論文

ファジィ論理と GA による三重倒立振子の マン・マシン共同操作システム[†]

増井 重弘^{*1} 寺野 寿郎^{*2} 井田 博哉^{*3}

現代の自動制御は人間にはできないような高度な作業ができる反面、人間なら行える作業ができない欠陥も持っている。ここで対象とした三重倒立振子の制御は仮想的な作業であるが、人間の操作負担を軽減させるとともに不安定制御系の制御機能を向上させる事ができるマン・マシンシステム開発の方法論として提案する。人間が制御困難な三重倒立振子のように非常に不安定な系の制御を対象としたファジィコントローラの完全な設計は大変困難である。従って、この手動制御の結果から簡単なファジィコントローラを設計した。また、大変な労力を要するファジィコントローラのチューニングを自動的に行うため、メンバーシップ関数の設定を GA により行う。GA の適用はメンバーシップ関数の設定が容易にでき制御能力も向上して有効である。更に制御能力の向上とロバスト性をあげるため、この簡単なファジィコントローラと人間によるマン・マシン共同操作システムを構築した。このマン・マシン共同操作システムは、熟練者単独でも制御不可能な不安定系の範囲を容易に制御可能とした。また、本システムは初心者でも制御ができる利点がある。

キーワード：マン・マシン共同操作、ファジィ制御、不安定系の制御、遺伝的アルゴリズム (GA)

1. まえがき

現代の自動制御は人間にはできないような高度な作業ができる反面、人間なら簡単に行える作業ができない欠陥も持っている。この種の作業の完全自動化は非常に難しく、むしろ人間と機械が共同して行えば簡単なシステムで人間の負担を大幅に軽減することができる。本研究は、対象とした三重倒立振子の制御としては仮想的な作業であるが、人間の操作負担を軽減するとともに不安定系の制御機能を向上させるマン・マシンシステム開発の方法論として提案する。

従来のマン・マシンシステムの研究のほとんどは、人間が知的センサーや判断の役割としてコントローラを制御し制御操作量はコントローラ自身が人間の指示によって出力している⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。我々は制御系コントローラ自身の制御操作量に人間が直接介入することにより制御能力を向上させるシステムを構築する。

ファジィコントローラは一般に人間(熟練者)の行動に基づいて設計されている。従って人間が制御操作に苦勞するような非常に不安定な系の制御などを対象としたファジィコントローラの設計は大変難しい。熟練者のもつその定性的なルールを言葉や記号により表現

する場合、表現可能な要素は非常に制限されたものになってしまうからである。

それ故に、三重倒立振子のような非常に不安定な制御対象の場合は、全自動ファジィコントローラをめざさないで、人間と簡単なファジィコントローラとの共同操作により初心者でも容易に制御できるマン・マシンシステムを構築することを目的とした。

三重倒立振子の制御を人間の操作のみでは制御限界が、仮想空間(重力加速度 $g/5$ 、振り長 $100[m]$)であるのに対し、人間とコントローラの共同操作では現実の重力加速度でも制御を可能とした。しかし、振り長を短くしたり、人間の操作負担を減らすためには、さらに優れたファジィコントローラが必要とされる。

それには、制御規則やメンバーシップ関数を修正してコントローラを最適なものに改良してゆくのであるが、このようなチューニングを試行錯誤で行うことは大変な労力を要する。メンバーシップ関数をどのように選択するかだけでも、大変自由度の大きいものとなるからである。

そこで、ファジィコントローラのチューニングを自動的に行うために、最適化問題に適した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を利用したシステムを設計する。制御規則は手動制御から抽出されたものが最適であるとし、メンバーシップ関数の設定のみを GA により行いファジィコントローラを改良する。

コントローラが改良されると共同操作システムは熟練者の操作のみでは制御不可能な制御を初心者でもより容易に制御することができるシステムとなる。またこのシステムはファジィコントローラと熟練者との共

[†] Man-Machine Co-operation System for Triple Inverted Pendulum by Fuzzy Logic and Genetic Algorithm
Shigehiro MASUI, Toshiro TERANO and Hiroya IDA

^{*1} 法政大学工学部システム制御工学科
Department of System and Control Engineering, Faculty of Engineering, Hosei University

^{*2} 東京工業大学 名誉教授

^{*3} NTT コミュニケーションウェア(株)

NTT Communication Ware Co.

