

三次元座標測定機の測定精度に関する研究*

(測定プローブの影響)

大矢 誠^{*1}, 谷藤 克也^{*1}

A Study on the Measuring Accuracy of Three-dimensional Coordinate Measuring Machines

(Influence of Measuring Type of Probe)

Makoto OYA and Katsuya TANIFUJI

The measuring accuracy of three-dimensional coordinate measuring machines (cmm's) is affected by various error factors. To improve the measuring accuracy of cmm's by numerical error correction, it is necessary to give the calibration method careful consideration for several error factors in addition to geometrical errors. For example, as for the air bearing which has been broadly used as the linear guide way of the carriages, it may be considered that the deficiency of bearing stiffness decreases the measuring accuracy of cmm's. In such a case, measured values may vary with the type of probe system. In this paper the error factor which is considered as the influence of the lack of bearing stiffness is experimentally investigated. It is clarified that the measured values of cmm's vary with the measuring type of the probe in relation to the straightness of the linear guide way.

Key Words: Measurement, Accuracy, Coordinate Measuring Machine, Probe, Linear Guide, Straightness

1. 諸 言

三次元座標測定機は空間の点の座標を求める測定機であるが、直交座標形という構造上の制約から精度を低下させる要因が多い。特に Abbe の原理を満足しない構造のために、各機構部を高精度化することで測定機の精度を向上させるには限界がある。そこで近年、ソフトウェア的に精度を改善する方法が提案されている。すなわち、測定機を校正して系統誤差を求めておき、測定値を補正しようとする考え方である⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

ソフトウェア的な精度の改善が有効であるためには、測定の再現性が高く、精度が安定に保たなければならない。また、各機構部の経年変化を避けることはできないので、適切な周期で測定機を校正する必要がある。さらに幾何学的誤差とともに、測定プローブや測定方法の違いなども実用上大きな誤差要因となる。

ところで、三次元測定機の各軸案内機構にエアベアリングが多く用いられるようになってきている。これは摩擦係数が非常に小さいこと、高い運動性能を期待できること、案内部にはんれい岩やセラミックスを使

用できること、などの長所を持つためと考えられる。一方、剛性が低いという欠点を指摘される場合がある。著者らも実際の使用に際して、剛性不足に起因すると思われる誤差を経験している。エアベアリング案内機構を持つ機種では、測定形式の異なるプローブ、すなわち固定式と移動式のプローブによって測定結果が異なることがあった。

このような測定結果の違いは個々の測定機についてそれぞれ異なるものと考えられるが、安定した精度を実現するためには考慮しなければならない問題である。そこで本研究では測定形式の異なるプローブによって生ずる測定結果の差異について実験的に検討する。そして、各軸案内面の形状誤差やキャリッジの移動による変形、あるいは被測定物の重量などによって変化する測定機の傾きと関連してプローブの測定形式の違いが測定結果にどのような影響を及ぼすかを実機実験により明らかにする。

2. 測定実験に用いた三次元測定機

測定実験には A, B 2 機種 of 三次元測定機を用いた。両者は、ともにブリッジ形の構造であり、測定範囲の大きさもほぼ同程度 (A 機: 400×300×300 mm, B 機: 400×300×200 mm) である。A 機はマニュアル操

* 原稿受付 平成 2 年 6 月 25 日。

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

作のほかにモータドライブ操作が可能であり、B機に比べて重量が大きい。キャリッジの移動案内方式は、A機はエアベアリング、B機はローラベアリングを用いている。

図1はB機を示したものである。本機は防振用のゴム板を介して床面上3箇所支持してある。また、3箇所の支持部にあるジャッキによって測定機のレベルを調整できるようになっている。A機の据付方法も同様である。

測定形式の違うプローブとして2種類のプローブを用いた。一つは固定式の逆テーパープローブであり、他方は移動式のタッチトリガプローブである。これらのプローブによってボールプレート(図1)を測定して20個の鋼球中心座標を求め、各軸成分ごとに比較した⁽⁴⁾⁽⁶⁾。

