制御行動における人間のダイナミックス

高島 典子*, 吉沢 修治*, 南雲 仁一*

HUMAN DYNAMICS IN MANUAL CONTROL

Michiko TAKASHIMA*, Shuji YOSHIZAWA*, Jin-ichi NAGUMO*

1. はじめに

自動車・航空機等の操縦あるいはクレーンの制御などのように、人間が自分の制御結果を知り、それによって機械を（手で）制御するような人間-機械系を手動制御系と呼ぶ。このようなシステムにおける人間の行動を調べることは、人間の制御動作特性を知り、使いやすい機械を設計するうえできわめて重要なことである。Tustin (1947) 以後、制御理論を用いて手動制御系における人間の制御特性を解析しようとする研究が、多数行われてきた。

本稿では、まず手動制御系の一般的な構成について説明する。次にこれまで行われてきたこの方面の研究を簡単に紹介し、最後にわれわれの研究室で行ってきた研究について述べる。

2. 手動制御系の一般的な構成

航空機シミュレータなどの応用的研究に用いられる手動制御系には、その応用分野によって多種多様なものがあるが、ここでは基礎的研究に用いられる手動制御系についてのみ述べることにしよう。

一般的な手動制御系のブロック図を図 1 に示す。図に

見られるように、手動制御系では制御のフィードバックループの中に人間が含まれていることが特徴である。

手動制御の方式は、表示装置から人間が直接知ることのできる情報の違いによって、追跡制御と補償制御とに分けられる。追跡制御では系への入力信号（目標値）および系の出力信号（制御値）の両方が人間に与えられ、人間は出力信号が入力信号と一致するように制御をする。一方、補償制御は、人間が入力信号と出力信号の差（偏差と言う）だけを知らされて制御を行うもので、一般により困難な制御である。表示装置としてブラウン管を用いた場合には、これらは例えば図 2 のようにあらわすことができる。

系への入力信号は、ランダム信号が用いられる場合と、正弦波信号、ステップ信号など特定の信号が用いられる場合とがある。前者に比べ、後者では人間が制御に慣れるにしたがって入力信号を予測した動作を行うようになる傾向が強い。人間に対する信号の表示方法としては、大部分の研究において視覚による方法が用いられているが、振動の体感覚（畑・津村 (1973)）、触覚（Hill (1970), Schmid, Bekey (1978)）、聴覚（Mirchandani (1972), Vinje, Pitkin (1972)）などによる方法が用いられている場合もある。操作装置には、操作レバー、つ

図 1 手動制御系

* 東京大学 工学部 計数工学科 (Department of Mathematical Engineering and Instrumentation Physics, Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo)

図2 追跡制御と補償制御

まみ、ハンドル（自動車の）などが用いられ、制御対象には線形特性を持つもの（ K , K/s など（付録参照））が多い。

3. 手動制御系に関するこれまでの研究

上述のような基本的な手動制御系における人間の制御動作について、種々のモデルが提案され、また種々の方法でその性質が調べられてきた。それらの研究のいくつかを、簡単に紹介しよう。

Tustin (1947) は、手動制御系における人間の特性のモデルとして、次の伝達関数を提案した（付録参照）。

$$\frac{1+Ts}{s} e^{-\tau s}$$

それ以後伝達関数を用いた表現を中心に、さまざまな線形モデルが提案された（井口（1970）参照）。これに関する文献は、Costello, Higgins (1966) によりまとめられている。

しかし、人間の動作というのは、決して線形でも定常でもない。McRuer, Jex (1967) は、手動制御系の出力信号のうち入力信号と線形な相関を持たない部分をレムナント (remnant) と呼び、その原因として、

- (1) システムの雑音
- (2) 人間の動作の非線形性
- (3) 人間の行動の非定常性

を挙げている。このうち (2) および (3) には、人間の適応能力、学習能力、予測能力といった、機械にはない独特の性質に起因しているものがあると考えられる。そこで、単一の線形モデルでは説明できないこれらの性質のうちのいずれかに着目し、それを説明しようとするモデルが考えられるようになった。

制御対象（図1参照）の変化に対する人間の適応能力を説明するモデルとしては、McRuer 他 (1965) のクロスオーバーモデル (crossover model) が代表的なものである。このモデルは、ある条件の下で近似的に、

$$Y_p Y_c = \frac{\omega_c e^{-\tau s}}{s} = \frac{\omega_c}{s} \cdot e^{-\tau s}$$

