

三次元座標測定機の精度向上に関する基礎的研究*

(誤差ベクトル分布の測定法)

大矢 誠**, 穂苅 久**, 田村 久司***

A Study on the Improvement in Accuracy of Three-Coordinate Measuring Machine

(A Measuring Method of the Distribution of Error Vector)

by Makoto OYA, Hisashi HOKARI, and Hisashi TAMURA

For the purpose of the improvement in measuring accuracy of three-coordinate measuring machine, the measuring method of the systematic errors is proposed. The method described here is based on the distance measuring method which was reported in the earlier paper by authors, and is adequate to determine the distribution of error vector in the measuring range. Then measurement was practically carried out and the distributions of error vector were clarified about two types of three-coordinate measuring machines. In connection with the experimental results, the relation between the distribution of error vector and the geometrical accuracy of machines is discussed. Also the variation of error vector according to the room temperature change is examined and the results is reported.

Key Words: Measurement, Three-Coordinate Measuring Machine, Accuracy Measuring Method, Distribution of Error Vector, Geometrical Accuracy

1. 緒 言

三次元座標測定機の種々の誤差要因のなかで、測定機本体の幾何学的精度、キャリジの移動により生ずる機械各部の変形、座標検出スケール自身の精度などは系統的誤差の大きな要因である。前報⁽¹⁾では、この系統的誤差を、基準となる理論座標系における誤差ベクトルとして表し、これを決定するための基本的手法を提案した。また、その手法にもとづき誤差ベクトル決定の測定実験を行い、その妥当性を確認することができた。

ところが、誤差ベクトルの分布を詳細に知りたい場合に、この手法をそのまま適用するには多少の困難のともなうことがわかった。すなわち、測定時間がかかりすぎる、観測点の位置によっては、誤差ベクトルを正しく決定できない場合があること、などである。しかし、誤差補正による測定機の精度向上を目標とする本研究においては、誤差ベクトルの分布を詳細に知ることがどうしても必要である。

そこで、本報では、これらの問題点の解消を目指し

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和59年10月29日。

** 正員、長岡工業高等専門学校 (〒940 長岡市西片貝町888)。

*** 正員、新潟大学工学部 (〒959-21 新潟市五十嵐2-8050)。

た。それは、前報で提案した距離測定による誤差ベクトルの決定を基礎として、各軸方向の指示精度測定と平面度測定とを併用することで、測定時間の短縮と誤差ベクトルの決定精度の向上を実現しようとするものである。

そして、その手法に基づき、2機種 of 三次元測定機について測定を行い、誤差ベクトルの分布を求めてみた。また、その分布から実機の誤差の様子を明らかにするとともに、測定機の幾何学的誤差と誤差ベクトルの分布との関係について検討を行った。さらに、同手法を用いて温度の変化に対する誤差ベクトル分布の変化の様子についても調べてみた。

2. 誤差ベクトルの決定

2.1 誤差ベクトル決定の基本的手法と問題点

図1に示すように、誤差ベクトル Δx_R は真の位置ベクトル X_R と測定機座標系での位置ベクトル x_R とを用いて次のように表される。

$$\Delta x_R = x_R - X_R \dots\dots\dots (1)$$

このとき、真の位置ベクトルを与える基準座標系(O-XYZ系)は測定機座標系の原点Oとx,y軸上の2点P,Qの計3点から決定する。すなわち、これら3点でXY平面を決定し、OPの方向でX軸を決定すれば、

