

予見ファジィ制御による自動車の駐車制御

筑波大学 構造工学系 安信誠二
筑波大学 理工学研究科 ※村井泰仁

1. はじめに

ファジィ理論を制御分野に応用するファジィ制御は、仙台市地下鉄の自動運転[1]や各家庭用電気製品などの実システムへの応用が進められている。また2次元平面上の移動体の制御への応用に関しても、知能ロボットである自立型移動ロボットの縦列駐車[2]や、ファジィ推論を用いた移動ロボットの障害物回避[3]などの研究が進められている。本研究では、列車自動運転などで実用性が確認されている予見ファジィ制御を用いて、熟練者の運転を組み入れた四輪自動車の駐車制御方式[4]をシミュレーションと模型自動車の走行状況とを比較評価する。

2. 熟練者による自動車の手動操作過程

運転者は走行速度や現在位置等の周囲の状況の情報を目、耳、体で確認し、その情報が脳に伝達される。脳は車両性能と目標速度・目標位置を考慮しながら操作量を決定し、手や足にハンドル操作・アクセル操作を実行させる。それらの実行が自動車の出力となって、再び周囲の状況として運転手の情報になる。そして、熟練者があらゆる状況に対して下す判断は、次に示すように階層化して考えることができる。

まず第一段階で、最終的にどこに駐車させるのが目的かという最終目標を決める。そして最終目標にたどり着くためにいくつかの途中目標を設定する。つまりある目標におよそ達したら、次の目標に進むという方法で順に途中目標を変えながら最終目標に向かう。途中目標と走行速度の設定は、現在の車体の位置と向きによって、「もし目標位置が左前方にあり車体が平行ならば、中間位置で車体を左に傾ける。」のような経験則で決定する。

第二段階で、目標位置と向きへの決定に対して、それに上手く到達するためにハンドルの切り角と速度を決定する。その経験則をルール形式で記述すると次のようになる。

- もし ハンドルを保持すれば目標にうまく近づく
ならば ハンドルを保持する
- もし まっすぐ直進すれば目標にうまく近づく
ならば まっすぐ直進する
- もし ハンドルを右にきれば目標に正確に近づく
ならば ハンドルを右にきる
- もし ハンドルを左にきれば目標に正確に近づく
ならば ハンドルを左にきる

これらは直進するか、右折あるいは左折するかのハンドル操作を仮定し、それらの実行結果を予測して、一番適当な操作を実行するという経験則である。

ここで示したのは人間が考える経験則のごく一部分であり、実際はこれらの経験則を拡張して制御ルールとする。熟練者はこのような階層的な考えに従って自動車を運転していると考えられる。コンピュータでこれを実現するには、それらのルールをコンピュータに理解できるように定量化する必要がある。そこで、人間のあいまいさを持つ言葉を定量化できるファジィ制御を適用する。

3. 予見ファジィ制御による駐車制御

3.1 ファジィ制御

人間の「少し」とか「若い」といったあいまいさを持つ言葉を定量的に取り扱う理論として、ファジィ理論がある。このファジィ理論は、1965年に米国のカリフォルニア大のザデー (Zadeh) 教授が書いた論文 "Fuzzy Sets" [5] に始まる。このファジィ理論に基づいて、1974年にロンドン大のマムダニ教授がスチームエンジンの実験装置[6]へ適用したのが、ファジィ制御の始まりである。ファジィ制御は、IF-THEN 形式のファジィ制御規則を用いて制御器を作ることや、曖昧さを含んだ言葉で制御方策を記述することなどが特徴である。

3.2 二階層ファジィコントローラ

人間の駐車制御に関する階層的な駐車戦略を経験則で表現しアルゴリズム化することによって、実システムへ適用するために図1のような①判断部、②実行部からなる二階層ファジィ制御コントローラを考える。それぞれのファジィコントローラに対し状態評価、予見(目的評価)の二つのファジィ制御の考え方を適用する。

