三次元座標比較測定機*

大岩孝彰** 先生宗弘*** 中島正晴*** 牧田直己† 大塚二郎††

3D Co-ordinate Comparator Using Reference Workpiece

Takaaki Oiwa, Motohiro Senjo, Masaharu Nakajima, Naomi Makita and Jiro Otsuka

This paper describes a three-dimensional coordinate comparator using a reference workpiece with the same material and geometrical profile as the measuring workpieces. Because of little influence of the temperature change, this measuring machine can be utilized in shop-floor thermal environment instead of a conventional coordinate measuring machine which measures absolute coordinate values. Moreover, the comparator's geometrical deviation and the probe's error have little effect on the measured values. Measurement results using gauge blocks, an optical flat and workpieces with complicated profile show that this comparator has measurement uncertainty less than $\pm 1 \mu\text{m}$ regardless of temperature change of several degrees.

Key words: coordinate measuring machine, comparison measurement, comparator, reference workpiece

1. 緒 言

CNC工作機械により加工された複雑な形状を持つ高精度な部品の幾何偏差測定の高効率化が求められている。このためには測定を生産工程内で行う、つまり計測のインライン化が必須である¹⁾。従来の三次元座標計測は専用の恒温室環境つまりオフラインにて行われてきたが、近年三次元座標測定機(CMM)の幾何校正や熱変形補正技術が発達し^{2)~7)}、広範囲な温度環境に対応した計測が可能となっている。しかし例えば1hに数℃以上というような急激な温度変動には完全に対処できていない。

一方、一次元の長さ測定においては、標準尺を備えた測長器などを用いた絶対値測定と、ブロックゲージなどのあらかじめ校正された端度器およびコンパレータなどの比較的狭い測定長さを持つ測微計を用いて被測定物との置換測定を行う、いわゆる比較測定の二つに大別できる⁸⁾。前者の絶対値測定では一般にCMMと同様に恒温室などの標準環境が必要となる。後者の比較測定では、測定環境の影響が少なく、広い測定範囲を持つ線度器が不要であるという長所を持っているため、生産現場で多用されてきた。さらにISO規格では、通常のCMMの測定の不確かさを求める一方法として校正された工作物を用いた比較測定が規定されている⁹⁾。本研究では、工作物の三次元座標測定を現場環境で行うために、従来のCMMのように測定空間の絶対座標を計測するのではなく、被測定工作物と同じ幾何学的形状および材質を持つ標準工作物との比較測定を行う三次元座標比較測定機を開発した¹⁰⁾。米国でも同様の技術が開発されている¹¹⁾。本報では三次元座標比較測定機の原理と誤差要因の考察、さらに部品の2面間の長さ測定を行った結果について報告する。

2. 原 理

2.1 概 要

本測定機では、被測定工作物と同一の材質および幾何学的形

Fig.1 3D Co-ordinate Comparator

状を持つ工作物を標準工作物とし、同一の測定環境下で被測定工作物と置換法により比較測定を行う。一般的なコンパレータによる長さの比較測定ではブロックゲージが実用標準として使用されるのと同様に、本測定機においても標準工作物と被測定工作物の三次元座標測定値を比較し、寸法誤差および形状偏差を算出する。このような比較測定法には以下のような利点があると考えられる。

- 1) 測定機のスケールの比較的狭い範囲を用いるために幾何偏差(系統的誤差)の影響が少ない。
- 2) 環境温度変化の影響を受けにくく、恒温室が不要。
- 3) 測定環境温度を標準環境(例えば20℃)に設定する必要がない。
- 4) プローブ校正の必要がない。

ただし、実用標準としてブロックゲージを用いる際には正確な校正が必要であるように、本報の標準工作物についても標準環境下にてトレーサビリティを備えたCMMを用いて絶対値測定を行い、校正すなわち寸法や幾何偏差の測定を行う必要がある。

