拘束条件付き軌道追従制御の実用的な一修正方法

正員 涌井伸二 (キャノン)

A Practical Modification Method of Trajectory Tracking Control
with Constrained Condition
Shinji Wakui, Member (Canon Inc.)

キーワード：ロボットアーム、軌道追従制御、非干渉化制御、1形サーボ系、外乱オブザーバ

1. はじめに

著者は、ロボットアームに非干渉化制御⁽¹⁾を施したうえで、最適な1形のサーボ系を構成する軌道追従制御⁽²⁾に対して、物理パラメータに同定誤差がある場合の運動性能への影響を明らかにした⁽³⁾。同制御則では、同定誤差に対するロバスト性確保のために1形のサーボ系を組む。しかし、誤差許容による不安定性は設計パラメータの重み操作で回避できても軌道追従精度は確保できないことが判明した。また、軌道追従過程で発生する不安定現象は定常偏差補償器の振舞いに着目して説明可能となり、同現象を抑圧して軌道追従制御の実用化を図るため外乱オブザーバを設けるという制御則の修正を提案した⁽³⁾。しかし、外乱オブザーバの組み込みや、その同定誤差に原因した新たな不安定現象が発生しないかという懸念がもたれていた。そこで、ここに数値実験による検証結果を示す。

2. 軌道追従制御法と外乱オブザーバの付加

水平2自由度アームの運動方程式は次式で与えられる。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}, \theta) + D\dot{\theta} = u \quad (1)$$

文献(2)で提案の制御則は次式である。

$$u = [0, D_i]x - \bar{M}_i \bar{J}^{-1} F p_N + \bar{M}_i \bar{J}^{-1} k v \quad (2a)$$

$$\dot{v} = [-\delta x, v_y - \delta \dot{y}]^T \quad (2b)$$

ただし、 $p_N = [\delta x, \delta \dot{x}, \delta \dot{y}, \delta \ddot{y}]^T$, $x = [\delta \theta^T, \delta \dot{\theta}^T]^T$, F, K : 最適(出力)レギュレータの設計によるゲイン係数、下付添字 i : 同定値、上付() : 平衡点、 $\delta x, \delta y$: x - y 作業座標上の偏差、 J : ヤコビ行列、 v_y : 速度指令、その他の記号は慣例に従う

上式は非干渉化制御適用によって制御対象を位置と速度に関するサブシステムに分離し各々に対して最適な1形のサーボ系が設計されることを意味する。位置

と速度の最適な1形サーボ系はパラメータ誤差がないとき独立であるが、不可避な誤差が混入すると位置制御系にとって速度指令 v_y が外乱として感知され、これが不安定現象の原因となった。そこで、実用化に向けて図1のように位置制御系の定常偏差補償器の出力を零と成す次式の外乱オブザーバを新たに設けることを提案した。

$$F_0 \left[\frac{\omega_0}{s + \omega_0} (b_2 \delta \dot{x} + b_1 w_1) - b_3 \delta \dot{x} \right] \quad (3)$$

ここで、 ω_0 はオブザーバ帯域を決める角周波数、 F_0 , $b_1 \sim b_3$ はオブザーバゲインであり、 $F_0 = 1/b_1$, $b_1 = \alpha$, $b_2 = \omega_0 + (\beta - 1)[JMDJ^{-1}]_{11}$, $b_3 = \omega_0$ と選んだとき平衡点における位置誤差は零とでき、かつ制御と観測に関

図1 制御システムの構成図
Fig. 1. Schematic diagram of control system.

図2 作業座標系
Fig. 2. Task oriented coordinates.

する分離定理が成立する。 α, β は慣性行列と粘性摩擦行列の真値に対する同定値のスカラー倍率を意味する。

3. 数値実験

図2はアーム先端の x 座標を固定したまま、 y 方向に速度指令 v_y で追従させるという拘束条件付き軌道を示す。ここで、初期位置 A を平衡点とした制御則(2a)式の第2, 3項の固定したパラメータは、アーム先端が $y=0$ を通過したとき最終位置 B を平衡点としたパラメータへ切り換えられる。 v_y は0.3 m/sであり2秒間与えた。数値実験は粘性摩擦行列が真値に対して11%増の見積もりとなった場合を示す。条

件設定の理由は粘性摩擦が大きいアームほど制御が難しく安定性に深刻な影響を与えることが次式の β の安定判別からわかっており、外乱オブザーバ付加による効果が顕著に示せるからである。ただし、 f_{1-3} と $k_{1,2}$ は各々 F, K の要素である。

$$\left. \begin{aligned} \beta &< 1 + \frac{f_2 + f_3}{\text{trace}[\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{J}^{-1}]} \\ \beta &< 1 + \frac{f_1 k_2 + f_3 k_1}{k_1[\mathbf{J}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{J}^{-1}]_{22}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

図3は軌道追従時の関節トルク、軌道誤差および関節角度のプロファイルである。粘性摩擦の同定値に過誤があったまま拘束条件付き制御を施した場合、約3秒後に発散をまねく(記号a)。しかし、オブザーバの付加によって(記号b)この発散は抑圧可能となり、最終位置 B への漸近が達成される。しかも、パラメータ誤差なく拘束条件付き軌道追従制御を施した場合(記号c)よりも軌道誤差の抑圧効果は大きい。

なお、 $\omega_0 = 200\pi$ (rad/s)であり、その他のパラメータは文献(2)も参照されたい。また、 b_2 には同定誤差の見積もりを当てねばならず、分離定理成立のためには時変ないし切換えを要請する。しかし、図3の数値実験では固定した。従って、オブザーバゲインの同定誤差に原因する新たな不安定現象はそのゲインを適切に設定したときには生じない。

4. むすび

拘束条件付き軌道追従制御則に外乱オブザーバを組み込んだとき、軌道追従誤差の抑圧とともに不安定現象の発生も軽減されることを示した。

(平成5年1月19日受付)

文 献

- (1) 小郷・美多：システム制御理論入門(昭54)実教出版
- (2) 大明・美多：「拘束条件付制御によるロボットアームの経路制御」, ロボット学誌, 3, 27 (昭60)
- (3) 涌井：「ロボットアームへの軌道追従制御適用の留意点」, 電学論D, 110, 683 (平2-6)

涌井 伸二(正員)

昭和29年12月23日生。54年信州大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年第二精工舎入社。平成元年キャノン入社。現在、制御システム研究室室長。工学博士。ステッパの研究開発。

(a) 関節トルク

(b) 軌道追従誤差

(c) 関節角度

図3 軌道追従結果

Fig. 3. Results of trajectory tracking.