

人間オペレータの技量の個人差と習熟度の カオス・エントロピ解析とファジィ制御による獲得

川副嘉彦^{*1}, 石川恵介^{*2}, 伊倉良明^{*2}

Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Fuzzy Controller

Yoshihiko KAWAZOE^{*3}, Keisuke ISHIKAWA and Yoshiaki IKURA

^{*3} Department of Human-Robotics, Saitama Institute of Technology,
1690, Fusajii, Fukaya - shi, Saitama, 369-0293 Japan

This paper tries to identify the individual difference and the proficiency of human operator's behavior from time series data by using fuzzy inference and acquire individual skill of human operator. 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. The identified fuzzy controller from time series data of each trial of each operator showed well the human-generated decision-making characteristics with the chaos and the large amount of disorder. The estimated degree of freedom of motion increases and the estimated amount of disorder decreases with an increase of proficiency both in fuzzy control simulation and experiment. It also showed that the agreement between the fuzzy control simulation and the experiment for the degree of freedom of motion and the entropy ratio is particularly good when the simulated wave form and the measured wave form resemble in appearance.

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

1. 本研究の背景と目的

生物が生きている状態をもっとも明白に表す現象の一つは運動である。運動は物理的な状態の変化として観測できる。しかし、運動がどうやって獲得されるのかは難しい問題である。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⁽¹⁾。

子供の発達過程の膨大な観察から、ゲゼル (Gesell, 1945)は、発達が進むにつれて運動の自由度が増大していくこと、不安定化と安定化を繰り返しながらゆらぎ（カオス）をうまく使って進んでいくことを経験則として指摘している⁽¹⁾。

また、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（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（自由度を解放する）ようになる (Newell & Van Emmerik, 1989)⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

図 1(a)と図 1(b)は、武術研究者・甲野善紀によるパテュシェ（お菓子職人）の混ぜ方の提示例を著者らが撮影したものであり、(a) 自由度の高い動きは体全体の関節を使い、(b) 自由度の低い動きは腕の動きが目立つ。

図 2(a), (b) は二重振子（2自由度）の強制振動の（電磁石と永久磁石の反発により強制力を与える）例であり、模型の鉄棒人形が大きい初期角度を与えられて大車輪を行うときのほぼ 1 回転の間のコマ写真である。大振幅の振動や回転運動になるとカオス挙動がみられる。すなわち、強制力が一定であるのに周期（この例では 0.51 秒と 0.70 秒）も振幅も毎回微妙に異なり、周期性と無秩序さが同居する複雑系である。

*原稿受付 2009年9月24日。

^{*1}正員、フェロー、埼玉工業大学工学部（〒3690293 深谷市普濟寺1690）

^{*2} 埼玉工業大学大学院工学研究科

E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

ロボットの本質が機械工学から多リンク系の力学と制御（非線形）への展開だとすれば、2リンク系でもカオスになるロボットの力学と制御は未開拓である。

図3は、本研究における人間オペレータによる倒立振子（倒立棒）の安定化制御実験風景を示す。人間オペレータ（試行者）が練習により倒立棒を60秒間倒さないという安定化制御にある程度習熟した後の（転倒させないで少なくとも60秒間制御できるという意味）10回の試行における倒立振子角変位と台車変位の時系列波形のカオス・エントロピ解析とファジィ制御器およびニューラル制御器による個人差および習熟度の獲得を多くの試行者の多くの試行について試みている^{②③}。

従来のPID制御（図4）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最小にしようとするような制御はしないで倒立棒を倒さない範囲で振動を有限振幅に保つよう

制御をする（図5）。倒立棒はほとんど垂直には立っておらず、重力による転倒力により常にゆれており、右と左の方向の切り替えの途中は制御していないよう見える。あらゆる転倒状況（倒立棒の傾き角、角速度、台車の位置、速度などの組み合わせ）において転倒しないような切り替えのコツを試行錯誤により獲得し、試行を重ねて習熟していくと次第に動きが滑らかになり、倒立棒は静止しているように見える（図6）。しかし静止しているのではなく、絶えず細かく動いているのであり、これが人間オペレータによる安定化制御が外乱に対して強いロバスト性をもつ理由である。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^{④⑤}。

前報では、人間オペレータによる倒立振子の安定化制御における実測時系列データからその挙動をニューロ制御器^②およびファジィ制御器^③として同定する方法を示し、人間オペレータによる倒立振子の安定化制御における実測時系列データから同定したニューロ制御器^②およびファジィ制御器^③を用いたシミュレーション結果および実測時系列データのカオス・エン

