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)中島克洋^{*1}, 田丸雄摩^{*1}, 高藤和樹^{*1}Ultraprecision Positioning by Preload Change of Lead Screws
(Characteristics of Fine Feed)Katuhiro NAKASHIMA^{*2}, Yuuma TAMARU and Kazuki TAKAFUJI^{*2} Kyushu Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Sensui-cho 1-1, Tobata-ku, Kitakyushu, Fukuoka, 804-8550 Japan

The ultraprecision positioning is examined against the fine feed system utilized the elastic deformation of lead screws accompanying preload change in double nuts. The nonlinear deformation due to Hertzian contact of ball screw can ignore within a feed of 1 μm under adequate initial preload. The influence of load on table displacement of nanometer order is not observed in the range from 10 to 50 kg. The displacement obtained under increase in preload coincide well with the result under decrease in preload also. Feed control with preload change based on one to one correspondence of preload change and displacement is effective to avoid the hysteresis phenomenon of PZT actuator adopted as deformable spacing part between double nuts. Further, preload can use as a measure to detect table displacement in place of position sensor which sometimes shows unreliability owing to unstable situation in nanometer region. The minimum step feed deduced from preload change is 1 nm for sliding screw and 5 nm for ball screw.

Key Words: Ultraprecision Positioning, Machine Element, Ball Screw, Sliding Screw, Double Nut, Preload Change, Fine Feed, Position Sensor

1. 結 言

超精密位置決め技術に関するアンケート調査⁽¹⁾によると、送り要素には送りねじが51.9%使われており、2位の摩擦駆動の6.6%を断然離している。送りねじは、長いストロークにわたる送り運動伝達機構として優れており、技術蓄積も多いためであろう。

とはいえ、ナノメータオーダークラスの超精密位置決めになると容易でない。例えば、すべりねじは、構造は簡単だが、ねじ面の摩擦が大きいために、超精密位置決めには不可欠な微動がむずかしい。前述のアンケート調査では、送りねじの中で、ボールねじは80.6%、すべりねじ(台形、三角ねじ)は16.2%の使用割合になっている。ボールねじが最も使用される理由は摩擦が小さく軽く動くためである。しかし、ボールねじでもナノメータオーダーの送りになると、鋼球のころがり始めの非線形な挙動が問題になる⁽²⁾。そこで、ナノメータオーダーの超精密位置決めには、非接触の静圧ね

じが適していると考えられ、研究されてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、静圧ねじは構造が複雑であり、製作費が高く、剛性は小さい。アンケート調査の中で、静圧ねじは数値に表れるほどの使用実績が見られない。

以上の状況に対し、我々は通常用いられている程度のボールねじやすべりねじを使い、超精密位置決めを簡単に実現できる実用的な方法を提案した⁽⁵⁾。すなわち、予圧ダブルナットにおいては通常一定予圧で使用するという発想を変え、予圧を変化させることによりねじ内各部に生じる弾性変形を微動に利用する方法である。この方法は、ねじの摩擦に無関係なために、ボールねじ、すべりねじの区別なく適用可能であり、しかも高いねじ精度を必要としない。また、弾性変形を利用した変位なので、簡単に再現性よい位置決めが期待できる。さらに、得られる微小変位は間座伸縮量より縮小されること、その縮小度合いが間座剛性によって変えられるという特徴をもつ。ここでは微動特性を詳しく知るために、ボールねじの非線形な変位特性と関連して初期予圧の影響やテーブル負荷が微動に与える影響を調べ、また計算値との相違を変位成分に分けて検討した。さらに、変位の間接測定を含む予圧による微動制御の有効性と最小微動量を確認した。

