

# 三次元測定機の座標データ処理に関する研究\*

## (原点補正を必要としない複数プローブの座標データ処理法)

大 矢 誠<sup>\*1</sup>

### Study on Data Processing Method of Three-Dimensional Coordinate Measuring Machine (Simultaneous Processing Method of Data Measured by Multiple Probes)

Makoto OHYA

It is often necessary to utilize more than two probes in measuring three-dimensional (3-D) shapes by means of a 3-D coordinate measuring machine. Accuracy of measurement, especially of complicated shapes, can be improved by using multiple probes, because of the wide range of measured data. In the case that more than two probes are used, calibration of each probe must be performed to correct the zero position of the scale. In this paper, a new method for processing data measured by multiple probes is proposed. Two kinds of parameter related to shape and offset vector of a probe are involved in an observation equation. The parameters can be determined simultaneously by solving a set of observation equations for both standard probe and offset probe. The efficiency of the measurement by multiple probes is not affected because probe calibration and data correction are not essential in the proposed method. The simultaneous processing method is applied to experimental data. The most probable values and the standard deviations of the parameters are calculated by the least squares method. Results show that measurement accuracy of the method is almost the same as that of a conventional calibration method.

**Key Words:** Measurement, Accuracy, Data Processing, 3-D Coordinate Measuring Machine, Calibration of Probe, Offset Vector, Simultaneous Processing Method

## 1. 緒 言

三次元測定機を用いて複雑な形状や斜面上の深穴など、標準的なプローブだけでは対応できない形状を測定する場合には、測定すべき形状やその位置に応じて適切なプローブを選択・交換する必要がある。また、ねじや歯車歯面などの形状を高精度に測定しようとするれば、被測定面上のできるだけ広い範囲で座標データを取得できるように、プローブの方向やスタイラスの長さを変えて測定することがある。このような場合には、プローブの校正を行って原点を補正する必要があるため、測定作業が煩雑になり測定能率の低下も避けられない。

この問題を解決するために、プローブの自動交換システム<sup>(1)</sup>や、複数のスタイラスをもつスタープローブ、あるいはプローブヘッドに位置決め機構をもたせることなどが行われている<sup>(2)</sup>。しかし、スタープローブでは被測定物とスタイラスの干渉の問題があり、プローブ自動交換システムではプローブの位置の再現性に不安がある。また、自動位置決めヘッドは複雑な形状の測定に有効ではあるが、スタイラスの角度から原

点位置を精度よく定めることは困難であり、校正作業を不要とするまでには到っていない。

本研究では、複数のプローブによる座標データから形状を計算する場合に、被測定形状を表すパラメータ(形状パラメータ)とそれぞれのプローブの原点位置からの偏位にかかわるパラメータ(オフセットパラメータ)を同時に決定する方法を提案する。すなわち、プローブを交換したり、スタイラスの長さや方向を変えてプローブ球の位置を標準位置から偏位(オフセット)させた場合にも、原点補正を行うことなく座標データを処理しようとするものである。この方法では、プローブを変更しても特別な校正作業を必要としないので、測定能率は低下しない。また、これによって被測定面全体をカバーするように座標データを得ることが容易になるので、高精度に形状を測定できるようになる。

本報では、まず従来用いられてきた方法によってプローブを校正した場合の精度と、その問題点について述べる。次に、平面、円筒、円すい、球などの基礎的な幾何学形状に関してオフセットパラメータを定義し、形状パラメータとオフセットパラメータを同時に計算する手法について述べる。次に、測定実験の結果から、提案する手法によって両パラメータが同時に決定でき

\* 原稿受付 1996年6月19日。

<sup>\*1</sup> 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2-8050)。

ること、および形状計測の精度は従来の原点補正法によるものと同等以上であることを確認する。さらに、本手法によって求めたオフセットパラメータからプローブの原点位置のずれ(オフセットベクトル)を知ることとも可能であることを示す。

