

M系列入力による非線形摩擦を含む機械モデルのオンライン同定

豊澤雪雄*, 園田直人*, 原田博之**, 柏木 潤**

A Method for Online Identification of Nonlinear Friction Type Machine Model

by Use of M-sequence

Yukio. TOYOZAWA, and Naoto. SONODA *
Hiroshi. HARADA **, Hiroshi. KASHIWAGI **

It is important for a continuous path control to identify the machine parameters, such as inertia and dominant nonlinear friction. This paper presents a practical identifying method for the inertia and Coulomb friction by using steepest descent method, in which the inverse model reversing the input and the output quickly approaches to the true machine parameters. It is shown in the simulation that low-pass filtered M-sequence is very suitable input for this method in order to reduce estimation error. Furthermore, it is shown that the steepest descent method with a dead band is very effective from the practical point of view.

Key Words: Identification, Nonlinear friction, M-sequence, Steepest descent method

1. はじめに

高い軌跡精度が要求される工作機械では中間の減速器を除いた直動機構, いわゆるダイレクト駆動方式が構造体の剛性を高くできる利点から増加傾向にある. この場合のアクチュエータとしては, 回転軸にはビルトインタイプの回転モータ, 直線軸にはリニアモータが使われることになる⁷⁾.

一方, 制御する側から見ると, 従来の減速器やボールネジの機構では, 機械的に低減されることにより問題にならなかった機械パラメータの変動や外乱の影響をダイレクト駆動方式では直接受けることになる. このような機械パラメータの種類としては, テーブルに搭載されるワーク重量によって変動するイナーシャや摺動面の摩擦, また外乱としてはワーク切削による加工外乱がある. 岩崎ら¹⁰⁾は, 外乱オブザーバを用いた高精度位置決め制御器の研究において, 非線形摩擦モデルを独自に定式化し, 実測によりそのパラメータを得ることで, 非線形摩擦モデルに対する制御器の効果を示した. また Elhami ら⁶⁾は, 動作方向により非対称なクーロン摩擦に非線形フィルタを応用する事により, 推定が実現できる事を示している.

本研究は, このクーロン摩擦に代表される非線形摩擦とイナーシャを, 制御対象の入出力関係を逆にした逆モデルとして制御ソフト中に組み込み, サーボモータへの電流指令と速

度フィードバックから, オンラインでモデルの係数を同定していく実用的な方法を提案するものである.

提案する方法では, 同定に用いる入力信号としては, 機械を一方向にオフセットさせていくことなく高速に同定を行うことができるM系列信号をカスケードにローパスフィルタを通した信号が, 実用上優れた入力信号の一つであることを示す. また, 同定アルゴリズムに不感帯を導入することで, 簡略化された非線形摩擦モデルでも精度良く同定することが可能であることを示す.

2. 機械モデルのオンライン同定方法

2.1 制御系の構成

本研究で対象とする制御系は, Fig.1のように速度制御, 電流制御, PWM増幅器(Amp.), およびサーボモータを含む制御対象の機械から構成される. 制御対象の機械は, イナーシャ J と摩擦 C で構成され, ダイレクト駆動方式を前提とするため, バックラッシュやばねなどのロストモーションは含まないものとした. また, 速度制御, 電流制御は, ソフトウェアによるデジタル制御を行うものとする.

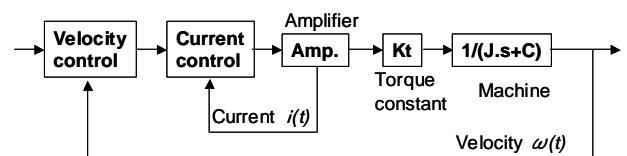


Fig.1 Structure of servo control

* ファナック株式会社 熊本県菊池郡菊陽町津久礼 2570-2

** 熊本大学大学院自然科学研究科 熊本市黒髪 2-39-1

* FANUC CORPORATION, 2570-2 Tsukure Kikuyo-machi

Kikuchi-gun Kumamoto

** Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto

(Received August 18, 2010)

