適応制御を用いた多軸速度同期システム*

鎌野 琢也**・鈴木 茂行**・飯田 賢一**・
片岡 雄***・富塚 誠義****

Multiple Axes Synchronizing System under Adaptive Feedforward Control*

Takuya KAMANO**, Takayuki SUZUKI**, Kenichi IIDA**,
Yu KATAOKA*** and Masayoshi TOMIZUKA****

1. はしがき

抄紙機, 工作機械, 巻取り機などのように, 動特性の異なる複数の駆動軸を有するプラントにおいては, 製品精度あるいは作業効率の向上のために, 軸間の同期化を図りつつ, 各軸の回転速度を精密に制御する必要がある¹⁾. しかしながら, 動作条件によりその動特性が, 変動する駆動軸の回転速度を, 定常状態のみならず過渡状態において同期させることは, 固定ゲインコントロールを用いる従来の制御システムでは限界があり, 適応機能を有する同期化コントローラが必要となる.

本論文では, アダプティブフィードフォワードコントローラ (AFC)²⁾ と同期化コントローラを組み合わせ, 二軸速度同期システム^{3),4)} を多軸システムに拡張した, 多軸速度同期システムを提案する. 同システムの応答特性のシミュレーション結果から, その有用性が確認されたので, 以下に報告する.

2. システム構成

Fig. 1 に, 提案する多軸速度同期システムの構成図を示す. 第 1 軸から第 n 軸のプラントの動特性は, それぞれパラメータの異なる一次

Fig. 1 Synchronizing adaptive feedforward control for multi-axes system

遅れ要素で表わし, 各軸は, 固定ゲインコントローラ (k_{ai}) からなるフィードバックループを構成している. 各軸には, 他の軸との同期化を図りつつ追従誤差を減少させ, 応答性を改善するための AFC が設けられている. AFC の各パラメータは, 対応する軸の追従誤差信号と, 同期化コントローラからの同期化誤差信号より求められる適応誤差信号を用いて, 次式で調整される.

* 原稿受付 1991. 11. 30

** 徳島大学 工学部 The University of Tokushima; 2-1 Minamijosanzima, Tokushima 770, JAPAN

*** 片岡機械製作所 Kataoka Machine Co., LTD; 4765-46 Sangawa, Iyomishima 770, JAPAN

**** カリフォルニア大学 バークレー校 Department of Mechanical Engineering, University of California; Berkeley, California, CA 94720, U.S.A

Key Words : multiple axes system, adaptive control, feedforward control, motion control, synchronization.

$$\frac{d\hat{P}_i(t)}{dt} = \gamma e_{fai}(t) \Phi(t) \quad (i=1 \sim n) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{P}_i(t)$ は次式で表わされる適応パラメータベクトルであり、

$$\hat{P}_i^T(t) = [\hat{W}_{i1}(t), \hat{W}_{i0}(t), \hat{W}_{ic}(t)] \quad (2)$$

$\gamma > 0$ は適応ゲイン、 $e_{fai}(t)$ は適応誤差信号である。また、 $\Phi(t)$ は次式で表わされる AFC の入力信号で

$$\Phi^T(t) = [D\omega_r(t)\alpha_s, \omega_r(t)\alpha_s, V_c] \quad (3)$$

$\omega_r(t)$ は規範入力、 V_c は一定入力、 α_s は速度検出器の係数、 D は微分演算子を表す。第 i 軸の適応誤差信号 $e_{fai}(t)$ は、追従誤差信号と同期化コントローラからの同期化誤差信号を用いて、次式で求められる。

$$\begin{aligned} e_{fai}(t) &= e_{fsi}(t) + \beta \{e_{fsi}(t) - e_{fs(i+1)}(t)\} \\ &\quad - \beta \{e_{fs(i-1)}(t) - e_{fsi}(t)\} \\ &= (1+2\beta)e_{fsi}(t) - \beta \{e_{fs(i+1)}(t) + e_{fs(i-1)}(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\beta > 0$ は同期化パラメータである。(4) 式から明らかなように、各軸は同期化コントローラを介して、間接的に影響を及ぼし合い、その適応パラメータは、隣合う軸間との同期化を図りつつ、追従誤差が減少するように調整されている。本適応システムの漸近安定性は、超安定論⁵⁾を用いて証明される。ただし、 $\beta = 0$ とすると同期化コントローラは作用せず、各軸は独立して動作することに注意しておく。

