

手動による倒立棒の安定化制御における 個人差・習熟度の獲得とカオス・エントロピ解析 (ニューロ制御器とファジイ制御器の同定器としての比較)

Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency during Manual Stabilizing Control of an Inverted Pendulum on a cart: Comparison of a Fuzzy Controller and a Neuro Controller as an Identifier

○ 正川副嘉彦 (埼玉工大) 石川恵介 (埼玉工大) 太田智洋 (坂本工業)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusajii 1690, Fukaya, Saitama

Keisuke ISHIKAWA, Saitama Institute of Technology

Tomohiro OHTA, Sakamoto Industry Co.,Ltd, Bessho-Cho 292, Ota City, Gunma

This paper tried to identify the individual difference and the proficiency of human operator's behavior from time series data by using fuzzy controller and neural controller acquiring individual skill and proficiency 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 and neural 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 the simulations with identified fuzzy or neural controllers and the experiment. It also showed that the fuzzy controller is good for identification of initial stage and the neural controller is good for that of proficient stage of skill up process.

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

1. 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。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⁾⁻⁽⁶⁾。

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⁾⁽³⁾およびファジイ制御器⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾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およびファジイ制御器を用いたシミュレーション結果も実測結果と同様に、時系列データのカオス・エントロピ解析によるとカオス性（最大リップノフ数が正）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およびファジイ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、推定した運動の自由度と無秩序さの程度も近い値を示すことを8名の試行についてカオス・エントロピ解析により明らかにした。埋め込み次元nを与えてアトラクタをn次元に再構成することにより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次元あるいは自由度を推定

することができる⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。

本論文では、不安定系の安定化操作における人間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ニューロ制御器が有用であることをカオス・エントロピ解析により明確にし、ファジイ制御器は習熟の初期段階の同定に適しており、ニューロ制御器は習熟のレベルが高い段階の同定に適していることを示した。

図A1は、人間オペレータOTの2回目の試行においてニューロ制御器による同定ができなかった例について、ファジイ制御器による安定化制御挙動を示したものである。この場合のように技量として習熟の余地のある段階における安定化制御挙動についてはファジイ制御による同定が適している。

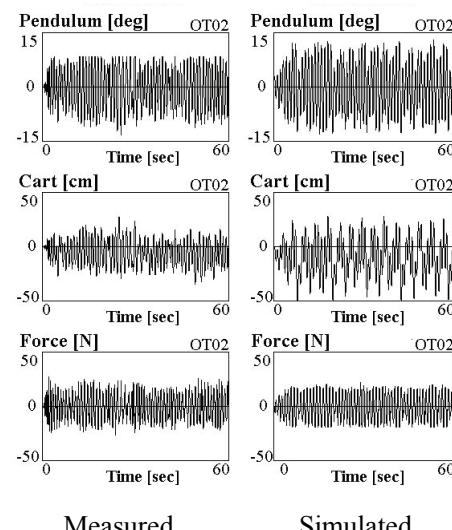


Fig.A1 Simulated waveform using identified Fuzzy controller vs. measured waveform (Human Operator OT's 2nd trial).

1. 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。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⁾⁻⁽⁶⁾。

図1(a)と図1(b)は、運動の自由度のイメージとして武術研究者・甲野善紀によるパテエシェ（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⁽⁶⁾。図2(a), (b) は、電磁石と永久磁石の反発により強制力を与えた2自由度・二重振子の強制振動の例であり、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。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⁽⁶⁾。

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た⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。

従来のPID制御などの線形制御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な力だけに頼らない省エネの柔軟な制御をする。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に見える。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。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は習熟しない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

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⁾⁽³⁾およびファジィ制御器⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾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およびファジィ制御器を用いたシミュレーション結果も実測結果と同様に、時系列データのカオス・エントロピ解析によるとカオス性（最大リニアノフ数が正）と無秩序さの程度（エ

