

ボールねじ式送りテーブルの位置・角度補正

田丸 雄摩^{*1}, 清水 浩貴^{*1}, 加茂田 浩史^{*2}

Correction of positioning and angular errors for ball screw feed unit

Yuuma TAMARU^{*1}, Hiroki SHIMIZU^{*1} and Hiroshi KAMODA^{*2}

^{*1} Dept. of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensui-Cho, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550 Japan

^{*2} ISEKI&CO.,LTD

700 Umaki-Cho, Matsuyama, Ehime, 799-2692 Japan

Received** August 2014

Abstract

In the present study, we developed a new feed correction mechanism which corrected not only a positioning error (i.e., feed deviation) but also an angular error (i.e., yaw of a table). A correction mechanism including two piezoelectric actuators was constructed and installed between double nuts. The correction mechanism corrects positioning error if both piezoelectric actuators are expanded to the same length, and corrects angular error if one piezoelectric actuator is expanded and the other is contracted. First, the positioning and angular errors correction functions were investigated separately. A load was applied to one side of the table in order to simulate a counter force during machining. In the positioning error correction, a low-frequency component of positioning error was corrected effectively under the condition that the load for the table was set to at least 50 N. In the angular error correction, the correction capability was comparable to that of the positioning error correction up to the maximum load torque to the table, 1.4 Nm. The load torque was limited to 1.4 Nm because both piezoelectric actuators reached their saturation voltage. Finally, simultaneous correction of positioning error and angular error was examined, and the simultaneous correction capability was confirmed to be equivalent to the separate correction capabilities.

Key words : Feed Table, Ball Screw Drive, Positioning Correction, Angular Correction, Machine Element, Piezo-Element, Actuator

1. 緒 言

工作機械において送りテーブルは重要な役割を果たし、中でも除去加工では高負荷の下での位置決め精度が要求される。なぜなら除去加工では工具で削り出しを行う接触を伴った加工が大半を占め、加工反力を生じるがその力の大きさ、方向は時々刻々変化し予測し得ないからである。この加工反力はテーブル送りに誤差をもたらし、加工精度の低下を招く一因となる。

送り運動の伝達要素はダイレクトドライブ方式が増えてきたものの送りねじ方式も一定程度存在する(大岩, 勝木, 2011)。ダイレクトドライブの代表はリニアモータであるがボールねじと比べると剛性が低い、推力が小さい等(堀内, 2001), (大塚他, 2001)の理由から高負荷での加工用途には使いづらい面がある。そこで本研究では特に加工負荷に対して有利なボールねじ送りテーブルを採り上げ、送り誤差の補正を試みる。

加工用のテーブルでは経路補償が必須であり、加工中における送り誤差の大小が加工誤差に影響する。誤差補正の例として送りねじの熱膨張による位置決め誤差の補正(横山他, 2008a, 2008b), (Xu, et al., 2011)がある。また XY テーブルでは円弧運動で生じる象限切替突起誤差の補正(海野他, 2008)がある。これらはいずれも特定の要因で生じる誤差を補正するものであるが、汎用的な補正手法は見当たらないようである。

本研究では粗微動一体形テーブルとして構築した高剛性のボールねじ式送り装置(中島他, 1999)のダブルナット間座部に新たに開発した補正機構を組み込んだ。本機構は送り誤差の発生要因を特に限定せずに補正できることを特徴とする。さらに一般的な送り誤差補正はサーボモータの軸回転制御によるテーブル進行方向の位置補正であるが、本論文ではアクチュエータとして積層型ピエゾ素子（以下ピエゾ）を用いる補正機構を提案し、また補正のためのフィードバック制御にはピエゾだけを用いる。そのため本機構による補正ではサーボモータの軸回転制御を行わせることなくテーブル位置に加えてテーブル回転角度の補正も可能にする。

2. テーブル送り誤差の補正機構と補正原理

テーブルの送り誤差はガイドレールやボールねじなど構成部品の精度によるもの、テーブル送りで生じるガイドローラやボールの転動によるもの、装置の設置環境によるものなど種々の要因が挙げられる。さらにテーブルが外力を受ける場合、その反力による誤差が加わる。特に外力が変動すると送り誤差を予測して補正することは不可能である。また加工用途のテーブルではテーブル送中も継続して加工が進行する。したがって CP (Continuous Path) での補正が肝要である。そこでテーブルの位置および回転角度をリアルタイムで計測し連続的に送り誤差を補正することを試みる。位置はねじ軸方向である X 軸成分で表し、誤差を位置誤差と定義する。また、回転角度はテーブル鉛直軸である Z 軸回りの回転成分で表し、同様に角度誤差と定義する。図 1 はガイドレールのうねりやテーブルが外力を受けることで生じる送り誤差の発生例を模式的に示す。