2.2 測定機の概要

本測定機(先生精機㈱, 3DインラインチェッカーMSM-102)の全体写真を図1に、三面図を図2に示す。鋳鉄製フレームに設

* 原稿受付 平成17年1月11日
 ** 正 会 員 静岡大学工学部(浜松市城北3-5-1)
 *** 正 会 員 先生精機㈱(静岡市清水水原622-7)
 † 先生精機㈱
 †† 正 会 員 静岡理科大学(袋井市豊沢2200-2)

Fig.2 Dimensions and specifications of developed 3-D coordinate comparator

置されたXYZ直交スライドにより測定定盤とプローブの相対運動を行う。一般のCMMなどでは空気静圧案内や摩擦駆動方式が多用されているが、本機では室温が変動する環境下での測定時間を短縮し精度を向上させるために、転がり直動案内およびボールねじを採用して高速化をはかっている。各XYZ軸の最大移動速度は200mm/s、最大測定速度は30mm/sである。各軸の測長は光学式のリニアスケールユニット（ACU-RITE社ENC150、スケールピッチ：20 μ m、精度：5L/1000 μ m）により1 μ mの分解能で行われる。Z軸コラムには市販のタッチプローブ（レニショーTP20、繰返し精度2 σ $\leq$ 0.35 μ m、測定圧：0.08 N、触針長：20mm、先端球径：2.5mm、プリトラベル：約2.5 μ m）が取り付けられている。

2.3 測定手順

- 1) 測定の前準備として、前述のように標準工作物を標準環境下にCMMにて値付けを行う。標準工作物は被測定工作物と同一の材質、表面性状を持つものを用いる。一般には工作物のうちの一つを標準工作物とすればよい。
- 2) 標準工作物と被測定工作物を同一の温度環境下に置く。これは後述のようにできるだけ両者間の熱膨張の違いを少なくして不確かさを減ずるためであるが、通常は両者をほぼ同一の温度となるまで生産現場環境に一定の時間放置すればよい。
- 3) 標準工作物を測定機定盤上に設置し、タッチプローブで接触してXYZ軸の座標値（機械座標系）の計測を行う。計測された値は標準工作物座標値として記録される。このとき一般的なCMMで行う座標値取得前の測定物のアライメント作業等を精密に行う必要はない（後述）。また、標準工作物座標値から工作物の寸法や幾何学的な形状を求めることができるが、これらの値と1)で求めた標準工作物の校正値が一致する必要はない。
- 4) 被測定工作物を標準工作物とできる限り同一の位置に設置する（このために定盤上にストップ等をあらかじめ配設しておくことが望ましい）。こうすることにより、測定機の各軸が標準工作物の測定時と同一の位置付近にあるときに被測定工作物を測定し、測定機の持つ系統的な幾何偏差たとえばスケールユニットの器差や各運動軸の

Fig.3 Workpiece coordinate system

再現性のある運動誤差の影響を排除できる。

- 5) 被測定工作物をタッチプローブで接触し、XYZ軸の座標値（機械座標系）を測定する。この際の測定点、測定方向、測定速度、プローブ触針はすべて標準工作物を測定した場合のそれらと同一とする。これにより、測定点の表面性状の違いやタッチトリガープローブの方向依存性誤差やプリトラベル誤差の影響を排除できる。結果、触針径を含むプローブの校正を省くことができる。
- 6) 被測定工作物の各測定値(XYZ)から標準工作物の測定値を引いた値を標準工作物の校正値からの偏差とする。

3. 誤差要因

ここでは本三次元比較測定機における誤差要因について概算する。ブロックゲージなどでは0.1 μ m以下のオーダーで厳密な不確かさの推定が行われ⁸⁾、ISOでもCMMの比較測定時の不確かさが記されている⁹⁾が、ここでは最小読み取り単位に相当する1 μ m前後の誤差に影響すると思われる2,3の要因のみに絞って考察する。