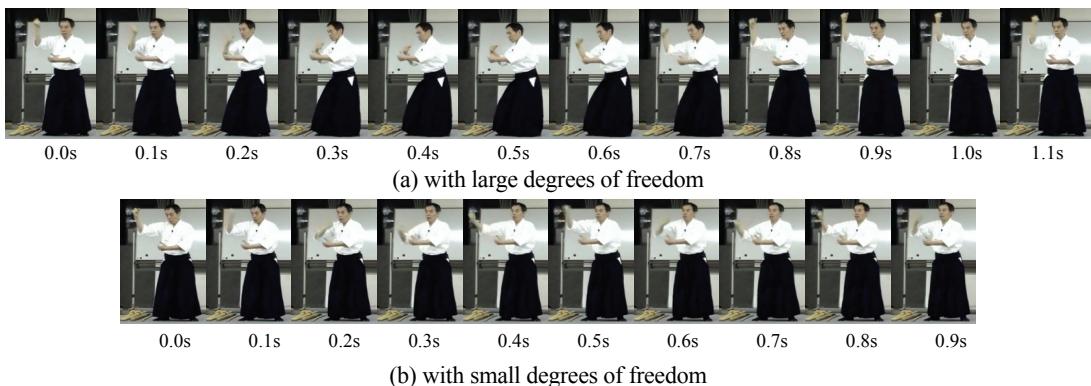


Fig.1 Cake craftsman's behavior presented by Yoshinori Kouno

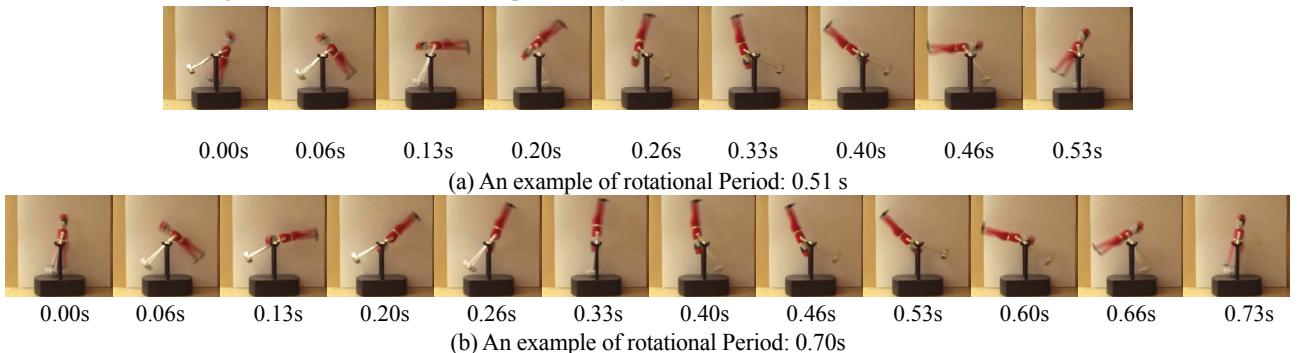


Fig.2 Chaos and disorder in the excited double pendulum (toy of the horizontal bar)

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ラル制御器および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が似ているほど、推定した運動の自由度と無秩序さの程度も近い値を示すことを 8 名の試行についてカオス・エントロピ解析により明らかにした。埋め込み次元 n を与えてアトラクタを n 次元に再構成することにより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次元あるいは自由度を推定することができる⁽²⁾⁻⁽⁶⁾。

図 4 は、人間オペレータの安定化制御特性を獲得したニューラル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を比較した例(人間オペレータ NK の 3 回目の試行 : NK03)である。台車に作用する力が実測波形に比べて小さめであるが、振子角度と台車変位は似たような挙動を示している。

本論文では、不安定系の安定化制御における個人差と習熟度を時系列データから同定した結果およびカオス・エントロピー解析結果に基づいて、ファジィ制御とニューラル制御の同定器としての特長を比較・考察する。

