

三次元座標測定機の経年変化に関する研究*

大 矢 誠^{*1}A Study on the Secular Change of Three-Dimensional
Coordinate Measuring Machines

Makoto OHYA

One of the methods of improving the accuracy of the three-dimensional coordinate measuring machine (cmm) is numerical error correction. For the method, calibration of cmm must be carried out periodically. However, the long term stability of the accuracy cannot be predicted, and it is often difficult to determine the interval time of calibration. For the purpose of determining the periodic time of calibration, the secular change of a cmm has been investigated for over seven years. The same calibration procedure was performed with the cmm under the same environmental conditions. Results of tests show that the change in the accuracy occurs in a short period of one or two months. The accuracy must be frequently measured for the judgement of the time to practice the calibration procedure.

Key Words: Measurement, Accuracy, Coordinate Measuring Machine, Calibration, Secular Change

1. 緒 言

三次元測定機は立体形状を能率良く測定する手段として広く使用されている。しかし、その構造はアップの原理に従っていないので、広い測定範囲にわたって高精度化を実現することは困難である。そこで、測定の再現性の良さを前提とし、系統誤差を補正することによって精度向上を図る方法が用いられる。すなわち、測定機をあらかじめ校正しておき、ソフトウェア的に系統誤差を補正しようとする方法である⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

誤差補正によって高い精度を維持するためには、測定機の校正をどの程度の周期で行うかということが問題になる。経年変化の大きさが繰返し精度を越えない程度であれば実用上はさしつかえない。したがって、目標とする精度と経年変化の大きさのかねあいから、経済性を考慮しながら適切な周期で校正を行えばよい。しかし、個々の測定機の経年変化を予測することはできないので、その変化を代表するなんらかの指標があれば都合がよい。また、実機についての経年変化に関する資料があれば、校正周期の判断に有用であると考えられる。

著者はこれまでに約8年間にわたり、1台の三次元測定機をほぼ一定の環境において同一の方法によって校正を行ってきた。経年変化のようすは個々の測定機についてそれぞれ異なるものであるが、校正周期の判断や指標の見きわめのための参考になるとと思われる。そこで、経年変化のようすについて報告する。

2. 検 査 方 法

2.1 測定対象とした三次元測定機 測定対象とした三次元測定機は、ブリッジ形構造のマニュアル機である(図1)。測定範囲の大きさはX, Y, Z各軸についてそれぞれ400, 300, 200 mmである。キャリッジの移動案内方式にはローラベアリングが用いられている。座標は最小読取り値1 μ mのガラススケールで読取られる。測定プローブとしてはタッチトリガプローブを用いた。

校正は1983年11月より1991年3月まで13回行っている。納入立会い検査(1980年)における精度検査結果を初期精度として表1に示す。表1に示した幾何学的な誤差は全測定範囲について求めたものであるが、これらの要因を総合すると長さ測定の誤差は図2に示した測定範囲においても10 μ m以上になることが予想される。しかし、繰返し精度は高く各軸とも標

* 原稿受付 平成3年4月8日。

*1 正員, 新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

準偏差で $0.6 \mu\text{m}$ 以下であったので、適切な誤差補正を行って系統誤差を取り除くことができれば測定精度を繰返し精度の程度に向上させることが期待できる。なお、測定機は恒温室 ($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, $50\% \pm 10\%$) 内に設置されており、以下の測定はすべて恒温室内で行ったものである。

2.2 校正範囲と測定点位置 測定範囲のほぼ中央部に各軸移動量の80%をとり 320, 240, 160 mm の範囲をそれぞれ 80 mm 間隔に等分割し、60 箇所の格子点 ($P_1 \sim P_{60}$) を定めた。図 2 に格子点の配置と格子点番号を示す。また、点 P_1 を原点に選び、この位置は誤差のない基準点とし、 P_1P_5 の方向を X 軸、3 点 P_1, P_5, P_{16} を通る平面の法線方向を Z 軸とする座標系を定めてある。校正実験ではこれらの格子点について 3 軸方向の系統誤差成分を求めた。各軸方向の誤差を $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ と表し、これを誤差ベクトル ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) と呼ぶことにする。

2.3 校正方法 校正は、長さの標準器を用いた長さ測定を基本とし、以下の手順で行った。

測定範囲の隅の 8 点 ($P_1, P_5, P_{16}, P_{20}, P_{41}, P_{45}, P_{56}$,

P_{60}) については、各 2 点を結ぶ方向に置いた長さの標準器 (ブロックゲージ) を測定する。すなわち、測定点 8 箇所について 28 とおりの空間的な長さ測定を行い、その結果より各点における誤差ベクトルの 3 成分を同時に求める。

