

315 非線形ばね特性を考慮した送り駆動系の数学モデル

Mathematical Model of Feed Drive System under the Influence of Nonlinear Spring Behavior

○金子 悟士 (東京農工大院) 山崎 敬則 (小山高専) 佐藤 隆太 (東京農工大)

Satoshi KANEKO, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo

Takanori YAMAZAKI, Oyama National College of Technology, 771 Nakakuki, Oyama, Tochigi

Ryuta SATO, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo

Key Words: Feed drive system, AC servo motor, Microscopic motion, Nonlinear spring behavior

1. 結 言

AC サーボモータところがり要素とを用いた送り駆動系では、ころがり要素の非線形挙動が高精度化を妨げる要因として挙げられている。しかしながら、この送り駆動系が数マイクロメートル単位の微小変位時にどのような挙動を示しているかはあまり検討されていない。

そこで本研究では、ころがり軸受が組み込まれた AC サーボモータ単体に対して数十パルスの微小回転指令を与えたさいのモータの動的挙動を把握し、さらにこの挙動を表現するため変位に依存してばね定数が変化する非線形ばね特性を考慮した数学モデルを提案している。

2. 実験装置および方法

本研究で用いた実験装置を図 1 に示す。送り駆動系は Y 軸に X 軸が載る構造を持つ XY テーブルと各軸を駆動する AC サーボモータおよびサーボアンプとで構成され、制御装置には DSP ボードが組み込まれたパソコンを用い、位置の制御のみを行っている。

モータの電流および速度はサーボアンプによって制御されている。サーボアンプ内の速度ループは PI 制御で、速度ループゲイン K_v ならびに積分時間 T_i は固定して実験を行った。サンプリング時間 (サーボサイクル) は 0.1ms とし、データは指令値入力時をトリガとして 1ms ごとに取得した。AC サーボモータはカップリングを介してリードが 2mm のボールねじに連結され、ロータリエンコーダは 17 ビット (131072 パルス) である。テーブルには分解能が 5nm であるリニアスケールが取付けてある。

3. 微小変位時の非線形領域

ころがり要素を用いた送り駆動系は、微小変位領域では比例ゲインを上げないと応答が悪くなるといわれている。

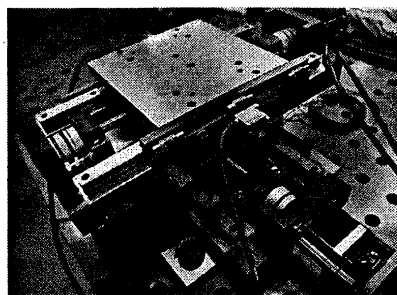


Fig. 1 Experimental system

この原因は、ころがり要素による非線形ばね特性の影響であると考えられているが、影響を受ける変位領域、影響を及ぼす支配的な要素についてはほとんど明らかにされていない。そこで、変位依存性および負荷の有無による挙動を確認するため、AC サーボモータ単体と送り駆動系全体に対して微小変位のステップ応答実験を行った。なお、以下に示す測定値は全て回転角を直線変位換算した値を用いている。

図 2(a)は AC サーボモータ単体のステップ応答であり、目標変位 r は下から順に 1, 10, 20, 50, 100, 200 μ m である。実験は同一条件で五回行い、結果にはほぼ再現性があることを確認している。図 2(a)によると、 $r=50\text{mm}$ 以上の領域ではほぼ同じ形状となることから、線形領域であると言える。 r が小さくなるにつれて立ち上がり時間、整定時間が遅くなるのは、モータ軸受部のころがり要素による非線形ばね特性の影響であると考えられる。

図 2(b)は送り駆動系全体のステップ応答で、図 2(a)と同様に結果は全て正規化してある。図 2(a)と比較すると、ほぼ全ての領域において応答は一致せず、収束が遅くなることがわかる。これは、ころがり要素が増えたことによって非線形領域が拡大し、減衰特性に影響していることが考えられる。