2. 人間オペレータによる台車上の倒立振子の安定化制御実験

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

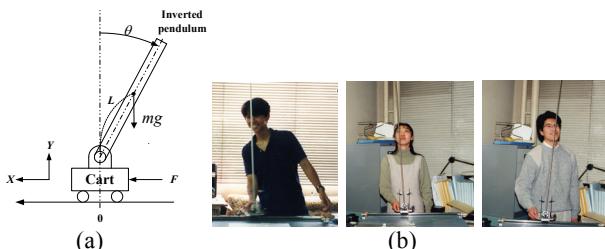


Fig.3 Stabilizing control of an inverted pendulum on a cart by a human operator.

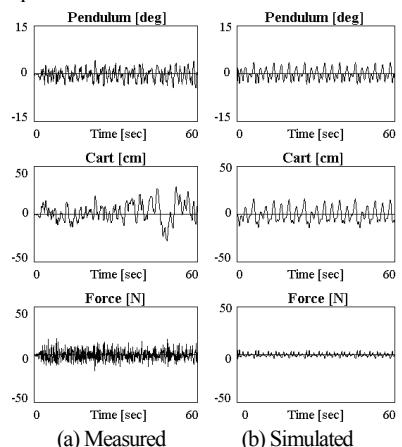


Fig.4 Simulated waveform using acquired Neural controller vs. measured waveform of Human Operator NK's 3rd trial (NK03). $u_0=2.0$, $\alpha=12.0$, $\beta=3.0$.

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。

3. 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制御シミュレーション

3.1 人間オペレータの時系列データからのファジィ制御器の生成

ファジィ制御装置の入力として倒立棒の角変位 θ_t 、角速度 θ'_{t+1} 、および台車変位 X_t 、台車速度 X'_{t+1} 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。

3.2 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⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。図 5 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 ($\theta_t + \beta \theta'_{t+1}$)、台車関係統合変数 ($X_t + \gamma X'_{t+1}$) を作り、その二つの変数から制御器の出力が決まる。出力 F_{n+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。

3.3 ファジィ同定と制御についての考察

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)が大きく、試行を重ねて習熟度が増すと無秩序さの程度が低減する傾向を示す。また、試行を重ねると推定次元(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⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

図 6 と図 7 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 人の試行についてのカオス・エントロピー解析結果である。ファジィ制御シミュレーション値と実測値の総エントロピーの割合および推定次元数(運動の推定自由度)は、極めて良く一致している。すなわち、実測とシミュレーションの波形が似ていると主観的に判断したデータは、カオス・エントロピー解析結果により客観的にも近い値になることを示している⁽⁶⁾。

4. ニューラル同定と制御シミュレーション

4.1 時系列データからのニューラル制御器の生成

図 8 は、人間オペレータの時系列データからのニューラル制御器の自動生成のためのニューラルネットワークの構成を示す。倒立振子角度 θ_t 、角速度 θ'_{t+1} 、角加速度 θ''_{t+1} 、台車変位 X_t 、台車速度 X'_{t+1} 、台車加速度 X''_{t+1} 、1 サンプリング前に台車に作用した力 F_{t-1} を入力としている。応答

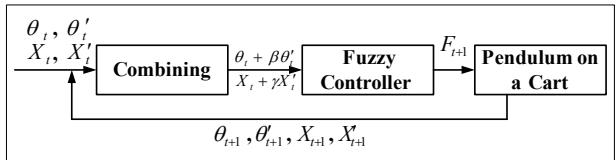


Fig.5 Stabilizing control simulation of the pendulum using the constructed Fuzzy controller from human operator's time series data.