残りの Y 軸は必然的に決まる。したがって、点 P の誤差ベクトルの未知成分 Δx_P と、点 Q のそれ、 Δx_Q 、 Δy_Q は OP, OQ, PQ 間の距離測定から知ることができる。そして、他の成分は原理的に 0 である。つぎに、これら 3 点と他の観測点 R とを結ぶ 3 方向についての距離測定を行えば、点 R での誤差ベクトル $\Delta x_R(\Delta x_R, \Delta y_R, \Delta z_R)$ を知ることができる (図 1)。このとき点 R が XY 面内、またはその近くにあると、Z 軸方向の観測ができないから、 Δz_R が不定となる。これをさけるため、また、距離測定にともなう偶然誤差などの影響を避けるためにも、観測点の数を O, P, Q, R の 4 点より多くして n 点とし、これらの点を相互に結ぶ $n(n-1)/2$ とおりの測定方程式を求めて、最小二乗法により誤差ベクトルを決定することにした。すなわち、測定方程式 (2) の残差 r_{ij} の平方和を最小とする条件

$$\begin{cases} i=1, 2, \dots, n-1, j=i+1, \dots, n \text{ について} \\ N_{ij} \cdot (\Delta x_j - \Delta x_i) = M_{ij} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{cases} r_{ij} = N_{ij} \cdot (\Delta x_j - \Delta x_i) - M_{ij} \dots\dots\dots (3) \\ \sum \sum (r_{ij})^2 \rightarrow \text{minimum} \end{cases}$$

から誤差ベクトル $\Delta x_i (i=1, 2, \dots, n)$ の未知の $(3n$

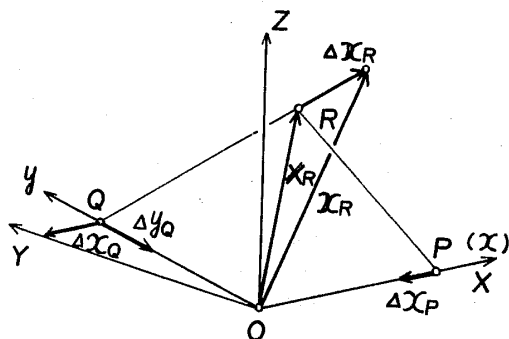


図 1 座標系と誤差ベクトル

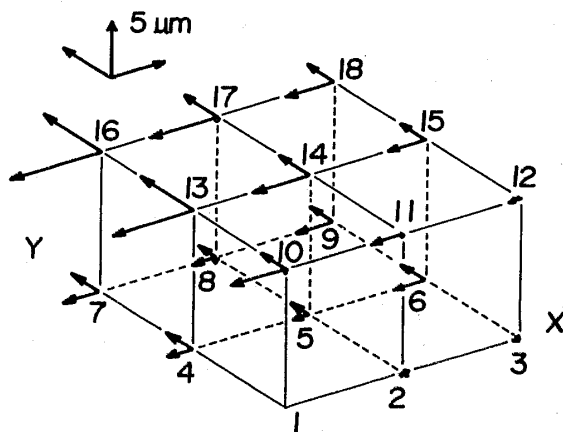


図 2 距離測定による誤差ベクトル

-6) 個の成分の値を求めることができる。ここに、 N_{ij} は 2 点 x_i, x_j 方向の単位ベクトル、 M_{ij} はゲージ寸法の測定値と真値との差である。

前報では、一辺 100 mm の立方体の 8 頂点を観測点とし、28 方向の測定方程式から誤差ベクトルを求めたが、本報ではさらに広い測定範囲での誤差ベクトルの分布を求めるために、図 2 に示すような 4 個の立方体を合わせた $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の直方体について、点 1 から点 18 までの 18 節点を観測点として測定を行うことにした。このときには $18 \times (18-1)/2 = 153$ とおりの方向での距離測定を行い、それらの測定方程式を用いて式 (3) の条件により各点の誤差ベクトルを求めることになる。図 2 には、A 機種について求めた誤差ベクトルを各成分ごとに矢印の大きさに示した。

