日本機械学会論文集(C編)
56巻525号(1990-5)

論文 No. 88-1090 A

三次元座標測定機の精度向上法*
(第3報, 測定プローブの姿勢決定法)

大矢 誠*1, 穂苅 久*2, 田村久司*1

A Method of Improving the Accuracy of the Three-coordinate Measuring Machine
(3rd Report, A Method of Determining the Attitude of the Measuring Probe)

Makoto OYA, Hisashi HOKARI, and Hisashi TAMURA

To calibrate the three-coordinate measuring machine (3CMM) with several kinds of measuring probes that differ in shape and size, it is necessary to know the attitude of the probe about the coordinate axis as well as the error vector. This paper presents a method of determining the attitude of the probe at several positions in the measuring range. In this method, the three-dimensional standard gages of two types and probes of four types with different offeset are used to observe the attitude, and the discrete distribution of the attitude vector is determined. Based on the proposed method, the experimental measurement to determine the attitude vector was performed. The systematic error at any position in the 3CMM can be calculated from the distribution of the error vector and the attitude vector. To verify the measuring accuracy corrected by the systematic error, distance measurements were performed using the gage blocks, and the measured values were corrected. As a result, it was clarified that the correction improves the accuracy of the 3CMM.

Key Words: Measurement, Accuracy, Calibration, Attitude Vector, Error Vector, Three-coordinate Measuring Machine, Three-dimensional Standard

1. 緒 言

複雑な三次元形状の測定を, 短時間に, 容易に行うことのできる測定機として, 三次元座標測定機は現在の機械工業に不可欠のものとなっている. この測定機については, 精度試験の方法, データ処理機能や操作性の向上, 測定の自動化とともに, 高精度化などの研究も行われている.

精度向上のためには, 測定機の幾何学的な精度を高めることがまず考えられる. そのほかには, ソフトウェア的に系統誤差を補正するということも考えられる. 後者の方法を実現するための基礎として, 著者らはこれまでに, 誤差ベクトル分布の決定法と誤差補正法について研究を行ってきた[1][2]. そして, 前報[4]では試作した三次元用ゲージを用いた誤差ベクトルの離散的な分布決定法を示し, その誤差を補正すれば測定精度が向上することを確認した.

これら一連の研究では電気接点式のタッチ信号プローブを用いて測定を行い, 測定機の系統誤差を誤差ベクトルとして求めた. この誤差ベクトルは, 測定プローブの姿勢変化によって生ずる誤差を含むものである. ところで, プローブおよびその測定子の向きや長さが変われば, 測定される座標値が同じ値であっても, 座標を検出する位置は異なってくる. プローブの姿勢変化による影響は座標検出点の位置によって変わってくるから, 測定プローブを変えた場合には誤差ベクトルの分布も異なったものになる. よって, 誤差補正による測定機の精度向上のためには, プローブの姿勢変化の様子を知る必要がある.

そこで本研究では, 測定プローブの姿勢変化を決定する方法を提案する. この方法は, 三次元用ゲージを用いて, 姿勢の変化を決定するものである. ゲージは, 先に誤差ベクトルの決定に用いたものと同じものを用いる. そして, 測定機の実使用状態における測定プローブの姿勢変化の様子を x, y, z 各軸に対する傾きとして観測し, これを決定する. これらの傾きを成分とするベクトルを姿勢ベクトルと呼ぶことにする. 誤差ベクトルの分布とともに姿勢ベクトルの分布もあらかじめ求めておけば, プローブの測定子の方向や長さが変わっても系統誤差を知ることができる. そして, その値で座標測定値を補正すれば, 測定機の精度を向上させることができる. これが本研究の目的である.

* 平成元年10月28日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 昭和63年7月25日.
*1 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2-8050).
*2 正員, 長岡工業高等専門学校 (〒940 長岡市西片貝町888).

本研究では提案の方法に基づき，実機について測定実験を行い，プローブの姿勢変化の様子を観測し，測定機空間内の離散的な位置における姿勢ベクトルの値を求めた．また，実験により求めた姿勢ベクトルの正しさを検証するために，測定プローブの取付け方向を変えて座標検出点の位置を変化させ，測定空間内のさまざまな位置・方向で既知寸法を測定し，誤差ベクトルと姿勢ベクトルの両方を補正してみた．その結果，補正によって測定精度の向上することが確認できた．本報ではそれについても報告する．

2. 姿勢ベクトルの決定法

2·1 測定プローブの姿勢　図1に直交座標形の三次元測定機の構造の概略を示す．この測定機は，x, y, z の各キャリッジが直交3軸方向にそれぞれ移動し，測定プローブは z 案内軸先端に取付けてある．図1の場合には測定子および座標検出点もその軸上にある．

測定プローブが移動するとき，各キャリッジは理想的な幾何学的直線運動をしているとは考えられない．そのため，測定プローブの姿勢が変化する．姿勢の変化は，個々の測定機固有の分布をするものと考えるべきであろう．そして，その分布は，測定機空間内でのプローブの位置のみの関数であるとしてよいであろう．

