

カバリングマシンの自動糸交換装置の開発

(第6報) ファジィ手法を用いた自律式作業台車の走行制御

八田 潔*, 堀 純也**, 喜成 年泰**, 新宅 救徳**

Development of an Auto-Doffer for Covering Machines

Part 6 : Control of Autonomous Vehicle by using Fuzzy Method

Kiyoshi Hatta*, Junya Hori**, Toshiyasu Kinari**, and Sukenori Shintaku**

Abstract

Doffing operation for the covering machine has been already automated by the auto drawing-in apparatus loaded on the autonomous vehicle. The vehicle repeats moving and stop while measuring its position and attitude with a pair of laser displacement sensors. In this report, control methods for this autonomous vehicle are investigated to approach the initial operating position rapidly, to break away at the end of the covering machine, and to turn around it.

Fuzzy control was applied to the path tracking that the autonomous vehicle approaches the initial operating position of the covering machine. It obtains much rapider response than the method in which the front wheel takes on the reference path.

Using this advantage of fuzzy control, it enables the vehicle to turn back over the side of the covering machine with stability. By means of this, the autonomous vehicle can directly use the machine frame as a guide way without any additions extraordinary to the covering machine.

(Received May 15, 1997)

(Accepted for Publication Nov. 11, 1997)

1. 緒言

本研究では、カバリングマシンによるカバード糸製造工程の準備作業を自動化・省力化する台車型糸交換システムの開発を進めてきた。これらの作業は、作業位置の高低差や繰り返し回数の極めて多いことが特徴であるが、中小規模の工場が多いため大規模な設備投資が困難であること、慢性的な求人難であることなどから、自動化要求は強いにもかかわらず、実際には自動化が非常に遅れている状況にある。

第1報¹⁾、第3報²⁾では、空気流によって中空スピンドルに芯糸のスパンデックスを通す装置を、また、第4報³⁾では、空気圧力の変化によって糸通しの

可否を判断するセンサと、失敗時のリトライ機構について報告した。さらに、第2報⁴⁾、第5報⁵⁾では、これらの装置を載せ、カバリングマシンと並行して移動する作業台車の開発とその制御について報告した。特に、前報の第5報では、レーザ変位計によってカバリングマシンとの間隔を精密に検出し、自律的に位置姿勢を修正しながら移動する台車を開発し、スピンドルの軸線上で糸通し作業を行う方法を示した。しかし、現段階では、作業開始時に台車をカバリングマシン端の定まった位置(誤差10mm以下)に人手でセットしなければならず、また、同じ作業を行うカバリングマシン裏面への移動も手動で行わなければならない。本研究における最終目標が、工場内を自由に動き回る作業台車の開発である

*会員, Member, 石川工業高等専門学校, Ishikawa National College of Technology, 石川県津幡町, Tsubata, Ishikawa

**会員, Member, 金沢大学工学部, Faculty of Engineering, Kanazawa University, 金沢市小立野, Kodatsuno Kanazawa

ことから、台車のカバリングマシン作業開始位置への接近、および作業のための移動・停止、ならびにマシン裏面への旋回は必要な動作であると考えられる。

そこで、本報では、狭い工場内において、カバリングマシンの初期作業位置へできるだけ速やかに接近し、特別な装置を追加することなく旋回作業を行う手法について報告する。

2. 軌道追従制御

本研究で開発した作業台車は、第5報でも報告したとおり、左右輪が独立して回転できる2輪速度差制御方式の4輪台車で、その位置と姿勢の検出は、台車側面の前後に取り付けられた一対のレーザ変位計によって行われる。また、計測結果はパソコンで処理され、両輪の回転制御に反映される。カバード糸製造の各準備作業を行うために、この台車は、カバリングマシンから100mmの間隔をおいて平行に置かれ、スピンドル間距離100~200mmを移動して、スピンドル軸線上1mm前後（スピンドル中心で最大3mm）の精度で停止する。しかし、この台車では、レーザ変位計の測定範囲および設置間隔の制限により、進行方向100mm~200mmの移動で修正できる左右方向の間隔距離は100mmを中心に±10mmが限界である。したがって、カバリングマシンの端に間隔距離を無視してセットされた台車が、作業のための最初の走行制御を開始するまでのあいだに、できるだけこの誤差を小さくしておく必要がある。具体的には、カバリングマシン端から第1スピンドルまでの長さは、およそ1000~1500mm程度であり、作業台車の大きさが600mmであることを考慮すれば、台車が第1スピンドルに接近するために利用できる距離は500~1000mm程度と考えて良

