

人間オペレータの技量のカオス・エントロピー解析
とファジィ制御による獲得
(倒立振子の安定化制御における時系列データ
からの個人差の同定)

川 副 嘉 彦 *1 , 伊 倉 良 明 *2
貝 瀬 徹 *3 , 松 本 仁 *4

**Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Human Operator's
Skill Using a Fuzzy Controller: Identification of Individuality
During Stabilizing Control of an Inverted Pendulum**

Yoshihiko KAWAZOE *5, Yoshiaki IKURA,
Toru KAISE and Jin MATSUMOTO

*5 Department of Human - Robotics, Saitama Institute of Technology,
1690, Fusaiji, Fukaya, Saitama, 369-0293 Japan

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 investigated 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.

Key Words : Human's Dexterity, Skill, Individuality, Estimated Degree of Freedom of Motion, Estimated Amount of Disorder, Fuzzy Control, Identification, Chaos, Entropy, Time series data, Inverted pendulum

1. 緒 言

われわれが日常何気なく行っている動作からスポーツ選手や音楽家が見せる超人的な動きまで、運動には限りない多様性がある。ゲゼル(Gesell, 1945)は、子供の発達過程の膨大な観察から、運動の発達は全体に統合された状態から個々の部分のはたらきが特殊化する

ように進むこと、すなわち、運動の自由度は発達が進むにつれて増大していくこと、不安定化と安定化を繰り返しながらゆらぎをうまく使って進んでいくこと、すなわち、カオスが重要な役割を果たしていることを経験則として指摘している。ヒトの運動学習過程でも自由度に注目した研究がなされており、右利きの人に左で字を書かせるという課題を行うと、被験者は初期には関節の自由度を固定して(自由度を凍結して)字を書いているが、熟練すると多くの関節を動かすようになると言われている(Newell & Van Emmerik, 1989)

一方、現状では、機械と人間は異質のものであり、機械に較べて人間の動作原理は複雑である。調和のと

*原稿受付 2008年10月7日。

*1 正員, フェロー, 埼玉工業大学工学部 (〒369-0293 深谷市普濟寺1690)

*2 埼玉工業大学大学院工学研究科

*3 兵庫県立大学経営学部 (〒651-2197 神戸市西区学園西町82-1)

*4 東和コンピュータマネジメント(〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-12)

Email: kawazoe@sit.ac.jp

れた人間 - 機械系あるいは人間と機械のインターフェイスを論じるには、機械に組み合わせる人間の特性を工学的に対応できるような形で明らかにする必要がある⁽²⁾。

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⁽³⁾⁽⁴⁾。

倒立振り子（倒立棒）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の形成あるいは偶有性（半ば規則的、半ばランダム）の可能性が十分ある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

これまでの著者らの実験によると、人間の手による台車上の倒立振り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、時系列実測波形を用いたエントロピー診断結果によると無秩序さの程度が大きく、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^{(6)・(11)}。さらに、学習によって習熟すると、無秩序さの程度を表すエントロピーの割合は低減し、人間 - 倒立棒系の運動の自由度が増える。これらのことは、エネルギーの第二法則に登場するエントロピーが秩序をあらわし、エントロピーが小さい方が秩序があり、秩序があるとは情報が多いことと矛盾しない⁽¹²⁾。さらに、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^{(13)・(19)}。

一方、不安定系の安定化操作におけるオペレータの技量の個人差と習熟度の同定にニューロ制御器が有効であり、実測結果と同定したニューロ制御器を用いたシミュレーション結果の波形が似ているほど、運動の推定自由度と無秩序さの程度も近い値を示すことを8人の試行についてのカオス・エントロピー解析により前報で明らかにした⁽²⁰⁾。

従来のPID制御など線形理論による安定化挙動と人間オペレータによる安定化挙動には大きな違いが見られる。すなわち、目標軌道を与えて目標値との差を最小にしようとする従来の機械制御は倒立棒を常に垂直に立てようとするが、人間オペレータは目標値との差を有限振幅の範囲内に保ちながら倒立棒を倒さないような制御をする。倒立棒はほとんど垂直には立ってお

らず、常にゆれている⁽²¹⁾。倒立棒を常に垂直に立てようとする傾向のある人間オペレータは長時間の安定化操作に習熟しない傾向がある。

本論文では、カオスの時系列データからのファジィ制御器による同定法が人間オペレータによる倒立棒の安定化制御におけるオペレータの技量（運動の自由度と無秩序さの程度）の個人差の獲得に有効であるかどうかをカオス・エントロピー解析により8人の人間オペレータについて吟味する。ファジィ制御器とニューロ制御器の比較については別報に述べる。なお、本論文での安定化制御というのは、倒れないという意味の非線形系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・エントロピー解析の概要

