ファジィと人間工学 手動制御とそのファジィモデル

○増井 重弘、寺野 寿郎（法政大学工学部）

Manual Control and Its Fuzzy Model

Shigehiro Masui & Toshiro Terano(Hosei Univ.)

1. 緒言

手動制御において、人間は、制御対象の状態の認知、未来状態の予測や推定、最適の操作方法の選択、操作量の決定、学習による改善など知的活動を行っており、このような複雑な行動を数学モデルで表すのは困難である。一方、ファジィ制御では人間の制御行動がその基本となっているので、人間の行動を分析しルール化すれば手動制御はファジィモデルとして表すのに適している。手動制御の行動モデルが明確になれば、そのファジィモデルを応用して自動制御装置の設計が容易にできる。

2. 手動制御の対象とその操作方法

手動制御の制御対象である二重倒立振子についてのシミュレーションで用いたモデルを説明する。二重倒立振子は、本質的に不安定であり手動制御の困難な制御対象としての適例である。

図1に制御対象である二重倒立振子のモデルを示す。 U , X_1 , X_2 (m) はそれぞれ台車、第一振子、第二振子の水平位置座標である。 ϕ , γ (rad) はそれぞれの垂直偏位角度である。

ここで振子の長さ L (m)、重力の加速度を g (m/s^2)、時間を t (s) とすれば

$$\begin{aligned} \frac{d^4 \gamma}{dt^4} - 4\Lambda \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + 2\Lambda^2 \gamma \\ = \frac{2\Lambda}{L} \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} \end{aligned} \quad (1)$$

図1 二重倒立振子

となり、二重倒立振子の数学モデルは近似的に(1)式で表せる。

ここで Λ は g/L (s^{-2}) である。

手動制御実験は、まず(1)式をサンプルに値系に交換してマイクロコンピュータによって0.2 (sec) のサンプル値でシミュレートする。操作はiiで行い、操作部としてキーボードを用い、キーを9段階に分けて、正負両方向に4段階の大きさのステップ関数を発生するキーを選択操作して行なう。表示部は γ , $\dot{\gamma}$, $\ddot{\gamma}$ の時間経過軸を縦に並べて、 γ , $\dot{\gamma}$, $\ddot{\gamma}$ の未来値も色わけしてややずらしつつ表示する。この二重倒立振子の実験は、 $L=20$ (m), $g=9.8/25$ (m/sec^2) に設定し

た。被験者は、第二振子が僅かに傾けられ状態から γ の偏差を減らすように $\ddot{u}$ を操作する

3. 手動制御の分析結果

人間は適切なインタフェースと予測値表示があれば二重倒立振子のように本質的に不安定な系でも手動制御で十分安定化できる。

しかし、人間の制御操作、特に熟練者の操作は経験や勘によって無意識的に行動している。従って、アンケート等の問診によって熟練者の制御方策の抽出には限界がある。そこで、CRT上の状態変数の時間軸経過表示に対し、アイカメラを用いて被験者が表示画面のどの情報に注目して操作しているかを調べ情報の利用形態を分析し操作方策の抽出を行なう。眼球運動のデータを利用する場合、視線は常に微妙な運動をしているが、本実験では高速な動きを追跡するものではないので、注視成分を含んだ随従眼球運動の運動成分を利用することとし、「アイマークが0.1度以内に0.1秒留まったときの範囲を停留点」と定義した。図2に熟練者の停留点分布の実験例を示す。円の半径は停留時間の長さを表しており、最大停留時間は0.5秒以上である。

図2 熟練者の停留点分布の実験例

熟練者は γ 、 $\dot{\gamma}$ 、 $\ddot{\gamma}$ の全情報を絶えず注視しながら制御している様子が大体解る。しかし、これまでの実験やアンケート結果より熟練者は制御対象の時間的变化にともなう情報利用形態を変えていることが解っている。そこでアイカメラの実験データを6秒毎に時間を分割し、停留点の状態を時間に対して分散分析により検定した結果、表1に示す如く三つのフェーズに分割された。フェーズ2_Eは分散分析の結果で14秒の点で多少の変化が見られた個所である。フェーズ2では時間と共にシステム状態がかなり変化し、特にフェーズ2からフェーズ3の切換え点の部分では制御の成功、に大きく関与するのでこれをフェーズ2_Eとした。

