

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760202

研究課題名（和文） 0.1nm 変位での転がり摩擦挙動の特性解明と超高精度位置決め制御への応用

研究課題名（英文） Clarification of Rolling Frictional Behavior in 0.1nm Displacement Area and Application to Ultra-precision Positioning Control

研究代表者

田中 淑晴 (TANAKA TOSHIHARU)

豊田工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号：70455137

研究成果の概要（和文）：工作機械などの構成要素である直動転がり案内を用いた位置決め装置において、数式による摩擦モデルによって摩擦補償を行い、位置決め精度の向上を目指す。そのモデル化のためパラメータ推定を行うための実験を行った。その結果、10nm の変位振幅のような微小な変位領域においても強い非線形の特徴を有することがわかった。また、直動転がり案内の送り速度に依存する特性が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study aims to improve positioning accuracy by frictional compensation using frictional model with several equations for positioning device with linear ball guide ways. Experiment of estimating parameters is carried out for modeling frictional behavior. As the result, the linear ball guide ways have strong nonlinearity in minute displacement like amplitude of 10nm. Moreover, the characteristic depending on feeding velocity of linear ball guide ways become clear.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，知能機械学・機械システム

キーワード：超精密位置決め，直動転がり案内，非線形摩擦モデル

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロメートルレベルの位置決め精度を有する位置決め装置が採用される分野には、液晶検査装置、超精密加工機などがある。さらに、サブナノメートルレベルの位置決め精度を有する超精密位置決め装置では、半導体製造装置などがある。近年、これらの装置において、リニアモータ駆動と直動転がり案内にて構成される位置決め装置が注目を浴び始めている。しかし、案内内部には転がり摩

擦が生じてしまうため、数十マイクロメートル以下での精密な位置決めを行う際には、転がり摩擦による挙動（外乱）に対して何らかの対策を施すことが求められる。

その対策として、2006年に直動転がり案内内部に生じる転がり摩擦の挙動のモデル化（田中他、精密工学会誌, Vol. 72, No. 4(2006)470-474）が提案された。その手法は、すべり軸受の摩擦挙動を表すために提案され Bristle Model と呼ばれる摩擦モデルを転がり摩擦の

挙動を表すために援用するものであった。この摩擦モデルは、微小な変位領域と大きな転がり領域の全く異なる2つの特性を表すことができた。しかし、位置決め時において変位が連続して変化する場合には、摩擦モデルの等価ばね定数を変位の大きさによって変化させる必要があった。そこで、2007年に生じる変位の大きさによって等価ばね定数が変化する等価ばね関数を摩擦モデルに組み込んだ非線形摩擦モデルが提案された(田中他, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 4(2007)465-469)。このことによって、円弧運動などの連続した位置決め時における直動転がり案内の摩擦に対しても摩擦挙動を推定することが可能となった。2008年には、その非線形摩擦モデルを制御系のフィードフォワード部に組み込むことによって、一般的な位置決め制御と比較して位置決め誤差を低減させることができた(田中他, 精密工学会誌, Vol. 74, No. 11(2008)1171-1175)。

しかし、位置決め精度の向上を達成した上記の非線形摩擦モデルに用いられている各パラメータを同定するために、数種類の実験を行う必要があった。また、その実験結果から算出されたおおよその数値を基に試行錯誤の微調整を必要とした。その手間と負担は、産業応用の観点から高いハードルとなっていた。

## 2. 研究の目的

直動転がり案内の摩擦補償を可能とした非線形摩擦モデルを用いた位置決め制御において、サブナノメートルレベルの位置決め精度の要求にも対応できるように、非線形摩擦モデルの改良とその摩擦モデルに用いられるパラメータの同定法の構築を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

直動転がり案内の10nm程度での変位領域の摩擦挙動(「非線形ばね特性」と呼ばれる変位と印加力の関係)は、図1(二見他, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 10(1991)1808-1813)になることは解明されている。これは、ほぼ線形に近い特性を示しているが、拡大するとヒステリシスを生じている。直動転がり案内において、変位振幅が10nmのような微小な変位領域における特性が明らかにされていない。そこで、34pmの分解能を有するリニアエンコーダを用いて位置決め時の変位を測定し、そのときに生じる印加力(リニアモータの推力)の測定を行う。そして、式(1)~(4)にて表される非線形摩擦モデルに用いられるパラメータ推定を行う。式(1)が転がり摩擦力  $F_f$  を算出し、その補助関数として式(2)~(4)がある。

