ファジィ制御系の数理的解析と産業応用の 可能性について†

張 暉 敦*・荒 木 光 彦*

Mathematical Analysis of Fuzzy Control Systems and on Possibility of Industrial Applications

Sangdon JANG* and Mituhiko ARAKI*

Fuzzy control systems are analyzed from the control engineering viewpoint and possibility of their industrial applications is investigated. First, the mathematical model of a fuzzy controller which uses symmetric triangular membership functions and direct inference is derived. Then, the fuzzy control system of inverted pendulum which is often used in demonstration is analyzed, and it is shown that the pendulum falls down after a certain time. Based on the control theory, it is inferred that the pendulum will be balanced if PI element is inserted into the loop of the angle of the pendulum, and this inference is proved to be correct. The above phenomena are explained by applying linear stability theory. Lastly, possibility of industrial applications of fuzzy controllers is investigated.

Key Words: fuzzy control systems, mathematical model, inverted pendulum, stability, possibility of industrial applications

1. ま え が き

昨今、さまざまな分野でファジィ制御の応用が試みられている^{1)~3)}。ファジィ制御は、操作経験や制御対象についての知識に基づき IF-THEN 型の言語表現で制御則が与えられる点に魅力があるが、その半面、安定性や制御性能についての明確な保証がないため、産業応用にあたっては「はたして大丈夫であろうか」という不安を伴うことになる。ファジィ制御装置は制御対象から得られたデータに基づいてファジィ推論を

行い、その結果を使って操作量を定めるものであり、「入力されたデータに対して一意に定まる値を出力する」という動作をしている。これらを制御工学という立場からみれば非線形ゲインに他ならない。したがって、ファジィ制御系の挙動は、従来の制御理論で厳密に解析し評価することができるものであり、またそうされるべきものであろう。

本論文では、この観点に立った解析を進め、ファジィ制御装置を産業応用という目的に使う場合、どのような点に注意すれば十分その目的に耐えうるようになるかを検討する。まず、応用例でよく用いられる対称三角形メンバーシップ関数と直接推論を使うファジィ制御装置について、その数理モデルを導く。つぎに、その結果を用いて倒立振子のファジィ制御系を解析し、現在デモンストレーションに使われている方式では、一定時間後振子が倒れてしまうことを示す。つぎに、制御理論の立場から検討を加え、PI 補償によって振子が倒立させられるであろうことを推測し、実際その推測が正しいことを確認する。最後に、ファジィ制御装置の産業応用について若干の提言を行う。

2. ファジィ制御装置の数理モデル

ファジィ制御装置には、メンバーシップ関数の選び方および推論の仕方によって多種多様なものがある。ここでは、推論過程が簡単で、ハードウェアとして実現されているものを扱う。すなわち、入力数 2, 出力数 1 で、Table 1 のような九つのルールからなるファジィ制御装置を考える。ここに、NM, NS, ZR, PS, PM はおのおの Negative Middle, Negative Small, approximately ZeRo, Positive Small, Positive Middle の略号であり、Table 1 は x, y が各条件を満たす場合に z に割当てべき値を掲げたものである。

† 第 28 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1989・7)

* 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto
(Received November 8, 1989)

(Revised April 27, 1990)

Table 1 Rules of the fuzzy controller

$y \backslash x$	NS	ZR	PS
NS	rule 1 NM	rule 4 NS	rule 7 ZR
ZR	rule 2 NS	rule 5 ZR	rule 8 PS
PS	rule 3 ZR	rule 6 PS	rule 9 PM

ちなみに、ルール 4 は IF x is ZR and y is NS THEN z is NS というルールである。このようなルールの集合は原点へ制御量を保持する目的に使用できる。 $x \in \text{NS}(\text{ZR}, \text{PS})$, $y \in \text{NS}(\text{ZR}, \text{PS})$, $z \in \text{NM}(\text{NS}, \text{ZR}, \text{PS}, \text{PM})$ に対応するメンバーシップ関数の形は Fig. 1 (a), (b), (c) の通りとする。メンバーシップ関数についてもルールごとに番号を付け、 $f_{xi}(x)$, $f_{yi}(y)$, $f_{zi}(z)$ ($i=1, \dots, 9$) という記号で表わす。メンバーシップ関数の形を決定する a , b , c が制御装置の可調整パラメータとなる。

