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

正員 間下 知紀* 正員 大石 潔**

正員 百目鬼英雄***

High Speed Positioning System Considering Coulomb Friction and Inertia Variation

Tomonori Mashimo*, Member, Kiyoshi Ohishi**, Member, Hideo Dohmeki***, Member

In a conventional positioning system, when the position error becomes small, the motor cannot obtain enough deceleration torque. Hence, the position response becomes slow.

In order to overcome this problem, this paper proposed a new high speed positioning system of an AC servo-motor considering unknown coulomb friction, inertia variation and windup phenomenon. In this paper, the sum of coulomb friction load and inertia variation are estimated by disturbance observer. The proposed method always uses the maximum acceleration torque, the deceleration torque and maximum speed.

キーワード：高速位置決め，外乱オブザーバ，アンチwindアップ，クーロン摩擦負荷，慣性変動

Keywords: high speed positioning, disturbance observer, anti-windup, coulomb friction torque, inertia variation

1. はじめに

筆者らはこれまでに負荷としてクーロン摩擦と粘性摩擦項を有する系について高速に位置決めを行う手法を提案してきた⁽¹⁾。本論文では，実際のサーボ系において，より一般的なクーロン摩擦負荷と，慣性変動による負荷の両方がある系について，提案する手法を拡張し高速位置決めを可能にする。

2. 高速位置決め制御法

図1に本論文に使用した基本となる従来の位置制御系のブロック図を示す。図1の制御系では一般的なwindアップ対策として出力飽和が生じた場合には積分器を止めている。図1に示す従来の位置制御系を用いて高速に位置決めを行うため，位置指令としてステップ状の入力を与えた場合，減速時に位置偏差が減少し，なだらかな応答となってしまう⁽¹⁾⁽²⁾。

モータを高速で位置決めするためには図2のSpeedに示すようにモータの最大トルクで加速し，最高速度に達したのち負荷を支えながら一定速度で駆動し，最後に最大トル

図1 従来の位置制御系のブロック図

Fig. 1. Block diagram of conventional positioning system.

図2 理想的な高速位置決め応答

Fig. 2. Ideal response for high speed positioning.

クで減速する必要がある。このような理想的な応答を得るために，本論文では図2のSpeed Referenceに示すように時間 $[t_0, t_2]$ においては速度指令として ω_{max} を， t_2 以降は零を，それぞれステップ状に与える。しかしながら，時間 t_2 はモータにかかる負荷，目標位置によって変化する。また，一般に負荷トルクは未知であることが多いため，時間 t_2 を事前に算出することは困難となる。本論文ではモータにかかる負荷 T_L を外乱オブザーバによって推定して， t_2 に値する位置偏差 $\Delta\theta_m^{err}$ を求める手法を新しく提案する⁽²⁾。 $\Delta\theta_m^{err}$ は減速開始の閾値で， $\Delta\theta_m^{err}$ 内に実際の位置偏差 θ_m^{err} が入った際に時間 t_2 と判断する。

* オリエンタルモーター（株）

〒277-8530 柏市篠籠田 1400

Oriental MotorCo., Ltd.

1400, Shikoda, Kashiwa 277-8530

** 長岡技術科学大学

〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1

Nagaoka University of Technology

1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka 940-2188

*** 武蔵工業大学

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

Musashi Institute of Technology

1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo 158-8557

$\Delta\theta_m^{err}$ は減速時の速度波形の定積分であり (1) 式で表される。このとき減速に必要とする時間および初期速度は図 2 の拡大図に示すように t_d, ω_{m0} とする。本論文では、負荷がクーロン摩擦負荷 T_{LC} と変動分の慣性モーメント J_L である場合減速時の速度 $\omega_m(t)$ 及び時間 t_d の式である (2), (3) 式を新たに示す。2 つの式を (1) 式に代入することでクーロン摩擦負荷と慣性変動がある場合の $\Delta\theta_m^{err}$ は (4) 式として新しく導出される。

$$\Delta\theta_m^{err} = \int_0^{t_d} \omega_m(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega_m(t) = \omega_{m0} - \frac{k_t i_{max} + T_{LC}}{J_n + J_L} t \dots\dots\dots (2)$$

$$t_d = \frac{\omega_{m0}}{\frac{k_t i_{max} + T_{LC}}{J_n + J_L}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta\theta_m^{err} = \frac{1}{2} \frac{\omega_{m0}^2}{\frac{k_t}{J_n + J_L} \left(i_{max} + \frac{\hat{T}_{LC}}{k_t} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

