ボールねじ熱膨張のリアルタイム補正による 位置決め精度の向上(第2報)*

- 室温変動下の位置決め誤差を"ゼロ"に補正 -

横山和宏** 鳥海 啓*** 斉藤瑞希*** 森脇俊道† 明田川正人††

Improvement of Positioning Accuracy by Real-Time Compensation
of Thermal Elongation of Ball-screw (2nd Report)

- Compensation for Zero Positioning Error under Room Temperature Change -

Kazuhiro YOKOYAMA, Hiraku TORINOUMI, Mizuki SAITO,
Toshimichi MORIWAKI and Masato AKETAGAWA

This paper deals with the improvement for Zero positioning error of machine tool element under room temperature change. During operation the temperature at fifteen positions of the hollow ball-screw is measured and input into the personal computer by the optical telemeter system. Based upon the temperature distribution of ball-screw, the present position of ball-screw nut obtained from CNC controller and the information of initial positioning error, the compensating quantity for Zero positioning error is calculated. The compensating quantity is fed from the PC to CNC controller, and the origin shift of machine coordinate is immediately executed. These measurement and control are repeatedly executed during operation, and the real-time compensation is realized. Only once the measurement of initial positioning error is needed. It is clarified that the positioning error of $-8.4 \sim +1.5 \mu\text{m}$ is realized under room temperature change of $16.5 \sim 26.5^\circ\text{C}$ during 23.5hr operation.

Key words: improvement, positioning accuracy, real-time compensation, thermal elongation, ball-screw, temperature distribution, personal computer, CNC controller.

1. 緒 言

生産能率向上に伴う NC 工作機械や産業用ロボットの高速送りが実施され、最近では $90 \sim 100\text{m/min}$ の最高送り速度が実施されている。これに伴う支持軸受部の発熱量およびボールねじ・ナット間の発熱量増大による、ボールねじ熱膨張および位置決め精度の低下への対策として、既に、スケール・フィードバックを用いたシステムがある。このシステムは位置決め精度は高いもののイニシャル・コストが高い。また、中空ボールねじ内部に冷却液を循環させて熱膨張を抑制するシステム¹⁾があるが、冷却ユニットのイニシャル・コストとランニング・コストが必要である。さらに、原点復帰時にボールねじ全長の熱膨張量を検知し、熱膨張が均一と仮定して位置決めインプロセス補正を行う研究²⁾が報告されている。著者らも、前報³⁾において、ボールねじの温度上昇を光テレメータシステム⁴⁾⁵⁾で測定し、これから推定した熱膨張量⁶⁾を補正量として、CNC 制御装置にリアルタイムで機械座標系原点シフトを実行させることにより、位置決め誤差の変化を抑制した結果を報告した。しかし、上述の研究²⁾³⁾はいずれも、

熱膨張を補正するのみであるので、室温が基準温度と異なるなどの原因により初期の位置決め誤差がゼロでない場合には、その値をそのまま固定化する方法である。

本研究では、前報³⁾で取り上げたボールねじ熱膨張の影響を補正するだけでなく、初期位置決め誤差自体をも含めて、同時にリアルタイムで補正する。従って、工場など恒温でない環境において、常に位置決め誤差をゼロにすることを目標としている。計算した補正量を用いて、CNC 制御装置にリアルタイムで機械座標系原点シフトを実行させるプロセスは、前報³⁾と同一である。

2. 位置決め誤差“ゼロ”への補正

2.1 初期位置決め誤差・室温変化による位置決め誤差

一般に、工作機械を使用する室温は基準温度と異なるので、室温と基準温度の差に基づく熱膨張により、ボールねじの長さは設計値と異なる。その結果、テーブル駆動による加熱が無い状態で得られる、初期位置決め誤差であっても、一般にゼロではない。また、室温が変化する場合、室温の変化に遅れてボールねじ温度が変化し、ボールねじ長さが変化するので、位置決め誤差は時間的にもゼロではない。

本研究では、初期位置決め誤差の情報とボールねじ温度の情報をを用い、リアルタイムで機械座標系原点シフトを実行することにより、初期位置決め誤差、室温変化による位置決め誤差およびテーブル駆動中の熱膨張による位置決め誤差を含