2.2 逆モデルの定義

本研究では、制御対象の逆モデルを制御ソフト中に取り込み、このパラメータを短時間かつ正確にオンラインで同定する方法を提案する。同定するにあたってモデルのパラメータは、イナーシャと摩擦のみとし、切削反力などの外乱はないものとしている。モデルのパラメータは、イナーシャと摩擦のみとしたが、特に摩擦については粘性摩擦とクーロン摩擦のみで構成される非線形特性を有する簡略化されたモデルとした。非線形摩擦については、その取り扱いを容易にするために、一般に多項式による近似を用いる方法もあるが、本研究では、(1)式のように非線形のまま扱うことを特徴とする。これは、制御ソフトでのダイナミックレンジなどを考慮すると実装上有利と考えられるからである。

$$i(t) = \frac{J}{Kt} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{C_1}{Kt} \cdot \omega(t) + \frac{C_2}{Kt} \cdot \text{sign}(\omega(t)) \quad (1)$$

$i(t)$ は電流、 J はモータのイナーシャ、 C_1 は粘性摩擦係数、 C_2 はクーロン摩擦係数、 Kt はモータのトルク定数、 $\omega(t)$ はモータ角速度、 $\text{sign}(\cdot)$ は符号関数である。デジタル制御を行うために後退差分で離散化すると式(2)のように定義できる。

$$i(n) = \frac{J}{Kt \cdot T} \cdot (\omega(n) - \omega(n-1)) + \frac{C_1}{Kt} \cdot \omega(n) + \frac{C_2}{Kt} \cdot \text{sign}(\omega(n)) \quad (2)$$

ここで、 T はサンプリング周期である。

2.3 オンライン同定法

本研究では、前記のモデル化された制御対象の逆モデルを最急降下法を使って逐次同定する実用的な方法を提案する。Fig.2 に示すように制御対象の出力であるモータ角速度 $\omega(t)$ を逆モデルの入力とし、逆モデルの出力である推定電流 $\hat{i}(n)$ と、制御対象の入力である電流 $i(n)$ との差、すなわち同定誤差 $e(n)$ が最小となるように逆モデルのパラメータを逐次更新しながら同定を行う。

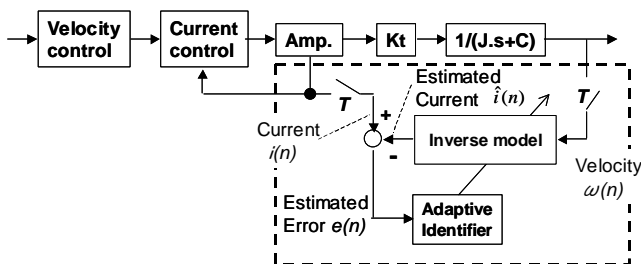


Fig.2 Proposed block diagram of identification

先の(2)式の逆モデルを以下の(3)式のようにおく。

$$\hat{i}(n) = h_0 \cdot v_0(n) + h_1 \cdot v_1(n) + h_2 \cdot v_2(n) \quad (3)$$

$$h_0 = J / (Kt \cdot T)$$

$$h_1 = C_1 / Kt$$

$$h_2 = C_2 / Kt$$

$$v_0 = \omega(n) - \omega(n-1)$$

$$v_1 = \omega(n)$$

$$v_2 = \text{sign}(\omega(n))$$

逆モデルの出力の推定電流 $\hat{i}(n)$ と、制御対象の入力である電流 $i(n)$ の差である同定誤差 $e(n)$ を(4)式のようにおき、評価関数 $\mathcal{E}(n)$ を(5)式のように同定誤差 $e(n)$ の2乗と定義する。

$$e(n) = i(n) - \hat{i}(n) \quad (4)$$

$$\mathcal{E}(n) = e(n)^2 = i(n)^2 - 2 \cdot i(n) \cdot \hat{i}(n) + \hat{i}(n)^2 \quad (5)$$

両辺を求める係数 h_m で偏微分してつぎの(6)式を得る。

$$\frac{\partial \mathcal{E}(n)}{\partial h_m} = -2 \cdot e(n) \cdot v_m(n) \quad m=0, 1, 2 \quad (6)$$