入力から出力 (操作量) を求める方法としては Mamdani の直接推論を使うものとする。すなわち、ルール i に対する入力 (x_o, y_o) の適合度 α_i を

$$\alpha_i = \min[f_{xi}(x_o), f_{yi}(y_o)] \quad i=1, \dots, 9 \quad (1)$$

で定義する。 α_i ($i=1, \dots, 9$) を使ってルールごとに出力 z のメンバーシップ関数をつぎのように修正する。

$$M_i(z) = \min[\alpha_i, f_{zi}(z)] \quad i=1, \dots, 9 \quad (2)$$

このルール別修正メンバーシップ関数 M_i から総合修正メンバーシップ関数 M_o を次式で定める。

$$M_o(z) = \max\{M_1(z), \dots, M_9(z)\} \quad (3)$$

最後に総合修正メンバーシップ関数 M_o の重心

$$z_o = \int z \cdot M_o(z) dz / \int M_o(z) dz \quad (4)$$

を求め、これを入力 (x_o, y_o) に対する出力とする。

以上から z_o は x_o, y_o の 2 変数関数

$$z_o = F(x_o, y_o) \quad (5)$$

になることがわかる。関数 F の形を具体的に求めるためには入力空間、すなわち x - y 平面を Fig. 2 に示した 16 個の領域に分けて考えるとよい。各領域での計算は、ほとんど同じになるので、代表例として領域 D_1 ($0 \leq x \leq a$; $0 \leq y \leq b$) での計算過程を示しておく。

Fig. 1 Membership functions

Fig. 2 Division of the input space

Fig. 3 Subdivision of D_1 's

①入力の各成分に対するメンバーシップ関数の値
領域 D_1 ではルール 5, 6, 8, 9 が当てはまり、各ルールについてのメンバーシップ関数 $f_{xi}(x_o)$, $f_{yi}(y_o)$ の値はつぎようになる。

$$f_{x5}(x_o) = f_{x6}(x_o) = -x_o/a + 1$$

$$f_{x8}(x_o) = f_{x9}(x_o) = x_o/a$$

$$f_{y5}(y_o) = f_{y8}(y_o) = -y_o/b + 1$$

$$f_{y6}(y_o) = f_{y9}(y_o) = y_o/b$$

②適合度 α_i

適合度 α_i は f_{xi} と f_{yi} との最小値として定まるから、 f_{xi} と f_{yi} の値の大小関係にしたがって領域 D_1 をさらに四つの小領域に分解する (Fig. 3 参照)。分け方から、各小領域における適合度の値は自明であろうが、ちなみに R_1 における適合度は

$$\alpha_5 = -x_o/a + 1, \quad \alpha_6 = y_o/b$$

$$\alpha_8 = x_o/a, \quad \alpha_9 = y_o/b$$

である。以上では四つのルールに対する適合度だけ求めたが、他のルールについての適合度はもちろん 0 である。

③ルール別の修正メンバーシップ関数 M_i

たとえば、小領域 R_1 での修正メンバーシップ関数 $M_i(z)$ は Fig. 4

(a) Modified membership function $M_i(z)$ (b) Total modified membership function $M_0(z)$ **Fig. 4** Example of $M_i(z)$ and $M_0(z)$

(a) のとおりになる。

④ 総合修正メンバーシップ関数 $M(z)$

以上より、小領域 R_1 での総合修正メンバーシップ関数 $M_0(z)$ は Fig. 4(b) のとおりになる。

⑤ 出力 z_0

$M_0(z)$ の重心を求めることにより小領域 R_1 については

$$z_0 = cz', \quad z' = \frac{-y'^2 + 5y' - x'^2 + 3x'}{-2(x'^2 - y' - x' - 1)}$$

となる。ただし、 $x' = x_0/a$, $y' = y_0/b$ とする。

以上の計算を、入力空間のすべての領域について実行すれば z_0 を与える関数 F の全貌が明らかとなる。 $y \geq 0$ の部分についての計算結果を **Table 2** に示しておく。ただし、 $R_1 \sim R_{14}$ は Fig. 3 の小領域である。Table 1 のファジィ推論のルールは原点对称だから関数 $F(x, y)$ も原点对称になる。したがって、 $y \leq 0$ の部分の $F(x, y)$ は Table 2 の式の x' , y' を $-x'$, $-y'$ で置き換え、さらに z' に負号をつけることによって求められる。

