

ファジィ推論による時系列データからの人間オペレータの技量獲得 (倒立振子の安定化制御における技量の個人差の同定)

Acquisition of Human Operator's Skill from Time Series Data Using Fuzzy Inference: Identification of Individual Skill during Stabilizing Control of an Inverted Pendulum

川副嘉彦*
Yoshihiko Kawazoe*

松本 仁*
Jin Matsumoto*

* 埼玉工業大学 工学部 機械工学科
Department of Mechanical Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract: In order to stabilize the inherent unstable system like the inverted pendulum on a cart, severe judgment of situation is required. Accordingly, it can be expected that the human operators exhibit a complex behavior occasionally. This paper tries to identify the individual difference of human operator's behavior from time series data by using fuzzy inference and acquire individual skill of human operator. It also investigates the chaotic behavior of human operator and the possibility of the formation of complex system in the learning process of the human operator with difficult control objects. The operators in the experiment are skilled to some extent in stabilizing the inverted pendulum by training, and the data of ten trials per person were successively taken for an analysis, where the waveforms of pendulum angle and cart displacement were recorded. The maximum Lyapunov exponents were estimated from experimental time series data against embedding dimensions. It was found that the rules identified for a fuzzy controller from time series data of each operator showed well the human-generated decision-making characteristics with the chaos and the large amount of disorder and the individual difference of chaotic and complex human operation can be identified with fuzzy inference.

キーワード: ファジィ制御, カオス, 同定, 技量, 時系列データ, 倒立振子

Keywords: Fuzzy Control, Chaos, Identification, Skill, Time series data, Inverted pendulum

1. はじめに

従来の人間-機械系の研究分野においては、熟練後の人間の特性や人間の制御動作のうち線形応答については多くの成果が得られ、各種の伝達関数モデルが提案されてきた[1]。しかし、これらの研究では、難しい制御対象や学習が進行して行く過程での人間の挙動に顕著な非線形・非定常な特性についてはほとんど不明である[2][3]。

倒立振子のように平衡点不安定な非線形系を人間が制御して安定化させるためには、人間には過酷な状況判断が要求され、人間は時と場合により複雑な行動を行うことが予想される。従って、人間が介在したこのような閉ループ制御系には、システム全体として複雑系（要素の変更により新しい性質や能力を生むシステムのことを指す）が形成される可能性が考えられる[4][5]。

人間の手による台車上の倒立振子の安定化制御にはリミットサイクル的な挙動や不規則的な挙動が見られ、時系列実測波形についてエントロピー診断を行ったところ、無秩序さの多いことなどを前報で示した[5]-[10]。また、

カオス性を示す尺度として算出した最大リアプノフ指数も正の値を示した。さらに、エントロピーの割合は、学習効果によってその値が変化し、学習によって無秩序さの程度が変わることを示した。さらに、不安定系制御対象の例として台車上の倒立振子を取り上げ、外乱にロバストな人間オペレータの巧みな操作を実測時系列データからファジィ同定する方法について示した[7][11]-[18]。

本論文では、カオス的時系列データからのファジィ同定法がオペレータの個人差のある技量の獲得に有効であるかどうかを8人の人間オペレータの場合について検討した。なお、安定化制御というのは、倒れないという意味の有限振幅の安定性である。

