数値制御工作機械の位置決め精度評価方法に関する研究*

神崎 和宏^{*1}, 堤 正臣^{*2}, 陳 亮^{*3}

Evaluation Method of Accuracy of Positioning for CNC Machine Tools

Kazuhiro KANZAKI, Masaomi TSUTSUMI and Liang CHEN

It is very important to evaluate the positioning accuracy of NC machine tools, so that the evaluation method is standardized by ISO. It is, however, found from our experiments that two test cycles recommended by ISO gave different results, although only one permissible deviation is provided in the test code. In this study, the positioning accuracy has been precisely investigated, varying the test cycle, the feedback system and the feed rate of a machining center. From the experiments, it is found that the linear cycle gives larger deviation, which increases with the increase of the number of measurements, than the quasi-pilgrim step cycle. The increment of the deviation cannot be neglected in the quasi-pilgrim step cycle or the closed loop controlled system using a linear scale. Therefore, it is necessary to consider the thermal effect as well as the random and systematic errors when evaluating the positioning accuracy. Then, the effectiveness of an alternative method proposed in this paper is confirmed using several machining centers.

Key Words: Machine Tool, Machining Center, Positioning Accuracy, Repeatability, Test Cycle, Thermal Effect, Evaluation Method

1. 緒 言

数値制御(NC)工作機械の位置決め精度は、ISO規格(ISO 230-2)⁽¹⁾⁽²⁾に規定された方法に従って評価することを原則としている。この規格は1972年に発行された米国工作機械工業会規格が原案となって作成されたものである⁽³⁾。それから20年を経過した現在、この規格が高精度化したNC工作機械に適した評価方法であるかどうかは疑問である。

1970年代の初めを振り返ってみると、早送り速度、最小設定単位の両方とも現在と1桁違っていた。標準的な機械では、早送り速度は1m/minから2m/min、最小設定単位は10μmであった。制御方式も電気油圧パルスモータを使ったオープンループ制御が主流で、位置決め精度の偏差が±1パルス以内であっても±10μmの時代である。

ところで、ISO規格の基本は、ひとつの目標位置に一方又は両方向から繰り返して位置決めしたときの目標位置と実際の停止位置との偏差をランダムな値

と考へて、統計的に処理することである。しかし、著者らは、数多くの位置決め精度の測定データをISO規格に従って処理して行くうちに、偏差はランダムなものではなく、データ数が変わると最終的な評価結果が変化してしまうことを見いだした。

そこで、本論文では位置決め精度の評価結果は工作精度に反映すると考えISO規格による位置決め精度評価方法の問題点を明らかにし、従来まで偏差の主成分として考えられてきた偶然偏差と系統偏差⁽³⁾に加え、別途熱の影響を考慮するか、または熱の影響を極力小さくする方法を考える必要のあることを明らかにする。

2. 実験方法

2.1 位置決め精度の測定方法 実験対象として立て形マシニングセンタ及びCNC装置付XYテーブルを用いて、それぞれのY軸テーブルの位置決め精度を、送り速度1m/min及び20m/minで、分解能10nmのレーザ干渉計を用いて測定した。その測定システムの概要を図1に示す。実験に使用したマシニングセンタは、ロータリーエンコーダを用いたセミクローズドループ制御を採用している。一方、XYテーブルのテーブルの位置のフィードバックは、マシニングセンタと同様

* 原稿受付 平成4年7月15日。

*¹ 学生員, 東京農工大学大学院 (〒184 小金井市中町2-24-16)。*² 正員, 東京農工大学工学部。*³ 東京農工大学大学院。

のセミクローズドループ制御及びリニアスケールを用いたクローズドループ制御の二通りが行えるようになっている。分解能はいずれも $1\mu\text{m/p}$ である。

位置決め目標位置はY軸の0mm, 80mm, 160mm, 240mm, 320mmの計5点とした。ここで、図2に示すISO規格で定められた測定サイクルである直線サイクル及び折返しサイクル(I)をY軸テーブルに行わせ、各目標位置ごとに正方向と負方向から位置決めを行った。折返しサイクルとは、隣合った目標位置の間で往復運動を行い、それを連続する目標位置ごとに順番に繰り返す位置決め運動である。それに対し直線サイクルは各目標位置を順番に通過し、機械の移動範囲全長に渡って往復運動を繰り返す運動である。

