



ボールねじ熱膨張量の推定精度向上*

小坂貴史** 横山和宏*** 斉藤航司† 鈴木孝昌†

Improvement of Estimation Accuracy on Thermal Elongation of Ball-screw

Takashi KOSAKA, Kazuhiro YOKOYAMA, Koji SAITO and Takamasa SUZUKI

As a base to improve the positioning accuracy by the real time compensation of the thermal elongation of ball-screw, it is important the improvement of the estimation accuracy on the thermal elongation of ball-screw. In this paper the improvement is carried out under two processes; namely, a process to improve the measurement accuracy of the elongation, in which it is eliminated the influences due to inertia force of table at the stroke ends and due to thermal elongation of the displacement measuring system during experiment, and another process to improve the estimation accuracy of the elongation, in which the longitudinal temperature distribution of the ball-screw is measured in detail at fifteen points by the optical telemeter system developed. It is clarified that the estimation accuracy of $-2.50 \sim +2.58 \mu\text{m}$ is accomplished under several conditions less than 20m/min table speed.

Key words: estimation accuracy, thermal elongation, ball-screw, temperature, optical telemeter system

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ている。これら工作機械やロボットの多くはボールねじで駆動されているので、高速送りの実施に伴う支持軸受の発熱量およびボールねじ・ナット間の発熱量が増大し、ボールねじ熱膨張による位置決め精度の低下が生じる。この対策として、サーボモータの電機子電流からボールねじの温度分布と熱膨張量を計算する研究¹⁾および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。

他方、著者らの一部は、光テレメータシステム^{3)~5)}を用いて中空ボールねじの温度分布を測定し、これを基にボールねじ熱膨張量を推定⁶⁾して、ボールねじの熱膨張による位置決め精度の低下をリアルタイムで補正しようとしている。補正後の精度を達成する基礎として、熱膨張量の推定精度を向上させる必要がある。さらに、推定精度を正確に評価する基礎として、熱膨張量測定値の精度を向上させる必要がある。

本研究では、測定ジグの熱膨張量を補正するとともに、テーブルのストローク端での加減速時の慣性力に基づく弾性変形の影響を除去し、ボールねじ熱膨張量の測定精度を向上させている。さらに、温度測定点を 15 点に増設するとともにその配置を検討し、熱膨張量の推定精度向上を行っている。また、ボールねじ用ナットや軸受支持部などの非回転体の温度からの熱膨張量推定法の精度についても言及している。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

実験に使用したボールねじの諸元を表 1 に示す。このボールねじを組み込んだ 1 軸の実験装置を図 1 に示す。サーボ

モータ側のボールねじ支持軸受の位置でスラスト方向の位置を固定したシングルアンカ方式で、サーボモータのパルスをフィードバックするセミクローズド制御を行っている。図 1 中の反射テープ・光電スイッチ・マイクロセンス・サンプルホールド IC・A/D 変換器は、3.3 で詳細に説明するように、テーブルストローク中央におけるボールねじ 1 回転中の変位計出力のピーク値をホールドする機能を導入することにより、ストローク端における加減速時の慣性力の影響を除去して、熱膨張量測定値の精度を向上させるために使用している。

図 1(b)中に、ボールねじの $\phi 17\text{mm}$ 中空穴内面の温度測定点の配置を示す。サーボモータはフレキシブルカップリングを介しているため、またリネヤガイドはテーブルを介しているため、ボールねじの熱膨張には殆ど影響しない。従って本研究において、ボールねじの熱膨張を支配する熱源は、シングルアンカ用軸受、ボールねじ用ナット、自由側支持軸受および環境である。ここでは、文献⁶⁾の場合に比べ、測定点数を 15 点に増設し、主要熱源の 1 つであるアンカ用支持軸受近くの温度分布を詳細に測定している。文献⁴⁾と同様にして校正した光テレメータシステムの精度を図 2 に示す。15 チャン

Table 1 Specification of ball-screw

Outer diameter	$\phi 40\text{mm}$
Inner diameter	$\phi 17\text{mm}$
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