い。

ここで、カバリングマシン壁面から大きく離れてセットされた台車が、移動とともに次第に目標経路に追従していく理論⁶⁾を述べる。台車が一定速度 V で移動するとき、図1に示すように、台車と目標軌道との最短距離を y とし、台車は常にその進行方向が台車から r だけ離れた軌道上の点 P を向くように操舵されるとすると、幾何学的関係から

$$y/r = \sin\theta \quad (1)$$

$$dy/dt = -V\sin\theta \quad (2)$$

となるので、両式より

$$dy/dt = -(V/r)y \quad (3)$$

が導かれる。(3)式を整理すると、

$$(1/y)dy = -(V/r)dt \quad (4)$$

なる変数分離形1階の微分方程式となるので、両辺をそれぞれ積分し、時間 $t=0$ での軌道誤差を $y(0) = y_0$ とすれば

$$y(t) = y_0 \exp(-Vt/r) \quad (5)$$

となる。上式から時間とともに $y(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となり、軌道追従が可能となることがわかる。また、移動速度 V が一定の場合、 Vt は台車の移動距離 x となり、

$$y(x) = y_0 \exp(-x/r) \quad (6)$$

と表されるので、台車の移動とともに指数関数的に軌道追従が行われることがわかる。なお、この理論に基づく軌道追従の方法を本報では指数関数形制御と呼ぶことにする。後輪駆動の台車では、前輪を目標軌道上にのせて移動することにより次第に軌道追従が実現されるが、その収束速度は、 r に相当する台車の前後輪ホイールベースの長さに支配される。

3. ファジィ制御

前節で検討したように、台車を軌道追従させるための、前輪を軌道上に載せて移動する方法は、指数

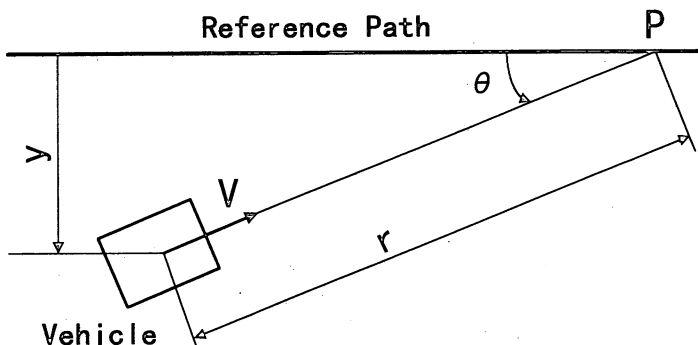


Fig. 1 Path Tracking Control

関数的に収束するので確実ではあるが、そのために必要な移動距離は極めて長い。この応答を改善するために、よくとられる手法としてPID制御があげられる。高度な制御法であるPID制御を用いることにより、速応性・振動抑制・オフセット補償など対応できる要素は多いが、自律台車のように、両輪の回転がすべりにより確実に伝達されなかったり、他の要因により乱される場合には、かえって不安定となる危険性も持っている。そこで、本研究では、PID制御のように特別な概念を必要とせず、非線形系にも容易に適用できるファジィ制御を用いることで、自律台車の走行制御を実現することにした。

ファジィ制御は、if-then形式の入出力を用いて表現するために、特別なモデルを必要とせず、数値的な計算制御ではないために、人間の感覚に近いという特徴を持っている。移動ロボットにおけるファジィ制御の適用⁷⁾については、すでに多くが報告されているが、本報では、カバリングマシンへの自律作業台車の接近ということに論議を絞る。そのため手法について検討した結果を報告する。台車の制御においては、カバリングマシンからの設定間隔100mmに対する偏差 Δy とその姿勢 $\Delta\theta$ がデータとして与えられるので、これらのデータを、いくつかの状態に離散化し、 Δy および $\Delta\theta$ の状態の組み合わせによって、次に行うべき制御のルールを決定していく。ファジィ集合⁸⁾に使われる各状態については、次の7つの表記を使用するものとし、以後これを使用する。