2.2 熱電対による温度測定 ボールねじの温度上昇を直接測定するのが困難なためにXYテーブルのボールねじのナットの温度上昇を測定した。その測定には $\phi 0.3\text{mm}$ の銅-コンスタンタン線を用いた。測定は、空調された実験室内で、さらに装置をビニールテントで覆い、雰囲気温度変動を最小限にして行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 位置決め精度の変化 1台のマシニングセンタの位置決め精度を、送り速度を 1m/min として往復6回の位置決めを行い、測定した。最初の1往復分を除いて、残りの5回分のデータを処理した結果を表1に示す。なお表中の記号はJISB6201(1990)に従った。表に示したように、一方向繰返し精度 $R\uparrow$, $R\downarrow$, 繰返し精度 R , 両方向位置決め精度 A , 反転偏差 B の値は全て、直線サイクルの方が折返しサイクルよりも大きくなっている。他のマシニングセンタにおいても、これと同様の結果が得られることを確認している。こ

の原因を詳細に調べるために、以下の実験はXYテーブルで行うことにした。

測定回数を増やすと偏差がどのように変化するかを詳しく調べるために、往復100回の位置決めを行った。その結果の一例として、送り速度 1m/min , 目標位置320mmにおける測定回数と偏差との関係を図3に示す。図示したようにセミクローズドループ制御の場合、偏差は直線的に増え、しかもその増え方は直線サイクルの方が折返しサイクルよりもかなり大きくなっている。

テーブルの位置の検出をリニアスケールで行ない同様の実験を行なった結果も、図4に示すように直線サイクルと折返しサイクルとは一致せず、直線サイクル及び折返しサイクルの両方においては偏差に増分を生じているのがわかる。このような図3及び図4に示した偏差の増分の差が原因となって、表1に示した直線サイクル及び折返しサイクルの位置決め精度及び繰返し精度の評価結果に差が生じたことになる。

偏差の増加の著しい直線サイクルの各目標位置における測定結果を順番に並べると、結果を示していないが、偏差の増分はボールねじが伸びる方向である支持

表1 直線サイクル及び折返しサイクルの位置決め精度の比較(実機:A)

	$R\uparrow$	$R\downarrow$	R	A	B
Quasi pilgrim step cycle	0.66	0.78	8.09	8.53	5.53
Linear cycle	3.48	2.04	9.85	10.29	7.50

$R\uparrow, R\downarrow$: Unidirectional
 A : Accuracy
 R : Bidirectional
 B : Mean reversal value

図1 実験装置の構成図

図2 直線サイクル及び折返しサイクル

端寄りの方が大きくなることがわかっている。これは折返しサイクルの場合も同様の結果であった。

偏差がこのような変化する原因は、サーボモータの発熱、ナットやベアリングにおける相対運動による摩擦熱などによって、ボールねじが徐々に支持端寄りに熱膨張していることが考えられる^{(4)~(6)}。またリニアスケールの検出ヘッドの相対運動による摩擦熱による熱膨張、及びテーブルの熱膨張によるリニアスケールの伸びも原因として考えられるが、この詳細については別途検討することにした。

3.2 ボールねじの熱膨張の影響 ボールねじの熱膨張の影響を調べるために、送り速度を20m/minとし、送り速度1m/minのときの結果と比較した。セミク

ローズドループ制御方式では、偏差の増分がほぼ一定であるので、測定回数を20回とした。その結果を図5に示す。図によると直線サイクル、折返しサイクル共に送り速度20m/minの方が偏差の増分が大きいことがわかる。これは送り速度を速くすることにより、サーボモータの発熱、ボールねじとナット又は軸受との相対運動による摩擦熱によってボールねじが伸びたためと考えられる。

そこで、ボールねじの温度上昇を調べるために図6に示すようにナットの表面に熱電対を溶着し、往復100回の位置決めを行い温度上昇を測定した。そのときの結果を直線サイクルと折返しサイクルとに分けて示すと、それぞれ図7及び図8のようになる。測定時の室温の変動は図7(a)及び図8(a)に示すように最大でも約1.0°Cであるので、室温の変動がナットの温度上昇に及ぼす影響は少ないと考えられる。図7(b)及び図8(b)によると、送り速度が20m/minのときの方がナット表面の温度上昇が大きいこと、また折返しサイクルの方が温度上昇は大きいことがわかる。