* 原稿受付 1999年4月21日。

^{*1} 正員、九州工業大学工学部 (☎ 804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

E-mail: nakasima@mech.kyutech.ac.jp

2. 送り装置

図1は使用した送り装置の構成を示す。ダブルナット間に伸縮可能な間座（圧電素子）と予圧検出センサーを配し、予圧を変化させたときのねじ内に生じる弾性変形によりテーブルを微小変位させる。すなわち、この送り装置は、本来のねじ軸回転を粗動とし、粗動では得られない微小な送りをねじの弾性変形で行う粗微動方式である⁽⁶⁾。送りねじはボールねじ（ねじ軸径20）、すべりねじ（Tr20相当）の両方が使用できる。ねじ軸左端は軸方向動きが拘束された固定支持、右端は軸方向に移動できる自由支持である。テーブルは固定端側ナット1または自由端側ナット2に取り付けられる。固定端側ナットに取り付けると、より微小な変位が得られる。テーブル案内方式はクロスローラガイドであり、テーブルの質量は10.7kgである。

間座の圧電素子はパソコンからドライバアンプを経て伸縮される。その結果生じた予圧変化は、外周面上にひずみゲージを貼ったリング状のセンサーで検出され、その値はパソコンに入力される。テーブルの微動変位は、分解能8nmのレーザスケールまたは分解能1nmの静電容量型非接触変位計で測定され、その結果もパソコンに入力される。なお、一部の実験では、圧電素子ドライバアンプへの入力の手動で行っている。

送り装置は恒温室内の空気ばね式光学除振台上に置かれている。ただし、空調装置を運転すると電源のオンオフ時などに発生するノイズのために正確な変位測定が困難な場合があった。そこで、空調装置は使用しなかったが、1回の実験時間は2分から4分であり、この間の室温変化は0.1°C以下であった。

3. 初期予圧の影響

ボールねじは、鋼球とねじみぞ間でのヘルツ接触変形があるために、非線形な変位特性をもつ。このことが微動に与える影響を、初期予圧を変えて調べた。

図2は、三種類の初期予圧300, 500, 700Nのもとで、

Fig.1 Schematic view of precision feed unit

予圧を連続的に250N増加し、その後初期予圧まで減少させたときのテーブル変位の測定結果である。テーブルは自由端側ナットに取り付けている。図3は、比較のために、同一条件で行ったすべりねじ使用時の結果を示す。両図には既報⁽⁵⁾により計算した値も示している。ボールねじ、すべりねじの両方とも、予圧増減時の差がほとんどない安定した変位が得られている。

ボールねじ使用時の変位は、計算値と同じく、初期予圧が増えると減少する。ただし、実際の変位は計算値より大きい。予圧が250N増加したときの変位は、初期予圧300, 500, 700Nに対してそれぞれ2.7, 2.3, 2.0 μm である。また、変位の増加の様子に注目すると、変位は予圧増加にともないわずかに小さくなっている。このことは初期予圧が小さいほどよく表れている。以上より、ヘルツ接触変形の非線形性は微動に影響してい

Fig.2 Influence of initial preload to table displacement (Ball screw)

Fig.3 Influence of initial preload to table displacement (Sliding screw)

ることが確認できる。しかし、変位の非線形性は強くない。変位は、 $1\mu\text{m}$ 以内なら、予圧に比例すると見なしでも差し支えない。ボールねじ単体の粗動で、 $1\mu\text{m}$ 程度の位置決め精度を得ることはむずかしくない。通常の微動範囲は $1\mu\text{m}$ 以内で十分である。ボールねじは、ある程度の大きさの初期予圧のもとで、微動は $1\mu\text{m}$ を越えない範囲で使用すればよい。

図3に示したすべりねじの場合、テーブルは、初期予圧に関係なく、予圧に比例して変位している。実際の変位が計算値より大きくなるのはボールねじと同じである。ただ、初期予圧が大きいと、ごくわずかではあるが、変位増加の傾きは小さい。これは、ねじがもつ各種誤差のために、初期予圧が大きいほど負荷をもつねじ山の増加や接触ねじ面積の増大があり、その結果として変形が小さくなるためと考える。ボールねじ、すべりねじとも実際の変位が計算値より大きくなるのはこの各種誤差のためと思われる。