距離測定はゲージ両端の測定面で各 20 点ずつを測定した。この測定時間は一つの方向について約 5 min 程度である。誤差ベクトルの分布をさらに詳細に知りたい場合には観測点数 n を多くとればよい。しかし、そのとき必要となる測定回数は n^2 に比例するので、たとえば、図 3 のような分割で 60 点の誤差ベクトルを求めようとする、 $60 \times (60-1)/2 = 1770$ とおりの方向の距離測定を行うことになる。よって、観測点数をむやみに増やすことは現実的でなくなってしまう。また、測定方程式が増加すると、距離の測定にともなう偶然誤差などの影響は平均化されるから、誤差ベクトルの決定精度は全体に向上するが、図 2 の点 9, 18 などの隅の点における誤差ベクトルの z 軸方向成分の決定精度は、他の成分に比べてそれほど向上しない。そこで、次に、距離測定を基礎とした、より現実的な誤差ベクトルの決定方法について述べる。

2.2 誤差ベクトル分布の決定法 2.1 節に述べ

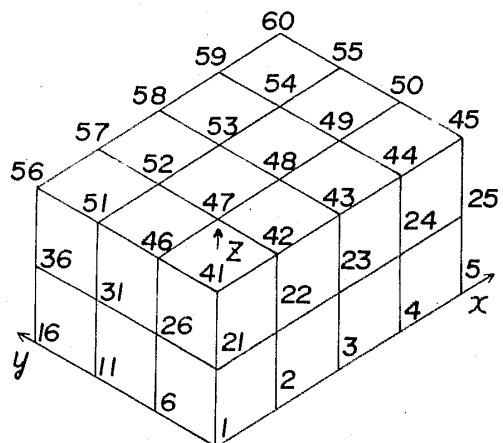


図 3 測定範囲の分割と観測点位置

た誤差ベクトルの決定法は、各観測点位置での系統的誤差の各軸方向成分を同時に決定できるという利点がある。しかし、観測点数が多くなると測定時間がかかりすぎるという欠点もある。そこで、観測点を図3のように規則的に配置し、各軸方向成分を個別に観測する方法を取り入れて、測定時間の短縮を計ることにした。すなわち、図3のように x, y, z 方向の測定範囲を等間隔に4, 3, 2等分し、60個の節点位置での誤差ベクトルを求める手順は以下のようなものである。ただし、点 P_i の添字 i は図3の節点の番号に対応するものとする。

2・2・1 距離の測定 3点 P_1, P_5, P_{16} を図1の点 O, P, Q に対応させて基準座標系を設定し、測定範囲全体の直方体の8頂点について、28方向の距離の測定を行い、式(3)の条件より、これらの点の誤差ベクトルを決定しておく。これによって、各軸相互の直角度が明確になるとともに、次に述べる指示精度測定の際に基準となる点の誤差ベクトルの値が得られる。

2・2・2 指示精度⁽²⁾測定 ある座標軸に平行な3本の軸方向で指示精度を測定し、それらでの誤差ベクトル成分を決定する。例えば、 x 軸方向で、図4のように点 P_1 から点 P_5 までで指示精度測定を行えば Δx_1 に対する $\Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5$ の差が観測される。そして、 Δx_1 の値は既知であるから他の4点での値が定まる。ここでは、 x 軸方向には点 P_1, P_{16}, P_{41} を基点として指示精度測定を行い、 $P_1 \sim P_5, P_{16} \sim P_{20}, P_{41} \sim P_{45}$ の15点での誤差ベクトルの x 軸方向成分を定めた。同様に y 軸方向には P_1, P_5, P_{41} を基点とし、 z 軸方向には P_1, P_5, P_{16} を基点とした測定により、それぞれの位置での y あるいは z 軸方向成分を定める。そして、これらの結果は次の平面度測定に用いられる。

2・2・3 平面度⁽³⁾測定 各軸断面内での平面度測定から、その測定軸方向の誤差ベクトル成分を定める。例えば、図5に示すように、 $P_1 \sim P_{20}$ を含む xy 平面上に正しい平面を置き、3点 P_1, P_5, P_{16} を基準とした平面度測定を行えば、これらの点での $\Delta z_1, \Delta z_5, \Delta z_{16}$ は既知であるから、基準座標系に対する他の17