* 原稿受付 平成 19 年 12 月 15 日

** 正 会 員 新潟大学工学部機械システム工学科 (新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地)

*** 学生会員 新潟大学大学院自然科学研究科

† 正 会 員 神戸大学工学部機械工学科 (神戸市灘区六甲台町)

†† 正 会 員 長岡技術科学大学工学部機械系 (長岡市上富岡町)

Fig.1 Experimental set-up for the real-time compensation of positioning accuracy due to ball-screw thermal elongation

○, ●: Temp. measuring position by conventional data-logger and PC1
 ◀: Electric micrometer
 ↑: Temp. measuring position of the ball-screw by the optical telemeter system and PC2

む、総合的な位置決め誤差をゼロに補正することを目標としている。

本研究で用いるボールねじ実験装置を図1に、その諸元を表1に示す。モータ側のボールねじ支持軸受でのみ、スラスト方向位置を固定するシングル・アンカ方式である。位置決め誤差を求めるため、超精密レーザ変位計 5528A(YHP(株)製)により、テーブル位置を測定する。即ち、図1(b)に示すように、ボールねじのスラスト方向位置固定用軸受の支持ブラケット上部にレーザ変位計用のキューブ・コーナを固定し、移動するテーブル上に反射鏡を設置している。本研究では、位置決め誤差を、CNC 制御装置が示す位置（公称値）と上記レーザ変位計の出力との差として、式(1)により定義する。

$$PA_n(Z_{nomNC}, comp.**) = Z_{nomNC} - LR_n(Z_{nomNC}, comp.**) \dots \dots (1)$$

但し、

$PA_n(Z_{nomNC}, comp.**) : Z_{nomNC}$ における位置決め誤差
 $Z_{nomNC} : \leq 0$, テーブルの現在位置(公称値)
 $comp.** : comp. \text{ by Eq. (4) or (5) または } comp. OFF$

$LR_n(Z_{nomNC}, comp.**) : \leq 0$, 24mm 毎の Z_{nomNC} における超精密レーザ変位計の出力
 添字 n : 第 n 測定補正トラバースにおける値, $n=0, 1, 2, \dots, n$

図2に、初期位置決め誤差が負の場合の例を●印で示す。位置決め誤差が負であるのは、式(1)から分かるように、テーブル位置（公称値）の絶対値に比べ、レーザ変位計出力の絶対値が小さいことを示す。即ち、室温およびボールねじ温度が基準温度に比べて低く、ボールねじが収縮していることによるものである。

Table 1 Specification of ball-screw

Outer diameter	φ40mm
Inner diameter	φ17mm
Lead	12mm
Material	Cr Mo-steel (JIS:SCM420)
Longitudinal rigidity	335.3 N/μm(calculated value)
Coefficient of thermal expansion	$\rho = 12 \times 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ (measured value)
Lubricant	Grease
Pre-load	Constant gap preloading
Anchoring	Single anchor

2.2 2ヶ所における位置決め誤差をゼロにする補正

本節では、テーブル・ストロークの両端近くの2ヶ所における位置決め誤差（：図2中の●印）を、ゼロにする補正について検討する。この方法は、レーザ変位計を用いることにより実施できるだけでなく、長さが既知の端度器と電気マイクロメータを用いることによっても実施できる。

まず、初期位置決め誤差を求める。実験開始時にボールねじ温度が均一であるかどうかは明らかでない。本研究では、熱膨張による位置決め誤差の変化量のみを補正するのではなく、総合的な位置決め誤差をゼロにすることが目標である。従って、その基礎として、ボールねじ各部の初期温度分布による位置決め誤差への影響を除去する必要がある。そこで、ボールねじ初期温度分布の平均値に対する、ボールねじ各部の熱膨張量の差を、式(2)による補正量を用いて機械座標系原

Fig. 2 Initial positioning error compensated by Eq. (2)

Fig. 3 Positioning error compensated by Eq. (4) or Eq. (5)

$$X_0(Z_{refl}, 0) = \rho \int_{Z_{refl}}^0 (T - T_{0mean}) dL \quad \dots \dots \dots (2)$$

但し,

$X_0(Z_{refl}, 0)$: 第0回目測定補正トラバースにおけるボールねじ熱膨張量の推定値

Z_{refl} : $=(Z_{nomNC} - 171) \text{ mm} < 0$ 超精密レーザ変位計用の反射鏡の現在位置(公称値)

ρ : $=12 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, ボールねじの熱膨張係数(実測値)

T : ボールねじの温度

T_{0mean} : ボールねじの初期平均温度(15ヶ所の測定値の平均)

点シフトを実行し, リアルタイム補正 ON における初期位置決め誤差を求める. この補正は, 実験開始時の初期位置決め誤差を測定するトラバース (: 第 0 回目測定補正トラバース) においてのみ実行する. 得られる初期位置決め誤差の模式図を, 図 2 に示す.