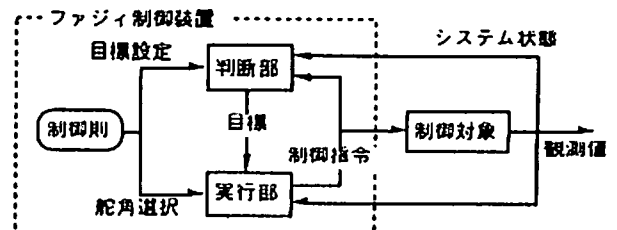


図1 二階層ファジィコントローラ

①判断部

ある目標を設定し、その目標に達したかどうかを

判断する。達していれば途中目標を設定する。達していなければ現在の途中目標を維持する。

形式：IF (現在 X_t is X_i , Y_t is Y_i , $\theta_t = \theta_i$)

THEN (途中目標 $X_T = x_i$, $Y_T = y_i$, $\theta_T = \theta_i$)

②実行部

判断部で設定された途中目標に対して、実行可能な制御指令を予測、予見し、最適な操作を決定する。

形式：IF ($\phi = \phi_i \rightarrow dp$ is very Good, $d\theta$ is very Good)

THEN ($\phi = \phi_i$)

dp : 目標位置と推定位置との距離

$d\theta$: 目標位置と推定位置での θ の差

3.3 評価指標のファジィ集合による定量化

最初に、熟練者の経験則の中で用いる言葉の意味を定量化しておく。駐車制御では距離と角度に関する評価の言葉の意味をメンバシップ関数で表現する。すなわち距離 (dp) と角度 ($d\theta$) に関して、(1)許容範囲にある(good) (2)正確である(very good)というファジィ集合を定義する。

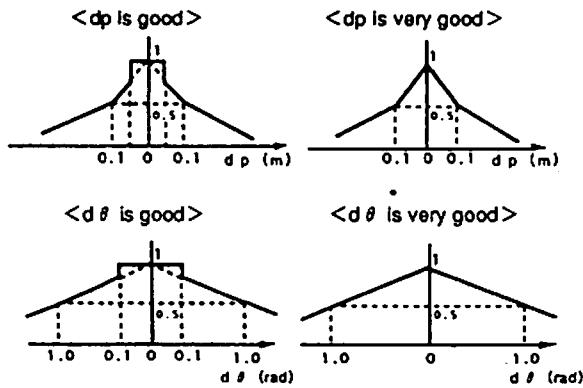


図2 メンバシップ関数

3.4 予見ファジィ制御

本論文では、判断部に状態評価ファジィ制御を用い、実行部に予見ファジィ制御を用いた。予見ファジィ制御方式は熟練者の運転を (1)多数の制御目的の満足度をファジィ集合を用いて表現評価し、(2)システムの状況を見ながら「もし～の条件なら～する」といった制御知識を利用し、(3)制御対象の動特性をシミュレーションする、という三つの戦略をアルゴリズム化する方式である。この方式は対象システムの状態の観測値をもとに、制御則で記述された制御指令の候補値に関してコンピュータシミュレーションを行い、その結果より制御目的となる被評価量を予測(予見)し、その制御目的をファジィ推論によって評価し、一番最適な制御指令を決定するというものである[1]。

本論文で用いる制御則は、「もし(N)制御指令 u を C_i とした場合、評価指標 x は A_i であり、評価指標 y は B_i であるならば、(then) 制御指令 u を C_i とする。」という制御則に基づき、最適な制御指令を決定してい

く。一般的な予見ファジィ制御の制御則を次に示す。

IF (u is $C_i \rightarrow x$ is A_i and y is B_i) then u is C_i ($i=1, N$)

前件部で現時点の u を C_i とした時に、評価する x, y の値がどうなるかということ(予見)して、それが望ましければ実行するという制御則であるという点が、予見ファジィ制御の特徴である。これは2章で述べた熟練者の自動車操作のルール形式と全く同じ形式である。そこで、熟練者のルールに則したファジィルールを次のように記述する。

IF ($\phi = 0^\circ \rightarrow dp$ is Good, $d\theta$ is Good)
THEN $\phi = 0^\circ$

IF ($\phi = +4^\circ \rightarrow dp$ is very Good, $d\theta$ is very Good)
THEN $\phi = +4^\circ$