3. 応答特性

提案した多軸速度同期システムの一例として、六軸システムの応答特性のシミュレーション結果から、その有用性を確かめる。計算には Table 1 に示す時定数とゲイン定数を用いるが、その値は未知の値として取り扱う。また、適応ゲイン γ を $\gamma = 0.1$ とし、規範入力として周期 8 (s)、振幅 150 (rad/s) の台形波状の信号を用い、

Table 1 Time constants and gain constants of six axes system

i -th Axis	Time Constant τ_{mi} (s)	Gain Constant K_{mi} (rad/s/V)
1st Axis	1.407	19.24
2nd Axis	0.844	19.24
3rd Axis	0.563	19.24
4th Axis	0.281	19.24
5th Axis	0.141	19.24
6th Axis	0.0563	18.89

(a) Independent adaptive feedforward control ; $\beta = 0$

(b) Synchronizing adaptive feedforward control ; $\beta = 20$

Fig. 2 Responses of six axes system in early stage of adaptation

各軸の固定ゲインコントローラの値 k_{ai} はすべて 4 に、各適応パラメータの初期値は 0 にそれぞれ設定している。

Fig. 2 (a), (b) は、それぞれ適応初期段階における $\beta = 0$ と $\beta = 20$ の場合の応答特性である。 $\beta = 0$ とすると、各軸は独立して動作するので、各軸の出力は動特性の違いから、それぞれ異なる応答を示しつつ、規範入力に近づいている。これに対し、 $\beta = 20$ とすることにより各軸出力は、適応初期段階から一致して規範入力に近づいている。この結果から、各軸の動特性の違いは、同期化コントローラにより補償されていることがわかる。

つぎに、適応後に、規範入力を一定に変更し、第 6 軸のみに加えた外乱トルク (0.1 Nm ; 定格負荷トルクに相当) に対するそれぞれ $\beta = 0$ および $\beta = 20$ の場合の応答特性を、Fig. 3 (a), (b) に示す。 $\beta = 0$ の場合には、外乱が加えられた軸の出力 ω_6 のみが、その影響を受け変化し、他の軸の出力は、規範入力に一致したままである。それゆえ、第 6 軸の AFC の作用により、外乱の影響が補償され、 ω_6 が規範入力に回復するまでの間、システムは非同期状態にある。一方、 $\beta = 20$ とすると、外乱が加えられた軸ばかりでなく、他の軸の出力も変化し、過渡状態においても各軸の出力はほぼ一致しており、高速の同期化が図られていることがわかる。また、(4) 式から明らかなように、 $\beta = 20$ とすることは、適応

(a) Independent adaptive feedforward control ; $\beta = 0$ (b) Synchronizing adaptive feedforward control ; $\beta = 20$

Fig. 3 Responses of six axes system to step disturbance to the sixth axis

ゲインを実質的に増加させることと等価であるため、同一の外乱トルクに対する出力の変動幅は、 $\beta = 0$ の場合に比較して減少している。

4. むすび

本論文では、適応制御を用いた多軸速度同期システムを提案している。提案したシステムは、各軸に設けられた適応コントローラ (AFC) の適応誤差信号として、各軸の追従誤差に加えて軸間の同期化誤差を導入することで、軸間の高速な同期化を実現している。ここでは一例として、六軸システムの応答特性のシミュレーション結果から、その有効性を確かめた。その結果、本システムは動特性が未知であり、かつ、それらが大幅に異なる駆動軸の出力を定常状態のみならず過渡状態においても同期させることができ、また、外乱トルク変動に対しても、高速の同期化の図れることが明らかとなった。

今後、提案システムの実装技術を検討し、実測結果から本システムの有用性を確認する予定である。

参 考 文 献

- 1) 電気学会 (編): 電気工学ハンドブック, 電気学会 (1988)
- 2) 鎌野, 鈴木, 井内, 富塚: アダプティブフィードフォワード制御を用いた速度および位置制御システム; システム制御情報学会論文誌, Vol. 4, No. 8, pp. 331~338 (1991)
- 3) M. Tomizuka, J. S. Hu, T. C. Chiu and T. Kamano: Synchronization of Two Motion Control Axes Under Adaptive Feedforward Control; Adaptive and Learning Control, DSC-Vol. 21, pp. 1~8 (1990)
- 4) M. Tomizuka, T. Kamano and T. Suzuki: Design and Implementation of the Adaptive Synchronizing Feedforward Controller for Two Axes Motion Control Systems; IFAC International Symposium on ITAC, pp. 295~300 (1991)
- 5) I. D. ランダウ, 富塚: 適応制御システムの理論と実際, オーム社 (1981)