$F(x, y)$ の性質を調べておこう。原点における $F(x, y)$ の偏微分係数を領域別に求めてみると

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{3c}{2a}, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{3c}{2b} (x, y \in R_3, R_4, R_{17}, R_{18})$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{3c}{2a}, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{5c}{2b} (x, y \in R_1, R_{15})$$

Table 2 Nonlinear function which characterizes the fuzzy controller

Region	Function $F(x', y')/c$ $x' = x/a, y' = y/b$
R_1	$\frac{-x'^2 + 3x' - y'^2 + 5y'}{2(-x'^2 + x' + y' + 1)}$
R_2	$\frac{-x'^2 + 5x' - y'^2 + 3y'}{2(-y'^2 + y' + x' + 1)}$
R_3	$\frac{x'^2 + 3x' - y'^2 + 3y'}{2(-y'^2 + y' - x' + 1)}$
R_4	$\frac{x'^2 + 3x' - y'^2 + 3y'}{2(-x'^2 - x' + y' + 1)}$
R_5	$\frac{x'^2 - x' - 3y'^2 + 5y' + 2}{2(-y'^2 + y' - x' + 2)}$
R_6	$\frac{-3x'^2 + 5x' + y'^2 - y' + 2}{2(-x'^2 + x' - y' + 2)}$
R_7	$\frac{-x'^2 + x' + y'^2 + y'}{2(-x'^2 - x' - y' + 2)}$
R_8	$\frac{-x'^2 + x' + y'^2 + y'}{2(-y'^2 + y' + x' + 2)}$
R_9	$\frac{-3y'^2 + 5y' + 2}{2(-y'^2 + y' + 1)}$
R_{10}	2
R_{11}	$\frac{-3x'^2 + 5x' + 2}{2(-x'^2 + x' + 1)}$
R_{12}	$\frac{-x'^2 + x' + 2}{2(-x'^2 - x' + 1)}$
R_{13}	0
R_{14}	$\frac{y'^2 + y' - 2}{2(-y'^2 + y' + 1)}$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{5c}{2a}, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{3c}{2b} (x, y \in R_2, R_{16}) \quad (6)$$

となる。すなわち、 $F(x, y)$ は方向によって傾きが異なる（すなわち、全微分不可能な）関数であって、原点に本質的な非線形性を有することがわかる。

3. 直線軌道を走行する台車上の倒立振子のファジィ制御

ファジィ制御装置を使った倒立振子の制御はファジィ制御の有効性を示すためのデモンストレーションとしてよく使われてきた。文献 4), 5) をみれば、実際の制御系が **Fig. 5** のようになっていることがわかる。制御の目的は走行状態、静止状態を問わず振子を倒立させればよいものとされている。この装置では数 m の距離しか走行できない（したがって、そこで実験を終える）わけだが、以下では十分長い距離走行できる

(a) Structure of the control system

(b) Inverted pendulum on the linear truck

Fig. 5 Fuzzy control of the inverted pendulum

ものとして検討を行う。これは、本論文が「プロセス制御などの目的でファジィ制御装置を使用した場合にも、はたしてデモンストレーションのようにうまく行くか」という疑問に答えることを主目的としているからである。

Fig. 5(b) の倒立振り子系の運動方程式は⁶⁾

$$(M+m)\ddot{r} + m l \cos \theta \ddot{\theta} = -D\dot{r} + m l \dot{\theta}^2 \sin \theta - Gu \quad (7a)$$

$$m l \cos \theta \ddot{r} + (\sigma + m l^2) \ddot{\theta} = -C\dot{\theta} + m l g \sin \theta \quad (7b)$$