次に、各フェーズ内で γ 、 $\dot{\gamma}$ 、 $\ddot{\gamma}$ のどの情報が利用されているかを、熟練者のデータの分散分析によって調べた。その結果を表2に示す。これらの結果と図2から次の4つのことが明らかになった。

- (1) フェーズ1において $\ddot{\gamma}$ の情報を γ 、 $\dot{\gamma}$ の情報を多く利用する。
- (2) フェーズ2において、 $\dot{\gamma}$ 、 $\ddot{\gamma}$ の情報を γ より多く利用する。ただし、フェーズ初期と終わりではかなり時間的推移が見られる。
- (3) フェーズ2_Eにおいて $\dot{\gamma}$ の情報を γ 、 $\ddot{\gamma}$ の情報より多く利用する。
- (4) フェーズ3において、 $\dot{\gamma}$ 、 $\ddot{\gamma}$ の情報が γ より多く利用される。

このように熟練者の情報利用形態には、はっきりした法則があり、手動制御する際に状

表2 停留時間の分散分析結果

表1 分散分析結果によるフェーズの分類

時 間	フェーズ
0~6 (秒)	フェーズ1
6~18 (秒)	フェーズ2
14~18 (秒)	フェーズ2 _E
18~60 (秒)	フェーズ3

	フェーズ1			フェーズ2			フェーズ2 _E			フェーズ3		
	F	F _α	判定	F	F _α	判定	F	F _α	判定	F	F _α	判定
$\gamma - \ddot{\gamma}$			-	17.85	6.95	**	8.19	7.87	**	17.72	6.69	**
$\gamma - \dot{\gamma}$	33.92	7.38		7.92	6.95	**	0.19	4.21#		15.39	6.69	**
$\dot{\gamma} - \ddot{\gamma}$	33.92	7.38	**	0.31	3.88#		8.06	7.87	**	0.26	3.78#	
$\gamma - \dot{\gamma} - \ddot{\gamma}$	29.73	5.05	**	6.49	4.82	**	5.73	5.31	**	10.67	4.67	**

F: データから得た分散比F

F_α: 有意水準1%に対するF-分布表のF値

判定: **有意水準1%で有意

*有意水準5%で有意

態変化に応じて最適な情報入力の方策を習得している。

次に、熟練者の操作履歴データを基に手動制御中における振子の動きを図3に示す。図3より全てのケースについて定性的な分析を加えた結果、熟練者が二重倒立振子を制御するとき、二つの重要な制御則が存在することが解った。

制御則Ⅰ： θ の偏差に対する制御法則はまず θ をゼロにする。すなわち2本の振子を1本にするか、あるいは θ が異符号で若干折れるように操作する。

制御則Ⅱ： ϕ に対する制御法則においては ϕ をゼロ、すなわちほぼ1本になった振子を垂直に立てる操作をする。

4. 手動制御のファジィモデル

熟練者の手動制御実験結果の経緯によりその動作を分析してみると、操作の初期においては γ の偏差を減らすような操作人力を選んでいる。次の段階では初期の操作によって $\dot{\gamma}$ の急激な減少によって γ がオーバーシュートするのを防ぐため $\dot{\gamma}$ との関係を考慮しながら $\dot{\gamma}$ の減少を防ぐとともに $\dot{\gamma}$ の偏差を減少させ

図3 振子の状態変化の一例

る操作をしている。そして、 γ 、 $\dot{\gamma}$ の偏差が小さくなった状態においては、操作はその状態を維持するため操作量 u をプラスとマイナスの両方向にほぼ同程度に操作している。このことから二重倒立振子の操作パターンは三つのモードが存在することが解る。そこで、この三つのモードについて、初期偏差を偏らす初期段階の操作を“モード1”と呼び、 γ のオーバーシュートを防止する操作を“モード2”と呼び、 γ 、 $\dot{\gamma}$ の偏差をゼロ近傍で維持する操作を“モード3”と呼ぶことにする。これらの三つの操作モードは制御則Ⅰ、Ⅱを満たし、アイカメラによる分析で三つに分割された“フェーズ”と一致し、モードの分類は正当であるといえる。 $\dot{\gamma}$ の偏差がある限界値をこえると、被験者は発散をさけるために γ 、 $\dot{\gamma}$ の値にかかわらず、 $\dot{\gamma}$ の偏差を減らすため大きめの操作を行なう。この操作を“モード4”と呼ぶことにする。これらの操作モードの時間的割合や操作モードの切換え判断には被験者各個人によって異なっている。