ある位置（点P）での姿勢を表現するために，図1に示すように測定プローブの x, y, z 各軸に対する傾き $(\omega_P)_x$, $(\omega_P)_y$, $(\omega_P)_z$ を用いる．これらは測定機の幾何学的な誤差によるものであり，その値は微小である．よって，この角度成分をそのままベクトル成分としてよい．そして，この3成分からなるベクトル $\boldsymbol{\omega}_P((\omega_P)_x, (\omega_P)_y, (\omega_P)_z)$ を姿勢ベクトルと言うことにする．添字 P および後述の Q は，測定プローブの位置を示している．各成分は図1に示す方向を正とする．

図1に示すように座標検出点が z 案内軸上にあるプローブを，標準プローブと呼ぶことにする．誤差ベクトルは，このプローブを用いて決定してある[1]．したがって，標準プローブで測定すれば，点Pの正しい位置 $\boldsymbol{X}_P$ を知ることができる．このとき誤差ベクトルは姿勢変化による狂いを含めた形で求めているから，標準プローブを用いる限り，特に姿勢の影響を考慮する必要はない．また，この場合の誤差ベクトルには ω_z すなわち z 案内軸のローリングの影響は含まれない．なぜならば，座標検出点が z 案内軸上にあるので，ω_z が変化しても，それは検出点位置に影響しないからである．

2·2 姿勢とオフセットの関係　測定プローブ，あるいはその取付け方向などを変えた場合には，座標検出点の位置は，標準プローブのそれと異なってくる．この差をオフセットと呼ぶことにする．図2は，姿勢ベクトル $\boldsymbol{\omega}_P$ が零ベクトルの場合について，方向と長さの異なる二つのプローブの測定子を同時に示したものである．図2の点Pは，標準プローブの座標検出点であり，その正しい座標を $\boldsymbol{X}_P$ で表す．また，点P′はオフセットプローブの座標検出点である．二つのプローブは，検出点位置が異なっているが，座標の測定値は同じになる．2点P, P′の差をオフセットベクトルと言うことにし，これを $\boldsymbol{r}(r_x, r_y, r_z)$ で表す．オフセットプローブによって測定される点P′の座標 $\boldsymbol{X}_P'$ は次のように表される．

$$\boldsymbol{X}_P' = \boldsymbol{X}_P + \boldsymbol{r} \quad \cdots\cdots(1)$$

図3は，図2と同じプローブではあるが，測定機空間内での位置が変わった場合を示したものである．プローブの移動に伴って姿勢が変化し，オフセットプローブの座標検出点は点Q′に位置している．このとき，オフセットベクトルは見かけ上 $\overrightarrow{QQ'}$ となり，図2の場

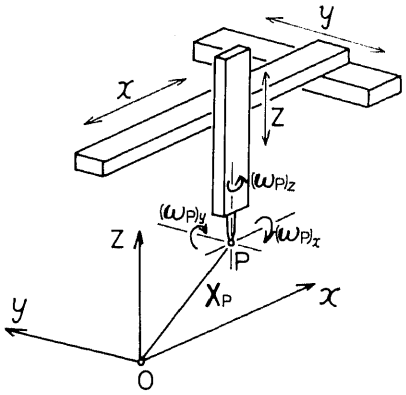


図1　三次元測定機の構造と測定プローブの姿勢

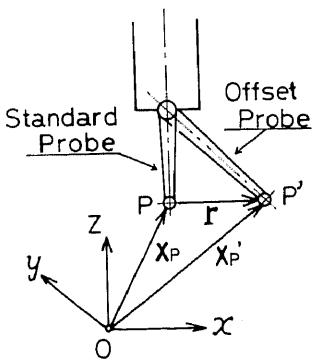


図2　測定プローブのオフセット

合のそれ（r）と大きさは変わらないが，方向が異なる．姿勢が変化した場合には，点Q′の正しい座標 X'_Q は次式より求められる．

$$X'_Q = X_Q + r + \omega_Q \times r \quad \cdots\cdots(2)$$

式(2)の右辺第3項が姿勢変化の影響を示すものである．そして，それは姿勢ベクトルとオフセットベクトルのベクトル積であり，各ベクトルの成分を用いて表現すれば，次式のようになる．

$$\omega_Q \times r = \begin{Bmatrix} (\omega_Q)_y r_z - (\omega_Q)_z r_y \\ (\omega_Q)_z r_x - (\omega_Q)_x r_z \\ (\omega_Q)_x r_y - (\omega_Q)_y r_x \end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots(3)$$

このように，ある位置でのオフセットベクトル（例えば図2の r）が既知であったとしても，測定プローブの位置が変わると姿勢も変化するから，式(2)右辺第3項のように姿勢変化の影響を考慮しなければならない．

もし，測定空間内のあらゆる位置Qで，その正しい位置 X_Q と姿勢ベクトル ω_Q をあらかじめ知っておくことができれば，どのようなオフセットベクトル r（既知）の測定プローブを用いても，式(2)により，その座標検出点の正しい位置を知ることができる．すなわち，測定精度の向上が期待できる．