である。 u は電力増幅器への入力電圧、 G は駆動系の利得係数、 r は台車の位置、 θ は振り子の倒れ角 (垂直上方を 0) M 、 D は台車の質量および粘性摩擦係数、 m 、 $2l$ 、 C は振り子の質量、長さおよび粘性摩擦係数、 σ は振り子の慣性モーメントに関するパラメータである。以下のシミュレーションでは、古田氏の教科書にあるパラメータ値と飽和条件を用いる⁶⁾。すなわち

$$\begin{aligned} M &= 0.392 \text{ kg}, \quad m = 0.074 \text{ kg}, \quad D = 2.847 \text{ kg/s}, \\ G &= 56.29 \text{ N/V}, \quad g = 9.8 \text{ m/s}^2, \quad l = 0.358 \text{ m}, \\ \sigma &= 0.0095 \text{ kgm}^2, \quad C = 0.00218 \text{ kgm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

とし、アンプの飽和から生ずる制約

$$|u| \leq 0.12 \text{ V} \quad (18)$$

を課す。ファジィ制御装置としては前節の装置を用い、振り子の倒れ角と倒れ角速度をそれぞれ入力 x 、 y として、出力 z を (8) 式の飽和要素に通したものを電

力増幅器への電圧 u とする。

前章の数値モデルを使って上のファジィ制御系のシミュレーションを行った結果を Fig. 6 に示す。ただし、この結果は、ファジィ制御装置のパラメータを

$$a = 0.2 \text{ rad}, \quad b = 0.5 \text{ rad/s}, \quad c = 1.0 \text{ V}$$

初期条件を

$$\theta(0) = 0.01 \text{ rad}, \quad \text{ほかの初期値} = 0$$

と選んだときのものである。Fig. 6 から、この場合には、台車が約 38m 走ったとき振子が倒れてしまうことがわかる。パラメータ a 、 b 、 c をこれ以外のいろいろな値に設定しても、走行距離は異なるが、最後には振子が倒れてしまうという結果は同じであった。

振子が倒れる理由として、直観的にはつぎの説明が可能である。ファジィ制御装置は非線形ゲインであり、入力電圧 u から倒れ角 θ への伝達特性は定位性であるから、定常的な外乱があれば倒れ角に定常偏差が生じる。

Fig. 6(c) をみれば確かに θ に定常偏差が (短期的にみて) 生じているようにみえる。

この定常偏差を維持するためには台車を常に加速することが必要であり、この事実は Fig. 6(d) で台車の速度が徐々に増加していることから裏付けられる。ところが、アンプの出力に上限があるために、ある時点で加速ができなくなり振子は倒れてしまう。このことは、 θ の波形と u の波形を比較すれば確認できる。

(a) Position of the cart

(b) Angle of the pendulum

(c) Enlargement of (b)

(d) Velocity of the cart

(e) Control input u

Fig. 6 Simulation results of the system of Fig. 5

上のように、振子が倒れる主な理由が定常偏差の存在にあるとすれば、I要素またはPI要素で定常偏差を除去することによって、振子を安定に倒立させられるのではないかと考えられる。そこで、Fig. 7のように倒れ角 θ のループにPI補償要素を入れてみると、Fig. 8のように倒立状態が保持できることがわかった。ただし、PI補償要素のパラメータは $K=5$ 、 $T=2.5$ とした。

Fig. 7 Structure of the control system with PI

Fig. 8 Simulation results of the system of Fig. 7

4. 線形理論による解析

前章で、従来型のファジィ制御系で振子が倒れる理由が、振子の倒れ角に生じる定常偏差であることを示唆した。しかし、この説明はつぎの点で不十分なところを残している。すなわち、この説明は定常外乱を前提としているが（目標値が0であることに注意）、そのような外乱は explicit には加わっていない。もちろん、よく考えてみると、台車の位置を制御せずに自由に行っていることが結果的に定常外乱として作用しているものと解釈できそうであり、定常偏差が生じる原因を見出すことはできる。ただし、台車の動きも振子と一体となった微分方程式で記述されるわけだから、上のような解釈を導入することは、動的システム理論という立場から不満足なものといわざるをえない。この点を償うため、本章では、線形理論による安定解析を行う。ただし、2章で述べたように、ファジィ制御装置は原点で全微分不可能だから、微小変動に対する近似としての線形化はできない。したがって、厳密に言えば本章の解析は単なる比較の対象としての意味しかもちえないが次章の検討結果（ファジィ制御装置の傾きの下限を線形ゲインと合せたときの結果）と総合すれば、これによってシステムの特性が十分解明されたとみなしてよからう。