最急降下法のアルゴリズムによると、係数更新式は(7)式のように表される。 μ は正の定数で、 $\partial \mathcal{E}(n) / \partial h_m$ は時刻 n の勾配である。 $1/2$ は便宜上導入した定数である²⁾。(7)式は(6)式の勾配と反対向きに、つまり誤差特性曲線の最急降下の方向に各係数を逐次補正して行くと、最終的には各係数は評価関数を最小とする値に収束する。これにより、制御対象のイナーシャと非線形摩擦を同定することになる。

$$h_m(n) = h_m(n-1) + \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \left(-\frac{\partial \mathcal{E}(n)}{\partial h_m} \right) \quad (7)$$

μ は同定の速度を決める係数で、(7)式では正の定数としたが、ここでは同定の速度が入力の大さに影響しないようにするために、 μ は(8)式のように逐次変更することとした^{2), 3)}。

$$\mu(n) = \frac{\eta}{1 + \sum_{m=0}^2 v_m(n)^2} \quad (8)$$

ここで、 η は正の定数とする。

以上から最終的な同定(9)式を得る。また、得られたオンライン同定法のブロック図は、Fig.3 のようになる

$$h_m(n) = h_m(n-1) + \mu(n) \cdot e(n) \cdot v_m(n) \quad (9)$$

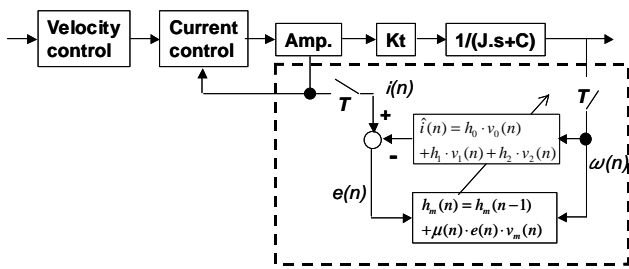


Fig.3 Proposed final block diagram using online identification method

3. シミュレーション結果

3.1 シミュレーション条件

前記の逆モデルの各係数を同定するアルゴリズムの有効性を検証するためにシミュレーションを行った。シミュレーションの制御系の構成は、2.1項の記載に従い、離散系の速度制御と電流制御と、連続系のPWM増幅器と制御対象の機械から構成される。なお、今回提案の逆モデルの同定アルゴリズムも離散系となり、サンプリング周期 T は1msとした。速度制御の帯域は20Hz程度、電流制御の帯域は200Hz程度とした。

制御対象の機械は、(1)式のようにイナーシャと非線形摩擦からなり、非線形摩擦はFig.4のような特性とした。制御対象の各係数はTable 1の通りである。

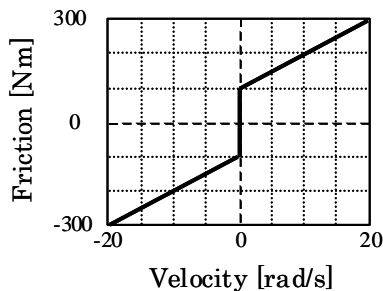


Fig.4 Characteristics of nonlinear friction

Table 1 Parameters for machine

Inertia J	Viscous friction	Coulomb friction
13 [kgm ²]	10 [Nm.s/rad]	100 [Nm]

3.2 推定信号

先の逆モデルを推定する場合、速度指令に推定用の適切な信号を入力する必要がある。

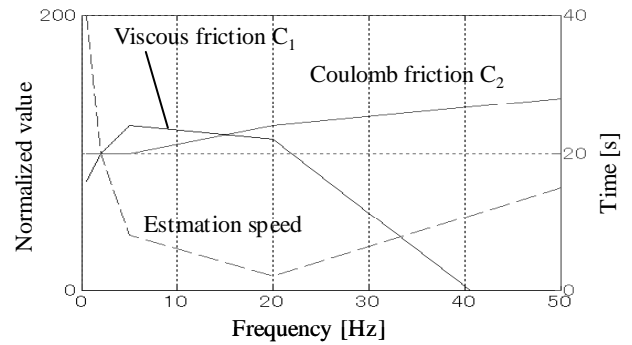


Fig.5 Dependence of estimation speed and friction coefficients on the frequency of sinusoidal signal