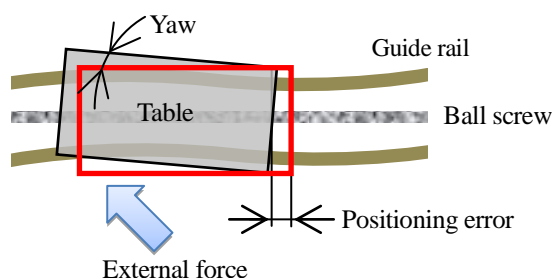


Fig.1 Positioning and angular errors in a linear motion table

2・1 補正機構

図 2 に補正機構の模式図を示す。市販のボールねじ式送りテーブルのねじ軸ダブルナット間に送り補正のための機構要素を組み込んでいる。アクチュエータには 2 個のピエゾを用い、ねじ軸をはさんで左右対称に配置した。また、テーブルのガイドレール等による拘束力および外力に抗するため 20000N を出力できるタイプ：NEC トーキン AE2525D15F、無負荷時最大変位 15.6 μm を選定した。PZT1, PZT2 の伸びは各々個別に調節することが可能であり、位置、角度個別での補正ならびに両者の同時補正を行わせる。ピエゾはダブルナット間に予圧をかけた状態で設置するが、その反力を受ける。さらに安全を考慮して最大印加電圧の 67%で駆動させるため実際のピエゾの伸びは 5.4 μm に制限される。そのため補正可能な伸縮範囲は正負等量にすると $\pm 2.7\mu\text{m}$ となる。

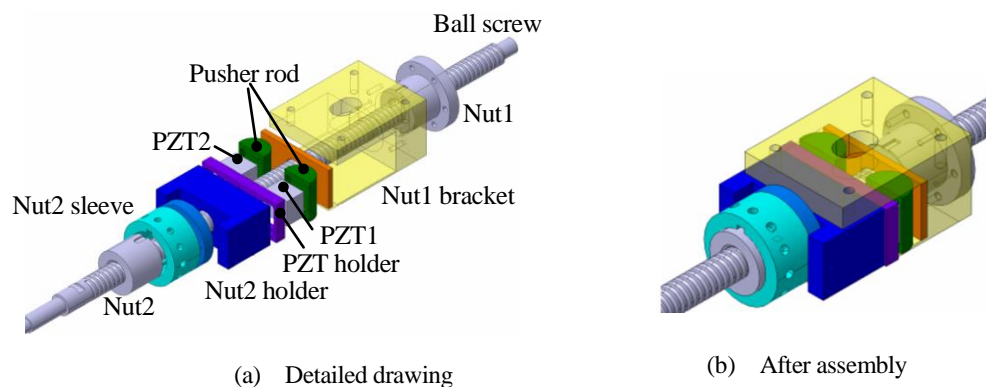


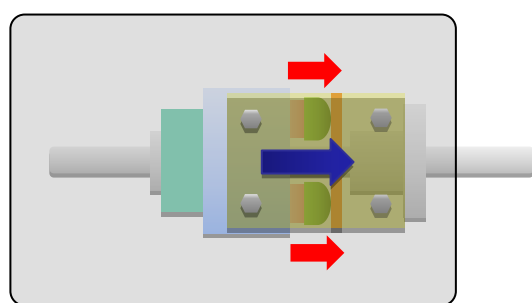
Fig.2 Feed correction mechanism

2・2 位置誤差補正原理

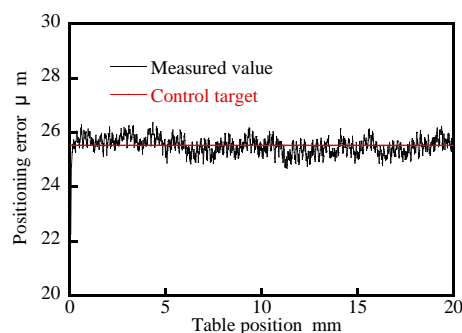
図 3-(i)に位置誤差の補正原理を示す。(a)は補正機構の挙動の模式図である。ナット 1 ブラケットはテーブルとボルトで締結されている。ピエゾを伸縮させると主にダブルナット間のねじ軸やねじ山が弾性変形してテーブルに補正変位が与えられる。位置補正はねじ軸方向の誤差を補正するためピエゾ 1, 2 を同時に等量伸縮させる。(b)はテーブル送りに対する位置誤差の一例を示す。横軸はテーブル送り量の指令値であり、サーボモータに入力される指令回転速度と時間の積で算出する。以下、本図以降のテーブル位置は全てこの値である。縦軸は位置誤差を表し、テーブル送り量の指令値と測定値との差で算出する。位置誤差を詳細にみるとボール転動に起因する高周波成分にねじ軸リード誤差に起因する低周波成分が重畳して表れている。さらに始動直後に $25\sim 26\mu\text{m}$ 程度の誤差が発生しているがこれは起動時に生じる初期位置誤差である。ここで生じた位置誤差は装置固有でありテーブルが無負荷の定常運転で生じたものである。今回は当該状態での送りを定常送りと定義した。始動直後のような大きな誤差はねじ軸回転駆動のパラメータ調整を行うことで除去可能である。高周波成分の誤差変動幅は $1\mu\text{m}$ 程度でありボールねじの最高等級精度である C0 級の範囲に十分収まっている。そこで今回はテーブル送り動作中における補正能力(補正可能な変位誤差)を評価するために高周波成分より変動幅の大きい低周波成分を対象として補正を行った。なおピエゾ伸縮のみによる補正効果を明らかにするためテーブル送りは定常送りで行っている。さらに定常送りでの始動直後 10 点の位置誤差を平均した値を定常位置誤差と定義し、図 3-(i)-(b)に示される位置誤差補正の制御目標に設定した。

2・3 角度誤差補正原理

図 3-(ii)に角度誤差の補正原理を示す。補正機構は位置誤差補正と同様である。角度誤差補正ではテーブルを Z 軸回りに補正動作させるためピエゾ 1, 2 の伸縮量に差を設ける。テーブルの案内要素を弾性変形させること