3.1 温度差の影響

理想的には標準工作物と被測定工作物が同一の温度である必要があるが、実際には測定時の温度が異なり不確かさ要因となる。一般に長さの比較測定では、標準工作物と被測定工作物の温度差を δ_T とすると、これに起因する測定誤差は、

$$l_M \times \alpha_M \times \delta_T \quad (1)$$

である⁸⁾。ここで l_M は標準工作物の20 $^{\circ}$ Cでの長さ、 α_M は標準工作物の線膨張係数である。これによれば、例えば鋼（線膨張係数：11ppm/K）製の工作物の長さ300mmとしたとき、温度差による誤差を1 μ m以下とするためには、標準工作物と被測定工作物温度差は約0.3 $^{\circ}$ Cまで許されることになる。

3.2 線膨張係数の差の影響

標準工作物と被測定工作物が同一の材料からできていても材料の製造ロットが異なると微小な線膨張係数の差の影響が発生する。標準工作物と被測定工作物の線膨張係数の差を δ_α とすると、これに起因する測定誤差は

$$l_M \times \delta_\alpha \times \Delta l_M \quad (2)$$

である⁸⁾。ここで、 Δl_M は標準工作物の20 $^{\circ}$ Cからの温度差である。したがって、例えば鋼製の長さ300mmの標準工作物と被測定工作物を25 $^{\circ}$ Cで測定するとき、両者の線膨張係数の差に起因する誤差を1 μ m以下とするためには、両者の線膨張係数の差を約0.7ppm/K程度に抑える必要がある。

3.3 工作物のミスアライメントの影響

本測定機における通常の測定では、

- 1) 一般のCMMのように工作物を必ずしも機械の移動軸に沿わせないで設置する場合、
 - 2) 工作物を機械の移動軸に沿って定盤上に設置する場合、
- の二通りがある。前者1)では工作物を自由な姿勢で定盤上に設置できるが、工作物のデータムに対してワーク座標系を設定する必要がある。例えば図3は直方体形状の工作物の長手方向の長

Fig.4 Misalignments of reference workpiece and compared workpiece

Fig.5 Frequency distribution of measured deviation using block gauges

さ測定をする例であるが、左側基準面側の2点(A点およびB点)および対面1点(C点)の計3点を測定する。本機で測定される長さは線分ABに下ろしたC点からの垂線の長さとなる(この測定値は触針先端球径を含むが本機は比較測定機なので、同じ触針を用いる限り径の補正を行う必要はない)。

次に後者2)では、定盤上のストップなどを用いて工作物を機械座標軸に沿って設置するが、工作物のデータムとの間に角度誤差が生ずる。例えば、図4(a)は機械のX軸に対して標準工作物が角度誤差 θ を持っている場合を示しているが、本機では工作物の寸法の絶対値は計算せず、図中のA点およびB点の移動軸の座標 x_A および x_B の差が標準工作物測定値となる。次に被測定工作物を同じ角度誤差 θ を伴って設置した場合、被測定工作物の寸法が標準工作物と等しい場合は、測定されるA点とB点の座標値 $x_{A'}$ および $x_{B'}$ は図(a)の標準工作物の場合と等しくなり、結果的に標準工作物からの偏差は0となり正しく測定ができる。また、図(b)のように被測定工作物の寸法に誤差 Δl がある場合では標準工作物からの寸法の偏差の誤差 ΔL は、

$$\Delta L = \frac{\Delta l}{\cos \theta} - \Delta l \approx \frac{\Delta l}{2} \theta^2 \quad (3)$$

である。これは一般に非常に微小な量であり無視できる。例えば、測定する工作物の偏差が100 μm 程度の場合、誤差を1 μm 以内とするためには、工作物基準面と機械の移動軸の角度誤差は8°程度まで許容される。

次に、標準工作物と被測定工作物の間に生じた相対的な角度誤差の影響について検討する。このような角度誤差は例えば工作物を定盤上に固定するストップと工作物の間にゴミ等があった場合や局所的な形状偏差やバリなどがあった場合などに発生する。図4(c)のように、この長さ測定誤差 ΔL は工作物の長さ l に比例する一般的なコサイン誤差であるので、

$$\Delta L \approx \frac{l}{2} \theta^2 \approx \frac{l}{2} \left(\frac{t}{l} \right)^2 = \frac{t^2}{2l} \quad (4)$$

