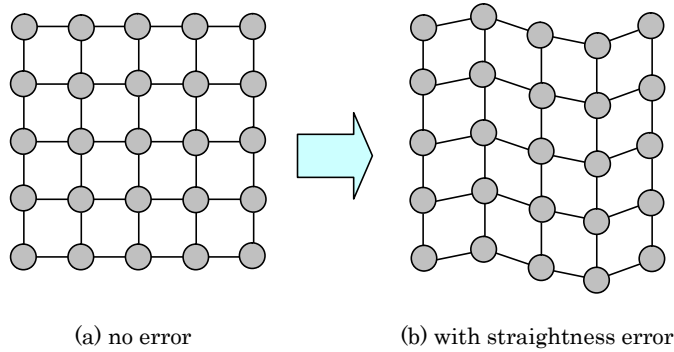


Fig. 2.1 Ball plate measurement result of the CMM with straightness error

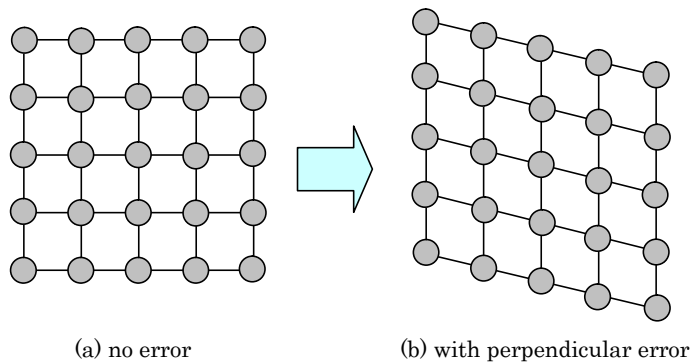


Fig. 2.2 Ball plate measurement result of the CMM with perpendicular error

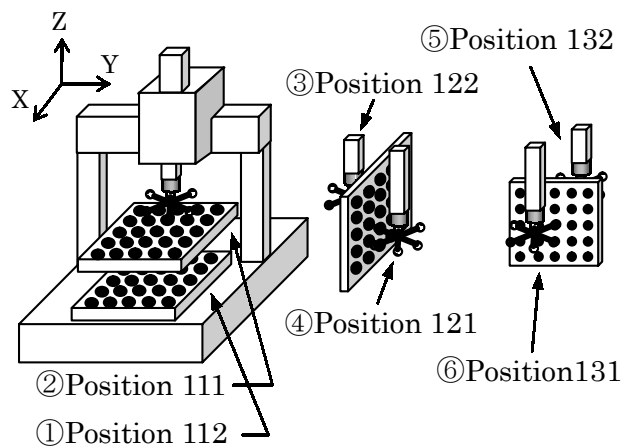


Fig. 2.3 Ball-plate positions for evaluating the parametric errors of CMM

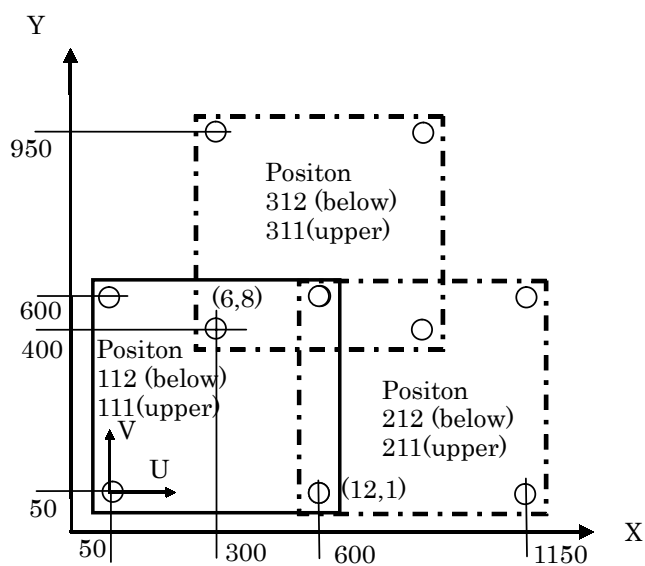
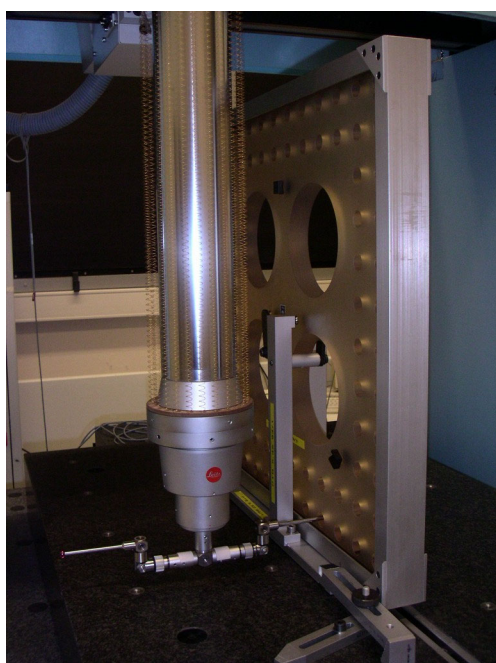
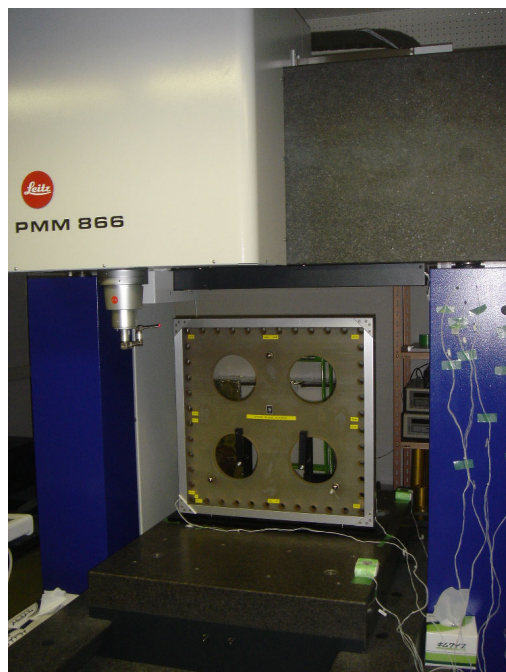


Fig.2.4 Hole-plate setting position in XY-plane



(a) Position 122



(b) Position 131

Fig. 2.5 Pictures of the CMM's parametric error evaluation

第3章 ボールプレートの校正方法

CMMの幾何学誤差を算出することは、CMMの高精度化ならびにソフトウェアシミュレーションによる不確かさの算出を行う上で必須である。この幾何学誤差を算出するのに使用されるボールプレートやホールプレートといった二次元幾何ゲージを高精度に値付けることは、非常に重要なことである。この値がずれてしまうと、このゲージを使用して校正されたCMMは、間違った値を導いてしまう。これらゲージの値付けは、産業技術総合研究所計量標準総合センターで行われている。ここでは、この値付け作業について詳しく説明する。

二次元幾何ゲージの値付けは、CMMを使用して行う。産総研で所有するCMMは、ドイツのLeitz社製PMM866Pという測定機である。非常に高精度なCMMではあるが、二次元幾何ゲージを普通に測定したのではこのCMMが持つ測定精度以上の値をゲージにつけることはできず、結果的に二次元幾何ゲージで産総研の所有するCMMを校正することは不可能になってしまう。そこで、産総研では、このCMMが持つ能力以上の測定を可能とする手法を用いて値付けを行っている。その手法は、反転法¹⁷⁾¹⁸⁾と呼ばれる手法とレーザ干渉計による測定である。この2種類の測定により、より高精度な二次元幾何ゲージの校正を実現している。

3.1 反転法による測定

二次元幾何ゲージの校正作業では、反転法と呼ばれる手法を用いる。この測定は、古くから真直度、直角度、真円度等、幾何学量測定において使用されてきた手法である。反転法の例として真直度測定について説明する。図3.1のように真直度測定機にて測定対象であるストレートエッジを測定するとする。はじめに、図の上部のような測定を行い、その後、ストレートエッジを180度反転し、下部のような測定を行う。このとき、真直度を測定する変位センサの向きを変える必要がある。この2回の測定結果を差し引くと、その真直度測定機のガイド誤差は、キャンセルされ、測定した対象の真直誤差のみが算出できる。図中の上部を数式化するとセンサの出力 $S(1)$ は、測定機の真直誤差 $G(I)$ とストレートエッジの真直誤 $G(S)$ の和で表される。

$$S(1) = G(I) + G(S) \quad (3.1)$$

次に図中下部を数式化するとセンサの出力 $S(2)$ は、以下のように表される。

$$S(2) = -G(I) + G(S) \quad (3.2)$$

式(3.1)、(3.2)より、

$$G(S) = (S(1) + S(2)) / 2 \quad (3.3)$$

となる。式(3.3)より測定機の真直誤差がストレートエッジの真直誤差の結果に影響しないことがわかる。このように測定装置の持つ幾何学的な誤差をキャンセルする測定法は、CMMの測定にも応用することができる。

ボールプレートの測定では、図3.2のように4回のポジションで測定を行うことにより、CMMがもつ幾何学誤差をキャンセルする測定が可能となる。このとき、ボールプレートの中心となる球に対して180度回転させなければならない。各球位置の算出は、図3.3のように北極1点、赤道上4点の計5点の測定から導かれる。このようなプロービング戦略による測定は、CMMのプロービングシステムの誤差を軽減する。そのため、ボールプレート測定においては、プロービング誤差をそれほど考慮する必要がない。例えば、ブロックゲージ測定のような両端面の測定では、このプロービング誤差が距離測定の結果にそのまま影響を及ぼしてしまう。しかし、球の場合、二つの球の中心間距離を求めるため、プロービング誤差が発生しても、球の中心座標は、同じ方向にシフトされるためこの影響を受けにくい(図3.4参照)。つまり、球の中心座標の相対関係は、プロービングシステムの特性によらず、一定して測定できる。