点の誤差ベクトルの z 軸方向成分を求めることができる。また、これによって、点 P_{20} などの隅の点での z 軸方向成分も無理なく決定できる。真直度測定によっても同様の結果を得ることができるが、平面度測定によるほうが基準点の数が少なくてすみ、測定の能率も高い。そこで、 x, y, z 各軸の分割数により、それぞれ5, 4, 3箇所の断面で平面度測定を行い、2・2・1, 2・2・2項の結果を総合して60点の誤差ベクトルを決定する。

3. 測定例と測定結果

3・1 測定方法 測定対象とした2機種の三次元測定機(A, B)はどちらもブリッジ形の構造をし、測定範囲はA機が400 mm×300 mm×200 mm, B機が400 mm×300 mm×300 mmであり、実際に誤差ベクトルの分布を求めた範囲は320 mm×240 mm×160 mmである。案内方式はA機がころがりベアリング, B機が空気ベアリングである。座標検出には、それぞれ透過形と反射形のリニアエンコーダが用いられ、最小読取り値はどちらも1 μ mである。

距離の測定にはブロックゲージとオプチャルフラットを密着させたものを、指示精度測定にはチェックマスタを用いて、各測定面で約20点ずつの座標測定を行い、面間距離を算出した。また、平面度測定は、測定面が450 mm×300 mmの石定盤を基準とする3箇所の観測点を通るように置き、各観測点位置の近傍で約10点ずつ座標を測定した。そして、基準3箇所での座標測定値から定めた平面に対する各点の距離を算出した。さらに、基準点の誤差ベクトルの値で補正し、それぞれの点での誤差ベクトルの成分を求めた。定盤自身の平面度は1.5 μ m程度であることを、光電式オートコリメータを用いて確認している。チェックマスタと定盤は、測定テーブルを案内として、その測定面を測定軸方向と一致させ、他の2軸方向の誤差ベクトル成分の混入を0.1%程度以下に抑えた。

3・2 誤差ベクトルの測定結果 A, B 2機種について2・2・1項の距離測定を行った。距離測定による測定方程式の M_{ij} と残差 r_{ij} のそれぞれの最大値と最

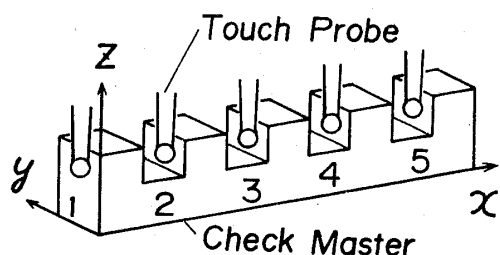


図4 x 軸方向指示精度の測定

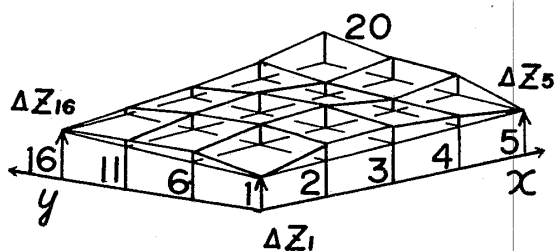


図5 xy 平面での平面度測定

小値を表1に示す。このときの28方向の測定値の標準偏差 σ も表1に示しておく⁽⁴⁾。また、A機の200mm×200mm×100mmの測定範囲での図2の153方向(18点)の測定結果も比較のために表1に記入した。ゲージ寸法の測定値と真値との差はA, B機でそれぞれ24, 7 μ mであり、2機種の測定精度には大きな差がある。また、残差と標準偏差の値はB機に比べA機のほうが小さくなっているのは、A機については28方向の測定を2回繰返して行っていることによる。表2に誤差ベクトルの絶対値の最大値と、各成分ごとの最大値, 最小値を示したが、これからもB機はA機に比べ全体的に高い精度を有していることがわかる。図6, 7に2機種の誤差ベクトル分布全体の様子を図示した。A機では、 z 軸方向成分はどの位置でも小