である。ここで、 t はゴミなど角度誤差の要因の大きさである。角度 θ は微小なので誤差は僅少となる。例えば長さ $l=50\text{mm}$ の工作物において、測定誤差 ΔL を1 μm 以内にするための t の大きさは0.32mm程度となる。以上をまとめると、工作物の設置の際のミスアライメントの影響は軽微である。

Fig.6 Relation between block gauge length and measured deviation

Fig.7 Frequency distribution of measured deflection using optical flat

4. 測定

4.1 ブロックゲージを用いた長さ測定

まず、被測定物の局所的な幾何偏差や表面あらさなどの影響を排除するために、標準工作物および被測定工作物として同一のブロックゲージを用いた測定を行う。最初に、ブロックゲージ(0級)を標準工作物とし、X軸に沿ってプローブを動かして図5中のA、A'、BおよびB'点への接触を3回行い、X軸の絶対座標値の平均値を標準工作物測定値 $\bar{x}_{MA}$ 、 $\bar{x}_{MA'}$ 、 $\bar{x}_{MB}$ 、および $\bar{x}_{MB'}$ とする。その後同様に、このブロックゲージの測定を連続して60回繰り返した(60min)。この時のX軸方向の各測定値を被測定工作物の測定値 x_{WAi} 、 $x_{WA'i}$ 、 $x_{WB'i}$ 、および $x_{WB'i}$ ($i=1, \dots, 60$)とする。プローブの方向性の影響を無くすために、A'-AおよびB'-Bの座標をそれぞれ50mmおよび100mmの長さ測定結果とした。またB'-Aの値を150mmの測定結果とした。したがって、求める標準工作物からの偏差の平均値は以下の式となる。

$$\overline{\Delta l_{50\text{mm}}} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} \left\{ (x_{WA'i} - x_{WAi}) - (\bar{x}_{MA'} - \bar{x}_{MA}) \right\} \quad (5)$$

$$\overline{\Delta l_{100\text{mm}}} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} \left\{ (x_{WB'i} - x_{WB'i}) - (\bar{x}_{MB'} - \bar{x}_{MB}) \right\} \quad (6)$$

$$\overline{\Delta l_{150\text{mm}}} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} \left\{ (x_{WB'i} - x_{WAi}) - (\bar{x}_{MB'} - \bar{x}_{MA}) \right\} \quad (7)$$

測定は恒温室にて23.5°Cおよび28°Cにて行った。23.5°Cで測定した結果の一例を図5に示す。スケール分解能は1 μm であるが、標準工作物測定値との偏差はほぼ±1 μm の範囲内にある。測定値の標準偏差は0.53~0.61 μm 程度であった。また、本機ではプローブのブリトラベルや先端球半径の補正等を一切行っていないが、良好な比較測定結果が得られた。

図6は28°Cで測定した場合も併せた測定長さと誤差の関係を示す。測定長さが增大しても標準偏差への影響はほとんど見られないことがわかる。また、偏差の平均値は±1 μm 以内に入っており、室温変動の影響も0.5 μm 以下であることがわかる。

Fig.8 Mean deviation and standard deviation measured using optical flat

Fig.9 Workpiece with holes and step

Table 1 Measurement items and nominal values

No.	Measurement items	Nominal value mm
1	Diameter of hole 1	23.8
2	Diameter of hole 2	32.0
3	Diameter of hole 3	32.0
4	Diameter of hole 4	32.0
5	Diameter of dowel 1	4.2
6	Diameter of dowel 2	4.2
7	Diameter of hole 5	18.5
8	Diameter of hole 6	15.5
9	Step height	0.5
10	Pitch circle diameter	56.0

Fig.10 Measured deviation and standard deviation using a reference workpiece

4.2 オプティカルフラットを用いた測定

次に面精度 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 、直径 $\phi 80$ のオプティカルフラットを標準工作物および被測定工作物として測定したZ方向偏差の度数分布を図7に、偏差の平均値と標準偏差を図8に示す。23.5°Cおよび28°Cの室温の両方で標準偏差は $0.5\mu\text{m}$ 弱であり良い結果であった。