さらに、(5) 式に示すように慣性モーメントに変動があり $J_L \neq 0$ であれば $\dot{\omega}_m \neq 0$ の時、つまり過渡時に推定トルクへその影響が現れ、過渡状態と定常状態の外乱オブザーバ出力 $\hat{T}_L$ を比較することで慣性変動分とクーロン摩擦負荷の同定が可能となる⁽³⁾。

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + T_s s} (J_L \dot{\omega}_m + T_{LC}) \simeq J_L \dot{\omega}_m + T_{LC} \dots\dots\dots (5)$$

提案する制御系のブロック図を図 3 に示す。提案手法では図 3 の Pre Controller において $\Delta\theta_m^{err}$ と実際の位置偏差 θ_m^{err} を比較し、 $\omega_m^{ref} = \omega_{max}$ 、または $\omega_m^{ref} = 0$ の指令を与える。その後、図 2 に示すように θ_m^{err} が十分小さい任意の値 $\Delta\tilde{\theta}_m^{err}$ 以下になったときに時間 t_3 であると判断し、制御系は Pre Controller を用いたループから従来の位置制御系のループへ切り替えられる。また速度制御系ではステップ状の指令を与えることになるので飽和を起こすことがある。従来のウィンドアップ対策のように積分器を止めるだけでは飽和が収まった際に応答が遅れてしまう。そこで、提案法では制御系の閉ループ特性を変化させない手法の一つである筆者らが提案してきたアンチウィンドアップアルゴリズムを用いる⁽⁴⁾。

3. 実験結果

図 4(a), (b) にそれぞれ従来の制御系、提案手法を用いた制御系の実験結果を示す。実験はモータにプロニーブレーキによるクーロン摩擦と慣性体を回転子につけた慣性負荷をかけて行っている。従来法が減速時になだらかな応答となっているのに対し、提案法では加減速ともにモータの最大トルクを用いて高速に位置決め出来ているのが確認できる。

4. まとめ

サーボモータの高速位置決め手法として未知のクーロン摩擦負荷および慣性変動を推定し、その推定値と目標位置のみを用いて高速に位置決めするアルゴリズムを新しく提案した。提案手法の有効性を実験によって確認した。

(平成 16 年 3 月 18 日受付)

図 3 提案する位置決め手法のブロック図

Fig. 3. Block diagram of proposed positioning system.

(a) conventional positioning controller

(b) proposed positioning controller

図 4 実験結果

Fig. 4. Experimental results.

文 献

- (1) T. Mashimo, K. Ohishi, and H. Dohmeki: "High speed positioning system considering viscous friction torque for servo motor", 2003 Japan Industry Application Society Conference I.E.E. Japan, pp.427-430 (2003) (in Japanese)
間下知紀・大石 潔・百目鬼英雄:「粘性摩擦負荷にロバストなサーボモータの高速位置決め制御」, 電気学会産業応用部門全大予稿集第 2 分冊, pp.427-430 (2003)
- (2) T. Mashimo, K. Ohishi, and H. Dohmeki: "High speed positioning system considering coulomb friction and inertia variation", The papers of Joint Technical Meeting on Industry Electric and Electronics Application, IEE Japan, IEA-03-66, pp.17-22 (2003) (in Japanese)
間下知紀・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」, 電気学会産業電力電気応用研究会予稿集 IEA-03-66, pp.17-22 (2003)
- (3) H. Sato and N. Matsui: "Estimation of Inertia by Torque Observer", T. IEE Japan, Vol.112-D, No.2, pp.181-182 (1992-2) (in Japanese)
佐藤宏和・松井信行:「負荷トルクオブザーバを用いたイナーシャ推定法」, 電学論 D, 112, 2, pp.181-182 (1992-2)
- (4) K. Ohishi and T. Mashimo: "Design Method of Digital Robust Speed Servo System Considering Output Saturation", IEEE Trans. IA, Vol.119, No.1, pp.88-96 (1999-1) (in Japanese)
大石 潔・間下知紀:「操作量飽和を考慮したデジタルロバスト速度サーボ系の一構成法」, 電学論 D, 119, 1, pp.88-96 (1999-1)