- PB : Positive Big (正で大きい値)
- PM : Positive Medium (正で中位の値)
- PS : Positive Small (正で小さい値)
- ZO : Zero (ゼロ)
- NS : Negative Small (負で小さい値)
- NM : Negative Medium (負で中位の値)
- NB : Negative Big (負で大きい値)

自律台車の動作を考えた場合、 Δy が $\pm 1\text{mm}$ 以内であれば位置的な修正の必要はなく、 $\pm 3\text{mm}$ 以内であれば、それ以上偏差が増大しないようにしなければならない。また、さらに大きな偏差がある場合には、積極的な修正動作が必要であるといえる。一方、同じ位置に台車があったとしても、その姿勢 $\Delta\theta$ が目標経路の方向に向いているのと、反対に向いているのでは、行うべき台車の修正動作は全く異なってくる。そこで、図2に Δy に関するメンバシップ関数を、図3に $\Delta\theta$ に関するメンバシップ関数

をそれぞれ示し、これらに基づく台車制御の規則表を表1に示す。表1に示した台車の各制御モードは、全部で7つであるが、それぞれの動作については、プラスの場合を例に図4で説明する。まず、(a)のZOは両輪を同速度同方向に回転させた直進動作であり、台車が目標経路に順調に接近しているときや経路上にのって直進しているときに使用される。また、(b)のPSは、右車輪を左車輪より高速回転させて左向き前進させ、(c)のPMは、左車輪を停止さ

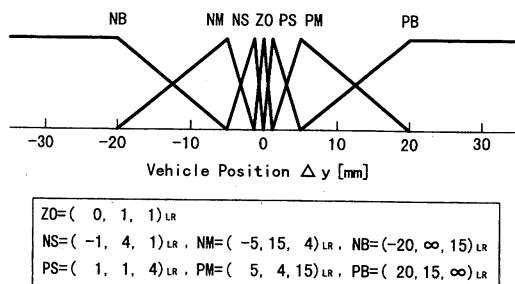


Fig. 2 Membership Function in the Position

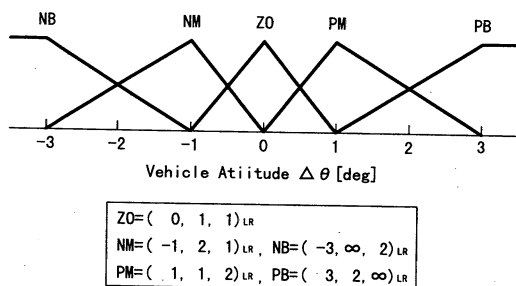


Fig. 3 Membership Function in the Attitude

Table 1 Rules for the Fuzzy Control of Vehicle

		Vehicle Attitude $\Delta\theta$					
		NB	NM	ZO	PM	PB	
Vehicle Position Δy	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	
	NM	NB	NB	NM	NS	ZO	
	NS	NB	NM	NS	ZO	PS	
	ZO	NM	NS	ZO	PS	PM	
	PS	NS	ZO	PS	PM	PB	
	PM	ZO	PS	PM	PB	PB	
	PB	ZO	PM	PB	PB	PB	

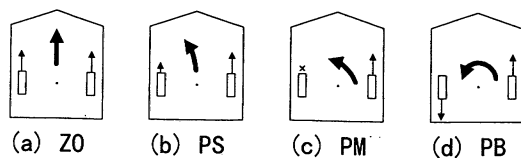


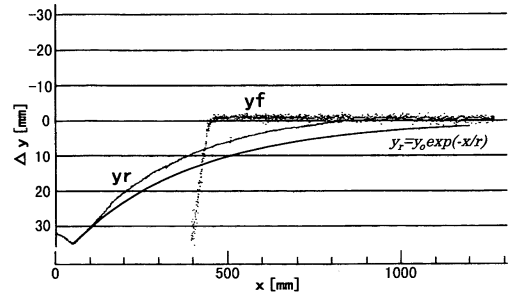
Fig. 4 Driving Modes based on the Fuzzy Control

せ右車輪のみを回転させて左方向に曲がる動作を行う。ともに、位置姿勢における若干の修正を行うときに使用される。さらに、(d)のPBは、両輪を逆方向に同速度で回転し移動を伴わない旋回を行うが、これは、台車の姿勢が最初から大きくずれているときや、軌道上にのった台車の姿勢を正すときに使用される。なお、マイナスの動作については、左右車輪の回転比が逆になり、進行方向が時計回りとなる。