同操作のときは改良されたファジィコントローラが熟練者の負担をより軽減し制御能力も向上する。

2. 制御対象

制御対象は図1に示すような三重倒立振子である。

この図において u [m] は操作端である台車の水平位置を示す。 ξ [rad]、 ϕ [rad]、 θ [rad] はそれぞれ第1、第2、第3振子の傾斜角度である。また次のように仮定を設ける。

- (1) 3つの振子は同形で、質量はそれぞれ頭部に集中しており腕と台車の質量は無視できる。
- (2) 軸受部の摩擦はない。
- (3) 垂直方向からの角度変位は微小である。
- (4) 操作部に遅れはない。

θ を制御量に、 u を操作量に選ぶと、対象の動特性は式に示すような微分方程式によって近似される。

$$\begin{aligned} \theta^{(6)} - 9A\theta^{(4)} + 18A^2\ddot{\theta} - 6A^3\dot{\theta} \\ = -6A^2\ddot{u}/L \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 L ：各振子の長さ[m]、 g ：重力加速度[m/s²]、 A ： g/L [1/s²]である。

制御対象はパソコン上のシミュレーションにより、その動きを表現し、振子長 L [m] を変化させることで実験を行った。実験は第3振子のみわずかに傾けた状態 (0.001 [rad]) から始めて、ディスプレイ上に表現される情報を見ながら、キーボードを操作してシステムを安定に保つように要求される。キーボードは数段階の大きさのステップ関数を発生するもので、ここでは $\ddot{u}$ を操作することによりシステムを制御する。一方、表示情報としては振子の動きをそのまま実態表示しても人間は操作をどのようにするべきかを判断できないので、振子の傾斜角度、角速度、角加速度を時間軸に対して表示した。

図1 制御対象

3. 手動制御

三重倒立振子の手動制御は、たとえシュミレーションとはいえ安定に制御できるようになるためには被験者にもよるが60時間前後の練習を要する。状態変数は、それぞれの振子の角度 (θ 、 ϕ 、 ξ)、角速度 ($\dot{\theta}$ 、 $\dot{\phi}$ 、 $\dot{\xi}$)、角加速度 ($\ddot{\theta}$ 、 $\ddot{\phi}$ 、 $\ddot{\xi}$) をとる。CRT に表示される情報は、はじめは9変数 θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ 、 ϕ 、 $\dot{\phi}$ 、 $\ddot{\phi}$ 、 ξ 、 $\dot{\xi}$ 、 $\ddot{\xi}$ の一定時間後の予測値 (2秒後) を用い、時間軸経過表示として表示する。不安定系の手動制御において、予測値と時間軸経過表示が有効であることは知られている⁽⁴⁾。

8人の被験者に、はじめは、振子長100[m]、重力の加速度 $g=1/50$ という緩い条件で行ってもらい、徐々に g を大きくして厳しい条件にして手動制御を行ってもらった。被験者は、手動制御を行う場合、始めは9変数の情報の関係がわからず発散させてしまうが、それを繰り返すことにより必要な情報の把握が的確になって行き、より無駄のない操作をすることで適切な制御を行うことができた。すなわち、熟練者となった被験者全員の見解によると人間は9変数すべてを見ながら操作することは不可能であり、必要な情報として、 θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ のみで制御しているということである。図2は、熟練者に必要な4変数のみを表示した人間の制御限界 (振子長100[m]、重力加速度 $g=1/5$) における手動制御結果を示す。熟練者は無意識下で操作しているので、聞き取り調査には限界がある⁽⁵⁾。そこで、熟練者全員の制御結果のデータを9変数すべて表示したり、振子の実際の動きを表示して検討した結果⁽⁶⁾、操作のタイミングは人により多少異なっているが、制御方策は同じであった。聞き取り調査と検討結果により以下の制御ルールを抽出した。