このように、測定回数の増加とともにナットの温度が上昇していること、また送り速度20m/minの方が、1m/minの場合よりも温度上昇が大きいことから、ボー

図3 セミローズドループ制御の場合の測定回数と位置決め偏差との関係

図4 クローズドループ制御の場合の測定回数と位置決め偏差との関係

図5 位置決め偏差に及ぼす送り速度の影響(目標位置: 80mm, 負方向位置決め, セミローズドループ制御)

図6 熱電対溶着点

ルねじが熱膨張した結果、セミクローズドループ制御の場合にはより大きな偏差を生じたと考えられる。

なお折返しサイクルの方が直線サイクルよりもナットの温度上昇が幾分大きく現れているが、折返しサイクルではボールねじが短い区間で往復運動を行うので、ボールねじの自然冷却効果が小さいため局所的に温度が高くなっていると考えられるが、この点についても今後検討したい。

そこで図3及び図4の直線サイクルの熱の影響を直線とみなして、最小自乗法によって補正してランダム偏差だけを抽出した。その結果を図9に示す。標準偏差の推定値 $\pm 3s$ の幅6sを求めると、その幅はセミクローズドループ制御方式では $1.2\mu\text{m}$ 、クローズドループ制御方式では $0.8\mu\text{m}$ となった。これらの値は制御系の分解能である $1\mu\text{m}$ とほぼ一致するので、高精度な位置決めが実現されていると言える。送り速度 20m/min の場合も、測定回数は20回であるが、幅6sは $0.7\mu\text{m}$ となりほぼ同様の結果になった。

どの目標位置においても偏差が一方に増えたり減ったりするのならば、ここに示したような直線近似をして偏差を補正すればよいが、次章で述べるように、必ずしも同じように扱えるとは限らないので、熱の影響があまり強く出ない評価方法について次章で検討することにする。

3-3 位置決め精度の評価方法の問題点 以上述べたように、ISO規格に従った位置決め精度の評価結果には、測定サイクルによる違いがあり、測定回数によっても変わることがわかった。これは、ISO規格では位置決め精度の偏差の成分を偶然偏差と系統偏

図7 直線サイクルの場合のナットの温度上昇

差とに大別し、統計的にデータを処理する方法を採用していることと関係している。

測定回数が増えるに従って一方に偏差が増えたり減ったりする場合には、ISO規格に示す方法に基づいて精度を評価しても意味があるとは考えられない。重要なことは偏差がどのように変化するかを知ることである。例えば1個目の部品とn個目の部品の精度の違いを予測できるデータを提供する方がより重要になることもあれば、1個の部品に複数の穴をあけるような場合には、穴間の距離寸法の偏差がどの程度であるかを知ること重要である。また工作機械を設計する上でも偏差の増減の傾向を知ることが重要である。従って、従来の偶然偏差と系統偏差に加えて、偏差の変化傾向を新たに考慮する必要があると考えられる。

4. 目標位置間距離偏差による評価

以上の結果から、熱の影響が位置決め精度の評価結

図8 折返しサイクルの場合のナットの温度上昇

図9 熱の影響を補正したときの位置決め偏差(直線サイクル, 目標位置:80mm, 正方向位置決め, 送り速度1m/min)

果に大きな影響を及ぼすことがわかった。位置決め偏差が熱の影響を受けてどのように変化するかを知るには、測定回数を増やして、その結果を各目標位置毎に単純に並べれば良い。しかしこれでは手間と時間がかかってしまう。従って、従来どおりの少ない測定回数で、しかも熱の影響ができるだけ少ない状態で位置決め精度を評価できる方法が必要である。