Fig.5は、推定信号として正弦波を入力した場合の摩擦係数 C_1, C_2 の同定速度と最終的な同定値を表したものである。周波数が低いと同定値の誤差は小さくなるが、同定時間は長くなる。逆に周波数が高くなると、同定時間は短くなるが、同定値の誤差は大きくなる。このように、正弦波入力の場合は、最適な入力周波数が存在するので、この最適値の探索を行う必要性が発生し、実用上好ましくない。

よって本研究では、この推定信号としてM系列を採用する。これはM系列が高周波の周波数成分を均一に含むために、特定周波数の正弦波などに比べ、同定速度に優れている点が上げられる。これは実用上、短時間に同定を完了させることができるという大きな利点である。また、両極性を持つM系列信号を使うことで、制御対象であるサーボモータが一方に動作することがないので、実用上の安全性が確保できるという利点もある^{11), 13)}。

またM系列信号のクロックとしては、その最小パルス幅で制御器が十分応答できる必要がある。ここでは制御器の速度帯域を20Hzとして、クロック周期の半分の時間で95%までステップ応答が整定する時間とした。25ms以上が必要なことから、余裕を持ってM系列信号のクロック周期を100msとした。実用的な観点から、長くても60s以内にオンライン同定を完了させるために、M系列信号の周期は60sより大きくする必要がある。ここでは、(10)式の10次の特性多項式を持つM系列を採用し⁵⁾、その周期を100sとした。また、振幅はモータの動作領域を考慮して適切に選んだ。

$$f(x) = x^{10} + x^3 + 1 \quad (10)$$

3.3 M系列による同定

Fig.6に示すシミュレーション結果は、M系列信号を推定信号として同定を行った場合のイナーシャ J と摩擦係数 C_1, C_2 の同定の様子を横軸時間で表示したものである。なお、縦軸はそれぞれの係数の理論値に対する割合を示している。イナーシャ J はほぼ理論値に収束しているが、摩擦係

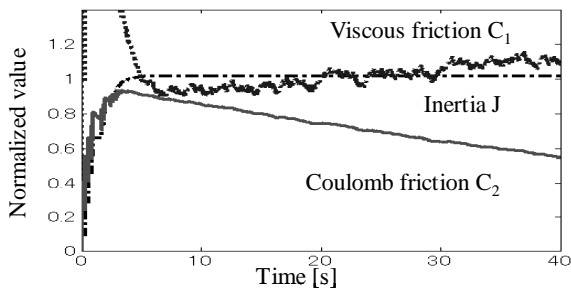


Fig.6 Inertia and friction coefficients estimated by M-sequence with sampling period 1ms

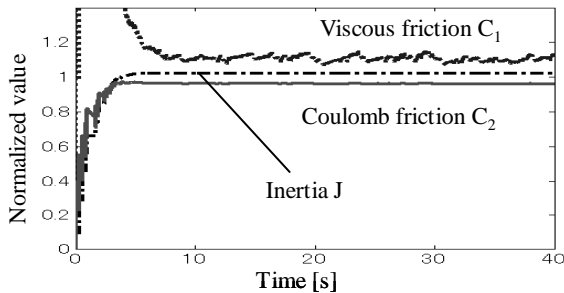


Fig.7 Inertia and friction coefficients estimated by M-sequence with sampling period 0.1ms

数は一定値に収束しない．特にクーロン摩擦係数 C_2 は時間経過と共に真値から大きく外れて行く．これは逆モデルを離散化した結果、微分処理が差分処理になっているための遅れの影響で、離散系のサンプリング周期を $1/10(T = 0.1\text{ms})$ まで細かくすると、それぞれの摩擦係数が収束しない現象は Fig.6 から Fig.7 のように改善する．この現象は、同定アルゴリズムの性質から来る問題で、M系列信号を入力した場合の角速度 ω がゼロクロス部分での動きが早いことから、離散化による遅れの影響をより強く受けることが原因である．サンプリング周期を短くした場合や、ゼロクロス部分の角速度 ω の動きが遅い入力信号の場合では、この摩擦係数が収束しない現象は見られないことがシミュレーションから判明している．