* 原稿受付 平成 16 年 12 月 27 日

** 学生会員 新潟大学大学院自然科学研究科

*** 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)

† 新潟大学工学部

ボールねじ熱膨張量の推定精度向上

ネル間の温度変化の最大差は、ウォーミングアップ 20min の後は 0.05°C 以内となっている。

2.2 実験方法

表 2 に実験条件と実験番号を示す。テーブルの移動速度は 20m/min(；ボールねじ回転数 1667rpm に相当)までの 4 種類とした。図 3 に移動熱源であるナットの鋼球循環範囲とそのトラバース範囲を示す。図 3(a) に示すパターン FS は用いたボールねじのフルストロークをテーブル(；従ってナット)がトラバースし、熱膨張測定の対象範囲 935.5mm の 61.5% を移動熱源が加熱する場合である。図 3(b) に示す CS は 935.5mm の 31% を加熱し、ch5~ch6 の領域がほぼ対称に加熱範囲に含まれる場合である。図 3(c) の ES は 935.5mm の 31% を加熱し、ch5 が加熱範囲のほぼ中央で、ch4, ch6 が加熱範囲の境界にほぼ一致する場合である。いずれの実験においても、図 3(a) 中の 935.5mm に対する熱膨張量を日本 ADE 社製マイクロセンスで測定する。中空ボールねじの温度測定用の光テレメータシステムの電源を 1hr ON にしてウォーミングアップした後、実験を開始する。熱膨張量が変位計の測定可能範囲 50μm 近くに達するまでテーブルを駆動し、その後 60min 間停止し自然冷却する。引き続き同様の駆動と停止を行った。ボールねじ温度、変位計出力、実験装置各部の温度、雰囲気温度の測定は 1s 毎にデータをサンプリングし、パソコンに保存している。

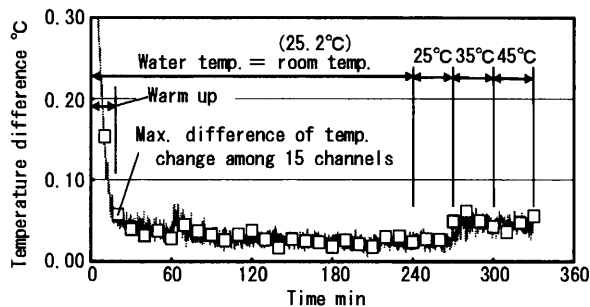
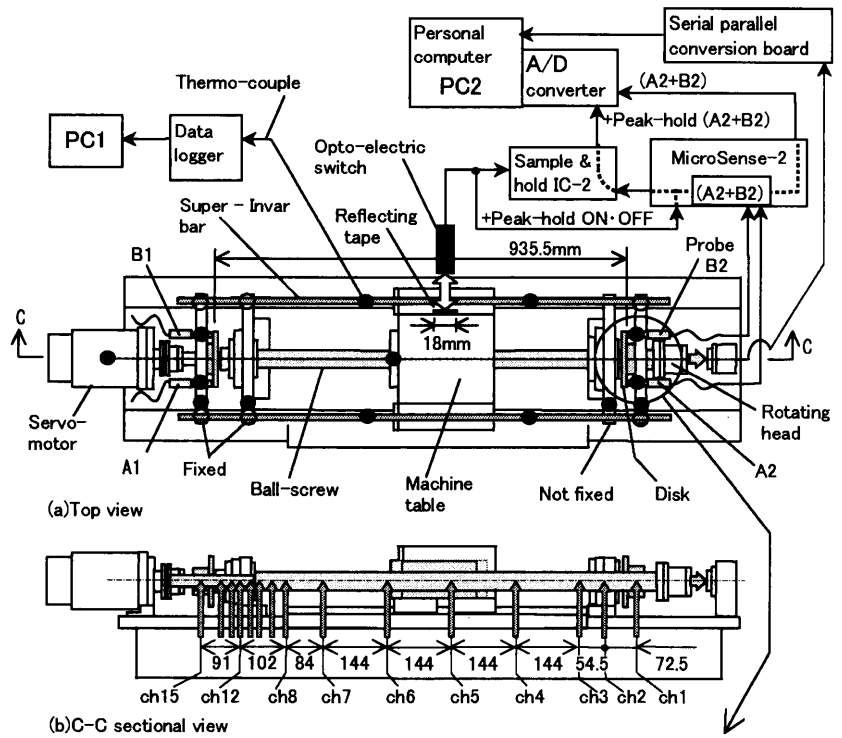


Fig. 2 Measurement accuracy of the optical telemeter system adopted

Traverse condition	Table speed Fm/min			
	2.5	5	10	20
Pattern FS (:Full stroke) [z-0~z-400mm]	Experiment No. FS-2.5	No. FS-05	No. FS-10	No. FS-20
CS [z-130~z-243]	No. CS-2.5	No. CS-05	No. CS-10	No. CS-20
ES [z-202~z-315]	No. ES-2.5	No. ES-05	No. ES-10	No. ES-20



- : Temp. measuring position by conventional data-logger and PC1
- ↑ : Temp. measuring position of the ball-screw by the optical telemeter system and PC2