## 2. プローブの校正

**2.1 基準球によるプローブの校正方法** プローブのスタイラスは、一般には図1に示すようにZ軸の下方に向けた状態で使用される。本報ではこれを標準プローブと呼び、これに対してスタイラスの長さや方向を変えたものをオフセットプローブと呼ぶことにし、プローブ球の位置の偏位量をオフセットベクトル  $D(Dx, Dy, Dz)$  として定義する。すなわち、標準プローブはオフセットベクトルが零ベクトルのプローブである。

一般の形状測定では標準プローブの座標データだけを処理すればよいが、1章で述べたように、標準プローブとオフセットプローブの二通りのデータを同時に処理することが必要になる場合がある。このとき、三次元測定機の測定値  $X_m$  とそれぞれのプローブ先端のプローブ球の位置  $X_p$  の関係は次のように表現できる。

$$X_p = X_m + D \quad \dots\dots\dots (1)$$

標準プローブとオフセットプローブを同時に用いる場合、従来の処理方法では、プローブの校正を行ってオフセットベクトルをあらかじめ求めておき、原点位置のずれを補正していた。プローブの校正には基準球を用いる方法が最も一般的である。その他には、オリジナルポイントブロック(OPB)のように直交する3

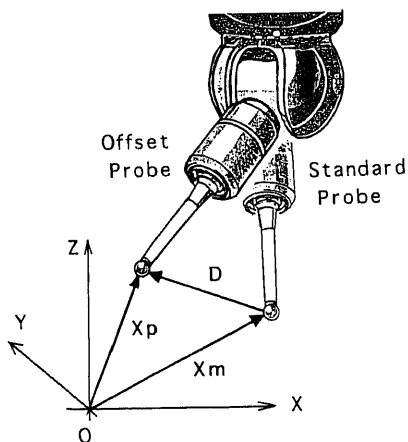


Fig. 1 Relationship between measured coordinates and offset vector

平面の交点を基準点とし、この点を標準プローブとオフセットプローブで測定し、両者の差からオフセットベクトルを定めることも行われる。

**2.2 基準球によるプローブの校正精度** 基準球の測定では、一つのプローブで測定できるのはせいぜい半球面のみであり、スタイラスの方向が決まると、球面上の測定点の位置と範囲は限定される。そこで、この影響を調べるために測定点数や測定範囲の広さなどの条件を変えて基準球を実測し、測定値の変化のようすから従来方法によるオフセットベクトルの決定精度を評価してみた。なお、測定に用いた三次元測定機の最小読取値は各軸とも  $1\mu\text{m}$  であり、プローブは繰返し精度  $0.5\mu\text{m}(2\sigma)$  のタッチトリガープローブ(レニショー TP1)を用いた。

基準球として  $\phi 20\text{ mm}$  のベアリング用鋼球を用い、球面上の緯度の異なる7箇所の断面を標準プローブで測定した。各断面ではおのおの36点ずつの測定点をほぼ等間隔に取り、計252点の座標データを得た。その中から、測定範囲の広さ(図2に示すように球の頂点からの角度  $\psi$  を用いて表す)と測定点数を変えて計算処理を行い、球の中心座標  $X_0(X_0, Y_0, Z_0)$  および半径  $R$  を求めた。

測定値のばらつきについては、測定点の分布する領域の広さを示す角度  $\psi$  の影響が大きい。しかし、 $\psi$  が  $45^\circ$  以上、測定点数が10点以上であれば、求めた中心座標のばらつきは各軸成分について標準偏差で  $1\mu\text{m}$  以下であった。測定に用いた三次元測定機の最小読取値が  $1\mu\text{m}$  であることを考慮すれば、基準球を用いてオフセットベクトルを決定する際のばらつきは小さいものと判断できる。

図3は、横軸に測定点数を取り、測定範囲の広さ( $\psi$ )を変えた場合の中心座標のZ軸成分の値( $Z_0$ )を示したものである。図3より、測定点を広い範囲でとる( $\psi$ が大きくなる)に従って  $Z_0$  は減少することがわ

