

## ボールねじ送り系の高精度化に関する研究

京都大学 ○嶋崎 敬, 松原 厚, 茨木創一, 滋賀県立大学 小川圭二

### High Precision Feed Drive using Ball Screw

Kyoto University Takashi HATOZAKI, Atsushi MATSUBARA, Souichi IBARAKI

The University of Shiga Prefecture Keiji OGAWA

In this paper, we investigate issues with the improvement of motion accuracy of a ball screw driven feed drive, which has been often used as a feed drive in machine tools. To achieve the goal of the positioning accuracy of 10 nanometer order and the straightness error of 0.1 micrometer order, disturbance factors imposed on the feed drive system are investigated.

### 1. 緒言

近年、情報機器の生産分野で、高精密な三次元形状を持つ試作部品加工への要求が高まっている。また、量産部品成型用の金型加工に対しても、より高い仕上げ面あらかさや形状精度が求められ、これら的高精密・超精密加工を行うための小型加工機の送り系にリニアモータを採用する事例が増えている。リニアモータは高応答で摩擦レスという利点があり、超精密・高精密位置決めに向いているが、高出力が要求されるとサイズが大きくなり、発熱、コスト等に問題が生じる。これに対しボールねじ送り系は、機能・コストのバランスがよく、機械の汎用化に必要な剛性を持つ<sup>2)</sup>。このため、ボールねじ駆動は工作機械への応用において主流の位置を占めてきたが、高精密加工機に応用するには種々の問題がある。

本研究では、高精密加工への要求にボールねじを用いた駆動系がどこまで対応できるかに関する基礎的な研究を行う。その手段として、実際にボールねじ駆動でナノメートル単位の位置制御が可能なテストスタンドを製作して、その位置決め性能を測定し、誤差の発生原因を調べる。

### 2. 実験装置の概要

テストスタンドの概要を図1に、送り駆動機構の外観を図2にそれぞれ示す。テストスタンドは送り駆動機構、ベースユニット、静圧軸受けを内蔵したテーブルユニット、リニアエンコーダ、数値制御装置から成る。主な構成要素の特徴を以下に挙げる。

(1)ボールねじは、リード 10mm, 直径 32mm, 省スペースナット形状とオーバーサイズボール与圧を採用し、代表移動誤差は $-0.8\mu\text{m}$ , ねじ部有効長さに対する変動  $1.0\mu\text{m}$  (レーザー式自動リード測定器による)である。

(2)リニアエンコーダは反射回折格子型(ガラススケール)で、信号周期は $4\mu\text{m}$ である。信号はシリアル変換ユニットにより内挿分割 4096 を施し 1nm 相当の分解能を得ている。

(3)案内機構は静圧軸受を選択している。静圧軸受は複合絞り田字溝長方形パッドを採用している。スライダ側とベース側の材料には天然石(グラナイト)を使用している。案内機構に静圧軸受を用いた理由は、ボールねじとサーボドライブが送り精度へ与える影響を明らかにするためである。

(4)CNC サーボ制御系は補間単位と指令単位がナノオーダーである制御装置を用いている。フィードバック制御は従来と同じく、電流ループ、速度ループ、位置ループのカスケード制御である

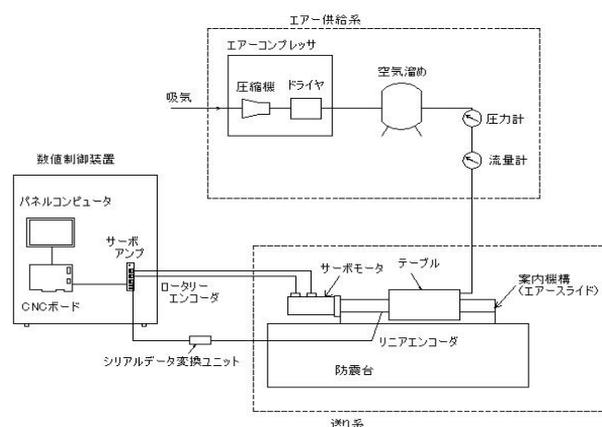


図1 テストスタンドの全体

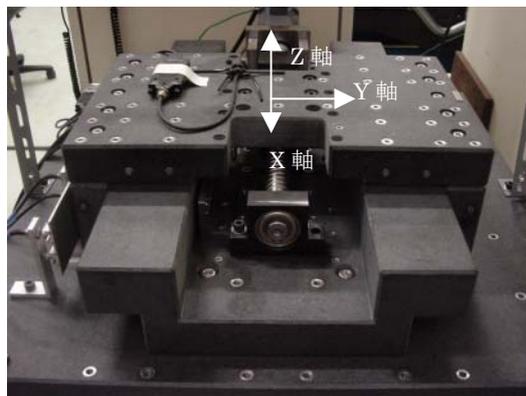


図2 送り駆動機構の概観

が、ナノオーダーでの位置制御を実現するため 64 ビット CPU を搭載しサーボアンプとの通信を光通信で行っている。またサーボ制御処理も、同時に高速化と高精度化されている(サーボ補間周期 1.7msec, 電流フィードバック検出分解能 12bit)。

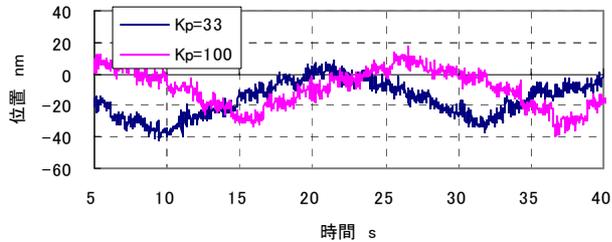
(5)モータには小型 AC サーボモータを使用し、ロータリエンコーダの分解能は 400 万 pulse/rev である。

