粘性摩擦, クーロン摩擦および一定外乱トルクの 影響を除去したイナーシャ同定方式*

鶴田和寛** 二見 茂*** 中村裕司† 村上輝夫††

The Inertia Identification Method Eliminating the Influences of Viscous Friction,
Coulomb Friction and Constant Disturbance Torque in Motion Systems

Kazuhiro TSURUTA, Shigeru FUTAMI, Hiroshi NAKAMURA and Teruo MURAKAMI

This paper presents the inertia identification method in which the factors of viscous friction, Coulomb friction and constant disturbance torque are eliminated. It has a model of a velocity controller and rigid mechanical system integrating four conditions described as follows. The first condition is that real velocity equals model velocity and is not zero. Under this condition, the inertia is calculated by taking the ratio of the integrated value of real torque reference in specified time range to the integrated value of the model torque. The second condition, elimination of viscous friction, is that the integrated value of velocity equals to zero in the specified time range. The third condition, elimination of Coulomb friction, is that the time range for velocity in positive direction equals the time range for velocity in negative direction. The last condition, elimination of constant disturbance torque, requires selection of velocity references V_{ref} which is satisfied with conditions 1 to 3 and V_{ref2} which is defined as inverting of V_{ref} . Then, the average inertia value under each velocity reference is computed. The experimental results using the one-axis stage verified the exact inertia identification.

Key words : inertia identification, Coulomb friction, viscous friction, constant disturbance torque

1. 緒 言

メカトロニクスに対する技術的要求は年々厳しくなっており、特に工作機械や半導体製造装置では、高速・高精度応答に対する要求が高い。これらの要求を実現するためには、モータを含んだメカ特性を正確に把握したうえで制御しなければならない。メカ特性を把握する際、最も重要な要素は負荷イナーシャ値である。負荷イナーシャ値は従来のPID制御のパラメータ設定に用いられるばかりでなく、メカ振動を抑制する外乱オブザーバ等の設計にも用いられる。負荷イナーシャを同定する方法には、ファジィ推論を用いる方法¹⁾、ファジィ推論にニューラルネットワークを組み込むことにより学習機能を持たせたファジィ・ニューラルネットワークと呼ばれる方法²⁾、遺伝的アルゴリズムを用いる方法³⁾、負荷トルクオブザーバを用いてイナーシャを推定する方法⁴⁾などがある。

しかし、これらの方法では、あらかじめ仮定されたモデルと実際の動きを比較しながら同定するため、同定のために多くの試行回数が必要であること、複雑な演算が多いこと、安定性に欠けること等の問題がある。

特にメカの摩擦特性には非線形特性がある場合が多く、モデル化が難しく、同定の妨げになる場合があり実用的でない。

実用的な方法として、速度ループをPI(比例積分)制御とI-P(積分比例)制御の2種類で構成し、それぞれのステップ応答結果からイナーシャを同定する方法があるが、この方法では

一定外乱がある場合や粘性摩擦、クーロン摩擦が大きい場合はイナーシャ同定誤差が300%を超えることがあり、摩擦外乱が大きいメカでは使用できないという問題があった。

本論文では、メカ系の外乱を粘性摩擦、クーロン摩擦、一定外乱トルクのみと考え、これら3つの外乱の影響を受けないようなイナーシャ同定方式⁵⁾を提案する。

本方式の特長は、前記3つの外乱の一般的な速度特性を考慮し、非常に簡単な演算で精度良くイナーシャ同定ができることである。1軸転がり案内スライダを用いて実験した結果、低速駆動時を除き、イナーシャ同定誤差が10%以内であり、本方式が有効であることが確認できたので報告する。

