

# 誘導式搬送車のファジィ制御

石川職業能力開発短期大学校  
東京工業大学工学部

西田 均  
藤田 壽 憲\*

Fuzzy Control of Automatic Guided Vehicles

Hitoshi NISHIDA, Toshinori FUJITA

## 要約

本研究は AGV の円弧軌道追従制御にファジィ制御を適用してスムーズな走行を実現することを目的とした。AGV は軌道から脱線してはいけないが厳密に軌道に沿う必要はない。このことからあいまい性を許容できるファジィ制御が有効であると考えられる。研究では古典制御理論の考え方を適用した方法で幾何学的シミュレーションによりメンバーシップ関数の調整を行った。この結果シミュレーションにおいてスムーズな走行を実現した。さらに実用性を検証するために走行実験を行ったが、シミュレーションと同様の結果を得た。これよりファジィ制御が AGV の軌道追従制御に有効であることを確認した。

## I 緒言

工場などで運搬・搬送手段として使われている誘導式搬送車(以下 AGV と呼ぶ)は FA 化において必要不可欠なものとなっている。そして AGV の走行性能は FA 工場の稼働率向上に大きく関係している。搬送システムには「少ない台数で多くを搬送する」ことが要求されるので、AGV は速くかつ脱線しないように走らせる必要がある。そのために誘導線(以下軌道と呼ぶ)に沿う追従制御性能の向上が求められている<sup>(1)</sup>。軌道追従制御を高精度に実現する研究もなされているが技術的課題は多い<sup>(2)</sup>。AGV は軌道から脱線してはいけないが厳密に軌道に沿う必要はない。少しのずれを許した方がハンチングもなくスムーズな走行が可能となることが予想される。このことからあいまい性を許容できるファジィ制御が有効であると考えられる<sup>(3)</sup>。

そこで本研究では AGV の円弧軌道追従制御にファジィ制御を適用してスムーズな走行を実現することを目的とした。現在、メンバーシップ関数の調整は試行錯誤的に行われているが、本研究では古典的制御理論の考え方を適用した方法で幾何学的シミュレーションによって行った。調整の結果、シミュレーションにおいて良好な結果を得ることができた。さらに実用性を検証するために走行実験を行ったが、シミュレーションと同様の結果を得た。このことからファジィ制御が

AGV の軌道追従制御に有効であることを確認したので報告する。

## II AGV と偏差

本研究の AGV は 3 輪車で前 2 輪はそれぞれ独立して駆動され、後ろ 1 輪は自由舵である。走行運動は前輪で左右の速度差がない場合は直線運動となり、速度差がある場合は円弧運動で曲率半径はその速度差により決まる。車輪の滑り、慣性力を考慮しないならば、AGV の速度  $V$  および AGV の曲率半径  $R$  は以下のよう表される。