4. 微動誤差の検討

3. で、実際の微動は計算値より大きいことを述べた。そこで、測定値と計算値の差異を、微動成分に分けて検討した。

微動のもとになるねじの変形は、ねじ山の変形 δ_T （ボールねじではヘルツ接触変形も含む）とねじ軸変形 λ （ナットとかみ合う部分の変形と間座間のねじ軸の変形の和）である。固定端側ナット1の変位を δ_1 、自由端側ナット2の変位を δ_2 とすると、変位と変形間に次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \delta_T \\ \delta_2 &= \delta_T + \lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 δ_1 の δ_T はナット1とかみ合うねじ山部の変形、 δ_2 の δ_T はナット2とかみ合うねじ山部の変形である。

δ_1 、 δ_2 はそれぞれテーブルをナット1側、ナット2側に取り付けたときのテーブル変位として測定できる。ナット変位とテーブル変位が一致することは確認している。 λ は自由支持側ねじ軸端の変位として表れる。そこで、 δ_1 、 δ_2 、 λ を各々独立して測定し、 δ_T 、 λ について測定値と計算値の差異を調べた。その際、直接得られる値だけでなく、上に示した変位と変形間の関係から間接的に得られる値も算出した。

実験は、ボールねじ、すべりねじに対して、初期予圧を700Nとし、25Nの予圧変化ステップで800Nまで増加後、同じ予圧変化ステップでもとの初期予圧700Nに

戻す条件下で行った。なお、実験中に固定端側のねじ軸端は変位しないことを確認している。

図4は λ の計算値、測定値および δ_2 の測定値から δ_1 の測定値を差し引いて間接的に求めた値の3者を示す。直接得た測定値と間接的に求めた値は独立して得られた値であるが、一致している。変位測定法や測定値に問題がないことを示している。ねじ軸変形 λ の計算値は、ねじ寸法がほぼ同一であることから、ボールねじとすべりねじで同じである。測定値もボールねじ、すべりねじでほぼ同じになっている。すなわち、ねじ軸変形の測定値と計算値の差はボールねじとすべりねじで変わらない。測定値は計算値のおおよそ1.5倍である。

図5は、 δ_1 の測定値 δ_T' と計算値 δ_T の差 $\Delta\delta_T$ （ $=\delta_T' - \delta_T$ ）および δ_2 の測定値（ $\delta_T' + \lambda'$ ）と計算値（ $\delta_T + \lambda$ ）の差から λ の測定値と計算値の差（ $\lambda' - \lambda$ ）を差し引いて間接的に求めた値 $\Delta\delta_T'$ （ $=\delta_T' - \delta_T$ ）を示す。この場合も、 $\Delta\delta_T$ と $\Delta\delta_T'$ は独立した測定

Fig.4 Deformation of screw shaft with preload change

Fig.5 Thread deformation difference between measurement and calculation

値から得られた値であるが、ボールねじ、すべりねじのそれぞれで一致している。 $\Delta \delta_{\tau}$ はナット1側のねじ山変形に、 $\Delta \delta_{\tau'}$ はナット2側のねじ山変形に対応した値であるが、 $\Delta \delta_{\tau}$ と $\Delta \delta_{\tau'}$ がほぼ等しいことからナット1側とナット2側のねじ山変形は同程度あると推定できる。

ねじ山変形の測定値と計算値の差は、ボールねじの方がすべりねじよりかなり大きい。ボールねじのねじ山変形は、ヘルツ接触変形のために、もともとすべりねじより大きい。そこで、各種誤差によるねじ山全体が接触しない影響がより大きく表れていると考える。測定値と計算値の比はボールねじでは1.46であり、この値はねじ軸変形の場合とほぼ同じである。すべりねじの測定値は計算値の6倍になった。これは計算値が、もともとねじ軸変形の1/30程度の非常に小さい値であるために測定値のわずかの誤差でも大きく影響することもあり、このような値になったと思われる。

計算によると、ねじ山変形のうちヘルツ接触変形が断然大きく、つぎにねじ軸変形が続き、ヘルツ接触変形を除くねじ山変形は最も小さい。測定値と計算値の差もやはり、変形量の順に大きい。ヘルツ接触変形が大部分であるボールねじのねじ山変形の測定値と計算値の差は全体の差の70%を占める。ねじ軸変形の差はすべりねじ、ボールねじで同程度である。ヘルツ接触変形がないすべりねじのねじ山変形の差は最も小さい。