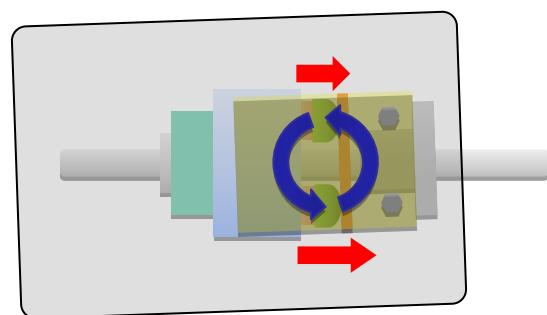


(a) Schematic illustration of motion correction

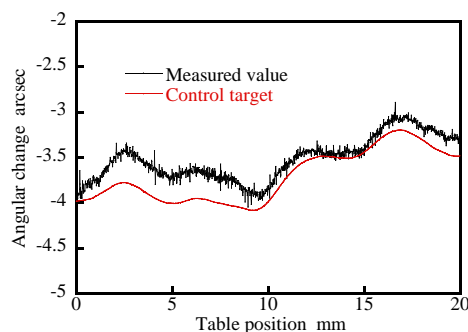


(b) Actual positioning errors

(i) Schematic of positioning error correction



(a) Schematic illustration of motion correction



(b) Actual angular change

(ii) Schematic of angular error correction

Fig.3 Feed error correction method

で補正変位が与えられる。(b)はテーブル送りに対する角度変化の一例を示す。縦軸は角度変化をテーブル回転角：秒；arcsec で表す。実際の角度変化をみると位置誤差と同様に高周波成分と低周波成分が重畳しているが、角度変化では前者はガイドローラの転動、後者はガイドレール各要素間の遊びや曲がりやが寄与していると考えられる。今回は位置誤差補正に合わせて低周波成分の角度変化を補正対象とする。

そこで角度誤差補正ではテーブルを始点から終点まで任意時点で定常送りを行わせて得られた角度変化の 100 点移動平均値を定常角度誤差と定義し、図 3-(ii)-(b)に示される制御目標に設定した。

3. 送り試験装置と計測・制御

図 4 に送り試験装置を示す。テーブル案内にはクロスローラガイドを用いている。ねじ軸は C3 級、 $\phi 20\text{mm}$ 、リード 5mm、またテーブルの最大ストロークは 200mm である。装置は除振台上に設置し、恒温恒湿環境下で試験を行った。

図 5 にテーブル駆動および位置・角度の計測、制御系統を示す。ねじ軸に直結した AC サーボモータの回転駆動でテーブルが送られる。サーボモータにはコントローラで送り量の指令値を入力する。テーブル位置は分解能 10nm のレーザスケール、角度はレーザオートコリメーション方式の分解能 0.1arcsec の角度センサを用いて各々計測した。位置補正はレーザスケール、角度補正は角度センサの各々の計測値をパソコンに取り込んでピエゾ 1, 2 のドライバへの印加電圧量を制御してピエゾ 1, 2 の伸縮量を調節するフィードバック制御によって行う。位置および角度の補正手法について以下に詳述する。

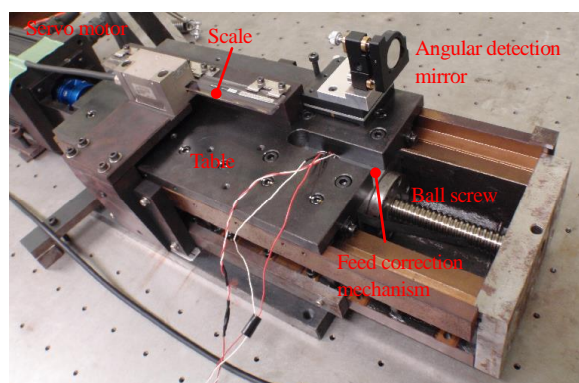


Fig.4 Setup of precision feed table unit

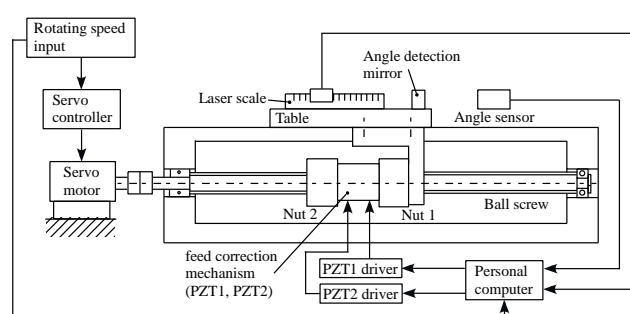


Fig.5 Driving, measuring and control systems in table feed

3・1 位置補正

まず位置補正手法について説明する。位置補正は下記①～⑨の手順に従う。

- ① パソコンにサーボコントローラで設定したサーボモータの軸回転速度（指令値）を入力する。なお、パソコンへはデータを入力するのみで制御には関与しない。
- ② サーボモータを始動させ、同時にレーザスケールで位置計測を開始する（サーボモータの始動と計測の開始はシンクロ動作する）。
- ③ レーザスケールで位置データを取得する。
- ④ 取得した位置データをパソコンに取り込む。
- ⑤ ③、④を繰り返して位置データと①の指令値との差を 10 点取得し、平均する（10 点のデータを取得した時点で⑤は終了）。この平均値が定常位置誤差（Control target）になる。
- ⑥ ③、④は継続して繰り返されリアルタイムに位置データの取得と指令値との差を算出する。この値が Measured value になる。
- ⑦ Measured value が Control target に合致するようにパソコンからピエゾ 1, 2 ドライバに電圧を印加しピエゾ 1, 2 を伸縮させる。ここで位置補正はテーブル進行方向への補正なのでピエゾ 1, 2 は等量伸縮させる。