- (1) θ と $\dot{\theta}$ の状態により操作ルールが変わる。 θ と $\dot{\theta}$ が

図2 熟練者の手動制御結果

同符号の場合は、 θ を $\dot{\theta}$ と異符号になるように操作し、 θ と $\dot{\theta}$ が異符号の場合は偏差がゼロに徐々に近づくように操作する。

(2) θ と $\dot{\theta}$ を制御するための $\ddot{\theta}$ を、 $\ddot{\phi}$ を用いて操作する。 $\ddot{\phi}$ を細かく操作して $\ddot{\theta}$ を徐々に制御する。4変数で操作できる理由は、 ξ 、 $\dot{\xi}$ は操作量 u の状態に直結して計算された値を表示しているの、この表示される内容は操作感覚で把握できる。 ξ は $\ddot{\phi}$ と逆の動きの状態が表示されるので $\ddot{\phi}$ の状態を見て操作すれば ξ を操作できるし、また $\ddot{\phi}$ は三重倒立振子の手動制御ルールにより θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ で制御できる。

4. ファジィコントローラ

手動制御結果から、熟練者は θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ 、 $\ddot{\phi}$ の4情報のみ利用し、これら4変数の偏差が正か負を見ながら状態が安定な方向に向かっているか否かを判断して操作量を決め、制御ルールを切り替えている。この制御方策に基づいて図3に示すようなファジィコントローラの構造を決定した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

上位ルールは状態の正、負による大まかな判断をするものであり、下位ルールが操作量を決めるものである。Rule 1は全体を大まかに不安定モードと安定モードに分ける。 θ と $\dot{\theta}$ が同符号なら不安定モード内 Rule2へ異符号なら安定モード内 Rule 3へ移る。Rule 2では $\dot{\theta}$ と $\ddot{\theta}$ の関係について判断する。Control 1とControl 2は $\ddot{\theta}$ と $\ddot{\phi}$ の関係から θ をコントロールするために必要なファジィルールである。安定モード内におけるRule 3は θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ 、 $\ddot{\phi}$ がある一定の値に収まるときは、系をあまり乱さないようなコントロールへの切

り替えである。Control 3~Control 5は θ と $\dot{\theta}$ が異符号の時 θ の偏差は比較的減少しやすい。ここでは3振子を垂直に維持するに必要ファジィルールである。

各コントロールルールの一列を表1に示す。それらルールのメンバーシップ関数を図4に示す。図において、

表1 ファジィルールの一例(Control 2,3)

Control 2	
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = PB$
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = PM$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = NM$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = NB$

Control 3	
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = NS$
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = PM$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = PS$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = NS$
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = PS$
If $\theta = P$ and $\dot{\theta} = N$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = NS$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = P$ and $\ddot{\phi} = P$	Then $\ddot{u} = NM$
If $\theta = N$ and $\dot{\theta} = P$ and $\ddot{\theta} = N$ and $\ddot{\phi} = N$	Then $\ddot{u} = PS$

不安定モード

安定モード

スイッチングルール（上位ルール）

Rule 1 : If ($\theta > 0$ and $\dot{\theta} > 0$) or ($\theta < 0$ and $\dot{\theta} < 0$)
Then Rule 2 else Rule 3

Rule 2 : If ($\dot{\theta} > 0$ and $\ddot{\theta} > 0$) or ($\dot{\theta} < 0$ and $\ddot{\theta} < 0$)
Then Control 1 else Control 2

Rule 3 : If $|\theta| < A1$ and $|\dot{\theta}| < B1$ and $|\ddot{\theta}| < C$ and $|\ddot{\phi}| < D$
Then Control 5 else Rule 4

Rule 4 : If $|\theta| < A2$ and $|\dot{\theta}| < B2$
Then Control 3 else Control 4