という式で表現される。ここで Y_p は人間の制御特性を示す伝達関数、 Y_c は制御対象の特性を示す伝達関数である。この式は人間と制御対象とを一つの系と考えたときのその系の特性、 $Y_p \cdot Y_c$ が、 Y_c によらず、ゲイン定数 ω_c （クロスオーバー周波数と言う）、積分要素、および遅れ時間 τ を持つ遅れ要素の積で近似されることをあらわしている。このことは、制御対象の特性が異なると、人間はその違いを打ち消すような、つまり全体の特性が変化しないような制御特性を持つことを意味している。

上のモデルは定常状態における適応能力に関するものであるが、制御対象の特性が時間的に変化したときの人間の適応の速さに関する研究については、Young (1969) により良くまとめられている。また最近の日本における研究の例として、畑・竹田 (1977) の実験的考察がある。人間の適応していく過程自体をとらえるには、その時々刻々の特性を表現するようなモデルが必要である。そこで時々刻々の人間の特性を推定する手法が、Nagumo, Noda (1967), 小畑 (1975) によって提案されている。

一方、手動制御系において人間がある評価関数に関して最適制御を行っているとの仮定のもとに、人間の制御特性のモデルを最適制御理論を用いて考察しようとするところみが、10年ほど前から盛んになってきている (Baron, Kleinman (1969))。この方面の研究については、明石 (1973) の解説を参照されたい。

また、GMDH (Group Method of Data Handling) アルゴリズム (Ivakhnenko (1971)) を手動制御系に応用した非線形モデルが、井上・猪岡 (1976), Inooka, Inoue (1978) により報告されている。

4. 学習的同定法を用いた手動制御系の研究

次に、われわれの研究室において行った視覚入力追跡制御系および聴覚入力追跡制御系の研究を紹介しよう。

4.1 学習的同定法

学習的同定法は定常な線形系の同定法の一つであるが、同定に要する計算時間が短いため、手動制御系のように準定常な系の特性を実時間的に求めるのに適している。

時間を離散的とすると、定常な線形系のサンプル値荷重関数は有限個 (N 個) の荷重係数の組

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_N)$$

で近似される。このとき、与えられた入力系列

$$\dots, x_{j-N+1}, x_{j-N+2}, \dots, x_j, \dots$$

に対して、第 j ステップにおける系の出力は、

$$y_j = \sum_{i=1}^N w_i x_{j-i+1}$$

となる。

一方、第 j ステップにおける推定荷重関数を、

$$V_j = (v_1^{(j)}, v_2^{(j)}, \dots, v_N^{(j)})$$

とすれば、その推定出力 z_j は、

$$z_j = \sum_{i=1}^N v_i^{(j)} x_{j-i+1}$$

で与えられる。このとき、次の手続きを用いて逐次推定値を修正することにより、ランダム系列を含む広い範囲の入力系列に対して、推定値 V_j を真の系の荷重関数 W に収束させ得ることが示されている。

$$\begin{cases} v_i^{(j+1)} = v_i^{(j)} + \Delta v_i^{(j)} & (1 \leq i \leq N) \\ \Delta v_i^{(j)} = \alpha(y_j - z_j) \frac{x_{j-i+1}}{\sum_{k=1}^N x_{j-k+1}^2} & (0 < \alpha < 2) \end{cases}$$

さらにこの収束の速さについては、計算機シミュレーションにより、規準化同定誤差

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - v_i^{(j)})^2}{\sum_{i=1}^N w_i^2}}$$

の期待値が、 $2N$ ステップごとに $1/e$ になることが示されている (Nagumo, Noda (1967), 野田・南雲 (1968))。

4.2 視覚入力追跡制御系

図3に、本同定実験装置のブロック図を示す¹⁾。本装置では、目標値は、ブラウン管上に表示された左右にランダムに動く縦の輝線として与えられる²⁾。オペレーターは、この輝線の動きを見ながらつまみを回して、同じブラウン管上に表示されている輝点を横方向に変位させ、輝点が輝線上に乗るように制御する。系への入力信号とつまみの回転角に比例した出力信号とから、前述の学習的同定法を用いて系の荷重関数³⁾が推定され、別のブラウン管上にオンラインで表示される。

図3 視覚入力追跡制御系の同定実験装置

(注: AD変換器……Analog-Digital変換器)

- 1) この手動制御系では、図1における制御対象は $K=1$ で省略されている。
- 2) ランダム信号の高域遮断周波数は、0.1 Hz 程度である。
- 3) われわれの実験で求められる荷重関数は、人間だけの特性ではなく、人間を含むフィードバック系全体つまり手動制御系自体の特性であることに注意されたい。

この装置を用いて、視覚入力追跡制御系の同定実験を行った。実験中に観測される荷重関数の形状は、一般に先頭の部分が正の大きな値を取り、尾の部分は正または負の小さな値を取る。