図 2 中の●印で示す 2 ヶ所における位置決め誤差は, 誤差ゼロを示す水平の点線より下にプロットされている. これは, 位置決め誤差が負であることを示しており, ボールねじ温度が基準温度より低温で, ボールねじが収縮していることを示している. 本研究で取扱うシングル・アンカ方式のボールねじは, スラスト方向位置の固定用軸受け (: 本研究では $z+171\text{mm}$ の位置) を基点として伸縮するので, $z+171\text{mm}$ における位置決め誤差は常にゼロと考えられる. 従って, 2 ヶ所の●

印を結ぶ線と $z+171\text{mm}$ の交点は位置決め誤差ゼロを意味し, この交点を通る水平線も, 位置決め誤差ゼロの状態を表している. この水平線と●印との垂直方向距離は, 初期平均温度 T_{0mean} なるボールねじの $z-0$, $z-384\text{mm}$ における位置決め誤差を示す. これら 2 ヶ所における位置決め誤差の差は, 基準温度に比べて T_{0mean} が低いことによる, ボールねじ長さ 384mm の部分の収縮量に相当する. 上述の差をゼロにする温度 (: 基準温度), 即ち, 図 2 の位置決め誤差ゼロを実現するボールねじ温度は, 式(3)により求められる.

$$T_{PA384} = - \frac{\{PA_0(z-384, \text{comp. by Eq. (2)}) - PA_0(z-0, \text{comp. by Eq. (2)})\}}{\rho \times 384} + T_{0mean} \quad \dots \dots \dots (3)$$

但し,

T_{PA384} : 基準温度 (: $z-0$ および $z-384\text{mm}$ における位置決め誤差をゼロにするボールねじ温度)

図 2 中の●印で示す位置決め誤差をゼロにする, 即ち, 水平線の状態を実現するには, ボールねじ温度 T と式 (3) で定義される T_{PA384} との温度差に基づく熱膨張を補正すれば良いと考えられる. 従って, 式 (4) の補正量で, 機械座標系原点シフトを実行する.

$$X(Z_{nomNC}, T_{PA384}) = \rho \int_{Z_{refl}}^0 [T - T_{PA384}] dL \quad \dots \dots \dots (4)$$

但し,

$X(Z_{nomNC}, T_{PA384})$: $z-0$ および $z-384\text{mm}$ における位置決め誤差をゼロにする補正量

この補正は, 図 2 中の●印を結ぶ実線を, この実線と $z+171\text{mm}$ との交点を支点として, 回転させるように補正し, 水平線に一致させることになるので, 補正後の位置決め誤差は, 図 3 中の●印および△印で表される. △印が水平線上に位置しない (: Z_{nomNC} における位置決め誤差がゼロでない) のは, 図 2 中の△印が●印を結ぶ実線上に位置しないことによるものである.

2.3 トラバース途中の位置決め誤差をもゼロにする補正

本節では, レーザ変位計またはステップゲージによる測定値を基に, トラバースの両端だけでなく途中の複数位置における位置決め誤差をもゼロにする補正の方法を検討する. 擬似的には, 図 2 中の●印で示す 2 ヶ所の位置決め誤差に加えて, ボールねじ製作時のリード誤差の情報を組み合わせることにより, 本節の補正を実行することが可能と考えられる.