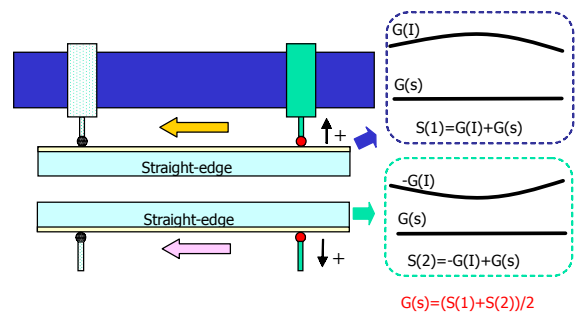


Fig. 3.1 Straightness measurement by reversal method

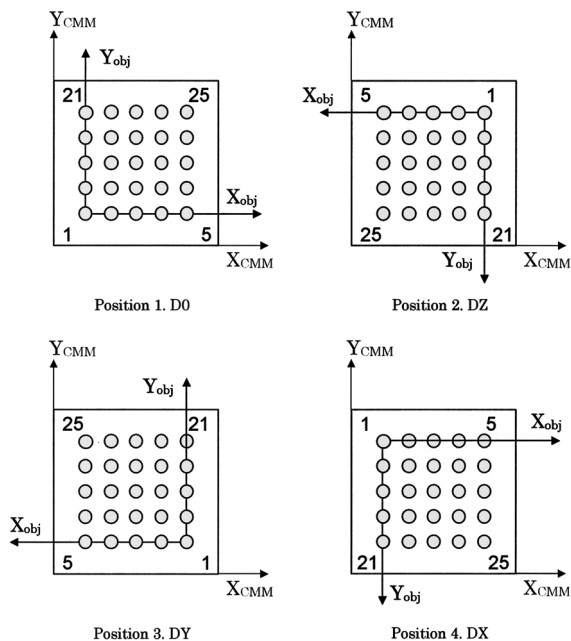


Fig. 3.2 Ball-plate positions for the calibration

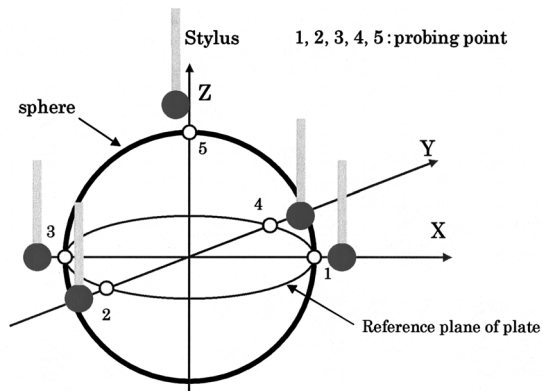


Fig. 3.3 Probing points for the sphere of ball-plate

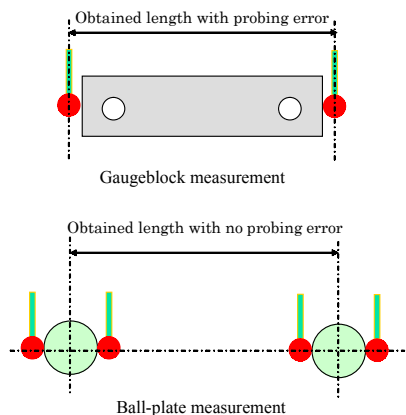


Fig. 3.4 Measurement strategies for length measurement

次に反転法により直角誤差がキャンセルされる様子を図3.5に示す。直角誤差がXY軸の間で発生している場合、ボールプレートの校正値とCMMの測定値の間には図中(a)のような差が生じる。次にボールプレートをZ軸回りに180度反転させて測定を行うと図中(b)のような結果を得ることができる。この2つの結果を足して平均すると、CMMの測定値とボールプレートの校正値との差は、全く無くなる。このような手順でその他の幾何学誤差も反転法によりキャンセルされる。ただし、スケールがもっている指示誤差だけは、取り除くことができないため、別の手法でこれを補正する必要がある。次節でその手法について述べる。

各ポジションにおける測定は、次のような手順で行う。図3.6のように球1を原点、球5をX軸上、球21をXY平面したワーク座標系を構築する。X軸の正方向は球1から球5に向かう方向で、Y軸はそれに垂直でほぼ球1から球21に向かう方向を正方向とする。このようにワーク座標系を構築した後、図3.7のように渦巻状に球1から中心の球13まで順番に測定を行う（Forward測定）。次に球13から先と同じ経路で球1まで順番に測定を行う（Backward測定）。この測定中、通常、温度ドリフト等の影響により測定にヒステリシスが発生するが、このドリフトによる影響は、1次的に発生するため、Forward測定とBackward測定の結果を平均することにより、この影響による誤差を低減することができる。以上のことから、図3.7のような渦巻き測定を行い、高精度な測定を達成している。この渦巻き測定を図3.2に示す4つのポジションで行い、その4つの測定結果を平均することでスケール誤差を除く幾何学誤差をキャンセルした測定結果を得ることができる。

3.2 寸法標準器によるスケール誤差補正

前節において、幾何学誤差をキャンセルする反転法の説明を行った。ここでは、反転法を用いても取り除くことのできないスケール自身の誤差を取り除く手法を説明する。これらスケール誤差は、例えばスケールの取り付け方法により発生する。スケールが少し傾いて取り付けである場合には、余弦誤差が発生し、1次の誤差が現れる。また、スケールを支持する位置によってもスケールに変形をもたらし、誤差を生じさせる。このようなスケール誤差は、寸法の基準となる寸法標準器を用いて取り除くことができる。

3.2.1 ブロックゲージによる手法

寸法標準器の代表であるブロックゲージを反転法の測

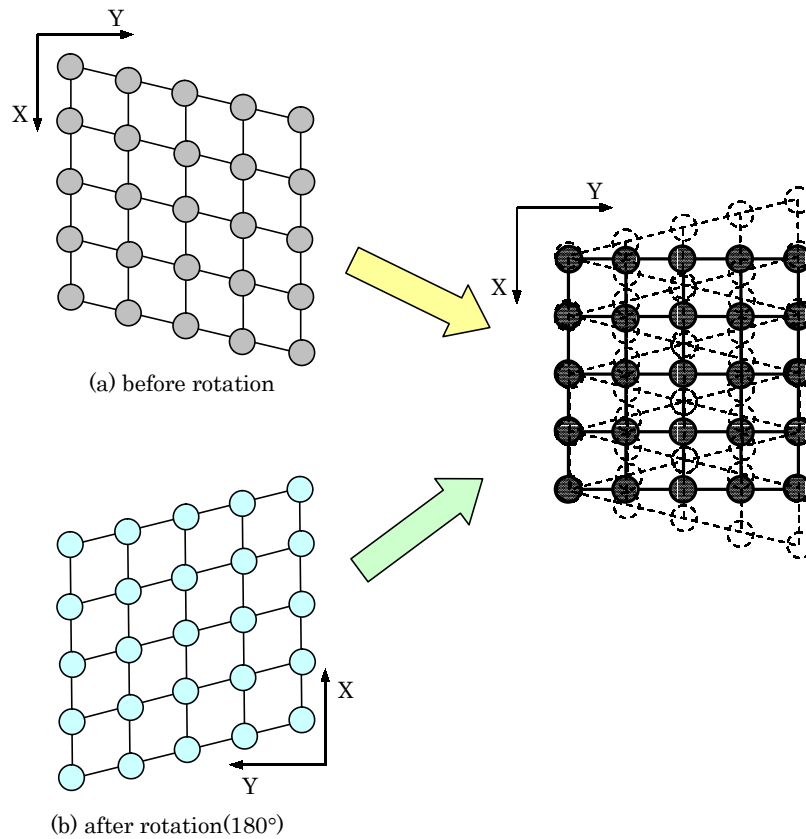


Fig. 3.5 Perpendicular error compensation by reversal method

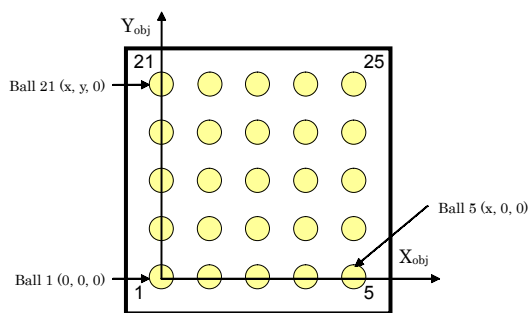


Fig. 3.6 Coordinate system for ball-plate measurement

定が終了した後、測定する。通常、スケール誤差は、1次誤差であるため、この傾きを算出するために最低3本のブロックゲージを必要とする¹⁹⁾。使用するブロックゲージの長さは、ボールプレートの軸方向の最大球間距離とほぼ同じ寸法のもの1本、50~100 mm程度の短めのブロックゲージ1本、2本のブロックゲージの中間程度の寸法をもつブロックゲージ1本が推奨される。X軸方向のスケール誤差を算出する場合、ブロックゲージの片側端面を図3.8のようにCMMのX

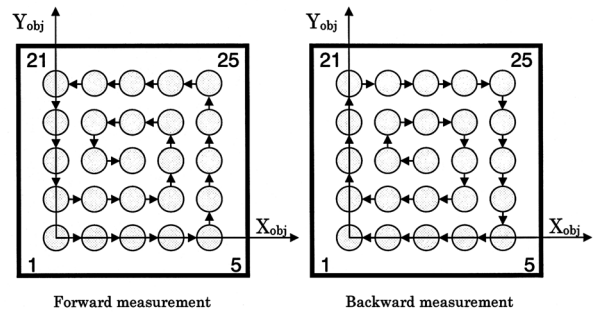


Fig. 3.7 Ball-plate measurement sequence

軸に沿って並べそれぞれのブロックゲージを測定する。ブロックゲージの測定は、図3.9のようにブロックゲージの片側の面を3~4点程度プロービングし、面の法線ベクトルを算出し、この法線ベクトルに平行となる軸上のそれぞれの面1点ずつ、計2点を測定し、ブロックゲージの寸法を測定する。このとき、ブロックゲージの中央を測定するようにする。このようにブロックゲージを測定した後、それぞれのブロックゲージの校正値と測定値とを比較し、その差を

プロットすると、**図3.10**のような結果が得られる。この図から、スケールの1次誤差を算出し、その傾きを補正量とする。同様にY軸に関して測定を行い、補正量を算出する。

ブロックゲージによるスケール補正は、**図3.4**に示すようにボールプレートとは異なるプロービング戦略をとるため、プロービングの誤差が発生する。このプロービングの誤差は、20、30 mmといった短いブロックゲージを測定し、校正値を測定結果と比較することにより導き出すことができる。短尺のブロックゲージは、熱膨張の影響をほとんど受けないため、プロービングの誤差のみを抽出することができる。ここで得られたプロービングの誤差を前述のブロックゲージ測定に適用するとさらに高精度な補正が可能となる。

3.2.2 ステップゲージによる手法

ステップゲージは、10~20 mmの短尺のブロックゲージを並べたような1次元幾何ゲージで、数十本のブロックゲージに相当する。ステップゲージの測定においても、ブロックゲージの測定と同様にX、Y軸それぞれについて測定を行い、補正量を算出する。ただし、ブロックゲージの測定とは、プロービング戦略を変えて測定する。ステップゲージ測定では、**図3.11**のように同じ方向からプロービングを行い、端面を測定するようにする。これにより3.2.1項で述べたプロービングの誤差の影響は、受けない。