A, B, C, D : Constants

図3 ファジィコントローラの構成

a,b,c,d:メンバーシップ関数の1または0になるポイント

図4 メンバシップ関数の一例

前件部は、熟練者が定性的に正負を判断して操作していることとコントローラの簡略化を計るため正負のみのメンバーシップ関数とした。また前件部のメンバーシップ関数の形を Type 1~Type 4 までの形に変えて設定する。ファジィコントローラはロバスト性に優れるといわれているが、三重倒立振子のように非常に不安定な系ともなると制御可能な範囲は非常に狭くなる。したがって、メンバーシップ関数の形やスケールは実験条件によって変える必要がある。レンジの端点は実験条件である振り長に基いて定め、ブレイクポイント(頂点)は4変数に重視度(優先度)を持たせるために Type 1~Type 3 のような台形型に設定する。その理由は熟練者が4変数の状態変化に対応して重要視する変数を把握して操作しておりその特徴をメンバーシップ関数が1になるポイントをずらすことによりコントローラに取り入れるためである。すなわち、Control 1,2 においては $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ の重視度を θ , $\dot{\theta}$ に比べ大きくするためであり、安定モード内の Control 3~5 においては θ はあまり重要視せず、 $\ddot{\phi}$ の重視度を $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ に比べて大きくするためである。

このファジィコントローラによる制御限界(重力加速度 $g=1$ 、振り長70[m])での三重倒立振子の制御結果を図5に示す。ここでのメンバーシップ関数等の設定、修正によるコントローラのチューニングは試行錯誤に行いかなりの時間を費やした。しかし、少しでも振り長を短くした場合、このコントローラでは制御不可能となってしまう。

この三重倒立振子におけるファジィコントローラをより優れたものにするには、上位ルールにおいてより複雑な切り替え、さらに下位ルールにおいてメンバーシップ関数の設定の見直しが必要とされる。

図5 ファジィコントローラの制御結果

5. 遺伝的アルゴリズムの適用と制御結果

GA は遺伝子情報を含む染色体の表現の仕方を変えることにより、数種類のパラメーターを同時に最適化可能であり、任意の評価関数に対して適用可能である⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

本研究では、メンバーシップ関数の設定に GA を適用し、ファジィコントローラのチューニングを行う。前件部 θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ の4つのメンバーシップ関数をまとめて1染色体とする。それぞれのメンバーシップ関数を遺伝子として、ファジィコントローラの下位ルールにおける Control 1~5 は各コントロール部毎に50個の染色体を用いている。染色体は16列の乱数列で現わし、左から4列ずつをそれぞれ θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ の4つのメンバーシップ関数に対応させて表現型とする。またそれぞれに割り当てられた4列のうち最初の1列はメンバーシップ関数の形である Type 1~Type 4 を表し残りの3列はスケールに対応させる。従って染色体の第1、第5、第9、第13列目は1~4の間での乱数を発生することとなる。その他の列には0~9までの乱数を発生させる。また、4つのメンバーシップ関数をまとめて1つの染色体とすることで、GA の進化を経ても θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}$ の相互関係が崩れないコントローラが生成され则认为られる。全てのコントローラ部においてこのように染色体をコーディングする。ファジィコントローラは上位ルールでコントローラを切り替えた上に、さらに複雑にコントロールの切り替えを行っている。今回は、ファジィルール(表.1)については GA を適用していない。GA によるチューニングの流れは以下のように行う。(1) 初期生物集団として、いくつかの染色体をファジィコントローラに与える。今回はランダム発生でなく、これまで試行錯誤に実験を行ってきて、比較的良い制御結果が得られたものを初期生物集団とした。

図6 遺伝子情報の表現法

- (2) ファジィコントローラを用いてシミュレーションを行い、評価基準に基づく適応度を求める。
- (3) 適応度に基づいて淘汰を行う。
- (4) 生き残った個体を増殖する。交差、突然変異を行うことにより新しい個体を生成する。
- (5) 満足する結果が得られるまで、(2)～(4)を繰り返す。