倒立振子の状態を $v = [r \ \theta \ \dot{r} \ \dot{\theta}]^T$ において、原点の周りで線形化すれば次式が得られる。

$$\dot{v} = Av + bu \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

$$a_{32} = -m^2 l^2 g / \beta,$$

$$a_{33} = -D(\sigma + m l^2) / \beta,$$

$$\begin{aligned} a_{34} &= Cml/\beta, \quad a_{42} = (M+m)mlg/\beta, \quad a_{43} = Dml/\beta, \\ a_{44} &= -(M+m)C/\beta, \quad b_3 = -(\sigma + ml^2)G/\beta, \\ b_4 &= mlG/\beta, \quad \beta = \sigma(M+m) + Mml^2 \end{aligned}$$

ファジィ制御装置の代わりに線形ゲイン

$$H = [0 \quad h_1 \quad 0 \quad h_2] \quad (10)$$

でフィードバックを行うものとする。閉ループ系の特性方程式は

$$s[s^3 + (Q_{11} + Q_{12}h_2)s^2 + (Q_{21} + Q_{22}h_1)s + Q_{31}] = 0 \quad (11)$$

$$Q_{11} = -a_{33} - a_{44}, \quad Q_{12} = b_4,$$

$$Q_{21} = a_{33}a_{44} - a_{42} - a_{34}a_{43}, \quad Q_{22} = b_4,$$

$$Q_{31} = -a_{43}a_{32} + a_{33}a_{42}$$

となる。したがって、閉ループ極は $s=0$ および (11) 式の [] 内を 0 とするような三つの極からなる。方程式を調べてみれば、 $s=0$ は、台車の位置に対応する不可制御な極であることがわかる。[] 内の定数項が

$$Q_{31} = \frac{Dm^3l^3g - D(\sigma + ml^2)(M+m)mlg}{\beta^2} < 0 \quad (12)$$

となるから、残りの三つの極のなか、少なくとも一つは不安定である (ラウスの条件より)。いい換えれば、(10) 式の線形フィードバックでは振子を安定に倒立させることはできない。このことから、このシステムが不安定になる原因が、台車の粘性摩擦係数の存在 ($D \neq 0$) にあることがわかる。

今度は、Fig. 7 のように、振子の倒れ角のループに PI 補償要素を入れたときを考える。ただし、先と同様ファジィ制御装置は (10) 式の線形フィードバックで置き換える。閉ループ系の特性方程式は

$$s^2[s^3 + (Q_{11} + Q_{12}h_2)s^2 + (Q_{21} + Kb_4h_1)s + Q_{31} + Kb_4h_1/T] = 0 \quad (13)$$

で、閉ループ系は原点に二つ極をもつ。係数行列を調べれば、この二つの極は、台車の位置および PI 調節計の積分器におのおの対応する不可制御な極で、二つともサイズ 1 のジョルダンブロックに対応するものであることがわかる。ラウスの判別法を使って、残りの三つの極の安定性を調べると、 h_1 , h_2 が Fig. 9 の

Fig. 9 Stability region of the linearized system

斜線部分にあれば安定であることがわかる。したがって、この場合には振子を安定に倒立させることができる。ただし、不可制御な極が原点に二つあるため、台車の位置および積分器の値は初期条件で一意に定められてしまう。

5. 検 討

5.1 従来型のファジィ制御方式による倒立振り系の検討

ファジィ制御装置の原点での傾き (6) について記号

$$h_1 \triangleq \frac{3}{2} \frac{c}{a}, \quad \bar{h}_1 \triangleq \frac{5}{2} \frac{c}{a}, \quad h_2 \triangleq \frac{3}{2} \frac{c}{b}, \quad \bar{h}_2 \triangleq \frac{5}{2} \frac{c}{b} \quad (14)$$

を導入しておく。前章の解析から、ファジィ制御装置を線形ゲインに置き換えたとき、閉ループ系が 1 個の不安定極 ($s=0$ は除く) をもつことがわかっており、振子が倒れるまでの時間はこの不安定極の大きさによって決められると推測される。そこでまず、線形制御系で、 h_2 を固定して h_1 を変化させたときの不安定極の値を求めた (Table 3 第 1 欄)。つぎに、ファジィ制御装置の y についての傾きの下限 $\bar{h}_2$ を h_2 に一致させ、 x についての傾きの下限 $\bar{h}_1$ を h_1 に一致させて (この対応関係については次項参照) シミュレーションを行い、振子が倒れるまでの時間、距離を求めた (Table 3 第 2, 第 3 欄)。これから、最初に述べた推測が正しくて、なるべく長時間倒立させておくために