3. プローブの測定形式による測定値の変化

エアベアリングを用いたA機によって、ボールプレートを測定した。ボールプレートは長手方向をX軸方向に一致させて測定範囲のほぼ中央部に置いた。ま

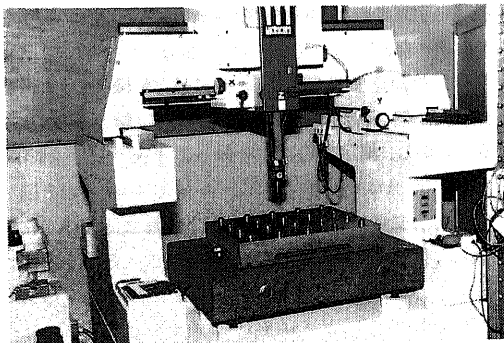


図1 測定実験に用いた三次元測定機

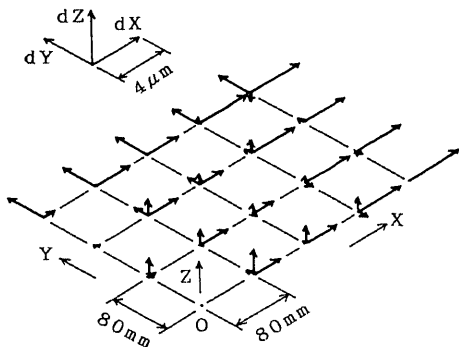


図2 プローブによる測定値の変化(A機, Z=0mm)

たZ軸方向の位置を80mm間隔に移動させ、Z=0, 80, 160, 240mmの4段階の高さで測定した。鋼球の配置は縦横それぞれ80mm間隔である。測定はすべてマニュアル操作で行った。

2種類のプローブによる測定結果は、両プローブの先端位置の違いを補正すれば等しいはずである。しかし、A機では両者に有意の差が見られた。図2は高さZ=0mmの位置に置いたボールプレートの各測定点について、2種のプローブの測定値の差を表してものであり、タッチプローブによる測定値から逆テーパープローブによる測定値を差し引いた値を各軸成分(dX , dY , dZ)ごとに矢印の大ききで示してある。

図2によれば、各鋼球について求めた中心座標のX軸およびY軸成分の差 dX , dY は、それぞれの軸方向に徐々に大きくなる様子が見られる。 dX はX軸320mmの測定範囲について最大約4 μ m、 dY はY軸240mmの測定範囲について最大約3 μ mであり、どちらもタッチプローブの測定値のほうが大きい。一方、図3はZ=240mmにおける同様の測定結果を示したものであるが、この場合にはプローブによる差は全体に小さく、ほぼ無視できる程度になっている。

図4は、ボールプレートの高さを変えた場合に dX がX軸方向にどのように変化するかを示したものである。この図によればX軸方向の分布は高さによら

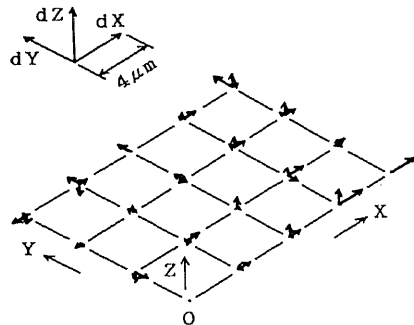


図3 プローブによる測定値の変化(A機, Z=240mm)

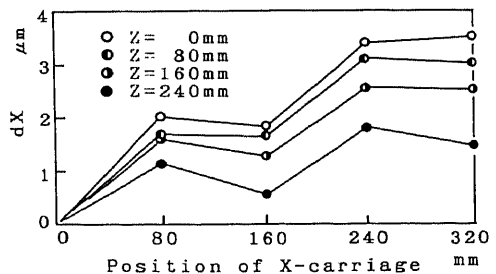


図4 プレートの高さによる dX のX軸方向分布

ずば同様の形状を示すこと、およびボールプレートの位置が高くなるに従って dX の値は徐々に小さくなるのがわかる。 dY の Y 軸方向分布についても同様の傾向が認められた。また、 dZ については、測定位置によるプローブの差は認められなかった。

ローラベアリングを用いた B 機についても同様の測定を行った。図 5 は、 $Z=0$ mm の位置における dX 、 dY 、 dZ を示したものである。B 機の場合には測定形式の異なるプローブを用いても測定結果が大きく変化することではなく、各軸成分の差は最大 1 μ m 程度である。

4. 測定力に関する検討

測定形式の異なるプローブを用いた場合には、測定力の方向と大きさが変わる。タッチプローブの測定力の方向は Z 軸と垂直な面内のプローブ移動方向であり、逆テーパープローブの測定力はほぼ Z 軸方向である。この違いのために各軸の回転角度誤差が変化することが考えられる。また、エアベアリングを用いた A 機に顕著な影響が表れることも予想できる。ピッチングの変化であれば、 dX と dY が高さ方向に減少する