次に実際 GA をどのように適用していくか述べる。

(1) 遺伝子の表現

上記で述べたように、前件部4つを合わせて1染色体とするわけであるが、図6のようにメンバーシップ関数の端点を実数値で表し、それを遺伝子情報とする。

(2) 個体の評価

n 個の個体の順番で染色体にセットされている遺伝子情報から図6の対応に従いメンバーシップ関数を決定する。図中の Type 2、Type 3は前述の「4. ファジィコントローラ」で説明したメンバーシップ関数の形の意味を表現している。以上を全てのコントロール部に対して行い、一つのファジィコントローラとして三重倒立振子シミュレーションを行う。シミュレーションは第3振子を直立状態に保つことが目標であるから、 θ の制御誤差が小さいほど評価値が高くなるように(2)式でコントロール部別に適応度を計算する。なお(2)式は最大値が1となるように正規化してある。

$$\text{適応度} = 1 - \frac{\sum |\theta_i|}{\{(\text{制御限界角度}) \times (\text{サンプリング数})\}} \quad (2)$$

一回のシミュレーションでコントロール部別に適応度が5つ算出されるわけだから、ここでいうサンプリング数というのは、コントロール部の一つがシミュレーション中どれだけ作動したかという時間となる。従って θ_i はそのコントロール部によって制御された第一振子の角度偏差となる。制御限界角度は0.05[rad]とした。

図7はファジィコントローラのチューニングに GA を適用したときの概念図を示す。この図は、GA による個体の進化を行うモジュール、個体の評価を行うモジュールからなる。GA モジュールは、評価モジュールから与えられた評価値に基づき、メンバーシップ関数情報(染色体)を持った個体の淘汰を行い次世代に個体を継承する。評価モジュールは GA モジュールから渡された集団に属する全ての個体の評価値を三重倒立振子シミュレーションにより算出する。この2つの手続きを繰り返し行い、最終的に評価値の最も高い個体を発生する。ファジィコントローラ自動チューニングにおいて、遺伝的アルゴリズム適用のために与えた実験条件は以下の如くである。

図7 遺伝的アルゴリズムの説明図

個体数は、一つのコントロール部に与える数は50個体とした。コントロール部は5つあるので総個体数は250個である。1回のシミュレーションは5つのコントロール部全てがそろい、各コントロール部において第 n 番目の個体が全てセットされて、1回のシミュレーションが行われる。この後、次世代生成のための交差等が行われる。交差法は2点交差で交差率は80%とする。これは各コントロール部において50個体に適応度が算出されるうちの10個体はそのまま次世代に残し、残り80%の40個体を交差により新しい個体を発生させる。また交差の際0.05%の確立で個体に突然変異も起こしておく。突然変異は染色体のランダムな位置を乱数によって書き換える。このような世代交代を120回行う。

図8は Control 3における適応度変化を表している。適応度は、はじめは0.5以下であったが100である世代交代付近でほぼ1.0に達している。

図8 Control 3 における適応度変化

GA によりチューニングされた制御結果を図9 に示す。この図は振子長30[m]初期値 $\theta=0.001[\text{rad}]$ としたときの制御結果である。この制御結果はほぼ安定状態に保つことができる結果が得られた。メンバーシップ関数の設定を試行錯誤で行いかなりの時間と苦勞を費やした制御結果は振子長70[m]が限界であったが、ここでは遺伝的アルゴリズムにメンバーシップ関数の設定を行わせたため短時間で能率的な設定ができた。また人間の手動制御の限界を越えるという点では、予想以上に良い結果が得られ、遺伝的アルゴリズムの適用は有効であるといえる。GA を用いた制御実験は、この後さらに振子長を短くして行ってみたが、良い制御結果は得られなかった。もともと熟練者の行動に基づいた4変数のみの少ない情報で構築した簡単なファジィコントローラであるから、このファジィコントローラでの制御は振子長30[m]程度が限界であろう。しかしながら、このように少ない情報による設計でも熟練者の制御能力を大きく越える制御が可能となることは、ファジィコントローラの面白いところである。