2.1 オペレータによる倒立振り子・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⁽⁶⁾⁽⁸⁾。倒立振り子（倒立棒）の下端をシャフト及びミニチュア・ベアリングを使用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、倒立振り子が傾くと、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、倒立棒が倒れないように制御を行う。倒立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 $t = 0.0293$ [s]として使用した。

手で台車を移動させて倒立振り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。倒立振り子を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



Fig.1 Stabilizing control of an inverted pendulum on a cart by a human operator.

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 エントロピー解析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} から x_{max} から、 0 から 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⁽²²⁾⁽²⁴⁾。

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

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⁽¹⁰⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。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⁽²²⁾⁽²³⁾。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⁽²³⁾⁽²⁶⁾。

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、たとえば自由度あるいは次元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⁽²²⁾⁽²⁴⁾⁽²⁷⁾。

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⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。

遅れ時間 τ は、人間の安定化制御における倒立振子の主要周期 $0.5 \sim 4.0$ [s] の数分の1という基準で種々試みてみたが、 $1/10$, $1/5$ およびサンプリング周期 0.0586 [s] の7倍 (0.41 s) の場合の差がなかったので、 $\tau = 0.41$ s (一定) とした。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= (x(t_1), x(t_1 + \tau), \dots, x(t_1 + (m-1)\tau)) \\ \mathbf{X}_2 &= (x(t_2), x(t_2 + \tau), \dots, x(t_2 + (m-1)\tau)) \\ \mathbf{X}_3 &= (x(t_3), x(t_3 + \tau), \dots, x(t_3 + (m-1)\tau)) \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_i &= (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)) \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_N &= (x(t_N), x(t_N + \tau), \dots, x(t_N + (m-1)\tau)) \end{aligned} \quad (1)$$

本論文では次元数を多次元へと拡張するため、1次元写像を

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

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 \mathbf{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⁽²²⁾⁽²⁴⁾⁻⁽²⁷⁾⁽³⁰⁾。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 $5 \sim 15$ 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 , 角速度 $\dot{\theta}$, および台車変位 X , 台車速度 X' 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り関係統合変数 $\theta_t + \beta\theta'_t$ 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 $+, ', X+ X'$ 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(5)の重み付き平均により F_{out} を求める。 F_{out} の値が適合する出力ラベルを図4からマス目ごとに求め、図5のようにルール表を同定する。

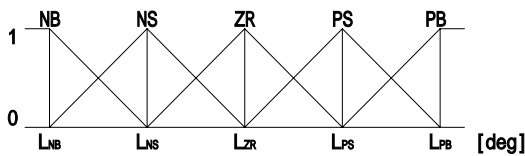


Fig.2 Membership function for input

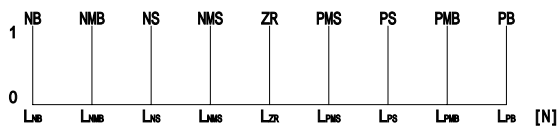


Fig.3 Membership function (Singleton) for output

$$F_{out} = \frac{(-4.4 \times NB) + (-2.0 \times NS) + 0.0 \times ZR + 2.0 \times PS + 4.4 \times PB}{NB + NS + ZR + PS + PB} \quad (5)$$

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	3.5	

Fig.4 Conformity of output F_{out}

		+				
		NB	NS	ZR	PS	PB
X	NB	PS	PMS	NMS	NMB	ZR
	NS	PMB	PMS	NMS	NMB	ZR
	ZR	PB	PS	ZR	NS	NB
X'	PS	ZR	PMB	PMS	NMS	NMB
	PB	ZR	ZR	PMS	NMS	NS

Fig.5 Rule for control of a pendulum on a cart
(1st trial NK01 of Human operator NK)

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

倒立振り子を 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。倒立振り関係統合係数 および台車関係統合係数の領域を 0 ~ 1 まで 0.01 刻みで選び、統合係数 および 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6は倒立振り子・台車系のモデルを示す。

図7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り子・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⁽¹⁷⁾⁽¹⁹⁾。シミュレーションにおける倒立振り子の初期角度は 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。

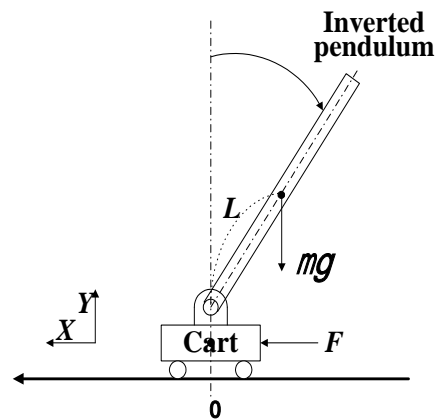


Fig.6 Model of an inverted pendulum on a cart.