2. 人間オペレータによる安定化制御におけるカオス・複雑系診断の概要

2.1 オペレータによる倒立振子・台車系の安定化実験

図1は、実験装置と実験の様子を示す[5]-[7]。倒立振子の下端をシャフト及びミニチュア・ベアリングを使用

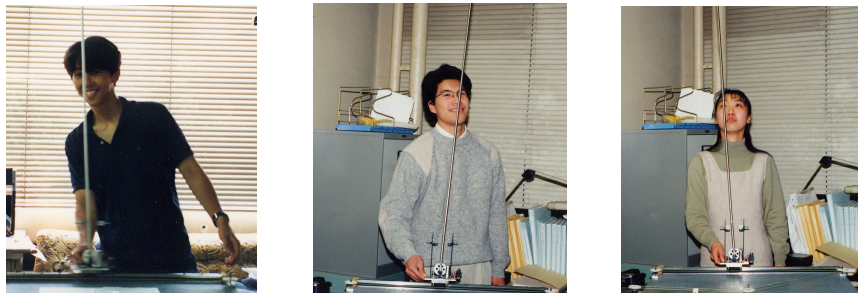


図1 人間オペレータによる倒立振子の安定化制御実験状況

して摩擦の少ない状態で支持している。台の上にリニアベアリング用のスライド・レールを固定し、倒立振子が傾くと、人間の手によりリニアベアリングに固定した台車を水平に移動させて、振子が倒れないように制御を行う。振子棒の傾斜角と台車の移動変位をポテンショメータにより検出し、AD 変換器を通してパーソナルコンピュータに取り込む。データを取り込むときのサンプリング時間は 0.0586[s]であり、60[s]制御したときに得られるデータ数は 1024 個である。カオス・複雑系診断を行う際には得られた実測データをスプライン補間してデータ数 2047 個、サンプリング時間 $\Delta t=0.0293[s]$ として使用した。

手で台車を移動させて倒立振子が倒れないように制御することは実験の初期には難しいが、練習により 60 s 間の制御が可能になる。倒立振子を 60 秒間倒れないように有限振幅で安定化制御するという技量にある程度習熟した試行者（オペレータ）8 人について、それぞれ計 10 回の試行を行った。これらのデータのうち第 1 回目の試行データを使用して 8 人の個人差の同定を試みた。

2.2 エントロピーによる無秩序さの診断法

個数 n の時系列データ (x_t) の最大値 (x_{\max}) と最小値 (x_{\min}) を求め、以下の式のように正規化すると、データの範囲が $x_{\min} \leq x_t \leq x_{\max}$ から、 $0 \leq b_t \leq 1$ となる。

$$b_t = \frac{x_t + |x_{\min}|}{x_{\max} + |x_{\min}|} \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n)$$

次に、データ範囲 0 から 1 を N_c 個（セル数）のセルに分割し、 n 個のデータ (b_t) が N_c 個のセルのどこに入るかを求める。各セルの確率 P_i を用いて、以下の式よりエントロピーを求めることができる[20]-[22]。

$$S = - \sum_{i=1}^{N_c} p_i \log p_i$$

これを本論文では、総エントロピーと定義し、総エントロピーの値を総エントロピーの最大値 $\log_e N$ で割った値を総エントロピーの割合と呼ぶ[9][16][17]。このエントロピーを無秩序さあるいは不規則さの程度を表すとみなす[20][21]。人間オペレータの安定化制御における制御挙動の無秩序さの程度を調べるために実測時系列データからエントロピー診断をおこなった。

2.3 最大リアプノフ指数によるカオス診断法

リアプノフ指数は、相空間内の近接した二つの軌道が時間とともに離れてゆく程度を表す量であり、相空間の次元が N の場合は、ある時刻におけるリアプノフ指数も N 個存在する。最大リアプノフ指数が正のとき、系は初期値に鋭く依存するためカオス的な挙動を示すので、これをカオスの定義の一つとして用いる[22]-[25]。

測定された時系列データのみから、我々が直接見ることのできない本来の力学系に関する情報を埋め込み次元を与えてアトラクタを再構成することにより得ることができる[20][22]-[25]。

観測された時系列データ $x(t_i)$ を用いて、遅れ時間を τ とする m 次元の再構成状態空間における m 次元ベクト

ルを式(1)のように作成する。一般に遅れ時間 τ は解析する波形の主要周期の数分の 1 にとればよいと言われている[26][27]。実測波形のパワースペクトルを求めると、人間の安定化制御における倒立振子の主要な周期はおおよそ 0.5~1.0[s]であった。

$$\begin{aligned} X_1 &= (x(t_1), x(t_{1+\tau}), \dots, x(t_{1+(m-1)\tau})) \\ X_2 &= (x(t_2), x(t_{2+\tau}), \dots, x(t_{2+(m-1)\tau})) \\ &\vdots \\ X_i &= (x(t_i), x(t_{i+\tau}), \dots, x(t_{i+(m-1)\tau})) \end{aligned} \quad (1)$$

本論文では次元数を多次元へと拡張するため、1 次写像を

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (2)$$

と置き、上式に対するリアプノフ指数の求め方を考える。上式の n を便宜的に j に置き換え x_j で微分すると

$$\frac{df(x_j)}{dx_j} = \frac{dx_{j+1}}{dx_j} = \frac{x_{j+1} - x_j}{x_j - x_{j-1}} = f'(x_j) \quad (3)$$