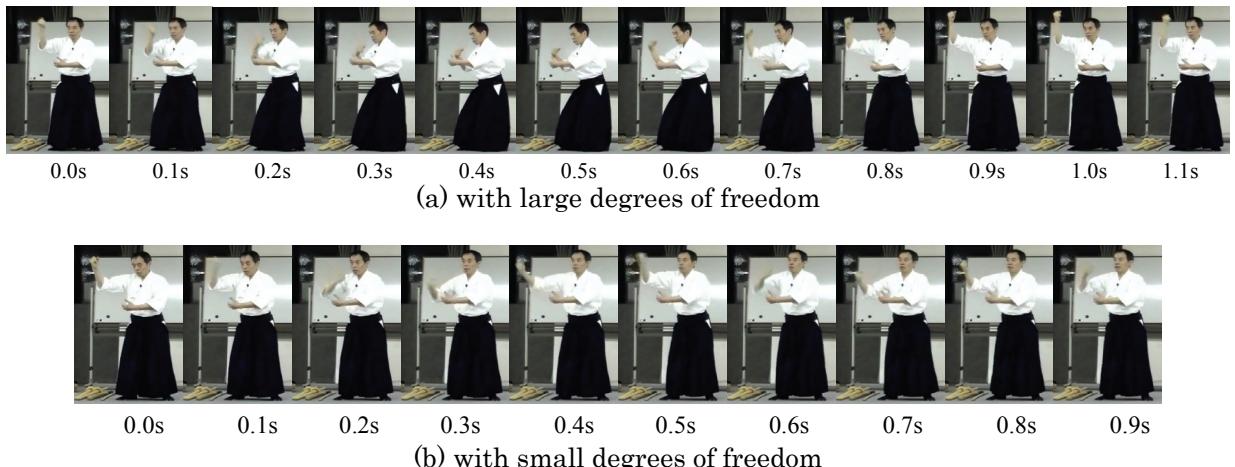


Fig.1 Behavior of A cake craftsman's behavior presented by Yoshinori Kouno

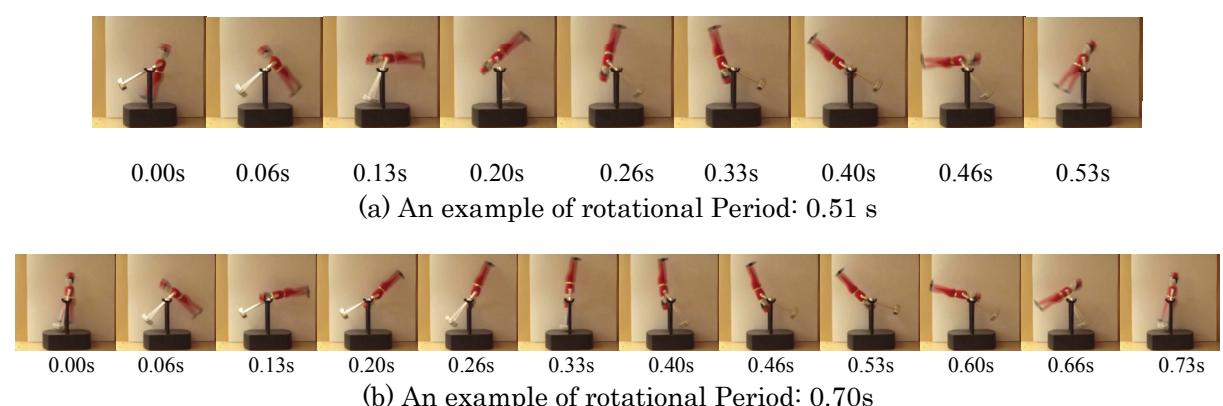


Fig.2 Chaos and disorder in the excited double pendulum (toy of the horizontal bar)

トロビ解析により、カオス性（最大リアプロノフ数が正）と無秩序さの程度（エントロピーの割合）が大きいこと、試行回数を重ねると運動の自由度が増大し、無秩序さの程度が低減することを示した。

また、実測時系列データから同定したニューロ制御器を用いた安定化制御シミュレーション波形と実測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名の試行についてのカオス・エントロビ解析により明らかにした^②。

本論文では、(1) ファジィ制御シミュレーションにおいても、人間オペレータによる台車上の倒立棒の安定化制御の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、運動の自由度が大きくなること、(2) さらに、実測波形とシミュレーション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名の試行について明らかにし、(3) 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ファジイ制御器およびカオス・エントロビ解析が有効であることを明確にする。

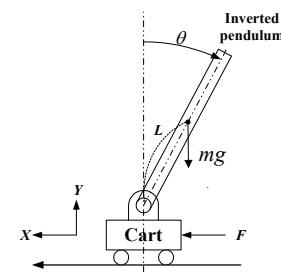
2. 人間オペレータによる倒立振子の安定化制御の ファジィ同定とファジィ制御シミュレーション

2.1 オペレータによる台車上の倒立振子の安定化実験

倒立振子の下端を台車上で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、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、リニアベアリングに固定した台車を人間オペレータの手により水平に移動させて、倒立棒が倒れないように制御を行う。振子角度も台車位置も特に目標値は与えない。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変換器を通してパソコンに取り込む。データ取込のサンプリング時間は0.0586[s]である。手で台車を移動させて倒立棒が倒れないように制御することは初期には難しいが、練習により可能になる。倒立棒を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達した試行者（オペレータ）8名について、それぞれ計10回の試行を行った。

2.2 人間オペレータの時系列データからのファジイ制御器の生成

ファジイ制御装置の入力として倒立棒の角変位 θ_t 、角速度 $\dot{\theta}_t$ 、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。ただし、外力 F の実測値は倒立棒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。



(a)

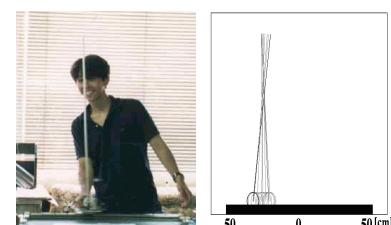


(b)

Fig.3 Stabilizing control of an inverted pendulum on a cart by a human operator.