Fig. 1 Measurement of ball-screw thermal elongation

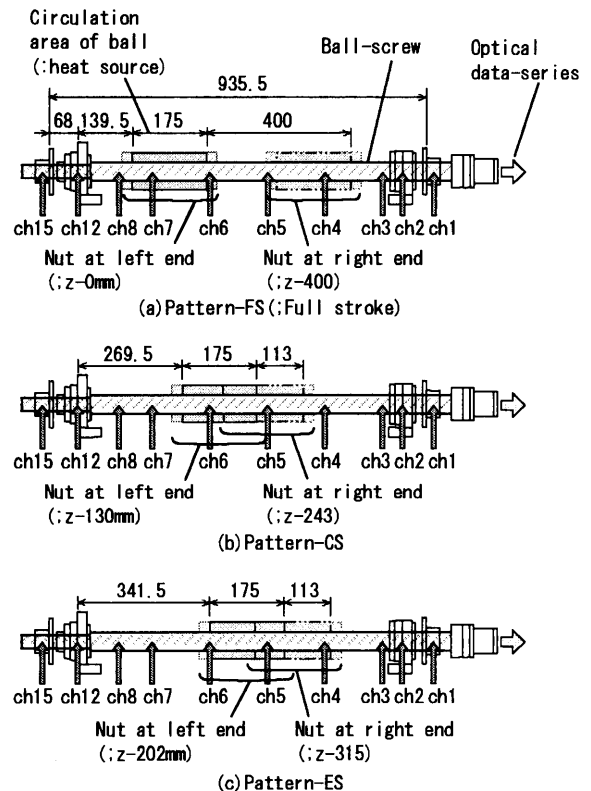


Fig. 3 Traverse pattern of table on the ball-screw

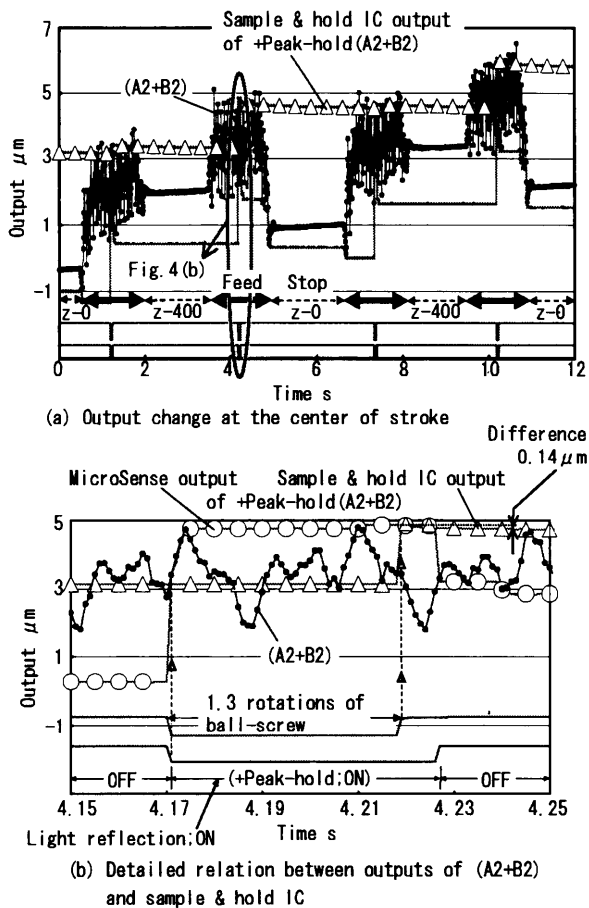


Fig. 4 Output change of +Peak-hold(A2+B2) without inertia force at the center of stroke

3. ボールねじ熱膨張量の測定値

3.1 熱膨張量の測定方法

ボールねじ熱膨張量を測定するため、図1に示すように、ボールねじに固定した2枚の円板の表面間距離935.5mmの変化を非接触変位計マイクロセンスで測定する。回転ヘッド側にマイクロセンスのプロープA2,B2をボールねじの軸芯と同一高さで、手前側と奥側の対称な位置に設置する。また、サーボモータ側にプロープA1,B1を設置する。4つのプロープをそれぞれのジグに固定し、ジグを熱膨張係数が小さいスーパインバ製丸棒で連結しているので、 $\{(A1+B1)/2+(A2+B2)/2\}$ により回転軸芯における熱膨張量を求めることができる。

しかし、円板をボールねじの回転軸芯に垂直に固定することは極めて困難であり、固定した状態で円板表面は必ずしも平面でないで、ボールねじの1回転毎に変位計の出力が周期的に変動する。そこで、ボールねじが回転中の熱膨張量は、変位計内部でアナログ和演算を行わせた後、最大値を保持する機能を利用して、+Peak-hold(A1+B1)と+Peak-hold(A2+B2)を測定する。両者それぞれの1/2の和を計算し実験開始時との差を計算して、熱膨張量としている。

3.2 プロープ・スーパインバ製丸棒の熱膨張量の補正

図1(c)の拡大図に示すように、支持ジグから突き出したプロープが温度上昇すると、プロープの熱膨張に基づきマイクロセンスの変位出力が増加するので、予め求めておいた係数⁶⁾を掛けて補正を行う。補正量は最大0.6μmであった。また、図1(a)に示すように、4個のマイクロセンスプロープは支持ジグとスーパインバ製丸棒で連結されている。スーパインバ

製丸棒が温度上昇し熱膨張するとマイクロセンスプロープ間の距離が増加し、変位出力が減少するので、スーパインバ製丸棒の温度上昇から熱膨張量を計算し、補正を行っている。補正量は最大0.8μmであった。これらの温度上昇は、本研究の実験条件においては、いずれの実験においてもほぼ同一の変化を示した。