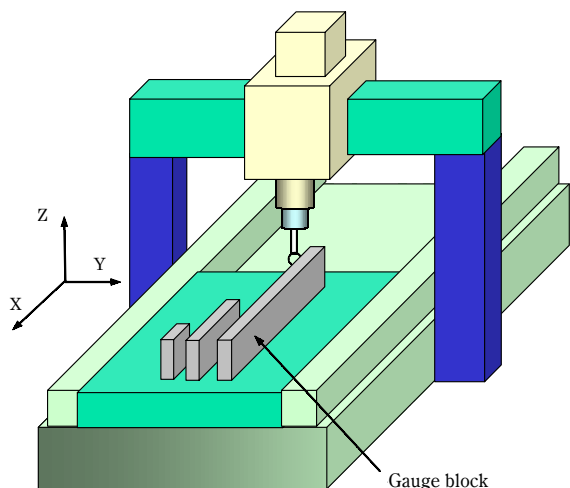


Fig. 3.8 Scale compensation using gauge blocks

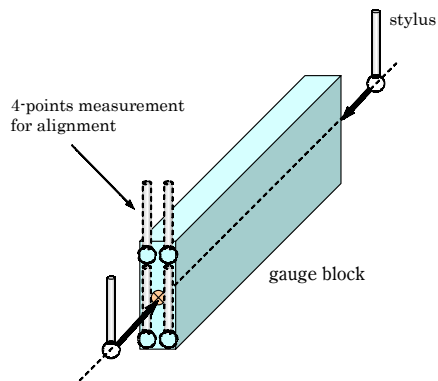


Fig. 3.9 Measurement strategy of gauge block measurement

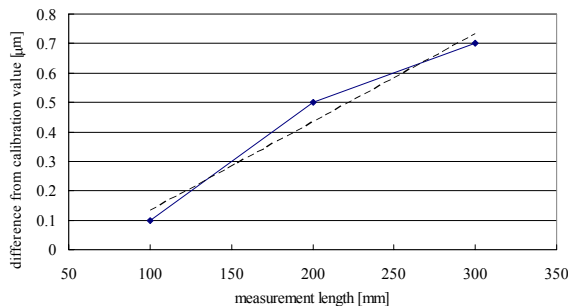


Fig. 3.10 Scale error compensation parameter by gauge block measurements

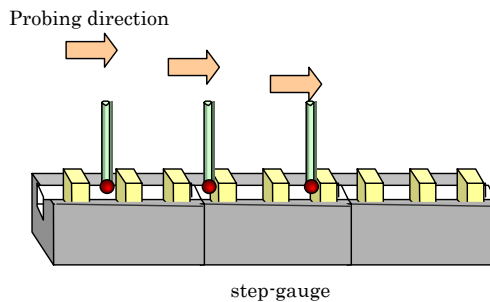


Fig. 3.11 Measurement strategy of step-gauge measurement

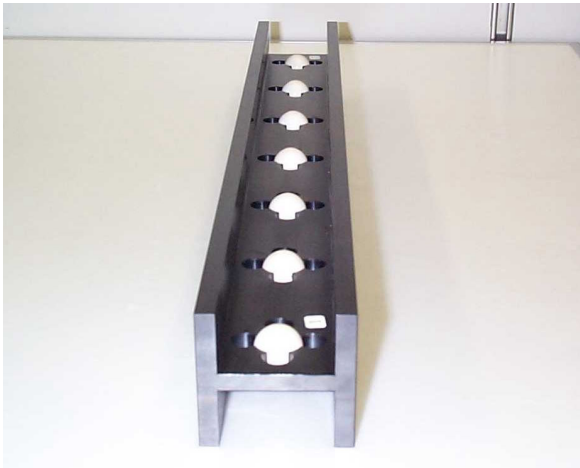


Fig. 3.12 Schematic of ball-step gauge

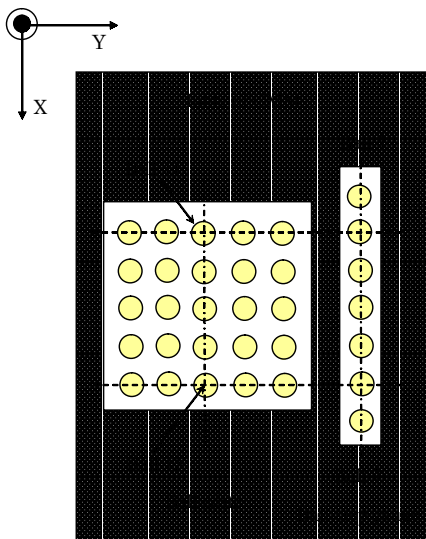


Fig. 3.13 Ball-plate and ball-step gauge alignment

3.2.3 ボールステップゲージによる手法

ボールステップゲージは、産総研が特許取得しているゲージである²⁰⁾。図3.12は、ボールステップゲージの概観を示している。この図からわかるように、ボールプレートを1次元にしたような形状をしている。測定対象となる球は、H形状をした本体の断面2次モーメントの中立軸上に配置されており、上下、左右の熱変化や自重たわみなどによる位置変化が生じた際にもその位置の変化は、非常に小さくなるよう設計されている²¹⁾。この球間距離は、レーザ干渉計によって産総研にてトレーサブルに校正されている。

X軸スケール誤差を算出する場合、はじめにCMMのX軸に沿ってボールプレートとボールステップゲージをしっかりアライメントして並べて配置し、CMMのX軸に沿

ったボールプレートの中央の1列（球11～15）とボールステップゲージの測定を行う（図3.13参照）。次に、ボールステップゲージの測定値のX座標 X_{bs} とその校正値 X_{bscal} の差をボールプレートの中央1列の測定値のX座標 X_{bp} に足し合わせ、反転法による測定値のX座標 X_{bprev} との差を算出する。この差が補正值 C となる。数式で表すと以下のようになる。

$$C = ((X_{bscal} - X_{bs}) + X_{bp}) - X_{bprev} \quad (3.4)$$

5つのそれぞれの球に対して補正值 C を算出し、その補正值を各球のX座標に反映させる。例えば、球13により算出された補正值は、その同じ並びである球3、8、13、18、23へ適用される。同様な手法でY軸方向（球3～23）の補正も行うことができる。もし、ボールプレートとボールステップゲージを同時に測定できない場合は、ボールプレートを配置したほぼ同位置にボールステップゲージを配置して測定を行い、CMMの測定値とボールステップゲージの校正値とを比較し、スケール誤差を導くことにより補正を行うこともできる。

3.2.4 レーザ干渉計による手法

産総研では、ボールプレートの中央一列（X軸方向：球11～15、Y軸方向：球3～23）のみレーザ干渉計を用いて球の中心間距離測定を行い、スケール誤差の補正を行っている。図3.14のような平面ミラーをCMMのプロービングシステムにスタイラスとプローブとの間に取り付け、スタイラスが上下に移動してもレーザが途切れることなく干渉計による測定を可能としている。測定は、シングルパスの干渉計により実施される。コーナキューブをCMMの移動テーブル上に配置してその移動量を測定する手法も考えられるが、この手法の場合、測定ループが前述のものよりも長くなり²²⁾、結果として測定のばらつきが大きくなったため、前述手法に決定した。

ボールプレートを球3が干渉計測、球23が奥になるように配置し、これら球の中心がCMMのX軸に平行になるようにアライメントする。また、レーザも4分割フォトダイオードを用いてアライメントを行う。球の測定は、図3.15のように各球の前後5点ずつプロービングし、各球の中心座標を算出する。このようなプロービング戦略では、X軸方向のプロービングのみしか行わないため、Y、Z軸方向に誤差を生じやすい。しかし、スケール誤差の補正には、X座標のみを対象とするので最終的なボールプレートの座標値には、影響しない。この干渉測定おける誤差要因として、以下のものが挙げられる。

- 1) アライメント誤差
- 2) ミラーの傾き

- 3) アッペ誤差
- 4) 球の形状誤差
- 5) ごみの付着や汚れなどによる誤差

1)のアライメント誤差については、算出した球の中心座標から値が算出できるため最終的には補正を行うが、なるべく物理的にアライメントを合わせるべきである。

2)のミラーの傾きは、あらかじめレーザ干渉計により測定して算出し、補正を行う。

3)のアッペ誤差は、レーザ干渉測定を行っている位置が球の配置された軸線上ではないため生じる。しかし、**図3.16**のように、本測定においては、測定点から球の中心座標を算出するため、スタイラスのプロベリングによる変形量がほぼいつも同じであるとすれば算出された球の中心のX軸座標値に対して、アッペ誤差はほとんど影響を及ぼさない。

4)の球の形状誤差については、補正ができないため測定の不確かさとして考慮する。

5)のごみ等による誤差は、アルコールなどによる洗浄により対処する。

このように、干渉測定から算出された球の中心のX座標と反転法により算出された値とを比較し、スケール補正量を算出する。

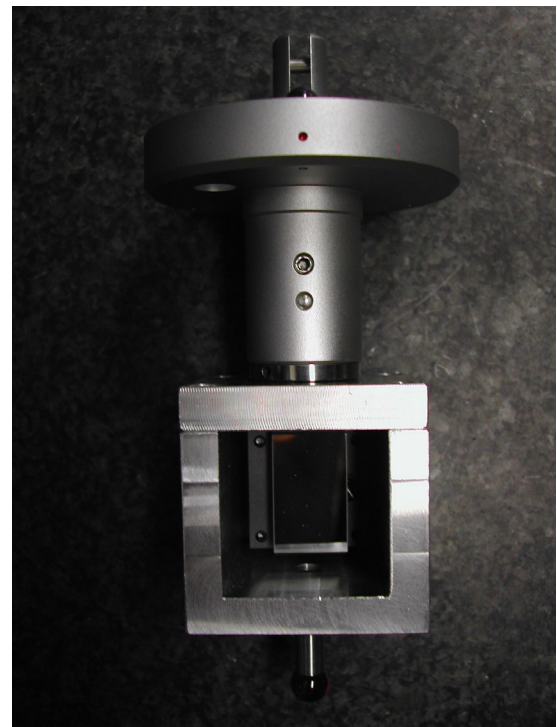


Fig. 3.14 Stylus with mirror

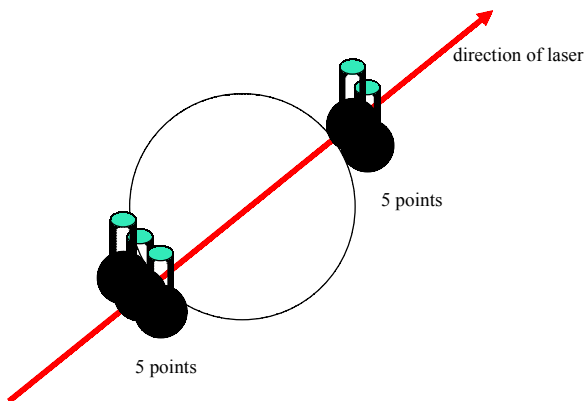


Fig. 3.15 Probing strategy for laser measurement

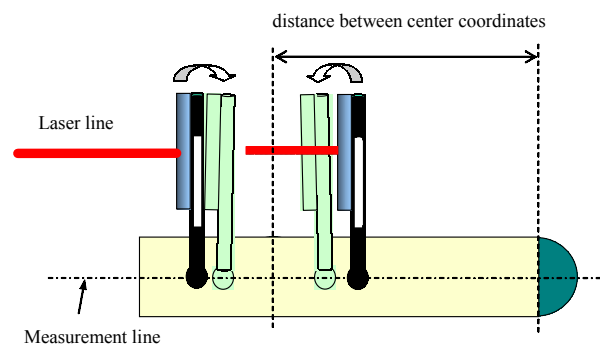


Fig. 3.16 Abbe error in laser measurement

第4章 ホールプレートの校正方法

4.1 反転法による測定

ホールプレートは、ゼロデュア等の線膨張係数が20℃近傍でほぼゼロであるガラス材で製作されていることが多い。ガラスに円筒の穴を等間隔にあげ、その円筒の中心座標を校正するものである。図4.1にホールプレートの例を示す。図中の4つの大きな円筒は、軽量化のためのものである。このホールプレートでは、44個の円筒がゼロデュアにあげられている。円筒は、きれいに研磨され、軸はホールプレート表面に対して直角が出ている。

ホールプレートの校正は、ボールプレートと同様、反転法ならびにレーザ干渉計により行う。ボールプレートと異なるのは、測定の際のワーク座標系の構築とプロービング戦略である。ワーク座標系の構築は、図4.2のようにホールプレートの表面を平面測定し、Z軸を作成する。ホールプレートの厚みの中心となる所で円筒1と円筒12をXY平面内で円測定し、得られた中心座標を結ぶ軸をX軸として、座標系を構築する。プロービングは、図4.3のように行われる。このプロービング戦略も球測定の時と同様にプローブの誤差を低減する。反転法の測定は、ボールプレートの時と同様である。