4.3 複雑な形状を持つ被測定物の測定

さらに図9の部品（アルミ鋳物）の複数の穴径、穴中心直径（P.C.D.）および段差などの10項目（表1）の測定を行った。穴径と中心座標は3点の測定座標から計算される。ある一つの工作物を標準工作物として測定した値を標準工作物測定値とし、引き続き同一の工作物を連続45回測定して偏差を求めた。結果を図10に示す。すべての測定項目の標準偏差の平均値は $0.48\mu\text{m}$ 、偏差の平均値は $-0.60 \sim +0.84\mu\text{m}$ の範囲にあり、室温による測定値の差は $1\mu\text{m}$ 以下であった。さらに被測定工作物を毎回定盤に取付け直して測定した結果の標準偏差の平均値は $0.58\mu\text{m}$ であり、3.3節で述べた工作物設置時の誤差の影響は小さかった。

Fig.11 Measured deviation and standard deviation using reference workpiece and another workpiece

Fig.12 Change in measured deviation, room and workpiece temperatures when the reference workpiece is referred once before comparing workpiece

次に、標準工作物の測定後、別の工作物を連続して45回測定した。偏差の平均値と標準偏差を図11示す。測定値の標準偏差は同様に $0.5\mu\text{m}$ 程度であることがわかる。さらに、偏差の平均値のうち、7番目と8番目の測定項目で大きくなっているが、これは後者の工作物自体の寸法誤差であると考えられる。すべての測定項目において、測定座標値の平均値の温度の違いによる差は $1\mu\text{m}$ 以下であり、広い温度変動環境下で本測定機が使用可能であることを示している。

4.4 室温変動の影響

図9の部品を標準工作物として測定し、引き続き被測定工作物として約10hに亘って測定した。一例として表1の項目10の中心直径（設計値： 56mm ）の偏差と室温、工作物温度の変化を図12に示す。計測開始時に恒温室の空調を作動させたため23回目の測定時までは測定された偏差は比較的安定している。その後空調機を停めたために室温と工作物温度は上昇して 30°C に達し、44回目で再び空調機を作動させたために、再び元の温度へ向かっている。温度変動 8.8°C のときの測定値の変動は約 $9\mu\text{m}$ であり、ほぼ温度変動に合わせて変化していることがわかる。これは、被測定工作物の線膨張係数（約 24ppm/K ）がスケールの線膨張係数（ 8.9ppm/K ）と大きく異なるためであり、鋼製の工作物の場合、変動がより小さくなることが予想される。

次に同じ部品を標準工作物および被測定工作物として用い、被測定工作物を測る前に必ず標準工作物測定を行った結果を図13に示す。11回の測定後に空調機を停止した後、工作物の温度は約 4.7°C 変化し約 $6\mu\text{m}$ 膨張していたと推察されるが、測定値の偏差はほぼ $\pm 1\mu\text{m}$ の範囲内にある。このときの他の測定項目を併せた結果を図14に示す。同様におよそ $\pm 1\mu\text{m}$ の範囲内（標準偏差の平均： $0.71\mu\text{m}$ ）であった。以上のことから被測定工作物を測定する直前に毎回標準工作物測定を行えば、急激な温度変動の影響を避けることが可能であることがわかる。また、図13、14の測定では標準工作物と被測定工作物を交互に測るた

Fig.13 Change in measured deviation, room temperature and workpiece temperature when the reference workpiece is referred at each time before comparing workpiece

Fig.14 Change in measured deviation of ten items when the reference workpiece is referred at each time before comparing workpiece

Fig.15 Measured deviation and temperature change in length measurements using large workpiece

め、測定結果には3.3節で記した定盤取付け時のミスアライメントの影響を含む。しかし連続して測定した図10の結果と比較してもミスアライメントによる精度の悪化は認められなかった。

