人間-機械系における個人差の軽減に関する研究

○末長 修, 井原 素三 (静岡大・工)

Abatement of Individual Difference
on Man-Machine Systems

O. Suenaga, M. Ihara (Shizuoka Univ., Fac. of Eng.)

〔目的〕 人間-機械系が実働した場合, 人間により, また同一人であっても身体状態や環境条件などにより, 系の制御特性は変化する. このような人間の制御特性の差異, すなわち個人差は系の安全性などの面から軽減され, さらに個人に依らず系の制御特性が所望の一定な特性を示すことが望ましい. 本研究は, このような個人差を軽減する人間-機械系をモデル追従型サーボ系^{1), 2)}の考え方を基に構成し, その有用性を実験的に確かめることを目的とする.

〔理論〕 図1に示すような補償手動制御系モデルを考える. ただし, $M(s)$, $G(s)$ はそれぞれ人間モデル, 制御対象の伝達関数表現である. また, r , u_m , y_m , z_m はそれぞれ目標値, 偏差, 操作量, 制御量である.

いま, $M(s)$ を

$$M(s) = K / (s^2 + a_1 s + a_0) \quad (1)$$

とする. よって, 人間モデルの状態方程式は

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_m \\ \dot{y}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_m \\ \dot{y}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K \end{bmatrix} u_m \quad (2)$$

となる. ただし, 時刻 t の記述は省略する.

ここで, 人間の状態方程式を式(2)と同じ次元, 係数行列により表現できると仮定する. すなわち

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_h \\ \dot{y}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_h \\ \dot{y}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K \end{bmatrix} u_h \quad (3)$$

ただし, u_h , y_h はそれぞれ入力(偏差), 出力(操作量)である.

次に

$$e = y_h - y_m \quad (4a), \quad u = u_h - u_m \quad (4b)$$

と定義すると, 式(2), (3)より

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K \end{bmatrix} u \quad (5)$$

を得る.

Davisonの方法³⁾を用いて, 式(5)に対する次式の拡大系を考える.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} + B \dot{u} \quad (6)$$

ただし

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K \end{bmatrix}$$

この拡大系に対して, 2次形式評価関数

$$J = \int_0^\infty \{ [e \ \dot{e} \ \ddot{e}] Q \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ \ddot{e} \end{bmatrix} + r \dot{u}^2 \} dt \quad (7)$$

を最小にする入力 $\dot{u}$ は

$$\dot{u} = f_1 e + f_2 \dot{e} + f_3 \ddot{e} \quad (8)$$

で与えられ, f_1, f_2, f_3 は

$$[f_1 \ f_2 \ f_3] = -r^{-1} B^T P \quad (9)$$

である. ただし, Q は半正定対称行列, r は正のスカラである. また, P はリカッチ方程式

$$A^T P + P A + Q - P B r^{-1} B^T P = 0 \quad (10)$$

の正定対称解である.

初期条件を $e(0) = \dot{e}(0) = 0$ とし, 式(8)を積分すると, 人間への入力偏差 u_h は式(4b)より

図1 補償手動制御系モデル

$$u_h = f_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + f_2 e + f_3 \dot{e} + u_m \quad (11)$$

で与えられ、人間-機械系の構成を図2のようになる。ここで、人間と式(3)との伝達関数特性の差異、また人間の相違による制御特性の差異は式(3)、(6)のパラメータ変動に相当するが、直接測定できる物理量 (e , $\dot{e}$, $\ddot{e}$) を状態変数とする最適レギュレータの最適フィードバック制御系 [式(6), (8)] は、これらパラメータ変動に対する感度を減少させる機能を有する。従って、個人に依らず y_h と y_m が一致し、個人差が軽減されることになる。

〔人間モデルの決定〕 表示装置にCRT、操作器にロータリ・エンコーダを用い、図1と同様な系を構成し、人間の周波数応答特性から人間モデル $M(s)$ を決定する。目標値は、折点周波数0.4Hzの1次遅れ要素により処理したランダム信号である。 $G(s) = 1$ とした。被験者は男子5名であり、練習を含めて10回の試行を行った。10回目の測定における被験者の平均的周波数応答特性から $M(s)$ を

$$M(s) = 34.72 / (s^2 + 11.39s + 13.89)$$

図2 人間-機械系

図3 人間の周波数応答特性

図4 人間の周波数応答特性(図2)

と決定した。図3に全被験者からの平均的、及び $M(s)$ の周波数応答特性を示す。

〔個人差軽減に関する実験〕 図2に示す制御系を構成し、個人差が軽減されることを実験的に確かめる。被験者は前述の実験の経験者2名と未経験者3名の男子である。ただし、 u_h の計算のために系にはマイクロ・コンピュータが介在するため、系は離散時間系となる。サンプリング周期0.02秒、 $\text{diag } Q = [10, 1, 0]$, $r = 1$ とした場合の状態フィードバック制御則は

$$[f_1 \ f_2 \ f_3] = [-3.03 \ -1.55 \ -0.116]$$

となる。測定は数回の練習の後に行った。 u_m と y_h から求めた系の平均的周波数応答特性を全被験者から求めた。その結果を図4に示す。図3と比較して、個人差(標準偏差)は軽減され、さらに系の周波数応答特性は $M(s)$ とほぼ同様な特性を示すことが確かめられた。

参考文献 1) K. Furuta etc., IEEE Trans. Autom. Control, AC-27(3), (725/727), 1982 2) K. Furuta etc., J. Robotic Systems, Vol. 2, No. 1, (89/112), 1985 3) E. J. Davison, IEEE Trans. Autom. Control, AC-21(1), (25/34), 1976