2. 摩擦特性の影響を除去したイナーシャ同定方式

粘性摩擦、クーロン摩擦および一定外乱トルクの影響を除去できるイナーシャ同定方式の基本原理解を図1を用いて説明する。

図中破線枠上段は速度制御部、下段はモデル部である。速度制御部では入力された速度指令 V_{ref} に速度 V_b が一致するように比例積分制御(以下PI制御と呼ぶ)を構成し、制御対象はイナーシャ J のみと仮定する。同様にモデル部でも速度指令 V_{ref} に速度 V_b' が一致するようにPI制御を構成し、制御対象はイナーシャ J' のみと仮定する。同図において、 $V_b = V_b' \neq 0$ (条件(a))が成立する場合、速度制御部のトルク指令積分値 ST_{ref} とイナーシャ J およびモデル部のトルク指令積分値 ST_{ref}' とイナーシャ J' には、

$$J/J' = ST_{ref}/ST_{ref}' \quad (1)$$

が成立し、

$$J = (ST_{ref}/ST_{ref}')J' \quad (2)$$

からイナーシャ値 J が求まる。

* 原稿受付 平成12年1月26日

** 学生会員 九州大学大学院工学研究科(兼(株)安川電機; 北九州市小倉北区大手町12-1)

*** 正会員 (株)安川電機(つくば市東光台5-9-10)

† (株)安川電機

†† 九州大学大学院工学研究院(福岡市東区箱崎6-10-1)

Fig.1 Block diagram as principle of inertia identification

Fig.2 Disturbance models

しかし、一般には摩擦トルク等の外乱があるため式(1)は成立しない。ここでは、外乱トルクを図2のような速度特性を考慮したモデルで表す。次にそれぞれを除去する条件を以下に示す。

- ・条件 (a) $V_{fb} = V_{fb}' \neq 0$
- ・条件 (b) $\int_a^b V_{fb} dt = 0$
- ・条件 (c) 積分区間 $[a, b]$ における正転時間と逆転時間が同じである
- ・条件 (d) ある速度指令とその正負を反転させた指令におけるイナーシャ同定値の平均を同定値とする

前記条件 (a)~(d) が成立する速度指令と積分区間 $[a, b]$ を決定することにより、粘性摩擦、クーロン摩擦および一定外乱トルクの影響を除去できる。以下に詳細を説明する。

図3は粘性摩擦トルクがある場合のトルク指令 T_{ref} から速度 V_{fb} までのブロック図とそれを等価変換したブロック図である。 D は粘性摩擦係数を表す。図3の右図から、速度 V_{fb} に粘性摩擦係数 D が乗じられて時間積分された値がゼロである場合は、トルク指令から速度までの伝達関数は $1/Js$ となり粘性摩擦の影響を除去できる。従って式(2)が成立し、直ちにイナーシャ J を求めることができる。なお、速度 V_{fb} の時間積分値がゼロであるという条件は区間 $[a, b]$ における時刻 a での位置と時刻 b での位置が一致することと同じである。

次にクーロン摩擦トルク F_c がある場合について図4を用いて述べる。クーロン摩擦トルク F_c がある場合は、トルク指令の時間積分を行う区間 $[a, b]$ における速度の正転時間（速度が正）と逆転時間（速度が負）が同じになるように速度指令 V_{ref}

Fig.3 Block diagram in case of viscous friction

Fig.4 Block diagram in case of Coulomb friction

Fig.5 Block diagram in case of constant disturbance torque

および前記区間 $[a, b]$ を決めればクーロン摩擦トルク F_c の影響を除去することができる（条件(c)）。

$$\int_a^b (T_{ref} - F_c) dt + \int_c^b (T_{ref} + F_c) dt = \int_a^b T_{ref} dt \quad (3)$$

ただし、 $(c-a)=(b-c)$

最後に一定外乱トルク F_d がある場合について図5を用いて述べる。任意の速度指令 V_{ref} の区間 $[a, b]$ において、一定外乱トルク $F_d=0$ の場合のトルク指令の時間積分値を ST_{ref0} とおくと、 $F_d \neq 0$ の時、速度制御器がP制御の場合は最終値の定理より速度偏差 $E(\infty)$ は、

$$E(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{Js + k_v} \frac{F_d}{s} = \frac{F_d}{k_v} \quad (4)$$