ここで新たな評価方法を検討することにした。式(1)に示すように、隣合う目標位置の同一測定回数における差を取り、それらの値から $\pm 3s$ ($6s$)を求めれば、ボールねじの伸び及びリニアスケールの伸びの影響がほとんど入らない状態で評価できると考えられる。また、式(1)のような処理をすることによって、1個の部品に複数の穴をあけた場合の穴間距離寸法の誤差も推定できることになる。

$$x_{(j-k),i} = x_{ji} - x_{ki} \quad \dots \quad (1)$$

ただし $k=j+1$

式(1)はj番目及びk番目の目標位置のi回目の測定値の差を表す。この方法を図10(a)、図11(a)及び図12(a)に示す測定結果に適用することにした。これらは、製

図10 提案した評価方法と従来の評価方法との比較 (実機Bの場合) (早送り速度: 20m/min)

造メーカーの異なる約10機種種の測定結果から、代表的な3つのパターンを選んだものである。パターン①は、図10(a)に示すように、各目標位置における測定結果の増分が直線的でほぼ同じ場合で図5に示したXYテーブルと同じような場合、パターン②は、図11(a)に示すように、各目標位置における増分が徐々に変化して、増減の方向が逆転する場合、そしてパターン③は、図12(a)に示すように偶然偏差の成分が大きく増減の方向が明確でない場合である。それぞれの図に測定回数を5回と20回とした場合について式(1)による方法と従来のISOの方法とによって求めた6sの値を示してある。

ISOの方法では、図10、図11及び図12に示したように、いずれのパターンでも測定回数が5回と20回とを比較すると、ほとんどの場合に20回の方が6sが大きくなっている。また、図11及び図12に示した2つのパターンの場合には、各目標位置における6sに大きな差

図11 提案した評価方法と従来の評価方法との比較 (実機Cの場合) (早送り速度: 20m/min)

図12 提案した評価方法と従来の評価方法との比較
(実機Dの場合) (早送り速度: 20m/min)

が認められる。

これに対して、式(1)による目標位置間距離偏差による方法では、図10に示すようにパターン①の場合は、測定回数による差がほとんどなく、また図11及び図12に示すパターン②及びパターン③の場合は回数による差はあるものの、目標位置間の差は少ない。

さらに詳細にこれらの図をみると、式(1)によって偏差を求める方法でも測定回数の影響を取り除くことはできないが、パターン①のように一定方向に偏差が増加するものでは6sが小さく評価され、1μm程度となってエンコーダの分解能の範囲になっている。偏差の増減の方向が逆転するパターン②では6sはパターン①よりも大きくなり、エンコーダの分解能以上の値になる。そしてもともと不規則な変化をするパターン③では従来の方法とほぼ同じ大きさとなる測定位置であり、パターン①やパターン②ほどの差はない。

このように式(1)による方法は、測定回数による評価結果の差をなくすことはできないが、従来の方法に

比べてその差を小さくできることから、次善の方法であると言える。

5. 結 言

ISO規格による位置決め精度の評価方法を用いて、実際に評価を行った結果、

(1)測定サイクルの違いによって評価結果に差がでること、

(2)測定回数によっても差がでること、

から、ISO規格に規定されている評価方法には問題があることがわかった。この原因について調べたところ、セミクローズドループ制御だけでなく、クローズドループ制御でも同様の傾向が見られたことから、ボールねじの熱膨張のみならずリニアスケールの伸びも関係していると推定され、より高精度に位置決め精度を評価するには、熱の影響を考慮しなければならないことがわかった。

次に、実際の機械加工を考えて、できるだけ熱の影響を小さくするような評価方法を提案し、実機による測定結果を用いて検討したところ、測定回数による差を小さくできることがわかった。

参 考 文 献

- (1) ISO 230-2: Acceptance code for machine tools-Part2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools, (1988).
- (2) JIS B 6201, 工作機械—試験方法通則, 日本規格協会, (1990).
- (3) ANSI/ASME B5.54.1991(D), Methods for performance evaluation of computer numerically controlled machining centers, (1991).
- (4) 大塚二郎・深田茂生・小淵信夫, ボールねじの熱膨張に関する研究(定予圧の場合), 精密機械, 50-4, (1984), 646-651
- (5) 山口利明・武内垣衣, ボールねじを用いた精密位置決め技術, 応用機械工学, 32-1, (1991), 109-115
- (6) 二宮瑞穂, ボールねじの発熱と対応策, 応用機械工学, 28-4, (1987), 98-103