2・3　姿勢ベクトルの決定法　本法では，姿勢ベクトルを決定するために立体的なゲージを用いる．このゲージは，測定プローブをいくつかの点に位置決めできるようになっている．図4に示した4点P′，P″，Q′，Q″は位置決め点である．その座標 X'_P，X''_P，X'_Q，X''_Q は，標準プローブを用いて測定して，あらかじめ定めておく．次に，オフセットプローブでそれらの点の座標を測定すれば，次のようにして姿勢ベクトルを知ることができる．

点Pでの姿勢を基準として，点Qの位置での姿勢の変化を求めるものとする．最初に，点Pの位置でオフセットベクトル r_1 を決定する．位置決め点P′の座標 X'_P を図4に示したオフセットプローブで測定すれば X_P が得られるから，オフセットベクトル r_1 は，

$$r_1 = X'_P - X_P \quad \cdots\cdots(4)$$

で決定できる．

次に同じプローブで座標 X'_Q にある位置決め点Q′を測定すれば，測定値 X_Q を得る．よって，$d'_Q(d'_Q)_x$，$(d'_Q)_y$，$(d'_Q)_z$ を

$$d'_Q \equiv X'_Q - X_Q - r_1 \quad \cdots\cdots(5)$$

とおけば，式(2)は姿勢ベクトル x_Q について次のように書き換えることができる．

$$\begin{bmatrix} 0 & (r_1)_z & -(r_1)_y \\ -(r_1)_z & 0 & (r_1)_x \\ (r_1)_y & -(r_1)_x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (\omega_Q)_x \\ (\omega_Q)_y \\ (\omega_Q)_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (d'_Q)_x \\ (d'_Q)_y \\ (d'_Q)_z \end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots(6)$$

式(6)の右辺 d'_Q は既知であるから，この式は姿勢ベクトル ω_Q の3成分を未知数とする連立一次方程式の形になる．しかし，一つの軸まわりの傾きの影響は，オフセットがあっても，その軸方向には現れないので，係数行列の対角要素はすべて零になる．そのために，この式より姿勢ベクトルの3成分を決定することはできない．

オフセットベクトル r_1 を設定する際に，その x 軸成分に対して他の2軸成分を十分小さくして，r_1 をほぼ $(r, 0, 0)$ とすることは可能である．このときには式(6)における $(r_1)_y$ と $(r_1)_z$ が小さくなり，これらと姿勢ベクトル成分との積は二次の微少量で零と見なせる．そして，この場合には，姿勢ベクトルの y, z の2軸方向成分を決定することができる．すなわち，式(6)より $(\omega_Q)_y$，$(\omega_Q)_z$ は次のようになる．

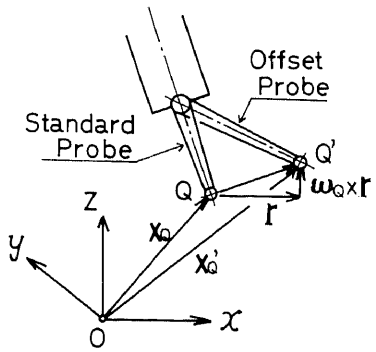


図3　姿勢の変化とオフセットの関係

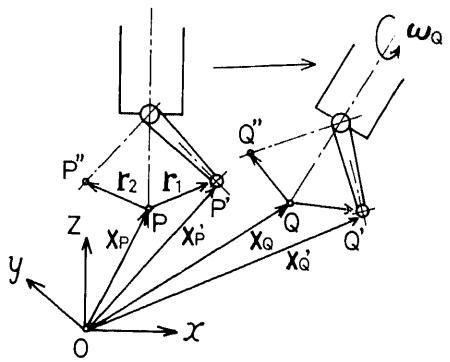


図4　位置決め点を用いた姿勢ベクトルの決定

$$\left.\begin{aligned}(\omega_Q)_y&=-(d'_Q)_z/r\\(\omega_Q)_z&=\ (d'_Q)_y/r\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(7)$$

また，このオフセットベクトルのプローブでは姿勢の影響は x 軸方向には現れず，$(d'_Q)_x$ は零になるはずである．したがって，この測定だけでは $(\omega_Q)_x$ を決定することはできない．

同じ点Qの位置で姿勢ベクトル ω_Q は変わらないから，オフセットベクトルの方向を変えて別の方向からこれを観測すれば，こんどは x 軸成分 $(\omega_Q)_x$ を知ることができる．例えば，オフセットベクトル r_2 を $(0, r, 0)$ とし，図4に示した別の位置決め点P″，Q″に関して先と同様の測定を行う．すなわち，点P″によって r_2 の値を決定してから点Q″の座標を測定すれば，式(7)と同様の式により姿勢ベクトルの x, z 軸成分 $(\omega'_Q)_x, (\omega'_Q)_z$ を知ることができるようになる．ただし，こんどは $(\omega_Q)_y$ はわからなくなるが，先に $(\omega_Q)_y$ は求めてある．また，$(\omega_Q)_z$ は重複してわかる．これはこの方法の検証およびその値の精度を高めることに用いることができる．