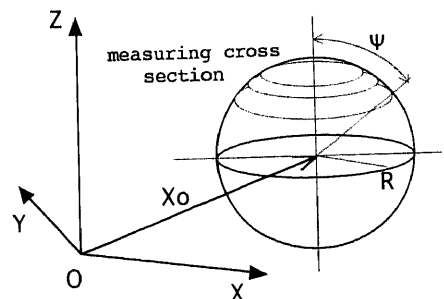


Fig. 2 Measuring range of sphere measurement

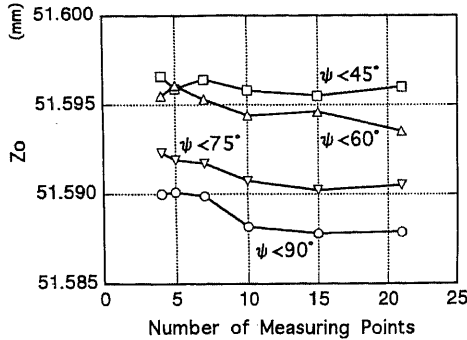


Fig. 3 Change of  $Z_0$  coordinate dependent on measuring range

かる。一方、 $X_0$ ,  $Y_0$ にはこのような傾向は見られなかった。半径  $R$  は、 $Z_0$ とは逆に、 $\psi$ が大きくなるにつれて増加した。座標  $Z_0$ の変化は最大  $8 \mu\text{m}$ 、半径  $R$ の変化は  $6 \mu\text{m}$ 程度であり、測定点数の増減による変化よりも顕著である。

次に、標準プローブのスタイラスをほぼ水平に傾け、それを  $X$  軸および  $Y$  軸方向に向けて基準球を測定したところ、測定範囲 ( $\psi$ ) が広くなるに従って中心座標の  $X_0$  および  $Y_0$  がそれぞれ減少し、半径  $R$  はどちらの場合も増加することを確認した。すなわち、スタイラスが  $Z$  軸方向に向いている標準プローブと同様に、球の中心がスタイラスと同じ方向に変化する傾向があり、これは測定に用いたタッチプローブの方向性に起因するものと考えられる<sup>(3)(4)</sup>。

この変化の大きさは個々のプローブの特性や測定力などによる差はあると思われるが、測定範囲の広さが変わると基準球の中心位置がスタイラスの方向に変化することは避けられない。基準球によってオフセットベクトルを求める従来の方法では、これが原点を補正する場合の誤差(偏り)になる。

### 3. 複数プローブの座標データを用いた同時計算法

本報で提案する手法は、被測定形状を表す形状パラメータとプローブにかかわるオフセットパラメータを未知数として測定方程式に含め、原点補正を行うことなくこれらのパラメータを同時に求めようとするものである。オフセットパラメータは、以下に示すように被測定形状によって異なった形となる。

3.1 平面の測定 被測定平面の法線  $n$  を二つの角度(方位角  $\alpha$ , 天頂角  $\beta$ )を用いて

$$n = (CaS\beta, SaS\beta, C\beta) \quad (2)$$

ただし、 $Ca = \cos \alpha$ ,  $Sa = \sin \alpha$ , etc.

と表し、座標原点と平面との距離を  $P$  とする。平面の形状パラメータを  $\alpha, \beta, P$  とし、測定方程式は次のようになる。

$$n \cdot Xp = P \quad (3)$$

標準プローブではオフセットベクトルは零ベクトルであるから、

$$n \cdot Xm = P \quad (4)$$

これに対して、オフセットプローブでは

$$n \cdot (Xm + D) = P \quad (5)$$

となり、これを次のように表す。

$$n \cdot Xm = P - P_1 \quad (6)$$

ここに  $P_1$  が平面の測定におけるオフセットパラメータであり、

$$P_1 = n \cdot D \quad (7)$$

これはオフセットベクトル  $D$  を平面の法線方向に射影した長さである。

形状パラメータ ( $\alpha, \beta, P$ ) とオフセットパラメータ  $P_1$  を未知数とし、標準プローブとオフセットプローブの座標データから得られる測定方程式 (4) と (6) とを連立させて解けば、4 個の未知パラメータを同時に決定できるはずである。