と近似表現が可能となる。上式を用いて m 次元、遅れ時間 τ のヤコビ行列の一般表現が可能となる。

従って、グラム・シュミットの直交化法により直交ベクトル b_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$) が求まるので、リアプノフ指数 λ_i は、

$$\lambda_i = \frac{1}{t_n - t_0} \sum_{j=1}^{n-1} \log_e b_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (4)$$

となる[20][22]-[25][28]。ここで、 n はデータ数、 t_0 、 t_n はそれぞれ時系列データの最初および最後の時刻を示す。

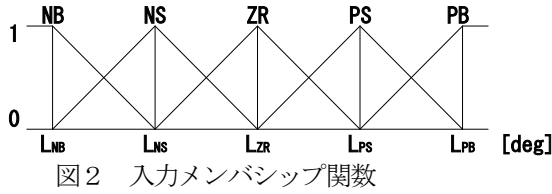
本論文では、埋め込み次元を 5~15 次元まで与えてリアプノフ指数を計算した。最大リアプノフ指数は、ある程度時刻が経過すると値がほぼ一定値に落ちついた。各次元ごとの最後の時刻 t_n のときの最大リアプノフ指数をその次元での最大リアプノフ指数とした。

3 人間オペレータの時系列データからのファジィ制御メンバシップ関数と制御ルール表の生成

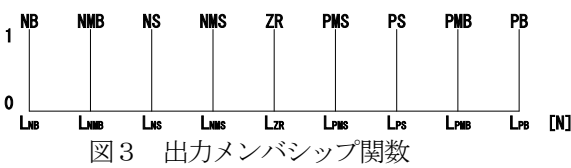
ファジィ制御装置の入力として振子の角変位 θ_t 、角速度 θ'_t 、および台車変位 X_t 、台車速度 X'_t を選び、出力として台車への外力 F_{t+1} を選んで、時系列実測データから制御装置としての人間オペレータの制御特性を同定する⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。ただし、外力 F の実測値は振子と台車の状態量実測値から運動方程式を使って間接的に算出した。

前件部は、状態変数を低次元化した振子関係統合変数 $\theta_t + \beta \theta'_t$ および台車関係統合変数 $X_t + \gamma X'_t$ の 2 変数とし、後件部は F_{t+1} として、まず、 θ 、 θ' の時系列データ θ_n 、 θ'_n から任意の統合係数 β を用いて $\theta + \beta \theta'$ の時系列データを、同様に時系列データ X_n 、 X'_n と統合係数 γ を用いて $X + \gamma X'$ の時系列データを作成する。次に、 $\theta + \beta \theta'$ 、 $X + \gamma X'$ 、 F の時系列データの度数分布を作成し、例えば $G_{NB}=10\%$ 、 $G_{NS}=25\%$ 、 $G_{ZR}=30\%$ 、 $G_{PS}=25\%$ 、 $G_{PB}=10\%$ のような割合でグループ分けし、各

グループの境界線部分に当たるデータを D_{NB_NS} , D_{NS_ZR} , D_{ZR_PS} , D_{PS_PB} とする. メンバシップ関数のラベルは $\theta + \beta \theta'$, $X + \gamma X'$ については 5 段階として図 2 のように決定する.



台車に加える外力 (F) の各ラベルは, 境界線部分にあたるデータを用いて図 3 のように 9 段階に決定する.



ルール表の同定については, $5 \times 5 (=25)$ のルールの各マス目に入る出力を次のように求める. たとえば, 時刻 t における時系列データ $\theta_t + \beta \theta'_t$ が G_{NB} , $X_t + \gamma X'_t$ が G_{ZR} , F_{t+1} が G_{NS} とすると, ルール表の $\theta + \beta \theta' = NB$, $X + \gamma X' = ZR$ であるマス目の $F = NS$ のラベルを一つカウントする. これをデータ数 (2046 個) だけ繰り返して各マス目の F の各ラベル数を求め, 式 (11) の重み付き平均により F_0 を求める. F_0 の値が適合する出力ラベルを表 1 からマス目ごとに求め, 図 4 のようにルール表を同定する.