ときと同様にプローブの誤差を低減する。反転法の測定は、ボールプレートの時と同様である。

4.2 レーザ干渉計によるスケール誤差補正

反転法で取り除くことのできないスケール誤差をボールプレート測定と同様、寸法標準器を用いて補正する。ここでは、産総研が行っているレーザ干渉計による測定法について説明する。ホールプレートは、図4.1のように円筒が外周部分にのみ作製されていることが多い。そこで、レーザ干渉測定をすべての円筒に対して行う（図4.4参照）。アライメント作業は、ボールプレートの場合と同様で、プロービング戦略が異なる。ホールプレート測定の場合のプロービング戦略を図4.5に示す。XY平面内で移動軸に対して±5°の範囲を前後5点ずつ測定し、中心座標を算出する。同様に他の円筒に対しても測定を行い、最終的に反転法で得られた結果とレーザ干渉測定による結果からホールプレートの校正値を得る。

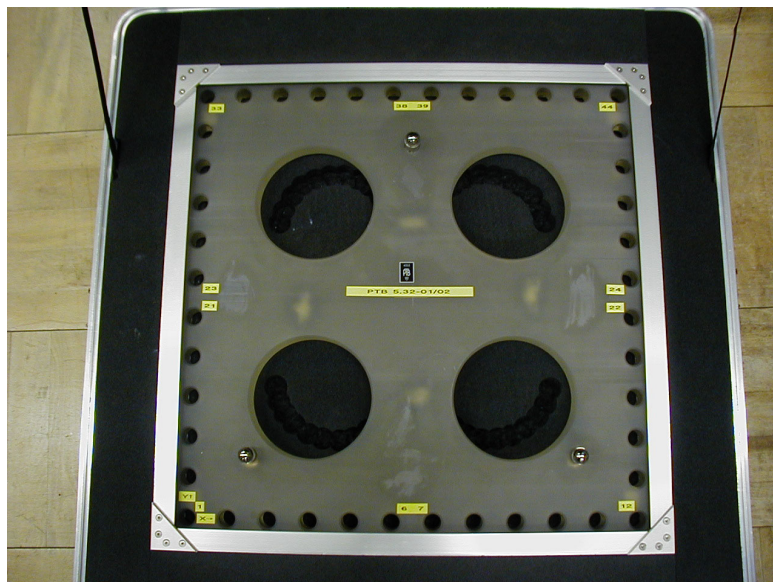


Fig. 4.1 Picture of hole-plate

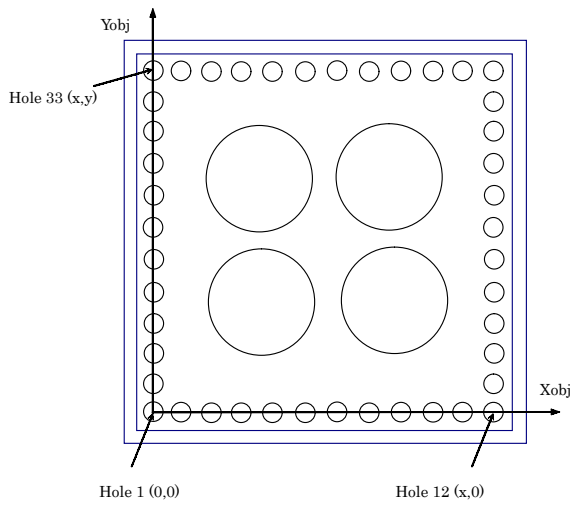


Fig. 4.2 Coordinate system for hole-plate measurement

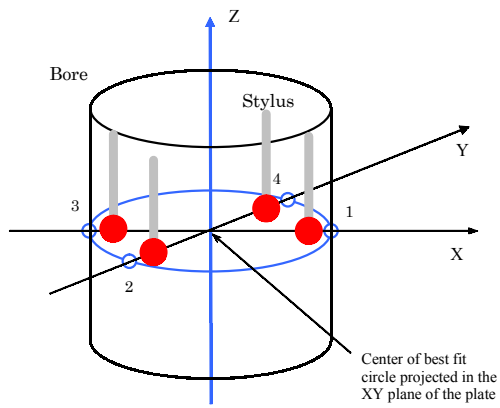


Fig. 4.3 Probing point for the hole of hole-plate

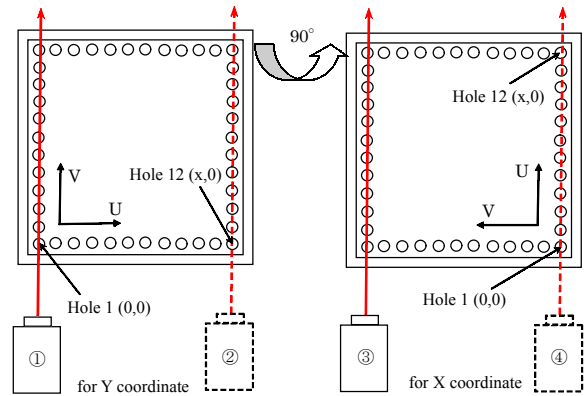


Fig. 4.4 Laser measurement for hole-plate

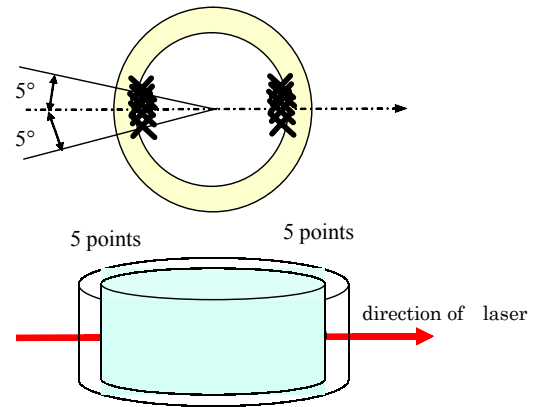


Fig. 4.5 Probing strategy for laser measurement

第5章 ボールプレートの経年変化と測定の不確かさ

5.1 ボールプレートの経年変化

ボールプレートの本体は、通常スチールで製作されている。スチールの材質、加工法にもよるが、製作されてからしばらくは、経年変化を起こすといわれている。特にブロックゲージなどでは顕著にこの影響を受ける。500 mmを超えるようなブロックゲージの場合、最大で1年間に数 μm の単位で変化が起きるといわれている。今回使用したボールプレートは、KOBA製、RETTTER製どちらも1997年製のものである。購入時にKOBA製は、Carl Zeissにより、RETTTER製は、PTBにより校正されている。2002年3月に現在と同様なシステムにて測定しているので、これらの校正値と今回の測定結果を比較した。図5.1は、KOBA製ボールプレートの結果である。この図は、1997年Carl Zeissにより測定された値を基準としてその差をプロットしたものである。図中の誤差バーは、1997年のツァイツ校正における不確かさを示している。X座標を見ると、AISTの結果は、どちらも非常に近い値になっているが、ツァイツの結果は、1次的に少し異なっているのがわかる。次にY座標を見ると、球9の値がツァイツとAISTとの間で大きく異なっている。これは、ツァイツが測定を行った際にごみが付着したなどによりこのような差が生じたと考えられる。また、X座標と同様スケール誤差補正の違いが現れている。いずれにしても、測定の不確かさ以内にAISTの校正値が存在している。以上のことから1997年からKOBA製ボールプレートの値の変化はないと考えられる。図5.2は、RETTTER製ボールプレートの結果である。この図は、1997年PTBにより測定された値を基準としてその差をプロットしたものである。図中の誤差バーは、1997年のPTB校正における不確かさを示している。これらの図からX座標に関しては、差も小さく、変化はないと考えられる。Y軸に関しては、球25が少し外れているが、測定の不確かさを考慮して、変化はないと考えられる。以上のことから、ボールプレートの経年変化はなかったといえる。ただし、これは、産総研の所有するボールプレートに限ったことであって、他のボールプレートに関してはわからない。

5.2 ボールプレート校正における測定の不確かさ

ここでは、産総研におけるボールプレート校正の不確かさについて述べる。不確かさは、計測における不確かさの表現のガイド (GUM) に従い、算出する。ボールプレート校正の不確かさ要因は、測定長さに依存しない要因と、測定長さに依存する要因に分けることができる。不確かさの要因は、以下のようなものが挙げられる。

5.2.1 長さに依存しない項

1) 短期的な再現性 (Aタイプ) u_1

短期的な再現性は、反転法を使った2回の測定結果から算出できる。25個のボールを2回測定したデータの平均からの差の標準偏差は24.6nmとなる。自由度は50 (全データ数) - 25 (平均) - 3 (座標変換) - 1 = 21である。プロービング誤差は、ここに含まれていると仮定する。

2) レーザ計測とCMM計測による球の中心位置測定における測定方法の違いによる誤差 (Bタイプ) u_2

球の形状誤差がこの誤差の要因の一つとなる。10点の測定から、球の中心位置を計算するが、全ての球に対して同じ測定方法を適用するので多くの誤差要因は相殺される。しかし、球が測定ラインに乗っていないことによる誤差等が発生する。その大きさは球の形状誤差程度であると推定する。大きさは、200nm。95%の信頼性でこの推定が正しいとすると、 $u_2 = 200 / \sqrt{3} = 115.5 \text{ nm}$ 。自由度は200。