のように一定の速度偏差を生じる。一方、速度制御器がPI制御の場合は、同様に速度偏差 $E(\infty)$ は、

$$E(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{T_i s}{J T_i s^2 + k_v T_i s + k_v} \frac{F_d}{s} = 0 \quad (5)$$

となり速度偏差を生じない。つまり区間 $[a, b]$ における一定外乱 F_d は速度制御器の積分器により補償され、その補償量の積分値は $\int_a^b F_d dt$ となる。本論文では速度制御器はPI制御で構成しているため、一定外乱 F_d を補償するトルクが出力され、区間 $[a, b]$ でのトルク指令の時間積分値 ST_{ref} は、

$$ST_{ref1} = ST_{ref0} - \int_a^b F_d dt = ST_{ref0} - (b_1 - a_1) F_d \quad (6)$$

となる。同様に、速度指令 V_{ref1} の正負を反転させた速度指令 V_{ref2} における区間 $[a_2, b_2]$ でのトルク指令の時間積分値 ST_{ref2} は、

$$ST_{ref2} = -ST_{ref0} - \int_{a_2}^{b_2} F_d dt = -ST_{ref0} - (b_2 - a_2) F_d \quad (7)$$

となる。ここで、式(2)を用いて区間 $[a_1, b_1]$ における J_1/J と区間 $[a_2, b_2]$ における J_2/J の平均値を取る（条件(d)）と、式(8)が成立するので、一定外乱力 F_d の影響を除去できる。ただし、 $b_2 - a_2 = b_1 - a_1$ であることが必要である。

Fig.6 Friction model with Stribeck curve⁶⁾

$$\left\{ \frac{ST_{ref1}}{ST_{ref}} + \frac{ST_{ref2}}{-ST_{ref}} \right\} / 2 = \frac{ST_{ref0}}{ST_{ref}} \quad (8)$$

以上が，本イナーシャ同定方式の基本原理解である。

本方式では，図2に示したように摩擦特性を，粘性摩擦トルクとクーロン摩擦トルクで表わしたが，図6に示したような，ストライベック挙動を考慮した摩擦モデル⁶⁾であっても，速度ゼロかつ摩擦ゼロの点に対して点対称な摩擦特性であれば，前記条件(a)から条件(d)を満たすことにより，摩擦特性を除去したイナーシャ同定が実現できるという特長を持つ。

3. 転がり案内スライダを用いた実験結果

3.1 スライダを水平に置いた場合

転がり案内スライダを用い，スライダを水平に置いた場合と，垂直に立てた場合と，速度指令の大きさを変えた場合について，本方式の検証実験を行った。実験装置の概要を図7に示す。

実験機はボールねじ駆動による転がり案内スライダ（THK社製 KR4620A+540LH0）を水平に置いて，カップリング（鍋屋工業社製 MST-32C）を介して AC サーボモータ（安川電機製 SGMAH-02）と連結され，モータを電流アンプ（SGDM-02AD）で駆動した。速度制御は汎用のパーソナルコンピュータを用いて，サンプリング周期 $t_s = 0.25\text{ms}$ で行い，トルク指令を D/A 変換して電流アンプへ出力し，モータ位置を検出するエンコーダから出力されるパルスカウンタボードから入力する構成とした。パーソナルコンピュータ内では，イナーシャ同定を行うための，速度指令発生部，速度制御部とモデル部を持ち，イナーシャ同定演算を行った。

同定を行うための速度指令は，図8に示すような 1000rpm の速度までに 50ms で達する台形指令とした。速度指令は前記条件(a)から(d)を満たす指令であれば何でも良いが，台形指令を用いれば速度 V_b とモデル速度 V_b' がゼロでない値で一致するという条件(a)が定速度部分で必ず成立するから台形指令とした。

Fig.7 Experimental system

Fig.8 Experimental results at 1000rpm
(Horizontal setting)