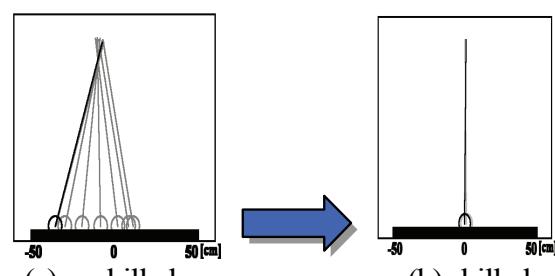


Fig.4 Stabilizing control of an inverted pendulum on a cart by a computer control with PID.



(a) Experiment (b) Stick picture

Fig.5 Stabilizing control of an inverted pendulum on a cart by a human operator.



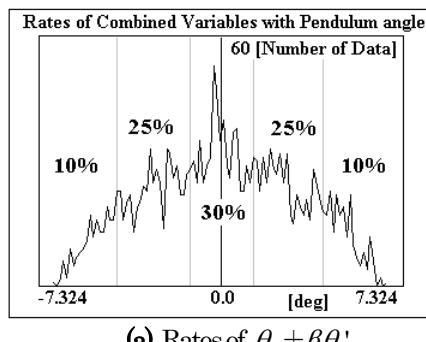
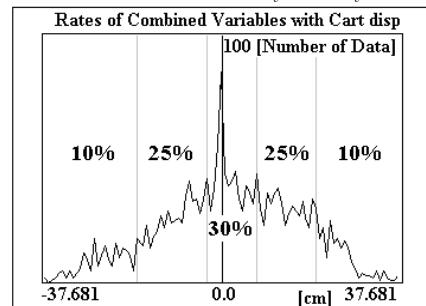
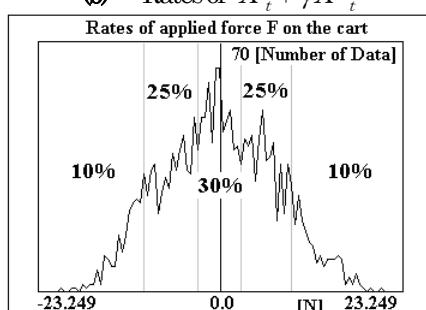
(a) unskilled

(b) skilled

Fig.6 Skill-up process of human operator during stabilizing control of inverted pendulum

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(図7)。この分割はルール表の作成に重要であり、領域の割合を変化させて同定を行い、実験結果と比較して最適な割合を決定した。

入力用メンバシップ関数の振子関係統合変数 $\theta_n + \beta\theta'_n$ および台車関係統合変数 $X_n + \gamma X'_n$ の各ラベルは、境界線部分に当たるデータを用いて、 $NB = \text{minimum of the data: } D_{MIN}$, $NS = (D_{NB_NS} + D_{NS_ZR})/2$, $ZR =$

(a) Rates of $\theta_t + \beta\theta'_t$ (b) Rates of $X_t + \gamma X'_t$ (c) Rates of applied force F on the cart
Fig.7 Example of rates of inputs and output.

average of the data: D_{AVE} , $PS = (D_{ZR_PS} + D_{PS_PB})/2$, $PB = \text{maximum of the data: } D_{MAX}$ のように5段階に決定する(図8)。台車に加える外力 F の各ラベルは、境界線部分に当たるデータを用いて、 $NB = \text{minimum of the data: } D_{MIN}$, $NMB = (NB + NS)/2$, $NS = (D_{NB_NS} + D_{NS_ZR})/2$, $NMS = NS/2$, $ZR = \text{average of the data: } D_{AVE}$, $PMS = PS/2$, $PS = (D_{ZR_PS} + D_{PS_PB})/2$, $PMB = (PB + PS)/2$, $PB = \text{maximum of the data: } D_{MAX}$ のように9段階に決定する(図9)。

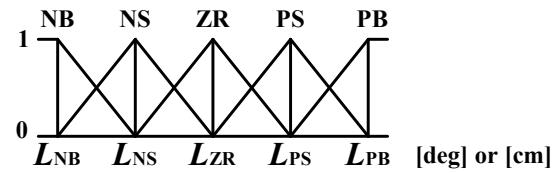


Fig.8 Membership function of inputs.

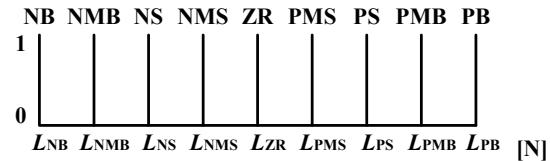


Fig.9 Membership function of output.