6. マン・マシン共同操作システム

三重倒立振子の制御を更に向上させると共に初心者でも容易に制御可能な、マン・マシン共同操作システムを構築する⁽¹²⁾。

図10は三重倒立振子のマン・マシン共同操作システムの構造を示す。図10に示すように、ファジィコントローラと人間をカスケードにつなぐことで、人間がファジィコントローラに介入するシステムである。人間の役割は、状態認識力、過去の経験に基づく推論ができるなどファジィコントローラにはない特徴を活かし、三重倒立振子の動きを予測した早めの入力をし、ロバスト性の優れた制御を可能にすることである。マン・マシンシステムのインターフェイスは手動制御のみと同様に振子の動きに予測値を持たせた時間軸経過表示とする。また人間のミス操作をカットする Fool Proof を設ける。表2は Fool Proof のカットルールを示す。この Fool Proof の機能表示に関しては人間側の正しい操作入力のみを CRT 上に表示している。これは自分の操作入力振子の制御にどのような影響を与えているか知る必要があるからである。しかしながら人間の操作入力に制限を加えているにもかかわらずカットルールによりカットされたミス操作入力を CRT 上に表示していない。この理由は、被験者には4変数をほぼ同時に見ながら迅速な操作が要求されミス操作まで見る時間的余裕がないからである。また初心者はミス操作が非常に多く、操作ミスの表示をしても学習効果は

振子長30[m]、初期値 $\theta=0.001[\text{rad}]$ のとき

図9 GA によるファジィコントローラの制御結果

図10 マン・マシン共同操作システムのブロックダイアグラム

表2 Fool Proof のカットルール
(Switch off となるときのみ)

P : Positive N : Negative				Operator Input	Switch
θ	$\dot{\theta}$	$\ddot{\theta}$	$\ddot{\phi}$		
+	+	+	+	$N4$	off
-	-	-	-	$P4$	off
+	+	+	-	$N3, N4$	off
-	-	-	+	$P3, P4$	off
+	+	-	+	$P3, P4$	off
-	-	+	-	$N3, N4$	off
+	+	-	-	$N4$	off
-	-	+	+	$P4$	off

∴ 正負に各 4 レベルにある操作量のうち
例えば $P4$ は Positive Level 4 を示す。

少ない。むしろ表示されている4変数との状態関係による第2章に記述した制御ルール(1)(2)の簡単な制御方を教えておいて試行経験による操作学習をさせる方が有効である。熟練者はミス操作がほとんど無くミス操作しても瞬間的に自覚しているからミス操作の表示は必要ないと考えられる。

図11は振子長30[m]、初期値 $\theta=0.003[\text{rad}]$ のときの熟練者の介入によるマン・マシン共同操作システムの制御結果である。このような初期値の大きいときの制御は、ファジィコントローラ単独、熟練者単独では過剰操作となり制御不可能である。しかし、図示の如く、マン・マシン共同操作システムの制御は人間と機械のそれぞれの利点がうまく融合し、お互いの欠点をカバーして良好な制御結果である。また、人間の操作量は非常に少なくなり人間にとって大幅な操作負担の軽減となる。図12は、振子長70[m]、初期値 $\theta=0.001[\text{rad}]$ の条件でマン・マシン共同操作システムによる初心者の制御結果である。振子長が短かいにもかかわらず、10人すべての初心者は簡単な制御方策をある程度教えてもらった後数回の練習により図示する如く良好な制御を行うことができた。なお、初心者用のファジィコントローラはマン・マシン共同操作システムの有効性を確認するためメンバシップ関数の値を少し変えてコントローラ単独では制御できないようにしてある。

このマン・マシン共同操作システムはファジィコントローラの出力に対し人間が安定制御のための操作量を補い適正な制御操作量を出力するシステムである。熟練者が意図的に制御困難な状態に遷移するように過剰操作しても、多少制御系は不安定状態となるが制御