- ⑧ ⑦のフィードバック動作により位置誤差補正が行われる。なお、補正は比例制御で行わせ、比例ゲインはピエゾ 1, 2 ともに 28.1, またサンプリング周波数は 100Hz である。
- ⑨ ⑧のルーチンはテーブル始点から終点まで行われるためテーブルの送り経路全体にわたる補正が成立する。

3・2 角度補正

次に角度補正手法について説明する。角度補正は下記①～⑪の手順に従う。

- ① パソコンにサーボコントローラで設定したサーボモータの軸回転速度（指令値）を入力する。なお、位置補正と同様にパソコンにはデータを入力するのみで制御には関与しない。
- ② サーボモータを始動させ、同時に角度センサで角度計測を開始する（サーボモータの始動と計測の開始はシンクロ動作する）。
- ③ テーブルを始点から終点まで送り、パソコンに角度変化データを格納する。さらに 100 点移動平均値を求める。
- ④ ①～③により定常角度誤差（Control target）が決定する。
ここまでする定常角度誤差を求める操作である。以下、個別のテーブルに対して定常角度誤差を目標値として角度補正を行わせる。⑤以降は個別のテーブル送りでの補正制御操作である。
- ⑤ パソコンにサーボコントローラで設定したサーボモータの軸回転速度（指令値）を入力する。（パソコンにはデータを入力するのみで制御には関与しない）。
- ⑥ サーボモータを始動させ、同時に角度センサで角度変化の計測を開始する。（サーボモータの始動と計測の開始はシンクロ動作する）。
- ⑦ 角度変化データを角度センサで取得する。
- ⑧ 取得した角度変化データをパソコンに取り込む。なお、このデータが Measured value となる。
- ⑨ Measured value が Control target に合致するようにパソコンからピエゾ 1, 2 ドライバに電圧を印加しピエゾ 1, 2 を伸縮させる。ここで角度補正はテーブル回転方向への補正なのでピエゾ 1, 2 は各々別個に伸縮させる。
- ⑩ ⑨のフィードバック動作により角度誤差補正が行われる。なお、補正は位置補正と同様に比例制御で行わせ、比例ゲインはピエゾ 1, 2 ともに 25.9, またサンプリング周波数も位置補正と同じく 100Hz である。
- ⑪ ⑩のルーチンはテーブル始点から終点まで行われるためテーブルの送り経路全体にわたる補正が成立する。

4. 位置補正試験

最初に位置補正試験を行った。テーブル送り速度は 60mm/min, ストロークは 100mm に設定した。テーブル負荷を与えない場合と与えた場合に分けて以下に示す。

4・1 テーブル無負荷試験

図 6 はテーブルが無負荷の状態での結果を示す。縦軸は実際の位置誤差から図 3-(i)-(b)で示す定常位置誤差（制御目標）を差し引いた値で位置補正残差と称す。(a)は無補正の結果である。計測した残差の範囲は約-0.5～

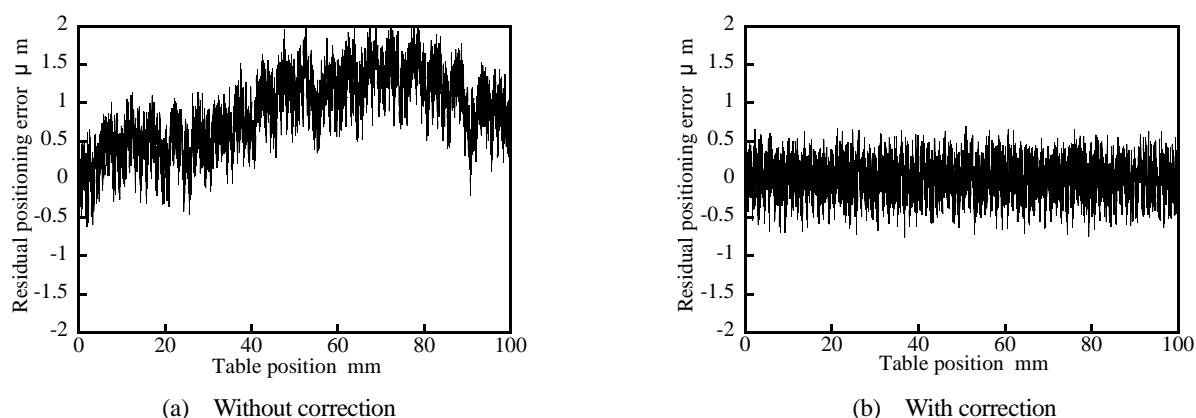


Fig.6 Residual positioning error (No external force)

2 μm である。(b)は補正をかけた結果である。長周期のうねりが解消し、テーブル送りの全ストロークにわたって残差を 0 μm 近傍に抑制できていることが分かる。なお、今回補正対象としなかった $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度の高周波成分が残る。