3.3 テーブル慣性力の影響の除去

本研究では、ボールねじ駆動中の熱膨張量を+Peak-hold値の増加量から求めるので、テーブル移動方向が反転する際のテーブル慣性力が+Peak-hold値に及ぼす影響を除去することが望ましい。この対策として、一定速度で移動しているストローク中央における+Peak-hold値を測定した例を図4に示す。図4(a)においては、ストローク中央における(A2+B2)に等しい+Peak-hold(A2+B2)がサンプルホールドICの出力として得られている。図4(a)における信号の詳細な関係を図4(b)に示す。図中下方の信号は光电スイッチからの出力である。光电スイッチは、図1(a)に示すように、ボールねじ1.5回転相当のテーブル移動量と同一幅(18mm)の反射テープからの反射光を検出して、その出力が変化する。反射光を受光している1.5回転相当の間のみマイクロセンスの+Peak-hold機能がONになるので、この間は(A2+B2)の最大値に一致するようにマイクロセンスの+Peak-hold(A2+B2)出力(図4(b)中の○印)が変化している。他方、反射光の受光開始(4.17s)からボールねじ1.3回転の時間が経過した時刻から、サンプルホールドICが+Peak-hold(A2+B2)出力(図4(b)中の△印)を保持する。その値を1s毎の測定によりパソコンPC2に入力する。図の例では、マイクロセンスの+Peak-hold(A2+B2)出力とサンプルホールドICの保持出力との差は0.14μmである。この差は、本研究の実験条件の範囲では、最大0.19μmであった。

3.4 熱膨張量の測定値

前節までに述べたように、ボールねじ回転中の熱膨張量は $\{+Peak-hold(A1+B1)/2+\{+Peak-hold(A2+B2)/2\}$ とその初期値との差で求められる。この初期値はテーブルが移動を開始して、最初にストローク中央に到達したときの測定値であるので、最初のストロークの1/2における熱膨張量を含んでいない。そこで、最初のストロークの1/2における熱膨張量は続く1ストローク中の熱膨張量の1/2に等しいと仮定して、加算補正する。また、第1回目のテーブル駆動期間の最終ストロークの中央で得られる+Peak-hold出力からテーブル停止までの熱膨張量については、その直前の1ストローク中の熱膨張量の1/2に等しいと仮定して加算補正し、テーブル停止時の熱膨張量を求める。

つぎに、ボールねじが停止した状態での自然冷却中の熱膨張量は、+Peak-hold出力ではなく、同時に測定している(A1+B1)出力と(A2+B2)出力とから、自然冷却中の $\{(A1+B1)/2+(A2+B2)/2\}$ の変化を用いて計算する。ただし、テーブル停止時の熱膨張量と自然冷却期間中の最初の熱膨張量が等しくなるよう、冷却期間中の測定値をスライドさせて、ボールねじ回転中および停止中の熱膨張量を求める。上記につづく第2回目のテーブル駆動期間中および停止中の熱膨張量も、同様にして求める。

得られた熱膨張量測定値とボールねじ温度上昇の例を図5、図6、図7、図8に示す。図5(a)におけるテーブル駆動中のボールねじ熱膨張量の増加速度は、図6(a)、図7(a)の場合の熱膨張量に比べて急激であることが分かる。これはストローク

の長さが 400mm と、図 6(a)、図 7(a)の場合の 113mm に比べて長いので、20m/min の一定速度期間の時間割合が長く単位時間当たりの発熱量が大きいことによるものと考えられる。これに対応して、定位置熱源である支持軸受に相当する図 5(b)中の ch12 と ch2 の温度上昇の速度が、図 6(b)、図 7(b)中のそれらに比べて、急激であることが分かる。図 8 はテーブルの送り速度が小さいので、図 5 の場合に比べて、熱膨張量および温度上昇が緩やかに変化している。

図 6 と図 7 は、テーブル移動速度およびナットのストローク長さは同一であるが、図 3(b)(c)に示すようにストロークの位置が異なっている。しかし、両者の熱膨張量の増加速度がほぼ同一の傾向を示すのは、いずれの場合のナットのストローク範囲も熱膨張量測定用の固定円板に対してボールねじの十分中央にあり、熱膨張量測定値がボールねじ各部の熱膨張の積分値として得られることによるものである。図 6(b)の場合は、図 3(b)に示すように、移動熱源であるナットが ch5 と ch6 をほぼ同等に加熱するので、両者の温度上昇の速度がほぼ同一になっている。これに比べ図 7(b)の場合は、図 3(c)に示すように、ナットが ch5 を中心に、ch4 とその次に ch6 を加熱するので、ch5 の温度上昇速度が速く、続いて ch4、ch6 の順番になっている。