その他の格子点については、まず各軸方向についてそれぞれ 3 箇所の位置で指示精度を測定してプローブの位置決め誤差を定め、それを各測定点におけるその軸方向の誤差ベクトル成分とする。さらに真直度または平面度が既知の規範 (直定規, 精密定盤) をそれぞれの軸断面に置いて測定することによって、各点の誤差ベクトル成分を個別に求める。これらの測定結果を総合して 60 箇所の誤差ベクトルを決定する⁽⁵⁾。

3. 検査結果

3.1 繰返し性と再現性 前節に述べた校正方法は、測定機の系統誤差を長さ標準器の長さ測定の誤差として観測するものである。この長さ測定には、長さ標準器を各軸と平行に設置して行う指示精度の測定も含まれる。図 3 は、長さ測定の 1 例として 2 点 P_1 と P_5 の位置にブロックゲージの測定面を置いて X 軸の指示精度を繰返し測定し、 $X=320 \text{ mm}$ における位置決め誤差を求めた結果を示したものである。約 6 時間に 24 回の測定を行ったところ、ばらつきの幅は 1.2

表 1 供試測定機の初期精度 (μm)

Error Components		Measured Value
Rectangularity	X-Y	2.5
	X-Z	4.0
	Y-Z	4.5
Straightness	X-axis	3 (Horizontal) 1 (Vertical)
	Y-axis	1 (Horizontal) 1 (Vertical)
Positioning	X-axis	2
	Y-axis	3
	Z-axis	1

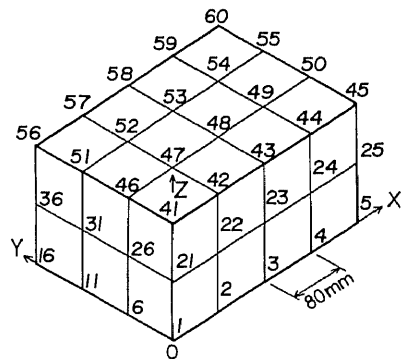


図 2 測定範囲の分割と格子点番号

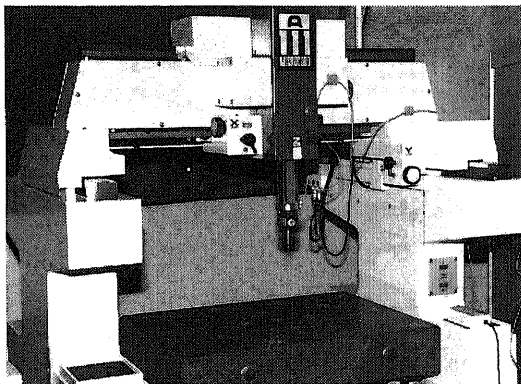


図 1 測定対象とした三次元測定機

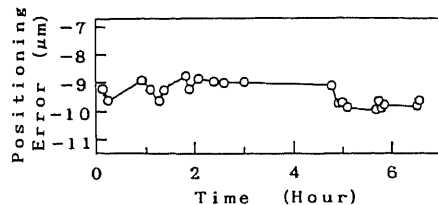


図 3 長さ測定の繰返し性 (X 軸指示精度についての測定結果)

μm 、標準偏差は $0.4 \mu\text{m}$ であった。この間、測定室温は約 0.5°C 徐々に上昇する傾向が見られた。

約 3 箇月間同じ位置で測定を行い、再現性について調べた結果を図 4 に示す。ばらつきの幅は $4.6 \mu\text{m}$ であった。この期間の室温は $19.4^\circ\text{C} \sim 20.8^\circ\text{C}$ の範囲で緩やかな変動があったが、位置決め誤差には短期間で大きな変化が起こっている。すなわち、2 日間で最大 $2 \mu\text{m}$ の変化が見られた。

他の測定位置における長さ測定についても同程度の変化があるものと考えてよい。そこで、2・3 節に述べた校正のための長さ測定は、繰返し性の影響を避けるために各位置について異なる日に 2 回測定を行っている。その差はおおむね $1 \mu\text{m}$ 以内であったが、それを越えた場合にはさらに測定を行い、平均値を用いて誤差ベクトルを求めている。

3・2 誤差分布の概要 測定期間のほぼ中間の 1987 年 3 月に行った校正によって得られた誤差ベクトルの分布を図 5 に示す。測定対象とした測定機では誤差ベクトルの X 軸成分が大きく、しかも Y 軸および Z 軸方向に直線的に変化しているようすが見られる。これは、 X 軸に対する Y 軸と Z 軸の直角からの狂いのためである。また、 X 軸方向の分布が高さ (Z 軸の位置) によって変化している。これは X 軸運動のピッチングによることを確認している。 Y 軸の誤差が