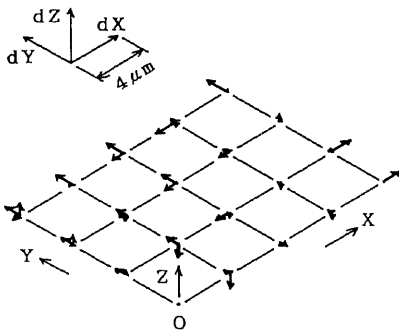


図 5 プローブによる測定値の変化(B機, $Z=0$ mm)

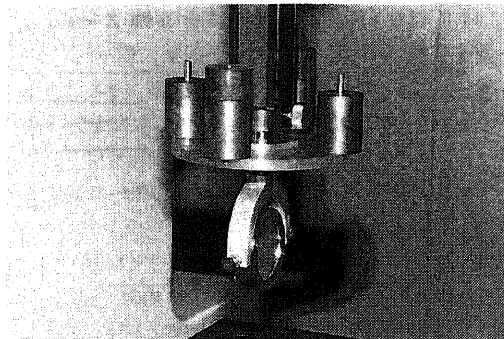


図 6 測定力の付加方法

ことも説明できる。そこで、測定力の違いが各軸運動の回転角度誤差、特に X 軸および Y 軸のピッチングにどのように影響するかを調べてみた。

回転角度誤差の測定には光電式オートコリメータ(分解能 0.1 秒)を用いた。これを測定テーブル上に固定し、 Z 軸先端に取付けた反射鏡の角度変化を測定した。測定力は、図 6 に示すように、プローブの取付部に重りを載せて与えた。また、重りの位置を片寄せることによって X 軸および Y 軸回りに力のモーメントを加えた状態で測定した。

図 7 は、A 機の X 軸方向 320 mm について 40 mm 間隔に測定した X 軸運動のピッチングを示したものである。この図には、測定力を付加しない場合、鉛直下向きに 10 N の測定力を付加した場合、 Y 軸回りにそれぞれ $+0.24$ N·m、 -0.24 N·m の大きさのモーメントを付加した場合の 4 通りの測定結果の平均値とばらつき幅が示してある。4 通りの測定については、各測定点位置でそれぞれ 4 回(2 往復)ずつ繰返し測定を行ったが、測定の再現性は良好であった。図 7 によれば測定力の影響はほとんど見られない。図 8 は A 機の Y 軸方向 240 mm について測定した Y 軸運動のピッチングを示したものである。図 7 に比べてばらつき幅はやや大きい、測定力の与え方による差は認められなかった。

重りを片寄せて載せたときには、A 機について 4 秒、B 機について 7 秒ほど Z 軸先端の傾きが変化する。しかし、測定力の状態を保ってキャリッジを移動

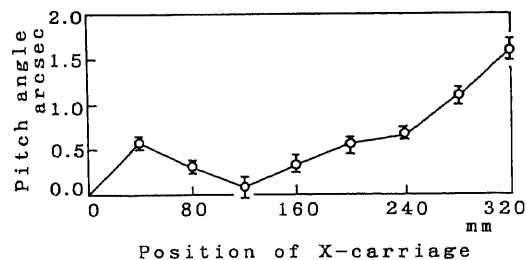


図 7 A 機について求めた X 軸方向のピッチング

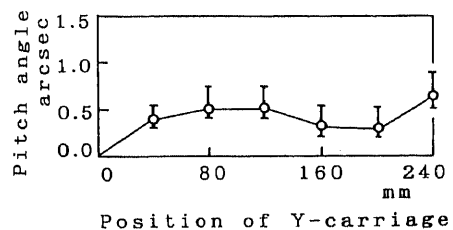


図 8 A 機について求めた Y 軸方向のピッチング

する限り、図7および図8に示したように測定力の違いによるピッチングの変化は各測定点について最大0.4秒程度である。したがって、一連の測定が同じ大きさや方向の測定力で行われるのであれば、ピッチングの変化はないものと考えてよい。なお、B機についても同様の測定を行い、ピッチングの変化がないことを確認している。

5. 案内面の形状に関する検討

A機では、Xキャリッジを固定しないとキャリッジが緩やかに中央部付近に移動する傾向がある。また、YキャリッジをY軸の両端部に置くと、中央部方向に移動する傾向が見られた。エアベアリング案内機構は摩擦係数が小さいので、形状誤差や重心移動によって生じる微小な変形のために案内面が水平から傾いた場合、その傾きの方向にキャリッジが移動するものと考えられる。

このとき、測定機の傾きを電子式水準器(分解能0.001 mm/m)で測定してみた。その結果、XおよびYキャリッジが測定範囲の中央部にあるときには測定テーブルはほぼ水平であった。しかし、キャリッジが移動した場合に測定機本体がかなり大きく傾くことがわかった。すなわち、XキャリッジがX軸の左端から右端に移動するとX軸方向の傾きが0.16 mm/m程度変化する。また、YキャリッジがY軸の全域を移動するとY軸方向の傾きが0.58 mm/m程度それぞれ直線的に変化する。