5. テーブル負荷の影響

ナノメータオーダの位置決めとなると、案内は静圧方式を採用することが多い⁽³⁾。そのためかテーブル負荷と精密送りの関係を取り上げた研究は見あたらない。本送り装置はころがり案内である。テーブル負荷は摩擦抵抗を変化させるので、ころがり摩擦が小さいとは言え、微動に影響することが考えられる。そこで、質量10kgから40kgの重りをテーブルに載せ、テーブル負荷に対する微動の追随性を調べた。最大負荷40kgは本送り装置の水平可搬負荷37kgを考慮して決めた。テーブルは自由端側ナットに取り付けられている。

図6は、ボールねじにおいて、初期予圧を700Nとし、5, 10, 15, 20Nの予圧ステップで4ステップ分予圧を増加減少したときの各ステップ変位とその平均値を結んだ線を示す。ステップ変位のばらつきは小さい。テーブルは、各予圧変化量に対して、負荷の大きさに関係なく、同一の微動を行っている。

図7は、ボールねじより小さい微動が得られるすべりねじに対する結果である。ボールねじの場合より小さい1ステップあたり微動量5nm程度で、広い予圧範

囲を増減している。図7にはテーブル自重のみ(10.7kg)と50.7kg負荷時の結果が示されている。テーブルは、予圧増減に追従して、確実に微動を行い、しかも負荷の影響を受けていない。テーブル自重のみ、20.7, 30.7, 40.7, 50.7kgのときの最大変位は、それぞれ406, 409, 406, 408, 403nmであった。この値の間には誤差範囲と見なせる程度の差しかない。

図7において、予圧増加時と減少時の間に少し差が見られるのは、変位計(静電容量型非接触変位計)出力のドリフトのためである。もし変位にヒステリシスがあるなら、予圧増加時より減少時の方が変位は大きくなければならない。しかし、変位は増加時より減少時の方が小さい。そして、初期予圧まで戻ったとき、変位は零より小さくなっている。この初期予圧に戻ったときの変位は、零以上になる場合(後出の図10)もあり、一様ではない。これは、ナノメータオーダの変位測定においては、温度などの環境条件の変化や変位計のドリフトのために、長時間にわたる安定した測定の困難さが表れているものと考えられる。

Fig.6 Influence of table load to displacement

Fig.7 Continuous table displacement

一方、ころがり接触部において、ナノメータオーダの微動では、非線形でヒステリシスをともなう変位になるとの指摘がある⁽²⁾⁽⁷⁾。この現象は非線形ばね特性とも呼ばれる。本送り装置においては、この非線形ばね特性をともなう微小送りは表れていない。

6. 予圧による微動制御の有効性と最小送り

図8は、圧電素子への入力電圧に対するテーブル変位を示す。ボールねじを使用し、テーブルは自由端側ナットに取り付けられている。2種類の間座剛性を用い、4つの電圧範囲に対する結果が示されている。変位は、間座剛性によって、二つに分かれる。さらに、変位は圧電素子の特性のためにヒステリシスを示す。ヒステリシスは間座剛性が高く、入力電圧範囲が広いほど大きい。以上から、入力電圧を微動の制御パラメータとするのは問題があることが分かる。しかし、本方法で得られる微動は、図7にも示したように予圧変化と一義的な対応関係がある。

一方、ナノメータオーダ変位の長時間にわたる安定した測定も困難であることを述べた。図9は、一定予圧に保持した状態で、静電容量型非接触変位計と予圧の指示値の変化を調べた例を2つ示している。変位計の指示値は安定しているときでも数ナノメータ、ときには数十ナノメータも不規則に変動している。それに対して、予圧の指示値は安定しており、1N以下の変動しかみられない。変位計の分解能は1nmとなっているが、よほどよい環境条件と測定条件を整えないとこのような高い分解能を保つのはむずかしいものと考ええる。

そこで、予圧と微動の一義的な関係に着目し、電圧ではなく予圧を使えば、微動制御は簡単になり、しかも微動量の安定した間接測定として有効である。

Fig.8 Table displacement with input voltage to PZT

図10は、小さい微動が得られる固定端側ナットにテーブルを取り付けたときの変位特性測定結果である。予圧変化1Nは、ボールねじで4.5nm、すべりねじで1.1nmの変位に相当している。