さく、 x, y 軸方向の成分は大きい。特に x 軸方向成分が大きい。しかし、それらの成分の方向には一定の傾向が認められる。B機は、A機とは対照的に、 $\Delta x, \Delta y$ の分布に比べ Δz の大きさが目立つが同じ断面内では、ほぼ一様の分布になっている。

3.3 測定環境と誤差ベクトルの変化 三次元測定機では、測定環境、特に温度の影響を受けやすく、これも大きな誤差要因であると考えられる。よって、その影響を明らかにしておくことも必要である。そこで、A機について、恒温室温度をいろいろ変化させて測定実験を行い、誤差ベクトル分布の変化という形でそれを調べた。

距離の測定では温度変化によるゲージの伸びを考慮せず、呼び寸法により測定データを処理した。図8に、20°Cを基準とした、温度の変化に対する各軸方向の誤差ベクトル成分の変化を示した。測定は x, y, z 軸のそれぞれの方向で行い、測定長は各々160mmである。これによれば、20°C付近での変化は小さいが、25°C前後以上では誤差ベクトル成分の変化が顕著になる。また、軸方向により変化の割合はやや異なり、 x 軸方向の変化が他の2軸に比べて小さい。図9に29°Cと20°Cでの誤差ベクトルの成分の差を示した。各軸方向には、その軸方向の距離に比例した変化がみられ、さらに X 軸に対する y, z 両軸の直角度も変化していることがわかる。

表1 距離測定による誤差ベクトルの決定 (μ m)

Points of measurement	8	8	18
Machine type	A	B	A
(M_{ij}) _{max}	15.0	2.7	9.5
(M_{ij}) _{min}	- 8.5	- 4.2	- 2.5
(r_{ij}) _{max}	0.8	1.4	1.4
(r_{ij}) _{min}	- 0.8	- 1.0	- 1.2
σ	0.7	1.3	0.7

表2 誤差ベクトルの大きさ (μ m)

Points of measurement	60	60	18
Machine type	A	B	A
$ \Delta X _{\max}$	17.1	7.2	10.2
(ΔX) _{max}	1.8	3.6	0.6
(ΔX) _{min}	-15.4	- 0.1	- 8.2
(Δy) _{max}	8.9	3.6	6.1
(Δy) _{min}	- 4.5	- 0.6	- 0.7
(Δz) _{max}	1.3	0.5	0.3
(Δz) _{min}	- 2.4	- 5.7	- 0.5

4. 考 察

測定対象としたA, B2機種はどちらも図10のように、固定された y 案内面上を y キャリジが移動し、 x, z 軸方向への移動は、この y キャリジ上で行われるブリッジ形の構造である。本章では、主にA機の誤差ベクトルの分布について、各軸方向成分を個別に検討し、測定機の各軸案内機構と誤差ベクトルとの関連