図 6(b)中の ch5、ch6 の温度上昇の最大値に比べ、図 5(b)中のそれらが小さいのは、図 3(a)のようにナットがボールねじの広い範囲を平均的に加熱するとともに、アンカ用支持軸受付近の温度上昇が大きいことおよび熱膨張量の最大値がマイクロセンサの測定可能範囲に収まる様にほぼ同一の最大変位量でテーブルを停止したことによるものと考えられる。

4. ボールねじ熱膨張量の推定値および推定精度

4.1 熱膨張量の推定値

ボールねじの温度測定に用いる光テレメータシステムは全 16 チャンネルである。光テレメータシステムの温度測定精度を向上させるために 1 チャンネルを電気回路基板の温度測定に使用するので、ボールねじの温度測定点は図 1(b)に示す 15 点である。中空ボールねじの空洞と同一直径の $\phi 17\text{mm}$ の塩ビパイプの外周に、厚さ 0.07~0.08mm に押しつぶした鉄・コンスタンタン熱電対線を露出させる。塩ビパイプをボールねじ空洞に挿入すると、塩ビパイプの全長にわたってスリットを加工しているので、塩ビパイプが弾性変形しその復元力により、図 1(b)に示す 15 点の温度を測定できる。

得られた温度上昇の一部を図 5(b)、図 6(b)、図 7(b)に示している。テーブルの駆動とともに、ボールねじの各部が温度上昇している。1 回目の温度上昇が最大になる時刻におけるボールねじの軸方向温度上昇の分布を図 5(c)、図 6(c)、図 7(c)に示す。この時刻におけるボールねじ熱膨張量の推定値を、15 点の温度上昇を示す図中の口印と横座標軸とで囲まれる面積と、熱膨張係数との積で求める。即ち、ボールねじ熱膨張量の推定値を式(1)により求めている。同様にして、各時刻の熱膨張量の推定値を求め、図 5(a)、図 6(a)、図 7(a)中に示している。

4.2 詳細な温度分布からの推定精度

図 5(a)、図 6(a)、図 7(a)、図 8(a)中には、既に求めた熱膨張量の測定値と式(1)による推定値との差も示している。図 5(a)と同一条件における、文献⁶⁾の推定値と測定値との差は -4.81~+2.21 μm であったが、本研究における図 5(a)中の測

$$X = \rho \left\{ \begin{aligned} &725 \times \frac{(\Delta T_1 + \Delta T_2)}{2} + 54.5 \times \frac{(\Delta T_2 + \Delta T_3)}{2} + 144 \times \frac{(\Delta T_3 + \Delta T_4)}{2} \\ &+ 144 \times \frac{(\Delta T_4 + \Delta T_5)}{2} + 144 \times \frac{(\Delta T_5 + \Delta T_6)}{2} + 144 \times \frac{(\Delta T_6 + \Delta T_7)}{2} \\ &+ 84 \times \frac{(\Delta T_7 + \Delta T_8)}{2} + 30 \times \frac{(\Delta T_8 + \Delta T_9)}{2} + 30 \times \frac{(\Delta T_9 + \Delta T_{10})}{2} \\ &+ 24 \times \frac{(\Delta T_{10} + \Delta T_{11})}{2} + 18 \times \frac{(\Delta T_{11} + \Delta T_{12})}{2} + 15.5 \times \frac{(\Delta T_{12} + \Delta T_{13})}{2} \\ &+ 20 \times \frac{(\Delta T_{13} + \Delta T_{14})}{2} + 55.5 \times \frac{(\Delta T_{14} + \Delta T_{15})}{2} \end{aligned} \right. \quad \dots(1)$$

ただし、
 X ; ボールねじ熱膨張量の推定値
 ρ ; ボールねじの熱膨張係数
 $12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (実測値, SCM420)
 ΔT_i ; 測定点 i の温度上昇

定値と推定値との差は +0.34~+2.58 μm と、その変動幅が小さくなっている。これは、プローブおよびスパインバ製丸棒の熱膨張量の補正だけでなく、テーブル慣性力の影響の除去および 1/2 ストローク相当の熱膨張量の補正による測定値の精度向上により、テーブル駆動開始時のデータのジャンプがなくなったことが一因である。もう 1 つの要因は、温度測定点を増設し、温度上昇の最大値を示す点および最小値を示す点を含め、ボールねじ温度上昇の測定値を結ぶ折れ線と実際の温度上昇の分布とが良く一致するように、温度測定点の数と位置とを決定したことによるものと考えられる。

表 2 に示す全ての実験におけるデータを用いて求めた、ボールねじ熱膨張量の推定値と測定値との関係を図 9 に示す。図 9(a)は、軸方向の 15 点の温度上昇からの熱膨張量推定値を用いた場合である。 $Y=X$ なる推定式に対し、最も離れたデータを通る 2 本の平行な直線から、推定精度は +2.58~ -2.50 = 5.08 μm であることが分かる。