$$F_{OUT} = \frac{(-4.4 \times NB) + (-2.0 \times NS) + 0.0 \times ZR + 2.0 \times PS + 4.4 \times PB}{NB + NS + ZR + PS + PB} \quad (11)$$

表 1 台車に加える力 F_{out} の適合表

| Output Label | NB | NMB | NS | NMS | ZR | PMS | PS | PMB | PB |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| F_{out} | -3.5 | -2.5 | -1.5 | -0.5 | 0.5 | 1.5 | 2.5 | 2.5 | 3.5 |

| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | PS | PMS | NMS | NMB | ZR |
| | NS | PMB | PMS | NMS | NMB | ZR |
| | ZR | PB | PS | ZR | NS | NB |
| | PS | ZR | PMB | PMS | NMS | NMB |
| | PB | ZR | ZR | PMS | NMS | NS |

図 4 台車上の倒立振子に対するファジィ制御ルールの同定例 (オペレータ NK の試行 1 回目: NK01)

4 時系列データからの技量の個人差の同定

4.1 ファジィ制御シミュレーションと技量の個人差の同定

倒立振子を 60 秒間倒れないように安定化制御するという人間オペレータの技量が同定できるかという問題および外乱に対してロバストな人間オペレータの巧みな制

御が同定できるかという問題に着目して, 人間オペレータ AT, FT, HT, KT, ME, NK, OT, ST の 8 人の試行実験データについて解析した. 倒立振子関係統合係数 β および台車関係統合係数 γ の領域を 0~1 まで 0.01 刻みで選び, 統合係数 β および γ の組み合わせに対して制御ルール表の生成と安定化制御シミュレーションを行った.

図 5 は倒立振子・台車系のモデルを示す. 図 6 は, 時系列データから生成したファジィ制御器を用いた倒立振子・台車系の安定化制御シミュレーションのブロック線図である. ファジィ制御器の出力である台車への外力 F が与えられると, 4 次元のルンゲ・クッタ法により台車の変位 X と速度 X' 及び, 振り子角度 θ と角速度 θ' が求まる [16]-[18]. シミュレーションにおける倒立振子の初期角度は 3[deg], 制御のサンプリング間隔は, 実測データの取り込みサンプリング周期にほぼ等しく, 0.06[s] とした.

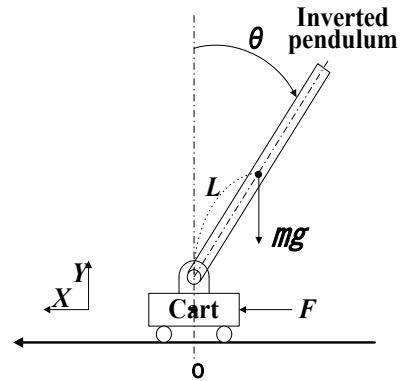


図 5 倒立振子・台車系のモデル

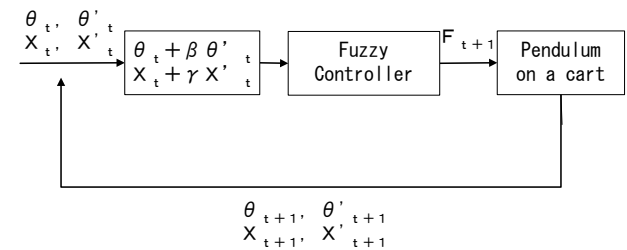


図 6 ファジィ制御シミュレーションのブロック線図

4.2 巧みな制御と個人差の同定

たとえば, 人間オペレータ FT の 1 回目の試行データ FT01 とオペレータ ST の 1 回目の試行データ ST01 を較べると, 両者とも, β が 0.5 以上の領域では安定化制御に成功しなかったが, FT01 は台車関係統合係数 γ が 0.5 以下の領域で成功する範囲が広く, ST01 は γ が 0.5 以上の領域で成功する範囲が広いなど, 個人差が顕著であった.

