精密位置決め装置のボールねじ熱膨張の ペルチェモジュール冷却による防止*

大塚二郎** 野崎孝志*** 鈴木隆太郎† 種石健一† 十朱 寧†† 中田篤史††
行平憲一†† 越水重臣††† 西出哲弘†††† 大澤洋文†††††

Prevention of Thermal Expansion of Ball Screw on Precision Positioning Device by Peltier Module Cooling

Jiro OTSUKA, Takashi NOZAKI, Ryutaro SUZUKI, Ken-ichi TANEISHI, Yasushi TOAKE, Atsushi NAKATA, Ken-ichi YUKIHIRA, Shigeomi KOSHIMIZU, Tetsuhiro NISHIDE and Hirohumi OOSAWA

On the precision positioning device of semi-closed control type which is driven by a ball screw, the expansion of the ball screw generates the positioning error of the stage during the stage repeated movement. The expansion is mainly caused by 2 heat sources of relative rotation of the ball screw/nut and angular ball bearings which support the thrust and radial force of the screw. In this study, the expansion measured by a gap sensor at the ball screw end is fed back to Peltier module to cool the screw/nut. Other Peltier modules cool both sides of housing made of pure copper of large thermal conductivity to keep the housing temperature at the room temperature of 20°C. The angular bearings are cooled through the housing. At the same time, the datum point of minute displacement in the longitudinal direction of the device is corrected by the Peltier modules indirectly. As a result, the expansion of the ball screw in length of 400 mm is reduced from 18 μm under the repeated stage movement of 150 mm/s to 1 μm .

Key words: ball screw, thermal expansion, positioning device, Peltier module

1. 緒 言

ボールねじ駆動によるセミクローズド制御の精密位置決め装置において、益々高速化と高精度化が要求されている。通常の位置決め誤差のうち、熱に起因する誤差は主にボールねじの熱膨張によるものとされている¹⁾。ボールねじを熱膨張させる熱源としては、ボールねじの軸とナットの相対回転によるものと、ボールねじを支持する軸受による2種類の発熱が殆どで、モータの発熱はカップリングを介するのであまり影響しない²⁾。

従来、研究を以下に概観する。千田、森脇³⁾は、工作機械の旋盤のx軸方向ボールねじについて取り上げ、軸方向剛性とその半径方向（あるいは支持軸受のモーメント）剛性の関係から、ボールねじ軸にプリテンションをかけた場合の熱膨張の抑制効果と、熱膨張が起きない適正なプリテンションの存在について明らかにしている。横山ら⁴⁾は、ボールねじの熱膨張の影響を補正するため、恒温室なしで室温が変化しても、初期位置決め情報、ボールねじ温度情報およびステージの現在位置情報を用いて、位置決め誤差そのものをゼロにするリアルタイムCNC制御により機械座標系原点をシフトさせるプロセスで、位置決め精度を大幅に向上させている。日本精工（株）⁵⁾は、ボールねじそのものの熱膨張を抑制するために、ボールねじに貫通穴、ナットに軸方向穴を複数あけ、そこに室温と同じ温度

で、かつ粘度の小さいオイルを通してボールねじと軸受とを共に冷却する装置を市販している。また、三井精機工業（株）のねじ研削盤は親ねじを中空にし、軸受部にも工夫を加えて、そこに室温と同じ温度のオイルを通して高精度リードのねじ研削を可能にしている⁶⁾。小淵、深田、筆者²⁾はボールねじ全長にわたって室温と同じ温度のオイルをねじ軸全体にかけて熱膨張を防いでいる。

本研究の目的は、ボールねじの軸とナットの相対回転によるものと、ボールねじを支持する軸受による2種類の発熱をペルチェモジュールで冷却することにより精密位置決め装置のボールねじの熱膨張を抑制しようというものである。