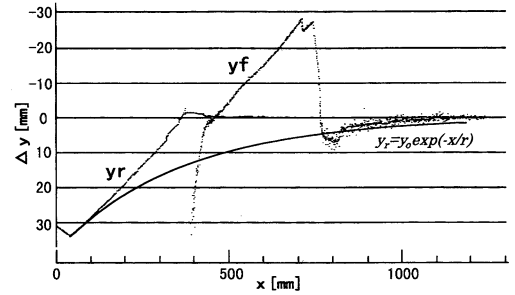
4. 実験と考察

4.1 カバリングマシンへの接近

走行試験は、補強された木製合板の上で台車を走行させ、その時の前後レーザ変位計の位置（カバリングマシン壁面からの最短距離） y_f , y_r を記録した。これは、 y_f が前部カスターの軌道、 y_r が駆動輪の軌跡と考えてよく、 y_r が目標経路に近づくことによって台車全体が軌道に追従したものとみなされる。前報の「作業のための移動制御」では、軌道への追従精度を優先したため台車速度を24mm/sとしてきたが、「接近のための制御」では、精度より追従の速さが優先されるので、台車速度を40mm/sとして実験した。なお、台車位置の計測は30回/s、車輪の制御は15回/s程度のリアルタイムで行っている。台車のスタートする初期位置は、目標経路から30mm前後離れたところとし、ファジィ制御の効果を検討した。図5に、(6)式に基づく指数関数形制御とファジィ制御の軌跡をそれぞれ示した。この2つの軌跡をもとに、軌道追従の速応性を比較するため、 Δy_r が10, 5, 1mmに達するまでに要した移動距離 x を表2に示す。図5からも明らかなように、どちらも目標経路に突入する角度に大きな差はないものの、指数関数的にその姿勢が収束するものと、そのままの角度で進入し続いて姿勢修正を行うものの間では接近に要する移動距離に大幅な違いを生ずることがわかる。また、実験した指数関数形制御は、



(a) Control by Exponential Function



(b) Control by Fuzzy Method.

Fig. 5 Locus of the Driving Controlled Vehicle (wheel base $r=385\text{mm}$)

前輪を軌道上ちょうどに設定したのではなく、 $\pm 1\text{mm}$ の範囲において制御したため、(6)式の理論上求められる結果より若干速く目標経路に達したが、ファジィ制御で得られた結果は、これを大きく超えている。したがって、カバリングマシン端から第1スピンドルへの接近という短い距離の間で、安定してマシンとの間隔を調整できるファジィ制御は、非常に有効であると確認された。ただ、制御自体は極めて容易であるが、ファジィ制御パラメータを設定するのは、若干経験的要素があると同時に試行錯誤を必要とする点が問題であるといえる。図6に、パラメータおよび制御ルールの調整を行った例を示す。(a)は、制御ルールの組み合わせを若干変更したもので、軌道追従の速応性という点で問題が生じた。また、(b)は、 Δy におけるメンバシップ関数で

Table 2 Required Length to Follow up Path on Movement (initial Variation $\Delta y=35\text{mm}$)

Required Length $x(\text{mm})$	Mark of Vehicle Position		
	$\Delta y=10\text{mm}$	$\Delta y=5\text{mm}$	$\Delta y=1\text{mm}$
Theoretical Value of Exponential Function	470	730	1333
Control by Exponential Function	340	500	770
Control by Fuzzy Method	250	280	320