実験の結果から、オペレーターの制御状態は、次の二つのモードに分類できることがわかった。

正規モード：追跡はスムーズに行われており、荷重関数の尾の部分は、大むね0付近にある。

非正規モード：オペレーターが追跡に失敗してまごまごしたりあわてたりしている状態である。このときの荷重関数の尾の部分は、波うち、かなり大きく上下に振れる。

正規モードにおける荷重関数は、さらに2種類に分類される。すなわち、一方は荷重関数の先頭が鋭く大きいもので、オペレーターがかなり細かく追跡制御を行っている状態に対応し、他方は先頭がなだらかな山になっているもので、幾分大まかな追跡を行っている状態に対応している。両者の例を図4に示す。(南雲ら 1969), Nagumo 他 (1970) 参照)

(a)

(b)

図4 視覚入力追跡制御系の正規モードにおける荷重関数

4.3 聴覚入力追跡制御系

もう一つの追跡制御系として、図5に示すような聴覚入力による系を構成し、同定実験を行った。この系で

図5 聴覚入力追跡制御系の同定実験装置
(注: VF変換器……Voltage-Frequency変換器)

は、目標音 x は矩形波の周波数をランダムな入力信号 $x^{(i)}$ により線形に周波数変調したもので、ヘッドフォンの左耳側からオペレーターに与えられる。一方、右耳側からは操作レバーの傾きに比例した周波数の音が供給され、オペレーターは左右の音の高さ（周波数）を一致させるように操作レバーを制御する。

同定実験の結果、聴覚入力追跡制御系の荷重関数の形状は、視覚入力の場合とはほぼ同様であることがわかった。ただ、本実験の場合には、オペレーターの音程認知の熟練度により制御成績⁵⁾に顕著な差があらわれた。ときには、オペレーターが目標音出力音を把握しそこで、操作レバーをランダムに左右に振ったり逆にまったく手の動きを止めてしまうような状態が観察されたが、このようなことは視覚入力の場合には見られなかった現象である。聴覚入力追跡制御系の二つのモードに対応す

(a) 正規モード

(b) 非正規モード

図6 聴覚入力追跡制御系の各モードにおける荷重関数の例

- 4) 高域遮断周波数は 0.3 Hz 程度である。
- 5) オペレーターの制御成績は、同定誤差の絶対値

$$|\gamma_j - \sum_{i=1}^N v_i^{(j)} x_{j-i+1}| \text{ と追跡偏差の絶対値 } |\gamma_j - x_j|$$

とで評価されている。

る荷重関数の例を、図6に示す。

同一オペレーターに上記の二つの入力方式による追跡制御を行わせると、明らかに視覚入力の方が優れた制御を行った。そこで視覚入力方式を多少変更して、聴覚入力の場合に比較的上手な制御を行ったオペレーターにとって、それと同程度のむずかしさになるようにした。すなわち、入出力信号の表示に上下に変位する水平輝線を用いることにより、操作レバーの動作方向(左右)と輝線の変位方向を違え、また入出力信号の区別をつけにくくした。こうして2入力方式の比較をこころみた結果、新視覚入力方式を用いても、視覚入力より聴覚入力の場合の方が制御状態のオペレーターによる差は大きかった。

また、新視覚入力、聴覚入力に加えて視聴覚同時入力追跡制御系の同定実験も行ったところ、同時入力の場合にオペレーターはもっとも安定で遅れ時間も小さい追跡制御を行うことがたしかめられた。(Takashima他(1978)参照)

4.4 オペレーターの制御状態と精神状態との関連

オペレーターの追跡制御状態と精神状態との関連性を探るこころみとして、聴覚入力追跡制御中のオペレーターの皮膚電位活動(新美・白藤(1969))を測定した。その結果、追跡制御の不調にともなって皮膚電位水準の不自然な変動の生じる例がいくつか観察された。これはオペレーターの安静状態が興奮の方向へ向かっているとき追跡制御が乱れてくることを示していると考えられる。

5. お わ り に

手動制御系について、その一般的な構成を説明し、これまでの研究を簡単に紹介した。手動制御系は、制御ループに人間が含まれるために、オペレーターの適応、学習、疲労の程度さらに作業に対する集中度のような精神的要因等によって、制御特性・制御成績が大きく左右され、統一的な取り扱いがむずかしい。そのため、研究の大筋は1970年ごろまでにできあがったようであるが、その後も種々のアプローチがこころみられてきた。さらに有力な同定法の開発と、精神的状態の指標となる生理学的量の採択が、今後の重要な研究課題と思われる。

付録 伝達関数について

入力信号 $x(t)$ に対して、 $y(t)$ を出力信号とする線形系を考える(t は時間)。入出力信号をそれぞれラプラス

変換したものを $X(s)$, $Y(s)$ とするとき (s は複素変数), 両者の比

$$H(s) = Y(s)/X(s)$$

をその系の伝達関数と呼ぶ.