3. 三次元用ゲージによる姿勢ベクトルの決定

3・1 三次元用ゲージの形状と観測点の配置　立体的なゲージを用いた精度検査法に関する研究はいくつかみられるが[5][6]，本方法で用いる三次元用ゲージは誤差補正を目的とし[4]，誤差ベクトルの各軸成分を求めるために試作・検定したものである[3]．

A形ゲージは，ほぼ一平面上に20個の精密鋼球が図5のように配置してある．B形ゲージは，図6のように80 mmずつ離れた高さのところに，それぞれ3個ずつ計9個の精密鋼球が配置してある．位置決め点 P_i (i=1～20と1～9) は各鋼球の中心とする．鋼球中心の正しい位置は既知である．また，縦，横，高さ方向の間隔はそれぞれほぼ80 mmずつになっている．

本研究では，図7に示すように測定機空間を格子状に分割し，60個所の格子点で姿勢ベクトルの値を決定する．すなわち，これらの格子点を観測点とする．この観測点の配置は誤差ベクトルの場合のそれと同じである．各点の位置は，x, y, z 方向に順に走査したときの通し番号（図7）によって示すことにする．また，観測点1の位置での姿勢を基準として，他の観測点2～60で姿勢ベクトルを求める．

3・2 測定方法　測定プローブは4通りのオフセットベクトル $(r_1 \sim r_4)$ のものを用いた．それは，ほぼ次のような値である．

$$\left.\begin{aligned}r_1&=(\ 80,\ \ 0,\ 0)\,\mathrm{mm}\\r_2&=(\ \ 0,\ 80,\ 0)\,\mathrm{mm}\\r_3&=(-80,\ \ 0,\ 0)\,\mathrm{mm}\\r_4&=(\ \ 0,\ -80,\ 0)\,\mathrm{mm}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(8)$$

例えば，標準プローブが図7の観測点47に位置するときには，各プローブの先端はそれぞれ観測点48, 52, 46, 52に位置するようになっている．そして，これらのプローブをそれぞれプローブ1，プローブ2，……，

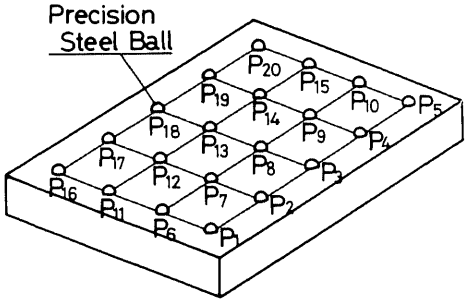


図5　A形ゲージの形状

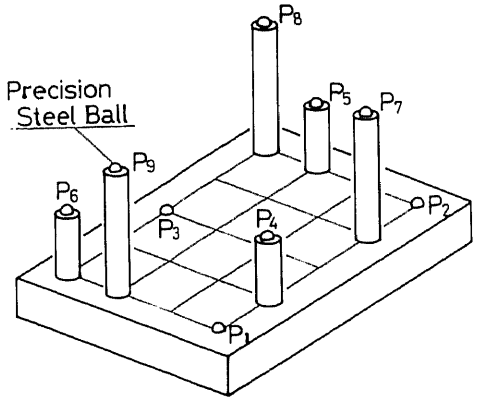


図6　B形ゲージの形状

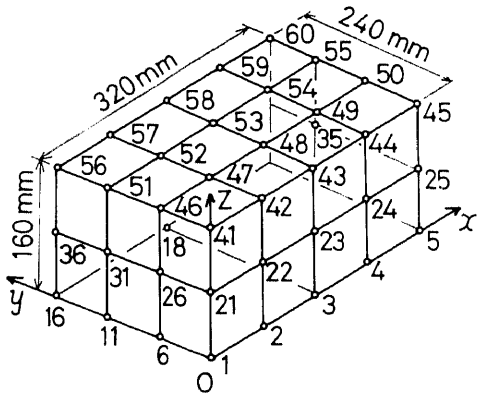


図7　測定範囲と観測点の配置

と呼ぶことにする．2・3節に記したように，プローブ1とプローブ3を用いると姿勢ベクトルの y, z の2軸成分を同時に決定できる．また，プローブ2とプローブ4では姿勢ベクトルの x, z の2軸成分を決定できる．

A形ゲージについては，測定を3回行う．すなわち，P_1～P_{20} の20個の位置決め点が観測点1～20，21～40，41～60とそれぞれほぼ一致するように3段階の高さにゲージをセットして，これを測定する．B形ゲージについては，位置はめ点 P_1～P_9 が観測点1，5，18，22，35，36，44，60，51とそれぞれほぼ一致するようにセットして測定する．これら計4回の各測定の手順は次のようである．

最初に標準プローブ（$r=0$）を用いてゲージの位置決め点を測定し，測定機上での各点の正しい座標を決定しておく．前報[4]では，この測定結果より誤差ベクトルの分布を決定した．次に姿勢ベクトルを決定するために，ゲージの位置をそのままにしておき，測定プローブの取付け方向のみを順次変えて r_1～r_4 の4通りのオフセットベクトルのプローブによって位置決め点の座標を測定する．この測定値には姿勢変化の影響が含まれているから，2・3節の考え方より姿勢ベクトルを決定することができる．