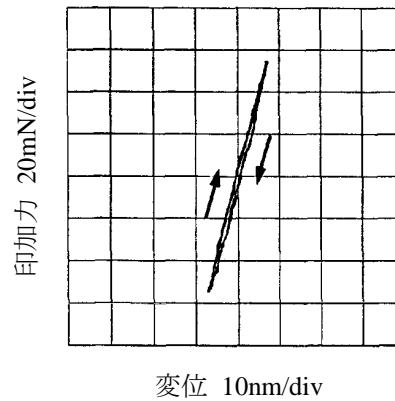


図1 非線形摩擦挙動例

$$F_f = K(z)z + C_1 \frac{dz}{dt} + C_2 v \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = v - |v| \frac{K(z)z}{F(v)} \quad (2)$$

$$F(v) = F_S - (F_S - F_C) e^{-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2} \quad (3)$$

$$K(z) = a_1 + a_2 e^{-\left(\frac{z}{a_3}\right)^2} \quad (4)$$

$F_f$ : 転がり摩擦力  $F_S$ : 最大静止摩擦力

$C_1$ : 減衰係数  $F_C$ : クーロン摩擦力

$C_2$ : 粘性係数  $v_s$ :  $F_C$  の速度

$v$ : 速度  $a_1, a_2, a_3$ : 任意の定数

$z$ : 仮想内部変位

非線形摩擦モデルに用いられる各定数を実験結果から推定する方法が確立されていないため、非線形ばね特性の測定結果からパラメータを推定する手法を検証する。ばね関数である式(4)については、非線形ばね特性のばね定数と変位振幅より求める。また、減衰係数については、非線形ばね特性の面積より求める。粘性係数は、送り速度を変化させたときの特性より定数を推定する。

## 4. 研究成果

直動転がり案内の非線形ばね特性の測定結果を図2に示す。図2(a)は変位振幅が100~900nmまで100nm刻み、同図(b)は変位振幅が10, 50, 100nmの結果である。全ての結果とも、直動転がり案内の転動体が転がり出す前の非線形ばね領域での特性を示している。また、変位振幅が最も小さい10nmの結果についてもヒステリシスを生じていることが分かる。それぞれの特性曲線において、頂点と頂点を結ぶ直線をばね定数(単純化のため)とするとナノメートルの変位領域においても変位

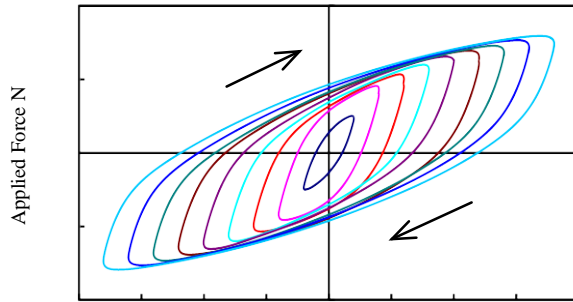
振幅が変わると、ばね定数も変化することが分かる。変位振幅毎にばね定数を算出した結果と式(4)にて推定されたばね定数を図3に示す。その結果、 $1\mu\text{m}$ 以下のような微小な変位領域については、式(4)では推定できないことが分かった。そこで、式(5)に示すばね関数を提案し、推定結果を同図に示す。新たに提案するばね関数を用いると  $1\mu\text{m}$  以下の変位領域においてもばね定数を推定できることが分かった。

$$K'(z) = \left| \frac{b_1}{z + b_4} \right| + b_2 e^{-\left(\frac{z}{b_3}\right)^2} \quad (5)$$

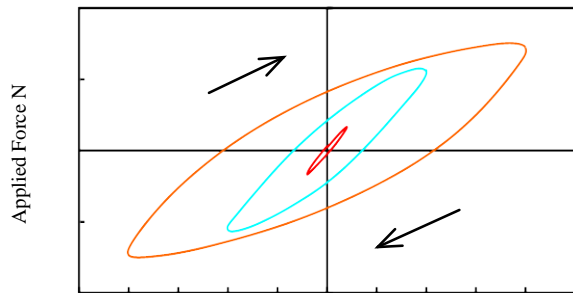
$b_1, b_2, b_3, b_4$ は任意の定数とする。今回のばね関数のパラメータ推定の結果を表1に示す。

表1 ばね関数のパラメータ

$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
1	1.5	0.1	0.2



(a) 100~900nm 変位振幅



(b) 10, 50, 100nm 変位振幅

図2 非線形摩擦挙動の測定結果

減衰係数に関する実験は、図2のような非線形ばね特性の測定結果から減衰比を求め、減衰係数を算出した。その結果を図4に示す。減衰比は、変位振幅が  $0.2\mu\text{m}$  程度までは徐々に大きくなり、その後はほぼ一定の値となった。減衰係数については、変位振幅が  $0.2\mu\text{m}$  程度までは、減衰比同様徐々に大きくなり、その後、変位振幅が大きくなるにつれて、減衰係数は小さくなる結果となった。