3) 幾何学誤差

スケールの短期間の周期誤差である。独立な2回の測定結果のばらつきに含まれていると仮定し、無視できる。

4) アッペ誤差

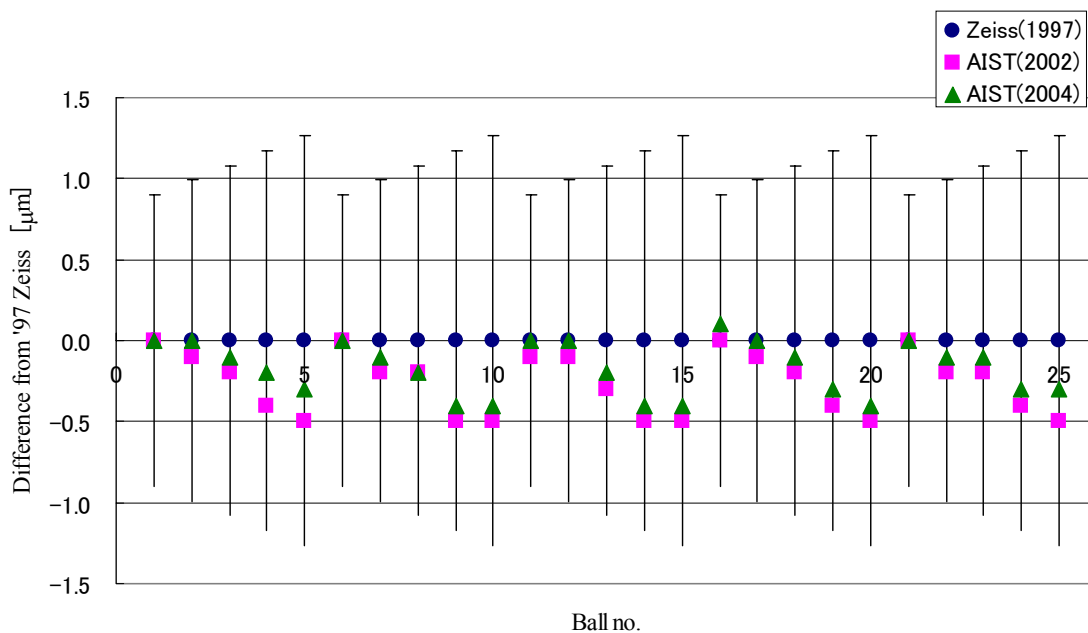
CMMの運動性能が非常に良いため、無視できる。

5) レーザ干渉計測の不確かさ (Bタイプ) u_3

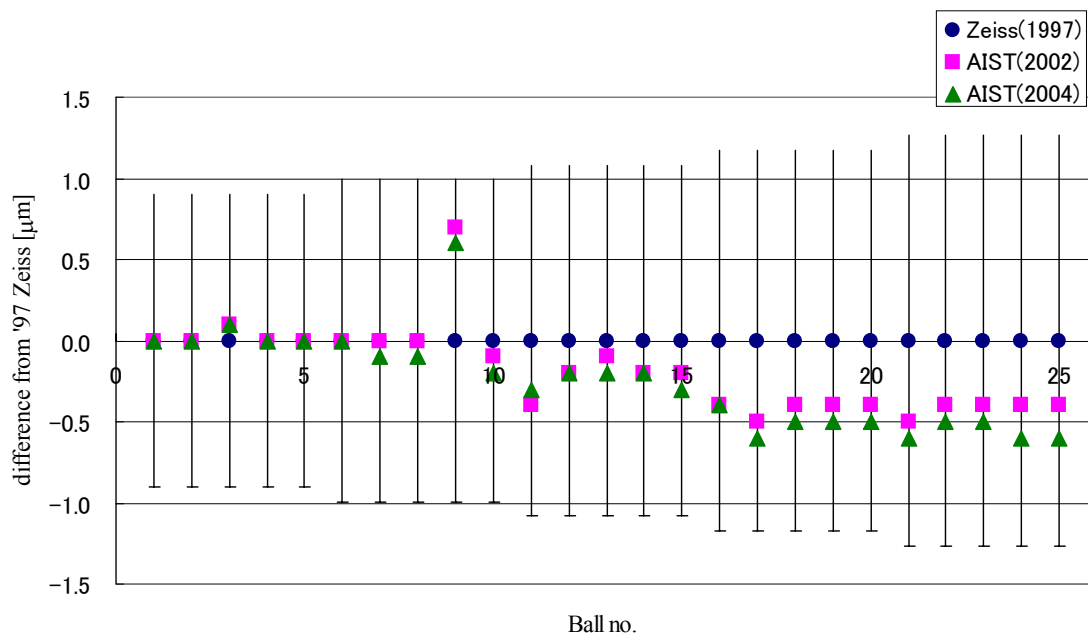
再現性：標準偏差は23nm。自由度は19。(ボールプレート)

非線形性：波長の約20分の1を超えることは通常考えられないため、30nmを超えないと仮定する。一様分布なのでその不確かさは、 $\sqrt{3}$ で割って17.3nm。自由度は200。

量子化誤差：1カウント (10 nm)。 $\sqrt{12}$ で割って2.9nm。自由度は無量大。



(a) X coordinate



(b) Y coordinate

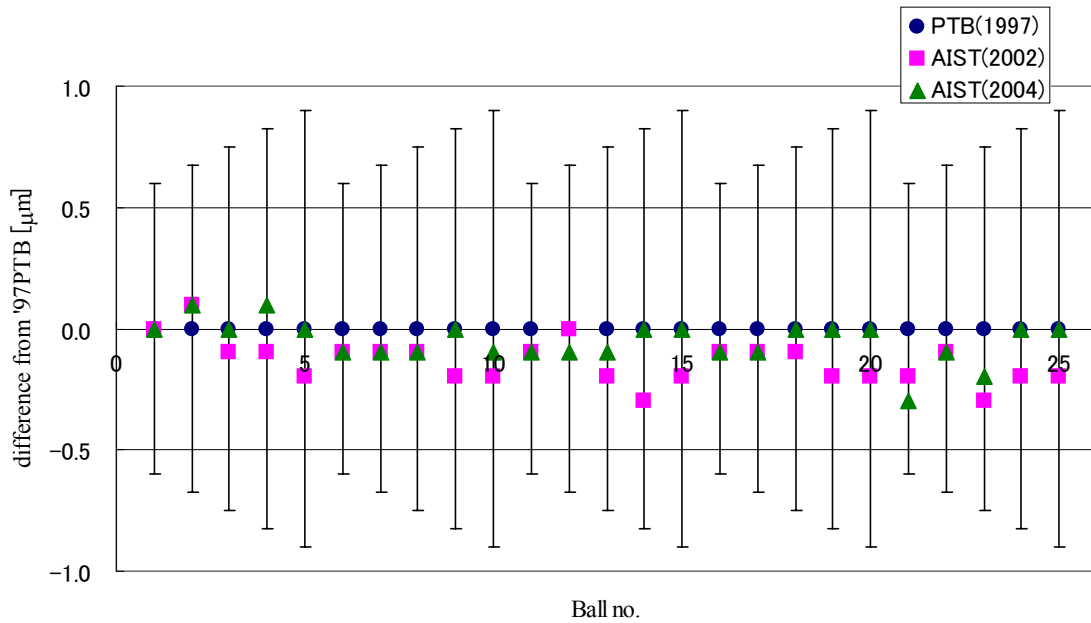
Fig. 5.1 KOBA ball-plate results

5.2.2 長さに依存する項

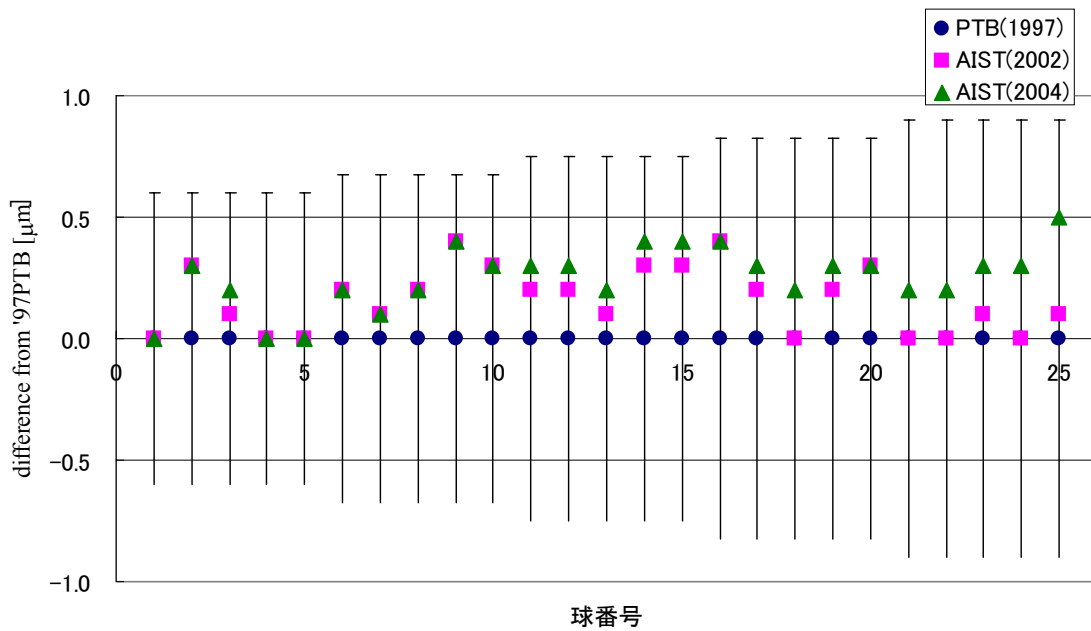
1) ゲージの温度ドリフト (Bタイプ) u_4
 温度ドリフトだけでなく、温度分布、温度測定の不確かさ、温度計の校正の不確かさを含む。実測値は以下の通りである。(ゼロデュア製のホールプレートは線膨張係数が非常に小さい (0.05E-6 [K]) のでこの要

因は、無視できる)

	標準不確かさ	自由度
反転法するとき	$u = 5.2 \text{ mK}$ (標準偏差)	93
レーザ計測するとき	$u = 11.0 \text{ mK}$ (標準偏差)	207
温度測定	$u = 10/\sqrt{3} = 5.7 \text{ mK}$ (仮定)	200
温度計の校正	$u = 10/\sqrt{3} = 5.7 \text{ mK}$ (仮定)	200



(a) X coordinate



(b) Y coordinate

Fig. 5.2 RETTER ball-plate results

2) CMMの温度ドリフト

CMMのスケールに対して長さ標準をトランスファーするため、この要因は、測定結果にほとんど影響しない。温度ドリフトが直接現れるのは、行きと帰りの測定値の差であり、最大で0.4 μmである。行きと帰りを平均するので0.2 μm、つまり±0.1 μm。さらにこれ

がレーザにより補正されるため、要因の大きさはさらに小さくなるため無視できる。本要因も他の要因に含まれていると推定できる。

3) CMMの幾何学誤差 (Bタイプ) u_5

反転法における4回の測定の最大誤差は、最大測定長さである400 mmに対して1.3 μmである。これは、反転

法により相殺されるが、それでも残る誤差があると推定できる。どの程度相殺されるかその大きさはわからないが、一つの目安として、別のCMM（つまり別な幾何学誤差を有するCMM）での測定結果との比較が目安になる。別のCMMによる結果との差には、主に温度補正の誤差による長さに依存する項も含まれているがそれを差し引くと、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ を越えることはない。（例えば、所有する2台の三次元測定機の差や、過去の国際比較の結果などから判断） $0.1 \mu\text{m}/400 \text{ mm} = 0.25 \mu\text{m}/1000 \text{ mm}$ 。 $u = 0.25/\sqrt{3} = 144 \text{ nm}$ 。95%の信頼性でこの仮定が正しいとすると、自由度は $(0.05)^2/2 = 200$ 。

4) レーザ干渉計測の不確かさ (Aタイプ) u_6

表5.1 レーザ干渉計測における不確かさ

要因	
温度のばらつき	6.1 mK (自由度51) 0.006 ppm 8.3 mK (自由度47) 0.008 ppm
温度測定自体	$100/\sqrt{3} = 57.7 \text{ mK}$ 0.055 ppm (自由度200)
気圧のばらつき	6.2 Pa (51自由度) 0.017 ppm
気圧計測の不確かさ	$10/\sqrt{3} = 5.77 \text{ Pa}$ 0.016 ppm (200)
湿度計測の不確かさ	$1/\sqrt{3} = 0.57 \%$ 0.005 ppm (200)
湿度のばらつき	0.071 % (自由度51) 0 ppm
二酸化炭素濃度計測	$100/\sqrt{3} = 57.7 \text{ ppm}$ 0.008 ppm (自由度200)
周波数校正の不確かさ	$1.466 \text{ MHz} (k=2) = 0.733 \text{ MHz}$ $(k=1) 0.003 \text{ ppm}$ (自由度200)
エドレン式の不確かさ	0.025 ppm (自由度200)
合計	0.0658 ppm (自由度377)

5) レーザ干渉計測の不確かさ (Bタイプ) u_7

コサイン誤差。最大ストローク800 mmで $\pm 0.3 \text{ mm}$ を越えることはない。したがって矩形分布と仮定して $\sqrt{3}$ で割る。これを長さに対する項に直すと $\sigma = 32 \text{ nm}/800 \text{ mm}$ となる。平面ミラーから戻光のアライメントにもコサイン誤差が発生するが、レーザ干渉計が動作する範囲においては無視できると仮定する。自由度は200。