Table 2 Experimental conditions

Experiment	Feed speed	Heating condition	Traverse for measurement and compensation
R-temp.		Air conditioning [0-1hr]:OFF +[1-6.5hr]:setting 26°C(warming) +[6.5-11.5hr]:setting 18°C(cooling) +[11.5-18.5hr]:setting 23°C(warming) +[18.5-23.5hr]:setting 23°C(const. temp.)	At every 30min. during experiment (:1st~n-th traverse) at every 24mm position from $z-0$ to $z-384\text{mm}$ (feed speed:0.1m/min) [dwell, 7s(comp. ON by Eq. (4)) +7s(comp. ON by Eq. (5)) +7s(comp. OFF)]
LHT-F18R	$F=18 \text{ m/min}$	$[z-0(\text{dwell}, 1\text{s}) \Leftrightarrow z-384\text{mm}(\text{dwell}, 1\text{s})]$ *20traverses	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> $\leftarrow$ $\downarrow F$ $\leftarrow$ $\downarrow F$ $\leftarrow$ </div> <div> at $z-0$ [dwell, 7s(comp. ON by Eq. (4)) +7s(" .ON by Eq. (5)) +7s(" .OFF)] at $z-192$ [dwell, 7+7+7s] at $z-384$ [dwell, 7+7+7s] </div> </div>

R-temp:influence of room temperature, LHT:long heating traverse

Fig.4 Temperature of experimental set-up and ball-screw

前節で述べた式(4)による補正法では、図3中の△印で示すように、ストローク途中の Z_{nonNC} における位置決め誤差 PA_n はゼロではない。この位置決め誤差 PA_n をもゼロに補正するため、本節では式(5)の補正量を用いて、機械座標系原点シフトを実行する。

$$X_\delta(Z_{\text{nonNC}}) = X(Z_{\text{nonNC}}, T_{PA384})$$

$$\begin{aligned} & + \left[PA_0(Z_{\text{nonNC}}, \text{comp. by Eq.(2)}) - PA_0(z=0, \text{comp. by Eq.(2)}) \right] \\ & + \left[PA_0(z=384, \text{comp. by Eq.(2)}) - PA_0(z=0, \text{comp. by Eq.(2)}) \right] \cdot Z_{\text{nonNC}}/384 \end{aligned} \quad (5)$$

但し

$$X_\delta(Z_{\text{nonNC}})$$

: 24mm 毎の Z_{nonNC} における位置決め誤差をゼロにする補正量

式(5)の右辺の第2項は、図2中の●印を結ぶ直線と△印との上下方向の距離を意味し、図3中の水平線と△印との距離に等しい。従って、式(5)の補正量を用いて、機械座標系原点シフトを実行することにより、ストローク両端だけでなく、▲印で示すストローク途中の Z_{nonNC} における位置決め誤差をも、ゼロに補正できると考えられる。

3. 実験装置と実験方法

3.1 実験装置

図1の実験装置は前報³⁾のものと同一である。ボールねじ熱膨張量を高精度で推定するため、中空ボールねじの中空穴内面の15ヶ所に鉄・コンスタンタン熱電対を設置し、測定した15ヶ所(ch12を除くch0~ch15)の温度情報を、回転ヘッド中心部のLEDから光学式データとして送信し、静止ヘッドを経由してPC2に入力している。図1に示すように、室温、スラスト方向位置固定用軸受の支持ブラケットのモータ側表面温度およびその裏面の温度、ボールねじ用ナットの外周部2ヶ所の温度、反射鏡取付部近くのテーブル温度は、銅・コン

Fig.5 Positioning error under comp. OFF operation

スタンタン熱電対を用いて、市販のデータ・ログ経由でPC1に入力している。

リアルタイム補正の効果を明らかにするための基準変位を得るため用いた、超精密レーザ変位計出力の応答性は遅く、一定値に落ち着くまでに約1.3sを要するので、表2に示すように、必要な時間のドウェルを行い、ドウェル終了近くの出力をテーブル位置の基準変位として採用している。

3.2 実験方法

実験の条件を表2に示す。R-temp.なる実験では、室温が変化し、位置決め誤差が変化する条件下においても、本研究のリアルタイム補正が位置決め誤差をゼロ近くに抑制することを明らかにする。第0回目測定補正トラバースにおいては、式(2)による補正がONの場合と補正がOFFの場合について、 $z=0$ から $z=384\text{mm}$ までの24mm毎の各位置において、初期位置決め誤差を求める。その後、一般室用のエアコンを、表2に示す設定で23.5hrにわたり運転する。この間の30min.毎に、 $z=0$ から $z=384\text{mm}$ までの24mm毎の位置においてドウェルし、式(4)による補正、式(5)による補正、および補正OFFの状態での超精密レーザ変位計出力を測定し、位置決め誤差を求めた。