平面の測定では、オフセットベクトルの各成分 ( $Dx, Dy, Dz$ ) を個々に知ることはできない。また、未知パラメータが 4 個あるので、測定点数は 4 点以上必要となる。ただし、オフセットパラメータは一つのオフセットプローブにつき一つなので、オフセットプローブによる測定点は 1 点以上あればよい。なお、標準プローブとともに 2 種類以上のオフセットプローブを用いて測定することも可能である。

3.2 円筒の測定 円筒軸を表す単位ベクトルを  $n$  とし、これを 3.1 節の単位法線ベクトルと同様に式 (2) のように表現する。円筒軸が  $XY$  平面と交点をもつ場合を想定し、その交点座標を  $X_0(X_0, Y_0, 0)$  とする。また、円筒の半径を  $R$  とする。

標準プローブの座標データについて、測定方程式は、

$$|n \times (Xm - X_0)| = R \quad (8)$$

一方、オフセットプローブの座標データでは

$$|n \times \{(Xm + D) - X_0\}| = R \quad (9)$$

となり、これを次のように表現する。

$$|n \times (Xm - X_0) + N| = R \quad (10)$$

ここに、オフセットベクトルに関わるベクトル  $N$  は、円筒軸  $n$  とオフセットベクトル  $D$  の外積の形となる。

$$N = (Nx, Ny, Nz)^T = n \times D \quad (11)$$

すなわちベクトル  $N$  は円筒軸  $n$  と直交するので、各成分は互いに独立ではない。そこで、ベクトル  $N$  の 2 成分  $N_x$  と  $N_y$  を独立なオフセットパラメータとして扱うことにし、5 個の形状パラメータ ( $\alpha, \beta, X_0, Y_0, R$ ) を含めて合計 7 個の未知パラメータとする。残りの  $N_z$  成分は、ベクトル  $N$  と  $n$  の直交条件より、四つのパラメータ  $\alpha, \beta, N_x, N_y$  を用いて次のように表現できる。

$$N_z = -(CaS\beta N_x + SaS\beta N_y)/C\beta \cdots \cdots (12)$$

なお、円筒測定での測定点数は標準プローブとオフセットプローブを合せて 7 点以上、そのうちオフセットプローブによる測定点数は 2 点以上必要である。

**3・3 円すいの測定** 円すい軸を表す単位ベクトル  $n$  を円筒の場合と同様に式(2)のように表現し、円すいの頂点を  $X_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 、円すいの半頂角を  $\theta$  とする。標準プローブでは、測定方程式は

$$n \cdot (Xm - X_0) / |Xm - X_0| = \cos \theta \cdots \cdots (13)$$

一方、オフセットプローブでは

$$n \cdot \{(Xm + D) - X_0\} / |(Xm + D) - X_0| = \cos \theta \cdots \cdots (14)$$

となる。

オフセットパラメータをベクトル  $E$  で表すことにすると、式(14)より  $E$  は次のような形となる。

$$E = \begin{bmatrix} nx Dx \\ ny Dy \\ nz Dz \end{bmatrix} / |(Xm + D) - X_0| \cdots \cdots (15)$$

円すい測定におけるオフセットパラメータ  $E$  の各成分はそれぞれ独立である。したがって、未知パラメータは形状パラメータとして ( $\alpha, \beta, X_0, Y_0, Z_0, \theta$ )、およびオフセットパラメータ  $E(Ex, Ey, Ez)$  の計 9 個となる。