困難な状態になる前に Fool Proof のカットルールにより過剰操作はミス操作としてカットされる。そしてわずかな安定状態ならばファジィコントローラが制御するしファジィコントローラのみでは制御できない場合は熟練者が操作介入して安定に制御する。この場合、熟練者が操作介入しなければ時間の経過につれて制御困難と考えられる状態に遷移して行くが、第3振子の傾斜速度が早くなければすなわち $\dot{\theta}$ の値が大きくなければ熟練者の操作介入により制御できる。しかし角速度 $\dot{\theta}$ の値が $0.0007[\text{rad/s}]$ 以上になると第2振子の角加速度 $\ddot{\phi}$ のイン칭ング操作による角加速度 $\ddot{\theta}$ での角速度 $\dot{\theta}$ の制御では熟練者が操作介入しても角速度 $\dot{\theta}$ が速すぎて追従できず制御不可能となり倒れてしまう。三重倒立振子を制御している時の制御可能な限界は第3振子の角度 θ ではなく角速度 $\dot{\theta}$ で決まることは現実の三重倒立振子の制御を予想しても妥当であろう。このマン・マシン共同操作システムにおける図5の条件での制御対象の制御可能な限界は $\dot{\theta}$ が $0.0007[\text{rad/s}]$ 以下である。

このマン・マシン共同操作システムの評価は被験者の意見に基づいて行った。熟練者は手動制御のみの操作では $g=1/5$ の仮想空間でも4個の状態変数を見ながら判断し絶えず素早い動作をしなければならず、しかも1回の操作ミスでも安定化が困難であり、疲労が激しく集中力が維持できず長い時間の操作は無理である。一方、マン・マシン共同操作システムとの操作では手動制御のみでは絶対不可能な倒立振子の状態でも、ほとんどの操作はコントローラが行っているので4個の状態変数もさほど集中して見なくてもよく操作も少なくすみ操作ミスもカットされるので非常に楽であり

図11 マン・マシン共同操作システムの制御結果
(熟練者: 振子長30[m] 初期値 $\theta=0.003[\text{rad}]$)

図12 マン・マシン共同操作システムの制御結果
(初心者: 振子長70[m] 初期値 $\theta=0.001[\text{rad}]$)

長時間でも操作できる。初心者は手動制御のみの操作では $g=1/50$ の仮想空間でも状態変数の判断遅れや操作遅れ、操作ミスで10秒程で安定化できなくなるが、マン・マシン共同操作システムとの操作では、多少の操作遅れはその間コントローラが操作しているので十分修正でき、操作ミスもカットされるので数回訓練すれば安定化して制御できる。

7. むすび

非常に不安定な系のファジィコントローラ的设计は大変難しい。これまで試行錯誤で行っていたメンバーシップ関数設定にあたり、遺伝的アルゴリズムの適用は設定が容易にでき制御能力も向上して有効な手段である。ファジィルールは熟練者からの情報が少ないので同定が困難であるため、簡単なファジィコントローラしか設計できない。更に制御能力の向上とロバスト性をあげるため、全自動ファジィコントローラではなく、簡単なファジィコントローラによるマン・マシン共同操作システムを構築した。このマン・マシン共同操作システムは、熟練者単独、ファジィコントローラ単独でも制御不可能な不安定系を容易に制御可能とした。また、本システムは初心者でも制御ができる利点がある。今後、このようなシステムが各分野で応用されることを期待する。

参 考 文 献

- (1) 藤澤、福田、小菅、新井、室、他：「マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究」、電気学会論文誌C, Vol.115-C, No.10, p115/119(1995)
- (2) 三宅美博、多賀厳太郎、山口陽子、清水博、「自律分散ロボットにおけるリズムの相互引込みを用いた「場」的制御—予測できない環境下での協調的システム制御に向けて」、ロボットシンポジウム、日本ロボット学会、1994
- (3) 菅野道夫「言語による複雑なシステムの制御—半自律無人ヘリコプター」、国際ファジィ工学研究所研究報告書、ファジィ思考による知的情報処理、p465/483(1995)
- (4) 増井重弘・寺野寿郎・菅谷善昌：「不安定系の手動制御における予測効果」、電気学会論文誌、Vol.100-C, No.2, P79/85 (1990)
- (5) J. Rasmussen: "Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinction in Human Performance Models", IEEE Trans. of System Man and Cybernetics, Vol. SMC-13, No.3, p257/266(1983)
- (6) 増井重弘、寺野寿郎、菅谷善昌：「不安定系の手動制御におけるファジィルールの同定」、電気学会論文誌、Vol.111-C, No.2, p75/82 (1991)
- (7) T. Terano, S. Masui, K. Tanaka and Y. Murayama: "Manual Control of Intrinsically Unstable System and Its Modeling by Fuzzy Logic", Information Science, Vol.45, p249/273 (1988)
- (8) 北野宏明、「遺伝的アルゴリズム2」、産業図書(1995)
- (9) S. Tsutsui and Y. Fujimoto: "Forking Genetic Algorithm with Blocking and Shrinking Modes", Proc. of the Fifth ICGA, p206/213(1993)
- (10) 高濱徹行・宮本誠司・「遺伝的アルゴリズムによるファジィ制御の学習」8th Fuzzy Symposium 講演論文集、p.241~244(1992)
- (11) 安居院・長尾：「ジェネティックアルゴリズム」、昭晃堂(1993)
- (12) S. Masui, T. Terano, K. Ohshima: "Man-Machine System for Controlling Triple Inverted Pendulum", Proc. of the Fifth International Fuzzy Systems Association World Congress, p1289/1292(1993)