特性として、シグモイド関数 $f(x)$ を用い、「シグモイドの傾き」 u_0 の値は、2~5まで変えて計算した。教師信号 $F_{t+1}(T)$ とニューラルネットワークからの出力 $F_{t+1}(n)$ の差を求め、逐次修正法を用いたバックプロパゲーション法によりその差が小さくなるようにネットワークに学習させる。結合係数に関する学習係数 α 、オフセット値に関する学習係数 β を広範囲に変えて学習を試みた。図9は、人間オペレータによる安定化制御の時系列データを学習することにより生成され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のブロック線図を示す⁽²⁾⁽³⁾。

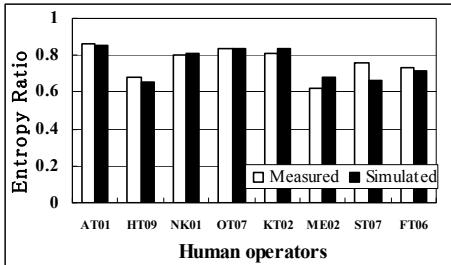


Fig.6 Entropy Ratios of 8 human operators comparing the simulated with an identified Fuzzy controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

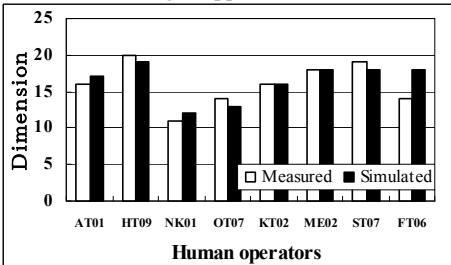


Fig.7 Estimated Dimension (Degree of Freedom) of 8 human operators comparing the simulated with an identified Fuzzy controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

4.2 ニューロ制御器を用いた安定化制御シミュレーション

同定したニューロ制御器を用いたシミュレーションにおいても、無秩序さの程度が大きく、習熟度が増すと無秩序さの程度が低減する傾向を示す。振子角度の時系列データから求めた最大リアノフ指数の収束状態から推定した次元数（運動の自由度）は、ニューラル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元が増す傾向があり、習熟度が増すと、運動の自由度の数が増えしていくと解釈できる。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。実測波形とシミュレーション波形が最も似ていると目視で判断した8人の試行を一つ選んで解析した結果が図10（総エントロピの割合）と図11（運動の推定自由度）である。8人の実測値とシミュレーションの値が良く一致している⁽²⁾⁽³⁾。

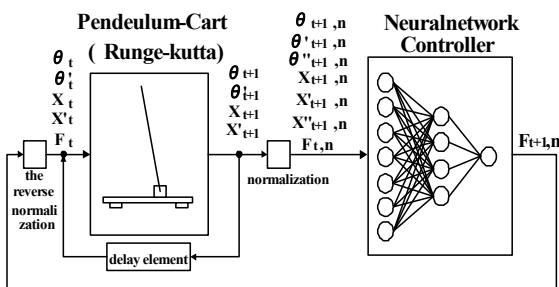


Fig.9 Block diagram of stabilizing control simulation with Neural controller identified from human operator

5. 同定器としてのファジイ制御とニューラル制御の比較

5.1 ファジイ制御器による習熟度の同定についての考察

無秩序さの程度が小さく1回目の試行から高いレベルの技量があったと推察される人間オペレータ ME および、同様に無秩序さの程度が小さいと解析された人間オペレータ ST に注目してみる。オペレータ ST については、試行5回目と9回目のファジイ同定ができなかった。オペレータ ME については、ファジイ同定できたのは2回目の試行のみであった。また、同一のオペレータの試行が二日以上に渡った場合、一日目の最後に行なった試行が同定できなかつた例(ATの7回目の試行 AT07, STの5回目の試行 ST05, STの9回目の試行 ST09)が見られた。表1は試行者とファジイ同定に成功した数(SUCCESS数)を示す。太線は日付が変わることを表す。試行回数を重ねるにつれて成功数が減少していくよう見える。また、オペレータ ME は、特にファジイ同定の成功数が少ない。