熱膨張量が変位計の測定可能範囲に収まる範囲で実験を行ったので、図 9(a)のプロット点は 0~50 μm に制限されている。しかし、 $Y=X$ なる推定式に対して、プロット点が上下にほぼ均等に分布しているので、より大きな熱膨張量の条件においても、プロット点の分布範囲が右上に伸びるだけで、上記の 2 本の平行線の間隔はあまり広がらないと考えられる。従って、表 2 の条件以外の駆動条件においても、推定精度はあまり悪くならないものと考えられる。

4.3 粗い温度分布からの推定精度

文献⁶⁾の場合と同様に 7 点の温度上昇から、例えば図 5(c)中の●印を用いて推定値を求めた場合の結果を図 9(b)に示す。図 5(c)中に示したように、推定値が異なる結果、図 9(b)の推定精度は 7.32 μm であり、図 9(a)の推定精度より悪いことが分かる。図 9(b)に見られるように、熱膨張量が増加するとともに推定値が増加し、データのプロット点が $Y=X$ に対して右方向に拡大することが分かる。従って、本研究の条件以外の条件での結果を含めると、推定精度が悪くなる傾向を有するものと考えられる。この傾向は、文献⁶⁾の場合についても同様であり、測定値 Y と 7 点の温度上昇から求めた推定値 X とを $Y=X$ により比較した処、推定精度 +4.81~ -3.30 = 8.11 μm であった。

つぎに、7 点の温度上昇から推定値を求めた文献⁶⁾の図 10 においては、推定精度 +3.19 ~ -3.13 = 6.32 μm であり、15 点の温度上昇から求めた本研究の図 9(a)における 5.08 μm に近い精度が得られている。これは、文献⁶⁾の図 10 においては、全ての実験について 7 点の温度上昇から求めた

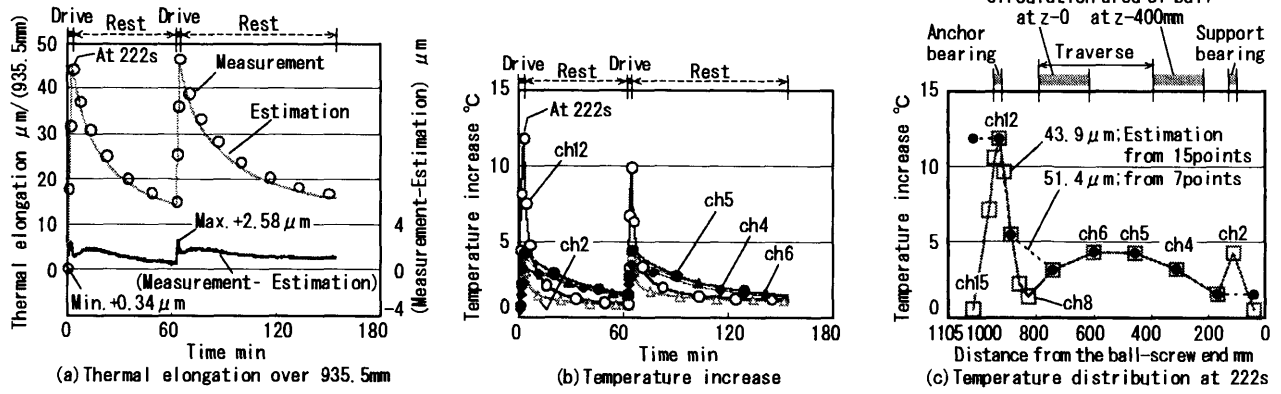


Fig. 5 Thermal behavior of the ball-screw (No. FS-20, z=0~z=400, $F=20\text{m/min}$)

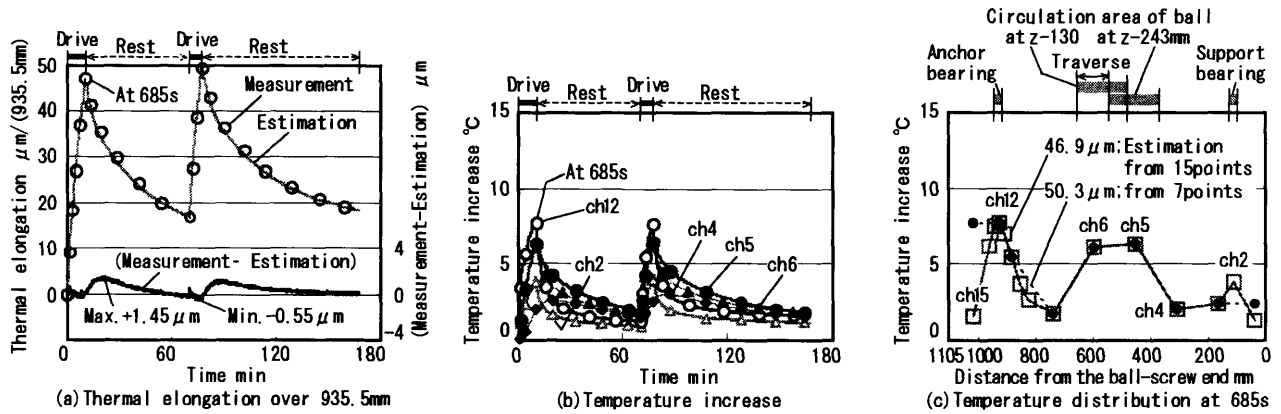


Fig. 6 Thermal behavior of the ball-screw (No. CS-20, z=130~z=243, $F=20\text{m/min}$)