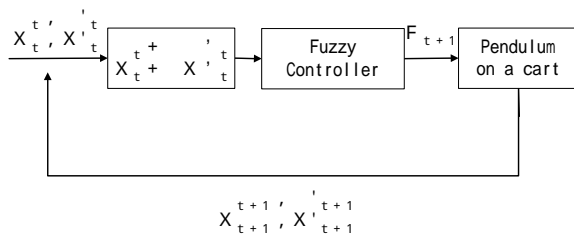


Fig.7 Stabilizing control simulation of the pendulum using the constructed fuzzy controller from human operator's time series data.

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 β 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 8(a)は人間オペレータ AT, (b)は ME, (c)は NK, (d)は OT の試行 1 回目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

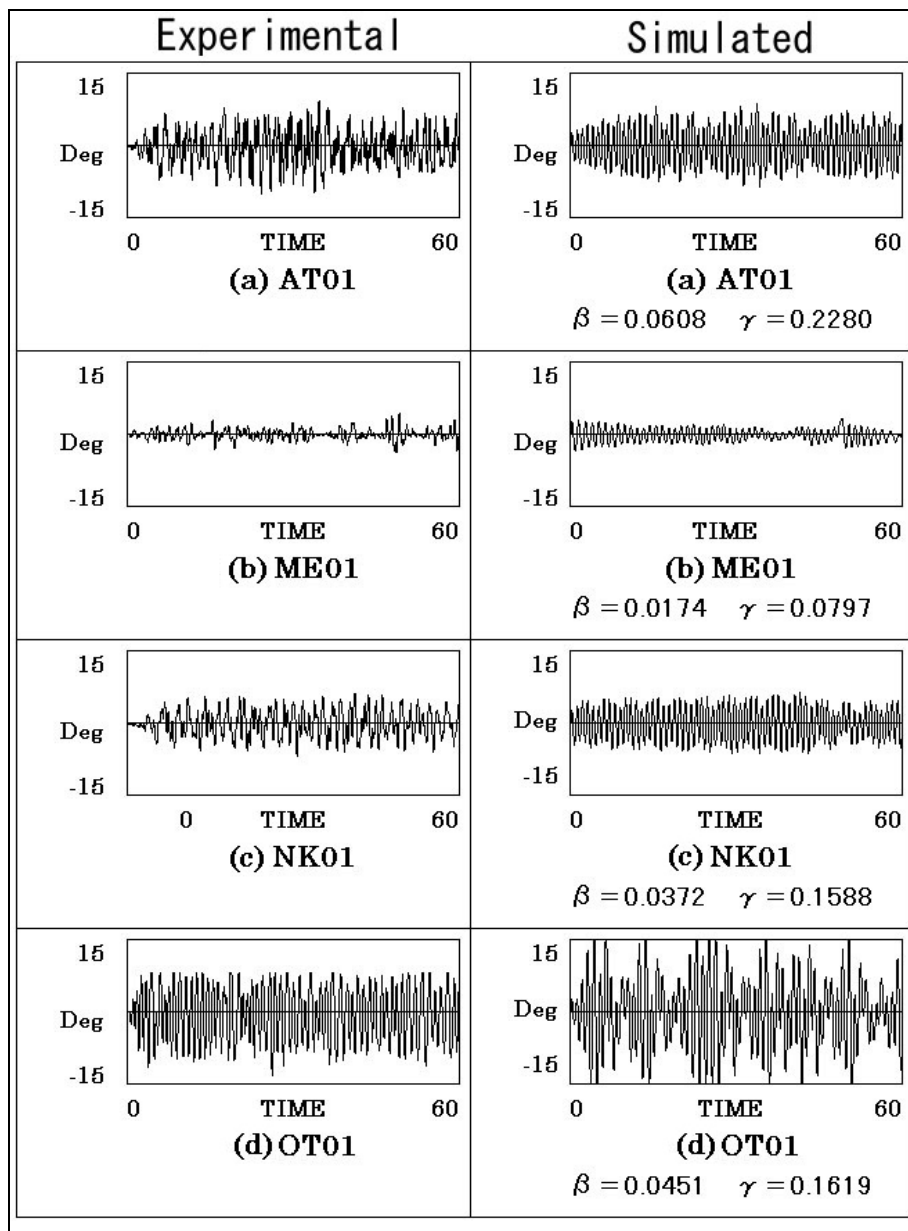


Fig.8 Simulated results using the fuzzy control rules and the membership functions constructed from the experimental time series data, being compared with the experimental results, showing the individual skill difference.

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 $\alpha = 0.01 \sim 1.00$ で成功範囲を探ったところ、どの場合も α の値より β 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 AT の 1 回目の試行 AT01 (図 8(a)) の波形はよく似ている。

図 9 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

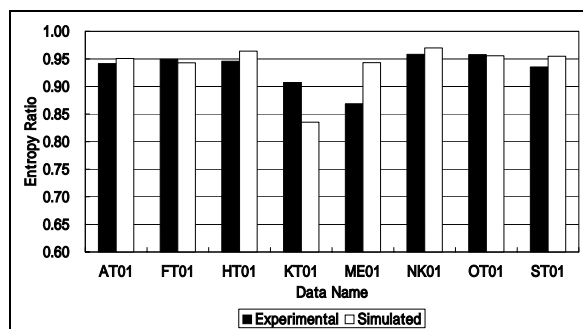


Fig.9 Individual skill of each operator captured in the entropy ratios of the simulation being compared with those of the experiment.