6) 長さ比較の不確かさ (Bタイプ) u_8

反転法による計測とレーザ干渉による計測は、測定方法が全く異なり単純には長さ標準をトランスファーできない。その際発生する不確かさは全く不明であるが、補正量の大きさが大体 $1.5 \mu\text{m}/400 \text{ mm}$ 程度であり、

それに比べて不確かさは十分に小さいと推定できる。校正直線の不確かさを考えてCMMの再現性のほぼ $\sqrt{2}$ 倍になる。再現性とはつまり幾何学誤差144 nmと考える。自由度は200。

7) 線膨張係数の不確かさ (Bタイプ) u_9

通常、線膨張係数の不確かさは、通常ゲージ製作会社により与えられている。ここでは、ボールプレートは $1.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ と仮定する。平均温度19.978°C（反転法）、19.951°C（レーザ測定）との積が不確かさになる。 $u_{10} = 0.58 \text{ ppm}$ (自由度200)。0.01276 ppmと0.02842 ppm。その二乗和は0.031 ppmとなる。

8) ミラーの傾き (Bタイプ) u_{10}

レーザの光軸と球を結んだ軸との不一致がある場合、レーザがミラーを照射する位置が異なる。その分をミラーの傾きを実測して補正するが少し残る。最大補正量が $0.16 \mu\text{m}$ 程度ある。誤差は最大10%程度あると仮定し、その確率は95%とすると、 $\sigma = 16 \text{ nm}/\sqrt{3}/332 \text{ mm} = 9.2 \text{ nm}/332 \text{ mm} = 27.7 \text{ nm}/1000 \text{ mm}$ となる。自由度は200。ホールプレートについては、 40 nm の10%。 $4 \text{ nm}/\sqrt{3}/400 \text{ mm} = 2.3 \text{ nm}/400 \text{ mm} = 5.75 \text{ nm}/1000 \text{ mm}$ 。

5.2.3 不確かさの算出

見積もった不確かさ要因を、長さに依存しない項と長さに依存する項のそれぞれについて二乗和を計算する。合成標準不確かさは、それらの二乗和をとる。長さに依存しない項についての不確かさ u_f は、

$$u_f = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_i^2} \quad (5.1)$$

長さに依存する項についての不確かさ u_l は、

$$u_l = \sqrt{\sum_{i=5}^{11} u_i^2} \quad (5.2)$$

である。合成標準不確かさ u_c はこれらの二乗和であるので、

$$u_c = \sqrt{(u_f)^2 + (u_l)^2} \quad (5.3)$$

また、拡張不確かさ U は

$$U = k \times u_c \quad (5.4)$$

である。ここで包含係数 $k=2$ とする。

以上のようにボールプレート校正における測定の不確かさを算出することができる。ここでは、産総研においてもっと良い条件で測定した場合の不確かさ算出について示している。

第6章 ボールプレート校正国内持ち回り比較

6.1 概要

産総研では、各都道府県に設置されている工業技術センター等と計測分科会形状計測研究会と呼ばれる研究会を開催している。2003年10月に開催された会議でボールプレートの持ちまわり測定を企画、開始することに決定した。この持ち回りの趣旨は、今後のCMM校正やバーチャルCMMの普及に伴い、ボールプレート等の二次元幾何ゲージ校正のニーズが高まると予想され、現状では産総研だけが校正を可能としており、これらゲージ校正方法の知識を広めることにある。産総研がパイロットラボとしてプロトコル（付属書1）の作成、途中経過報告、最終報告書（付属書2）の作成を行った。

本持ち回り測定では、産総研の所有する2種類のボールプレート（KOB A、RETT ER製）を使用して、2つのグループで行った。ボールプレートの他に寸法標準器となるボールステップゲージも配布した。ボールステップゲージによるスケール誤差補正の有効性を確かめる意味でも良い機会となった。輸送中、測定中の温度、湿度は、データロガーにより測定を行った。また、輸送用のケースには、衝撃センサを貼り付けることにより、輸送中の衝撃を観察した。

6.2 参加機関

本持ち回り測定に参加した機関は、16機関であった。

- 1) 産業技術総合研究所（パイロットラボ）
- 2) 企業 4（CMMメーカ2、CMMメーカ代理店1、測定サービス1）
- 3) 県工業試験場 10
- 4) 公的機関 1

6.3 測定結果

6.3.1 産総研における3回の測定結果

本持ち回り測定では、産総研において各ボールプレートに対して持ち回りの始めと終わり、中間の計3回の測定を行った。これは、輸送等の影響による校正値の変化を観察することができる。図6.1は、KOB A製ボールプレートの結果を、図6.2は、RETT ER製ボールプレートの結果を示している。これらの結果は、3回の測定値の平均値からの差を示している。これらの図からKOB A、RETT ER製それぞれのボールプレート校正値は、産総研における測定の不確かさの範囲内に存在し、1年間値の変動がないことが示された。

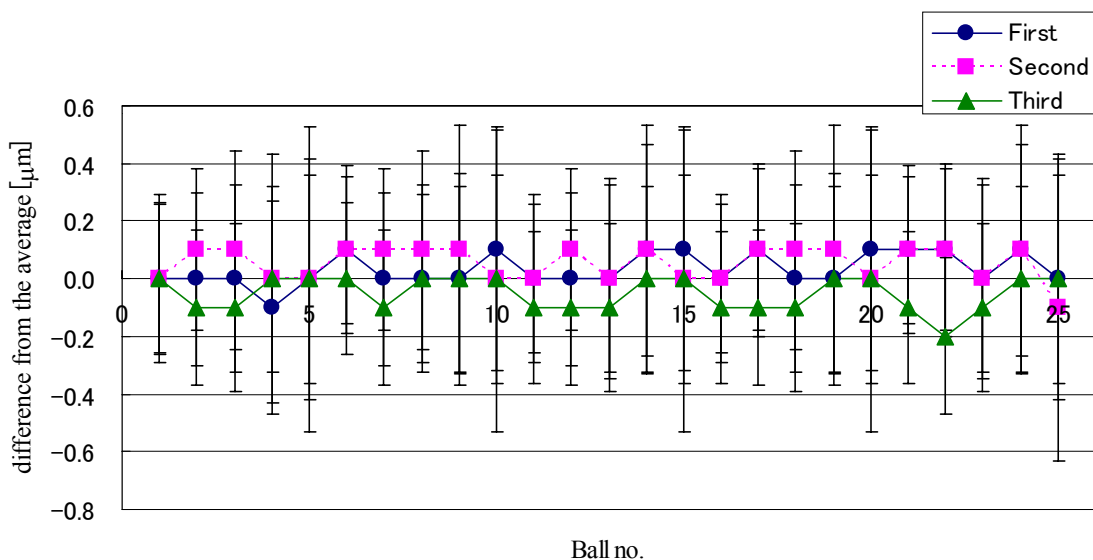
次にボールステップゲージの産総研における結果を示す。図6.3にKOB A用ボールステップゲージの測定結果を、図6.4にRETT ER用ボールステップゲージの測定結果を示す。これらの結果は、3回の測定の平均値からの差を示している。図中のバーは、1回目の測定における不確かさを示している。この結果から、残り2回の測定値は、すべて1回目の測定の不確かさの範囲内に存在しており、これら3回の測定において値の変動はなかった。

6.3.2 各機関の測定結果

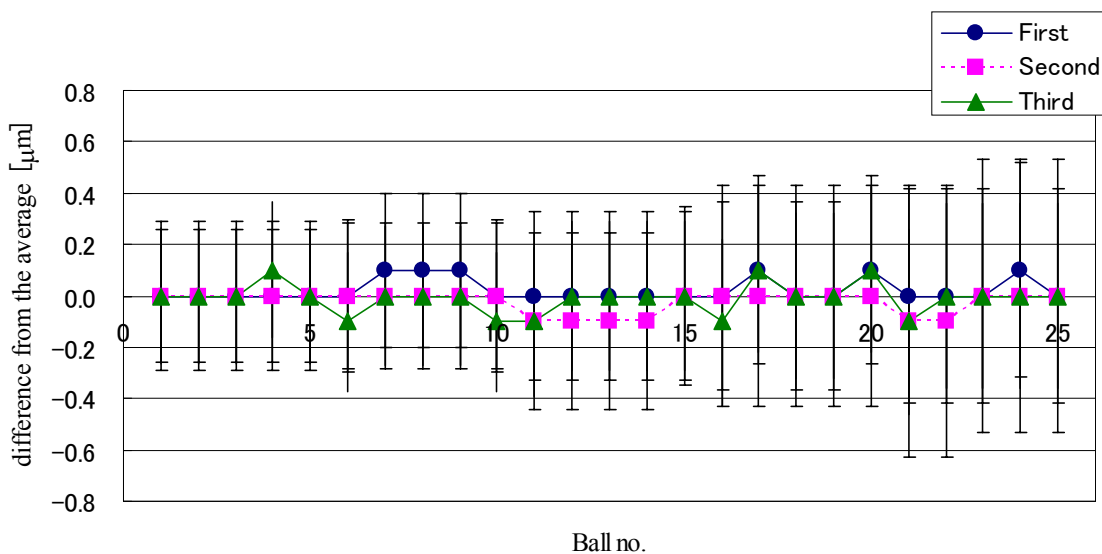
各機関の測定結果の公表については、プロトコル作成時より形状計測研究会で議論され、機関の名称が分からないようにして公表できるということに決定した。そのため、ここで公表する結果は、A、B、Cという機関名称になっている。図6.5は、KOB A製ボールプレートの結果を、図6.6は、RETT ER製ボールプレートの結果を示している。

KOB A製ボールプレートにおいて、測定D及び測定Hの測定結果が他の結果に比べ大きく外れているが、これは、寸法標準器であるボールステップゲージを測定した際の誤差が結果に影響を及ぼしたと考えられる。そのほかの測定においても小さい値ながらそのような傾向が見られるものもある。最終結果は、0.1 μm読みで桁を丸めているため、その影響による量子化誤差も影響を及ぼしている。しかし、各機関の結果は、よく産総研の値と一致しており、各機関の実力が示された。

RETT ER製ボールプレートにおいては、ボールプレートに使用された球がスチール球（KOB A製はセラミック球）であるためKOB A製ボールプレートに比べ真球度が悪く、ばらつきが大きい。測定Pが参照値と少し異なった値を示しているが、この原因も寸法標準器であるボールステップゲージを測定した際の誤差により最終結果に影響を及ぼしたと考えられる。測定I、J、K、Nなども同