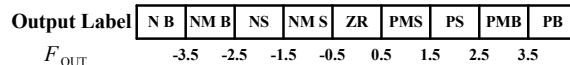
ルール表の同定については、 $5 \times 5 (=25)$ のルールの各マス目に入る出力を、たとえば、時刻 t における時系列データ $\theta_t + \beta\theta'_t$ が G_{NB} , $X_t + \gamma X'_t$ が G_{ZR} , F_{t+1} が G_{NS} とすると、ルール表の $\theta + \beta\theta' = NB, X + \gamma X' = ZR$ であるマス目の $F = NS$ のラベルを一つカウントする(図10)。これをデータ数(2046個)だけ繰り返して各マス目の F の各ラベル数を求め、

$$F_{OUT} = \frac{(-4.4 \cdot NB) + (-2.0 \cdot NS) + 0.0 \cdot ZR + 2.0 \cdot PS + 4.4 \cdot PB}{NB + NS + ZR + PS + PB} \quad (1)$$

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11からマス目ごとに求め、図12のようにルール表を同定する^③。

| | | $\theta + \beta\theta'$ | | | | |
|-----------------|----|-------------------------|----|----|----|----|
| | | NB | NS | ZR | PS | PB |
| $X + \gamma X'$ | NB | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | NS | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | ZR | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| | PS | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| | PB | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |

Fig.10 Fuzzy output grid number for generating a control rule.

Fig.11 Conformity of output F_{out}

| | | $\theta + \beta \theta'$ | | | | |
|-----------------|----|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 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 |

Fig.12 Rule for control of a pendulum on a cart
(1st trial NK01 of Human operator NK)

2.3 ファジィ制御器を用いた安定化制御シミュレーション 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 13 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プロック線図である。

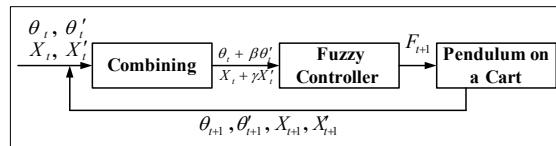


Fig.13 Stabilizing control simulation of the pendulum using the constructed fuzzy controller from human operator's time series data.

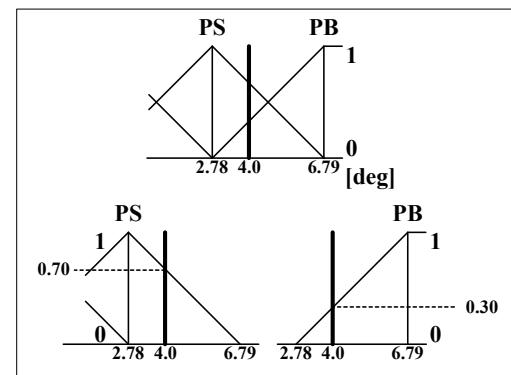
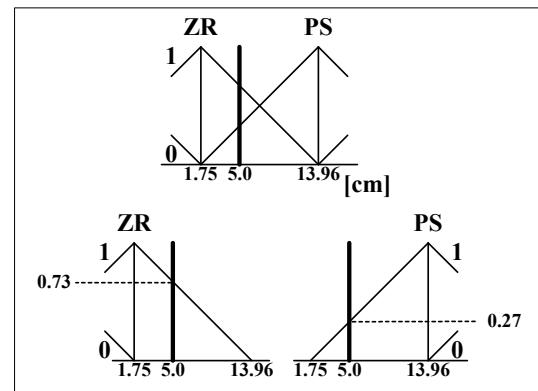
ファジィ制御器より得られた台車への外力 F から、4 次元のルンゲ・クッタ法により台車の変位 X と速度 X' および、振子の角度 θ と角速度 θ' を求める。振子関係統合変数 $(\theta_t + \beta \theta'_t)$ 、台車関係統合変数 $(X_t + \gamma X'_t)$ を作り、その二つの変数からファジィ制御器の出力が決まる。出力 F_{t+1} は、次の時刻に台車に加えるべき力である。

入力値を入力用メンバシップ関数に当てはめることにより、推論に用いるラベルとその適合度が決定する。振子関係統合変数 $\theta + \beta \theta' = 4.0$ [deg]、台車関係統合変数 $X_t + \gamma X'_t = 5.0$ [cm] のときの適合度の求め方を以下に示す。

(1) 入力値 $\theta + \beta \theta' = 4.0$ [deg] を入力用メンバシップ関数に当てはめると、PS のラベルの適合度が

0.70、PB のラベルの適合度が 0.30 と決定される（図 14）。

(2) 入力値 $X + \gamma X' = 5.0$ [cm] を入力用メンバシップ関数に当てはめると、ZR のラベルの適合度が 0.73、PS のラベルの適合度が 0.27 と決定される（図 15）。

Fig.14 Conformity of $\theta + \beta \theta'$ Fig.15 Conformity of $X + \gamma X'$

入力用メンバシップ関数により求められたラベルから、ルール表により推論に用いるラベルを決定する。 $\theta + \beta \theta' = 4.0$ [deg] のラベルは PS と PB、 $X_t + \gamma X'_t = 5.0$ [cm] のラベルは ZR と PS であり、これらを制御ルール表に当てはめてルールを決定し、次のような IF - THEN 形式のルールを得る。

```

IF θ + βθ' = PS and X + γX' = ZR THEN F = NS
else
IF θ + βθ' = PS and X + γX' = PS THEN F = NMS
else
IF θ + βθ' = PB and X + γX' = ZR THEN F = NMB
else
IF θ + βθ' = PB and X + γX' = PS THEN F = NMB

```

これらのルールを用いて、MAX-MIN 合成により以下のように出力値を求める。

ラベルの適合度を、ルールで決められた出力用メンバシップ関数（シングルトン）にあてはめる。そのときのルールに複数の条件があるときには、適合度の最小のものを条件部全体の適合度として出力用メンバシップ関数にあてはめる。これを MIN 値による切断と呼び、その行程を図 16 に示す。