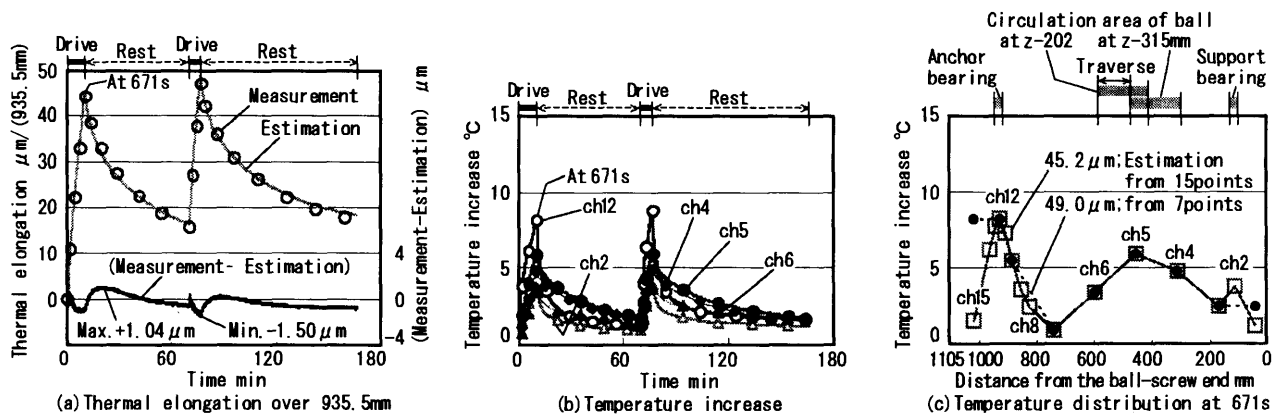


Fig. 7 Thermal behavior of the ball-screw (No. ES-20, z=202~z=315, $F=20\text{m/min}$)

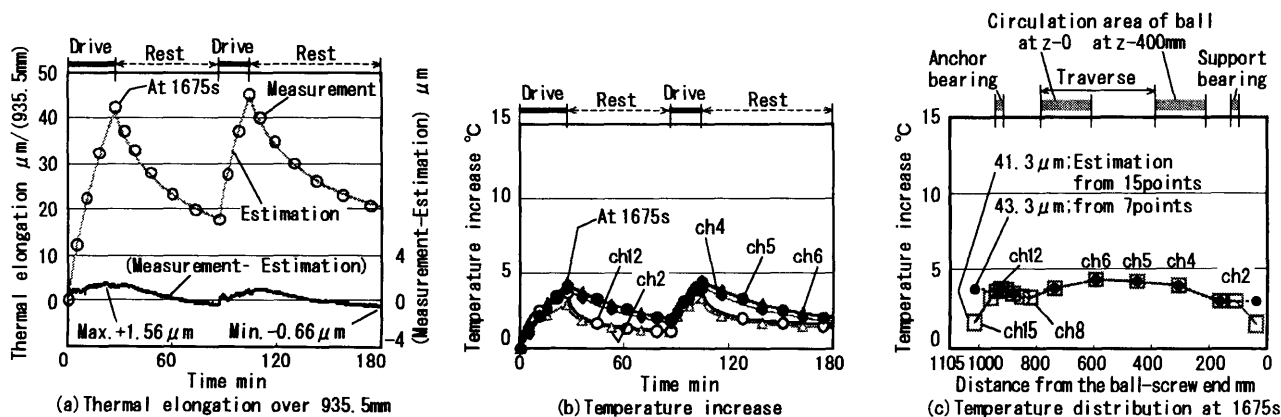


Fig. 8 Thermal behavior of the ball-screw (No. FS-2.5, z=0~z=400, $F=2.5\text{m/min}$)