3.4 ローパスフィルタの導入

摩擦係数が収束しない現象の対策として、Fig.7 ではサンプリング周期を Fig.6 に対して $1/10$ まで細かくした結果を示したが、現実のシステムでは CPU の能力などの問題で、サンプリング周期を短くすることは容易ではない．そこで本研究では、推定信号としてカスケードにローパスフィルタを通した M 系列信号を使う．これは、ゼロクロス部分の角速度 ω の動きを遅くして逆モデルの離散化による遅れの影響を低減すると共に、制御系の物理的なトルク制限を回避するために実用上優れた方法である．

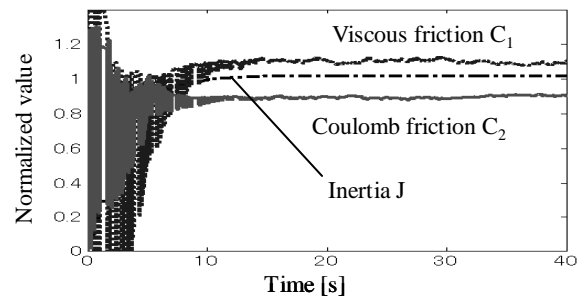


Fig.8 Inertia and friction coefficients estimated by M-sequence with low-pass filter

Fig.8 は、M 系列信号に遮断周波数 3Hz の 1 次ローパスフィルタを導入した結果である．同定速度はやや遅くなるものの逆モデルのイナーシャを正確に、また摩擦係数 C_1, C_2 を 10% 程度の誤差内で同定できていることがわかる．この結果から、M 系列信号を入力する場合において、摩擦係数が収束しない現象を避けるために、ローパスフィルタを導入する事は、極めて効果的な方法となる事がわかった．

3.5 不感帯の導入

本研究で同定する逆モデルは、Fig.4 のような簡略化された特性を持つ非線形摩擦を仮定した．しかし現実の駆動系では Fig.9 に示すように、非線形な摩擦特性のうち、停止時の最大静摩擦からクーロン摩擦が支配的な動摩擦領域に移行する際に現れるストライベック効果の影響が無視できないと考えられる．実際に低いバネ剛性を有する大型機械のサーボモータ駆動では、ストライベック効果はスティックスリップという不安定な動きを引き起こすことが古くから知られている．スティックスリップが顕著な場合、その最大静止摩擦 T_0 とストライベック速度 ω_0 を表現したモデルを使い制御系を設計する必要がある．そのためには(1)式において係数 C_2 からなる静摩擦モデルの項の代わりに、たとえば C_2 を $C_2 + T_0 \cdot \exp(-a \cdot |\omega|)$ と置き換えたモデルを使って考察を進めていくことになる．

本研究ではダイレクトドライブシステムについて考察を進めるので、ストライベック効果を持つ制御対象から引き起こされるスティックスリップが顕著でない事を前提としている．その上で簡略化された(1)式でモデル化される同定アルゴリズムの実用性を示す．シミュレーションでは、制御対象の各係数は Table1 とし、さらに最大静止摩擦 $T_0 = 200$ [Nm]、ストライベック速度、 $\omega_0 = 3$ [rad/s]とした¹⁰⁾．

この(1)式で簡略化されたモデルを使用した場合、先に述べたように両極性を持つ M 系列信号を使って同定すると信号のゼロクロス近傍でスティックスリップの影響を受けて同定精度が悪化してしまうことが予想される．そこで本研究では、両極性を持つ M 系列信号のゼロクロス近傍での悪影響を低減

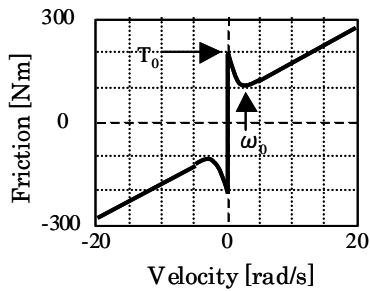


Fig.9 Characteristics of nonlinear friction with stick-slip

するために、同定の速度を決める係数 μ の(8)式に以下のような不感帯を導入する³⁾。

$$\mu(n) = \begin{cases} \frac{\eta}{1 + \sum_{m=0}^2 v_m(n)^2} & (|v_1(n)| \geq \sigma) \\ 0 & (|v_1(n)| < \sigma) \end{cases} \quad (11)$$