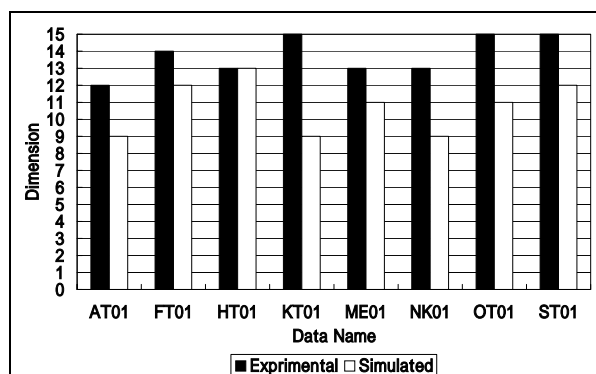


Fig.10 Individual skill of each operator captured in the estimated dimension i.e. the degree of freedom of the motion of the simulation being compared with those of the experiment.

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 のエントロピーの割合が他に比べてやや低く、無秩序さの程度がやや小さい(習熟している)ことを示す。この両者の実測結果とシミュレーション結果の値は、他の場合に比べて両者の差がやや大きい、シンプルなファジィ同定法では、ニューラルネットによる同定法⁽²⁰⁾に比べて、習熟した動きの同定がやや難しいことを意味する。

図 10 は、8 人のオペレータの試行 1 回目の実測時系列データについて埋め込み次元 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(運動の自由度に対応)を推定したものである。埋め込み次元数を増していき、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。

実測結果は個人差があり、オペレータ KT, OT, ST の次元(自由度に対応)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(自由度に対応)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(自由度に対応)を示している。

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 11 と図 12 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、図の上から振子角度、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 の振子角度、台車変位、力のメンバシップ関数に

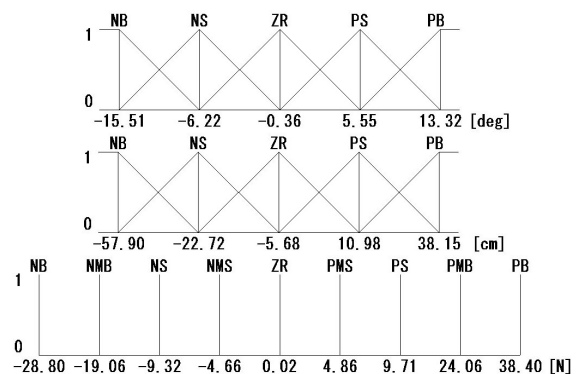


Fig.11 Identified membership function (operator OT01)