これは、人間は、統一した一定の操作ルールは構築しているがその適用は定性的な判断に基づいていると考える。

そこで、前述の熟練者の共通した一般的な操作モードをIF～THENの形式でルール化すると次のように表すことができる。

(Rule 1)

IF $|\gamma| < 3 \times 10^{-4}$ AND $|\dot{\gamma}| < 3 \times 10^{-5}$ AND $|\ddot{\gamma}| < 3 \times 10^{-6}$ THEN モード2を選択

(Rule 2)

IF $\{\gamma > 0 \text{ AND } (\dot{\gamma} < 0 \text{ AND } \dot{\gamma} > -C_1) \text{ AND } (\ddot{\gamma} > 0 \text{ AND } \ddot{\gamma} < D_1)\} \text{ OR } \{\gamma < 0 \text{ AND } (\dot{\gamma} > 0 \text{ AND } \dot{\gamma} < C_1) \text{ AND } (\ddot{\gamma} < 0 \text{ AND } \ddot{\gamma} > -D_1)\}$ THEN モード2を選択

(Rule 3)

IF モード2実行中 AND $\{(\dot{\gamma} > 0 \text{ AND } \dot{\gamma} < C_2) \text{ AND } (\ddot{\gamma} < 0 \text{ AND } \ddot{\gamma} > -D_2)\} \text{ OR } \{(\dot{\gamma} < 0 \text{ AND } \dot{\gamma} > -C_2) \text{ AND } (\ddot{\gamma} > 0 \text{ AND } \ddot{\gamma} < D_2)\}$ AND $(|\gamma| < 3 \times 10^{-4} \text{ AND } |\dot{\gamma}| < 3 \times 10^{-5} \text{ AND } |\ddot{\gamma}| < 3 \times 10^{-6})$ THEN モード3を選択

ELSE モード1を選択

ここで定数 C_1, C_2, D_1, D_2 はモード2の切換値を示している。

次に、各モードにおける制御動作も制御則 I、II と実験結果と被験者によるアンケートの結果から IF～THEN の形式によるルールを用いて表現した。例えば

(Rule 8)

IF $\gamma = P$ AND $\dot{\gamma} = N$ AND $\ddot{\gamma} = P$ AND $\Delta\ddot{\gamma} \geq$ THEN $\ddot{u} = N$

ここで、“P”は“Positive”、“Z”は“Zero”、“N”は“Negative”を意味する。同様なルールが全部で24個ある。前述のルール1からルール4までは操作モードのスイッチングルールであり、このルールから作成した手動制御における人間の行動の構造モデルを図4に示す。

このモデルにおいて“モード1”、“モード2”、“モード3”は定性的な制御ルールでファジィルールである。そこで手動制御の構造モデルはファジィ制御器で実現できるファジィモデルといえる。図5は制御ルールを構成している $\gamma, \dot{\gamma}, \ddot{\gamma}$ と $\ddot{u}$ のメンバシップ関数を示したものである。入力に対する出力は Mamdani 氏の重心法を用いた。折点の値 a_i, b_i, c_i は被験者に合わせて決定する。手動制御の実験結果とこのファジィモデルによるシミュレーション結果を図6に示す。ファジィモデルは熟練者の制御結果とよく一致しており、手動制御はこのようなファジィモデルが妥当である。

5. 結言

手動制御中のシステム状態の分析を行い、人間行動のファジィルールを同定することに成功した。このルールは、熟練者の高度な制御機能を表現するため、制御対象の状態により操作方法を切換えるメタルールと、状況毎の操作ルール群とから構成され、全体として階層構造となっている。この階層構造により個々のルールの同定や調節が大変容易になり、人間と同様の機能を持つファジィコントローラ的设计が可能となる。

図4 手動制御の人間行動の構造モデル

(1) 状態変数 $\gamma, \dot{\gamma}, \ddot{\gamma}$ のメンバシップ関数

(2) 操作量 $\ddot{u}$ のメンバシップ関数

図5 メンバシップ関数

熟練者の手動制御

ファジィモデルによる制御

図6 熟練者Aとファジィモデルの制御結果