IF ($\phi = -4^\circ \rightarrow dp$ is very Good, $d\theta$ is very Good)
THEN $\phi = -4^\circ$

IF ($\phi = \phi + 4^\circ \rightarrow dp$ is very Good, $d\theta$ is very Good)
THEN $\phi = \phi + 4^\circ$

ここでは4個のルールだけ示したが、実際には10個のルールが用いた。

現時点で実行可能な制御指令の適当な候補値に対して、それぞれある一定時間実行させた場合の d と $d\theta$ の予測値を4章の式(1)を使った数値積分で求め、これらの値にたいする評価をGoodやvery Goodのメンバシップ関数を用いたファジィ推論で行う。最も評価値の高い制御指令を実行するというものである。

3.5 予見ファジィ制御の推論過程

予見ファジィ制御の推論過程を具体的に示す。制御指令 u が取り得る値として、例えば $\phi 1, \phi 2, \phi 3$ の三つの候補値を考える。これらに関して制御対象のシステム状況にもとづき制御出力の計算を行い、

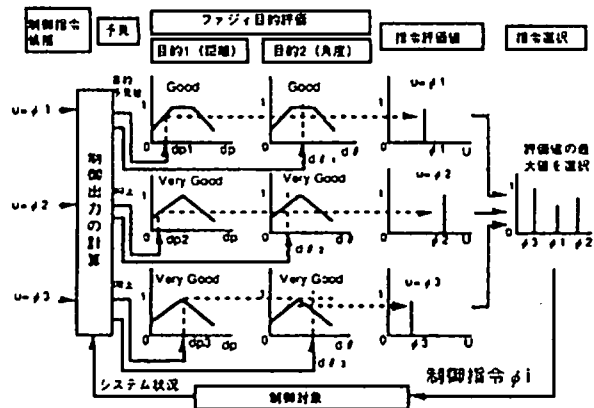


図3 出力舵角の推論過程

dp の予見値を求める。 dp について Good (許容範囲にある) Very Good (正確である) と言ったファジィ集合を定義する。またもう一つの制御目的 $d\theta$ に関しても同様に Good, Very Good の評価を行う。

これらの評価について、IF部の制御目的の評価値同士を論理積演算し適合度を求め、それとTHEN部の制御指令のシングルトンの集合を論理積演算して、各制御指令のシングルトンの集合を求める。そのシングルトンの集合の中で高さが最大のものの制御指令 ϕ_{out} とする。

4. シミュレーション

4.1 四輪自動車の操舵機構

四輪自動車の低速時の旋回運動において(図4)前輪操舵の四輪自動車が遠心力の発生を無視できるような低速で円旋回を行う場合、各車輪は横滑りせずに路面と点接触して転がっていると考える。平面上を(x,y)座標で考えた場合、その動きは式(1)に従う[7]。この式で表される車の動特性を用いて、将来の状態を予測予見する。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \cos \varphi \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} &= v \cos \varphi \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v}{L} \sin \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、現在位置を後二輪の中間の座標(x,y)(以下車体の位置と呼ぶ)、x軸と車の進行方向とのなす角度を車体の傾き角 θ 、左右前輪の舵角 ϕ_L と ϕ_R の平均値を操舵角 φ 、前輪と後輪との距離をL、前輪の平均速度をvとする。

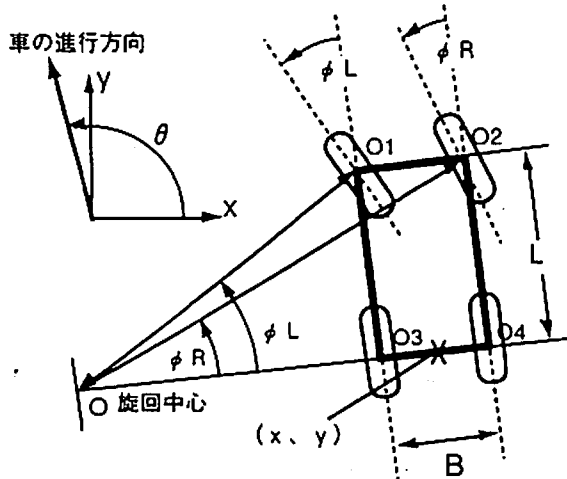


図4 四輪自動車の旋回運動

4.2 シミュレーション条件

上記のように提案したファジィ制御方式をC言語により記述し、車両の動きを模擬する対象システムモデルと共に、パーソナルコンピュータ(PC98)