時刻 1000ms から速度指令の正負を反転させた指令とした理由は，一定外乱トルクを除去する条件(d)を満たすからである。

実験による応答波形を図8に示す。図中実線①は速度指令，②はモータ速度，③はモデル速度，④はトルク指令，⑤はモデルトルク指令である。区間 $[a_1, b_1]$ でのイナーシャ同定値 J_1 は $J_1 = 3.1J_m$ ，区間 $[a_2, b_2]$ でのイナーシャ同定値 J_2 は $J_2 = 3.0J_m$ であった。式(8)，式(2)からイナーシャは $J = 3.1J_m$ となり，真値 $J = 3.2J_m$ にほぼ等しい。

トルク指令を積分する区間 $[a_1, b_1]$ と区間 $[a_2, b_2]$ の設定方法について述べる。積分開始時刻 a_1 は，速度指令が定速度となる時刻 $a_1 = 200\text{ms}$ と指定した。時刻 a_1 において，速度制御部は PI 制御で構成しているため，前記3つの外乱を補償することができ，速度指令と速度は一致している。モデル速度制御部のモデル速度も同様に速度指令に一致している。従って，速度 V_b とモデル速度 V_b' がゼロでない速度で一致するという条件(a)は必ず成立する。時刻 a_1 から速度制御部内のトルク指令 T_{ref} とモデル部内のトルク指令 T_{ref}' を初期値ゼロから積分するとともに，速度 V_b も初期値ゼロから積分し，速度 V_b の積分値がゼロになった時点を時刻 b_1 とする。速度 V_b の積分値がゼロになるということは同じ場所に戻るということである。

このように時刻 b_1 を決定することにより，粘性摩擦を除去する条件(b)が成立する。本実験では時刻 $b_1 = 607\text{ms}$ であった。区間 $[a_1, b_1]$ における速度 V_b が正である時間 t_{p1} と負である時間 t_{n1} は $t_{p1} = 206\text{ms}$ ， $t_{n1} = 201\text{ms}$ であったので，クーロン摩擦トルクを除去する条件(c)も区間 $[a_1, b_1]$ 内でほぼ成立していることがわかる。また，区間 $[a_2, b_2]$ についても同様に，時刻 $a_2 = 1200\text{ms}$ と指定し， $b_2 = 1607\text{ms}$ と設定した。

以上のように，本方式を用いれば摩擦トルクと速度特性を考慮することにより，非常に簡単な演算で精度良くイナーシャ同定することができる。

3.2 スライダを垂直に立てた場合

メカの動作仕様によっては重力の影響を大きく受ける場合がある。従って，スライダを垂直に立てた状態で本方式の検証実験を行った。その結果を図9に示す。モータが正転（速度正）する方向（テーブルが下降する）ではトルク指令が小さくなり，モータが逆転（速度負）する方向（テーブルが上昇する）ではトルク指令が大きくなっている。本実験において条件(b)が成立する時刻は $b_1 = 609\text{ms}$ であった。区間 $[a_1, b_1]$ における速度 V_b が正である時間 t_{p1} と負である時間 t_{n1} は $t_{p1} = 205\text{ms}$ ， $t_{n1} = 204\text{ms}$ であったので，クーロン摩擦トルクを除去する条件(c)も区間

$[a_1, b_1]$ 内ではほぼ成立していることがわかる。また、区間 $[a_2, b_2]$ についても同様に、時刻 $a_2 = 1200\text{ms}$ と指定し、 $b_2 = 609\text{ms}$ と設定した。区間 $[a_1, b_1]$ でのイナーシャ同定値 J_1 は $J_1 = -3.2J_m$ 、区間 $[a_2, b_2]$ でのイナーシャ同定値 J_2 は $J_2 = 9.2J_m$ であり、式(8)、式(2)からイナーシャは $J = 3.0J_m$ となった。一方方向のみでのイナーシャ同定結果は一定外乱トルクの影響を受けるため、 J_1, J_2 とも誤差が大きいが、一定外乱トルクを除去する条件(d)を用いることにより、真値 $J = 3.2J_m$ にほぼ等しい結果が得られた。