例えば, 伝達関数が,

$$H(s) = K$$

で与えられる系の出力は,

$$y(t) = Kx(t)$$

となり, これは出力信号が入力信号の K 倍, すなわち比例していることを示す (K をゲイン定数と言う).

また, 伝達関数が,

$$H(s) = 1/s$$

である系の出力は,

$$y(t) = \int_0^t x(t) dt$$

で与えられ, したがって出力信号は入力信号の時間的積分となる.

さらに, 伝達関数が,

$$H(s) = e^{-\tau s}$$

となる系の出力は,

$$y(t) = x(t-\tau)$$

である. すなわち, 出力信号は時刻が τ だけ前の入力信号に等しい (ここで τ を遅れ時間と言う).

二つの系が図 7 (a) のように並列に結合されるとき, 全体の系の伝達関数はそれぞれの伝達関数の和

$$H(s) + G(s)$$

となる. また (b) のように直列に結合されるときは, 全体の系の伝達関数はおののの伝達関数の積,

$$H(s) \cdot G(s)$$

で与えられる.

(a) 並列結合

(b) 直列結合

図 7 系の結合

以上のことから, Tustin の伝達関数

$$H(s) = \frac{1+Ts}{s} e^{-\tau s} = \frac{1}{s} e^{-\tau s} + T e^{-\tau s}$$

は,

$$y(t) = \int_0^{t-\tau} x(t) dt + Tx(t-\tau)$$

に対応し, この系が遅れ時間 τ を持つ積分要素と同じ遅れ時間を持つ比例要素との和であることを意味している.

参考文献

- 明石 一 (1973) 人間・機械系における人間の制御特性に関する研究の動向 人間工学, **9**, 41-48.
- Baron S. & Kleinman D.L. (1969). The human as an optimal controller and information processor, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-10, 9-17.
- Costello R.G. & Higgins T.J. (1966). An inclusive classified bibliography pertaining to modeling the human operator as an element in an automatic control system, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-7, 174-181.
- 畑 四郎・竹田晴見 (1977) 可変パラメータ・ダイナミックスをもつ自動制御系における人間の適応性に関する実験的考察 人間工学, **13**, 81-89.
- 畑 四郎・津村俊弘 (1973) 人間の制御動作における体感情報の効果に関する一実験的考察 人間工学, **9**, 49-57.
- Hill J.W. (1970). A describing function analysis of tracking performance using two tactile displays, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-11, 92-101.
- 井口雅一 (1970) 人間・機械系 共立出版.
- Inooka H. & Inoue A. (1978). Application of the GMDH algorithm to a manual control system, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-8, 819-821.
- 井上 章・猪岡 光 (1976) GMDH (Group Method of Data Handling) を用いた自動制御系の同定 人間工学, **12**, 115-117.
- Ivakhnenko A.G. (1971). Polynomial theory of complex systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-1, 364-378.
- 小畑秀文 (1975) 最小2乗推定の一手法とその自動制御系への応用 計測自動制御学会論文集, **11**, 348-353.
- McRuer D.T., Graham D., Krendel E.S., & Reisener W. (1965). Human pilot dynamics

- in compensatory systems, AFFDL-TR-65-15.
- McRuer D.T. & Jex H.R. (1967). A review of quasi-linear pilot models, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-8, 231-249.
- Mirchandani P.B. (1972). An auditory display in a dual-axis tracking task, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-2, 375-380.
- Nagumo J. & Noda A. (1967). A learning method for system identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-12, 282-287.
- 南雲仁一・佐藤俊輔・野田淳彦 (1969) 手動制御系の応答特性の実時間表示システム 人間工学, 5, 405-410.
- Nagumo J., Sato S., & Noda A. (1970). Real-time display system of response characteristics of manual tracking systems, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-11, 211-216.
- 新美良純・白藤美隆 (1969) 皮膚電気反射—基礎と応用, 医歯薄出版.
- 野田淳彦・南雲仁一 (1968) システムの学習的同定法計測と制御, 7, 597-605.
- Schmid H.P. & Bekey G.A. (1978). Tactile information processing by human operators in control systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-8, 860-866.
- Takashima M., Yoshizawa S., & Nagumo J. (1978). Human operator dynamics in auditory manual tracking systems. Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society 1978, 1433-1438.
- Tustin A. (1947). The nature of the operator's response in manual control and its implications for controller design, *J. Inst. Elect. Engrs.*, 94, IIA, 190-202.
- Vinje E.W. & Pitkin E.T. (1972). Human operator dynamics for aural compensatory tracking, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-2, 504-512.
- Young L.R. (1969). On adaptive manual control, *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, MMS-10, 292-331.