円すいの場合に必要測定点数は、両プローブを合わせて 9 点以上、そのうちオフセットプローブによる測定点数は 3 点以上必要である。

**3・4 球の測定** 球の中心座標を  $X_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 、半径を  $R$  とすると、測定方程式は標準プローブについては、

$$|Xm - X_0| = R \cdots \cdots (16)$$

であり、オフセットプローブでは次式のようになる。

$$|(Xm + D) - X_0| = R \cdots \cdots (17)$$

球の測定ではオフセットベクトルの 3 成分をそのままオフセットパラメータとすれば、球の中心座標と半径を含めた計 7 個を未知パラメータとしてそれぞれ独立に求めることができる。このとき、オフセットプローブによる測定点数は 3 点以上、合計 7 点以上の座標データがあればよい。なお、円も同様の取扱いが可能

である。すなわち、 $XY$  面にある円を測定する場合には、形状パラメータとして円の中心座標と半径 ( $X_0, Y_0, R$ ) およびオフセットベクトルの 2 成分 ( $Dx, Dy$ ) の計 5 個を未知パラメータとすればよい。

**3・5 オフセットベクトルの決定** 本報で提案する同時計算法では、それぞれの形状に固有のオフセットパラメータを求めることができ、さらに必要があれば、求めたオフセットパラメータからオフセットベクトルを知ることでもできる。

球の測定では、従来のプローブ校正法と同様に、オフセットベクトル  $D$  を直接知ることができる。ただし、複数のプローブによって球面上の広い範囲を測定したデータを用いるので、個々のプローブによるデータを個別に処理する場合と比べて、2 章に述べた球の中心座標の変化の影響を受けにくいという利点がある。また、円すい測定でも式(15)よりオフセットベクトルを知ることができ、これらは単独の形状からオフセットベクトルが得られる例である。

オリジナルポイントブロック(OPB)のように交点をもつ 3 平面があれば、その交点を基準点としてオフセットベクトルを決定できる。すなわち、一つのオフセットプローブで異なる法線ベクトル ( $n_1, n_2, n_3$ ) をもつ 3 平面を測定することができれば、それぞれのオフセットパラメータ ( $P_1, P_2, P_3$ ) が得られる。このときには、次の連立方程式を解くことによってオフセットベクトルの 3 成分 ( $Dx, Dy, Dz$ ) を知ることができる。

$$\begin{cases} n_1 \cdot D = P_1 \\ n_2 \cdot D = P_2 \\ n_3 \cdot D = P_3 \end{cases} \cdots \cdots (15)$$

円筒形状単独ではオフセットベクトルを求めることはできないが、適当な基準面があれば、その面と円筒軸との交点を基準点とすることが考えられる。すなわち、円筒のオフセットパラメータ  $N_x, N_y$  はオフセットベクトル  $D(Dx, Dy, Dz)$  と円筒軸  $n(nx, ny, nz)$  に関して、

$$\begin{cases} ny Dz - nz Dy = N_x \\ nx Dx - nx Dz = N_y \end{cases} \cdots \cdots (16)$$

の関係がある。この式と基準平面のオフセットパラメータに関する式(7)とを連立させて解けばよい。

#### 4. 実験結果および考察

3 章に述べた手法の妥当性を検証するためにスタイルスの方向を変えて各種の形状を測定した。測定例(1)では、提案した手法によって形状パラメータとオフセットパラメータを同時に決定できることを確認す

るために、平面、球、および円筒を測定した。また、3・5節に述べた方法によりオフセットベクトルを求め、基準球による測定結果と比較した。

測定例(2)では平面と円筒からなる被測定物を標準プローブおよび複数のオフセットプローブによって測定し、一つのプローブによるデータを単独に用いたり、あるいは複数のプローブのデータを同時に用いて計算処理を行い、データ処理の違いによる測定結果および再現性の相違を比較した。

4・1 測定例(1)について 精密鋼球、リングゲージ、およびオリジナルポイントブロック(OPB)を測定対象とし、標準プローブと三とおりの異なるオフセットベクトル( $D_1, D_2, D_3$ )をもつプローブの計4種類のプローブでおおのの形状を測定した。それぞれのオフセットベクトルはほぼ表2に示すような値である。