以上の結果から、重力等の一定外乱がある場合でも精度良くイナーシャ同定できることを確認できた。

t_{p1} と t_{p2} の時間差は、サーボの追従遅れで起こっていると考えられるが、この時間差 ($t_{p1} - t_{p2}$) の影響はスライダを水平に置いた場合も垂直に置いた場合も、実際に積算される区間 $[a_1, b_1]$ の時間の 3%未満であることから実用上問題がないと考えられる。

3.3 速度指令の大きさを変えた場合

本方式は、同定するための速度指令をあらかじめ指定して行うため、メカの動作仕様によっては、モータ回転数(移動距離)に規制がある場合がある。従って、速度指令(台形)の大きさを変えて本方式の検証実験を行った。その結果を図10に示す。速度が小さくなるほど同定値が小さくなることからわかる。その時の区間 $[a_1, b_1]$ におけるトルク指令を図11に示す。図中実線①は速度 1000rpm、②は速度 500rpm、③は速度 250rpm、④は速度 125rpm である。速度が小さいほど減速トルクと加速トルクが明確でないことがわかる。例えば、速度 125rpm におけるトルク指令④と速度 1000rpm におけるトルク指令①を比較すると、①は速度ゼロまでの減速トルクと速度反転してからの加速

Fig.9 Experimental results at 1000rpm
(Vertical setting)

Fig.10 Inertia identification at low speed

Fig.11 Torque references at low speed

トルクが明確であるが、④はトルク指令の正負が反転したような形になっていて、減速トルクと加速トルクが明確でない。

以上の結果から、図2に示すような粘性摩擦、クーロン摩擦および一定外乱トルクで表されたシンプルな摩擦モデルでイナーシャ同定した場合、速度に依存したモデル化誤差が存在すると思われる。

このモデル化誤差を無くすためには、速度ゼロ付近の摩擦挙動を詳しく調べる必要がある。そのため、摩擦の非線形挙動を考慮したモデル化の検討を進めており、その結果については今後報告する予定である。

4. 結 言

粘性摩擦、クーロン摩擦および一定外乱トルクの影響を除去したイナーシャ同定方式を提案し、転がり案内スライダを用いて検証実験を行った。得られた結論は以下の通りである。

- ・速度指令とトルク指令を積分する区間を適切に設定することにより、非常に簡単な演算で精度良くイナーシャを同定できた。
- ・重力等の一定外乱がある場合でも、精度良くイナーシャ同定できた。
- ・速度指令の大きさにより、粘性摩擦、クーロン摩擦および一定外乱トルクで表せない摩擦特性が存在することがわかった。

今後は、速度ゼロ付近の摩擦特性を把握し、モデル化して補償することにより、制御特性の向上を行いたい。

参 考 文 献

- 1) 山崎東, 菅野道夫: ファジィ制御システムと制御, 28, 7 (1982) 442.
- 2) 堀川慎一, 古橋武, 大熊繁, 内川嘉樹: ニューラルネットワークによる学習型ファジィ制御, 計測自動制御学会論文集, 127, 2 (1991) 208.
- 3) 梅田信弘, 小黒龍一: GAによる最適ゲインの決定, 安川電機, 61, 237 (1997) 222.
- 4) 山田哲夫, 吉田康宏, 伊達正晃: 負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定の一方法, 電学論 D, 113, 2 (1993) 263.
- 5) 鶴田和寛, 中村裕司: 粘性摩擦, 一定外乱およびクーロン摩擦の影響を除去したイナーシャ同定方式, 第38回自動制御連合講演会予稿集 (1995) 11.
- 6) P.Lischinsky, C.Canudas-de-Wit, G.Morel: Friction compensation for an Industrial Hydraulic Robot, IEEE Control Systems, February (1999) 25.