また、LHT-F18Rの実験では、 $z=0$ から $z=384\text{mm}$ までの20往復の加熱トラバースを行った後、 $z=0$ 、 $z=192$ 、 $z=384\text{mm}$ の3ヶ所においてドウェルし、式(4)による補正、式(5)による補正、および補正OFFの状態での超精密レーザ変位計出力を測定し、位置決め誤差を求める。さらに、上記の加熱トラバースから超精密レーザ変位計出力の測定までのプロセスを繰り返し、6.5hrの実験を行っている。

Fig. 6 Positioning error under comp. by Eq. (4) and (5)

Fig. 7 Positioning error compensated by Eq. (4) and Eq. (5)

4. 実験の結果

4.1 室温変化が位置決め誤差に及ぼす影響

エアコンを用いて強制的に室温を変化させ、テーブルの位置決め誤差の変化を測定した。図4に実験装置温度、室温およびボールねじ温度の測定結果を示す。サーボモータの温度が30min.周期で約1.5℃温度変動しているのは、30min.毎に位置決め誤差の測定補正トラバースを実行していることによる。室温は、エアコンの設定に基づいて、速やかに変化している。室温が16.5hr以後に約4℃の範囲で温度変動しているのは、エアコン自動運転中の暖房・冷房機能のON・OFFによるものである。装置各部の温度とボールねじ温度は殆ど同一であり、室温変化に遅れて、ゆっくりと変化している。

上記温度変化と同時に測定した位置決め誤差の結果を図5に示す。前報5.1節の方法³⁾と同様に、電気マイクロメータで測定した、超精密レーザ変位計用のキューブ・コーナ変位を修正した結果を示している。表2に示すように、30min.毎に位置決め誤差を測定するため、テーブルをz=0～z=384mmの間トラバースさせている。毎回の測定補正トラバースにおいては、24mm毎の各位置において21sのドウェルを行う。このドウェル中に式(4)による補正7s、式(5)による補正7s、補正OFF7sの状態のテーブル位置を、超精密レーザ変位計で測定し、位置決め誤差を求めている。補正OFFの場合の位置決め誤差の変化を図5に示す。同図(a)から、エアコンがOFFの0.5hrを含め、1～6.5hrの暖房運転中は、室温の温度上昇に遅れてボールねじ温度が上昇し、ボールねじ全長が伸びるので、z=0～z=384mmの全ての位置で位置決め誤差が+の方向に変化していることが分かる。図5(b)は6.5～11.5hrの冷房運転中で、ボールねじ全長が収縮し、位置決め誤差が-の方向に変化している。図5(c)は、エアコンの自動運転中の暖房・冷房機能のON・OFFにより、一定温度の周りに室温が変動する18.5～23.5hrの状態を示している。図4(b)の18.5～23.5hrに見られるように、ボールねじ温度の変動は小さいので、ボールねじの熱膨張の変動も小さく、図5(c)のように、位置決め誤差が殆ど変動しないことが分かる。

以上の検討から明らかなように、リアルタイム補正OFFの通常の条件下で、基準温度と異なる室温においては位置決め誤差はゼロでないこと、および室温が変化すると位置決め誤差が変化することが分かる。