(a) X coordinate



(b) Y coordinate

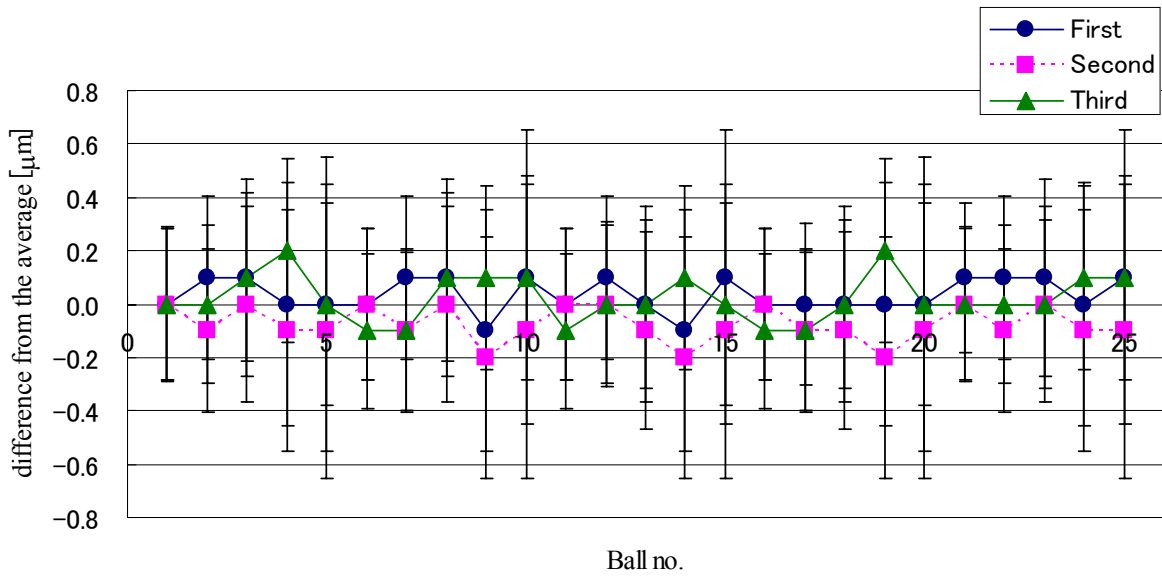
Fig. 6.1 KOBA ball-plate results in AIST

様の傾向が見られる。KOBA製ボールプレートの結果と比べ、全体のばらつきが大きいようにみられ、真球度が原因の1つとして考えられる。KOBA製ボールプレート同様各機関の結果は、よく産総研の値と一致しており、各機関の実力が示された。

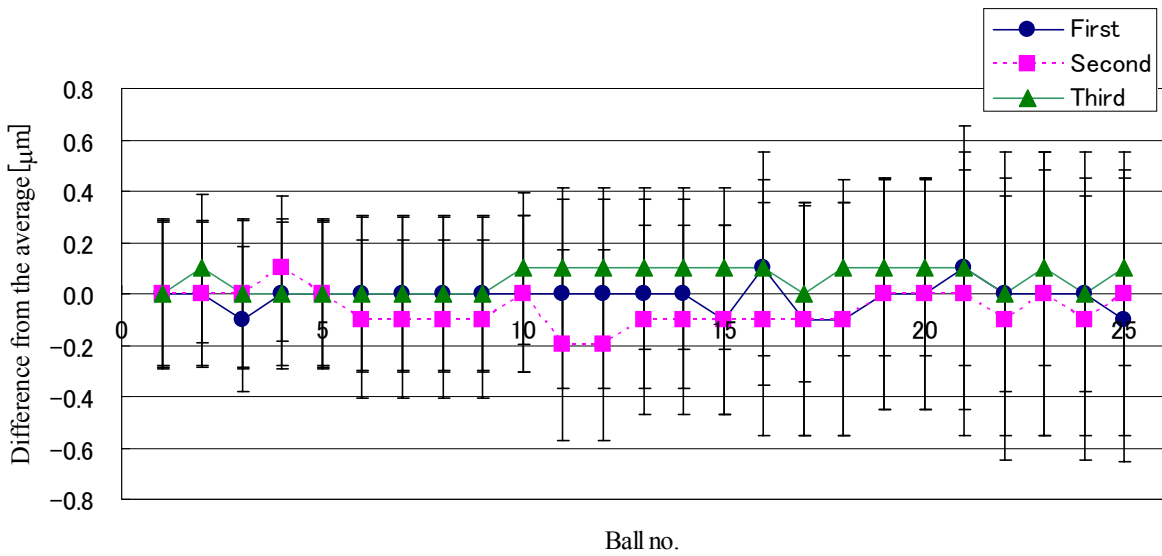
以上、ボールプレート国内持ち回り測定について説明をした。さらに詳しい結果については、付属書2を参照していただきたい。

6.4 まとめ

今回の持ちまわり測定には、県工業技術センターを中心として多くの機関に参加いただき、様々な知見を得ることができた。各機関がスケジュール通りに測定を修了し、輸送を行っていただいたためすべての日程を予定通りこなすことができた。1年間で測定、まとめまで終了できたことは、今後国際比較等の際にもこの経験が役立つ



(a) X coordinate



(b) Y coordinate

Fig. 6.2 RETTER ball-plate results in AIST

つと考えられる。ボールプレート等の輸送は、一般の宅配業者もしくはハンドキャリアで行われたがゲージの値の変化は無かった。各機関の測定環境も非常に良く、温度については、 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度にすべての機関が収まっていた。測定結果についてもほとんどすべての機関で産総研の校正値と $1\ \mu\text{m}$ 以下で一致しており、反転法と寸法標準器による校正法が高精度な測定を可能とすることが分かった。さらに、今回の持ち回りでは、手動プロービン

グ型のCMMによる参加もあり、通常そのようなCMMでは、達成できない結果が今回得られたという、非常に大きな知見を得た。今回の持ち回りで使用した産総研が開発したボールステップゲージの1年間における校正値の安定性を確認することができたと同時にブロックゲージ等に代わる寸法標準器として今後利用できることが確認できた。

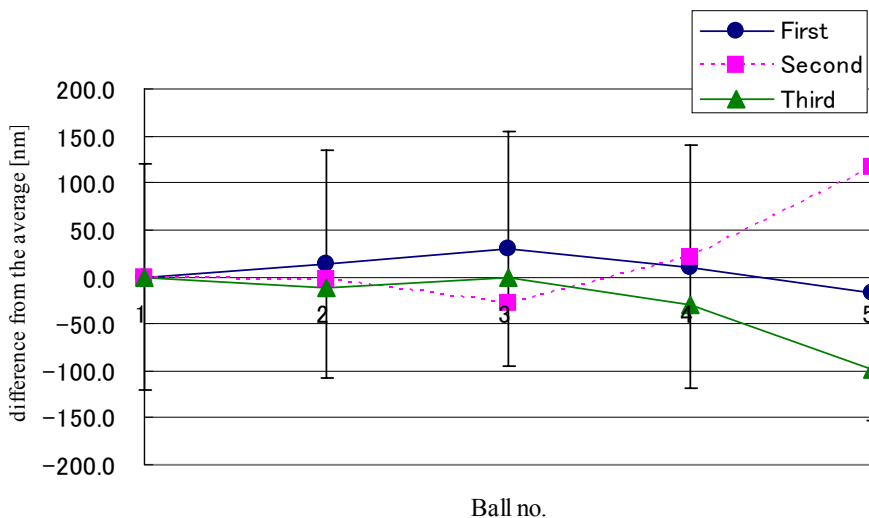


Fig. 6.3 Result of ball-step gauge for KOBA ball-plate

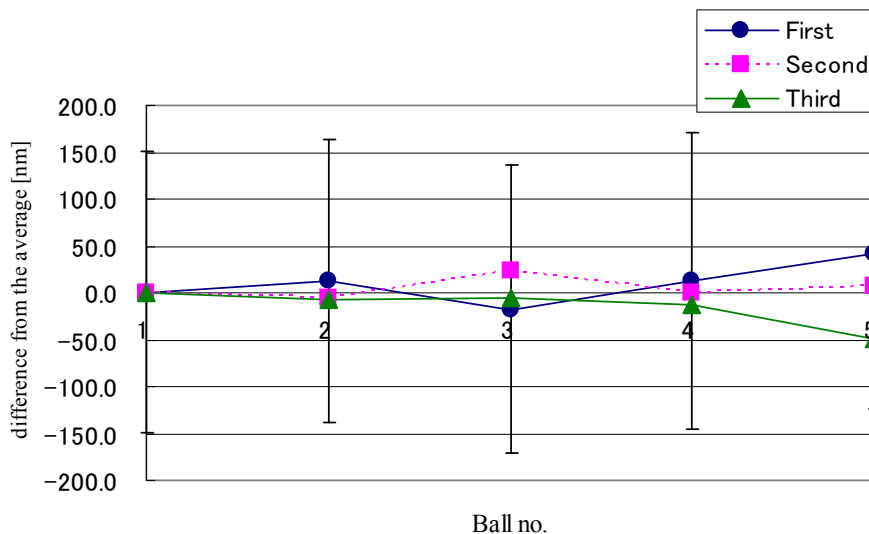
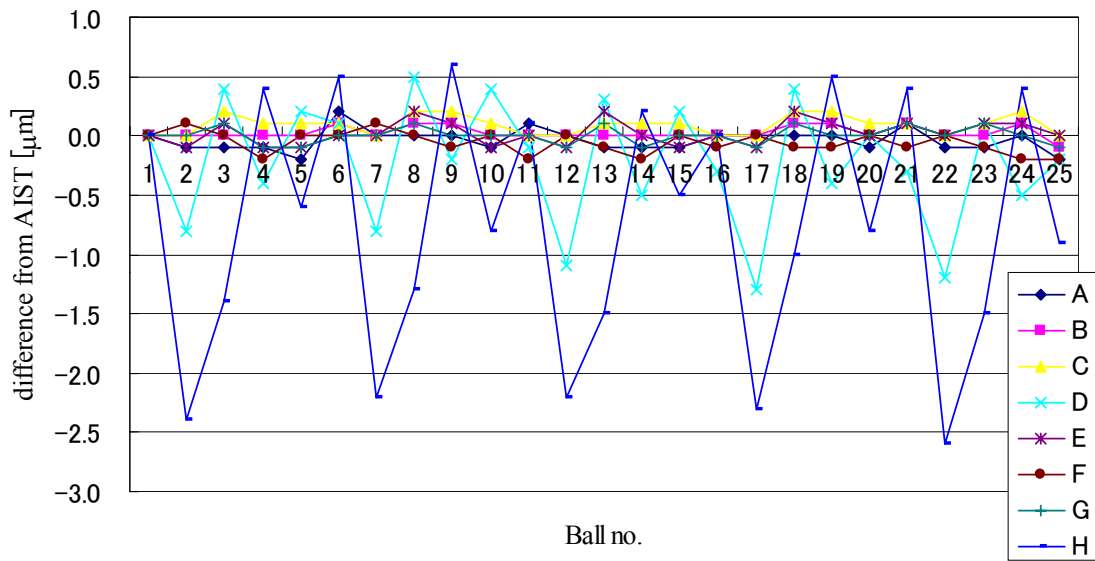


