個人差による影響を低減する 手動制御系設計

○末 長 修，井 原 素 三（静岡大・工）

A Design of Manual Control System for
Reducing The Influence of Individual
Difference

O. Suenaga, M. Ihara (Shizuoka Univ.)

〔目的〕一般に，人間には個人差が存在し，その影響により，例えば手動制御系においては，制御結果に差異が生ずることは周知の事実である．これら個人差による影響が低減され，さらに個人に依らず系全体の制御特性が所望の一定の特性を示す手動制御系が望まれる．このような立場から，著者らはモデル追従型サーボ系設計手法を基に目的とする制御系を構成した¹⁾．しかし，この系は操作結果から処理した信号を零とする作業を操作者に課したため，操作者の操作内容によっては過度の制御負担を操作者に与える可能性があるなどの問題点が残されていた．そこで，本研究では先に提案した系を改良し，その有用性を実験的に確かめることを目的とする．

〔理論〕人間，制御対象としてのプラント，および望ましい手動制御系全体の制御特性を表現するモデルをそれぞれ離散時間時不変システムとして以下のように記述する．

人間：

$$x_h(k+1) = A_h x_h(k) + b_h r(k) \quad (1.a)$$

$$y_h(k) = c_h x_h(k) \quad (1.b)$$

プラント：

$$x_p(k+1) = A_p x_p(k) + B_p u_p(k) + w(k) \quad (2.a)$$

$$y_p(k) = c_p x_p(k) \quad (2.b)$$

ただし， $B_p = [b_{p1}, b_{p2}]$

モデル：

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + b_m r(k) \quad (3.a)$$

$$y_m(k) = c_m x_m(k) \quad (3.b)$$

ただし， x, u, y はそれぞれの状態変数ベ

クトル，入出力であり， A, B, b, c は行列またはベクトルである． r は目標値， w は外乱である．また，目標値とプラント外乱は次式の性質を有するものとする．

$$\phi(q^{-1})r(k) = \phi(q^{-1})w(k) = 0 \quad (4)$$

ただし， $\phi(q^{-1}) = 1 + \rho_1 q^{-1} + \dots + \rho_l q^{-l}$ で q^{-1} は $q^{-1}r(k) = r(k-1)$ なる時間推移作用素である．さらに，プラント入力 u_p ，プラント出力とモデル出力の偏差 e を

$$u_p(k) \stackrel{d}{=} \begin{bmatrix} y_h(k) \\ u_c(k) \end{bmatrix} \quad (5), \quad e(k) \stackrel{d}{=} y_p(k) - y_m(k) \quad (6)$$

と定義する．すなわち，本研究の目的は $k \rightarrow \infty$ で $e(k) \rightarrow 0$ となる制御入力 u_c を設計することである．

式(1)～(3)と式(6)の両辺に $\phi(q^{-1})$ を掛け，整理すると以下の拡大系を得る．

$$x_a(k+1) = \Phi x_a(k) + \Gamma \phi(q^{-1})u_c(k) \quad (7)$$

ただし

$$x_a(k)^T = [\phi(q^{-1})x_p(k)^T, e(k-1)^T, \dots, e(k-l)^T, \\ \phi(q^{-1})x_m(k)^T, \phi(q^{-1})x_h(k)^T]^T \\ \stackrel{d}{=} [x_1(k)^T \mid x_2(k)^T]$$

$$\Phi = \left[\begin{array}{cccc|cc} A_p & 0 & \dots & 0 & 0 & b_{p1}c_h \\ c_p & -\rho_1 I & -\rho_2 I & -\rho_l I & -c_m & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & I & 0 & 0 \\ \hline 0 & \dots & 0 & 0 & A_m & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & A_h \end{array} \right]$$

$$\stackrel{d}{=} \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_{12} \\ 0 & \Phi_2 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma^T = \begin{bmatrix} b_{p2}^T & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\stackrel{d}{=} \begin{bmatrix} \Gamma_1^T & 0 \end{bmatrix}$$