さらに、切断された適合度をルールの数だけ出力用メンバシップ関数にあてはめる。そのとき 1 つのラベルに複数の適合度が重なったときには、その中の最大の適合度をラベルの適合度として残す。これを MAX 値による合成と呼び、その行程を図 17 に示す。こうして得られた出力用メンバシップ関数を合成ファジィ出力と呼び、合成ファジィ出力 NMB : 0.30, NS : 0.70, NMS : 0.27 を得る。合成ファジィ出力が得られたら、確定演算法の重心法を用いて出力値の演算を

$$F_{\text{OUT}} = \frac{\sum_{i=1}^9 X_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^9 Y_i} \quad (2)$$

のようを行う。 X_i は出力用メンバシップ関数の X 座標(−20.46, −13.37, −6.27, −3.14, −0.02, 3.09, 6.18, 14.72, 23.25), Y_i は各出力用メンバシップ関数の合成された適合度, i はラベル数を意味する。図 11 で得られた合成ファジィ出力を用いるとファジィ

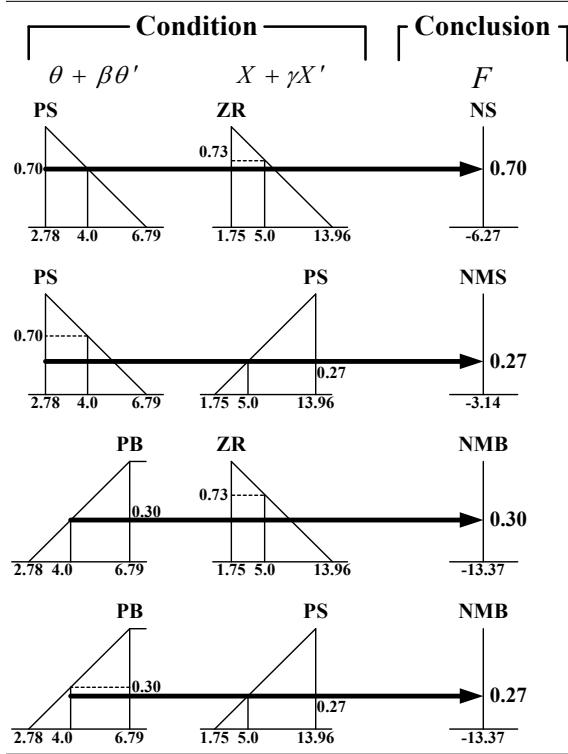


Fig.16 Cutting by MIN value

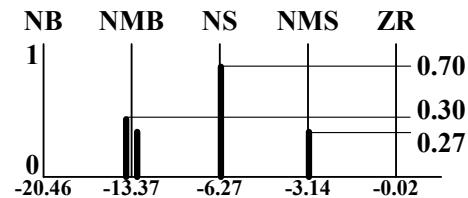


Fig.17 Composition by MAX value

推論結果は $F = -7.28 [\text{N}]$ となる。

ファジィ制御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⁽³⁾。運動方程式は、次のようになる。

$$M\ddot{X} - mL\ddot{\theta} \cos \theta + mL\dot{\theta}^2 \sin \theta + \mu_x \dot{X} = F \quad (3)$$

$$I\ddot{\theta} - mL\dot{X} \cos \theta + \mu_\theta \dot{\theta} = mgL \sin \theta \quad (4)$$

ただし、 m : 振子の質量, M : 振子と台車と手の等価質量の和, $2L$: 振子の長さ, I : 振子の支点まわりの慣性モーメント, F : 台車に作用するファジィ出力, μ_θ : 振子支点の摩擦係数, μ_x : 台車とレール間の摩擦係数である。

3. 倒立棒の安定化制御における時系列データのカオス・エントロピー解析

時系列データ (x_t) の最大値 (x_{\max}) と最小値 (x_{\min}) を用いてデータ範囲を $0 \leq b_t \leq 1$ に正規化し、分割した N_c 個(セル数)のセルのどこに n 個のデータ(b_t) が入るかにより求めた各セルの確率 P_i を用いて、以下のようにエントロピーを求めることができる⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

$$S = -\sum_{i=1}^{N_c} p_i \log p_i \quad (5)$$

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⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。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⁽⁶⁾⁽⁷⁾。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。

リアプロフ指数は、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ロフ指数も N 個存在する。最大リアプロフ指数が正のとき、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⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

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⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾。

観測された時系列データ $\mathbf{x}(t_i)$ を用いて、遅れ時間 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⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

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 0.5~4.0 [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、 $\tau = 0.41 \text{ s}$ (一定) とした。