4・2 テーブル負荷試験

テーブルに加工反力に代表されるような外力による負荷が生じる状態を模擬的に発生させるためテーブルに引張ばねで張力を作用させた。図 7 に示すようにばねはテーブル送り原点位置で X 軸方向に対して垂直に設置した。図 8(a)は無補正の結果である。右軸はテーブルに作用する負荷の X 軸方向成分である。テーブル送りに従ってばねが伸長し、テーブル位置が 100mm のところで 50N となる。特に 80mm 以降ではテーブル負荷の増大に相関して誤差が大きくなっている。(b)は補正をかけた結果である。負荷の増大に関わらず全ストロークにわたって無負荷と同様の補正効果を確認できた。テーブル拘束力の X 軸方向成分はねじ軸によって生じる。したがって位置補正にはねじ軸やナットと噛み合うねじ山に弾性変形を与えうる発生力をピエゾが発生する必要がある。図より発生力は負荷に抗して弾性変形を生じさせることが可能であり無負荷と同様の位置補正能力を示したと言える。

5. 角度補正試験

次に角度補正試験を行った。テーブル送り速度は位置補正試験と同条件の 60mm/min、ストロークは 100mm とした。テーブルが無負荷の場合とテーブル負荷を与えて負荷トルクが作用する場合に分けて以下に示す。

5・1 テーブル無負荷試験

図 9 はテーブルが無負荷の状態での結果を示す。縦軸は実際の角度誤差から図 3-(ii)-(b)で示す定常角度誤差(制御目標)を差し引いた値で角度補正残差と称す。(a)は無補正の結果である。角度補正可能範囲を実験で求めたところ-0.8~0.6arcsec であった。絶対値に差があるのはピエゾ 1, 2 の伸縮特性がわずかに異なるためだと

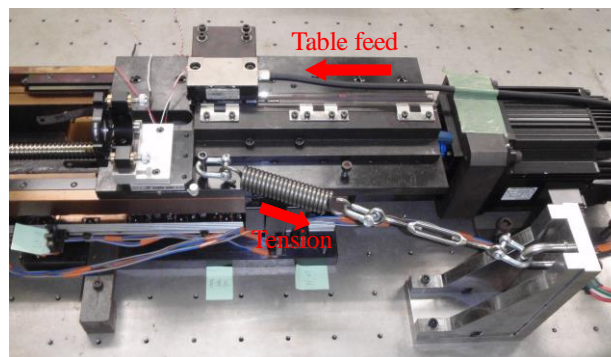


Fig.7 Table loaded condition

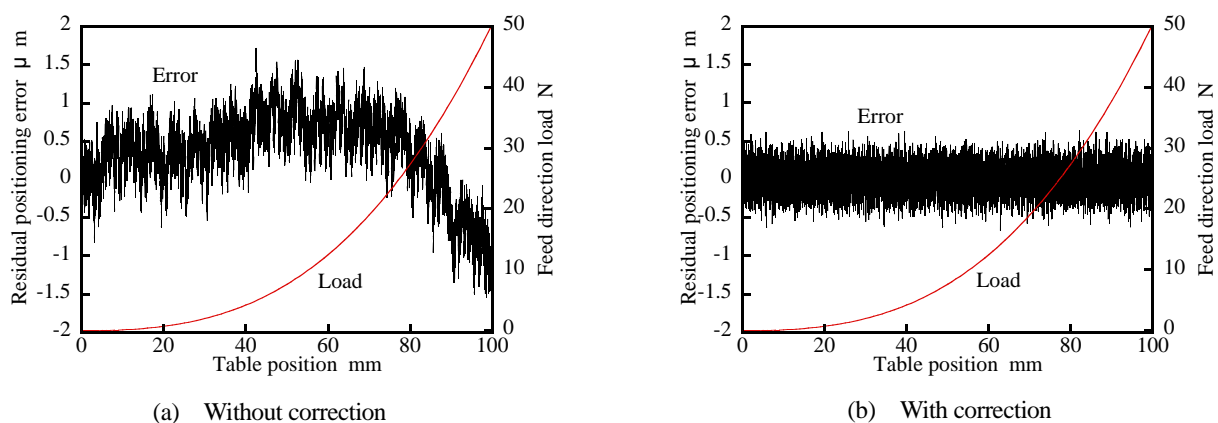


Fig.8 Residual positioning error (External force loaded)

推察する。(b)は補正をかけた結果である。長周期のうねりが解消し、テーブル送りの全ストロークにわたって残差範囲を 0arcsec 近傍に抑制できた。これより角度補正も位置補正と同様の補正効果が得られることを確認できた。なお、今回補正対象としなかった $\pm 0.2\text{arcsec}$ 程度の高周波成分が位置補正と同様に残る。

5・2 テーブル負荷試験

位置補正試験と同じ要領でテーブルに負荷を与えた。図 10(a)に補正有無の結果を示す。右軸は補正機構に作用する負荷トルクを表す。テーブル送りに従って負荷トルクが増し、100mm で 17Nm である。補正あり、なしともに負荷トルク増加にともなう角度補正残差は大きくなり、17Nm で -5arcsec となった。低負荷トルク領域での補正効果を観察するため(b)にテーブル位置 0~30mm (負荷トルク 0~2.0Nm) の領域の拡大図を示す。25mm (負荷トルク 1.4Nm) 付近までは補正をかけることで残差範囲を $\pm 0.1\text{arcsec}$ 程度に抑制しており補正効果を確認できる。しかし、それ以上の負荷トルクでは補正が機能していない。(c)にピエゾ 1, 2 への印加電圧変化をあわせて示す。25mm 付近でピエゾ 1 が 0V, ピエゾ 2 が最大電圧の 99V で飽和している。このため 25mm (負荷トルク 1.4Nm) 以降ではピエゾの可動範囲が限界に達して補正効果が表れなくなったと思われる。以上より角度補正可能限度の負荷トルクが約 1.4Nm と見積もられる。