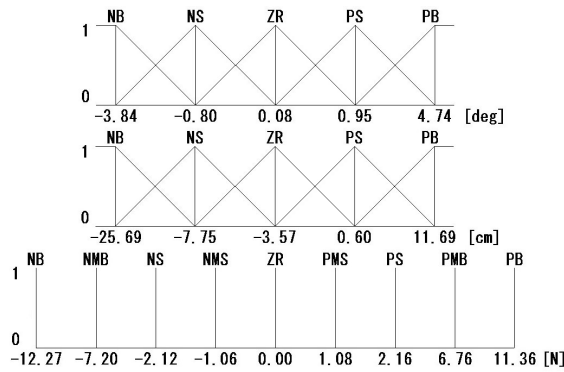


Fig.12 Identified membership function (operator ME01)

は大きな違いが見られる。

図 13(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, $X^+ = PB$, $X^- = NB$ 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, $X^+ = ZR$ のときでもある程度の力を加えているのに対し, (b)では微小な力しか加えていない。また, ルール表(a), (b)では $X^+ = PB$, $X^- = PB$ 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, 通常ならファジィルール設計者は対角線に対して対称のルール表を考えるであろうが, 図 13 ではどれも対称にはなっていない。人間が制御する際には複雑に力を加えていることが推測される。

5. 結論

カオス・エントロピー解析結果によると,人間オペレータによる台車上の倒立棒の安定化挙動にはカオス性と無秩序さが見られ, 試行回数が増えて習熟していくと, 無秩序さの程度が小さくなり, 運動の自由度は大きくなる。

人間オペレータによる倒立棒の安定化制御における実測時系列データからオペレータの制御特性をファジィ制御器として獲得するために, (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, 技量の個人差について同定を試みた。

(1) 8 人のすべてのオペレータの試行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

		$\theta + \beta \theta'$				
		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) Human Operator AT01 ($\beta = -0.0608$, $\gamma = -0.2280$)

		$\theta + \beta \theta'$				
		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) Human Operator ME01($\beta = -0.0174$, $\gamma = -0.0797$)

		$\theta + \beta \theta'$				
		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) Human Operator OT01 ($\beta = -0.0451$, $\gamma = -0.1619$)

		$\theta + \beta \theta'$				
		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) Human Operator ST01 ($\beta = -0.0595$, $\gamma = -0.6806$)

Fig.13 Individual skill of each operator captured in fuzzy rules constructed from the experimental time series data

た。

(2) 同定したファジィ制御器を用いた倒立棒の安定化制御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) 実測結果もファジィ制御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ファジィ制御器により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、カオスの挙動であることを示した。

