

ILQ サーボ系設計法による押出成形機の非干渉化制御

2020SC044 水野浩明

指導教員：陳幹

1 はじめに

押出成形機とは投入された原料を加熱しながらスクリューで混ぜ合わせ、原料の形状を変化させる産業機械である。また本研究で扱う押出成形機の加熱シリンダは3個のバレルと分割されたバンドヒータを接続した温度制御プラントであり、この温度制御系は、各バレルごとに異なる温度設定値をもっている [1]。この結果バレル間に温度干渉問題を起こし、性能や品質を悪化させてしまっている。そこで本研究では [1] で扱われた、バレル間に温度干渉を持つ押出成形機に対して、[2] で提唱された ILQ サーボ系設計法を用いる事で、バレル間の温度干渉問題の解決を目指す。

2 制御対象

制御対象として [1] で取り上げられた押出成形機を扱う。取り上げられた押出成形機概念図を図 1 に示す。

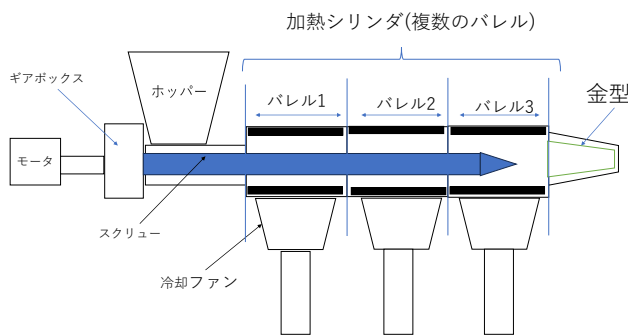


図 1: 押出成形機概念図

また、本研究では [1] で導出された 3 入力 3 出力の押出成形機の状態方程式を扱う。以下にその状態方程式を示す。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx \quad (2)$$

$$x = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^\top, u = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^\top \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_1 + \beta_1}{C_1} & \frac{\beta_1}{C_1} & 0 \\ \frac{\beta_1}{C_2} & -\frac{\alpha_2 + \beta_1 + \beta_2}{C_1} & \frac{\beta_2}{C_2} \\ 0 & \frac{\beta_2}{C_3} & -\frac{\alpha_3 + \beta_2}{C_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

この時の各パラメータは [1] のものを用いる。表 1 でそのパラメータを示す。

表 1: 押出成形機のパラメータの名称と数値

名称	数値	単位
バレルの温度 θ_n		$^{\circ}\text{C}$
バレルに入る熱量 q_n		cal/sec
放熱熱量 α_n	1.7×10^{-1}	cal/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{sec}$)
熱伝導熱量 β_n	9.1×10^{-1}	cal/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{sec}$)
熱容量 C_n	2.8×10^3	cal/ $^{\circ}\text{C}$

3 ILQ サーボ系設計法

本研究では [3] で記された ILQ サーボ系設計の手順に沿って ILQ サーボ系設計を行った。以下ではその手順について説明する。

3.1 step1

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_m \end{bmatrix}, D_i = c_i A^{d_i-1} B \quad (6)$$

$$d_i = \min\{k | c_i A^{k-1} B \neq 0\} \quad (7)$$

この時、

$$\det D \neq 0 \quad (8)$$

で制御対象は非干渉化可能である。

3.2 Step2

制御対象の安定性を確認し、安定な d_i 次多項式 $\phi_i(s)$ を、

$$\phi_i(s) = (s - s_i)^{d_i}, s_i = -\frac{1}{T_i}, (1 \leq i \leq m) \quad (9)$$

で与える。

3.3 Step3

(9) 式から $\phi_i(A) = (A - s_i I)^{d_i}$ とおいて、(10) で表現される非干渉化ゲイン K を求める。

$$K = D^{-1} N_\phi, N_\phi = \begin{bmatrix} c_1 \phi_1(A) \\ \vdots \\ c_m \phi_m(A) \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.4 Step4

導出した非干渉化ゲイン K から (11), (12) で表される、基準最適ゲイン K_F^0, K_I^0 を導出する。

$$K_F^0 = D^{-1} N_\psi, N_\psi = \begin{bmatrix} c_1 \psi_1(A) \\ \vdots \\ c_m \psi_m(A) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$K_I^0 = D^{-1} \Phi_0, \Phi_0 = \text{diag}\{\phi_i(0)\} \quad (12)$$

3.5 Step5

Σ を, 調整パラメータ σ_k で構成される $\Sigma = \sigma_k I$ (I : 単位行列) とし, 出力が指定した応答波形に漸近するよう調整パラメータ σ_k を選定する. 調整パラメータの選定方法は以下ようになる.

1. 対称行列 $KB + (KB)^T$ の最大固有値を求め,

$$\sigma > \lambda_{max}[KB + (KB)^T] \quad (13)$$

となるような σ を選定する.