オフセットプローブによる測定では，ひとつのプローブでゲージの全位置決め点を測定できない．表1は，各オフセットプローブで姿勢ベクトルを求めた観測点番号を，A形ゲージの3段階の測定とB形ゲージの測定のそれぞれについて示したものである．表中の観測点番号の配置は，図7を上から見た場合のそれである．また，オフセットベクトルを決定した観測点位置は，①のように○で囲んで示してある．4通りのオフセットプローブで測定すると，同じ位置の姿勢ベクトル成分を2回以上観測することがある．この場合は，その平均値を姿勢ベクトル成分の値とした．

3・3　オフセットベクトルの決定　$z=0$ mm の断面にA形ゲージがあるとき，観測点1の位置にあるプローブ1で位置決め点 P_2 の座標を，プローブ2で位置決め点 P_6 の座標をそれぞれ測定して，式(4)に従ってオフセットベクトル r_1, r_2 を決定した．プローブ3とプローブ4では，ゲージには対応する位置決め点がないから，観測点1のところでオフセットベクトル r_3, r_4 を決定しようとしてもそれはできない．しかし，他の一つの観測点で姿勢ベクトルが既知であれば，その点に関する式(2)を r について解くことによってオフセットベクトルの値を知ることができる．r の各成分は次式より決定できる．

$$\begin{bmatrix} 1 & -(\omega_Q)_z & (\omega_Q)_y \\ (\omega_Q)_z & 1 & -(\omega_Q)_x \\ -(\omega_Q)_y & (\omega_Q)_x & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_Q' - X_Q \\ Y_Q' - Y_Q \\ Z_Q' - Z_Q \end{Bmatrix} \quad \cdots\cdots(9)$$

そこで，プローブ1とプローブ2の測定結果から定めた姿勢ベクトルの値を用いて，オフセットベクトル r_3, r_4 を決定することにした．すなわち，観測点7での姿勢ベクトル ω_7 が既知であることより，この位置でプローブ3によって位置決め点 P_6 を測定して X_6 を求め，式(9)より r_3 を定めた．r_4 も同様に位置決め点 P_2 を測定して X_2 を求めてから r_4 を定めた．

観測点1～20での姿勢ベクトルを決定しておけば，

表1　姿勢ベクトルの観測位置（数字は観測点番号を示す）

Type of the probe	Type of the gauge and it's location			
	A			B
	z= 0mm	z= 80mm	z=160mm	z= 0mm
Probe1	16 17 18 19 * 11 12 13 14 * 6 7 8 9 * ① 2 3 4 *	36 37 38 39 * 31 32 33 ㉞ * 26 27 28 29 * ㉑ 22 23 24 *	56 57 58 ㊾ * 51 52 53 54 * 46 47 ㊽ 49 * 41 42 ㊸ 44 *	* ⑰ * 59 * * * * 34 * * * * * * 21 * 43 * *
Probe2	* * * * * 11 12 13 14 15 6 7 8 9 10 ① 2 3 4 5	* * * * * 31 32 33 34 35 26 27 28 29 ㉚ 21 22 23 24 25	* * * * * 51 52 53 54 ㊺ ㊻ 47 48 49 50 41 42 43 44 45	* * * * * * * ⑬ * 55 46 * * * 30 * * * * *
Probe3	* 17 18 19 20 * 12 13 14 15 * ⑦ 8 9 10 * 2 3 4 5	* ㊲ 38 39 40 * 32 33 34 35 * 27 28 29 30 * 22 ㉓ 24 25	* 57 58 59 60 * ㊷ 53 54 55 * 47 48 49 50 * 42 43 44 ㊺	* 37 * ⑲ * * 52 * * * * * * * * * * 23 * 45
Probe4	16 17 18 19 20 11 12 13 14 15 6 ⑦ 8 9 10 * * * * *	36 37 38 39 40 31 32 33 34 35 26 ㉗ 28 29 30 * * * * *	㊻ 57 58 59 60 51 52 53 54 55 46 47 48 ㊾ 50 * * * * *	56 * * * * * * * * * ⑥ 27 * 49 ⑩ * * * * *