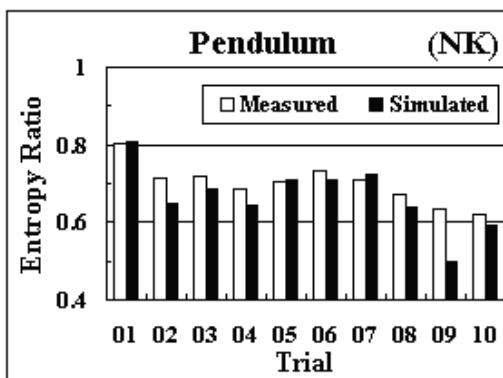
$$\begin{aligned} \mathbf{X}_1 &= (x(t_1), x(t_1 + \tau), \dots, x(t_1 + (m-1)\tau)) \\ \mathbf{X}_2 &= (x(t_2), x(t_2 + \tau), \dots, x(t_2 + (m-1)\tau)) \\ \mathbf{X}_3 &= (x(t_3), x(t_3 + \tau), \dots, x(t_3 + (m-1)\tau)) \\ &\vdots \\ \mathbf{X}_i &= (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)) \\ \mathbf{X}_N &= (x(t_N), x(t_N + \tau), \dots, x(t_N + (m-1)\tau)) \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (7)$$

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

$$\frac{df(x_j)}{dx_j} = \frac{dx_{j+1}}{dx_j} = \frac{x_{j+1} - x_j}{x_j - x_{j-1}} = f'(x_j) \quad (8)$$



(a) Human operator NK

Fig.18 Entropy Ratios vs. trials of Human Operators (Measured and Simulated with identified Fuzzy controller).

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、

$$\lambda_i = \frac{1}{t_n - t_0} \sum_{j=1}^{n-1} \log_e \mathbf{b}_{ij} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (9)$$

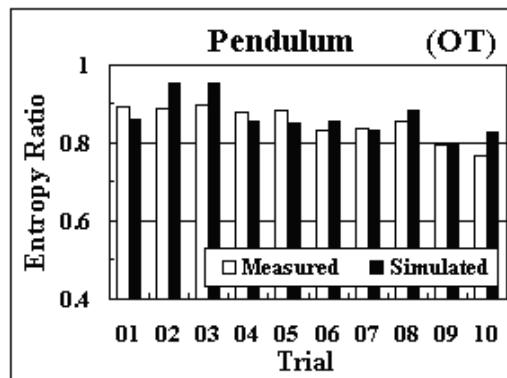
となる^{(6)(8), (12)–(14), (16)}。ここで、 n はデータ数、 t_0, t_n はそれぞれ時系列データの最初および最後の時刻を示す。

本論文では、埋め込み次元を 5~20 次元まで与えて計算した。最大リアプノフ指数は、ある程度以上の埋め込み次元では時刻が経過すると値がほぼ一定値に落ちつくので、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^{(2),(3)}。

4. ファジィ制御器による個人差と習熟度の獲得とカオス・エントロピー解析

図 18 は、(a) 人間オペレータ NK および(b) 人間オペレータ OT の試行 1 回目から 10 回目までの振子角度の時系列データのエントロピー診断結果である。同定したファジィ制御器を用いた安定化制御シミュレーションにおいても、無秩序さの程度（エントロピーの割合）^{(2),(3)} が大きく、習熟度が増すと無秩序さの程度が低減する傾向を示す。

図 19 は、振子角度の時系列データから求めた最大リアプノフ指数の収束状態から推定した次元数（運動の自由度）^{(2),(3)} である。同定したファジィ制御器を用いたシミュレーションにおいても試行を重ねると推定次



(b) Human operator OT

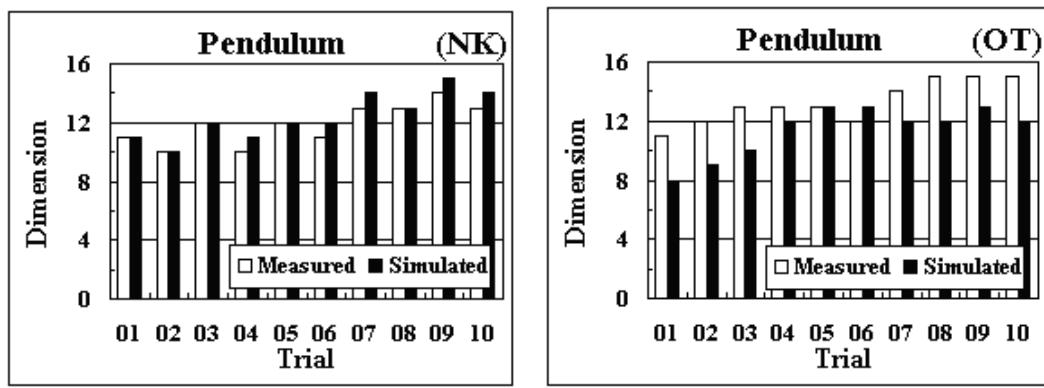


Fig.19 Estimated Dimension (Degree of Freedom) of motions vs. trial numbers of Operators (Measured and Simulated with identified Fuzzy controller).