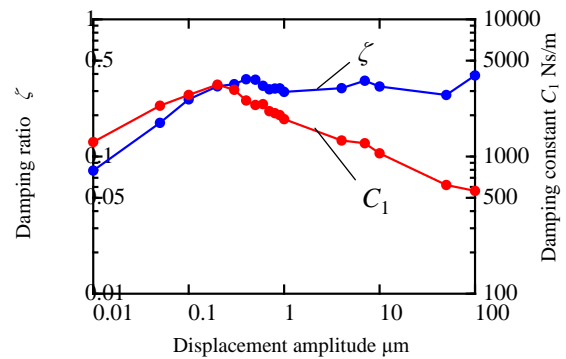


図4 減衰に関する結果

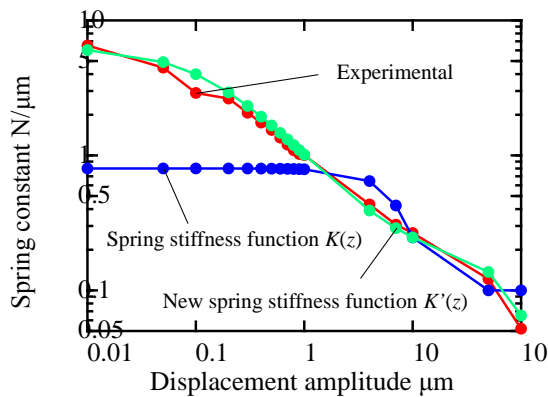


図3 提案するばね関数との比較

直動転がり案内のキャリッジに対する送り速度に影響を及ぼす粘性係数を求めるために、 $0.1\sim 100\text{mm/s}$ の範囲において、それぞれ一定速度で  $100\text{mm}$  のストロークを動かし、そのときの摩擦力(推力)を測定した。その結果を図5に示す。また、その特性を式(6)の関数によって推定した結果を同図に示し、パラメータを表2に示す。送り速度  $0.1\sim 1\text{mm/s}$  までは摩擦力が大きくなり、 $10\text{mm/s}$  までは一定値、 $10\text{mm/s}$  以上では、摩擦力が大きくなる結果となった。また、その特性を関数による推定ができていることがわかる。次に、送り速度に影響を及ぼす特性に関して、位置決め装置のステージに  $60, 100, 160\text{kg}$  の錘を載せて測定した結果を図6に示す。錘の大きさによって摩擦力が異なるが、その特性は同じ傾向を示すことが分かる。そのため、提案する式(6)において、荷重が変化しても、パラメータを変化させることで、これらの特

性も推定することが可能である。

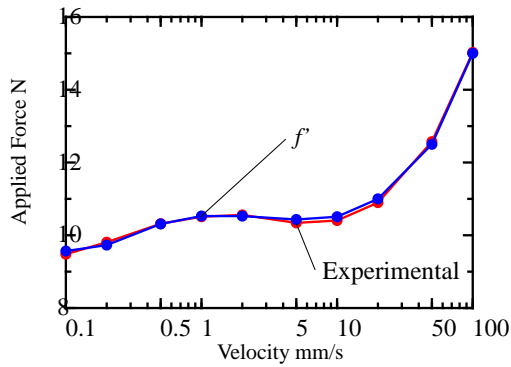


図5 送り速度に関するパラメータ推定

$$f = \left\{ \begin{array}{l} F_{C1} + (F_{S1} - F_{C1})e^{-\left(\frac{v}{v_{S1}}\right)^2} + F_{S2} \\ + (F_{C2} - F_{S2})e^{-\left(\frac{v}{v_{S2}}\right)^2} \end{array} \right\} \text{sgn}(v) + C_2 v \quad (6)$$

表2 速度に影響を受ける特性のパラメータ

$F_{C1}$	$F_{S1}$	$v_{S1}$	$F_{C1}$	$F_{S2}$	$v_{S2}$	$C_2$
5	5.5	5	5	4	0.4	0.05

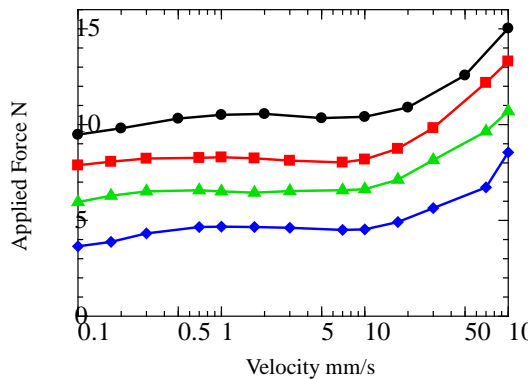


図6 荷重による摩擦力への影響

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① T. Tanaka, J. Otsuka, I. Masuda, Y. Aoyama and A. Inagaki: Sub-nanometer Resolution Positioning Device Driven by New Type of Linear Motor with Linear

Ball Guide Ways -Considering Time Lag of Electric Control System-, International Journal of Automation and Technology, 査読有, Vol.5, No.1(2012)832-841.

[学会発表] (計3件)

- ① 田中淑晴, 稲垣飛鳥: 直動転がり案内を用いた超精密位置決めに関する研究, 第17回高専シンポジウム, PB02, pp.394.
- ② 稲垣飛鳥, 田中淑晴: 超精密位置決めにおける直動転がり案内の摩擦特性-荷重の大きさによる影響-, 第17回高専シンポジウム, SA02, pp.48.
- ③ 稲垣飛鳥, 田中淑晴, 大岩孝彰, 大塚二郎, 酒井康光: 直動転がり案内を用いた位置決め装置への非線形摩擦モデルの適用, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会, L17, pp.679-680.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 淑晴 (TANAKA TOSHIHARU)  
 豊田工業高等専門学校・機械工学科・講師  
 研究者番号: 70455137