次にB形ゲージを用いて姿勢を観測する場合にも，オフセットベクトルを正しく知ることができる．すなわち，B形ゲージの位置決め点のうち P_1～P_3 (z=0 mm) のいずれかを測定して，オフセットベクトルを決定する．さらに P_4～P_9 のいずれかを測定すれば，異なる高さにある観測点の姿勢ベクトルについて，2軸方向の成分を知ることができる．例えばプローブ1を用いて，位置決め点 P_3 の座標を測定すれば観測点17の位置でオフセットベクトルが決定できる．そして，z=80 mm にある観測点21と34，また z=160 mm の断面にある観測点43と59について，姿勢ベクトルの y, z 軸成分をそれぞれ知ることができる．他のオフセットプローブについても，表1に示すような観測点位置で姿勢ベクトルの各2成分が決定できる．

z=80 mm または 160 mm の位置にあるA形ゲージで姿勢ベクトルを観測する場合にも，B形ゲージの測定結果より求めた姿勢ベクトルの値を用いてオフセットベクトルを決定できる．例えば観測点21 (z=80 mm) の位置でプローブ1のオフセットベクトル r_1 を決定しようとするときには，姿勢ベクトルの2成分 $(\omega_{21})_y$, $(\omega_{21})_z$ が既知であり，$(\omega_{21})_x$ が不明である．しかし，r_1 の y, z 軸成分は x 軸成分に比べて十分小さく，ほぼ零にしてあるから，姿勢ベクトルの x 軸成分 $(\omega_{21})_x$ との積も無視できる大きさになる．したがって，この位置でオフセットベクトル r_1 を決定することができる．

以上示したように，三次元用ゲージを用いて姿勢ベクトルの値を厳密に求めようとする場合には，ゲージの種類（A形ゲージ，B形ゲージ）と位置（A形ゲージの高さ）によらずオフセットベクトルを正しく定めることができる．ただし，実用的な見地からは，一連の測定が同一のオフセットプローブによって行われるのであれば，オフセットベクトルをそれほど正確に定める必要はない．

4. 測 定 実 験

4・1 測定条件　前章の手法に基づき，直交座標形の三次元測定機について，離散的な姿勢ベクトル分布を決定する実験を行った．そして，結果の妥当性を検証するために，実験より求めた姿勢ベクトルの値を用いて既知寸法の測定値を補正してみた．

測定対象とした測定機は，ブリッジ形の構造であり，ボールベアリングによってキャリッジの移動を行うものである．座標検出スケールは1 μm 読みのガラススケールが用いられている．測定可能な範囲は，x, y, z の各軸についてそれぞれ 400, 300, 200 mm の大きさであるが，そのほぼ中央部の (320×24×160) mm の範囲内で，図7に示した60点で姿勢ベクトルを求めた．検証実験もこの範囲内で行った．

測定プローブとしては，電気接点式タッチ信号プローブを用いた．プローブ自身の繰返し精度は標準偏差で1 μm 程度である．オフセットの設定は，タッチプローブ支持部の角度と長さを調節することで行った．また，プローブを測定機本体に取付けるとき，その向きを変えるだけで，オフセットベクトルの変更ができる．このようにして，プローブ1からプローブ4を設定した．図8は，プローブ3を用いて z=0 mm の位置にセットしたA形ゲージの位置決め点 P_8 を測定している様子を示したものである．これによって観測点9における姿勢ベクトルの y, z 軸成分を決定することができる．これらの測定実験は，室温 20±1°C の恒温室内で行った．

位置決め点はゲージの鋼球中心であり，その座標を決定するために鋼球上の10点を測定した．その際には，測定プローブの方向性の影響を避けるために，ひとつのプローブについては，この10点の測定位置が

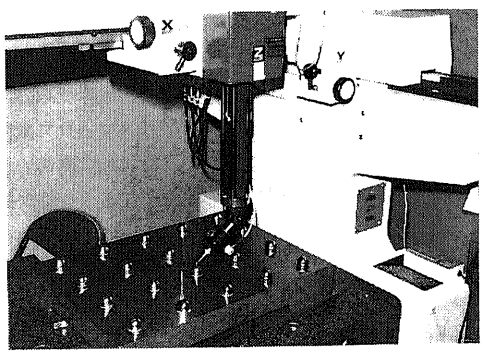


図8　プローブ3によるA形ゲージの測定

表2　測定の再現性 (μm)

i	x-axis		y-axis		z-axis	
	$d\bar{x}$	σ_x	$d\bar{y}$	σ_y	$d\bar{z}$	σ_z
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	-1.5	0.8	0.5	0.5	1.2	0.7
3	-3.3	0.5	1.2	0.7	2.7	1.2
4	-4.0	0.6	0.7	0.8	2.3	0.7
5	-7.0	1.9	1.5	1.2	4.0	1.5
6	1.4	0.8	-0.3	0.6	-0.4	0.8
7	-1.2	0.5	-0.7	0.8	-0.2	1.8
8	-2.9	0.9	-0.9	0.6	1.7	1.5
9	-3.8	0.6	-1.1	0.9	1.8	0.9
10	-5.4	0.6	-0.5	0.9	3.1	1.3
11	0.1	0.9	-0.4	0.8	0.4	1.4
12	-1.6	0.9	-0.8	0.6	1.6	1.5
13	-2.8	0.5	-0.9	0.7	1.3	1.0
14	-4.3	0.5	-0.4	0.8	2.5	0.9
15	-6.3	0.5	-0.8	0.5	3.1	1.0