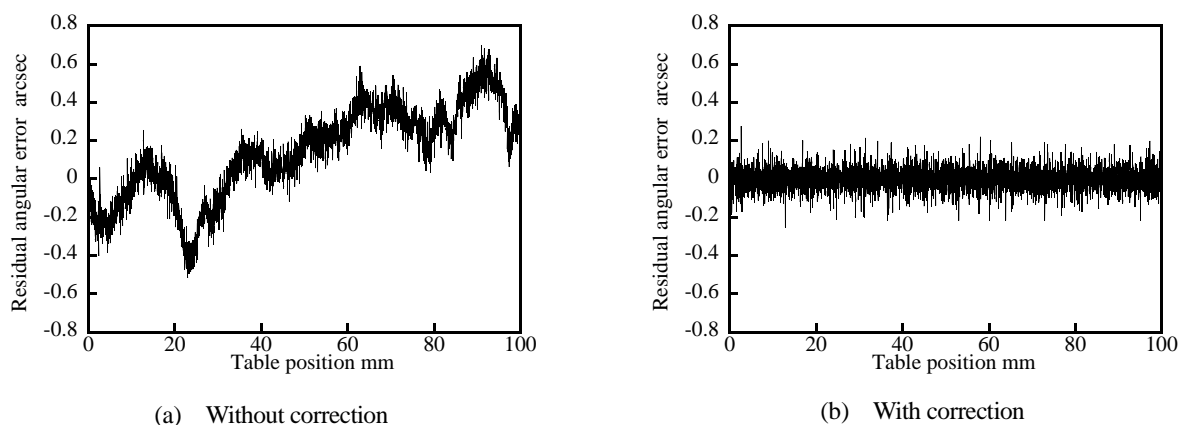


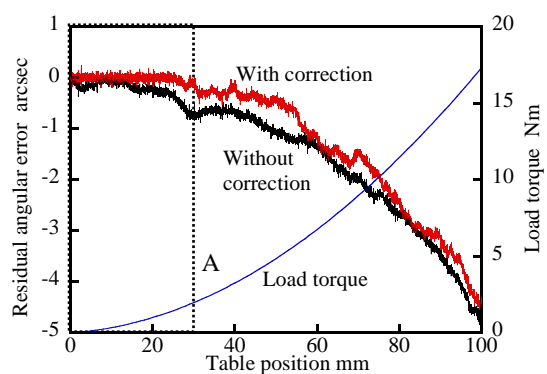
Fig.9 Residual angular error (No external force)

6. 位置・角度同時補正試験

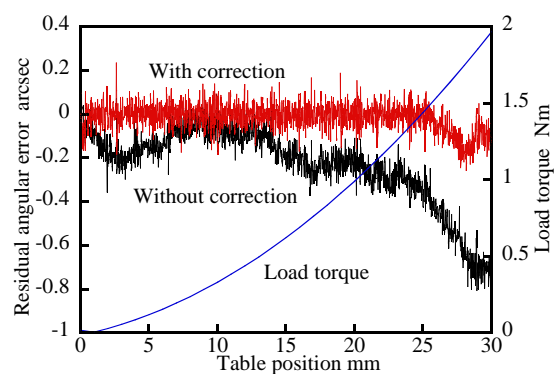
これまでに位置、角度それぞれの補正試験に対する効果を検証した。テーブル送りの有用性を高めるためには位置と角度を同時に補正できることが肝要である。そこで本章では位置・補正の同時補正を行った結果を示す。試験条件は位置、角度を独立して補正試験を行ったときと同条件のテーブル送り速度：60mm/min, 送り量：100mm とした。テーブルに負荷を与えた場合と無負荷の場合に分けて以下に示す。

6・1 テーブル無負荷試験

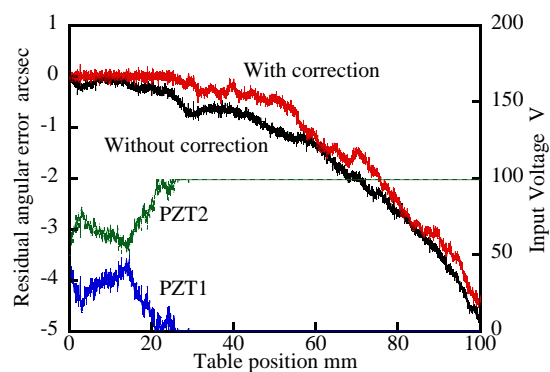
図 11 はテーブルが無負荷の状態での結果を示す。位置補正誤差と角度補正誤差を(a), (b)にそれぞれ示す。なお、ステージ位置と角度を同時に取得し、位置および角度を同時に補正した。位置、角度ともに各々を独立で試験した場合と同様の補正効果が得られた。高周波成分の残差範囲も位置補正： $\pm 0.5\mu\text{m}$, 角度補正： $\pm 0.2\text{arcsec}$ 程度ではほぼ同等である。



(a) Comparison between with and without corrections

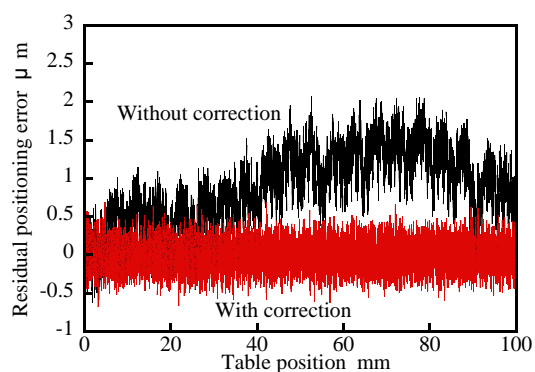


(b) Enlarged views of A in fig. (a)

