

PD 関係式に基づく途中誤差モデルを用いた 知的制御系の構築

王 濱

筑波大学・知的制御システム研究科

指導教員 安信 誠二

1 はじめに

PD 制御などの線形制御については、制御系設計法、安定性など、長年に渡り数多くの研究がなされてきた。また、線形制御系は調整するパラメータ数も少なく、構築が容易であるので実用性に富み、様々な場で実際に利用されている。しかし、内部状況や応答の正確度に制約がある非線形システムが制御対象として、線形制御はコントローラの自由度が低く、希望通りの応答を得ることが困難である場合が多い。

そのため、最近では計算機の処理速度の向上にともなって、GA やニューラルネットワーク、ファジィ制御といった知的制御についても活発に研究されている。これらの知的制御は、調整するパラメータ数も多くコントローラの自由度が高いので、柔軟な制御が実現でき、応答の調整がし易いという利点を持っている。

本研究では、まず、PD 制御関係式が誤差の微分方程式として解いた誤差方程式により、途中誤差モデルを決定する。次は、予見ファジィ制御方式で決めた途中誤差モデルを組み込んで、オーバーシュートをしなくて、立ち上がり速度が速い応答を得られる知的制御系を構築する。内部状況制約がある非線形システム・連結したタンクシステムを制御対象として、本研究の有効性を示す。

2 途中誤差モデル

PD 制御はシステムに対して現在最も実用化されている制御方式の一つである。プラントへの操作信号 u は目標値と現在値との誤差 e を用いて次式のように表せる。

$$u = K_p \times e + K_d \times \frac{de}{dt} \quad (1)$$

式 1 が誤差 e の微分方程式として、解いた誤差 e の方程式

$$e = e^{A \times t} \times r + \int_0^t e^{A(t-\tau)} \times B \times u(\tau) d\tau \quad (2)$$

となる。ただし： $A = -\frac{k_p}{k_d}$; $B = \frac{1}{k_d}$; r : 目標値

求めた誤差方程式により、式 2 を変えると、次式を得られる。

$$e(t') = e^{At^0} \times e(0) + B e^{At^{prime}} \left(\int_0^t \frac{u(\tau)}{e^{A\tau}} d\tau + \int_t^{t^0} \frac{u(\tau)}{e^{A\tau}} d\tau \right) \quad (3)$$

式 2 を代入して、 t^{prime} t と、即ち、 $t: (t - t^{prime})$ の区間に関数 u が定数 (t 時刻の操作量) とみなすと、次式を得られる。

$$e(t') = e^{A(t^0-t)} \times e(t) + B u(t) \left(-\frac{1}{A} (1 - e^{A(t^{prime}-t)}) \right) \quad (4)$$

整理してから、 $t = ndt$, $t^{prime} = (n+1)dt$ (ただし、 dt : サンプル時間) で交換して、離散化でいうと、次式を得られる。

$$e(n+1) = e^{Adt} \times e(n) - \frac{B}{A} (1 - e^{Adt}) \times u(n) \quad (5)$$

途中誤差モデルは

$$\begin{cases} A = -\frac{k_p}{k_d} \\ B = \frac{1}{k_d} \end{cases} \quad e(n+1) = e^{Adt} \times e(n) - \frac{B}{A} (1 - e^{Adt}) \times u(n) \quad (6)$$

となる。

3 予見ファジィ制御

予見ファジィ制御方式では、対象状態の観測値をもとに、制御則に仮定された候補値についてシミュレーションを行い、その結果により制御目的となる被評価量を予見・予測し、多目的評価のファジィ推論を行い、最適な制御指令を決定する。

3.1 予見ファジィエンジン

本研究では、ファジィ推論は重心値を採用する。推論過程は図 1 に示す。仮定部は、仮定値を決めるの

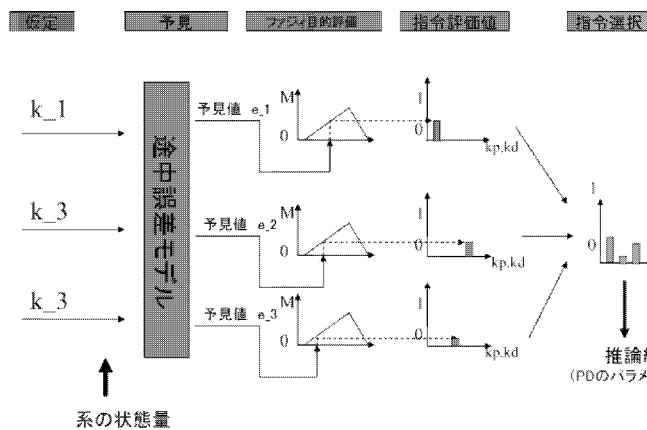


図 1: 予見ファジィエンジンの推論過程

は、ある程度で制御できる PD パラメータを採用する。 K_p, K_d, I_T を A に掛けて、仮定値が五組出る。

$$A = \begin{matrix} & \# \\ 0.2 & 1.0 & 1.8 \\ 1.8 & 1.0 & 0.2 \end{matrix}$$

予見部は、前に述べた途中誤差モデルを組み込んで、各仮定値によりモデルで予見値を求める。

誤差としては、最も良いのは値が 0 である。そして、 $E = -r \ 0 \ 0 \ r$ を目的評価となる。 指令選択は、次式により求めた重心値を推論結果とする。