Table 3 Positioning accuracy

Z _{nomNC} at 0mm	After compensation by Eq. (4)					After compensation by Eq. (5)				
	At 0.5hr	at 6.5hr	at 8.5hr	at 18.5hr	at 23.5hr	at 0.5hr	at 6.5hr	at 8.5hr	at 18.5hr	at 23.5hr
-24	-0.5	-2.3	-3.7	-3.6	-4.5	-0.4	-2.4	-3.6	-3.5	-4.5
-48	-0.6	-2.5	-3.7	-3.9	-4.8	-0.6	-2.4	-3.7	-3.6	-4.8
-72	-0.4	-2.6	-3.5	-3.9	-4.6	-0.5	-2.5	-3.6	-4.0	-4.7
-96	-0.7	-3.1	-3.7	-4.3	-5.2	-0.5	-2.9	-3.6	-4.3	-5.1
-120	-0.8	-3.4	-3.7	-4.4	-5.2	-0.6	-3.2	-3.7	-4.6	-5.2
-144	-0.2	-2.7	-2.9	-4.3	-4.8	-0.5	-3.1	-3.3	-4.7	-5.4
-168	-0.4	-3.1	-3.2	-4.5	-5.4	-0.5	-3.4	-3.4	-4.6	-5.6
-192	-1.1	-4.3	-3.9	-5.3	-5.3	-1.0	-4.2	-3.8	-5.2	-6.2
-216	-1.5	-5.0	-4.3	-6.0	-7.0	-1.2	-4.6	-3.7	-5.7	-6.6
-240	-2.1	-5.8	-4.7	-6.7	-7.7	-1.0	-4.7	-3.7	-6.1	-6.7
-264	-2.5	-6.5	-5.3	-7.5	-8.4	-0.9	-5.0	-3.7	-6.3	-7.0
-288	-2.0	-5.9	-4.7	-7.3	-8.0	-1.0	-5.3	-3.8	-6.6	-7.3
-312	-1.0	-5.5	-3.8	-6.1	-7.5	-1.0	-5.6	-3.8	-6.1	-7.4
-336	-1.3	-6.2	-4.0	-6.7	-7.5	-1.1	-5.5	-3.7	-6.7	-7.5
-360	-1.1	-6.5	-3.7	-7.1	-7.7	-1.0	-6.2	-3.8	-7.0	-7.7
-384	-0.9	-5.8	-3.4	-6.5	-7.7	-0.8	-6.3	-3.5	-6.7	-7.9
(max. - min.)	2.5 μm	4.9	2.4	4.7	4.5	1.2	4.7	0.6	4.1	4.0

4.2 2ヶ所における位置決め誤差をゼロにする補正の効果

図6(a)は、z=0およびz=384mmの2ヶ所における位置決め誤差をゼロにするため、式(4)による補正量を用いてリアルタイム補正を行った結果である。0～23.5hrの間に16.5～26.5℃室温が変化する環境下においても、z=0～z=384mmの全長において、位置決め誤差-8.4～+1.4μmが得られていることが分かる。z=0およびz=384mmにおける位置決め誤差そのものをゼロにできなかったが、位置決め精度を大幅に向上できることが分かった。

4.3 トラバース途中の位置決め誤差をもゼロにする補正の効果

図6(b)は、z=0およびz=384mmの2ヶ所だけでなく、この間の24mm毎の各位置における位置決め誤差をゼロにするため、式(5)による補正量を用いて、リアルタイム補正を行った結果である。前節の場合と同一の環境下で、z=0～z=384mmの全長において、位置決め誤差を-7.9～+1.5μmに抑制することができている。

つぎに、式(4)による補正と式(5)による補正の効果を比較するため、代表的なデータを図7に示す。式(4)による補正は、z=0とz=384mmにおける位置決め誤差のみをゼロに補正するので、途中の位置（例えばz=264mm）において、図7中の破線で示すように、式(4)による位置決め誤差が突き出すようにな

Fig. 8 Results on positioning error after compensation by Eq. (4) in the experiment LHT-F18R

っている。これは、図 2 の●印を結ぶ直線から△印が突き出していた影響が残っていることによると考えられる。これに比べ、式(5)による補正は $z=0 \sim z=384\text{mm}$ の 24mm 毎の各位置における位置決め誤差をもゼロにする補正である。その結果、上記の Z_{nomNC} における部分的な凹凸の影響も改善され、 $z=0 \sim z=384\text{mm}$ の各位置における位置決め誤差を示す折線がほぼ直線状になっていることが分かる。このことを詳細に検討するため、代表的な測定補正トラバース中の 24mm 毎の各位置における位置決め誤差を表 3 に示す。同一時刻における位置決め誤差の(max. -min.)から、式(4)による補正の結果に比べ、式(5)による補正の結果が、全体的に位置決め誤差が小さいことが分かる。例えば、表 3 中の 8.5hr の場合のように、 $z=0 \sim z=384\text{mm}$ の各位置で位置決め誤差がほぼ一定値を示す場合には、式(5)による補正が、式(4)による補正に比べ、良い結果を得られることが良く分かる。