ここで v_1 は角速度 ω であり、 σ は角速度 ω に対する不感帯幅を規定している。これは角速度 ω のゼロ近傍では同定を中断することを示す。

つぎに述べるシミュレーション結果は、不感帯導入の効果を示したものである。制御対象の摩擦特性としては先に示した Fig.9 のようにストライベック効果を持つ非線形摩擦とした。なお、Fig.9 にある T_0 および ω_0 はそれぞれ $C_2 \times 2$ 倍、3rad/sec とした。

Fig.10 は不感帯を導入しない場合のイナーシャ J と摩擦係数 C_1 、 C_2 の同定の様子を示したものである。ゼロクロス近傍のスティックスリップの影響で同定精度が悪化していることがわかる。

一方、Fig.11 に示すように不感帯を $\sigma = 5\text{rad/s}$ として推定を行うと、スティックスリップが存在しても安定に摩擦係数 C_1 、 C_2 の同定結果が収束し、精度も向上することがわかる。ただし、摩擦係数の収束後のオフセットが Fig.8 に比べて悪くなっているのは、制御対象の非線形特性によるものと考えられる。つまり、ストライベック効果を持つ Fig.9 の非線形性を持つ対象に(1)式で簡略化したモデルを使ったために、Fig.4 をモデル化した(1)式を用いた結果である Fig.8 よりも、オフセットが大きくなっている。この同定精度が悪化する現象は、適切な不感帯を選ぶことにより改善される。Fig.12 は不感帯 $\sigma = 10\text{rad/s}$ として推定を行った場合を示し、その結果オフセットは十分小さくなっていることがわかる。ただし不感帯を導入すると同定速度が遅くなるので、同定速度を決める定数 η を適当に大きくする必要があった。

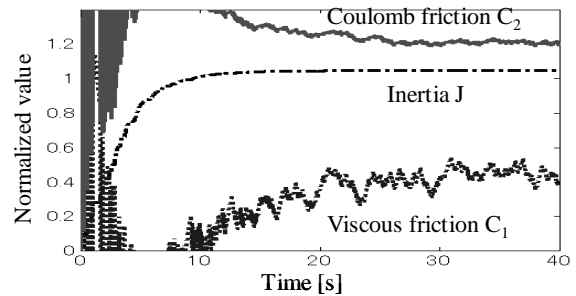


Fig.10 Inertia and friction coefficients estimated in case of nonlinear friction with stick-slip

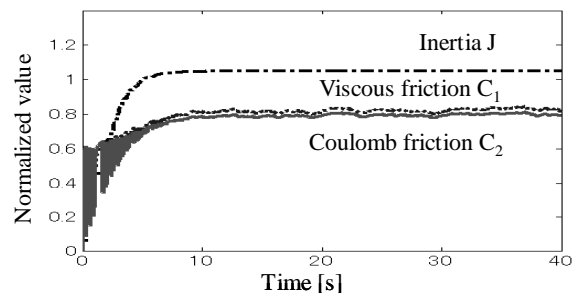


Fig.11 Inertia and friction coefficients estimated by using dead band $= 5\text{rad/s}$ in case of nonlinear friction with stick-slip

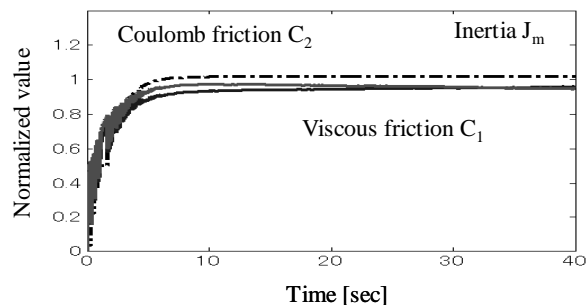


Fig.12 Inertia and friction coefficients estimated by using dead band $= 10\text{rad/sec}$ in nonlinear friction with stick-slip