3.2 制御ルール

予見ファジィ制御の制御ルールは一般的に「もし (If) 制御指令 u を C_i とした場合、評価指標 x は A_i である、評価指標 y は B_i であるならば、(then) 制御指令 u を C_i とする」といった。

本研究では、具体的に示すと、

$$\begin{aligned} \text{If}(K \text{ is } K_1 \rightarrow \text{目的評価 is } E) & \quad \text{then } K \text{ is } K_1 ; \\ \text{If}(K \text{ is } K_2 \rightarrow \text{目的評価 is } E) & \quad \text{then } K \text{ is } K_2 ; \\ \text{If}(K \text{ is } K_3 \rightarrow \text{目的評価 is } E) & \quad \text{then } K \text{ is } K_3 ; \end{aligned}$$

となる。

3.3 制御指令の求め (制御実行部)

本研究では、予見ファジィ制御方式で、途中誤差モデルを組み込んで、PD 制御のパラメータの変化を通して、目的を実現する。そして、知的制御系の制御指令の求め方は PD 制御関係式を採用して、離散化で行った式 7 のように示す。

$$u(n) = k_p(n) \times e(n) + k_d(n) \times \frac{e(n) - e(n-1)}{dt} \quad (7)$$

3.4 知的制御系の構築

前に述べた途中誤差モデルと予見ファジィ制御部と制御実行部 (制御指令の求め) と合わせて、下図のように知的制御系の構造を示す。

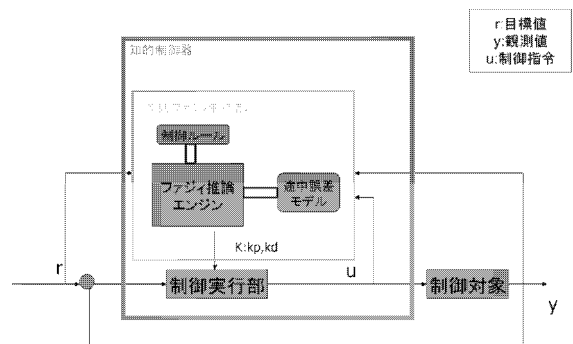


図 2: 知的制御系の構造図

4 制御シミュレーション例・連結したタンクシステム

本論文では、構築した知的制御系の有効性を確認するため、連結したタンクシステム (TTS) の制御シミュレーションを行った。TTS は、非線形システムで水が溢れないように、オーバーショットを絶対にしないと内部状況制限がある。

このシステムは、図 3 に見られるように第 1 タンク

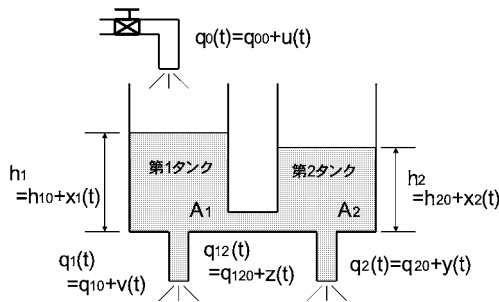


図 3: 連結したタンクシステム

クと第 2 タンクが管で連結されていて、第 1 タンクへの流入量を調節することにより、第 2 タンクの水位制御を行うものである。各変数を図 3 に示す。

4.1 対象システムのモデル化

ここでは、予見ファジィ制御に用いるモデルを求める。本論文では 2 タンクシステムを平衡状態近傍で線形化し、伝達関数を求め、モデルとして用いる。第 1 タンクの式は、

$$A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_0(t) - q_1(t) - q_{12}(t), \quad (8)$$

第 2 タンクの式は、

$$A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = q_{12}(t) - q_2(t) \quad (9)$$

と書くことができる。とすると、状態方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{12}} \right) & \frac{1}{A_1 R_{12}} \\ \frac{1}{A_2 R_{12}} & -\frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} u(t), \end{aligned} \quad (10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