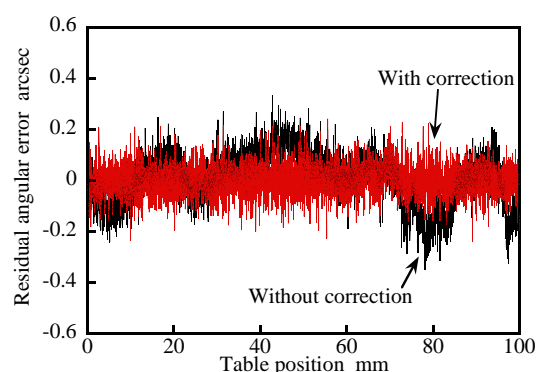


(c) Relationship between corrections and input voltage to PZT

Fig.10 Residual angular error (External force loaded)



(a) Positioning error correction



(b) Angular error correction

Fig.11 Residual errors in simultaneous correction (No external force)

6・2 テーブル負荷試験

位置、角度補正試験と同じ要領でテーブルに負荷を与えた。図 12(a)に位置および角度の補正残差を示す。位置、角度ともにテーブル位置 25mm（負荷トルク 1.4Nm）付近まで補正の効果が認められる。4 章で位置補正はテーブル負荷の有無に関わらず補正可能であることを示した。また、5 章で角度補正はピエゾ可動範囲の限界から補正機構への負荷トルクが約 1.4Nm 以内で補正可能であることを確認した。以上より同時補正では角度補正におけるピエゾの可動限界を迎えたため位置補正においても角度補正の限界である負荷トルク 1.4Nm の範囲内でのみ補正効果を示したと推察される。そこで(b)に示すように PZT1,2 に対する印加電圧を計測したところ 25mm 以降は補正のための印加電圧が飽和していることが確認できた。(c)は(a)をテーブル位置：0～25mm の範囲で拡大して示す。位置、角度ともに各々を独立で試験した場合と同様の補正効果が得られている。残差範囲も位置補正： $\pm 0.5\mu\text{m}$ 、角度補正： $\pm 0.1\text{arcsec}$ 程度でほぼ同等である。以上より今回構築した補正機構によって負荷トルクが生じた状態においてもピエゾの可動範囲内での位置・角度の同時補正が可能であることを確認した。

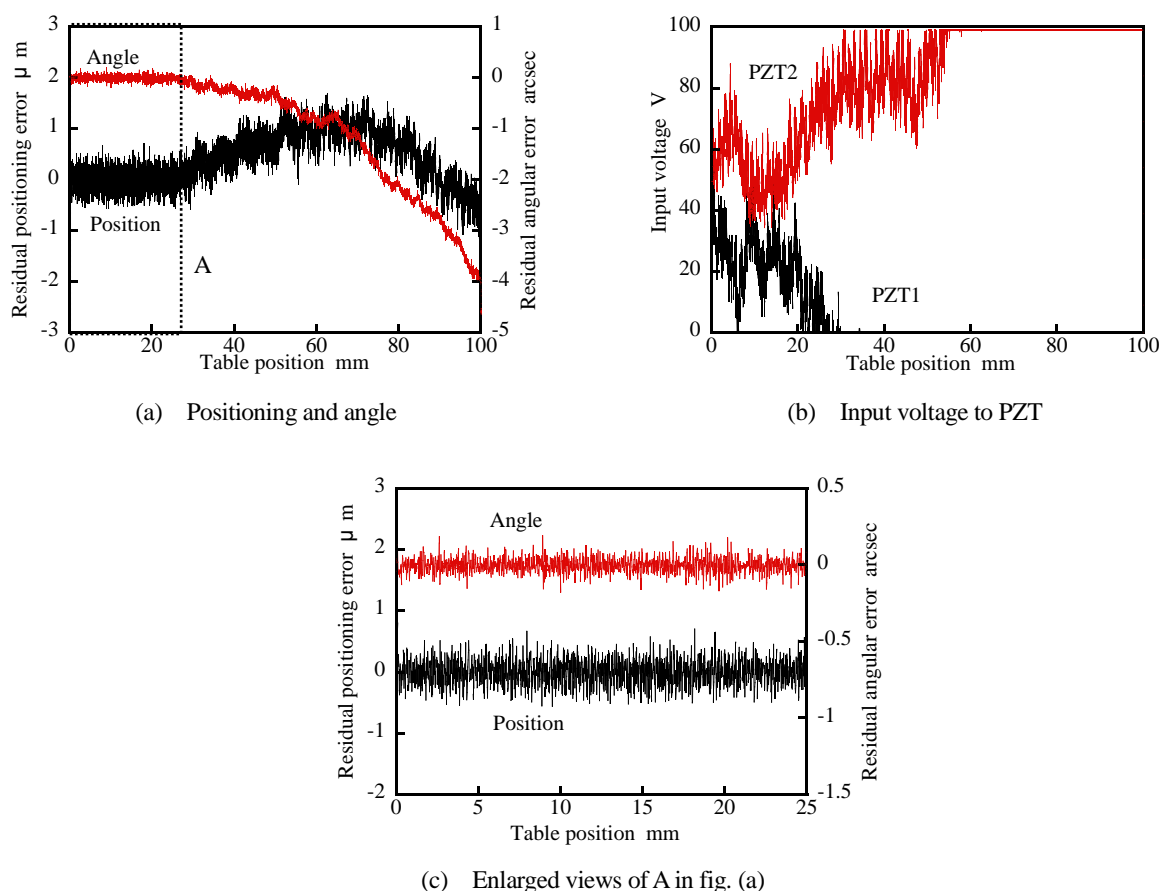


Fig.12 Residual errors in simultaneous correction (External force loaded)