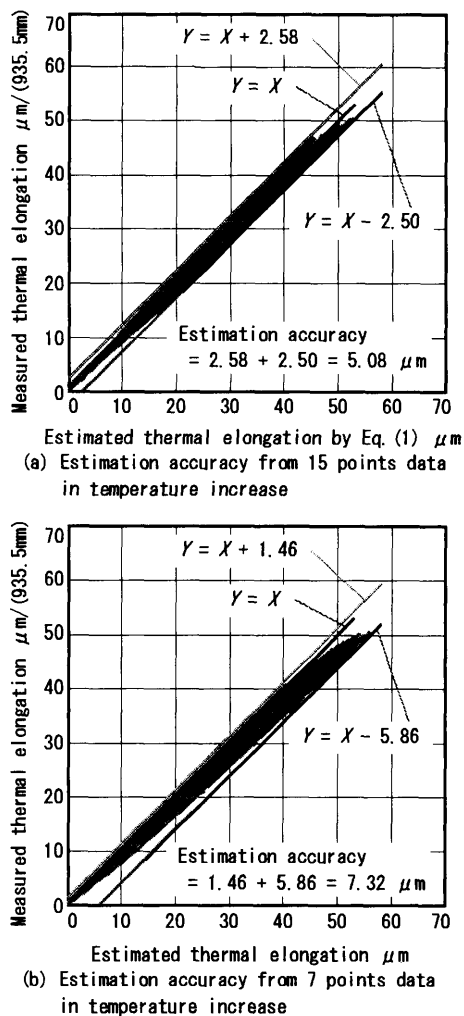


Fig. 9 Estimation accuracy of the ball-screw based upon whole data in Table 2

推定値に対し、さらに最小二乗法により近似直線 $Y = aX + b$ を求め、これに平行な 2 本の直線から推定精度を決定したからである。しかし、この方法では上述したプロット点が $Y = X$ に対し右方向に拡大する傾向が存在するので、実験時と異なる条件の駆動においては推定精度が悪くなる可能性がある。

即ち、本研究の方法では、温度測定点を 15 点に増設し、温度上昇から単純熱膨張として推定値を求め $Y = X$ により比較しているため、表 2 の条件以外の駆動条件においても、推定精度はあまり悪くならないものと考えられる。

4.4 ボールねじ温度変化についての考察

つぎに、軸方向における温度上昇の分布と速度について検討する。図 5(b) の 222s における温度上昇の分布を図 5(c) に示す。15 点の温度上昇と横座標軸とで囲まれた面積と、熱膨張係数の積として、この時刻の熱膨張量を求めるので、温度上昇の分布が重要であることがわかる。ch12, ch2 はそれぞれアンカ用軸受および自由側支持軸受の位置のボールねじ温度上昇である。定位置熱源であるこれらは、ch12 に見られるように、送り速度が大きい場合には、駆動と同時に急速に温度上昇するが、停止中の温度降下も急速であることが図 5(b) から分かる。これは、軸受と軸受支持ブラケットを経由して装置ベースに固体内の熱伝導による放熱効果が大いことによるものと考えられる。

送り速度が大きい場合、移動熱源であるボールねじナットにおける発熱量も大きい、これにより加熱される ch4, ch5, ch6 は、通過所要時間が短く加熱時間が短くなるという効果も存在するので、比較的緩やかに温度上昇する。停止中の温度降下が緩やかであるのは、主として空中への熱伝達により放熱効果が小さいことによるものと考えられる。従って、222s における温度上昇分布は図 5(c) のようになるが、図 5(b) から考えると、テーブル停止中の温度上昇分布では、ch4, ch5, ch6 に比べて ch12 の温度上昇が小さい分布になる。

5. 結 言

熱膨張に基づく位置決め精度をリアルタイムで向上させることを目標に、ボールねじ熱膨張量の推定精度を向上させる研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) ストローク端のテーブル慣性力による変位測定値への影響を除去するため、テーブルがストローク中央にある時のボールねじ熱膨張量を測定することにより、熱膨張量の測定精度を向上させることができた。
このため、ストローク中央における測定値をサンプル・ホールドし、一定周期でデータを収集しているパソコンにデータを転送するシステムを作成した。
- (2) ボールねじ熱膨張量の推定精度を向上させ、935.5mm の区間における熱膨張量について、推定精度 $+2.58 \sim -2.50 = 5.08 \mu\text{m}$ を得ることができた。
- (3) 推定精度を向上させるには、温度測定点として、温度上昇の最大値を示す点および最小値を示す点を必ず含める必要がある。さらに、温度上昇の測定値を結ぶ折れ線と、実際の温度上昇の分布とが良く一致するように、温度測定点の数と配置を決定する必要がある。

これらの条件を満たす温度分布を用いれば、単純熱膨張として推定することにより、実験していないより広範な条件下でも、良い推定精度が得られると考えられる。

謝 辞

非接触変位計マイクロセンスの 1 セットを貸与していただいた日本エー・ディー・イー(株)に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 垣野義昭, 森一晃, 夏書強, 木本康雄, 森山浩光, 東本暁美: NC 工作機械におけるボールねじの熱変位補正, 精密工学会誌, **54**, 9 (1988)1753.
- 2) 幸田盛堂, 村田倂二, 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, 鈴木孝昌, 小林滋, 松平雄策, 永井豊: 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 1 報 小型化, 小電力化および回路構成) 精密工学会誌, **67**, 12(2001)2037.
- 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) T.Kodera, K.Yokoyama, K.Miyaguchi, Y.Nagai, T.Suzuki, M.Masuda and T.Yazawa: Real-time Estimation of Ball-screw Thermal Elongation Based upon Temperature Distribution of Ball-screw, JSME Int. J., **47**, 4, C(2004)1175.