さらに、本機の最大測定範囲に相当する300mmの長尺工作物（幅：110mm、材質：アルミ）の長手方向とその直角方向に測定した結果を図15に示す。同様に空調機を操作して約8.7°Cの温度変化を与え、工作物の温度を-7.1°C変化させた（最大温度勾配：-3.7K/h）。300mmの長さのアルミ材では約50μmの熱収縮が予想されるが、測定された偏差は約±1μmの範囲内に収まっており、標準偏差はx方向1.0μm、y方向0.73μmであった。

4.6 測定長さを変化させた場合

次に標準工作物からの偏差が正しく測定されているかを調査するために、1.0005mmの長さのブロックゲージを標準工作物とし、1.001から1.009まで1μm毎、1.020mmから1.100mmまでは10μmずつ長さを増加させたブロックゲージを被測定工作物として測定した。結果を図16に示す。偏差の平均値は-0.8μm、標準偏差は0.98μmであり、正確に標準工作物からの偏差を計測可能であることを示している。

さらに、標準工作物として51.0005mmの長さのブロックゲ

Fig.16 Measurement error using gauge blocks with various lengths

Fig.17 Measurement error using gauge blocks with various lengths

ジを、被測定工作物として51.001から51.100の長さのブロックゲージを用いた結果を図17に示す。同様に偏差の平均値-0.90 μm、標準偏差0.98μmが得られた。

5. 結 言

被測定工作物と同じ幾何学的形状および材質を持つ標準工作物との比較測定に基づく三次元座標比較測定機を提案し、主に長さの比較測定精度を調査した結果以下の結論を得た。

- (1) 300mmまでの長さの寸法の比較測定を行った結果、約±1μmの偏差および標準偏差約0.5~1μmが得られた。
- (2) 測定長が増えても測定誤差の増加は観察されなかった。
- (3) 被測定工作物を測定する直前に毎回標準工作物測定を行えば室温変動の影響を排除することができる。
- (4) 工作物を定盤へ取付ける際の誤差の影響は少ない。

今後は幾何偏差測定について調査する予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、大岩孝彰、吉田 理：歯車偏心誤差のインプロセス計測に関する研究、精密工学会誌、**68**, 2 (2002) 244.
- 2) J.P.Kruth, P. Vanherck, and L.De Jonge: Self-calibration method and software error correction for three-dimensional coordinate measuring machines using artifact measurements, *Measurement*, **14** (1994) 157.
- 3) 大矢誠、穂刈久、田村久司：三次元座標測定機の精度向上に関する研究、日本機械学会論文集C編、**51**, 471 (1985) 285.
- 4) N. A. Barakat, A. D. Spence, and M. A. Elbestawi: Adaptive compensation of quasi-static errors for an intrinsic machine, *Int. J. Machine tools and Manufacture*, **40** (2000) 2267.
- 5) 阿部 誠、高増 潔、大園成夫、沢辺雅二：空間座標の比較測定によるCMMの校正（第1報）、精密工学会誌、**66**, 3 (2000) 483.
- 6) Chensong Dong, Chuck Zhang, Ben Wang, and Guoxiong Zhang: Prediction and Compensation of Dynamic Errors for Coordinate Measuring Machines, *J. Manuf. Sci. Eng.*, **124** (2002) 509.
- 7) 大岩孝彰、片岡頼洋：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機の校正に関する研究—ダブルボールバーとタッチプローブを用いたキャリブレーション—、精密工学会誌、**69**, 2 (2003) 222.
- 8) 首藤俊二：ブロックゲージ比較測定における不確かさ、精密工学会誌、**65**, 7 (1999) 949.
- 9) ISO/TS 15530-3, Geometrical Product Specifications (GPS)- Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 3: Use of calibrated workpiece or standards, (2004).
- 10) 先生宗弘：三次元比較測定装置、特許公開公報、平5-60543, (1993).
- 11) Russell S. Shelton: Method and apparatus for inspecting parts for dimensional accuracy outside a laboratory environment, United States Patent 5426861, (1995).