図 7(a)は人間オペレータ AT, (b)は ME, (c)は NK, (d)は OT の実測波形と同定したシミュレーション波形である. 人間オペレータの実測時系列データから生成したファジィ制御器により, (1) 60 秒間のファジィ制御シミュ

レーションに成功するか否か,すなわち, 倒立振子を 60 秒間倒れないように安定化するという技量が同定できるか, (2) 人間オペレータの実測波形に似た結果を得ることができるか, すなわち, 外乱に対してロバストな巧みな制御が同定できるか, という 2 つに着目した. (1)については, 8 人のオペレータすべての場合についてファジィ制御による安定化シミュレーションに成功した. 統合係数を β , $\gamma=0.01\sim 1.00$ で成功範囲を探ったところ, どの場合も β の値より γ の値が広い範囲で安定化に成功した. (2)についても, 同定したシミュレーション波形は実測波形の特徴をかなりよく示している. 特に, 人間オペレータ AT01 (図 7(a)) の波形はよく似ている.

図 8 は, 8 人のオペレータの試行 1 回目の実測時系列データおよびシミュレーション時系列データのエントロピー診断結果である. エントロピーの割合は, 実測結果の場合もシミュレーション結果の場合も大きく, 制御挙動の無秩序さの程度が大きいことを示している. 実測結果については, オペレータ KT の 1 回目の試行 KT01, ME の 1 回目の試行 ME01 のエントロピーが他に比べて

やや低く, 無秩序さの程度がやや小さいことを示している. この両者の実測結果とシミュレーション結果の値は差がやや大きい, 他の場合にはほぼ一致している.

図 9 は, 埋め込み次元 m を与えて時系列データから m 次元アトラクタを再構成し, それを用いて算出された最大リアプノフ指数の値から, 系の次元数 (自由度) を推定したものである. 埋め込み次元を増していったときに最大リアプノフ指数の値が飽和するときの次元を次元数とした.

最大リアプノフ指数はすべて正の値を示し, カオス的挙動であることを示した.

実測結果はオペレータ KT, OT, ST の次元 (自由度) が大きめであり, AT がやや小さめになっている. オペレータ HT の次元 (自由度) は実測値とシミュレーション値がよく一致しているが, シミュレーションの結果は実測結果に比べて小さめの次元 (自由度) を示している.

個人差が大きい, おおまかには実測データからの推定次元数 (自由度) は 12~15, シミュレーション結果からの次元数 (自由度) は 9~13 となっている.

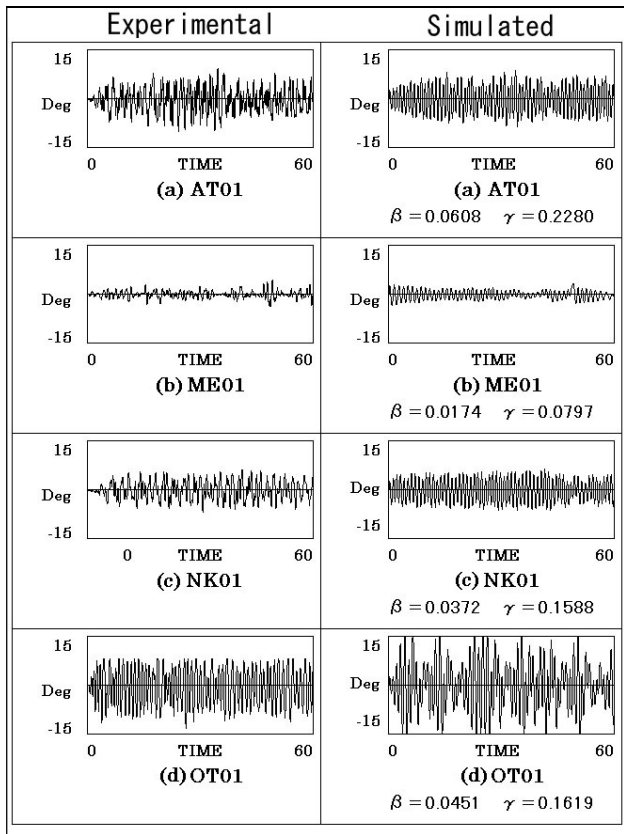


図 7 時系列波形に現れる技量の個人差

4.3 制御ルール表とメンバシップ関数に現れる技量の個人差

図 10 と図 11 は, それぞれ人間オペレータ OT および ME の 1 回目の試行におけるメンバシップ関数であり, 図の上から振り角度, 台車変位, 台車に加える力を示す.

オペレータ OT とオペレータ ME の振り角度, 台車変位, 力のメンバシップ関数には大きな違いが見られる.

