

平成21年6月1日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760185

研究課題名（和文）変位量に応じた非線形摩擦モデルの獲得と高速・高精度位置決めへの応用

研究課題名（英文）Development of nonlinear friction model suitable for table displacement and friction model-based controller for high performance motion

研究代表者

伊藤 和晃（ITO KAZUAKI）

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・講師

研究者番号：10369986

研究成果の概要：

本研究は、テーブル装置の位置決め動作時に発生する非線形摩擦のモデル化を行い、モデルベースの非線形摩擦補償を施すことで高速・高精度位置決めの実現を目指すものである。非線形摩擦は変位量に応じて特性が異なる。そこで、リニアガイドでの転がり摩擦が支配的な微小変位動作時と、通常変位動作時とに分け、各動作モードにおける非線形摩擦モデルを獲得する。この結果、提案法では非線形摩擦を補償して所望の高速・高精度位置決め制御が実現できることを実験により確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

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：メカトロニクス，モーションコントロール，非線形摩擦，制御工学

## 1. 研究開始当初の背景

現行の各種産業用機器や計測装置に用いられている位置決め装置では、マイクロメートルスケールでの位置決め制御が主流であるが、年々高まる加工・計測の精度向上や高効率化の要求によって、従前の数～数十倍の精度と高速性を実現する、サブマイクロ・ナノメートルスケールの高速・高精度位置決め制御技術の確立が強く望まれている。この場合、要求される加工精度によって対応すべき問題点が異なるため、新たな制御アプローチの開発が必須となる。すなわち、マイクロメ

ートルスケールの加工精度までは、機械系の柔軟構造に起因する機構振動を抑制する制振制御が主要であったが、加工精度や高速性の向上に伴い制振制御のみでは限界が生じ、機構系に内在する非線形摩擦の補償も併せて積極的に導入する必要性が生じてくる。非線形摩擦の補償には、その動特性解析からモデル化・制御への応用展開が必要となるが、従来までに国内外で開発・実用化された位置決め制御技術では、機構振動抑制と非線形摩擦のモデル化・補償を統合的に扱ったものは見当たらない。

## 2. 研究の目的

申請者はこれまでに、テーブル駆動の位置決め機構を対象に、機構振動の抑制とテーブルしゅう動面で発生する非線形摩擦の補償を同時に実現すべく、振動抑制に対する優位性を具備した位置指令生成法の開発と状態推定器による非線形摩擦補償について検討してきた。一方、サブマイクロ・ナノメートルスケールの加工精度を実現するために必要な非線形摩擦の動特性解析や動的モデルの開発、位置決め制御への応用に関しては未だ着手していない状態である。そこで、本研究では、非線形摩擦の動特性解析から動的モデルの開発、位置決め制御への応用展開を行う。その際、テーブル装置の変位量に応じて非線形摩擦の挙動が異なることが予想されるため、転がり摩擦特性が支配的となる微小変位動作時とそれ以上の変位動作時の2つの動作モードに対応する非線形摩擦モデルを構築する。

## 3. 研究の方法

テーブル装置の非線形摩擦挙動を解析するに当たり、動作モードをリニアボールガイドやボールねじに含まれる転がり要素の弾性変形によって発生する転がり摩擦が支配的となる微小変位動作時と、速度に比例する粘性摩擦が支配的となる通常変位動作時の2つに分類する。

微小変位動作時には、転がり要素の弾性変形による転がり摩擦挙動を解析するため、極低周波数で正弦波駆動を行い、その時の推力指令値と実位置データから転がり摩擦特性を獲得する。また、同一方向に順次送っていくイン칭動作と、往復動作では、位置決め開始時に生ずる摩擦の特性や方向が異なると予想されることから、同一振幅の位置指令に対してイン칭動作と往復動作を行った場合の摩擦特性を獲得する。以上で得られた摩擦特性を模擬するため、2次遅れフィルタと無駄時間で構成される数学モデルを構築し、試行錯誤的にパラメータ決定を行う。