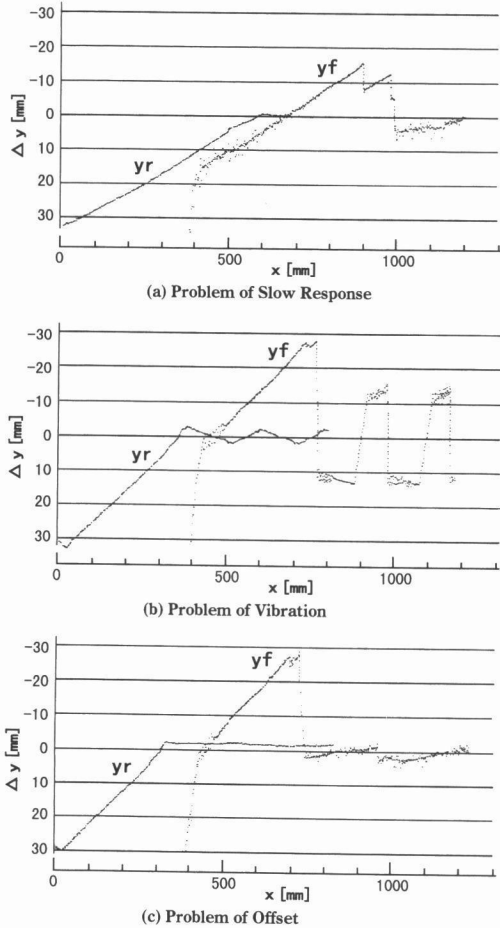


Fig. 6 Locus of Fuzzy Controlled Vehicle with Parameter Regulation

ZOの範囲を2倍に大きくしたものであり、この場合は、振動的な走行現象がみられるようになった。さらに、(c)は、 $\Delta\theta$ におけるメンバシップ関数でZOの範囲を5分の1に小さくしたものであるが、この場合は、目標軌道からわずかにずれる偏差が生じてしまった。いずれの場合も、自律台車の走行制御においては、あまり好ましくない現象であるが、ファジィ制御のパラメータの取り方、あるいは調整の仕方によってはこのような軌跡が得られる可能性もある。言い換えれば、これらの調整をうまく行うことによって最も好ましい軌跡を得ることができるということを示唆している。

4.2 旋回への応用

カバリングマシンへの接近については、前節で述べたように、ファジィ制御を適用することにより、

比較的短距離での軌道追従が可能となった。しかし、自律作業台車は、カバリングマシンの片面の作業を終えると、裏面への移動を行わなければならない。台車は、側面前後に取り付けられた一対のレーザ変位計により、その位置と姿勢を計測しているが、台車がカバリングマシン端より飛び出してしまうと、計測は不可能となる。また、カバリングマシンの奥行きは、およそ500~700mmであるが、この部分でも台車の走行制御を行うことができれば、裏面への旋回は、非計測状態のまま旋回するよりも確実となる。図7に、旋回のために行う3つの動作を示す。①は、ファジィ制御により軌道追従を行う部分で、カバリングマシン壁面から100mmの一定間隔で移動が実現される。②は、前部センサがカバリングマシンより飛び出し、有効なセンサは1つとなるので、そのまま直進する部分である。ここでの誤差は、センサが飛び出した時点での台車の姿勢に支配されるが、続く動作によって誤差が吸収されれば問題とはならない。③は、前部センサが計測を開始できる位置まで台車が回転を続ける部分で前後両方のセンサが動作し始めると、台車は再び①の動作を開始し、非常に短い距離で軌道追従を実現する。同様の操作を繰り返し、台車は、裏面へと移動して、ファジィ制御でカバリングマシンに接近したのち、作業のための移動制御を開始する。

ここで、2輪速度差制御方式の台車における旋回理論を述べておく。図8において、左右駆動輪の間隔(トレッド)を B 、その中心における回転半径を R 、左右駆動輪の回転速度の比を X とすれば、