2. 変位制御と温度制御

セミクローズド制御の位置決め装置のボールねじで、ねじにかかる軸方向負荷も受けるアンギュラ玉軸受を用いる側をここでは便宜的に固定側と呼び、ボールねじの熱膨張を軸方向に逃がし、深溝玉軸受を用いる側を支持側と呼ぶことにする。

①ボールねじ熱膨張をボールねじ支持側の軸方向変位 Δl_1 をギャップセンサ G_1 により測定し、 Δl_1 をステージ上に設けた冷却手段であるペルチェモジュールにフィードバックし、ナットを冷却してボールねじが熱膨張しないようにする。ここでは、これを「変位制御」と呼ぶこととする。

②固定側のアンギュラ玉軸受の発熱がボールねじ軸を熱し、しかも、ボールねじ固定側の基準点をわずかに狂わせる。モータとボールねじを継ぐ部分をハウジングと呼ぶ。アンギュラ玉軸受を含むハウジング全体をペルチェモジュールにより室温の20°Cになるように温度制御することにより、固定側ボールねじ軸を冷却すると同時に、ハウジング軸方向側面でギャップセンサにより測定する基準点移動量 Δl_2 をゼロにする。ここでは、この制御を「温度制御」と呼ぶこととする。

なお、①のギャップセンサで軸方向変位 Δl_1 を測定し、それ

* 原稿受付 平成 28 年 5 月 5 日

掲載決定 平成 28 年 8 月 17 日

** 正 会 員 静岡理科大学 総合技術研究所（静岡県袋井市豊沢 2200-2）

*** 正 会 員 静岡理科大学 理工学部 機械工学科

† 学生会員 静岡理科大学大学院（現、THK(株)）

†† 静岡理科大学

††† 正 会 員 産業技術大学院大学 産業技術研究所

†††† THK(株)

††††† 静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター

をサーボ系にフィードバックして熱膨張を低減するアイデアは昔からあったが、実現した精密位置決め装置は筆者らの調査の範囲では皆無であることをつけ加える。

3. 実験装置

3.1 機械的部分

3.1.1 構造

ここで用いる精密位置決め装置 (THK 社製 KR45A) の概観を図 1 に示す。ボールねじ軸長さ 400 mm, ステージのストロークは 300 mm, モータは AC サーボモータ定格出力 200 W のもので、位置決めは、セミクローズド制御されているから、ステージの位置決め精度はボールねじのリード精度に依存するところが大きい。ボールねじは、外径 15 mm, リード 10 mm でねじ溝は研削加工されていて JIS B 1192 によれば精度等級は C5 になる。累積リード誤差のみに注目すれば、ねじ部長さ 400 mm で $8\text{ }\mu\text{m}$ 以内で C1 に相当する。ボールねじ軸はモータ軸と金属板ばねカップリングによりハウジング内で継がれている。ボールねじ (グリース潤滑, 予圧はオーバーサイズボールによる) の支持は固定側のアンギュラ玉軸受, 支持側は深溝玉軸受で支持されている。ボールねじとナット材料は SCM420H であり、ステージの大きさは長さ 75 mm×幅 49 mm, 質量 3.0 kg であり、図 1(b) に示すように 4 条リニアボールガイドで案内される。ベースは S55C 相当品で、図 1 に示すようにベースは厚さ 10 mm の鋼板 (750 mm×300 mm) の上に 10 mm の隙間をもって 2 箇所固定されている。

アンギュラ玉軸受 (外径 22 mm, 7900C DF タイプ) の入るハウジングは、市販品の精密位置決め装置ではアルミ鋳物 (ADC10) 製であるが、本研究用に、ハウジング自身を冷却するのに形状が適しておらず、この部分に熱伝導率の非常に大きい純銅を用いている。精密位置決め装置を構成する要素の熱伝導率と熱膨張係数を表 1⁷⁾ に示す。ここで純銅の熱伝導率が大きいことがわかる。