7. 結 言

ボールねじ式送りテーブルに位置・角度の補正機構を組み込み、補正試験を行った。本研究で得られた知見ならびに課題と今後の展望をまとめる。

- (1) テーブル案内支持要素の弾性変形を利用した位置・角度補正手法を提案した。ねじ軸を挟んで対称に配置したピエゾをアクチュエータとする補正機構を開発し、位置、角度の補正試験を行った。
- (2) 位置誤差補正試験を行った。その結果、テーブルの無負荷、負荷（最大約 50N）に関わらず全ストロークにわたって補正効果が得られた。

- (3) 角度誤差補正試験を行った。テーブルが無負荷では全ストロークにわたって補正効果を確認できた。テーブルに負荷を加えた状態では補正機構に作用する負荷トルクが増大すると補正効果が表れなかった。これはピエゾの可動範囲が限界に達したためである。試験より角度補正可能限度の最大負荷トルクは約 1.4Nm であった。角度補正が機能する最大負荷トルク以下の領域では無負荷と同様の補正効果を得た。
- (4) 位置・角度の同時補正試験を行った。テーブルが無負荷では位置、角度ともに各々を独立で試験を行った場合とほぼ同等の補正効果が得られた。テーブルに負荷が作用した状態では角度補正におけるピエゾの可動限界を迎えるため位置補正においても角度補正の限界である負荷トルク 1.4Nm の範囲内でのみ補正効果を示した。以上よりピエゾの可動範囲内であればテーブルに負荷が生じた状態でも位置・角度の同時補正が可能であることを確認した。

以上で述べたように、工作機械に用いるボールねじ式送りテーブルの位置・角度補正として本補正機構の有用性を示すことができた。特に本報では、主にテーブル送り誤差の補正可能範囲を調べる目的から補正対象を低周波成分とし、長ストロークのねじ送りや静的な負荷変動に対する補正試験を行ったが、今後はねじ軸に生じる高周波成分や動的な負荷変動に対する補正システムについて検討する予定である。

文 献

- 堀内幸, 精密・超精密位置決め的高速化 (ボールねじ対リニアモータ), 精密工学会誌, Vol.67, No.2(2001), pp.179-183.
- 中島克洋, 田丸雄摩, 高藤和樹, 送りねじの予圧変化による超精密位置決め (微小送り特性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.640(1999), pp.4903-4908.
- 大岩孝彰, 勝木雅英, 超精密位置決めにおけるアンケート調査, 精密工学会誌, Vol.77, No.10(2011), pp.912-917.
- 大塚二郎, 羽山定治, 大橋康二, 精密・超精密位置決めの現状と将来予測, 精密工学会誌, Vol.67, No.2(2001), pp.173-178.
- 海野徹, 森本喜隆, 市田良夫, 佐藤隆之介, 工作機械の送りテーブルの実時間動特性計測とそれに基づく軌跡制御 (円弧補間加工における象限突起の抑制効果), 精密工学会誌, Vol.74, No.1(2008), pp.72-76.
- Xu, Z.Z., Liu, X. J., Kim, H.K., Shin, J. H. and Lyu, S.K., Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.54(2011), pp.605-611.
- 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, Vol.74, No.9(2008a), pp.931-936.
- 横山和宏, 鳥海啓, 斉藤瑞希, 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2報, 室温変動下の位置決め誤差をゼロに補正), 精密工学会誌, Vol.74, No.10(2008b), pp.1062-1067.

References

- Horiuchi, O., Speed up of precision/Ultraprecision positioning - ball screw vs. linear motor -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.67, No.2 (2001), pp.179-183 (in Japanese).
- Nakasima, K., Tamaru, Y. and Takafuji, K., Ultraprecision positioning by preload change of lead screws (Characteristic of fine feed), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.65, No.640 (1999), pp.4903-4908 (in Japanese).
- Oiwa, T. and Katsuki M., Survey of questionnaire on ultra-precision positioning, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.77, No.10 (2011), pp.912-917 (in Japanese).
- Otsuka, J., Haneyama, S. and Ohashi, Y., Present and future technologies of precision and ultraprecision positioning, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.67, No.2 (2001), pp.173-178 (in Japanese).
- Unno, T., Morimoto, Y., Ichida, Y. and Sato, R., Real-time synthesis and control by corrected inverse transfer function of NC tables -Effects of compensation at quadrant motion for circular interpolation-, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.74, No.1 (2008), pp.72-76 (in Japanese).
- Xu, Z.Z., Liu, X. J., Kim, H.K., Shin, J. H. and Lyu, S.K., Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.54(2011), pp.605-611.

- Yokoyama, K., Saito, M., Torinoumi, H., Moriwaki, T. and Aketagawa, M., Improvement of positioning accuracy by real-time compensation of thermal elongation of ball-screw (1st Report) -Principle of the compensation and influence of driving condition-, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.74, No.9 (2008a), pp.931–936 (in Japanese).
- Yokoyama, K., Torinoumi, H., Saito, M., Moriwaki, T. and Aketagawa, M., 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-, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.74, No.10 (2008b), pp.1062–1067 (in Japanese).