4.4 テーブル駆動中の位置決め誤差

表 2 の LHT-F18R では、まず、初期位置決め誤差を測定する。つづいて、 $z=0 \sim z=384\text{mm}$ の加熱用 20 トラバースの後、 $z=0, z=192, z=384\text{mm}$ の 3 ケ所で 21s のドウェルを行い、このドウェル中に式(4)による補正、式(5)による補正、補正 OFF の状態での超精密レーザ変位計出力を測定し、位置決め誤差を求めている。図 8 は、補正 OFF の場合および式(4)による補正を行った場合の結果を示す。前報³⁾と同様に、レーザ変位計用のキューブ・コーナ変位を修正した結果を示している。図 8(a)に見られるように、補正 OFF の測定補正トラバース開始時の位置決め誤差が負であるのは、図 5(a)の 0.5hr における位置決め誤差が負であることに対応するものである。補正

OFF の場合、テーブルの加熱用 20 トラバースによる熱膨張により、 $z=0, z=192, z=384\text{mm}$ のいずれの位置においても、位置決め誤差が増加している。

他方、式(4)による補正 ON の場合、図 8(a)から、 $z=0, z=192, z=384\text{mm}$ のいずれの位置においても、6.5hr にわたり、 $-7.6 \sim 0 \mu\text{m}$ と十分小さい位置決め誤差を達成していることが分かる。

また、キューブ・コーナの変位を長時間にわたり電気マイクロメータで測定し、上述のデータを修正しているが、電気マイクロメータ出力の安定性は必ずしも十分でない可能性がある。そこで、約 63 s 以内に測定を終えられる、同一トラバース中の相対的位置決め誤差を式(6)で求め、図 8(b)に示す。

$$z=0 \text{ に対する相対的位置決め誤差} \\ = \{PA_n(Z_{\text{nomNC}}, \text{comp. by Eq. (4) or (5)}) - PA_n(z=0, \text{comp. by Eq. (4) or (5)})\} \\ \dots\dots\dots (6)$$

同図から、 $-0.4 \sim +2.2 \mu\text{m}$ と極めて小さい相対的位置決め誤差を達成していることが分かる。

さらに、トラバース中の 24mm 毎の各点における位置決め誤差をゼロにするため、式(5)による補正を行った。図 8 とほぼ同様の結果が得られ、 $-7.5 \sim 0 \mu\text{m}$ と十分小さい位置決め誤差および $-0.5 \sim +2.0 \mu\text{m}$ と極めて小さい相対的位置決め誤差を達成していることが分かった。

5. 結 言

室温変化とボールねじ駆動による熱膨張が、位置決め誤差に及ぼす影響を補正する実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 初期位置決め誤差の情報、ボールねじ温度情報およびテーブルの現在位置情報を用いて、移動トラバース中の複数ヶ所における位置決め誤差そのものをゼロにする、リアルタイム補正方法を提示した。
- (2) 初期位置決め誤差は当初に 1 回測定するだけで、CNC 制御装置を別の日に再起動する場合にも、この補正方法をそのまま適用できる。
- (3) 長時間にわたり、室温が $16.5 \sim 26.5^\circ\text{C}$ と大幅に変化する条件下において、テーブル移動トラバースの全長において、位置決め精度を大幅に向上させることができた。
- (4) テーブル移動速度 18m/min.の条件下で、位置決め精度を大幅に向上させることができた。

参 考 文 献

- 1) 二宮瑞穂, 宮口和男: ボールねじの最近の技術動向, NSK Technical Journal, 664(1997)1.
- 2) 幸田盛堂, 村田悌二, 上田完次, 杉田忠彰: マシニングセンタにおけるボールねじ熱膨張誤差の自動補正, 日本機械学会論文集 C 編, 56,521(1990)154.
- 3) 横山和宏, 斉藤瑞希, 鳥海啓, 森脇俊道, 明田川正人: ボールねじ熱膨張のリアルタイム補正による位置決め精度の向上(第 1 報 補正の原理と運転条件の影響), 精密工学会誌(校閲終了)
- 4) 永井豊, 横山和宏, 鈴木孝昌, 小寺岳彦: ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究(第 2 報 測定精度), 精密工学会誌, 69,10(2003)1480.
- 5) 横山和宏, 永井豊, 鈴木孝昌: ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究(第 3 報 円筒面からのデータ伝送と非接触給電), 精密工学会誌, 69,11(2003)1600.
- 6) 小坂貴史, 横山和宏, 斉藤航司, 鈴木孝昌: ボールねじ熱膨張量の推定精度向上, 精密工学会誌, 71,12(2005)1525.