(5) 安定化制御における運動の自由度については、ファジィ制御シミュレーション結果は実測結果よりやや少なめの値を示した。

(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り、人間の制御挙動が単純ではないことが推測された。

(7) 不安定系の安定化操作におけるオペレータの技量の個人差の同定にファジィ制御器が有効であることを示した。

おわりに、熱心な協力を頂いた年々の大学院、学部最終学年学生のご助力に深謝する。

文 献

- (1) Taga, G., *Dynamic Design of Brain and Body*, (2002), Kaneko Shobo. (in Japanese)
- (2) Iguchi, M. *Man-machine system*, (1970), Kyoritsu Shuppan. (in Japanese)
- (3) Fujii, K. and Taguchi, J., The role of human controller in man machine system, *System and control*, Vol.25, No.6, (1981), pp.328- 335. (in Japanese)
- (4) Ito, K. and Ito, M., On the human operator's learning process and nonlinear behavior in stabilizing an unstable system, *Trans. IEE of Japan*, Vol.96, No.5, (1976), pp.109-115. (in Japanese)
- (5) Inoue, M., *Science of Chaos and Complex system*, Nihon-Jitugyou Shuppan. (1996) (in Japanese)
- (6) Kawazoe, Y., Manual control and computer control: Experiment with control of inverted pendulum on a cart, *Proc. of the 2nd Sympo. on Motion and Vibration Control*, No.910-52, (1991), pp.95- 100. (in Japanese)
- (7) Kawazoe, Y., Characteristic of Human Operator with the Control of Inverted Pendulum on a Cart. 1st Rep., Nonlinear Behavior in Computer Control, *Proc. of the Dynamics and Design Conference*, No.920 - 55(A), (1992), pp.1-6. (in Japanese)
- (8) Kawazoe, Y., Manual control and computer control of an inverted pendulum on a cart, *Proc. of the First International Conf. on Motion and Vibration Control*, (1992), pp.930-935.
- (9) Kawazoe, Y. and Ju, D. Y., Nonlinear characteristics of human operator with the stabilizing control of an inverted pendulum on a cart, *Proc. 2nd Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, (1994), pp.645- 650.
- (10) Kawazoe, Y., Ohta, T., Tanaka, K. and Nagai, K., Nonlinear Behavior in Stabilizing Control of an Inverted Pendulum on a Cart by a Human Operator : Remarks on Chaotic Behaviors and a Complex System, *Proc. of the 5th Sympo. on Motion and Vibration Control*, No.97-31(1997.11), pp.395- 398. (in Japanese)
- (11) Kawazoe, Y., Ohta, T. and Tanaka, K., Measurement and analysis of chaotic behavior of human operator stabilizing an inverted pendulum on a cart, *Proc. of ICMA2000-Human friendly mechatronics*, (2000), pp.457- 462.
- (12) Nakamura, K. and Yoro, T., *Grammar of Life*, Tetsugaku Shobo, (2001), p.151.
- (13) Kawazoe, Y., Matsumoto, J. and Kaise, T., Acquisition of Human Operator's Proficiency Using Fuzzy Inference and Its Chaos-Entropy Analysis, *Proc. of the 8th Sympo. on Motion and Vibration Control*, No.03 - 8, (2003), pp.525 - 530. (in Japanese)
- (14) Kawazoe, Y., 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. and Watanabe, T., (1999), 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, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 13-1, (2001), pp.23-29.
- (17) Kawazoe, Y., Hashimoto, K. and Ohta, T., Nonlinear Characteristics of an Operator Behavior during Stabilizing Control of an Inverted Pendulum on a Cart. (1st, Fuzzy Identification of Individual Difference and Skill Up Process from Experimental Time Series Data and Fuzzy Control Simulation), *Proc. of the Dynamics and Design Conference*, No.98-8(B), (1998), pp.168-171. (in Japanese)
- (18) Kawazoe, Y., Nonlinear Characteristics of an Operator Behavior during Stabilizing Control of an Inverted Pendulum on a Cart: Fuzzy Identification of Individual Difference and Skill Up Process from Experimental Time Series Data and Fuzzy Control Simulation), *Proc. of the Dynamics and Design Conference*, No.99 - 7 (A), (1999), pp.251-254. (in Japanese)
- (19) Kawazoe, Y., and Matsumoto, J., Acquisition of Human Operator's Skill Using Fuzzy Inference: Identification from Chaotic and Complex Time Series Data during Stabilizing Control of an Inverted Pendulum, *Proc. of 17th Fuzzy System Symposium*, (2001), pp.715-718. (in Japanese)
- (20) Kawazoe, Y., Ikura Y., Uchiyama K. and Kaise, T., Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Neural Controller, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.74, No.741(2008), pp.1355- 1363. (in Japanese)
- (21) Kawazoe, Y., Sunaga, T. and Momoi, T., Emergence of Instantaneous NANBA TURN of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art with Anti-ZMP, *Proc. of the Dynamics and Design Conference*, No.06-1, (2006), pp.1-6. (in Japanese)
- (22) Baker, G. L. and Gollub, J. P., *Chaotic dynamics: an introduction*, Cambridge University Press, (1996), pp.86-87.
- (23) Baierlein, R., *Atoms and information theory*, (1971), W. H. Freeman and Co., San Francisco, Chapter 3.
- (24) Shimoiyo, T., *Introduction to Chaos Dynamics*, Kindaikagakusha, (1992), pp.86-95, pp.107-111. (in Japanese)
- (25) Takens, F., Detecting strange attractors in turbulence, In Rand DA and Young LS (ed), *Lecture Notes in Mathematics*, Vol.898, pp.366-381, (1981), Springer-Verlag, Berlin.
- (26) Mane, R. On the dimension of the compact invariant sets of certain nonlinear maps. In Rand DA and Young LS (ed), *ibid*, Vol.898, (1981), Springer Verlag, Berlin, 230-242.

- (27) Wolf, A., Swift, J. B., Swinney H. L., and Vastano J. A. (1985), Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica*, 16D, 285-317.
- (28) Aihara, K., ed., *Chaos seminar*, (1993), pp.51 - 53, p.150. Kaibundo. (in Japanese)
- (29) Nagashima, H. and Baba, Y., *Introduction to Chaos*, Baihukan, p.89. (in Japanese)
- (30) Kodera, H., *Linear Algebra*, Kyoritu Shuppan, p.94. (in Japanese)
-