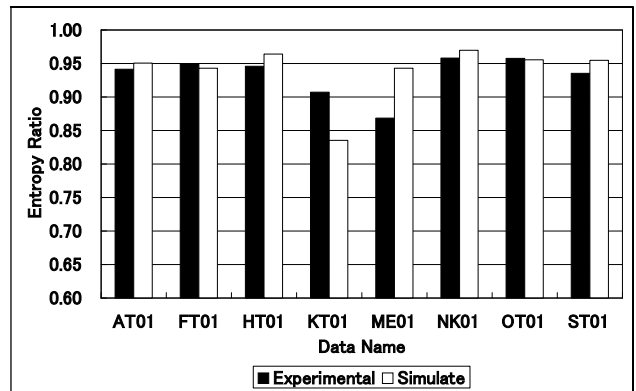


図 8 エントロピーの割合に現れる技量の個人差

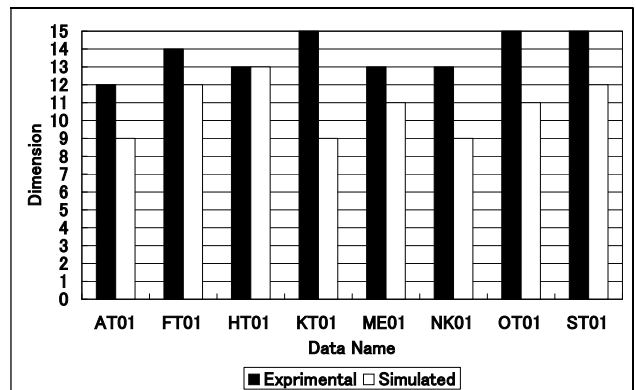


図 9 推定次元数 (自由度) に現れる技量の個人差

図 12(a)はオペレータ AT の 1 回目の試行 AT01, (b)は ME01, (c)は OT01, (d)は ST01 の時系列データから同定した制御ルール表である. 制御ルール表(a), (c)では, $\theta + \beta \theta' = PB$, $X + \gamma X' = NB$ では力 F は ZR なのに対して, (b), (d)では NB の力で制御している. また, ほとんどのルール表では, $\theta + \beta \theta' = ZR$ のときでもある程度の力を加えているのに対し, (b)では微少な力しか加えていない.

また, ルール表(a), (b)では $\theta + \beta \theta' = PB$, $X + \gamma X' = PB$ のとき, 小さい力NSで制御しているのに対して, (c), (d)では大きい力NMBで制御している. さらに, 設計者な

ら対角線に対して対称のルール表を考えるのが普通であろうが, 図 12 ではどれも対称にはなっていない. 人間が制御するには複雑に力を加えていることが推測される.

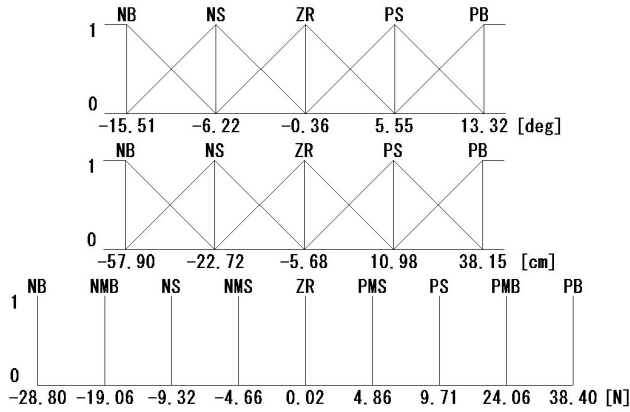


図 10 メンバシップ関数 (人間 AT01)

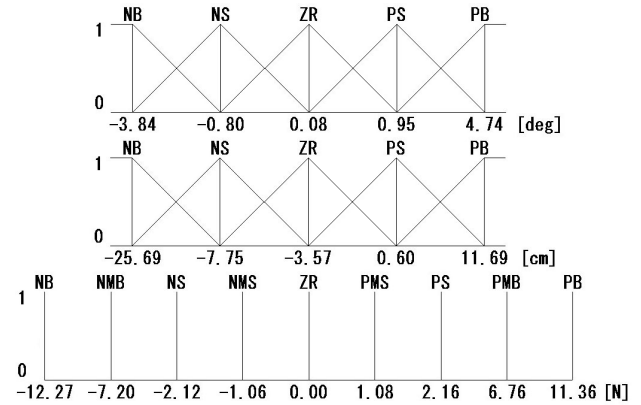


図 11 メンバシップ関数 (人間 ME01)

| | | | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | PS | PMS | NMS | ZR | ZR |
| | NS | PMB | PMS | NMS | NMB | ZR |
| | ZR | PB | PS | ZR | NS | NMB |
| | PS | ZR | PB | PMS | NMS | NMB |
| | PB | ZR | ZR | PS | ZR | NS |