$$R = (B/2) \cdot (X+1)/(X-1) \tag{7}$$

という関係式が成り立つ。したがって、台車を半径 R で回転させるためには、

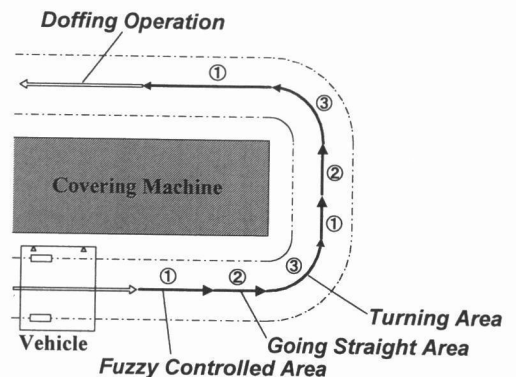


Fig. 7 Combination of Controls for Turning Motion

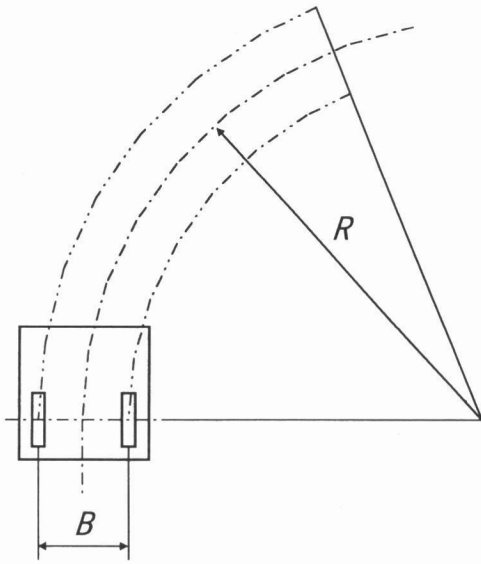


Fig. 8 Radius of Gyration on Vehicle Individually Driven Wheels

$$X = (2R/B + 1) / (2R/B - 1) \tag{8}$$

なる速度比で両輪を回転させればよいことになる。例えば、カバリングマシンから100mm 間隔をおいて移動する幅700mm の台車 ($B=500\text{mm}$) が、カバリングマシンのちょうど角を中心に旋回するときの回転半径は $R=450\text{mm}$ となるので、両輪の回転比は $X=3.5$ が得られる。よって、右輪の回転を左輪の3.5倍で回転させれば、理論的には反時計方向に希望の旋回が行えるはずである。

以上の、3動作および旋回理論により、実際に台車を移動させた軌跡を図9に示す。各プロットは、台車の左右輪中心を示したものであるが、カバリングマシン端から飛び出した時の姿勢により、旋回の位置は若干異なっているが、カバリングマシン側面に平行になったときには、ほとんど同じ位置に到達している。したがって、ファジィ制御および旋回を組み合わせた走行制御を行うことにより、比較的短い距離でも安定して台車の旋回を行うことができた。

5. 結 言

本報では、各種カバリングマシンに対応した自律台車を、作業のための初期位置へ速やかに接近させ

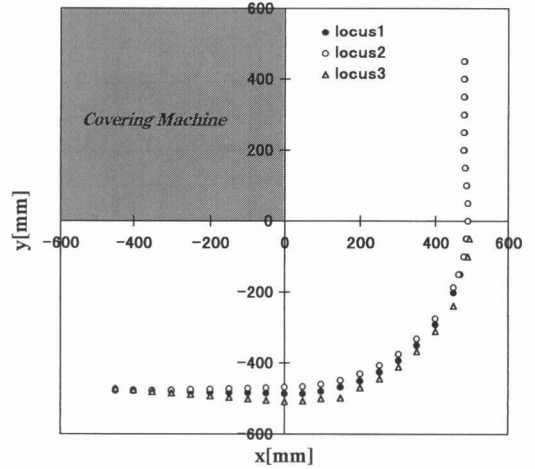


Fig. 9 Locus of Autonomous Vehicle at Turning Motion

るための走行制御の方法について検討した。その結果、軌道追従の方法として、ファジィ制御が有効であることが認められた。ファジィ制御における各種パラメータの設定については、台車の制御機構・ハードウェア特性により、多少試行は必要であるが、この手法の適用により、台車の前輪を軌道上にのせて徐々に追従させた場合より、速応性の点で大幅な改善がみられた。また、このファジィ制御の速応性を利用して、カバリングマシン裏面への台車の旋回を行ったところ、非常に安定した移動旋回が実現できた。

文 献

- 1) 堀 純也, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 50, T24 (1997)
- 2) 堀 純也, 八田 潔, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 51, T43 (1998)
- 3) 堀 純也, 八田 潔, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 51, T59 (1998)
- 4) 八田 潔, 堀 純也, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 50, T341 (1997)
- 5) 堀 純也, 八田 潔, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌 (掲載決定)
- 6) 日本機械学会: 機械工学便覧C4メカトロニクス, p. 101, 丸善 (1994)
- 7) 石川繁樹; 日本ロボット学会誌, 9-2, (1991), 149
- 8) 渡辺桂吾, 野見山章, 日本機械学会論文集, 62-595, C (1996), 1019
- 9) 田中一男; 応用をめざす人のためのファジィ理論入門, p. 182, ラッセル社 (1991)