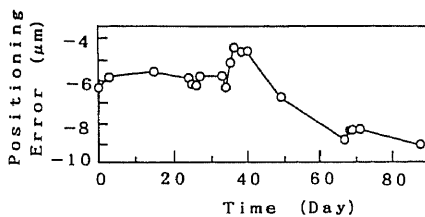


図 4 長さ測定の再現性
(X 軸指示精度についての測定結果)

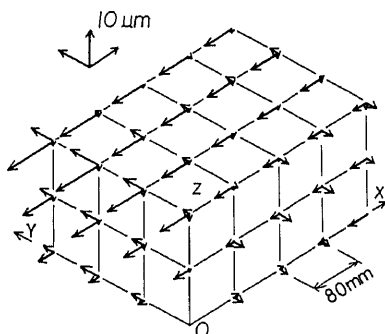


図 5 供試測定機の誤差分布

X 軸および Z 軸方向に凸状の分布を示しているのは、 X 軸および Z 軸運動の運動誤差の影響が表れているものと考えられる。これら 2 軸方向の誤差成分に対して、 Z 軸成分は全般に小さい。この全体的な傾向は測定期間を通して見られたものであり、測定機の幾何学的構造が大きく変化することはなかった。

3・3 長さ測定の経年変化 2・3 節に述べた 28 とおりの空間的な長さ測定について、いくつかの測定位置における長さ測定の誤差の経年変化を図 6 に示す。以後、図の横軸は第 1 回の校正時期を基準とした経過月数をとっている。

同じ測定位置について経年変化の最大幅は $7 \mu\text{m}$ であり、これは測定範囲の対角線に相当する位置 ($P_{16}-P_{45}$, 測定寸法 431 mm) で生じている。また他の対角位置 (P_1-P_{60} , P_5-P_{56} , $P_{20}-P_{41}$) における経年変化の幅もすべて $5 \mu\text{m}$ 以上であった。対角位置では測定長さが長いこと、各軸間の直角度の影響を直接受けることから、変化が大きくなるものと考えられる。それ以外では $5 \mu\text{m}$ 以上の変化はほとんど見られなかった。これら大きな変化を含めて経年変化の幅は平均 $4 \mu\text{m}$ 程度であった。また、一定の傾向をもって増加、減少するような傾向は認められなかった。

短期間で急激な変化が見られるのが 12 箇月と 14 箇月の間であり、 P_5-P_{56} の位置で長さ測定の誤差が 2 箇月間に $5 \mu\text{m}$ 変化している。この期間には他にも 3~4 μm 変化している測定位置がいくつかある。なお、3・1 節の繰返し性、再現性の測定はこの期間に行ったものである。

3・4 誤差ベクトルの経年変化 校正により定められた 60 点の誤差ベクトルの各軸成分について、経年変

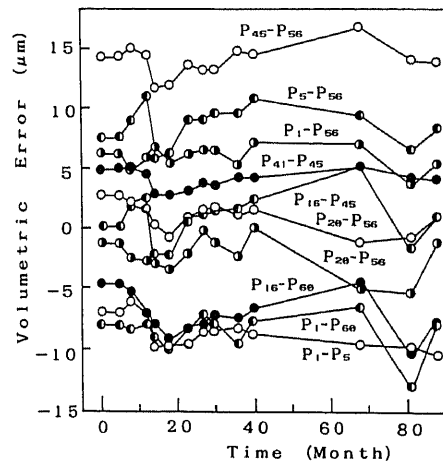


図 6 長さ測定誤差の経年変化

化の幅の平均値, 最大値, 最小値, および短期間(2箇月間)での最大変化量を, その測定位置とともに表2に示す。変化幅の最大値が約5 μm であるのに対して2箇月の経過で3 μm 以上変化する場合があります, 短期間でも大きな変化が生ずることがわかる。

図7は10箇所の測定点における誤差ベクトルのX軸成分の経年変化を示したものである。12箇月から27箇月にかけて大きな変化があり, 特に12箇月から14箇月にかけては増加と減少がともに見られ, その変化割合も大きい。この期間は前節に記した変動の大きな時期と一致しており, 測定機の精度が不安定であったことがわかる。また, 誤差ベクトルのX軸成分の分布より水平面内でのY軸運動の真直度を求めた結果を図8に示す。この図から前述の変化が図7に示した測定点以外でも生じていることが確認できる。