(a) 人間オペレータ AT01
 $\beta=0.0608, \gamma=0.2280$

| | | | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | PMB | PMS | NMS | ZR | ZR |
| | NS | PMB | PS | NMS | NB | ZR |
| | ZR | PB | PMB | ZR | NMB | NB |
| | PS | ZR | PB | PMS | NMS | NMB |
| | PB | ZR | ZR | PMS | NMS | NMB |

(c) 人間オペレータ OT01
 $\beta=0.0451, \gamma=0.1619$

| | | | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|----|-----|-----|
| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | PMB | ZR | ZR | NMS | NB |
| | NS | PMB | PMS | ZR | NS | NB |
| | ZR | PMB | PMS | ZR | NMS | NS |
| | PS | PB | PMS | ZR | NMS | NMB |
| | PB | ZR | PS | PS | NMS | NS |

(b) 人間オペレータ ME01
 $\beta=0.0174, \gamma=0.0797$

| | | | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | PMB | PMS | NMS | NMB | NB |
| | NS | PS | PMS | NMS | NMB | NB |
| | ZR | PMB | PS | ZR | NS | NB |
| | PS | PMB | PB | PMS | NMS | NS |
| | PB | ZR | PB | PS | NMS | NMB |

(d) 人間オペレータ ST01
 $\beta=0.0595, \gamma=0.6806$

図 12 ファジィ制御ルール表に現れる技量の個人差

5. 結論

人間オペレータの実測時系列データからファジィ制御器を生成するために, (1) 60 秒間のファジィ制御シミュレーションに成功するか否か, すなわち, 倒立振子を 60 秒間倒れないように安定化するという技量が同定できるか, (2) 人間オペレータの実測波形に似た結果を得ることができるか, すなわち, 外乱に対してロバストな巧みな制御が同定できるか, という 2 つに着目して, 技量の

個人差の同定を試みた.

(1) 8 人のオペレータのすべてについてファジィ同定による安定化制御シミュレーションに成功した.

(2) 同定したシミュレーション波形は実測波形の特徴をかなり良く示した.

(3) 実測結果もシミュレーション結果も時系列データはエントロピーの割合が大きく, 制御挙動の無秩序さの程度が大きいことを示した. 無秩序さの程度についても個人差をかなり同定することができた.

(4) 最大リアプノフ指数についても、実験結果およびシミュレーション結果はすべて正の値を示し、カオス的挙動であることを示した。

(5) オペレータの自由度については、シミュレーション結果の方が実測結果よりやや小さな値を示した。実測データからの推定次元（自由度）にも個人差があり、実測データからの推定次元は12~15、シミュレーション結果からの次元は9~13であった。

(6) 同定されたオペレータのメンバシップ関数および制御ルール表にも個人差による違いが見られた。ルール表はどのオペレータも非対称であった。人間の制御挙動が複雑なことが推測された。