通常変位動作時には、反復学習に基づく摩擦挙動解析を実施する。その際、動作変位に対する汎化性を具備した摩擦モデルを獲得するため、3種類の変位動作時での摩擦挙動を採取する。その上で、位置、速度、加速度、加々速度の4つの物理量に基づく摩擦モデルを構築する。摩擦モデルのパラメータの決定に際しては、3種類の変位動作時の摩擦挙動を一組のパラメータで模擬できるように、遺伝的アルゴリズムを用いて最適設計する。

以上から、微小変位動作時と通常変位動作時における非線形摩擦モデルが獲得できる。そこで、既約分解表現に基づく2自由度制御系を構成したテーブル装置に対し、非線形摩擦モデルに基づくフィードフォワード補償

を適用する。この場合、テーブル装置は位置指令に対する軌跡追従制御となることから、位置指令を入力として非線形摩擦モデルに与え、そこで得られる非線形摩擦量を推力指令値から差し引くことで、非線形摩擦補償を実施する。

本研究の有効性を検証するため、研究室に現有のテーブル装置を対象に位置決め実験を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 微小変位動作時の摩擦特性解析と非線形摩擦モデルの獲得

微小変位動作時での摩擦特性を獲得するため、研究室に現有のテーブル装置を対象に正弦波駆動実験を行った。その際、慣性力や粘性力が問題とならない極低周波数(0.05 Hz)の正弦波状にテーブルを微小変位させ、推定外乱を獲得している。なお、推定外乱とは、実験で採取した状態量に対して、零位相差フィルタを用いたオフラインの外乱オブザーバによって推定した外乱を示す。図1は、テーブル変位に対する推定外乱をプロットしたものである。図から、400  $\mu\text{m}$ を超える正弦波振幅では、クーロン摩擦(約0.1 Nm)に相当するほぼ一定の外乱が作用する特性を示しているものの、200  $\mu\text{m}$ 以下の振幅では、ヒステリシスを伴う非線形ばね挙動を示している。

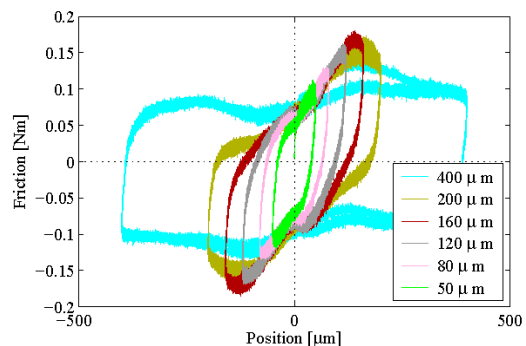
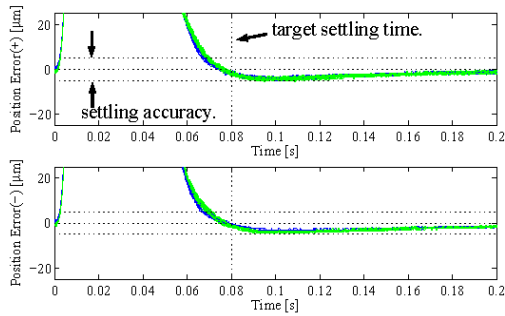
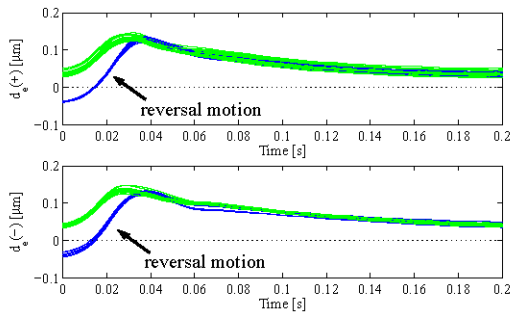


図1：微小変位動作時の非線形摩擦特性

次に、位置決め動作時に発生する非線形摩擦特性を獲得するため、位置決め実験を実施した。その際、インターバル2.5 sで振幅0.25 mmの位置指令を与え、同一方向に順次送っていくイン칭動作と、往復動作を繰り返して実施した場合における、時間応答波形を図2に示す。図中、(a)は目標位置に対する位置偏差応答波形、(b)は推定外乱であり、それぞれ上段は+方向への動作、下段は-方向への動作を示す。また、緑線はイン칭動作、青線は往復動作を行った際の特性である。図から、イン칭動作と往復動作では、位置決め開始時における摩擦の初期値が大きく異なることが分かる。