この拡大系において、 (Φ, Γ) を考えると可制御ではない。しかし、 $x_a(k)$ のすべての状態変数を零化する必要はなく、 $e(k-1), \dots, e(k-l)$ を零にすれば目的が達成される²⁾。

そこで、以下のような2次形式評価関数

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (\|x_1(k)\|_Q^2 + \|\phi(q^{-1})u_c(k)\|_R^2) \quad (8)$$

を最小にする最適入力を用いる。このとき、拡大系の最適入力 $\phi(q^{-1})u_c(k)$ は以下となる。

$$\phi(q^{-1})u_c(k) = -(R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \Phi x_a(k) \quad (9)$$

ただし、 P は離散形リカッチ方程式

$$P = \Phi^T P \Phi + Q - \Phi^T P \Gamma (R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \Phi \quad (10)$$

の正定対称解である。ここで、 P, Q を

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_{12} \\ P_{12}^T & P_2 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

と表すと、式(7)を用いて式(9)は次式となる。

$$\phi(q^{-1})u_c(k) = -(R + \Gamma_1^T P_1 \Gamma_1)^{-1} [\Gamma_1^T P_1 \Phi_1 x_1(k) + \Gamma_1^T (P_{12} \Phi_{12} + P_{12} \Phi_2) x_2(k)] \quad (11)$$

ここで

$$e(k) = \phi(q^{-1})\xi(k), \quad (12)$$

すなわち

$$\xi(k) = e(k) - \rho_1 \xi(k-1) - \cdots - \rho_l \xi(k-l) \quad (13)$$

なる $\xi(k)$ を導入し、式(11)の両辺を $\phi(q^{-1})$ で割って書き直すと、制御入力 $u_c(k)$ を得る。

$$u_c(k) = F_1 x_p(k) + F_{21} \xi(k-1) + \cdots + F_{2l} \xi(k-l) + F_3 x_m(k) + F_4 x_h(k) \quad (14)$$

ただし

図1 モデル追従型手動制御系の構成

$$\begin{aligned} & [F_1, F_{21}, \dots, F_{2l}] \\ & = -(R + \Gamma_1^T P_1 \Gamma_1)^{-1} \Gamma_1^T P_1 \Phi_1 \\ & [F_3, F_4] \\ & = -(R + \Gamma_1^T P_1 \Gamma_1)^{-1} \Gamma_1^T (P_{12} \Phi_{12} + P_{12} \Phi_2) \end{aligned}$$

以上より、図1に示すモデル追従型手動制御系が得られる。

〔実験〕表示装置にCRT、操作器にロータリエンコーダが連動する直径30mmの回転つまみを用い、図1に示す系を構成した。操作者、プラントは2次遅れ系、モデルは1次遅れ系で記述した。目標値はランダムステップ波である。操作者の状態変数推定には適応オブザーバ³⁾を用いた。被験者は男子5名で、 u_c を加えない実験Ⅰ、加える実験Ⅱのそれぞれについて、数回の練習の後、測定を行った。

〔結果〕各実験について、目標値 r とプラント出力 y_p 間の周波数応答特性を図2、3に示す。その結果、実験Ⅰで現れている個人差（ゲイン、位相特性のバラツキ）は、実験Ⅱにおいてはほとんどみられず、またモデルの周波数応答特性とほぼ一致することが確かめられた。なお、本研究の一部は平成2年度文部省科学研究費の補助を受けたものである。

〔参考文献〕1) 末長、井原：個人差が人間-機械系に及ぼす影響の低減について、人間工学、26-2, 75~80, 1990, 2) 古田：デジタルコントロール、186~192, コロナ社, 1989, 3) 岩井他：オブザーバ、198~201, コロナ社, 1988

図2 手動制御系の周波数応答〔実験Ⅰ〕

図3 モデル追従型手動制御系の周波数応答〔実験Ⅱ〕