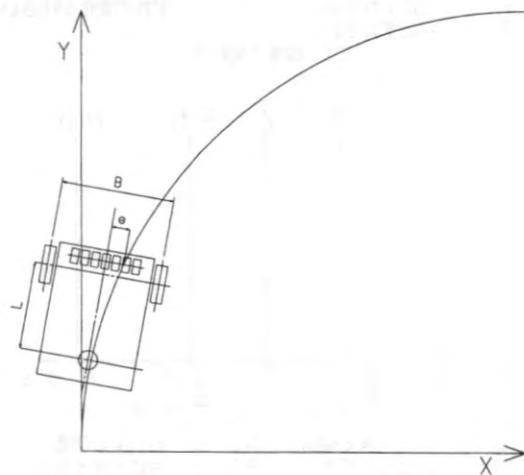


図1 円弧軌道と偏差

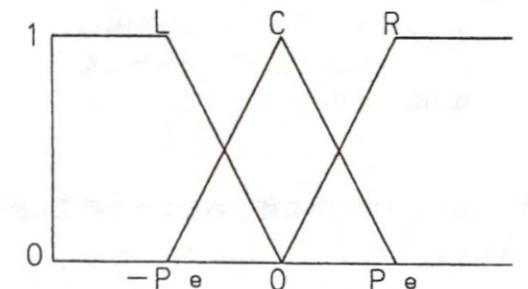
$$V = (V_R + V_L) / 2 \quad (1)$$

$$V_L / |R - B| = V_R / |R + B| \quad (2)$$

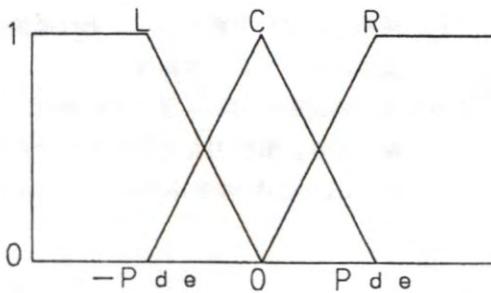
ここで  $V_L, V_R$  は左右の車輪の速度、 $B$  はトレッドである。軌道は図1に示すように1/4円の円弧軌道とし、センサ中心からセンサ軸と軌道の交点までの距離を偏差と定義する。本研究ではAGVは一定速度で走行するものとする。

### III ファジィ制御器

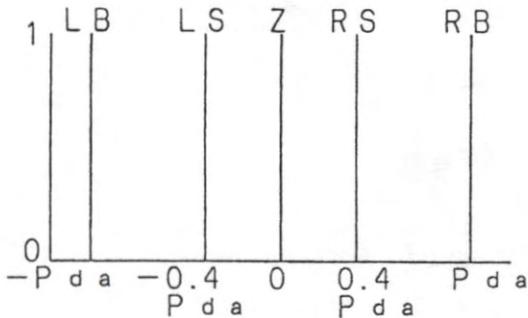
ファジィ制御器は入力変数を偏差  $e$  とその変化分  $\Delta e$  の2つとし、出力変数を方向操作量の変化分  $\Delta a$  とする。メンバーシップ関数を図2に示す。同図の変数



L : 左にずれている C : ずれが小さい  
R : 右にずれている  
(1) 偏差



L : 左にずれていく C : ずれの変化が小さい  
R : 右にずれていく  
(2) 偏差の変化分



LB : 左に大きく切る RS : 右に少し切る  
LS : 左に少し切る RB : 右に大きく切る  
Z : そのままの状態  
(3) 方向操作量の変化分

図2 メンバーシップ関数

$P$  はそれぞれのメンバーシップ関数のスケーリングファクタを示す。推論結果のメンバーシップ関数を中央によせることで偏差が大きいときの速応性を増し、かつ偏差が小さいときの安定性を確保している。

制御規則は自動車のハンドル操作の感覚から定めた。制御規則を表1に示す。推論方式は代数積一簡略化法<sup>(4)</sup>を採用した。

表1 制御規則表1

$\Delta e$ \ e	L	C	R
L	RB	RS	Z
C	RS	Z	LS
R	Z	LS	LB

本研究では推論結果の方向操作量の変化分  $\Delta a$  と  $R$  の関係を以下のように考えた。

式(3)を満足するサンプリング角度  $\Delta \theta$  を導入して、制御のサンプリング時間  $\Delta t$  を次式により定める。

$$\Delta t = r \Delta \theta / V \quad (3)$$

ここで  $r$  は軌道の曲率半径である。  $R$  と  $\Delta a$  の関係は図3に示すように幾何学的な関係から式(4)のようになる。

$$R = V \Delta t / (2 \Delta a) \quad (4)$$

式(3)、(4)から式(5)が得られる。

$$R / r = \Delta \theta / (2 \Delta a) \quad (5)$$

式(5)よりある  $\Delta \theta$  に対して  $r$  と推論より得られた  $\Delta a$  を代入して  $R$  が求まる。

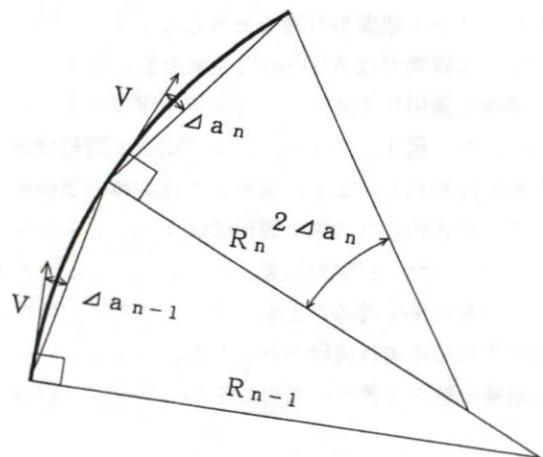


図3  $\Delta a$  と  $R$  の関係

一般にファジィ制御を離散時間で行う場合、サンプリング時間と軌道半径により各ゲイン、メンバーシップ関数を見直さなければならない。しかしここで導入したサンプリング角度の考え方はある  $\Delta \theta$  に対するメンバーシップ関数を定めておけば、軌道半径が変化しても式(3)に従って  $\Delta t$  を変えることで容易に対応することができることを示している。