(1999年3月 2日 受 付)
(1999年8月 4日 再 受 付)
(1999年9月14日 再々受付)

[問い合わせ先]

〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2

法政大学工学部システム制御工学科

増井 重弘

TEL : 042(387)6249

FAX : 042(387)6123

E-mail : masui@k.hosei.ac.jp

著 者 紹 介

増井 重弘 (ますい しげひろ)

法政大学工学部システム制御工学科

昭和37年 工学院大学電子工学コース卒業。昭和39年 工学院大学助手、昭和41年 法政大学付属工業高校教諭、昭和60年 法政大学工学部講師、平成5年 助教授現在に至る。弁理士。工学博士。ファジィシステムに関する研究に従事。電気学会、計測自動制御学会、電子通信情報学会会員。日本ファジィ学会会員。

寺野 寿郎 (てらの としろう)

東京工業大学 名誉教授

昭和20年 東京大学第二工学部卒業、運輸省技術研究所技官、東京工業大学教授、平成4年 法政大学教授退任。専攻、制御工学、システム工学、あいまい工学。主著「システム工学入門」、「システム工学の手法」、「あいまい工学のすすめ」、「ボイラの自動制御」、「機械設計システム」、「ファジィシステム入門」、「応用ファジィシステム入門」、など。東京工業大学名誉教授。工学博士。IFSA 元会長。日本ファジィ学会名誉会員。

井田 博哉 (いだ ひろや)

NTT コミュニケーションウェア(株)

平成6年 法政大学工学部電気工学科計測制御専攻卒業、平成8年 法政大学工学部大学院システム学専攻卒業、平成8年 NTT(株)ソフトウェア本部へ入社、平成9年 NTT コミュニケーションウェア(株)へ出向現在に至る。ネットワークオペレーションシステムの開発に従事。

Man-Machine Co-operation System for Triple Inverted Pendulum by Fuzzy Logic and Genetic Algorithm

by

Shigehiro MASUI, Toshiro TERANO and Hiroya IDA

Abstract :

Fuzzy control is very popular at present, but the application field of fuzzy system will be wider if design not only automatic system but also man-machine system. We have studied fuzzy control systems which kept stable a triple inverted pendulum. However, the identification of control rules is so difficult and also their membership functions are so sensitive that their design is not easy. We suggest, in this paper, a man-machine cooperating system where a beginner operator can manipulate easily a triple inverted pendulum assisted by a simple fuzzy controller. We adopt a method to tune the membership function of the fuzzy controller by using genetic algorithm. This tuning create good membership function. As the result, this man-machine cooperation system is that ever a beginner operator can keep stable the triple inverted pendulum. And also, this system improves control performance for the triple inverted pendulum with skilled operator and fuzzy controller.

Keywords : Man-machine Co-operation, Fuzzy Controller, Unstable Object, Genetic Algorithm

Contact Address : **Shigehiro MASUI**

Faculty of Engineering, Hosei University

3-7-2, *Kajino-cho, Koganei, Tokyo* 184-8584 Japan

TEL : 042-387-6249

FAX : 042-387-6123

E-mail : masui@k.hosei.ac.jp