実際のシミュレーションでの数値を用いて伝達関数を計算する。ここで [m] であった単位を [cm] で定義しなおす。すると伝達関数は

$$G(s) = \frac{0.1s + 0.01259}{s^2 + 0.2973s + 0.006245},$$

$$\omega_n = 0.07903, \quad \zeta = 1.881, \quad K = 2.016 \quad (12)$$

と求められる。ζ > 1 なので、このシステムは負の 2 実根をもつ非振動系となる。

この伝達関数を、知的制御の対象システムのモデルとして組み込む。

4.2 PD パラメータの決定

PD で定常偏差があるが、本研究では、定常偏差をなくすために知的制御系の制御指令を積分器に通して、制御対象へ入力する。単純な PD 制御は Matlab の simulink にチューニングしてからパラメータを $K_p = 1.7, K_d = 8.6$ と決定する。図 4 には目標値は 0.6 メー

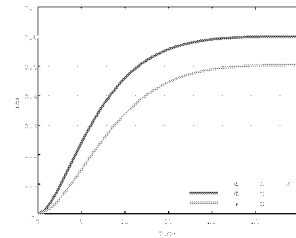


図 4: 単純な PD 制御の応答

トルで、サンプリング時間 dt は 0.1 秒で、実行時間

は 30 秒で、操作量（バルブの開度）を [0 ~ 10] と設定する。

4.3 途中誤差モデルの検定

前に述べた途中誤差モデルの精確率を検定するため、図 5 のように、構築した PD 制御系に途中誤差モデルを組み込む。ただし、途中誤差モデルの出力が、

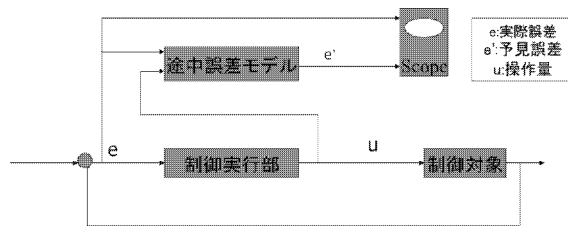


図 5: 途中誤差モデルの検定図

制御系に影響しなくて、評価量だけなる。図 6 によ

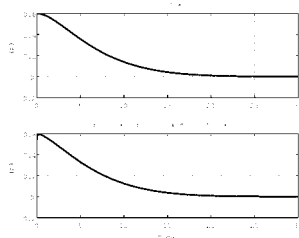


図 6: 誤差の定性的な評価

り、二つの曲線の形は大体に同じである。または、途中誤差モデルで予見したの誤差が実際の誤差よりもっと 0 に接近している。そして、途中誤差モデルは、PD 制御での誤差の変化特性が表せる。図 7 は、PD 制御で動いた具体的なデータである。このデータは 12s ~ 22s の間に五秒毎の 現在時刻と 目標値と 実際誤差と 予見した五回後の誤差と の四つの量である。このデータにより、今回予見した五回 (5dt) 後の誤差が、基本的に実際の 5dt 後の誤差と等しい。

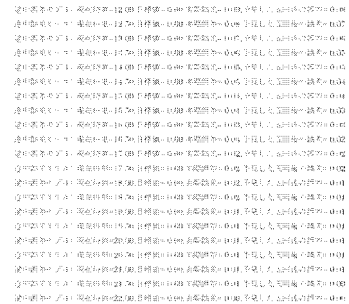


図 7: test

4.4 知的制御系の構築

構築した PD 制御系により、 $r_{IT} = 0.6m$; $dt = 0.1s$; $A = -0.1977$; $K_0 = 1.7 \ 8.6$ となる。前に述べた推定部と予見ファジィ制御部と制御実行部とを構築してから、図 2 のように合わせて、知的制御系を構築した応答は下図に示す。

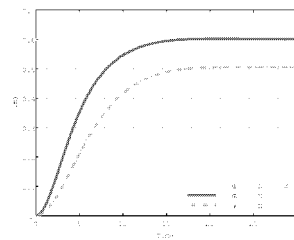


図 8: 知的制御系の応答

4.5 結果の評価

オーバーシヨットが両方ともない。

単純な PD 制御で行った応答 (図 4 のよう) は、立上る時間は 0.6m までが 21.6s である。

知的制御で行った応答 (図 8 のよう) は、立上る時間は 0.6m までが 15.1s である。

即ち、知的制御が単純な PD 制御よりは、安定まで 6.5s (30.1%) が速くなる。

5 まとめ

本研究では、ある程度良い PD 制御に基づいて、PD 制御関係式により途中誤差モデルを求めて、予見ファジィ制御方式で求めた途中誤差モデルを組み込んで知的制御系を構築した。

また、連結したタンクシステムを制御対象とし、変化特性と正確性の二つの方面から途中誤差モデルの精確率を検定した。制御結果から構築した知的制御系の有用性を確認することができた。

参考文献

- [1] 安信誠二、「ファジィ工学」、昭晃堂, 1991。「PID 制御」、朝倉書店, 1992。
- [2] 吉田恭子、「予見ファジィ制御系の構築方式の開発」、筑波大学大学院 卒業論文, 2005。