なお、モータはハウジングにボルト固定されており、ハウジ

(a) Schematic view of precision positioning device

(b) Section AA' of stage

Fig.1 Schematic view of precision positioning device

ングはベースに同じく固定されていて、モータとハウジングは、図 1 に示すように鋼板と垂直方向に 10 mm 以上の隙間がある。

3.2 熱膨張の測定方法とボールねじ固定側基準点移動

3.2.1 ねじ軸の熱膨張 (軸受方向変位 Δl_1) の測定方法

図 2 右下に示すように、ねじ支持側の軸受方向変位 Δl_1 を測定する為のギャップセンサ G_1 (キーエンス製 E302, 分解能 $0.1\text{ }\mu\text{m}$) が設けられていて、これはアップの原理に従っている。

また、軸端にセンタ穴があいているので、厚さ 0.1 mm の円形鋼板を取り付け、変位計測精度を高めた。

3.2.2 基準点移動量 Δl_2 の測定方法

Δl_2 を測定するための基準となる点を、ここでは図 2 左下のハウジング側 D とする。非冷却で運転していると D は徐々に微小ながら左方へ移動する。

基準点移動の原因は図 2 における C 点と D 点との間の熱変形に起因すると思われる。本研究では、ハウジング側面 D における水平方向変位をギャップセンサ G_2 (キーエンス製 E302, 分解能 $0.1\text{ }\mu\text{m}$) で基準点移動量 Δl_2 を常時測定する。ここで、装置の構造上 C 点は動かすことはできない。

G_1 , G_2 とも門型支持台 (低熱膨張材製) で鋼板上に固定されている。非冷却でステージを往復移動して装置全体が温度上昇しても鋼板には殆ど伝熱しない。従って、おおよそ $\Delta l_1 + \Delta l_2$ がボールねじの総熱膨張 Δl に相当する。

なお、本研究での基準点移動とその測定方法について、5.1 節で吟味する。

3.3 ペルチェモジュールによる冷却方法⁷⁾

3.3.1 ペルチェモジュールとその用い方

冷却用としてペルチェモジュールを用いる長所は次のとおりである。

①安価, ②取扱い容易。

短所としては、次のとおりである。

① 大熱源に対しては冷却しにくい, ②直流電源が必要。

ペルチェ効果は、図 3(a) のように N 型半導体と P 型半導体を用い吸熱と放熱を行うものであり、1 個 1 個をペルチェ素子といい、複数組合せたものを同図(b) のようにして、ペルチェモジュール (フジタカ製 FPH, $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 厚さ 3 mm) を構成する。ペルチェモジュールを用いるに当たって、被冷却面 (放熱面) と冷却面との間に隙間ができないように、両者の間に熱伝導率の比較的大きいシルバーグリース (Artic silver 製 5) を厚さ 0.1 mm 以下に塗布して圧着している。ペルチェモジュール

Table 1. Thermal specific values of some materials used for parts of precision positioning device

Part name	Materials	Thermal conductivity $\lambda[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Thermal expansion coefficient $\alpha \times 10^{-6} [\text{1/K}]$
Ball screw	SCM420	26	11.9
Base	S55C	56	10~11
Housing (used for commercial type)	ADC10 (cast aluminum alloy)	96	23
Housing (used for this study)	Cu (pure copper)	403	16.6

Fig.2 Gap sensors G_1 and G_2 to measure the right end displacement of ball screw and the datum point housing in the longitudinal direction

の放熱面にはヒートシンク (60 mm×60 mm) を圧着し、さらに強制冷却ファンを取付けて、冷却効果を高くしている。

3.3.2 冷却方法

緒言で述べたように、ボールねじ駆動による精密位置決め装置の主たる熱源は①ボールねじの軸とナットの相対回転によるものと②アンギュラ玉軸受によるものであることから、

①に対してはナットを冷却したいが、ここで用いる位置決め装置のナット部分にはペルチェモジュールを取付けるスペースがないので、図 1(b)のステージ上面にペルチェモジュールを取付け、ステージに固定されているボールねじナットを冷却し、そしてねじ軸を冷却する。