に組み込み評価した。ここでは、縦列駐車と横移動の2つのパターンについてシミュレーションした結果を示す。車両は、以下に示す初期位置と初期角度から、目標位置と目標角度めがけて操作される。

(1) 縦列駐車シミュレーション

左前方の目標位置にそのまま幅寄せする場合

初期位置: $(x_0, y_0) = (4.0\text{m}, -12.0\text{m})$

目標位置: $(x_e, y_e) = (0.0\text{m}, 0.0\text{m})$

初期角度: $\theta_0 = 90^\circ$

目標角度: $\theta_e = 90^\circ$

(2) 横移動シミュレーション

左横の目標位置に移動する場合

初期位置: $(x_0, y_0) = (4.0\text{m}, 0.0\text{m})$

目標位置: $(x_e, y_e) = (0.0\text{m}, 0.0\text{m})$

初期角度: $\theta_0 = 90^\circ$

目標角度: $\theta_e = 90^\circ$

ただし、自動車の走行速度Vは、0m/s(止まる) 0.4m/s(進む) -0.4m/s(戻る)の3値、ホイールベースL=2.6m、トレッド幅B=1.5m、最小旋回半径R2=5.3m、最大舵角 $\phi_{max} = 20^\circ$ とした。

4.3 シミュレーション結果

(1) 縦列駐車

縦列駐車シミュレーション結果を図5-1に示す。停止位置は $(x, y) = (0.0, 0.0)$ $\theta = 94^\circ$ であった。ここでは、縦列駐車において切り返しをするという人間の駐車戦略にもとづく途中の目標を $(2.0, -8.0)$ 、 $\theta = 125^\circ$ に置くことで取り入れている。この途中目標を経て、上手くハンドルを操作し、最終目標に到着しているのがわかる。

(2) 横移動

横移動シミュレーション結果を図5-2に示す。停止位置は $(x, y) = (-0.0, 0.2)$ $\theta = 84^\circ$ であった。

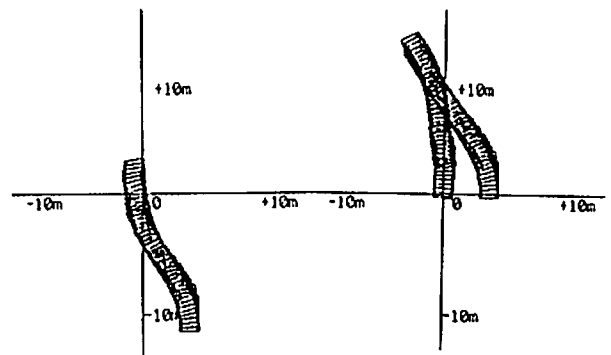


図5-1 縦列駐車

図5-2 横移動

横移動の場合は最終目標にバックで駐車させやすい位置に持って行くために、前方に途中目標を置き一度前進させた。そして、この途中目標に達した後、最終目標を目標とし、バックさせた。このように、

バックの切り返しを用いて、横移動の場合もうまく操作できている。

4.4 検討

これらの結果より、シミュレーションでは途中目標やルールを巧みに切り替え、目標にうまく到達できることがわかる。

5. 模型自動車の走行実験

5.1 模型自動車の実験

1/10スケールの模型自動車へファジィコントローラを使ってその走行状況を確認する。模型自動車にはものを使用した。図6のようにコンピュータはV25CPUボードを搭載する。磁気方位センサより得られる車体の絶対角度 θ と、後二輪にそれぞれ取り付けられたロータリーエンコーダにより得られる後二輪が進んだ距離(l_R , l_L)をコンピュータで読み取る。さらに現在位置(x , y)を算出し、(x , y , θ)はファジィコントローラへ入力される。ファジィ推論によって制御指令(ϕ_{out} , V)を求め、出力する。 ϕ_{out} , V の指令情報はV25CPUボードが作り出すパルスの幅の指令であり、前輪に接続された操舵用のサーボモータ、走行用のDCモータにそれぞれ伝達される。