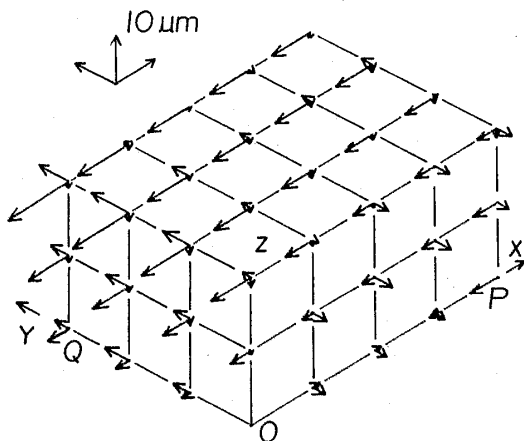


図6 測定機Aの誤差ベクトル分布

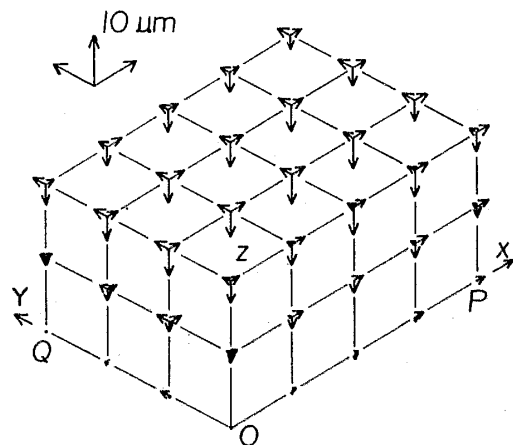


図7 測定機Bの誤差ベクトル分布

についての考察を行う。

4.1 x軸方向成分 $x=0$ の断面上の12点(図3)の観測点を基点としたx軸方向指示精度は図11に示したように、z軸の位置により大きく変化している。これは、xキャリジ部分のx軸方向への移動にもなって起こるxキャリジのピッチングが、アッペのオフセット誤差の原因となり、z軸の上下によって、x軸指示精度が変化するものと考えられる。

図12に $x=0$ の断面での Δx の分布を図6から抜粋して示す。yz面は、ほぼ平面に保たれているが、両軸はX軸に対してどちらもx座標を小さくする方向に傾いている。特にz軸の直角からの狂いは大きく、xキャリジは、この位置では右下がりに傾いている。

しかも、指示精度の例(図11)からわかるように、xキャリジがx方向へ移動するにつれて、この傾きは徐々に左下がりの傾きが変わっていく。

4.2 y軸方向成分 詳細については省略するが、y軸方向の指示精度は測定位置によらず、ほぼ一定の分布を示していた。したがって、yキャリジの移動は安定に行われ、xキャリジ部分の姿勢の変化はないようである。

図13に $y=0$ の断面での Δy の分布を示した。x、z軸の真直からの狂いが大きく、Y軸に対するz軸の直角度が、xキャリジの位置により変化していることがわかる。このことは、xキャリジ部分のx軸方向へ

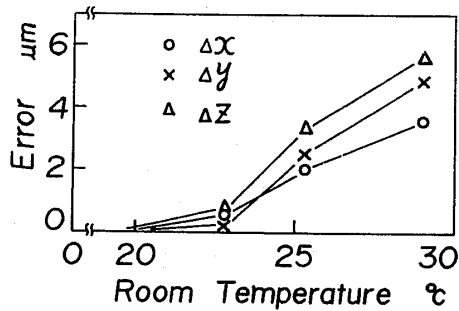


図8 温度変化による指示精度の変化

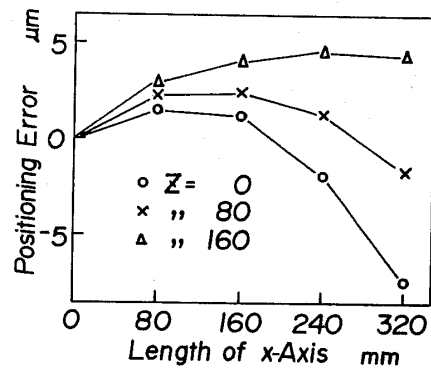


図11 x軸指示精度の変化

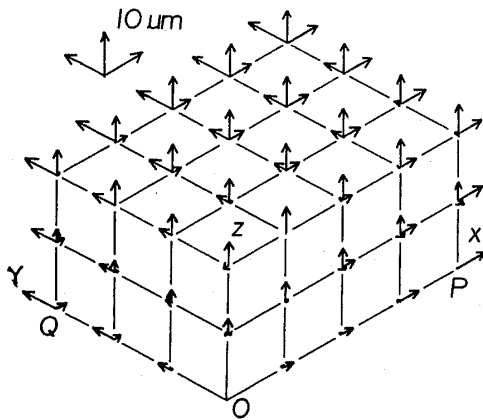


図9 温度変化による誤差ベクトルの変化 (20°Cと29°Cにおける差)

