ファジィ I-PD 予見コントローラを用いる倒立振子の位置制御の実験 A Design Method of Fuzzy I-P Servo System with Preview Actions

○学 八巻 貴則 (新潟大) 学 王 東 (新潟大)

正 愛田 一雄 (新潟大) 今井 純一 (新潟大)

Takanori Yamaki, Niigata University, Ikarashi, 2-nochō8050, Niigata, 950-2181

Wong Dong, Niigata University

Kazuo Aida, Niigata University

Junichi Imai, Niigata University

Key Words : Fuzzy Control, Preview Action, Inverted Pendulum

1. 緒言

現在, ファジィ制御は様々なところで実用化されている。倒立振子においてもファジィ制御を適用した研究がなされてきた。しかし, その多くは安定化制御を目的としたものであり, 位置制御への取り組みはあまり行われていない。

一方, 目標軌道の未来情報を利用した予見制御を行うことで, 制御エネルギーが減少し, 追従性が向上することが知られている。しかし, これまでファジィ制御に予見制御を付加した研究はあまり進められていない。

そこで本研究では, ファジィ制御に北森¹⁾の I-PD 制御系を導入したファジィ I-PD フィードバック制御系に, ファジィ予見要素を遺伝的アルゴリズム(以下 GA と表記)により最適化したファジィ予見制御系を付加し, ファジィ I-PD 予見コントローラを設計する。実プラントとして, 倒立振子を使用し位置制御を行う。その実験結果から, 本制御系の有効性を検証し報告する。

2. 制御対象モデル

実験用制御対象として, 倒立振子キット(Quanser Consulting Co, Ltd.)を用いる。系の運動方程式は, 次式で示される。

$$\begin{aligned} (m_p + m_c)m_p l_p \cos\theta \ddot{x} + m_p \ddot{\theta} l_p^2 - m_p g l_p \sin\theta &= 0 \\ \ddot{x} + m_p \ddot{\theta} l_p \cos\theta - m_p \theta^2 l_p \sin\theta &= F \end{aligned} \quad (1)$$

θ を振子の角度, x は台車の位置, l_p は振子の重心までの距離, m_p , m_c はそれぞれ振子と台車の質量を表している。また, F は台車に加えられる力を表している。

(1)式より状態方程式は次のように表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_p g}{m_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(m_p + m_c)g}{m_c l_p} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_c} \\ -\frac{1}{m_c l_p} \end{bmatrix} F \quad (2)$$

倒立振子の状態変数は位置, 角度, 速度, 角速度の 4 個あるが, 本研究では位置制御を行うために位置以外の状態を考慮しない。しかし, それでは倒立振子が不安定になるおそれがあるので, 最適レギュレータ理論を適用し他の 3 個の状態を補償する。Fig. 1 のプラント部分は, これを含んだものとする。

3. 制御系の構成

Fig. 1 に本制御系のブロック図を示す。多入力から単入

力への変換法によりファジィ制御規則数を減らす方法に, 北森の I-PD 型モデルマッチング手法の設計公式を導入している。これにより, 3 つのスケーリングファクタ s_1 , s_2 , s_3 と, 出力ゲイン k_f をそれぞれ得ることができる¹⁾。さらに, 予見制御部(Preview)を付加し, ファジィ I-PD 予見制御系を設計する。

Fig. 1 Fuzzy I-PD preview control system

4. 多入力から単入力への変換法

設計するファジィコントローラの制御規則言語は, Negative Big(NB), Negative Medium(NM), Negative Small(NS), Zero(ZO), Positive Small(PS), Positive Medium(PM), Positive Big(PB)の 7 個あり, ファジィコントローラへの入力数が n 個の場合, 制御規則数は 7^n 個となる。もちろん, 規則数が多ければ多いほど制御目的は達成されやすいが, 同じ制御性能が得られればパラメータ調整, 計算速度を考慮すると規則数が少ないほどよい。ここで, 本研究で採用した単入力への変換法である Fig.1 の DS 部分について説明する。