不感帯を導入するもう一つの利点として、制御対象や制御系パラメータ変動に対するロバスト性がある。たとえば、Fig.13 は Fig.4 で示される制御対象に対して不感帯が無い場合のアルゴリズムを適用した結果である。制御対象のイナーシャ J が極端に小さい場合(約 1/100)を想定すると、Fig.9 によるスティックスリップが無い場合でも摩擦係数の同定誤差が Fig.13 のように大きくなってしまふ。この現象は、先に述べたように同定アルゴリズムの性質から来る問題で、M 系列信号を入力した場合の角速度 ω がゼロクロス近傍での動きが早いことから、離散化による遅れの影響をより強く受けることが原因である。イナーシャ J を非常に小さくしたこ

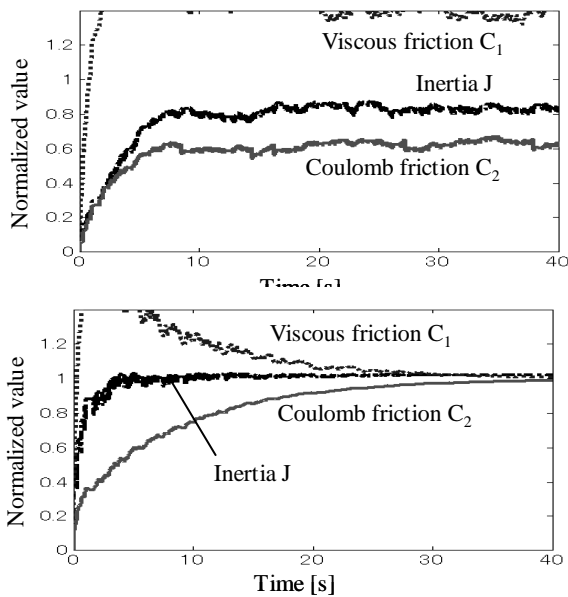


Fig.14 Inertia and friction coefficients estimated by using dead band $\omega = 5\text{rad/s}$ in case of low inertia

とにより角速度 ω のゼロクロス近傍の動きが早くなったことが精度悪化の原因と推測される。

これを避けるために先の検討ではローパスフィルタの導入を図ったが、さらにローパスフィルタの帯域を下げることは、先に示したM系列が高周波の周波数成分を均一に含むために、特定周波数の正弦波などに比べ同定速度に優れている点が失われることになる。

そこで対策として不感帯を設けて角速度 ω のゼロクロス近傍では同定を中断するアルゴリズムが効果的となる。Fig.14はその効果を示したものである。不感帯幅を適切に選ぶことで同定精度を大幅に改善することができた。

このように不感帯を導入する事は角速度 ω がゼロクロス近傍で複雑な摩擦特性を持つ制御対象でも極めて効果的な方法となる事がわかった。さらに同定精度の制御対象や制御系パラメータ変動に対するロバスト性の向上も確認できた。

最後に同定中のモータ回転角度をイナーシャ係数と合わせてFig.15に示す。両極性を持つM系列信号を使うことで、モータが一方方向に動作することがなく、実用上の安全性が確保できることを示している。

4. あとがき

サーボモータでダイレクト駆動される機械を高速化するためにあたって、その機械モデルとなるイナーシャや摩擦を推定する事は制御性能を向上させるために重要になる。本研究では機械モデルを、非線形摩擦を含んだ逆モデルとして制御ソフト中に組み込み、サーボモータへの電流指令と速度フィードバックから、このモデルのイナーシャと非線形摩擦などをオ

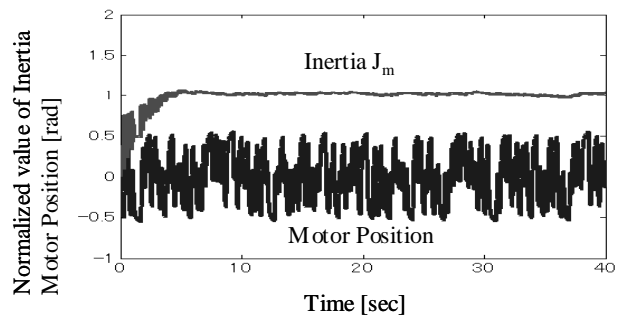


Fig.15 Estimated inertia coefficient and motor position during estimation

ンラインで同定していく実用的な方法を提案した。同時に、非線形摩擦を含んだモデルに対して、擬似不規則信号であるM系列をローパスフィルタに通した推定信号として使うことにより、精度の良いモデルを得ることが可能なことをシミュレーションで示した。