②に対しては、ハウジングの両側に 2 個のペルチェモジュールを取付けることとした。その様子を図 4 に示す。

4. 実験条件と熱膨張制御系

4.1 実験条件

実験室は、一般の空調付き実験室を改造して断熱性を高めた。

(a) Principle of Peltier effect(element)

(b) Peltier module(40mm×40mm×3mm)

Fig.3 Illustration of Peltier element and module

室温は $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ であるが、精密位置決め装置を室内でさらに隔離し、実験中の温度変化の影響を少なくする配慮をした。

図 1 の位置決め装置では、ステージの最高速度 $V=300 \text{ mm/s}$ (ねじ軸の回転数 1800 rpm) まで可能である。

実験はペルチェモジュールで冷却することが可能なステージ定常速度 $V=150, 100, 50 \text{ mm/s}$ 、往復動 (300 mm) の加減速度 9.8 m/s^2 の台形波速度のもとで行った。実験装置の温度を測定する為に、モータ、ハウジング、ステージ、ベース、鋼板等十ヶ所に熱電対 (K 型) を取付け、データロガー (グラフテック製 GL) に温度を記憶する。また、接触式表面温度計 (タスコ社製 TVA1100, 分解能 0.1°C) によってずい時、各所温度測定を行い、熱電対による測定との整合性をとった。

4.2 軸方向変位 Δl_1 と基準点移動量 Δl_2 の補正

4.2.1 軸方向変位 Δl_1 の制御系

ステージが往復動するとボールねじの軸とナットの相対回転によって発熱し (くわしくは 5.2 節で考察する)、ボールねじは温度上昇し熱膨張することを上述した。熱膨張により、図 2(a)に示すねじ軸方向変位 Δl_1 が生じる。図 2 の Δl_1 は、ギャップセンサ G_1 で測定し、図 5(a)に示すように、PID コントローラへフィードバックし、ペルチェモジュールアンプを介してペルチェモジュールでステージを冷却し、ナットを介してボールねじの熱膨張を諸言で述べたように変位制御する。

4.2.2 基準点移動量 Δl_2 の補正とアンギュラ玉軸受発熱の抑制

ブロック線図を図 5(b)に示す。図 2 に示す基準点移動量 Δl_2 をギャップセンサ G_2 で測定する。図 2 左側の図中で、ハウジングは純銅製で熱伝導率が大きいのので (表 1)、非冷却時でもほぼ均一な温度分布となる。

本研究では、ハウジングと、アンギュラ玉軸受を 20.0°C に近づけるためハウジングの諸言で述べたように「温度制御」を行

Fig.4 Schematic view of positioning device with 3 Peltier module

Fig.5 Schematic block diagram to cool the ball screw and to keep the housing temperature at 20°C

うこととする。ペルチェモジュールでハウジングを冷却し、図2のようにハウジングのアンギュラ玉軸受に比較的近い位置にサーミスタ温度センサ（分解能 0.05°C）を取付け、その温度をフィードバック制御する。

5. 実験

ペルチェモジュールを用いない非冷却で、精密位置決め装置全体の温度上昇が飽和するステージの 60 分間の往復動を行った。また、ステージ冷却、及びハウジング冷却を同時に行った状態で 60 分間のステージの往復移動を行った。それぞれの実験結果について、以下に述べる。

5.1 非冷却の場合

「変位制御」、及び「温度制御」を一切行わない場合の各速度の軸方向変位 Δl_1 の時間的変化の様子を図6(a)に示す。例えば $V=150$ mm/s の場合 60 分間で $\Delta l_1=15$ μ m 変化している。ここで、 Δl_1 が振動しているのはボールねじ軸の回転に伴う変位による影響である。

