

自律型移動ロボット「DREAM-1」の 縦列駐車制御

大北 正昭・三浦 正嗣・河野 英正
宮田 仁志*¹・小林 康浩*²

電気電子工学科・*¹米子工業高等専門学校・*²知能情報工学科

(1992年9月1日受理)

Control of an Autonomous Mobile Robot 「DREAM-1」
for Its Flush Parking

by

Masaaki OHKITA, Masatugu MIURA, Hidemasa KOUNO
Hitoshi MIYATA*¹ and Yasuhiro KOBAYASHI*²

Department of Electrical and Electronic Engineering

*¹Yonago National College of Technology

*²Department of Information and Knowledge Engineering

(Received September 1, 1992)

An autonomous mobile robot 「DREAM-1」 has been designed and constructed, which is controlled by the fuzzy control theory. In this robot, the location and position of the robot can be recognized with an aid of the distance information obtained by six supersonic transducers installed in the upper part of the mobile robot.

In this paper, we consider computer simulation of the fuzzy control of our robot 「DREAM-1」 for the flush parking and the removal from a parking lot. In such control, the fuzzy rules can be derived by modelling driving actions of a car. It is emphasized that the forward and reverse movements of the robot can be controlled smoothly by using simple membership functions.

Key words : Autonomous mobile robot with four wheels, Fuzzy control, Supersonic transducers, Flush parking, Removal from a parking lot.

1. はじめに

ファジィ理論は制御への応用に適した理論として最近特に注目されている。また、ファジィ理論の応用分野は広範囲にわたっているが、列車の制御、浄水場の制御、家庭用電気製品などで、既に実用化されている[1]-[4]。

我々は、ファジィ制御理論を用いた自律型四輪移動ロボット「DREAM-1」を試作した[5]。「DREAM-1」は、走行のスタート、コースの選択の信号を外部より与えてやれば、自律走行を開始する。ファジィ推論計算の実行及びその計算結果による走行方向の決定のために3つのマイクロコンピュータシステムを用いている。移動ロボットの位置および姿勢は、ロボット自体と走行路端との間の距離を、ロボット上部の前後及び側面に搭載した6組の超音波センサにより計測し決定される。また、走行のための外部からの命令を赤外線センサにより与える。前輪の方向角の制御をパルスモータにより、ロボットの駆動を後輪部の直流モータのPWM制御により行っている。

右折、左折、クランクなどの比較的簡単なコースでの走行[6]については、昨年度の鳥取大学工学部主催のファジィとニューロに関する公開講座の際の公開実験でそのスムーズな制御が確認できた[7]。

本報告では、「DREAM-1」の縦列駐車の実験に当たり、前もって行った走行軌跡の計算について紹介する。その計算は、移動ロボットの走行軌跡の計算機シミュレーションを四輪型モデルを用いて行った。なお、本報告の一部は、文献[8]により既に発表されている。

2. 走行制御の原理[9]

本報告で用いたファジィ変数は単調型と呼ばれるもので、メンバーシップ関数は単調減少または単調増加で直線型と呼ばれるものを用いた、ここでは、メンバーシップ関数を次のように表す。

$$X_{ij}(x) = a_{ij}x + b_{ij}, \quad -1 \leq x \leq 1, \quad (1)$$

ここで $0 \leq a_{ij}x + b_{ij} \leq 1$,

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

a_{ij} 及び b_{ij} は、ロボットの走行するコースの形及び

ロボットの構造、位置関係により決まる定数である。
j番目のルールは、次のように書ける。

$$R^j : \text{if } x_1 \text{ is } X_{1j}(x_1), x_2 \text{ is } X_{2j}(x_2), \dots, \\ \text{and } x_n \text{ is } X_{nj}(x_n), \text{ then } y \text{ is } Y_j(y). \quad (2)$$

ここで、 x_1, x_2, \dots, x_n は、制御対象の状態に関する情報を示す。 y は、制御対象に対する入力を示す。

$Y_j(y)$ は、 y に対するファジィ変数を示し、 $Y_j(y) = c_j y + d_j$ であり、係数 c_j および d_j は、走行ロボットの大きさ及び前輪方向切り角機構の特性により決まる。

ファジィ制御器に対する入力

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = x_1^0 \\ x_2 = x_2^0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_m = x_m^0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