表1は、球、円筒およびOPBの一つの面の測定結果を示したものである。そこに示した(a)~(c)の三とおりの結果は、座標データをそれぞれ次のように処理したものである。

(a)個別計算：個々のプローブによる座標データをそれぞれ個別に用いておおのの測定結果を求め、合計四とおりの測定結果の平均値と標準偏差。

(b)補正計算：基準球によってプローブを校正して原点を補正する従来方法によって形状を計算した結果。

(c)同時計算：本研究で提案する同時計算法により

形状を計算した結果。

なお、個別計算(a)と補正計算(b)では、基準球によってオフセットベクトルを求めた。また、補正計算(b)と同時計算(c)では、標準プローブを含めた2種類以上のプローブのすべての組合せについて計算を行い、計七とおりの結果を求めている。

求めた形状パラメータに関しては、球の測定では計算方法(a)~(c)の違いは測定結果にほとんど影響しない。円筒測定については $X_0, Y_0$ で最大約13 $\mu\text{m}$ 、角度 $\alpha, \beta$ で約30秒というかなり大きな差がある。平面の測定では角度に関して約7秒、平面と原点との距離については7 $\mu\text{m}$ の差が見られる。いずれの場合も同時計算による結果は個別計算と補正計算の結果の中間の値か、または個別計算の平均値に近い値となっている。なお、個別計算の結果は他の方法に比べて測定値のばらつきが大きい。

補正計算(b)および同時計算(c)について、各形状を最小二乗法を用いて計算した場合のあてはめ精度を比べてみた。同時計算における残差平方和を基準球により原点補正を行った場合の残差平方和と比べると、円筒および平面の測定については1/2以下になり、またXY平面とほぼ平行な平面の測定では1/10程度と極めて小さくなり、あてはめ精度が高くなることがわかった。これは、2章に述べたように、基準球測定における球の中心座標の変化が原因と考えてよい。基準球を用いてプローブを校正する際にオフセットベクトルに偏りが生じた場合には、従来の原点補正法では、

Table 1 Result of experiment (1)

\*in regard to an unit of angle  $\alpha, \beta$   
Average;(deg), Std.Dev;( $\mu\text{deg}$ )

Measured Shape	Parameter	(a) Separate Processing		(b) Corrected Data Processing		(c) Simultaneous Processing	
		Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu\text{m}$ )	Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu\text{m}$ )	Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu\text{m}$ )
Ball	$X_0$	97.478	—	97.478	0.1	97.478	0.0
	$Y_0$	127.806	—	127.806	0.1	127.805	0.4
	$Z_0$	97.068	—	97.068	0.1	97.067	0.2
	R	11.999	0.7	11.999	0.2	11.999	0.2
Cylinder	$X_0$	363.811	19.0	363.819	9.8	363.814	6.4
	$Y_0$	230.221	6.2	230.210	4.0	230.223	4.5
	$\alpha^\circ$	227.868	5.7	227.859	4.3	227.866	1.2
	$\beta^\circ$	43.212	5.4	43.211	2.3	43.213	2.3
	R	23.002	0.7	23.002	0.2	23.002	0.3
Plane (OPB)	$\alpha^\circ$	89.700	0.9	89.701	0.4	89.700	0.4
	$\beta^\circ$	89.998	1.2	90.000	1.1	89.998	0.7
	P	166.742	4.8	166.736	2.4	166.743	2.8

Table 2 Result of offset vector obtained in experiment (1)