図12は、表1を棒グラフ表示したものであり、人間オペレータ ST(白)、AT(黒)について試行日ごとに最小二乗法で近似直線を引き、日付が変わることにそれぞれ白と黒の幅の狭い棒状の直線をy軸方向に引いてみた。一日のうちの近似直線はいずれも右肩下がりになり、試行を重ねて習熟度が増すにつれて、ファジイ同定の成功数が減少していく。これは無秩序さの程度が小さくなり、運動の自由度が増えると、ファジイ同定が困難になることを示す。

5.2 ニューロ制御器による習熟度の同定についての考察

人間オペレータ FTの場合、2回目～10回目の試行のニューロ同定には成功したが、1回目の試行の同定には失敗した。1回目の試行の波形は、2回目以降の試行に比べて、動きが大きく、習熟度の高い動きには見えない。総エントロピの割合の解析結果は、2回目以降の試行ではすでに無秩序さの程度がかなり低く、試行を重ねても顕著には低減しない。人間オペレータ MEの試行3回目と10回目についてはニューロ制御器により学習できなかったが、人間オペレータ STについては、10回すべての試行について学習できた。

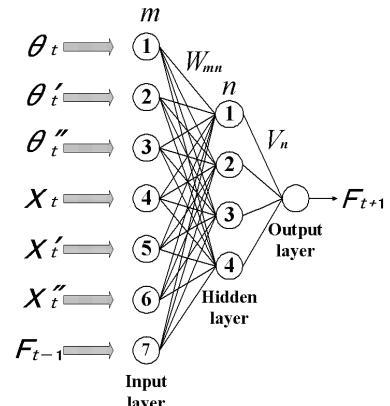


Fig.8 Multilayer feedforward Neural network for identification.

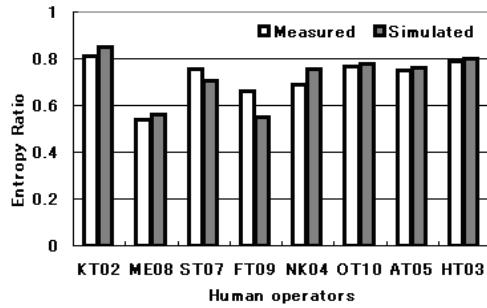


Fig.10 Entropy Ratios of 8 Human Operators comparing the simulated with an identified Neural controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

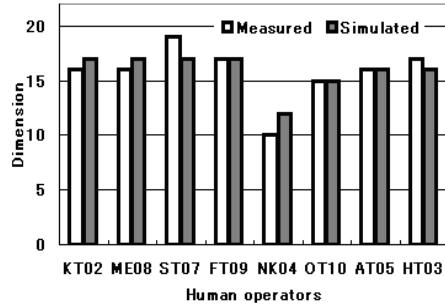
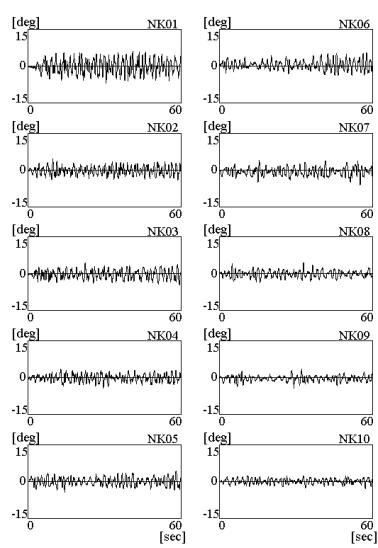


Fig.11 Estimated Dimension (Degree of Freedom) of 8 Human Operators comparing the simulated with an identified Neural controller and the measured resembling in appearance of wave forms.

Table 1 Number of success in identification of stabilizing control using Fuzzy controller.