(a) 位置偏差応答波形



(b) 推定外乱波形

図 2：従来法による位置決め実験結果

以上で得られた摩擦特性を模擬するため、図 3 で示す非線形摩擦モデルを仮定する。この場合、推定外乱  $\tau_c$  の導出に際して、同一方向への移動回数 (inching count) と動作方向 (command direction) をモデルに含めることで、イン칭動作と往復動作で生ずる非線形摩擦特性の相違を表現できるよう配慮している。図 3 中、 $F_{s1}(s)$ ,  $F_{s2}(s)$ ,  $F_{s3}(s)$ ,  $F_o(s)$  は、非線形ばね特性を模擬するための 2 次遅れフィルタであり、 $T_{s1}$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_{s3}$ ,  $T_o$  は、各フィルタの開始タイミングを規定する無駄時間である。

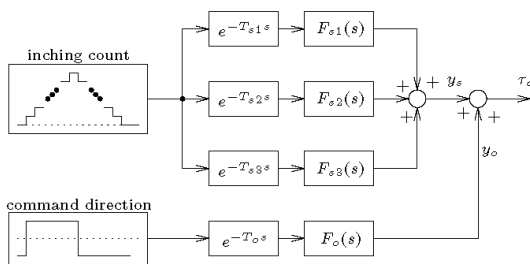


図 3：非線形摩擦モデルブロック線図

(2) 微小変位動作時における非線形摩擦モデルを基にしたフィードフォワード外乱補償

前項で得られた微小変位動作時の非線形摩擦モデルを用いて、モデルベースのフィードフォワード外乱補償を実施する。図 4 は、テーブル装置に対して構成した、外乱オブザーバ (DOB) を併用した既約分解表現に基づく 2 自由度位置決め制御系ブロック線図である。非線形摩擦モデルからの推定外乱  $\tau_c$  をフィードフォワード補償することで、インチン

グ動作と往復動作による初期値の違いや、非線形摩擦による影響を抑制した高速・高精度位置決めの実現が期待できる。図 5 は、図 2 と同一の条件下で位置決め実験を行った場合における偏差応答波形である。図中、青線はイン칭動作時、赤線は往復動作時をそれぞれ示す。図から、イン칭動作や往復動作といった動作モードによらず、オーバーシュートのない高速・高精度な位置決めが実現できている。