#### IV シミュレーションとメンバーシップ関数の調整

AGV の運動を考える場合、厳密には動力的に挙動を考えなければならない。しかし通常の AGV の走行速度は 2~4.5 km/h と比較的遅く、車輪の速度制御が十分に速いと考えられるので幾何学的挙動のみでシミュレーションを行った。

シミュレーションの手順は次の通りである。①その位置における偏差とその変化分を求める。②ファジィ推論により方向操作量の変化分を計算する。③方向操作量の変化分からサンプリング時間後の位置を式(5)を用いて幾何学的に求める。④円弧軌道出口なら終了する。そうでなければ①に戻りこの演算を繰り返す。走行の初期条件は円弧軌道の入口で偏差が 0 で接線方向に一定速度とした。またサンプリング角度は 4 度である。

幾何学的シミュレーションによってメンバーシップ関数のスケーリングファクタの調整を行うためには評価指標の設定が必要である。円弧軌道追従制御の場合、安定性に関しては振動的挙動の程度を示す方向操作量

符号反転回数(方向反転回数)、方向操作量の標準偏差、速応性に関しては円弧軌道出口の偏差、偏差の標準偏差などが考えられる。実用的には目的にあったわかりやすい評価指標を適宜選択すべきである。本研究ではある程度の偏差は許容してスムーズな走行を目標としているので、方向反転回数、円弧軌道出口の偏差を評価指標に設定した。

スケーリングファクタの調整に古典制御理論の考え方を適用する。スケーリングファクタの調整は正規化ゲインと出力ゲインの調整を意味する。偏差と偏差の変化分は  $r$  で除して無次元化して取り扱う。最初に偏差の変化分の正規化ゲインと出力ゲインを求める。偏差の変化分の正規化ゲインを適切に決め (1/4円進んで、 $e/r=0.08$ となる偏差の変化率を  $Pde$  の値とした)、出力ゲインを表 2 の規則表を用いてシミュレーションにより決定する。