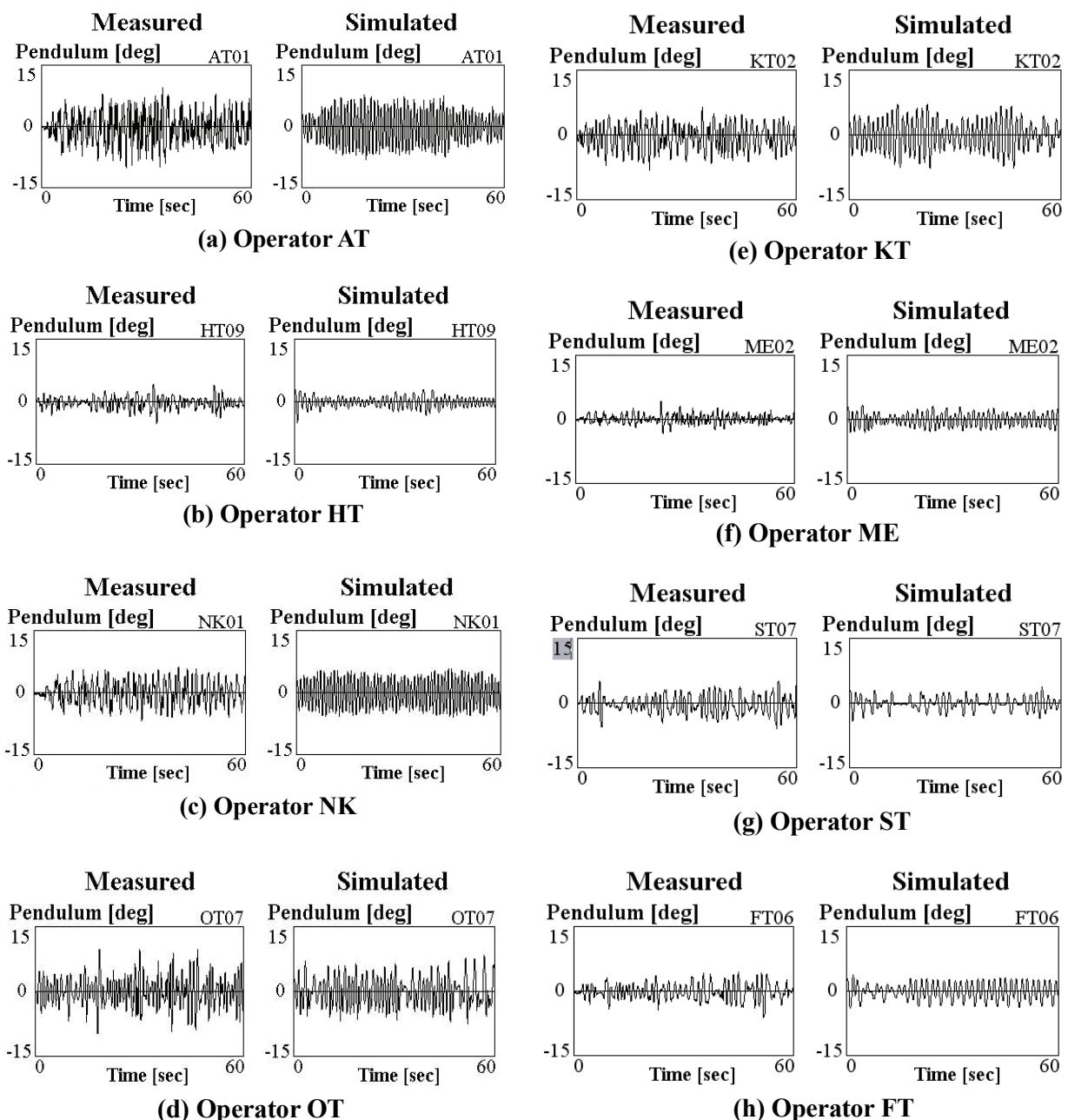


Fig.20 Example of simulated wave forms with identified fuzzy controller and the measured wave forms of 8 human operators resembling in appearance.

元（運動の自由度）が増す傾向があり、習熟度が増すと、運動の自由度の数が増大する（身体・腕系関節の自由度を多く使う）と解釈できる。どの試行においても最大リアノフ指数は正の値であり、カオス性を示す。

図 20 は、8人の試行者それぞれの10回の試行のうち、同定したファジィ制御器を用いた安定化制御シミュレーション波形と実測波形とが最も似ていると目視で判断した8人それぞれの試行を一つ選んで並べたものである。

図 21 と図 22 は、図 20 の実測時系列波形とシミュレーション時系列波形のカオス・エントロピー解析結果である。図 21 は、ファジィ制御シミュレーション値と実測値との総エントロピーの割合であり、これも8人のファジィ制御シミュレーションの値と実測値とが極めて良く一致している。また、図 22 は、推定次元数（運動の推定自由度）であり、8人のファジィ制御シミュレーションの値と実測値との値が良く一致している。すなわち、主観的であっても、実測とシミュレーションの波形が定性的に似ていると、客観的なカオス・エントロピー解析結果も近い値になることを示している。

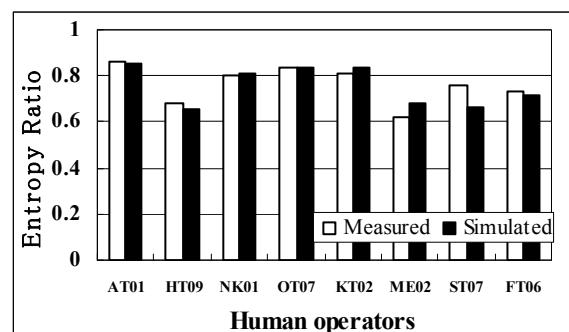


Fig.21 Entropy Ratios of 8 human operators comparing the simulated with an identified fuzzy controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