2. 次の行列 F, G, H と F の固有値を求める.

ただし, $A_K = A - BK$ である.

$$E_\sigma = \sigma I - KB - (KB)^T \quad (14)$$

$$F = A_K + GH, G = BE_\sigma^{-1/2}, H = E_\sigma^{-1/2} K A_K \quad (15)$$

この時 F が安定であれば 3. に進み, 不安定であれば 1. に戻って σ をより大きな値に選びなおす.

3. 次式で定義される行列 M の固有値を求め, 虚軸上に固有値がなければ σ の値を減らし, そうでなければ 2. に戻り, 最適な σ を $\underline{\sigma}$ とする.

$$M = \begin{bmatrix} F & GG^T \\ -H^T H & -F^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

以上が [3] で記された ILQ サーボ系設計の手順となる.

4 押出成形機の ILQ サーボ系設計

前章で説明した, ILQ サーボ系設計法を押出成形機に用いる事で制御系を構成した. 相対次数が $d_1 = d_2 = d_3 = 1$ の時, (7), (8) 式を満たすため,

$$D = \begin{bmatrix} c_1 B \\ c_2 B \\ c_3 B \end{bmatrix} \quad (17)$$

を得る. となる. また, (11), (12) 式から

$$K_F^0 = \begin{bmatrix} 2800 & 0 & 0 \\ 0 & 2800 & 0 \\ 0 & 0 & 2800 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K_I^0 = \begin{bmatrix} -4.9123 & 0 & 0 \\ 0 & -4.9123 & 0 \\ 0 & 0 & -4.0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

を導出した.

5 シミュレーション

$u = -K_F x + K_I \int_0^t (r - y) dt$, $\sigma = 0.0035$ で構成される ILQ 制御器を押出成形機に加えた時のシミュレーションを行った. 初期条件 $x = [20, 20, 20]^T$, 目標値 $R = [100, 120, 150]^T$ とした. また [1] の PID 制御での結果と比較するため計測時間を 28800 秒にし, PID ゲインは [1] の結果から $K_p = 2.8, K_i = \frac{1}{1800}, K_d = \frac{1}{60}$ とした. 図 2 に ILQ 制御による結果, 図 3 に PID 制御による結果を示す.

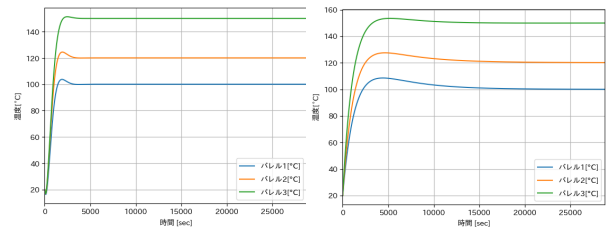


図 2: ILQ 制御によるシミュレーション

次に, 非干渉性を検証するため計測時間が 15000 秒を経過した後で, バレル 2 の目標値 150 に変更した際の各制御の応答を調べた. 図 4 に ILQ 制御による結果を, 図 5 に PID 制御による結果を示す.

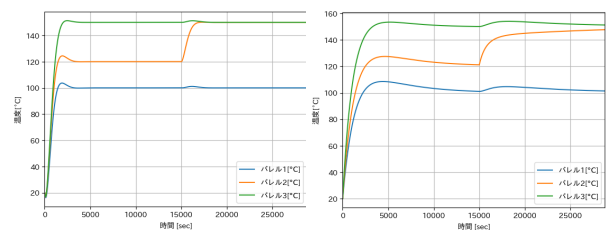


図 4: 目標値が変更した際の ILQ 制御によるシミュレーション

6 考察

図 5 の PID 制御では目標値が変動した際にバレル 1, 3 も影響を受け, 目標値から外れてしまっているが, 図 4 の ILQ 制御では目標値が変動した際もバレル 1, 3 はほとんど影響を受けていない. このことから PID 制御では熱干渉の影響を受けているが, ILQ 制御では非干渉化が達成されていると考える.

7 おわりに

本研究では, 押出成形機に対し, ILQ サーボ系設計を用いた事で非干渉制御系を構築し, バレル間の温度干渉問題を解決することができた.

参考文献

- [1] 濱根 洋人, 横山 修一, 小野垣 仁, 岩谷 征, H_∞ 外乱オブザーバによる押出成形機非干渉化温度制御, 電気学会論文誌, Vol.119, No.6, pp.866-872, (1999)
- [2] 藤井 隆雄, 下村 卓, ILQ 最適サーボ系設計法の一般化, システム制御情報学会論文誌, Vol.1, No.6, pp.194-203, (1988)
- [3] 藤井 隆雄, 辻野 太郎, 最適制御の実用設計法, 森北出版株式会社, (2015)