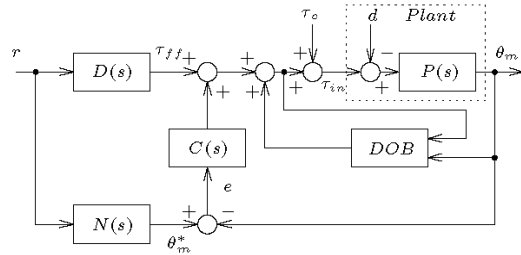


図 4：モデルベース非線形摩擦補償を有する 2 自由度位置決め制御系ブロック線図

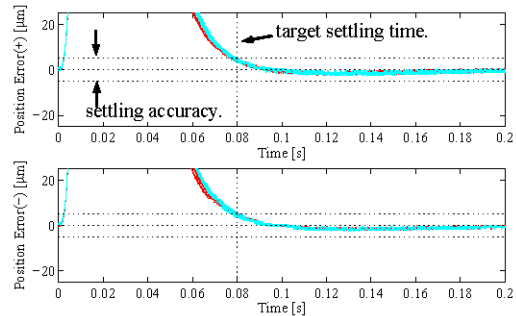


図 5：提案法による位置決め実験結果

(3) 通常変位動作時の摩擦特性解析と非線形摩擦モデルの獲得

通常変位動作時における摩擦特性では、粘性摩擦が支配的となる。図 6 は、テーブル装置を一定速度で動作させた場合の、速度に対する推定外乱の静特性を見たものである。

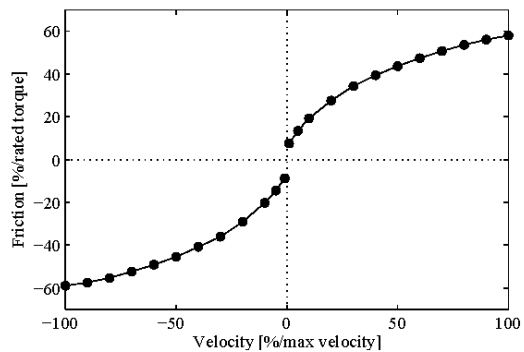


図 6：通常変位動作時の摩擦特性

図中、100%定格速度で約 60%定格トルクに相当する摩擦が生じている。また、粘性摩擦として知られる速度に比例する特性ではなく、非線形な摩擦特性を示している。

次に、位置決め動作時における摩擦特性を採取する。この場合、外乱オブザーバによる外乱推定では、ノイズ除去を目的としたローパスフィルタの影響から位相遅れを生ずる。そこで、ここでは反復学習に基づいて非線形摩擦特性を採取する。図7は、2自由度位置決め制御系に対して反復学習アルゴリズムを適用した場合のブロック図である。ここで、反復学習による外乱推定とは、複数回の試行に際し、実機とモデルの時間応答波形が一致するように、推定外乱の時系列データを順次アップデートするものである。外乱オブザーバとは異なり、オフライン処理が前提となるものの、フィルタ遅れの無い、より正確な摩擦特性を獲得できる。

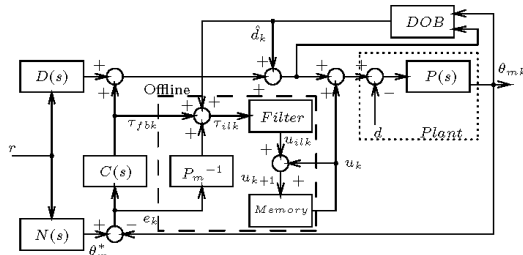


図7：反復学習を適用した2自由度位置決め制御系ブロック線図

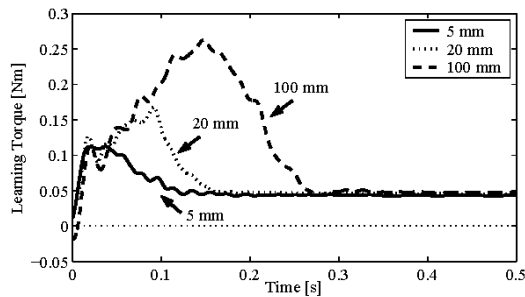


図8：反復学習による推定外乱応答波形

図8は、5 mm、20 mm、100 mmの位置決め動作を行った際に、反復学習によって獲得した推定外乱の応答波形である。得られた推定外乱データを基に、非線形摩擦モデルを構築する。通常変位動作時の摩擦特性は、クーロン摩擦や粘性摩擦が支配的となる。そこで、本研究では、非線形摩擦モデルを位置、速度、加速度、加々速度に比例した外乱成分の和で表現する。この場合、各パラメータの決定に当たっては、複数振幅の条件下で実機を十分に模擬可能な汎化性を具備させる必要がある。その決定には、試行錯誤と多大な労力を必要とする。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いたモデルパラメータの最適設計を実施する。遺伝的アルゴリズムによる最適設計では、評価関数によって得られる解が異なることから、評価関数の与え方が大変重要となる。ここでは、複数振幅に対する汎化性を具備させる必要性から、実験で採取した3

種類の振幅条件に対し、実機とモデルの時間応答波形の誤差二乗積分値を評価関数として与え、評価値が最小となるパラメータの組み合わせを遺伝的処理に基づいて決定する。

図9は、遺伝的アルゴリズムによって得られたパラメータを用いた場合の、外乱応答波形である。図中、波線は図8の結果と同一であり、点線はモデル応答波形である。図から、振幅によらず十分な精度の非線形摩擦モデルを獲得できている。