これらの結果から、送り駆動系全体ではころがり要素が相互に干渉して解析が困難であるため、まずは AC サーボモータ単体に対して数学モデルを構築した。

4. 送り駆動系のモデル化

ころがり要素を用いた送り駆動系の数学モデルは主としてクーロン摩擦が考慮されているが、これらは目標軌道がミリメートル単位の工作機械の運動を想定したモデルで、マイクロメートル単位の微小変位領域における動的挙動については、いくつか報告¹⁾されているだけである。

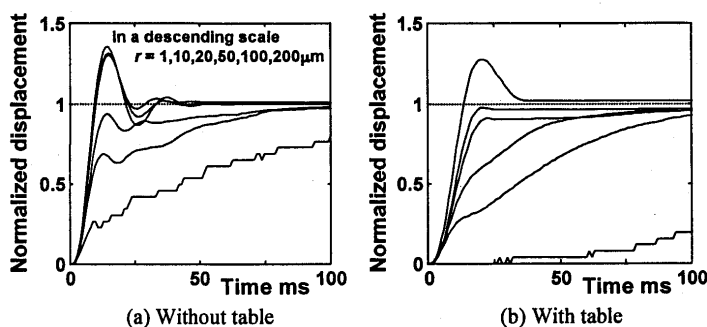


Fig. 2 Normalized step responses

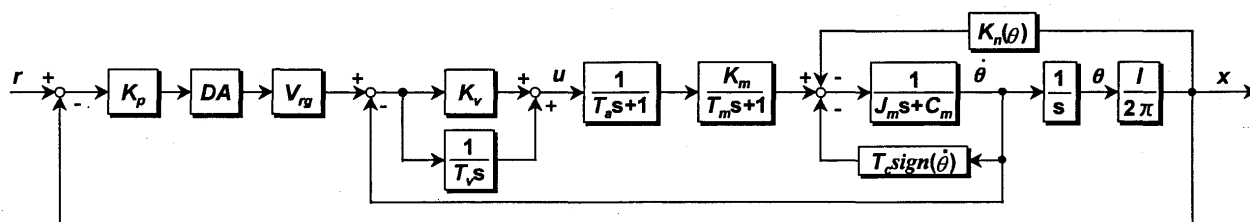


Fig. 3 Block diagram of feed drive system for microscopic motion

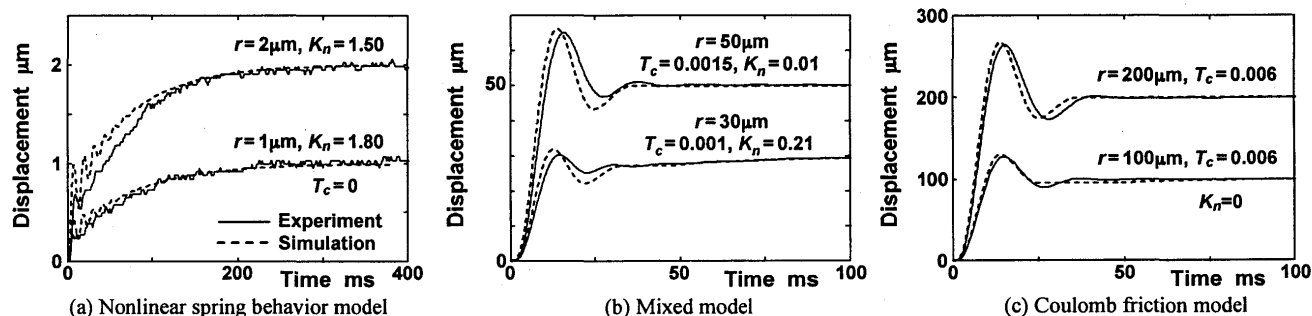


Fig. 4 Simulation and experimental results

著者らは、微小変位領域における送り駆動系の動的挙動を表現するために、クーロン摩擦に加えて非線形ばね特性を考慮した図3の数学モデルを提案している。

ここで、 K_p : 位置ゲイン(1/m), DA : DA変換器倍率(V), V_{rg} : 速度指令入力ゲイン(rad/(s·V)), K_v : 速度ゲイン(N·m·s/rad), T_i : 積分時間(s), T_a : トルクフィルタ時定数(s), C_m : モータ軸受部の粘性係数(N·s/rad), J_m : モータロータの慣性モーメント(N·m/s²), T_c : モータ軸受部のクーロン摩擦トルク(N·m·s/rad), K_n : モータ軸受部の非線形ばね定数(N·m/rad), l : ボールねじのリード(m)である。なお、速度ゲイン K_v は $K_v = J_m \cdot K_{vp}$ から求めている。値の詳細については文献²⁾を参照願いたい。

5. 摩擦モデルの比較および位相面軌道からの考察

摩擦モデルの有用性を検証するために、様々な目標変位 r に対してステップ応答実験を行った。図4は三つの変位領域における実験結果とそれぞれのモデルを用いたシミュレーションを比較した結果である。