図6(b)は基準点移動量 Δl_2 を示し、いずれの速度でも Δl_2 は図2でモータ側（左方向）へ移動していることがわかる。 $V=150$ mm/s と $V=100$ mm/s の場合を比べると、温度上昇速度に差がみられるが、室温変化のためと思われる。各時間における $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ がボールねじの総熱膨張量となる。例えば $t=60$ 分で $V=150$ mm/s の場合、ボールねじの総熱膨張量 Δl は $\Delta l_1 + \Delta l_2=18$ μ m となる。

5.2 冷却の場合

5.2.1 制御方法

図5(a)の Δl_1 の「変位制御」でも図5(b)の Δl_2 の「温度制御」でも PID ($K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$) 制御を用いている。各係数 K_p 、 K_i 、 K_d の決定は、原則、限界感度法を用いたが、最終的には試行錯誤で決定した。

ハウジングの「温度制御」の場合は、図4でわかるとおりハウジング軸方向の2組のペルチェモジュールを用いる。この場合、「変位制御」の場合と同じ方法で各係数を決定した。

5.2.2 結果

図7(a)は「変位制御」と「温度制御」を用いての $V=150$, 100, 50 mm/s での Δl_1 を示すものである。ペルチェモジュール冷却系の時定数が大きいことから、 $t=10$ 分位までは Δl_1 は変

化しているが、それ以後は Δl_1 は 1 μ m 以内に収まっている。

また図7(b)は、そのときの「温度制御」の場合の基準点移動量 Δl_2 を示すもので、いずれのステージ速度 V でも基準点移動量が確実に 1 μ m 以内に入っていると共に、ハウジング自身の温度が全体的に 20°C 近くになった。「変位制御」、及び「温度制御」によりボールねじ全体の温度が 20.0~20.4°C になったということであり、図7(a)の Δl_1 はボールねじの総熱膨張量 Δl とみなしうる。

また、図1(b)のステージとベースとの間のリニアボールガイドの温度上昇は非冷却中、ハウジング側は 21.0°C となるが、「変位制御」、及び「温度制御」中は 20.0°C になっていた。

以上を要約すると、ステージ往復移動をくり返すときに「変位制御」と「温度制御」を行うと、位置決め装置全体とボールねじ全長が 20°C 付近となり、その熱変形も初期状態とほぼ同一になったことを示している。

6. 考察

6.1 位置決め装置の熱変形と基準点移動量測定

図2のハウジングについて、非冷却のとき、ハウジング全体の温度の上昇は 3~4°C となり、しかも、装置全体はリニアガイド部分の $V=150$ mm/s で 1°C の温度上昇を考えると、精密位置決め装置全体は非常に複雑な熱変形を起こしていることになる。基準点移動の原因は、図1で CD 間 (80 mm) の熱変形にあると予想されることを 2.2.2 項で述べた。従って、非冷却時は、精密位置決め装置の固定方法により熱変形が変化するので、どのような固定方法を採用するかは重要であり、今後の研究課題である。

6.2 ねじ軸表面温度と熱膨張

筆者らの研究¹²⁾によれば、ねじ外径 50 mm 程度までのボールねじ、台形ねじでは、ねじ切削や研削等急激な温度変化の場合を除いて、ねじ表面温度と中心温度は一致していて、半径方向の温度勾配は殆ど認められない。しかも細い送りねじを針金のようにみなすことができ、ねじの中心温度 $\theta(x)$ と表面温度 $\theta_s(x)$ は殆ど等しいことを示す。

本研究において、「変位制御」、「温度制御」なしに、ステージ往復実験中に 15 分おきにねじ回転を止めて、 $x=0$ mm (基準点) から $x=400$ mm の右端まで 50 mm おきに、表面接触式

(a) Thermal expansion change of $\Delta\ell_1$ at the ball screw end

(b) Thermal displacement change of datum point $\Delta\ell_2$

Fig.6 Thermal displacement changes of ball screw end $\Delta\ell_1$ and origin $\Delta\ell_2$ without Peltier module cooling