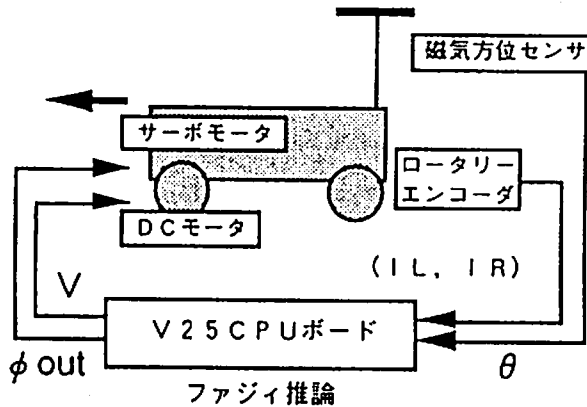


図6 模型自動車システムの概略

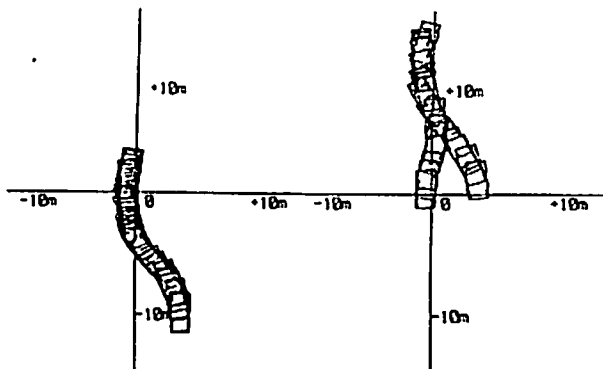


図7-1 縦列駐車

図7-2 横移動

5.2 走行結果

図7-1、7-2に模型自動車の走行状況を示す。

5.3 検討

図7-1、7-2より、模型自動車の動きはシミュレーションの場合(図5-1、5-2)とほとんど変わらないことがわかる。今回の実験では絶対方位と位置の計測の正確さに多少の問題があったが、ファジィ制御システムを導入することにより上手く駐車制御ができた。

また、ルールを巧みに変えることによって、より複雑な地形に対する駐車制御も可能であると考えられる。実際の四輪自動車の駐車制御においても、この制御方式が有効であると期待できる。

6. おわりに

予見ファジィ制御を提案しシミュレーションを行い、1/10スケールの模型自動車でもその有効性を確認した。今回の実験では、磁気方位センサによって計測された車体の絶対角度 θ は場所によって誤差が大きく、それを使って算出した車の現在位置(x , y)の値も厳密には正確とはいえない。しかし提案制御により、誤差を持つデータを扱いながらも熟練者に近い運転操作が実行できた。さらに、用いた予見ファジィ制御則を対象システムの状況によって臨機応変に書き換えることができるので、その柔軟性は高く、有効性も非常に高いと言える。

また安全性の観点から、人間が自動車を運転し駐車させるのは運転手が手と足を使って行うことになるであろう。したがって、駐車制御をすべてコンピュータに任せるのではなく、人間とコンピュータが協調し、舵角と速度に関するガイダンスをコンピュータが人間に知らせ、それを人間が実行できるようなシステムを構築することが重要である。

参考文献

- [1] 安倍、"ファジィ工学" 昭晃堂(1991)
- [2] 宮山、三浦、河野、大北、"自立型移動ロボット「DREAM-1」の縦列駐車実験" 9th Fuzzy System Symposium, 265/268(1993)
- [3] 前山、竹垣、"ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御" 日本ロボット学会誌 Vol.6 No.6, 518/522 1988
- [4] 安倍、村井、椎名、"予見ファジィ制御の駐車制御への応用" 電気学会 IIC-93-46, 69/78(1993)
- [5] L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets" Information and Control" Vol.8, 338/353 (1965)
- [6] E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant" Proc.IEE, 121, 12 (1974)
- [7] 高野、"自律移動ロボットの機構と移動制御技術" 日本ロボット学会誌 5巻5号, 52/58(1987)