	ME	ST	AT
01	0	129	32
02	2	60	503
03	0	524	221
04	0	86	11
05	0	0	11
06	0	252	105
07	0	4	0
08	0	2	5
09	0	0	0
10	0	133	2



(a) Measured

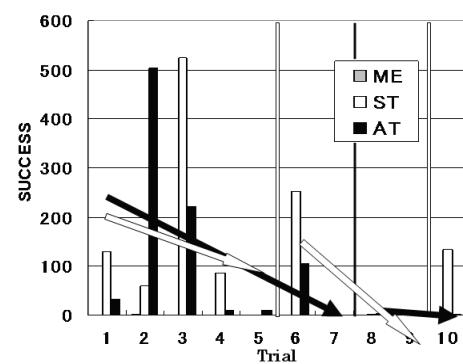


Fig.12 Trials vs. number of success in identification of stabilizing control using Fuzzy controllers.

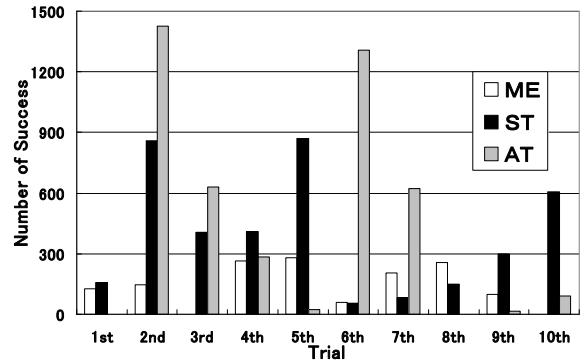
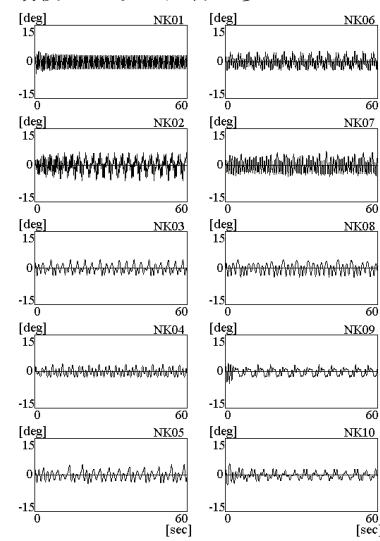


Fig.13 Number of success in identifications of Human Operators ME, ST and AT with neural controllers.

人間オペレータFTとME,KT,OTは、ある程度習熟してから試行1回目から10回目までを1日で行い、人間オペレータATは1回目から7回目までと8回目から10回目までを別の日に行っている。人間オペレータSTは1～5回目と6～9回目、10回目を、HTは1～5回目と6～10回目、NKは1～4回目と5～7回目、8～10回目のように2～3日に分けて試行している。図13は、試行者ME,ST,ATの試行回数ごとのニューラル学習の成功数を示す。ニューラル学習は、その日の初めの試行つまり習熟度が低いと考えられる試行の学習に失敗が多い。

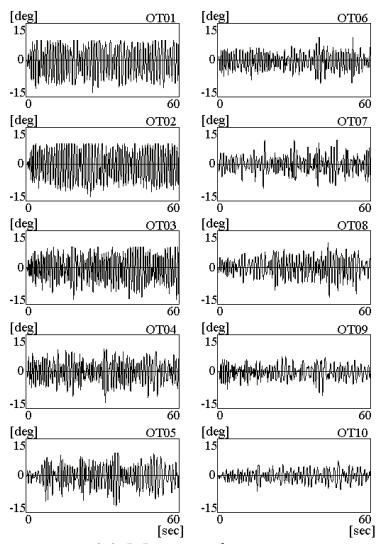
5.3 同定器としてのファジイ制御とニューラル制御の比較

ニューラル制御器による同定が失敗したデータは、試行1回目や翌日の試行1回目であった。一方、ファジイ制御器による同定が失敗したのは習熟度の高い試行10回目や試行した日の最後のほうの試行が多かった。したがって、ニューラル