Table 3 Unstable poles of the linearized system and running time and distance of the fuzzy control system ($f_z=3$)

h_1	The value of the unstable pole of the linearized system	Response of the fuzzy control system	
		Running time (s)	Running distance (m)
0.75	4.7348×10^{-1}	11.5	10
7.5	6.2772×10^{-2}	68	38
75	6.5723×10^{-3}	900	300

は a を小さく、 c を大きく選べばよいことがわかる。

5.2 PI 補償要素付ファジィ制御方式による

倒立振り子の検討

PI 補償要素を導入したファジィ制御系について、パラメータ空間での安定領域を線形化した系の安定領域と比較してみる。ファジィ制御装置の y に関する傾きの下限 h_2 を正の値に選んで、 x に関する傾きの下限 h_1 を変化させてシミュレーションしてみると、 h_1 についての安定限界と線形系の場合の安定限界がほぼ (約 1/50 ぐらいの精度で) 一致することがわかった。すなわち、この場合の安定性は、傾きの下限を使った線形モデルでほぼ正確に解析できる。この制御系の安定領域は、Fig. 9 のように、 h_1 、 h_2 が大きい側にひろがっているから、傾きの下限で安定性が定まるといえるのは妥当な結果といえる。

5.3 円軌道上を走行する台車の上での倒立振り子のファジィ制御

今まで、Fig. 5(b) のような装置を扱ってきたが、倒れるまでの走行距離が 10m 以上になるので解析結果を実験的に確認することが難しい。そこで Fig. 10 のように、円軌道上を走行する台車の上で振り子を倒立させるシステムについて速度制御型のドライバを用いた場合も検討してみた。その結果は本質的に直線軌道上の倒立振り子の場合と同様であった。また、この場合については、実験的にも、長時間後に振子が倒れることが他の研究者によって確認されているが、シミュレーション結果との定量的比較は行っていない。

5.4 振子を倒立させる方法について

振子を倒立させる方法として、Fig. 7 以外にどんな可能性があるか考察しておく。3章および4章で明らかにしたように、振子が倒れる主な原因は、制御装置が出力のゲインフィードバックであること、および粘性摩擦の存在の二つである。後者は実在の系では避

けられないから、前者を変更する必要がある。メンバーシップ関数の形を変えたりファジィ推論を min-max 以外の方法で行ったとしてもゲインフィードバックであることに変わりはないから、振子を倒立させることはできない。倒立させるためには、ファジィ制御装置に何らかの積分性をもたせるか、もしくはオブザーバを使って状態変数を推定するという方法が考えられる。積分性をもたせて安定化する方法は Fig. 7 以外に何通りも考えられる (単純に I 要素をいれる、dynamical fuzzy 装置を作る、など) が、その本質は4章の終りに述べたことに尽きる。オブザーバを使う場合はファジィ推論を現代制御理論の枠組みで用いることになる。

5.5 他の文献との比較

ファジィ装置を使った倒立振り子制御系の解析として、文献9)~11)の報告がある。文献9)では、当論文と同様のファジィ制御装置を使うものとし、シミュレーションおよびリアプノフの方法による安定解析を行いルールをうまく選べばシステムを安定化できると述べている。ただし、この文献では、粘性摩擦をすべて無視した方程式を基に検討している。文献10)はシミュレーションを行ったもので、時間が5秒、台車の走行距離が約1.6mまでの結果を示している。この文献では、システムの方程式として摩擦を含むものと含まないものの両方が掲げられていて、シミュレーションでどちらかを使ったか示されていない。文献11)はやはり台車とレールとの粘性摩擦係数を無視した系に対してシミュレーションと安定解析を行ったものである。3章で述べたように、系が不安定になる原因の一つは台車の粘性摩擦係数の存在であり、また振子が倒れるまで (当論文のパラメータ値のとき) 時間で20秒以上、距離で10m以上かかっている。このことから、上記三つの文献の結果は、実際のシステムに生じる長時間の現象を説明するには不十分であると考えられる。