Probe		(A) Separate Processing						(B) Simultaneous Processing					
		(1) Ball		(2) 3_Planes		(3) Axis,Plane		(1) Ball		(2) 3_Planes		(3) Axis,Plane	
		Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std. Dev ( $\mu$ m)
D <sub>1</sub>	Dx	48.698	0.7	48.696	2.1	48.071	5.2	48.699	0.8	48.696	1.4	48.699	2.8
	Dy	50.878	0.7	50.881	1.5	50.882	5.2	50.878	0.8	50.881	1.5	50.881	2.5
	Dz	28.870	1.3	28.868	1.2	28.870	4.2	28.868	1.1	28.867	1.0	28.870	2.1
D <sub>2</sub>	Dx	69.535	1.0	69.533	2.0	69.535	4.0	69.535	0.9	69.532	1.0	69.533	4.0
	Dy	4.953	0.9	4.955	4.3	4.956	4.1	4.952	0.9	4.955	2.2	4.956	2.8
	Dz	29.487	1.4	29.485	1.4	29.491	3.6	29.486	1.0	29.483	1.1	29.487	2.1
D <sub>3</sub>	Dx	11.898	0.8	11.898	3.0	11.898	5.8	11.898	0.9	11.898	1.8	11.897	2.8
	Dy	71.754	0.9	71.754	3.0	71.757	5.8	71.754	1.0	71.754	1.4	71.756	3.6
	Dz	29.438	1.4	29.439	1.5	29.439	4.6	29.435	1.1	29.437	0.9	29.438	2.2

Table 3 Result of experiment (2)

\*in regard to an unit of angle  $\alpha, \beta$   
Average;(deg), Std.Dev;( $\mu$  deg)

Measured Shape	Parameter	(a) Separate Processing		(b) Corrected Data Processing		(c) Simultaneous Processing		(b)-(c) ( $\mu$ m)	(b)-(a) ( $\mu$ m)
		Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu$ m)	Average (mm)	Std.Dev. ( $\mu$ m)		
P <sub>3</sub>	X	204.120	11.9	204.110	6.1	204.110	5.6	0.7	-9.7
	Y	104.050	8.0	104.050	5.3	104.051	6.7	-0.7	0.2
C <sub>3</sub> (Boss)	X <sub>0</sub>	87.023	34.2	87.036	3.6	87.033	2.7	2.3	13.0
	Y <sub>0</sub>	26.900	7.9	26.901	1.4	26.901	2.3	-0.1	0.7
	$\alpha^*$	169.304	13.1	174.032	3.5	175.522	2.9	-1.5°	4.7°
	$\beta^*$	0.061	11.9	0.063	3.3	0.060	2.4	10.6°	8.4°
	R	13.995	1.6	13.995	0.2	13.996	0.2	-0.2	0.1

それがすべての測定結果に影響し、スタイラスの方向や被測定形状によっては測定精度低下の原因となる場合がある。

表2は、本測定例より求めたオフセットパラメータを用いてオフセットベクトルを求めた結果を示したものである。この表には、

- (A) 個別計算法  
(B) 同時計算法  
によって、それぞれ

- (1) 基準球  
(2) OPB  
(3) 円筒軸と平面の組合せ

について求めたオフセットベクトルの値と精度が計六とお示してある。

表2によれば、オフセットベクトルの値そのものには大きな差はなく、最大3 $\mu$ m程度の違いが見られるだけである。したがって、被測定物の形状精度が十分に高い本測定例のような場合には、同時計算の結果か

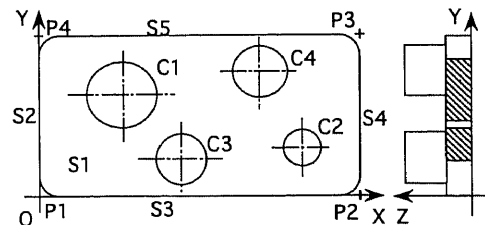


Fig. 4 Drawing of measured shape in experiment (2)

らオフセットベクトルを定めることもできる。

表2の標準偏差(Std. Dev.)は誤差伝ばの法則に基づいて算出したオフセットベクトルの精度(ばらつきの標準偏差)を示したものである。これによれば、従来の原点補正法による場合は基準球による精度が最も高く、OPB、円筒軸と平面の組合せ、の順に精度が低下する。しかし、同時計算法では精度の低下する度合がやや小さくなる。また、同時計算における標準偏差は個別計算に比べてやや小さくなっている。