### 3. 位置決め評価実験

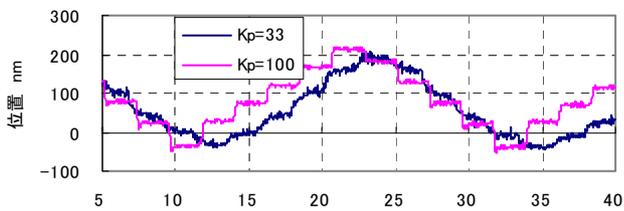
表1 テーブル位置の繰り返し再現性 nm

正方向位置決め時 (カッコ内は負方向位置決め時) の標準偏差

		往復運動の送り速度	
		1000mm/min	400 mm/min
立位置ループ ゲイン $K_p$	33rad/s	60(43)	52(30)
	100rad/s	27(24)	21(16)



(a) 10nm ステップ送り



(b) 50nm ステップ送り

図3 ステップ送り時のテーブル位置

### 3.1 テーブル移動時の位置再現性の測定

30mm 離れた位置までの往復運動を行い、停止してから4秒間、静電容量型変位センサによってテーブル位置を測定する。測定信号を平均して、1回の測定のテーブル位置とし、10回の位置決めを行ったときの標準偏差を算出した。この結果を表1にまとめる。位置ループゲイン  $K_p=100\text{rad/s}$  の場合、標準偏差は20nm程度となる。

### 3.2 ステップ送り時の運動幅

ステップ幅が10nm, 50nmの位置指令を与えて、静電容量型変位センサを用いてテーブル移動量を測定した。図3にそれぞれ結果を示す。ただし、測定値は10Hzのローパスフィルタで処理している。10nm ステップ送りの結果において、位置ループゲイン  $K_p=33\text{rad/s}$  では段差は確認できないが、 $K_p=100\text{rad/s}$  では段差が確認できる。いずれの場合もテーブル停止時の位置変動は10nm程度である。

### 3.3 定速送り時の位置偏差

送り速度が一定の時の速度ムラを評価するためサーボの位置偏差を測定する。測定した位置偏差には、周期変動成分が存在した。この変動成分の振幅と、送り速度の関係を図4に示す。図4から、位置偏差の変動量と送り速度の間には比例関係があり、変動量は位置ループゲインを上げることにより小さくできることがわかる。また、この振動はボールねじの1回転と同期することから、ボールねじで発生した外乱がモータトルクとテーブル位置に影響を与えたと考えられる。

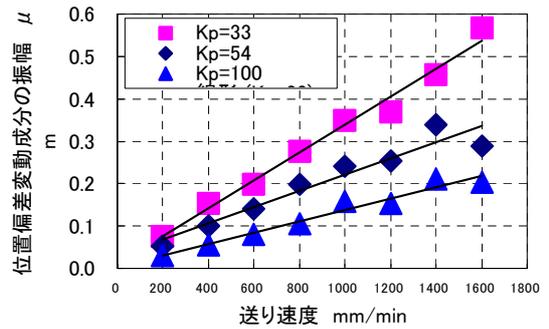


図4 定常送り時の位置偏差

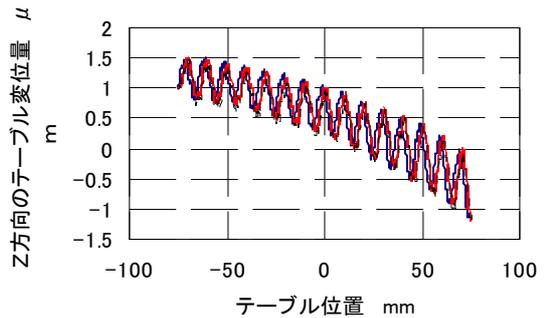


図5 送りの真直度 (Z軸方向の変動量)

### 3.4 真直度

テーブルをX軸方向に-75mmから+75mmまで送り、この時のY軸方向とZ軸方向の変位(真直度)を測定する。ストレートエッジをテーブル側に送りと平行に設置し、静電容量型変位センサをベース側に設置してストレートエッジの端面の変位を測定した。図5はテーブル位置に対するZ軸方向変位を示す。送り速度は、Z軸方向テーブル変位には振幅約0.8μmの周期変動が観察される。同様にY軸方向のテーブル変位を測定したところ、同様に振幅約4μmの周期変動が観察された。いずれの変動周期もボールねじのリード10mmと一致していることからボールねじの振れ回りが原因と考えられる。

### 4. 結言

ボールねじ駆動とナノ制御装置で10ナノオーダの位置決めが可能なテストスタンドを製作し、位置決め特性を評価した。送り系には摩擦が内在するため、位置決め精度を向上し、位置偏差を抑制するためには、フィードバックゲインを高くして運転しなければならない。また、送りと垂直な方向にはボールねじの振れ回りに起因するとみられる位置変動が観察され、ナットブラケットへの弾性カップリングの配置<sup>3)</sup>のような外乱の抑制法を検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 水本洋: 超精密工作機械の位置決め技術について, NACHI-BUSINESS news, vol.4A1, (2004.8),1.
- 2) リニアモータ v.s. ボールねじ, 2003年度精密工学会春季シンポジウム資料, (2003-3).
- 3) 鈴木弘, 新野康生, 村上慎二, 難波義治: 斜入射X線ミラー用超精密切削加工機の開発, 精密工学会誌, 60,9(1994), 1309-1313.