図 4 は方向反転回数が 0 回で出口における偏差が最小となる場合であり、これより出力ゲインを決定した。

表 2 制御規則表 2

$\Delta e$	$\Delta a$
L	R B
C	Z
R	L B

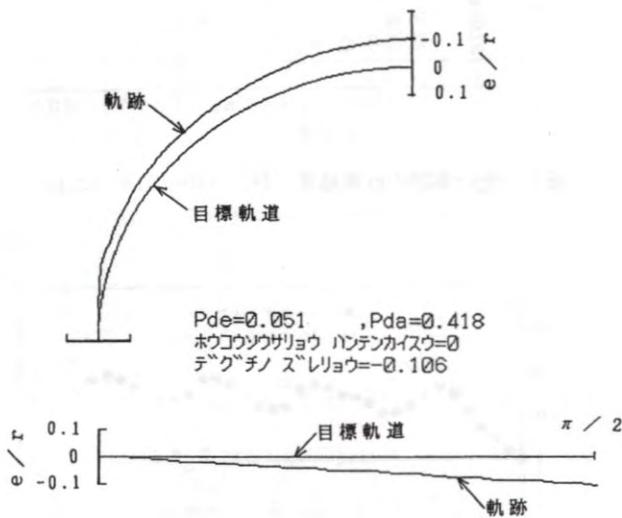


図 4 制御規則表 2 によるシミュレーション結果

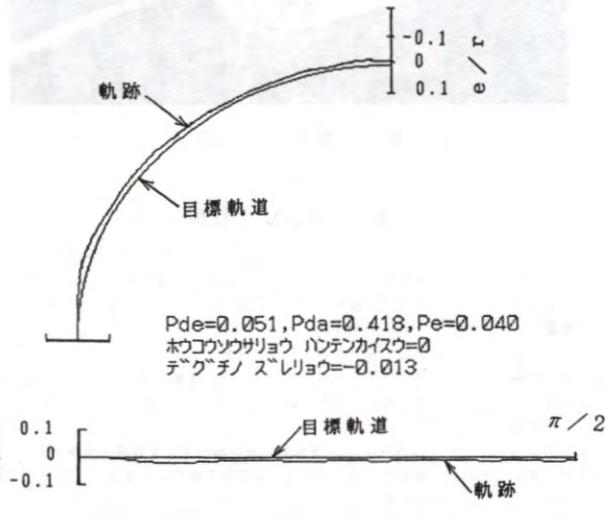


図 5 制御規則表 1 によるシミュレーション結果

表2を用いることで偏差だけの単純な比例制御の場合と等価になる。残りの偏差の正規化ゲインについては、表1の規則表を用いてシミュレーションにより求める。図5は方向反転回数が0回で出口の偏差が最小となる応答を示す。これより偏差の正規化ゲインを決定した。同図はAGVのスムーズな軌道追従性を示しており、円弧軌道出口での偏差も曲率半径の1.3%で小さな値となっている。

## V 走行実験

AGVのファジィ制御の実用性を検証するために走行実験を行った。図6に製作したAGVの外観を示す。またこのAGVの仕様を表3に示す。軌道からの偏差を検出するセンサは7個の光電センサからなりデジタル的に位置が検出できる。これは前件部の台集合を離散的に取り扱ったことと等価になる。AGV制御プログラムのファジィ推論部は入力に対する推論結果をマップとして持ち、これを参照する方式である。ゲインはシミュレーションで決定された値である。左右の車輪のモータ制御は推論結果を式(5)に代入してRを求め、式(1)、(2)より $V_L$ 、 $V_R$ を計算してそれぞれの速度に相当する電圧を出力した。軌道は平板に張り付けられ

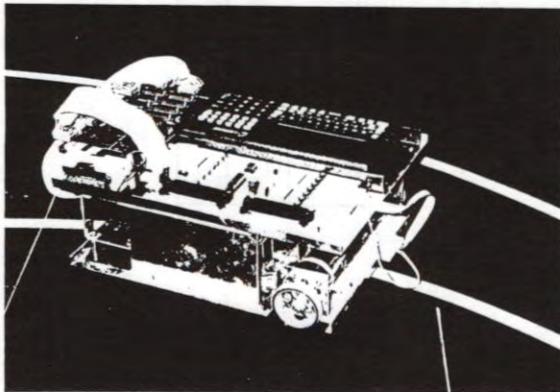


図6 製作したAGV

表3 AGVの仕様

サイズ	: 240×285×120 [mm] (W×L×H)
トレッド	: 233 [mm] ホールベース: 175 [mm]
重量	: 35.7 [N]
コンピュータ	: PC-G813 (SHARP)
駆動車輪	: アルミホイール+シリコンゴム接着 (φ48)
後輪自由舵	: ボールキャスタ (φ22)
バッテリー	: 9.6V × 2
モータ	: TG-07B-AH (ツカサ) エンコーダ: 100 [ppr]
モータドライバ	: PWM 20KHz KENTAC 831
ギア比	: 1/5
デジタルラインセンサ	: 光電センサ7個 センサ間隔10.16 [mm]
センサ回路	: チョップ式 センサ位置: 車軸前方(27 [mm])に平行に配置

た黒色のゴムシートの上に白色の幅19mmビニールテープを張り付けたもので、曲率半径は0.8mである。AGVの軌跡は軌道上方1,339mmに設置したCCDカメラで計測した。カメラからの画像データをビデオテープに記録して、時間ごとの画像データを画像処理して座標を求めた。使用した画像処理装置(レンズ: B2518、カメラ: XC-77RR、画像処理装置: アスペクトII)がたる形ひずみを生じていたので、AGVの位置は座標を線形幾何学的補正<sup>(5)</sup>を行って求めた。走行速度は0.090m/sでサンプリング角度は4.1度である。

センサ中心の走行軌跡の計測結果を図7に示す。シミュレーションと同様のスムーズな走行を示している。実験とシミュレーションとの比較をするために偏差の変化を調べたのが図8である。同図の横軸は軌道曲率中心に対する入口からの角度である。若干の違いはあるがほぼ同様な傾向を示している。走行実験でファジィ推論部の推論結果の履歴において、方向反転になる推論結果は無かった。このことからファジィ制御がAGVの軌道追従制御に有効であることが確認で