4・2 測定例(2)について 図4に示すような被測定物を測定し、測定の再現性を調べた。測定に際してはプローブのオフセットを十四とおりに変更し、被測定物自身の姿勢も変えて繰返し測定を行った。そして、4・1節と同様に(a)～(c)の計算方法による測定結果の違いについて調べてみた。測定対象は平面( $S_1 \sim S_5$ )とその交点( $P_1 \sim P_4$ )および穴( $C_1, C_2$ )、軸( $C_3, C_4$ )とし、測定結果は面 $S_1$ を $XY$ 面、点 $P_1$ を原点、 $\overline{P_1 P_2}$ を $X$ 軸とする座標系に変換して比較した。表3は測定結果のうち、3面の交点 $P_3$ と軸 $C_3$ の結果を示したものである。

表3によれば、個別計算(a)による結果はばらつきが大きく、標準偏差でみると、3平面の交点位置については $12\mu\text{m}$ 、円筒軸の位置については $34\mu\text{m}$ であった。特に $X$ 軸方向のばらつきが大きく、被測定物とプローブとの相対的な位置関係によっては正確な測定が困難な場合がある。補正計算(b)と同時計算(c)の結果はほぼ同程度のばらつきを示しており、標準偏差は交点位置については $7\mu\text{m}$ 、円筒軸の位置についても $4\mu\text{m}$ 程度である。これより、1種類のプローブのデータだけを用いる処理方法に対して、複数のプローブのデータを用いることの優位性がはっきり確認できる。また、各形状の計算結果も補正計算法と同時計算法ではほぼ等しくなっており、4・1節の結果も考え合わせると、同時計算法によれば原点補正を行うことなく従来と同等の精度で形状計測が可能であることが確認できた。

## 5. 結 言

三次元測定機でプローブを交換した場合などに必要となる校正作業を避けるために、複数のプローブによる座標データを同時に処理する方法を提案し、手法の妥当性を検証した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 基準球を用いた従来のオフセットベクトルの決定精度は、各軸成分について標準偏差でおおむね $1\mu\text{m}$ である。ただし、プローブの特性や測定力による方向性のために、測定点の取り方によっては基準球位

置がプローブのスタイラス方向に変化し、それが原点補正時の誤差となることがある。

(2) いくつかの幾何学形状に関してプローブのオフセットにかかわるパラメータを定義し、これと被測定形状を表すパラメータとを同時に定める手法(同時計算法)を提案した。また、測定実験を行って提案した手法の妥当性を検証した。

(3) 同時計算法による結果と従来の手法による結果を比較したところ、測定値の正確さおよび再現性ともに同等程度であった。このことより、提案した同時計算法によれば、複数のプローブを用いた場合にもプローブの校正作業を行うことなく、形状を定めることができる。

(4) 同時計算法により求めたオフセットパラメータからオフセットベクトルを定めることができることを確認した。その精度は、基準球については従来手法による結果と同等程度であり、OPBを用いた場合には同時計算法による方がばらつきが小さいという結果を得た。

提案した手法によれば、一つの被測定面を多種類のプローブを用いて測定した場合にも原点補正を行う必要がないので、深穴や傾いた軸、あるいは歯車の歯面など、一種類のプローブでは広範囲の座標データが取得できない形状を、高精度に、しかも効率よく測定することができる。また、本手法をプローブの自動交換システムや自動位置決めプローブヘッドなどと併用することによって、高精度・高能率化をより効果的に実現できるものと考えている。

## 文 献

- (1) 宿利浩章, 三次元測定機の自動化とデータ処理, 機械と工具, 12 (1986), 43-46.
- (2) 福井三郎兵衛, 三次元測定機用プローブの機能, 機械と工具, 12 (1986), 91-95.
- (3) 佐久間健司・中村哲夫, 寸法・形状測定における測定ヘッド, 精密工学会誌, 52-4 (1986), 605-609.
- (4) 大矢 誠, タッチトリガープローブの精度に関する研究, 機論, 59-563, C (1993), 2086-2091.