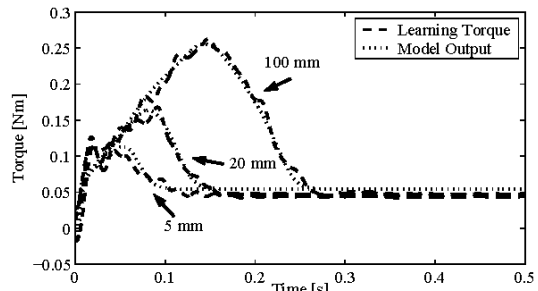


図9：遺伝的アルゴリズムによるパラメータ最適設計結果

#### (4) 通常変位動作時における非線形摩擦モデルを基にしたフィードフォワード外乱補償

微小変位動作時と同様、図4に示す2自由度位置決め制御系を前提に、非線形摩擦モデルの出力をフィードフォワード補償として付加する。図10は、振幅20 mmでの位置決め実験における、位置偏差応答波形(上段)、軌跡追従特性(中段)、摩擦補償トルク波形(下段)を示したものであり、図中の点線は従来法、実線は摩擦補償を施した提案法である。図から、提案法では、従来法に比べて十分な摩擦補償が施された結果、オーバーシュートを大幅に抑えた高速・高精度位置決めを実現できている。

次に、提案法の汎化性を確認するため、摩擦モデル獲得時には対象としなかった振幅10 mmの位置指令に対し、位置決め実験を行った場合の結果を図11に示す。図10と同様、提案法は従来法と比べて高い位置決め性能を実現できている。

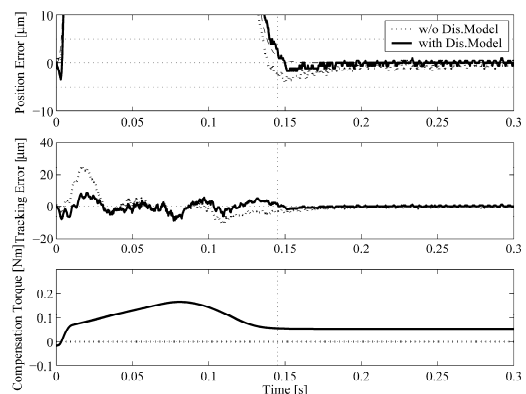


図10：20 mm変位での位置決め実験結果

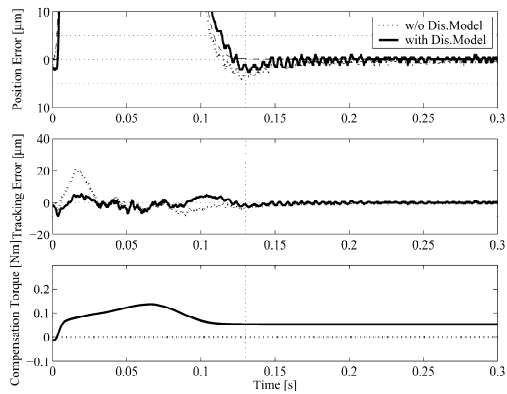


図 11 : 10 mm 変位での位置決め実験結果

## 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 山元 純文, 岩崎 誠, 伊藤 和晃, 松井 信行 : 「イン칭ング・往復位置決め動作を考慮した外乱フィードフォワード補償」, 電気学会論文誌D, Vol.128, No.11, pp.1308-1316 (2008) (査読有り)

〔学会発表〕 (計 3 件)

- ① 伊藤 和晃 : 「適応型外乱フィードフォワード補償による高速・高精度位置決め制御」, 電気学会産業計測制御研究会, 2008 年 03 月 11 日, 東京
- ② Masafumi Yamamoto : “Disturbance Compensation in Inching Motion of Ball Screw-Driven Table System, ”The 10th International Workshop on Advanced Motion Control, 2008 年 03 月 26 日, イタリア (査読あり)
- ③ Kazuaki Ito : “On-line Parameter Tuning of Disturbance Compensation in Precision Positioning, ”The 10th International Workshop on Advanced Motion Control, 2008 年 03 月 26 日, イタリア (査読あり)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 和晃 (ITO KAZUAKI)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・講師

研究者番号 : 10369986