どの鋼球を測定するときにもほぼ同じ位置となるようにした．

4・2　姿勢ベクトルの測定結果　$z=0$ mm の位置にセットしたA形ゲージについて，プローブ4を用いて15回測定を行い，測定の再現性を確認した．表2は，測定したゲージの位置決め点 P_i（$i=1$～15）について，式(5)の d'_0（Q' は観測点番号に相当し，$Q'=i+5=6$～20である）の各成分の平均値（d_x, d_y, d_z）と標準偏差（$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$）を示したものである．表2によれば，測定値のばらつきはどの位置でも標準偏差でほぼ1 μm 以下（最大値1.9 μm）であり，この測定機の最小読取り値を越えない程度であるから，再現性は良好であると考えている．また，このプローブの場合には，2・3節に記したように，d'_0 の y 軸成分は原理的には零でなければならないが，実際には±1 μm 程度の値となった．これより，この測定機の姿勢ベクトルの決定精度は，オフセットの絶対値80 mm につきおおむね±1 μm であると判断できる．

図9は，$x=0$ mm，$y=0$ mm，$z=160$ mm の各断面にある観測点の姿勢ベクトルの値を，各成分ごとに矢印の長さで示したものである．姿勢ベクトルは，y 軸成分の変化が最も大きく，次いで z 軸成分の変化が大きい．そして，どちらも x 軸方向に直線的に変化し，y 軸方向にはほとんど変化していない．この傾向はどの z 軸断面についても同様であった．さらに，高さ（z 軸）方向には，姿勢はほとんど変化しない．これらのことより，この測定機では，x キャリッジの移動によってピッチングとヨーイングが変化していることがわかる．これは，先に求めた誤差ベクトルの分布[1]からも予想されたことである．

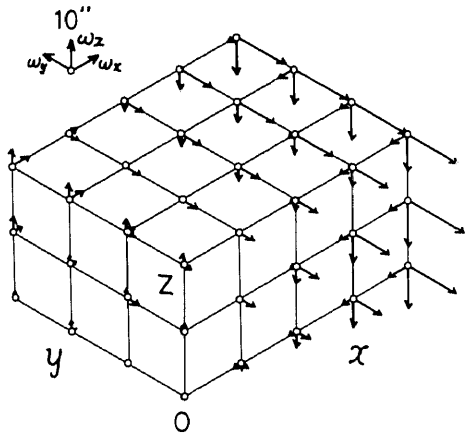


図9　姿勢ベクトルの分布

4・3　検証実験　60箇所の観測点における姿勢ベクトルの正しさを検証するために，80 mm～430 mm までの10種類の寸法のブロックゲージを測定し，その測定値を補正してみた．ブロックゲージは，測定空間内で位置と方向を種々変化させて測定した．また，r_1～r_4 以外のオフセットベクトルのプローブを用いた測定も行ってみた．オフセットベクトルの最大値は，絶対値で約130 mm である．そして，誤差ベクトルと姿勢ベクトルの両方を補正し，補正前後の寸法とブロックゲージの呼び寸法との差を求めて比較した．以下では，この値を寸法測定誤差と言うことにする．任意の位置における姿勢ベクトルは，誤差ベクトルの場合と同様に直線補間した[2]．

図10は，補正をしない場合の寸法測定誤差と補正後のそれをそれぞれ横軸と縦軸にとり，約370回の測定結果を散布図の形で示したものである．例えば，図中右端の◎印のプロット点は，320 mm のブロックゲージの一端を（3，231，123）mm 付近に，他端を（307，131，123）mm 付近に置き，オフセットベクトル（−33，107，67）mm のプローブで寸法を測定した結果である．測定値より求めた寸法測定誤差は20 μm であるが，誤差ベクトルと姿勢ベクトルを補正すればその値は0.6 μm となり，測定精度は大幅に向上する．また，補正をしないときの寸法測定誤差は−15 μm～20 μm の範囲に分布しているのに対して，誤差ベクトルのみを補正した場合の分布範囲は−7 μm～16 μm となる．さらに姿勢ベクトルを補正すれば，図10にみられるよ

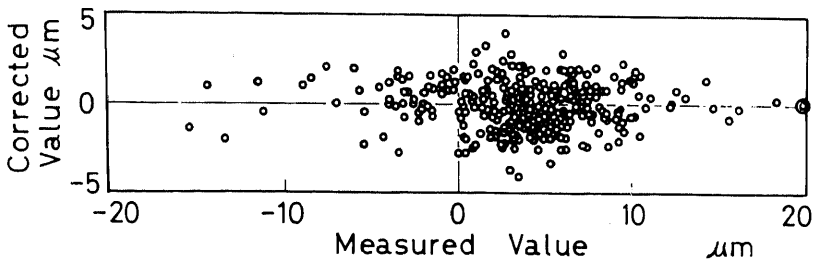


図10　補正前後の寸法測定誤差

うに，寸法測定誤差はほぼ±3 μm 以内の範囲に収まり，姿勢ベクトルの補正効果の大きいことがわかる．両者を補正した場合には，寸法測定誤差のばらつきは標準偏差で約 1.2 μm であった．さらに，補正の効果は測定長さ（ブロックゲージの寸法）とオフセットベクトルの大きさや方向に拠らないことも確認している．