誤差ベクトルのY軸成分(ΔY)については指示精度の形で整理してみた。Y軸線上の各測定位置における ΔY はY軸方向の位置決め誤差に相当し, これよりY軸の指示精度を求めることができる。Y軸方向指示精度は高さ(Z軸位置)によって分布形状が異なるので, 各高さごとに示してある(図9)。図9によれば, 5箇月から14箇月の間の分布に凹凸が見られる。この変化は測定位置が高いほど大きい。また, 27箇月

から40箇月の間にも凹凸の変化が見られるが, こちらは測定位置の低いほうが変化が大きい。そのほかには特徴的な変化は見られず安定した精度を保っていたようである。

図10は同じくZ軸指示精度の形に整理した誤差ベクトルのZ軸成分の変化を示したものである。Z軸成分は, 5箇月から8箇月にかけてと68箇月から81箇月にかけて急激に減少する。しかも, その割合はZ軸の高い位置, すなわち測定長さが長いほど大きくなっている。しかし, X, Y軸成分に比べて絶対値が小さいので, 誤差分布全体から見ればあまり目立つことはない。

空間的な長さ測定によって定めた隅の8点における誤差ベクトルの値を用いて各軸間の直角度をそれぞれ

表2 誤差ベクトル成分の経年変化 (μm)

	Average	Maximum	Minimum	Maximum change
ΔX	2.9	4.9 (P _{2a})	1.1 (P _a)	2.8 (P ₅)
ΔY	2.3	3.7 (P _{5a})	1.1 (P _a)	2.6 (P ₅₅)
ΔZ	2.0	4.5 (P _{a1})	0.5 (P _{1a})	3.6 (P ₄₂)

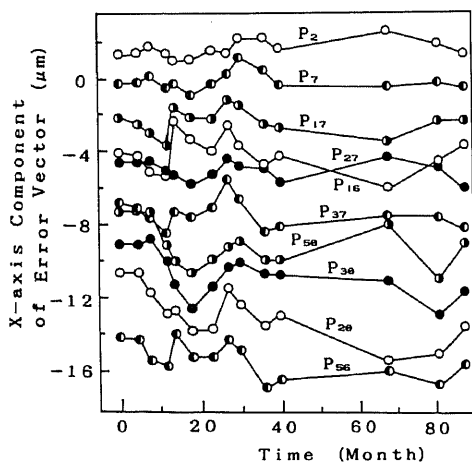


図7 誤差ベクトルのX軸成分の経年変化

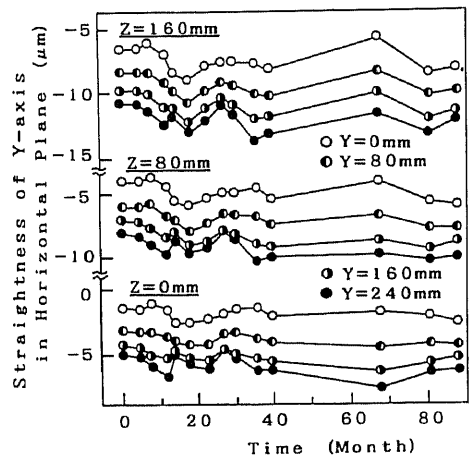


図8 誤差ベクトルのX軸成分の経年変化 (水平面内でのY軸真直度の形に整理した場合)

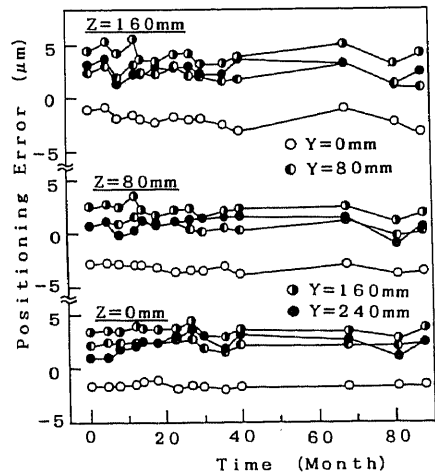


図9 Y軸指示精度の経年変化

2箇所の測定位置について求め、その変化を図11に示した。これによるとX-Y軸間の直角度の変動が大きい。特に12箇月と14箇月の2箇月間に1.3 $\mu\text{m}/100\text{mm}$ ほど変化している。同時期のX-Z軸間の直角度の変化も大きい。Y-Z軸間の直角度は特に大きく変化する時期は見あたらないが、短期間に細かい変動が表れている。