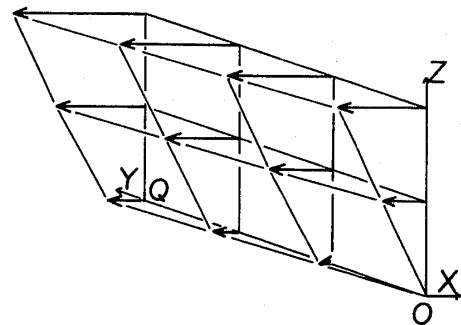


図12 yz面内での Δx の分布

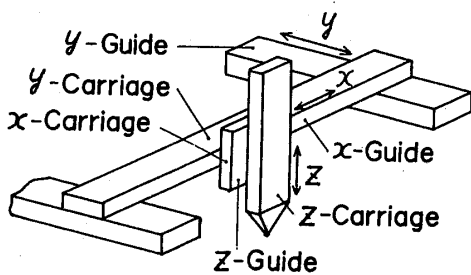


図10 測定機の構造

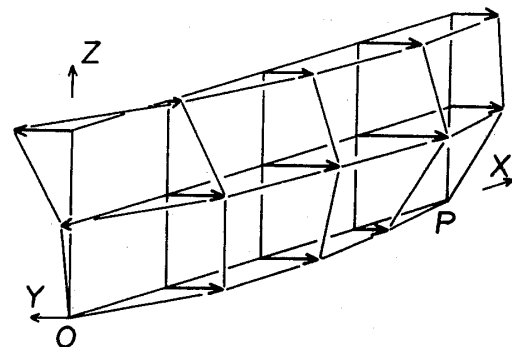


図13 xy面内での Δy の分布

$P_{xz}(x)$, $P_{yz}(x)$ は容易に測定できると思うが、上の値との比較データがあればご教示いただきたい。また、 $P_{xz}(x)$, $P_{yz}(x)$ の再現性はどの程度か。上の $\pm 1\mu\text{m}$ の誤差はこの再現性に関係するののか。また、この P_{xz} , P_{yz} は室温に依存しないか。

(3) 式(4)に入っている $H_y(y)$, $S_x(z)$, H_x , S_y , V_x , V_y は本文では不要であるかのような説明になっている。これらの項を省略すれば、各点での誤差ベクトルの評価はどのくらい変化するのか。

(4) 2・1節のような複雑な計算が必要になる測定機が実際にあるのか。

〔回答〕 (1) P_{xy} , $P_{xz}(x)$ などは図6に示した誤差ベクトルの値を用い、図14に基づいて算出した。各軸方向の分布は80mm間隔の離散的分布である。そして、本実験に使用した三次元測定機については、これらの値から、観測した60箇所での誤差成分を式(4)で表現できることを確認したもので、ご指摘のようであてはめ精度を確認したことになると思う。

(2) P_{xz} については、 $x=0$ での値を基準として x 軸方向の変化をオートコリメータで測定している。これと比較するために、図6の結果から、 $x=0$ での値を基準としたときの P_{xz} の x 軸方向変化を角度に換算して求めてみた。付表1に両者の結果を示した。

再現性については、オートコリメータを用いて短時間内に P_{xz} をくり返し測定した場合のばらつきは $\pm 0.2\text{s}$ 程度であり非常に小さい。長時間にわたる再現性は確認していない。また、これら直角度の再現性は他の要素精度の再現性ととも、あてはめ精度に影響すると考えられる。

P_{xz} , P_{yz} の室温への依存性は図9からわかるように、室温により多少変化するようであるが、その割合は軸方向への変化と比較すれば小さいものである。

(3) 著者らの意は、 H_x , H_y などの分布が測定範囲のどの位置でも同じ分布である、ということであって、不要ということではない。不適切な表現であったと思う。

また、これらの項を省略すると、 x , z 軸方向成分ではそれぞれ最大約 $1\mu\text{m}$ の違いになる。 y 軸方向成分は H_x の影響が大きく $3.4\mu\text{m}$, S_y で $1.3\mu\text{m}$ の変化があるから、最大 $5\mu\text{m}$ 程度の違いである。