温度計で極短時間にねじ表面温度 $\theta_s(x)$ を測定した。その結果のうち、各速度で $t=60$ 分の場合の表面温度 $\theta_s(x)$ を図 8 に示す。同図(a)の場合は非冷却の場合であり、ねじ全体にわたって温度上昇していることがわかる。この $\theta_s(x)$ より次の式で熱膨張を計算することができる。

$$\Delta\ell'(x) = \alpha \int_0^x \Delta\theta_s(x) dx \quad (1)$$

ここで、 α はねじの熱膨張率を示し、 $\Delta\theta_s(x)$ はねじ表面温度 θ_s と室温 20°C との差を示す。

式(1)により $\Delta\ell'$ を計算した結果が図 8(b)である。この図を見ると $V=150$ mm/s の場合 $x=400$ mm で $\Delta\ell_1=10$ μm となる。ま

(a) Surface temperature of ball screw without cooling of housing and stage

(b) Thermal expansion ball screw $\Delta\ell'$ calculated from the above figure without cooling

Fig.8 Surface temperature of ball screw and thermal expansion without cooling

(a) Thermal expansion at ball screw end $\Delta\ell_1$

(b) Thermal displacement of housing $\Delta\ell_2$

Fig.7 Thermal displacement changes of ball screw free end $\Delta\ell_1$ and datum

た、このときの $\Delta\ell_2$ は図 6(b) より 3 μm なので、総熱膨張量は、 $\Delta\ell \approx 13$ μm となる。室温の変化の影響と思われる。

つまり、4.1 節の $\Delta\ell \approx \Delta\ell_1 + \Delta\ell_2 = 18$ μm と一致しない。その理由は、表面温度測定中は、ねじ軸の回転を止める間、約 3 分間の間にねじ軸が外径 15 mm と細いので冷却されてしまうことが原因の一つである。ねじ表面温度測定時間を、短くすることが必要である。この件については別報で報告するが、長尺ねじの熱膨張量をおおよそ把握するには有効な手段である。

また、図 9 の場合は「変位制御」、及び「温度制御」を同時に働かせた場合の結果を示す。同図(a)は表面温度 $\theta_s(x)$ を示し、いずれの速度 V でもほぼ 20°C となっていることがわかる。また同図(b)は式(1)に従って $\Delta\ell'(x)$ を示すもので熱膨張もほぼ 0

(a) Surface temperature of ball screw with cooling

(b) Thermal expansion $\Delta\ell'$ with cooling

Fig.9 Temperature of ball screw surface with cooling and thermal expansion with cooling

になっている。

6.3 冷却時の熱伝導

6.3.1 ボールねじナットの冷却

図 1(b) でステージ上面が冷却されるとき、ステージ全体を冷却してナットを介してボールねじを冷却している。このときペルチェモジュール自身の温度は、 $V=150$ mm/s では 18.0°C である。純銅製に比べて S55C の熱伝導率は小さいため、ステージを冷却しつつ、最終的にナットを 20°C にするという手法が考えられる。これにはさらなる研究が必要になる。一方、筆者らのいままでの研究¹²⁾によれば、負荷を受けたボールねじの回転中、冷却してもしないでも、ナットとボールねじ共にほぼ同じ温度になる。その結果図 1 でボールねじは冷却されて 20°C になるということである。