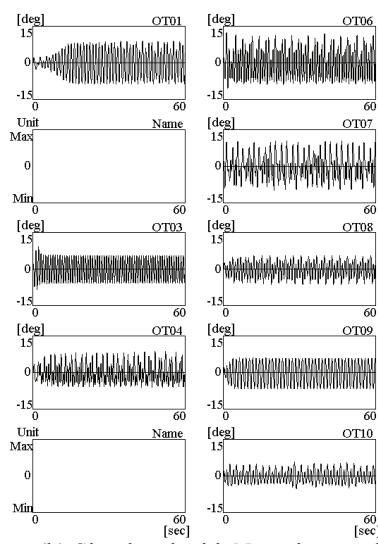


(b) Simulated with Neural controller

Fig.14 Proficiency of Operator NK from 1st (NK01) to 10th trial (NK10) (Measured and the Neural control simulations).

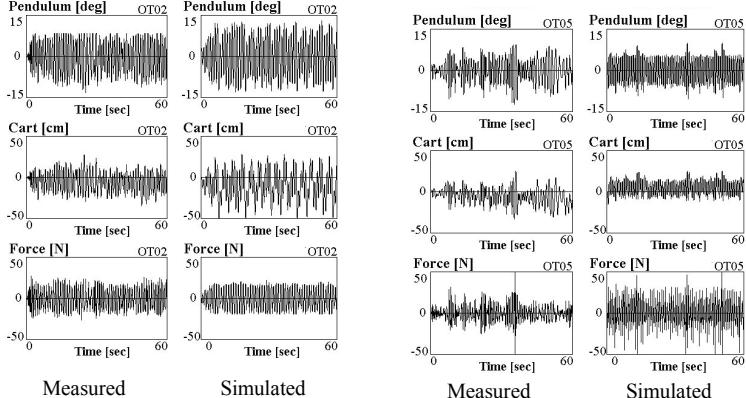


(a) Measured



(b) Simulated with Neural controller

Fig.15 Proficiency of Operator OT from 1st (OT01) to 10th trial (OT10) (Measured and the Neural control simulations).



(a) Human Operator OT's 2nd trial

Fig.16 Simulated waveform using identified Fuzzy controller vs. measured waveform.

制御器は習熟度が高い方が同定しやすく、ファジィ制御器は習熟度の低い方が同定しやすい。また、ニューロ制御器およびファジィ制御器の両方とも同定に失敗した試行 ME03, ME10, HT04 については、オペレータ ME は試行者の習熟度がかなり高く、シンプルなニューロ制御およびファジィ制御での学習が困難だったものと考えられる。さらに、人間オペレータ HT の 4 回目の試行は、実験において 60 秒間の最後に倒立振子が転倒したためだと考えられる。

図 14 は、人間オペレータ NK の 1 回目～10 回目までの試行における振子角度の実測波形とニューロ制御シミュレーションの結果である。すべての試行についてシミュレーションでも安定化制御に成功している。図 15 は、人間オペレータ OT の場合であり、2 回目と 5 回目の試行については、ニューロ制御器による同定ができない。図 16 は、オペレータ OT の 2 回目と 5 回目の試行についてのファジイ制御器による安定化制御の結果であり、この場合のように習熟の余地のある制御挙動についてはファジイ制御による同定が適していることを示している。

6. 結論

不安定系の安定化操作における人間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ニューロ制御器が有用であることをカオス・エントロピ解析により明確にし、ファジイ制御器は習熟の初期段階の同定に適しており、ニューロ制御器は習熟のレベルが高い段階の同定に適していることを示した。

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., Uchiyama, K. and Kaise, Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Neural Controller, *Journal of System Design and Dynamics, Japanese Society of Mechanical Engineers*, Vol.2, No.6 (2008), pp.1351-1363.
 - (4) 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.1412- 1420. (in Japanese)
 - (5) 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, *Journal of System Design and Dynamics, Japanese Society of Mechanical Engineers*, Vol.3, No.6, (2009), pp.932-943.
 - (6) Kawazoe, Y., Ishikawa, K. and Ikura, Y., Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Fuzzy Controller, *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.76, No.765, (2010), pp.1362- 1371. (in Japanese)