まず例として, 前件部変数を 2 個(e , Δe), 後件部変数を 1 個とすると, 制御規則の関係は座標形式の Fig. 2 に示される。

Fig. 2 The rule base of Fuzzy

Fig. 3 Distance of Fuzzy

これより、ファジィ言語の出力が ZO 直線からの距離によって求められることが分かる。Fig.3 に示すように ZO 直線を、傾きを λ_1 の直線 $\Delta e + \lambda_1 e = 0$ とする。また、任意の点 $\times (\Delta e, e)$ と置くと、ZO 直線から点 $\times$ までの距離は、

$$DS = \frac{\Delta e + \lambda_1 e}{\sqrt{1 + \lambda_1^2}} \quad (3)$$

となる。これを n 次元へ拡張すると、 $E^T = [e_n \ e_{n-1} \ \dots \ e_2 \ e_1]$ 、 $\lambda = [\lambda_{n-1} \ \dots \ \lambda_2 \ \lambda_1]$ より、次式で示される。

$$DS = \frac{\lambda E}{\sqrt{1 + \lambda_{n-1}^2 + \dots + \lambda_1^2}} \quad (4)$$

これより、ファジィコントローラは単入出力に変換できる。

5. メンバシップ関数

ファジィ集合のパラメータ調整の指針は、大きく分けるとメンバシップ関数を等間隔に配置した均等配置、0 付近にファジィ集合を密にした内密配置、逆に外側を密にした外密配置の 3 つがある。ここでいう 0 というのは、たとえば制御偏差 e が 0 ということである。つまり内密配置では、目標値付近で細かい制御を行うことを意味しており、逆に外密配置では、目標値付近において不感帯に近くなるという特性を持っている。

本研究では、前件部で上述の 3 タイプのメンバシップ関数を適用する。また、後件部に関しては、均等配置に固定している。

6. 予見制御部

現在の目標値と未来の目標値の差の荷重平均を(5)式に表す。これを予見情報として用い、ファジィ予見制御を行う。

$$r_p(k) = \frac{\sum_{i=1}^{L_p} W_i \{r(k+i) - r(k)\}}{\sum_{i=1}^{L_p} W_i} \quad (5)$$

$r(k)$ は参照入力、 L_p は予見長さを表している。また、重み W_i を(6)式に示す。

$$W_i = W_0^{i-1} \quad (6)$$

ファジィ予見制御部において、後件部メンバシップ関数を変化させると、より効果が得られる。ここで、後件部のメンバシップ関数の最適化と予見長さ L_p を設計する方法として GA を用いる。

GA は、自然界の遺伝的な法則を工学的にモデル化した最適化にすぐれた方法である。この GA のアルゴリズムには、再生、交叉、突然変異の 3 つの基本的動作がある。これらの動作を用い、(7)式の評価関数が最小となるような予見入力を求める。

$$J = \sum_{i=1}^K \{e^2(k) + \rho u^2(k)\} + r O_v \quad (7)$$

O_v はオーバーシュート、 ρ 、 γ は重みを表す。

7. 実験

上記の設計法を用い、倒立振子の位置を制御する実験を行った。Fig. 5 はステップ幅 20cm の応答を表してい

る。また、本制御系の追従性を確かめるために参照入力を(8)式に示すような 5 次曲線とした応答を Fig. 6 に示す。

$$q(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (8)$$

t は時間、 $a_0 \sim a_5$ は定数である。

また、両図の応答はメンバシップ関数が均等配置のものである。

Fig. 5 Step responses of control system

Fig. 6 Responses of control system to reference input eq. (8)

8. 結言

ファジィ I-PD 予見コントローラを設計し、倒立振子で位置制御の実験を行った。予見制御を付加することにより立ち上がり時間、制動時間を改善することができた。また、追従性においても満足する結果が得られた。今後の課題として、最適レギュレータを用いずにファジィ I-PD コントローラでの、安定化制御と位置制御を行うことである。

参考文献

- 1) 北森, 制御対象の部分的知識に基づくサンプル値制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 15 巻, 5 号 (1979), 695-700
- 2) Dong Wang, Kazuo Aida, Research on Fuzzy I-PD Optimal Preview Control, Institute of Control Automation and Systems Engineers, Korea, (2000), 483-487