図11は、ボールねじにおいて、5.2.1Nの予圧変化ステップ（変位では22.0.9.0.4.5nmのステップ送りに相当）で送ったときの変位計で測定されたテーブル変位と予圧変化を比較して示す。予圧変化の図には、予圧から換算した変位量を併記している。22.0.9.0nmのステップ送りは、変位計にその値が検出されている。しかし、4.5nmのステップ送りになると、検出が困難になっている。それに対し、予圧は4.5nmのステップ送りに相当する予圧変化1Nを検出している。

Fig.9 Fluctuation of position sensor and preload

Fig.10 Table displacement with preload change

Fig.11 Measured displacement and preload change, deduced displacement(Ball screw)

図12は、すべりねじに対する結果である。予圧はボールねじと同じく5, 2, 1Nとステップ変化(5, 5, 2, 2, 1, 1nmのステップ送りに相当)させた。変位計は変動はあるものの、5.5nmステップ送りを検出している。ボールねじの結果と併せて考えると、変位計では5nm前後が安定した検出限界であろう。2, 2, 1, 1nmのステップ送りは、変位計では検出されていない。図9に示した変位計出力の不安定さがあらわれている。それに対して、予圧は、1, 1nmの変位に相当する予圧変化1Nを、ノイズはあるものの、検知しており、予圧増減時の再現性もある。ボールねじ、すべりねじとも1Nの予圧変化まで検出できたことは、図9に示した予圧指示値の変動が1N程度であるのに対応している。

テーブルが実際に1nm変位したかについては、より信頼度の高い変位計で確認する必要がある。しかし、5nmまでの送りは変位計でも確認できること、また変位計出力を見ながら手で圧電素子を駆動した既報⁽⁵⁾で2nmのステップ送りが確認されていることから、1nmのテーブル変位も行われたのではないかと考える。

7. 結 言

送りねじの予圧変化による微小送り機構において、微動の基礎的な特性を調べ、次の結果を得た。

- (1) ボールねじにおけるヘルツ接触変形の非線形性は、初期予圧をある程度大きくとり、微動範囲が $1\mu\text{m}$ 以下であればその影響は考えなくてよい。
- (2) 微動量の測定値と計算値の差を、微動成分の測定から分離して示した。そのとき、直接えられた値と間

Fig.12 Measured displacement and preload change, deduced displacement(Sliding screw)

接的に得られた値はよく一致した。差の大きさは微動成分の大きさの順に一致する。

- (3) 最大50.7kgまでのテーブル負荷は、本送り装置の微動に影響しなかった。また、予圧増減時の微動に非線形ばね特性は見られず、変位計指示値のドリフトと見られる変動を除けば再現性は良好であった。
- (4) 予圧の使用は、微動制御を簡単にする。また、予圧はナノメータオーダー領域での不安定な変位センサーに替わる微動量の間接測定として有効である。
- (5) 予圧による間接測定では、ここで用いた微小変位計で測定された最小の微動量5nm程度を検出できた。

なお、本研究の一部は平成8, 9年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)課題番号08555038)のもとで行われたことを付記する。

文 献

- (1) 清水茂夫・坂戸啓一郎, 精密工学会誌, 61-12(1995), 1650-1655.
- (2) 川瀬佳洋・大塚二郎・深田茂生・青木芳人・飯田昇, 精密工学会誌, 57-7(1991), 1211-1216.
- (3) 上芳啓, 不二越技報, 50-2(1994), 42-48.
- (4) 石原直, 精密工学会誌, 57-10(1991), 1735-1739.
- (5) 中島克洋・高藤和樹・田丸雄摩, 機論, 64-621, C(1998), 1829-1835.
- (6) H. Yonezawa, Y. Hirata, H. Sasai, Annals of the CIRP, 39-1(1990), 433-436.
- (7) 二見茂・古谷彰浩, 精密工学会誌, 57-10(1991), 1808-1813.