4. 考 察

測定対象とした測定機には次のような特徴的な経年変化が見られた。

(1) 12箇月(1984年11月)と14箇月(1985年1月)の間に大きな変化が見られた。すなわち、空間的な長さ測定では、4箇所の対角方向位置での長さ測定の誤差が3~5 μm 小さくなっていた(図6)。誤差ベクトルのX軸成分も同時期に増加と減少がともに見られ、その変化割合も大きい(図7)。また、X軸の指示精度はこの時期を含めて27箇月までの間凹状の分布を示していた。特に測定長さが長くなるほど変化は大きかった。同様の変化がY軸水平面内の真直度にも表れていた(図8)。これらのことから判断すると、X-Y軸間の直角からの狂いとX軸指示精度に変化があったことがうかがわれる。そして、急激な変化の後、徐々に元に戻るようになっている。これらのことから、この時期にXおよびYキャリッジの運動誤差に大きな変化があり、それがX-Y軸間の直角度およびX

軸指示精度の変化を引き起こしたことが考えられる。

(2) 誤差ベクトルのZ軸成分は、5箇月から8箇月にかけてと68箇月から81箇月にかけて急激に減少するようすが見られた(図10)。しかも、その割合はZ軸位置が高いほど大きい。この原因としては、Z軸スケールの取付けのずれやZ軸自身の傾きなどが考えられる。しかし、X、Y軸方向の誤差成分には直角の狂いの影響はみられないから、これらの期間内になんらかの原因でZ軸スケールの取付けがずれたものと思われる。スケールが傾いたものとして、測定結果よりその変化を計算してみると、それぞれ、11分、13分ほどの角度変化に相当する。

(3) 誤差ベクトルのY軸成分は5箇月から14箇月の間の分布に凹凸が見られた。この変化は測定位置が高いほど大きい。また、27箇月から40箇月の間にも凹状の変化が見られたが、こちらは測定位置の低いほうが変化が大きい。各Z軸断面について求めた水平面内におけるX軸真直度にも、Y軸成分のこの傾向が現れていた。

これら短期間でみられる変化は、各軸キャリッジに大きな力が加わったり、測定機のすえ付け状態の変化などによって生じたものと考えられる。精度維持のためにはこれらを避けなければならない。そして、特に大きな変化が観測されたときに校正を行うのが効率的である。そのためには短時間で精度を検査できる方法が必要である。スケールのずれの検出には指示精度の測定が、また、精度上最も大きな影響を及ぼす直角度の変化を知るには、対角方向の長さ測定が有効である。あるいは両者を同時に検査できる立体的なゲージ⁽⁶⁾の利用も有効な方法と考えられる。

5. 結 言

経年変化は個々の測定機につき異なり、さらに使用環境、使用状況、その他多くの要因に依存するものと考えられる。検査対象とした三次元測定機は比較的良好な環境と使用状態のもとにおかれていると思われるが、短期間でかなり大きな変化が見られることがある。このような変化は、精度維持の面からは長期的な漸変傾向よりも大きな問題となる。本機の場合には、全期間を通して部分的な変化はあるが、総じて安定した精度を保っているように見受けられる。したがって、最大5 μm 程度の変化を許容すれば、定期的に繁雑な校正作業を行う必要はない。しかし、かなり短期間にこの程度の変化が起こっていることを考えると、校正時期の判断のためには短時間で実行できる精度検査法を確立し、短い周期で検査を行いながら精度の変化を

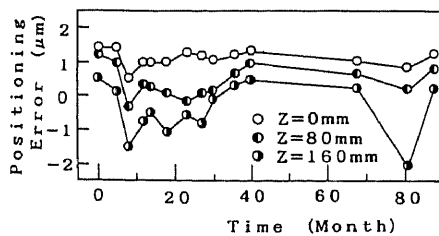


図10 Z軸指示精度の経年変化

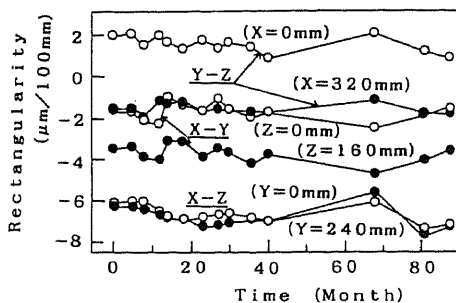


図11 直角度の経年変化

監視する必要がある。

文 献

- (1) Burdekin, M., ほか 1 名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 195-20 (1981), 231.
 - (2) Zhang, G., ほか 4 名, *CIRP Ann.*, 34-1(1985), 435.
 - (3) Busch, K., ほか 2 名, *Precision Eng.*, 7-3(1985), 139.
 - (4) 大矢・穂苅・田村, 機論, 54-503, C(1988), 1445.
 - (5) 大矢・穂苅・田村, 機論, 52-473, C(1986), 336.
 - (6) 大矢・穂苅・田村, 機論, 53-485, C(1987), 117.
-