6. ファジィ制御装置の産業応用の可能性について

本論文では、ファジィ制御系の一例についての検討を行っただけであるから、その結果に基づいてファジィ制御装置の産業応用について一般的結論を下すのは早計であろう。しかし、当論文によって得られた知見から若干の提言は可能と考えられるので、それについて述べる。まず、本論文の結果は、簡単な実験と直観的判断だけに頼って安易にファジィ制御を導入することが危険であることを示唆している。また、PI 動作

Fig. 10 Inverted pendulum on the circular truck

の導入によって安定な系が作れたという事実は、ファジィ制御装置を使う場合においても、オーソドックスな制御理論が有効であることを示している。一方、他の文献では、ファジィ制御が実用目的に使われていることが報告されている^{1)~3)}。それらの応用を詳しくみると^{1)~3)}、ファジィ制御装置は従来型制御理論を否定する形ではなく、むしろ協調する形で使われている。これらの事実を総合すれば、ファジィ方式とオーソドックスな制御理論とは、お互いの長所を生かした形で用いられるのが適当と考えられる。その場合には、

- (a) ファジィ制御を安心して適用してよい範囲 (制御対象のクラスや動作の及ぶ範囲) を明らかにすること

が第一の研究課題となろう。この目的には、絶対安定問題に関する研究結果⁸⁾を改良して使うのが有効であろう。つぎに、もう少し細かく、ファジィ方式と制御理論の分担範囲を本論文の結果を参考に考えてみると

- (b) ダイナミクスに関する基本的構造 (微分積分要素の使い方、オブザーバなど) は制御理論で決め、従来の制御理論では扱い難いような面での付加価値をファジィ方式によって与える

のが一つのあり方といえよう。ファジィ方式によって与えられる付加価値として、筆者らは

- (c) 経営者、運転員といった一般の人々に対して、制御系の調整作業を open にするためのヒューマンインタフェースとしての機能
(d) 学習、多目的最適化、スケジュール調整といったフィードバックループの上位に位置する機能

を高く評価するものである。なお、ファジィ制御の他

の特徴として「乗り心地、使い心地といった漠然とした評価基準を改善するのに線形制御より有効である」という指摘がある。本論文で示したように、ファジィ制御装置は本質的非線形性を含んでいるから、線形制御でできないことができるという可能性は否定できない。ただし、現時点では、上のような評価基準を改善していくための体系的設計理論がないので、その能力を生かすためにはかなりの手数が必要となることを覚悟すべきである。

参 考 文 献

- 1) 柳下, 伊藤, 菅野: ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用, システムと制御, **28**-10, 597/604 (1984)
- 2) 前田, 村上: Fuzzy Logic コントローラによる自動車の速度制御, 計測自動制御学会論文集, **21**-9, 984/989 (1985)
- 3) 安信, 宮本, 井原: Fuzzy 制御による列車定位置停止制御, 計測自動制御学会論文集, **19**-11, 873/880 (1983)
- 4) 村上周太: ファジィ制御, コンピュートロール, **22**, 51/58 (1988)
- 5) 山川 烈: Fuzzy コンピュータの発想, 講談社 (1988)
- 6) 古田, 美多, 川路, 原: メカニカルシステム制御, オーム社 (1984)
- 7) 北村新三: ファジィルール制御系の安定解析のための円板形条件, 第 33 回システム制御情報学会研究発表講演会, No. 5039 (1989)
- 8) V. A. Yakubovich: Frequency Conditions for the Absolute Stability of Control Systems with Several Nonlinear or Linear Nonstationary Blocks, Automation and Remote Control, **28**-6, 857/880 (1967)
- 9) Y. Y. Chen: Stability Analysis of Fuzzy Control — A Lyapunov Approach, ICSMC '87, **3**, 1027/1031 (1987)
- 10) 川路, 野口: ファジィ推論による倒立振子の安定化制御, 第 5 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 107/113 (1989)
- 11) 川路, 汐月, 野口: 倒立振子のファジィ制御と安定性解析, 第 18 回制御理論シンポジウム資料, 315/320 (1989)