参考文献

- [1] 井口, 人間-機械系, 情報科学講座(1970), 共立出版
- [2] 藤井・田口, システムと制御, 25-6 (1981), pp.328-335.
- [3] 伊藤・伊藤, 電気学会論文誌C, 96-5 (1976), pp.109-115.
- [4] 井上, カオスと複雑系の科学, 日本実業出版社
- [5] 川副嘉彦: 人間の手による制御とコンピュータ制御 (倒立振子の制御実験), 日本機械学会・第2回運動と振動の制御シンポジウム講演集, No. 910-52, pp. 95-100. (1991)
- [6] 川副嘉彦, 台車上の倒立振子の制御における人間の制御特性に関する研究 (第1報, コンピュータ制御における非線形挙動), 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, (A), No.920-55 (1992), pp.1-6
- [7] Kawazoe Y (1992), Manual control and computer control of an inverted pendulum on a cart, Proc. of the First International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.930-935.
- [8] Kawazoe Y & Ju DY (1994), Nonlinear characteristics of human operator with the stabilizing control of an inverted pendulum on a cart, Proc. 2nd International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.645-650.
- [9] 川副嘉彦・太田智洋・田中健一・永井健一, 倒立振子・台車系の手動による安定化制御における非線形挙動 (カオス的挙動と複雑系形成についての考察), 日本機械学会, 第5回運動と振動の制御シンポジウム講演集, No.97-31(1997.11), pp.395-398.
- [10] Kawazoe Y, Ohta T, Tanaka K (2000), Measurement and analysis of chaotic behavior of human operator stabilizing an inverted pendulum on a cart, Proc. of ICMA2000-Human friendly mechatronics, pp.457-462.
- [11] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第1報, 原因を探る諸実験), 日本機械学会論文集 51-461, (1985), pp.404-409.
- [12] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第3報, 低速ハンチングの計算機シミュレーション), 日本機械学会論文集, 51-471, (1985), pp.2789-2795.
- [13] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第9報, 非線形挙動の考察-その1), 日本機械学会論文集, 56-523, (1990), pp.693-699.
- [14] Kawazoe Y (1999), Nonlinear characteristics of a human operator during stabilizing control of an inverted pendulum on a cart: Fuzzy identification from experimental time series data and Fuzzy control simulation, Motion and vibration control in Mechatronics, Edited by Seto K, Mizuno T & Watanebe T, pp.133-138.
- [15] Kawazoe, Y., Fuzzy identification of chaotic and complex behavior of human operator stabilizing an inverted pendulum on a cart, Proc. 6th Int. Symp. on Artificial Life & Robotics, (2001), pp.9-12.
- [16] Kawazoe, Y., Measurement of Chaotic Behavior of Human Operator stabilizing an Inverted Pendulum and Its Fuzzy Identification from Time Series Data, J.Robotics & Mechatronics, 13-1. (2001), pp.23-29.
- [17] 川副嘉彦・橋本剣・太田智洋, 手動による倒立振子・台車系の安定化制御における人間の非線形制御特性 (第1報, 時系列実測データからのファジィ同定とファジィ制御シミュレーション), 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, (B), No. 98-8 (1998), pp. 168-171.
- [18] 川副嘉彦, 手動による倒立振子・台車系の安定化制御における人間の非線形制御特性 (時系列実測データからの個人差と習熟過程のファジィ同定とファジィ制御シミュレーション), 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, (A), No. 99-7 (1999), pp. 251-254.
- [19] 川副嘉彦・松本仁, ファジィ推論による人間オペレータの技量獲得 (倒立振子の安定化制御におけるカオス的時系列データからの制御ルールの同定), 第17回ファジィシステムシンポジウム論文集, 日本ファジィ学会, (2001. 9).
- [20] Baker GL and Gollub JP (1996), Chaotic dynamics: an introduction, Cambridge University Press. 86-87.
- [21] Baierlein R (1971), Atoms and information theory, W.H.Freeman & Co., San Francisco, Chapter 3.
- [22] 下条隆嗣, カオス力学入門, 近代科学社, pp.86-95, pp.107-111.
- [23] Takens F (1981), Detecting strange attracters in turbulence, In Rand DA and Young LS (ed), Lecture Notes in Mathematics, Vol.898, Springer-Verlag, Berlin, 366-381.
- [24] Mane R (1981), On the dimension of the compact invariant sets of certain nonlinear maps. In Rand DA and Young LS (ed), *ibid*, Vol.898, Springer-Verlag, Berlin, 230-242.
- [25] Wolf A, Swift JB, Swinney HL, and Vastano JA (1985), Determining Lyapunov exponents from a time series, Physica, 16D, 285-317.
- [26] 合原一幸編, カオスセミナー, 海文堂, pp.51-53, p.150.
- [27] 長島弘幸・馬場良和, カオス入門, 培風館, pp.89
- [28] 小寺平治, 線形代数, 共立出版(株), p.94.

論文受付番号 i056

問い合わせ先 郵便 369-0293

埼玉県大里郡岡部町普濟寺 1690

埼玉工業大学 機械工学科

川副嘉彦,

TEL: 048-585-6717 (直通)

FAX: 048-585-6717 (学科事務室)

E-mail ykawa@sit.ac.jp