図9はXおよびYキャリッジをそれぞれX、Y軸方向に移動した場合の測定機本体の傾き角変化を示したものである。この変化は主にキャリッジ重量の移動によって防振用のゴム板が変形するために起こる。したがって、重量の大きいYキャリッジの移動による角度変化が大きい。また、傾きが時間的に緩やかに変化することも確認している。

キャリッジは、この角度変化の影響を含めて案内面の傾き方向に移動しようとする。そして、固定式の逆

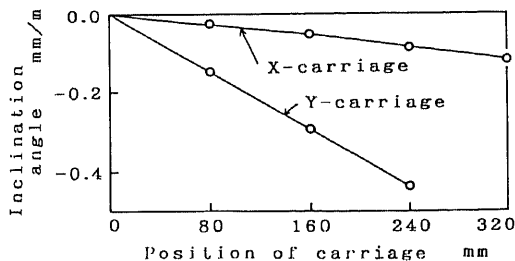


図9 キャリッジの位置に対する測定機の傾き角変化

テーパプローブの場合にはプローブの先端が被測定物の位置に拘束されるためにZ軸に曲りが生ずることになる。Z軸の測定長さが長いほど曲りは大きい。一方、移動式のタッチプローブではプローブの先端が拘束されることはない。これがプローブによって測定結果の異なる原因であると考えられる。A機の場合にはXおよびYキャリッジとともに測定範囲の中央部に移動する傾向がある。したがって、逆テーパプローブの場合には、Z軸先端は鋼球位置に固定されるが上部のキャリッジは中央部に寄り、このためにタッチプローブによる測定値との間に図2に示したような差が生ずる。

案内面の傾きの影響を確認するために、測定機支持部のゴム板を取り除いてボールプレートを測定してみた。この場合にはキャリッジ移動に伴う傾き角変化は最大0.02 mm/mとなり、図9の場合に比べて無視できる程度になる。図10は、Z=0 mmにおけるdX, dY, dZを示したものである。ゴム板を介して支持していた場合には、Yキャリッジの移動による傾き角変化はY軸案内面の形状誤差の影響を緩和する方向に働いていた。ゴム板のない図10の場合にはY軸成分の差dYが図2に比べて大きくなっていることがわかる。また、dXの分布にも変化が見られる。

6. 結 言

三次元測定機で用いられるプローブのうち、固定式の逆テーパプローブおよび移動式のターチトリガプローブによって同一の被測定物を測定した場合の測定結果の相違について実験的に検討し、次のことが明らかになった。

(1) 移動案内方式としてエアベアリングを用いた三次元測定機でボールプレートを測定したところ、

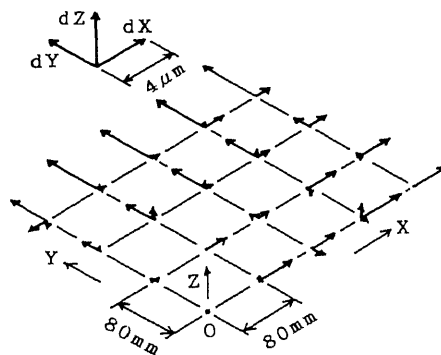


図10 プローブによる測定値の変化(防振用ゴム板を取り除いた場合：A機、Z=0 mm)

ロープによる差は X 軸および Y 軸成分について大きく表れ、測定実験に用いた A 機では最大約 $4\ \mu\text{m}$ であった。この差は Z 軸の測定長さが短くなるに従って徐々に小さくなる。一方、ローラベアリングを用いた機種では、プローブによる差は顕著に表れなかった。

(2) プローブの測定形式によって測定力の大きさや方向が異なる。これが X , Y 軸運動のピッチングに影響しないことをエアベアリング機およびローラベアリング機について確認した。

(3) 摩擦係数の極めて小さいエアベアリング機では、キャリッジが案内面の傾き方向に移動しようとする傾向がある。固定式プローブでは、プローブ先端位置が固定されるために Z 軸に曲りが生じ、移動式ブ

ロープによる測定結果との間に差が生ずる。

(4) キャリッジの移動に伴って測定機支持部のゴム板が変形し、測定機全体の傾きが変わる。測定実験に供した A 機の場合には、この傾き角変化は Z 軸の曲りを緩和する方向にあった。

文 献

- (1) Burdekin, M., *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 Engg.*, 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, 54-485, C(1987), 117.