ボールねじの軸とナットの相対回転による発熱の要因を分解すると、次のようになる。

- ①潤滑油（グリース）の搅拌
- ②ボール同士の摩擦
- ③チューブなどの循環機構に関する摩擦
- ④ボールとナット及びねじ軸溝間の摩擦
- ⑤シールの摩擦

中でも①が大きいと言われている⁹⁾。これらを考慮して理論的に解析することが今後必要である。

6.3.2 ステージの姿勢変化

ここで、ステージ上面を冷却することから、ステージの姿勢変化（ピッチング、ヨーイング、ローリング）が考えられるが、ステージ上面がペルチェモジュールの搭載によりスペースがなくなってしまう、オートコロメータやレーザ測長器用反射鏡が取付け不能の為、姿勢変化は測定できなかった。ただし、三次元測定機を利用して「変位制御」、「温度制御」を用いた冷却状態で各姿勢変化の差は $t=10, 60$ 分で 2 秒以下であった。ただし、冷却中はステージを短時間停止してステージの各辺の X, Y, Z 座標を測定するのにステージの各場所で約 5 分必要であり、ステージ停止中に位置決め装置の過冷却があることを考慮しなければいけないので、上記の値は参考値である。

7. 結 論

次のような結論が得られた。

(1) ペルチェモジュールによる冷却をしない場合、精密位置決め装置が複雑な熱変形を起こしても、軸方向変位 Δl_1 をねじ軸支持側でギャップセンサにより測定すると同時に、位置決め装置の基準点移動量 Δl_2 を、ボールねじ固定側を含む純銅製（熱伝導が極めて大きい）のハウジングの側面で測定し、長さ

400 mm のボールねじの総熱膨張量 Δl を近似的に $\Delta l_1 + \Delta l_2$ として求めることができるようにした。

(2) ギャップセンサで得るねじ軸の軸方向変位 Δl_1 をステージ上に設置したペルチェモジュールにフィードバックし、ナット冷却することによる「変位制御」により、熱膨張量 Δl_1 を $1\ \mu\text{m}$ 以内に抑えた。

(3) ボールねじを支持するアンギュラ玉軸受を含み、基準点となるハウジングを熱伝導率の非常に大きい純銅構成とし、ハウジング自身を「温度制御」することによりハウジング全体の温度がほぼ 20°C の温度となることを利用して、ボールねじ支持のアンギュラ玉軸受の発熱による位置決め装置長手方向の原点移動量 Δl_2 をほぼ 0 にした。同時にボールねじ自身の冷却も行なえた。

(4) 上記(2)と(3)により、精密位置決め装置の全長 400 mm のボールねじについて、ステージ速度 V が 150 mm/s 以下でボールねじ総熱膨張量 Δl ($=\Delta l_1 + \Delta l_2$) を $1\ \mu\text{m}$ 以内とすることができた。

なお、本研究では、ステージ速度が $V=150, 100, 50$ mm/s で 300 mm ストロークを往復動する時のみについて扱っているが、さらにステージ速度 V が大きく、加減速度が異なるステージ移動、デューティ比のあるステージ移動の場合については、今後の研究課題である。

謝 辞

本研究を行うに当たり、平成 22～24 年度科研費基盤研究 (C) (22560123) と平成 25～27 年度科研費基盤研究 (C) (25420072) の一部を使用し、日本学術振興会に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 大塚二郎, 坂戸啓一郎: 図解精密位置決め機構設計, 工業調査会 (1995) 157-167.
- 2) 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, 精密機械, **50**, 4 (1984) 646-651.
- 3) 千田治光, 森脇俊道: 工作機械ボールねじの熱変形による加工誤差の抑制に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編) **72**, 717 (2006-5) 1167-1172.
- 4) 横山和宏ほか: ボールねじのリアルタイム補正による位置決め精度の向上 (第 2 報—室温変動化の位置決め誤差をゼロに補正—), 精密工学会誌, **74**, 10 (2008) 1062-1067.
- 5) 日本精工: 軸ナット冷却ボールねじ, CAT, NO. JSP-101027 (2015)
- 6) 三井精機工業: ボールねじとねじ研削盤について (カタログ), (2014) 22.
- 7) 例えば, 日本物理学会編: 学術用語集, 培風館 (1990) 401.
- 8) 日本精工 (株): ボールねじの摩擦と温度上昇・機構製品レポートサービス
https://www.jp.nsk.com/services/pm_techreport/ball06.html (2014) 1-11