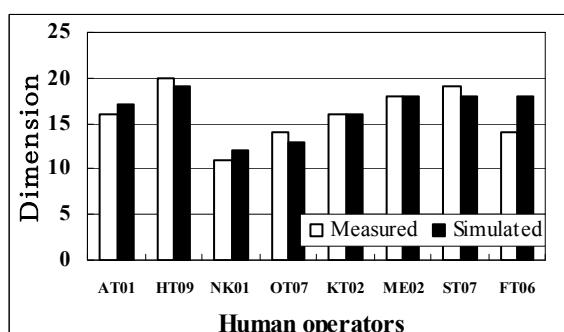


Fig.22 Estimated Dimension (Degree of Freedom) of 8 human operators comparing the simulated with an identified fuzzy controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

5. 結 言

本論文では、(1) カオス・エントロピー解析によるところ、人間オペレータによる台車上の倒立棒の安定化運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（エントロピーの割合）が低減し、運動の自由度が増大すること、(2) さらに、人間オペレータの安定化運動の実測波形とファジィ制御器による同定結果に基づくシミュレーション波形とが主観的であっても定性的に似ているほど、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人の試行について明らかにし、(3) 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ファジィ制御器とカオス・エントロピー診断が有効であることを明確にした。

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。調和のとれた人間一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。従来の人間一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。しかし、これらの研究では、人間にに関する特徴である非線形、あるいは非定常な応答は雑音項として処理されており、難しい制御対象や学習が進行して行く過程での人間の応答に顕著な非線形・非定常な応答については不明な点が多い^{②,③}。

日本ロボット学会誌 2009 年 5 月号において、「ロボット制御の理論」特集が組まれ、そもそも、ロボット研究に必要な理論とは何かが改めて問われている。様々なロボット制御法が次々と提案される一方で、長きにわたりロボット制御技術の研究やロボットの開発に携わって来た人々の多くに混乱と疑問が生じているという背景が見える^{⑩,⑪}。

二足歩行ロボットに代表される大振幅・大変位を伴う不安定な多自由度・非線形系の大膽な速い動きの生成や不意の外乱にロバストな安定化制御の実現には、従来の ZMP 制御のような微小変動を扱う線形制御は無力である。従来とは質の異なる新しいロボット制御が求められている。今後、平衡点不安定を利用する非線形最適制御を二足歩行ロボットに展開したい。

おわりに、動きの解析のための撮影を長年にわたつて快く許可いただいている古武術研究者（神戸女学院客員教授）・甲野善紀氏および西武池袋コミュニティ・カレッジ・若杉泰介氏に厚くお礼申し上げる。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も深謝する。また、長年にわたって本研究に関して討論と励ましをいただいた故・田中健一先生（元・埼玉工業大学専門学校教授）のご冥福を心からお祈り申し上げます。

文 献

- (1) Taga, G., *Dynamic Design of Brain and Body*, (2002), Kaneko Shobo. (in Japanese)
- (2) 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)
- (3) Kawazoe, Y., Ikura, Y., Kaise, T. and Matsumoto, J., Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Human Operator's Skill Using a Fuzzy Controller: Identification of Individuality During Stabilizing Control of an Inverted Pendulum, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.753, (2009), pp.1355-1363. (in Japanese)
- (4) Kawazoe, Y., How Should Be the Robot That Coexists with Nature, Life and Human: Emergence of NANBA Walk and Run of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art, *Journal of the Faculty of Engineering, Saitama Inst. Tech*, Vol.15, (2005), pp.11-23. (in Japanese)
- (5) Kawazoe, Y., How Should Be the Robot That Coexists with Nature, Life and Human: Mechanism of Robustness of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art, *Journal of the Faculty of Engineering, Saitama Inst. Tech*, Vol.15, (2005), pp.25-32. (in Japanese)
- (6) Baker, G. L. and Gollub, J. P., *Chaotic dynamics: an introduction*, Cambridge University Press, (1996), pp.86-87.
- (7) Baierlein, R., *Atoms and information theory*, (1971), W. H. Freeman and Co., San Francisco, Chapter 3.
- (8) Shimojyo, T., *Introduction to Chaos Dynamics*, Kindai Kagakusha, (1992), pp.86-95, pp.107-111. (in Japanese)
- (9) 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 Symposium on Motion and Vibration Control*, No.97-31(1997.11), pp.395-398. (in Japanese)
- (10) 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)
- (11) 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)
- (12) 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.
- (13) 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, pp.230-242.
- (14) Wolf, A., Swift, J. B., Swinney H. L. and Vastano J. A. (1985), Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica*, 16D, 285-317.
- (15) Aihara, K., ed., *Chaos seminar*, (1993), pp.51-53, p.150, Kaibundo. (in Japanese)
- (16) Nagashima, H. and Baba, Y., *Introduction to Chaos*, Baihukan, p.89. (in Japanese)
- (17) Kodera, H., *Linear Algebra*, Kyoritu Shuppan, p.94. (in Japanese)
- (18) Shimada, A. and Oaki, J., On special issue "Theories for Robot Control", *J. of the Robotics Society of Japan*, Vol.27, No.4, (2009), p.369. (in Japanese)
- (19) Kajita, S., From inverted pendulums to biped locomotion -ZMP and control theory-, *J. of the Robotics Society of Japan*, Vol.27, No.4, (2009), pp.392-395. (in Japanese)