付表1 P_{xz} の x 軸方向変化

x (mm)	0	80	160	240	320
calculated values from experimental results (sec)	0.0	1.8	4.4	9.2	16.7
measured values using an auto-collimator (sec)	0.0	2.5	4.7	9.6	16.0

(4) 三次元的な誤差を知る方法を考えたとき、これを直接測定できるような原器が存在しないことから、間接的な測定を行って誤差を決定する方法として、2・1節の手法を提案したものである。

〔質問〕 梶谷 誠〔電気通信大学〕

(1) 測定例において、実際にかかった総測定時間をご教示願いたい。

(2) 図3の分割単位の大きさの決定は、どのようなことを考慮して行えばよいか。

〔回答〕 (1) 図2の測定例では18箇所の観測点について、ブロックゲージを用いた距離測定を153回行っている。このときの総測定時間は約10hであった。

また、図6, 7については60箇所の観測点について2・2節の測定を行った。このときにはそれぞれ約5hを要した。

(2) 誤差の変化がなめらかであれば分割単位を大きくする、というように対象となる測定機の誤差分布の様子を考慮して決定しなければならない。したがって測定機の納入立合検査時に行う指示精度、真直度、直角度などの検査結果から、その測定機の精度がどの程度であるかをあらかじめ知っておくことも必要となる。

あるいは最初は大きな分割単位(全測定範囲を一つの単位とすることもできる)で測定を行い、その結果によって分割単位を決定することも可能である。

〔質問〕 沢辺 雅二〔(株)三豊製作所〕

誤差ベクトルによって三次元空間の系統誤差の補正を行う研究の一つとしての測定法の報告を拝見し、次の点についておたずねしたい。

(1) 一つの軸についてピッチング、ヨーイング、ローリングの検出が、指示精度と平面度の測定から十分できるのか。

(2) 指示精度と平面度の測定時のばらつきについてはどう考えられ処置されたか。

(3) x , y , z 軸に平行な方向のみの測定をしておられると拝見したが、空間的にステップゲージ(チェックマスタ)を空間的に傾斜したセットしたときの測定が実用に近いとして広く行われていると思われるが、この報告でこれを採用しなかった理由をお聞かせ願いたい。

〔回答〕 (1) 指示精度と平面度の測定だけから三次元的な誤差を決定することはできない。したがって、その測定結果だけでピッチング、ヨーイング、ローリングを検出することはできない。

しかし、本研究では指示精度と平面度の測定ととも

に、2点間距離の測定を行っている。すなわち図3に示した測定範囲の隅の8点 ($P_1, P_5, P_{16}, \dots, P_{56}, P_{60}$) に関しては、その各々の2点を結ぶ位置、方向にブロックゲージを置き (このときゲージは空間的に傾斜する)、寸法測定を行った。そして、この結果を用い、式(3)を満足するように8点の誤差ベクトルを決定した。その後、既知となったこれらの点での誤差ベクトルの各軸方向成分と他の観測点の誤差成分との関連を指示精度、平面度の測定によって決定した。

このようにして得た誤差ベクトルの分布とピッチング、ヨーイング、ローリングとの対応を考えることは可能である。

(2) 測定に用いたゲージ類は測定面が正しい平面であると考えた。したがって、座標測定値をばらつか

せる主な原因はくり返し精度と量子化誤差であり、これらが重ね合されたとき、その分布は正規分布に近い。そこで、最小二乗法によって測定面を決定した。

(3) 軸に平行な方向のみの測定から、真に三次元的な誤差を決定することはできない。したがって、本研究では回答(1)にも述べたようにゲージを空間的に傾斜させた測定も行っている。ただし、指示精度と平面度の測定はご指摘のように x, y, z 軸に平行な方向のみについて行っている。

また、ステップゲージ(チェックマスタ)を用いた測定法は、測定機の精度評価法として大変有用であると考えるが、本研究の誤差補正という目的には適合しない。