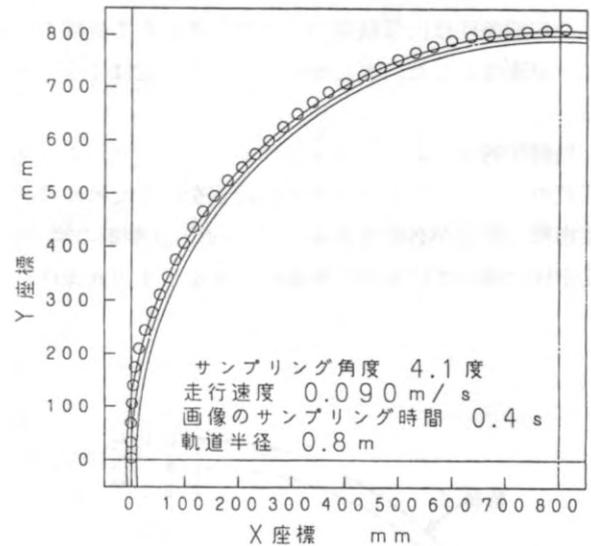


図7 走行実験の計測結果(センサ中心の走行軌跡)

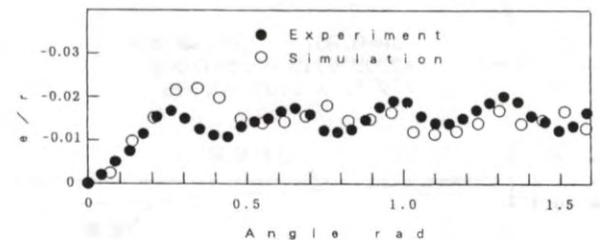


図8 偏差の変化

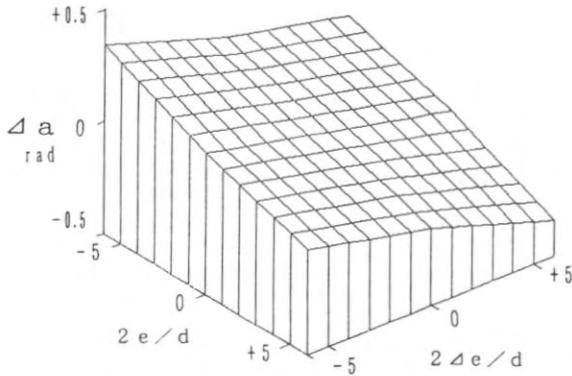


図9 出力特性

きる。

本研究でのファジィ制御の特性を調べるために入力値と出力値の関係を三次元表示したのが図9である。図中の $d$ はセンサの間隔を表す。古典制御では出力は平面になるが、代数積—簡略化法によるファジィ制御では歪んだ曲面となっている。これは非線形制御を意味している。 $e$ と $\Delta e$ がともに大きな値で符号が同じ領域では $\Delta a$ は急勾配となっておりハンドルを切る割合が大きくなることを示している。この結果速応性の良い制御になっていると考えられる。逆に $e$ と $\Delta e$ がともに小さな値の領域では $\Delta a$ は緩やかな勾配のためハンドルを切る割合が小さくなっている。このことから安定性の良い制御になっていると考えられる。

## VI 結言

AGVの円弧軌道追従制御にファジィ制御を適用してスムーズな走行を実現した。メンバーシップ関数の調整は古典制御理論を適用して幾何学的シミュレーションによって容易に行うことができた。走行実験ではシミュレーションと同様の安定性、速応性の良い軌道追従制御を実現しており、ファジィ制御の有効性を確認した。

## おわりに

この研究は平成4、5年度の卒業研究で学生と共同で行ったものである。AGVの製作や走行実験などは学生が主体的に行った。このテーマは学生の興味・関心が高く積極的な研究活動が見られた。研究成果の一部は学生が日本機械学会北信越支部学生員発表会で報告した。結果として学生に研究方法、製作方法、実験方法、発表の方法などを実践的に教育できたと思う。最後になるがこの研究は平成4年度の雇用促進事業団

指定研究を受けて行ったものであり関係各位に感謝申し上げます。

## 【参考文献】

- (1) 津村俊弘, 移動体の知能化, 計測と制御, Vol. 30, No. 1, 1991年1月.
- (2) 水谷元彦, 対馬一憲, 自律移動車輪形ロボットの軌道追従制御に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 58巻550号, 1992年6月.
- (3) 遠藤真一郎, 無人搬送車への応用, 日本機械学会第182回講習会教材, 1991年6月.
- (4) 水本雅晴, 最近のファジィ制御法, 数理科学, No. 333, 1991年3月.
- (5) 安居院猛, 長尾智晴, 画像の処理と認識, 昭晃堂, 1992年11月, p 20-22.