さらに、実際の大型機械のサーボモータ駆動で問題となるストライバック効果の影響についても検討を行った。大きな静摩擦から動的摩擦領域への移行へ移る際に過渡的に起こるこの現象は、スティックスリップという不安定な動きを起こすことで知られている。本研究で用いた逆システムはそのようなモデルの場合でも、同定アルゴリズムに不感帯を導入することで、高精度に同定を行う事ができる可能性を示した。これは、モデルのパラメータが大きく変わる場合にも有効である事も同時に示す事ができた。これらの特長は実際の機械の同定に際して実用的な方法と思われる。

つぎの課題はこれらシミュレーションで確認された同定アルゴリズムを実験で検証し、シミュレーション結果と比較することにより、本提案の実用性を確認する事である。

参考文献

- 1) A. S. Morse : Global stability of parameter-adaptive control system, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-25-3, pp433-439 (1980)
- 2) サイモン・ヘイキン：適応フィルタ入門, pp94-103, 現代工学社(1987)
- 3) 新誠一：適応制御理論の現状と将来, システム制御情報チュートリアル講座'89, pp105-130 (1989)
- 4) 寺尾満, 金井喜美：ロバスト適応制御入門, pp129-147, オーム社(1989)
- 5) 柏木潤：M系列とその応用, 昭晃堂(1996)
- 6) M. R. Elhami and D.J.Brookfield : Sequential Identification of Coulomb and Viscous Friction in Robot Drives, Automatica, Vol.33, pp393-401 (1997)
- 7) 大塚二郎：位置決め制御技術の現状と動向, 計測と制御 Vol.41-No11, pp769-774 (2001)

- 8) 足立修一：制御のためのシステム同定，東京電機大学出版局(2002)
- 9) 間下知起,大石潔,百目鬼英雄：クーロン摩擦と慣性変動を考慮した高速位置決め制御系の一構成法，電気制御学会 D 論：Vol.124-No11, pp1168-1169 (2004)
- 10) 岩崎誠・前田佳弘・川福基裕・平井洋武：非線形摩擦のモデル化と摩擦補償による位置決め制御系の高精度化，電気学会 D 論，Vol.126-No.6, pp732-739 (2006)
- 11) H.Harada, Y.Toyozawa, M.Shigaki, H.Kashiwagi and T.Yamaguchi：Identification of Nonlinear Parameters by Using M-sequence and Harmonic Probing Method, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 2-No.1, pp209-217 (2008)
- 12) 原田博之，豊澤雪雄，志柿雅彦，柏木潤，山口晃生：M 系列信号とボルテラ核を用いる非線形系のパラメータ推定，日本機械学会論文集 C 編，Vol.74-No.740, pp766-772 (2008)
- 13) Y.Toyozawa,H.Kashiwagi,T.Yamaguchi :Identification of Wiener-type Nonlinear Systems by Using M-sequence Correlation Method, SICE Annual Conference 2008, pp2666-2669(2008)

定年退職、熊本大学名誉教授.05～10 年放送大学熊本学習センター所長.

[著者紹介]

豊澤雪雄 (正会員)



1977 年九州大学工学部電気工学科卒業.
同年ファナック(株)サーボ研究所入社.
87 年ファナック(株)サーボアンプ研究所
九州サーボソフト開発課主任研究員,モ
ータ制御用サーボソフトウェアの開発に
従事し現在に至る.

園田直人



1983 年大分大学工学部電気工学科卒業.
87 年ファナック(株)サーボアンプ研究所
九州サーボソフト開発課入社,主任研究
員,モータ制御用サーボソフトウェアの
開発に従事し現在に至る.

原田博之 (正会員)



1979 年東京大学工学部計数工学科卒
業.81 年同大学大学院修士課程終了.同
年熊本大学工学部助手,同講師を経て,90
年同助教授となり,現在に至る.信号処理.
ロボット工学の研究に従事(工学博士).

柏木潤 (正会員)



1962 年東京大学工学部応用物理学科卒
業.67 年同大学大学院博士課程終了
(工学博士).同年熊本大学工学部助教
授,76 年同教授(機械工学科).94～96
年同大学院自然科学研究科長,2005 年