図4(a)は r が 1μm, 2μm のステップ応答で、モータ軸受部に作用する反トルクが、非線形ばねだけによって生じると考えたモデルである。シミュレーションでは T_c を全て 0N·m·s/rad とし、非線形ばねトルク係数 K_n は r に応じて実験結果の減衰と周期がなるべく一致するように調整した。図4(a)から、シミュレーションでは振動的になるが、微小変位領域において実験結果をほぼ表現できている。

図4(b)は r が 30μm, 50μm のステップ応答で、モータ軸受部にクーロン摩擦と非線形ばねを混合した摩擦力が作用していると考えたモデルである。シミュレーションでは K_n , T_c は実験結果の減衰と周期とが一致するように調整した。図4(b)から、 K_n , T_c のパラメータを調整しても、実験とシミュレーションに差異が生じていることが確認できる。

図4(c)は r が 100μm, 200μm のステップ応答で、モータ軸受部にクーロン摩擦だけが作用していると考えたモデルである。シミュレーションでは K_n を全て 0N·m/rad とし、

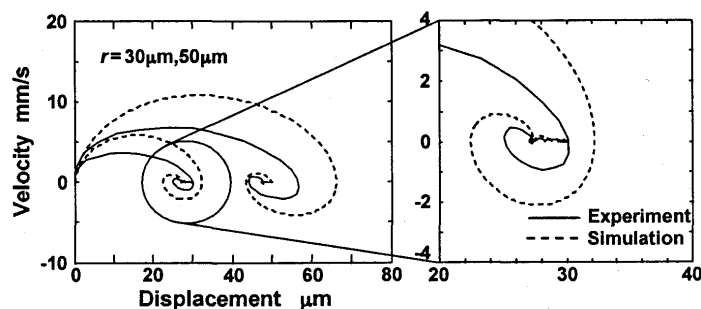


Fig. 5 Simulation and experimental results of phase trajectories

クーロン摩擦トルク T_c は実験で同定した値を用いている。図4(c)によると、実験とシミュレーションの減衰と周期とがほぼ一致していることから、 $r=100\mu\text{m}$ 以上ではクーロン摩擦モデルで表現できることがわかる。

図5は図4(b)の位相面軌道である。 $r=30\mu\text{m}$ の実験結果に着目すると、目標変位周辺で急激に減速していることがわかる。この速度域のクーロン摩擦モデルを考慮することで減衰が弱まり応答が振動的になると考えられる。この考察に基づく結果については、講演にて報告する予定である。

6. 結 言

本研究では、ACサーボモータ単体の微小変位領域での動的挙動を解析し、クーロン摩擦および非線形ばね特性を考慮したモデルを用いて比較した結果、次の知見を得た。

- 1) 目標変位 r が 100μm 以上の領域ではクーロン摩擦モデルでステップ応答をほぼ再現できる。
- 2) 目標変位によってばね定数が変化する非線形ばねモデルだけでは、微小変位領域の挙動を再現することは難しい。

文 献

- 1) 二見 茂: 精密位置サーボ系, 計測と制御, 39-10 (2000), pp. 659-662.