5. 結　　言

三次元座標測定機では，被測定物の形状によっては，異なる測定プローブを用いることがある．座標検出点位置の異なるプローブを用いた場合には，その姿勢変化の影響を無視することができない．系統誤差を補正して測定機の精度を向上させるためには，誤差ベクトルの分布とともに姿勢の変化を知っておくことも必要になる．そこで本報では三次元用ゲージを用いて測定プローブの姿勢を決定する方法を提案した．

三次元用ゲージとしては，誤差ベクトルを決定したものと同じ2種類の形状のゲージを用いると都合がよい．なぜならば，誤差ベクトル観測位置と同じ観測点位置で姿勢ベクトルを知ることができるからである．

この方法では，まずゲージを測定機上にセットして位置決め点の正しい座標を定めておく．次にオフセットプローブによって姿勢の影響を含んだ形で位置決め点の座標を測定する．その結果より，離散的ではあるが，姿勢ベクトルの分布を決定するものである．また，ゲージ寸法（位置決め点の座標）は既知であるから，本法によって誤差ベクトルと姿勢ベクトルとが同時に決定できる．

提示した手法に基づき，実機について測定実験を行い，姿勢ベクトルの離散的な分布を決定した．求めた姿勢ベクトル分布の正しさを検証するために，既知寸法の測定結果を誤差ベクトルと姿勢ベクトルとで補正してみた．その結果，これらを補正すれば寸法測定は±3 μm 以内の精度になることが確認できた．

このようにして，三次元用ゲージを用いて誤差ベクトルと姿勢ベクトルをあらかじめ定めておけば，測定プローブの形式（オフセットベクトルの大きさと方向）が変わっても，系統誤差を知ることができる．そして，この系統誤差をソフトウェア的に補正すれば三次元座標測定機の精度向上が可能になる．

文　　献

（1） 大矢・穂苅・田村，機論，52-473，C（1986），336.
（2） 大矢・穂苅・田村，機論，52-484，C（1986），3236.
（3） 大矢・穂苅・田村，機論，53-485，C（1987），117.
（4） 大矢・穂苅・田村，機論，54-503，C（1988），1445.
（5） 矢野・中村，精密機械，44-10（1978），1223.
（6） Harvie, A., *Precision Engg.*, 8-1 (1986), 13.

討　　論

〔質問〕　沢辺雅二〔(株)ミツトヨ〕

（1） 測定プローブの移動による変動は案内精度およびその機構方式による変動であると思うが姿勢変動と言えるものか．

（2） 基準となる原点(球)の位置の測定によって，測定プローブの姿勢，測定子の長さ，方向が変化したとしても，補正ができる．これで，貴論文の測定方法における精度は十分達成できる．新たに姿勢ベクトルを決定するまでもないと思われるがどうか．

（3） 現実に測定プローブの誤差が問題となるのは測定プローブに対する測定方向，測定速度が変化したときの測定値のかたより，およびばらつきの程度が一様でないことであると思う．貴論文で提案されている方法が，この課題の解決に対して展開できる可能性はどうか．

（4） 三次元用ゲージとして鋼球を並べているが，穴をも混在させたゲージ構成させてみてはどうか．

〔回答〕　（1） 各軸運動の回転角度誤差のために，z 軸および下端に取付けた測定プローブは，測定位置によって，微小ではあるがその姿勢が変化する．本論文では，各軸に対する角度誤差の変化を姿勢ベクトルという用語を用いて表現することにした．すなわち，x 軸方向については，姿勢ベクトルの各成分 w_x, w_y, w_z はそれぞれ x 軸運動のローリング，ピッチング，ヨーイングに相当するものとご理解いただきたい．

（2） 基準となる原点における測定プローブの姿勢，測定子の長さ，方向（本論文では，これらが異なる場合，その差をオフセットベクトルと定義している）を補正するだけではなく，回転角度誤差の影響を補正することを目的として姿勢ベクトルの考え方を導入した．オフセットベクトルについては，ご指摘のように基準となる原点の位置で，その大きさと方向を定めることができる．さらに姿勢ベクトルの分布を求めておくことによって，測定位置によって変化する角度誤差の影響を補正することができる．

（3） 回答(1),(2)にも記したように，本論文で取扱っているのは，測定機の各軸運動の回転角度誤差の求め方と補正方法であり，測定プローブに起因する誤差は考慮していない．測定方向や速度の違いによる誤差については，今後の検討課題としたい．

（4） 本研究で用いているゲージは，測定プローブを測定空間内のある「点」に位置決めするためのものである．穴（円筒形状）は，この目的には合致しない．例えばテーパ穴のように頂点の位置を特定できる形状であれば，混在は不可能ではない．

正誤のお詫び

日本機械学会論文集C編平成2年2月に掲載しました論文，編集上の不手際により著者名の一部(辜)を脱字をしてしまいました．ここに関係者並びに読者に対し深くお詫び申しあげます．

第56巻522号C編(1990-2)

自動車用動力伝達系の摩擦損失に関する研究*

（第1報，損失測定法とその適応範囲）

細井賢三*1，辜　敬之*1，矢田恒二*2

日本機械学会編修課