Fig. 6.4 Result of ball-step gauge for RETTER ball-plate

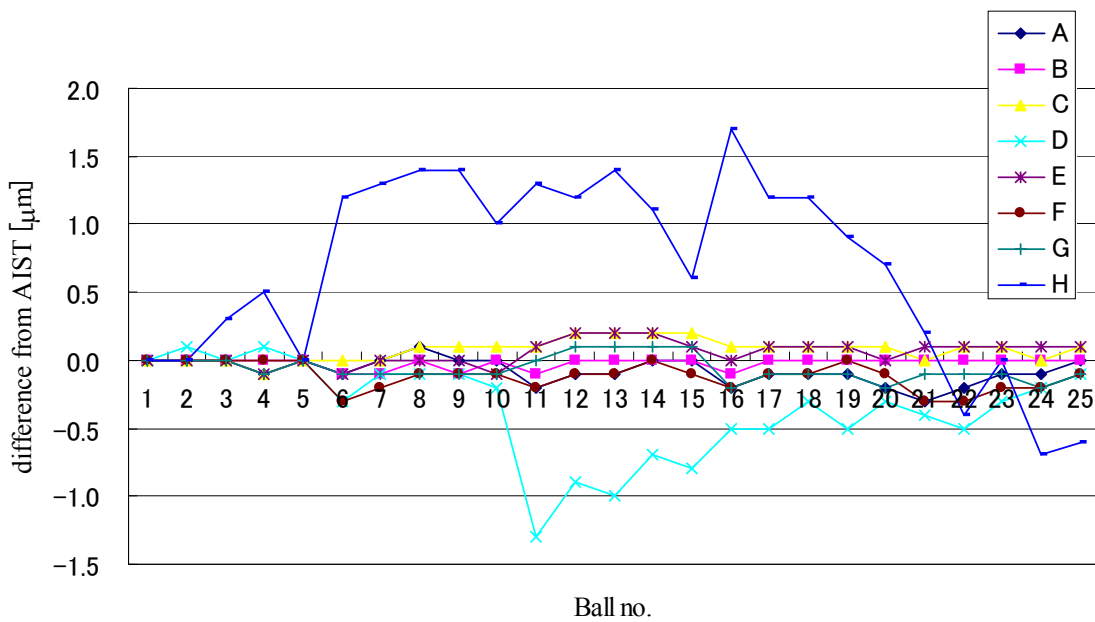
おわりに

本技術書では、三次元測定機の校正や検査に用いられるゲージの校正方法について説明した。現在、三次元測定機の精度検査状況は、製造メーカーが行う年1回の定期検査のみもしくは、購入してからまったく検査をしていないという状況がほとんどである。本来であるならばユーザーが月1度、測定機の定期検査を行うことが望ましい。定期検査を行う習慣をユーザーに広めるためには、産総研

をはじめとして県の工業技術センター等がユーザーに対して積極的に各種ゲージを使用した測定機の検査方法等を広め、ゲージの値付けなどを行うサービスを展開することが大切である。今後、計測分科会や学会発表のような活動を通して、さらにユーザーの測定への意識を変えていくことが望まれる。



(a) X coordinate



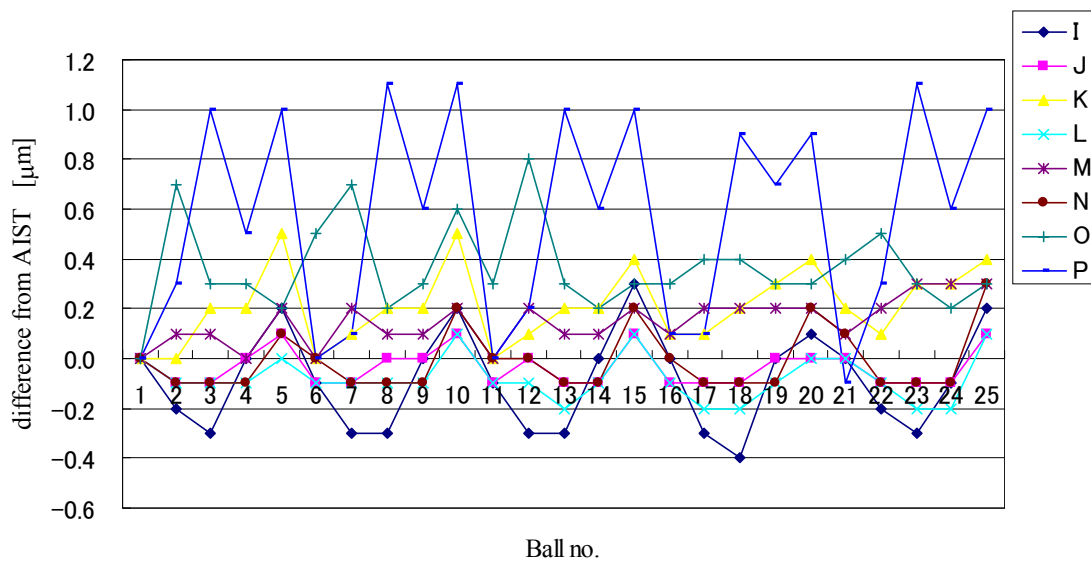
(b) Y coordinate

Fig. 6.5 KOBA ball-plate results

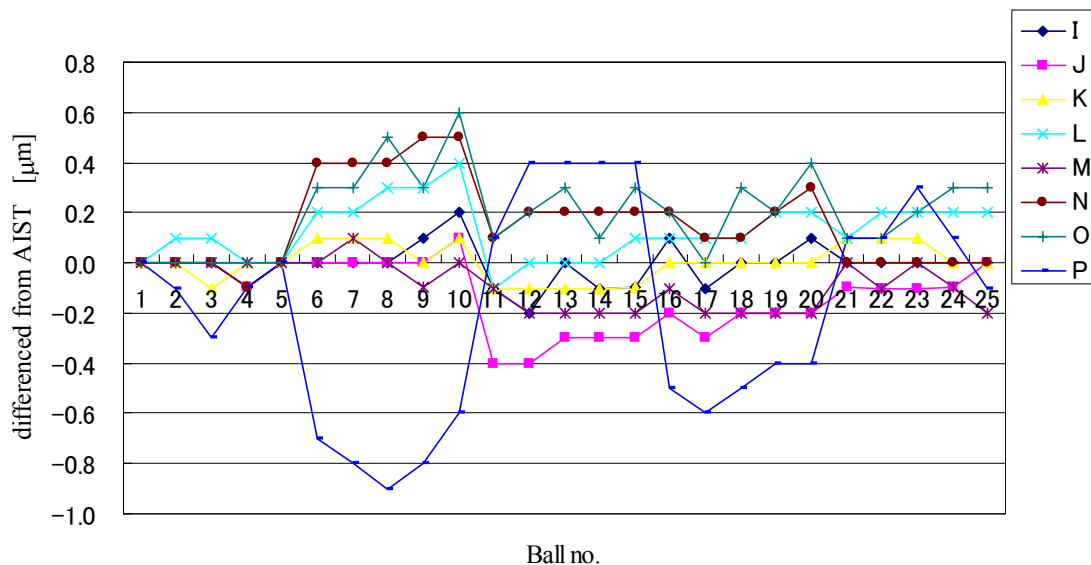
謝辞

本モノグラフに記載のボールプレート持ち回り測定は、産業技術連携推進会議 知的基盤部会 計測分科会 形状計測研究会の主催により行われた。持ち回りに参加していただいた岩手県工業技術センター 和合 健氏、福

島県ハイテクプラザ 吉田 智氏、群馬県立群馬産業技術センター 鏑木 哲志氏、埼玉県産業技術総合センター 宇野 彰一氏、東京都立産業技術研究所 樋田 靖広氏、静岡県浜松工業技術センター 山田 浩文氏、石川県工業試験場 廣崎 憲一氏、鳥取県産業技術センター 木村 勝典氏、広島県立東部工業技術センター 竹



(a) X coordinate



(b) Y coordinate

Fig. 6.6 RETTER ball-plate results

保 義博氏、山口県産業技術センター 池田 悟至氏、
 (財)機械振興協会 高瀬 省徳氏、(株)ミットヨ 阿
 部 誠氏、(株)東京精密 荒井 正敏氏、日本電産トー
 ソク(株)榎本 幹雄氏、(株)浅沼技研 今澤 宣幸氏
 にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) JIS B 7440-1:2003 「製品の幾何特性仕様 (GPS) - 座標測定機 (CMM) の受入検査及び定期検査-第1部: 用語, 日本規格協会発行
- 2) S. Sartori, G. X. Zhang: Geometric Error Measurement

- and Compensation of Machines, *Annals of the CIRP*, 44, 2, pp.599-609 (1995).
- 3) J. A. Soons, F. C. Theuws and P. H. Schellekens: Modeling the errors of multi-axis machines: a general methodology, *Precision Engineering*, 14, 1, pp.5-19 (1992).
 - 4) Han Haitjema, Wouter Pril and H. J. Schellekens: A Silicon-Etched Probe for 3-D Coordinate Measurements With an Uncertainty Below 0.1 μm , *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50, 6, pp.1519-1523 (2001).
 - 5) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO (1993).
 - 6) E. Trapet, et al.: Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine, Final Project Report MAT1-CT94-0076, PTB-Bericht F-35, Part 1 and 2 (1999).
 - 7) F. Haertig, E. Trapet, F. Waeldele and U. Wiegand: Traceability of Coordinate Measurements According to the Virtual CMM Concept: Proceedings of the 5th IMEKO TC-14, pp. 245-254 (1995).
 - 8) 高増潔: バーチャル座標測定機, 計測と制御, 40, 11, p.801 (2001).
 - 9) S. Phillips et al.: The Validation of CMM Task Specific Measurement Uncertainty Software, Proc. of ASPE 2003 Summer Topical Meeting on Coordinate Measuring Machines, pp. 51-56 (2003).
 - 10) ISO/TS 15530-3, Geometrical Products Specifications (GPS) -Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement- Part 3: Use of calibrated workpieces or standards, ISO (2004).
 - 11) Paulo Cauchick-Miguel, Tim King, Jim Davis: CMM verification: a survey, *Measurement*, 17, 1, pp.1-16 (1996).
 - 12) G. Zhang, R. Ouyang, B. Lu, R. Hocken, R. Veale and A. Donmez: A Displacement Method for Machine Geometry Calibration, *Annals of the CIRP*, 37, 1, pp.515-518 (1988).
 - 13) K. Busch, H. Kunzmann and F. Waeldele: Calibration of coordinate measuring machines, *Precision Engineering*, 7, 3, pp.139-144 (1985).
 - 14) 阿部誠、高増潔、大園成夫: 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*, 67, 4, pp.638-643
 - 15) 梅津健太、古谷涼秋: CMMの幾何学的誤差推定による校正と不確かさ, *精密工学会誌*, 69, 1, pp.64-68 (2003).
 - 16) A. Balsamo, M. Franke, E. Trapet, F. Waeldele, L. De Jonge and P. Vanherck: Results of the CIRP-Euromet Intercomparison of Ball Plate-Based Techniques for Determining CMM Parametric Errors, *Annals of the CIRP*, 46, 1, pp.463-466 (1997).
 - 17) C. Evans, R. Hocken and W. Estler, Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and 'Absolute Testing' : *Annals of the CIRP*, 45, 2, pp. 617-634 (1996).
 - 18) H. Schwenke, E. Trapet and F. Waeldele: Pushing the Limits of Accuracy of Coordinate Measurement: Proceedings of the Fourth International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering, Vol.1 pp. 331-335, Braunschweig Germany (1997).
 - 19) Toshiyuki Takatsuji, Sonko Osawa and Tomizo Kurosawa: Uncertainty analysis of calibration of geometrical gauges, *Precision Engineering*, Vol.26 No.1 pp.24-29 (2002).
 - 20) 高辻利之、大澤尊光、黒澤富蔵、野口宏徳: 特許第3210963号
 - 21) Sonko Osawa, Toshiyuki Takatsuji, Hironori Noguchi and Tomizo Kurosawa: Development of a ball step-gauge and an interferometric stepper used for ball-plate calibration, *Precision Engineering*, Vol.26 No.2 pp.214-221 (2002).
 - 22) 大澤尊光、高辻利之、黒澤富蔵: ステップゲージ校正用干渉式三次元測定機の開発, *精密工学会誌*, Vol.68 No.5 pp.687-691 (2002).