とすると、

j番目のルール R^j に対する適合度は、

$$w_j = X_{1j}(x_1^0) \cap X_{2j}(x_2^0) \cap \dots \cap X_{mj}(x_m^0) \\ = \bigcap_{i=1}^m X_{ij}(x_i^0). \quad (4)$$

次に、制御ルールの後件部において、 y_j は次の関係を満足する値である。

$$w_j = Y_j(y_j). \quad (5)$$

$y_j (j=1, 2, \dots, n)$ は、次のように書ける。

$$y_j = Y_j^{-1}(w_j), \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

結果的には、ファジィ制御器への入力 y^0 は、

$$y^0 = \frac{\sum_{j=1}^n w_j y_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (7)$$

により決まる。

3. 四輪車の旋回運動 [10]

ここでは走行軌跡の計算機シミュレーションに、新たに取り入れた四輪車の旋回運動について述べる。

四輪車がごく低速度で旋回する際には遠心力の影響は無視できる。この状態では遠心力と釣り合うコーナリング・フォースは必要ないので、これを発生するためのタイヤの横滑りも不要となる。すなわちこの場合には各車輪が横滑りなしに回転する理想的な旋回運動をしていると考えられる。

Fig. 1(a)はこの状態を示したものであり旋回中心Oは後車軸の延長線上にあって左右の前輪軸の延長線の交点。常に後車軸の延長線上にあるような内外輪舵取り角 θ , θ' を与える。

Fig. 1(a)において $R_1, R_2, R_3, R_4 (=R_3+B_r)$ を前後の内外輪の旋回半径とすると、

$$R_1 = \frac{L}{\sin \theta} \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{L}{\sin \theta'} \quad (9)$$

$$R_3 = R_1 \cos \theta - \frac{B_r - B_f}{2} \quad (10)$$

$$R_4 = R_2 \cos \theta' + \frac{B_r - B_f}{2} \quad (11)$$

ここで L, B_r, B_f は軸間距離 (ホイールベース) および前後の輪距 (トレッド) を示す。

また Fig. 1(a)より得られる関係式:

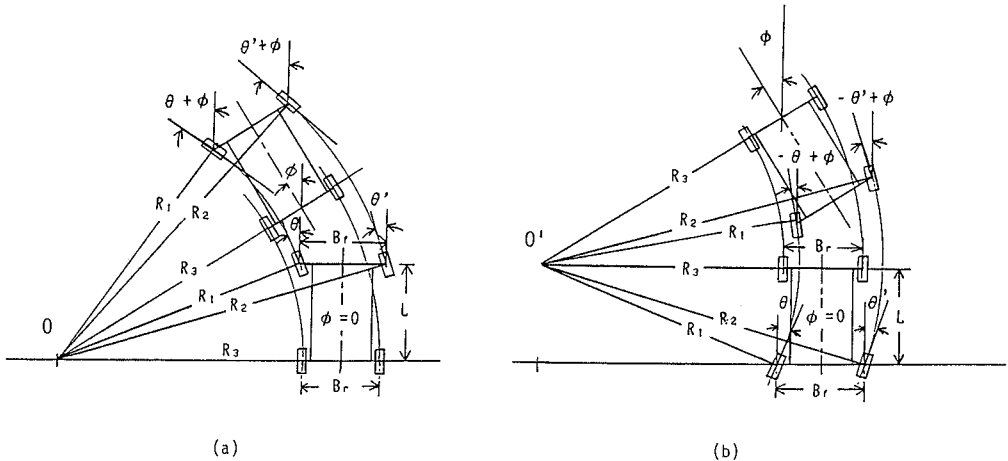


Fig. 1. Relation between the steering angle θ and the direction ϕ of the mobile robot ($B_f > B_r$). (a) Forward and (b) reverse movements.

$$R_2 \cos \theta' - R_1 \cos \theta = B_f \quad (12)$$

に式(8)及び(9)の R_1 , R_2 の値を代入すれば

$$\cot \theta' - \cot \theta = \frac{B_f}{L} \quad (13)$$

となり、この式は、アッカーマンのかじ取り方式の条件を表している。

(13)式から

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{L}{B_f + L \cot \theta} \quad (14)$$

の関係が得られる。また、本報告では移動ロボットのバック走行も考えるので、説明の便宜上、前進走行の場合と同様に図示しておく (Fig. 1(b)参照)。

4. 移動ロボットの計算機シミュレーション

計算機シミュレーションによって描かれるモデルの軌跡をより移動ロボットの描く軌跡に近づけるためにも、四輪モデルを考える。また、計算機シミュレーションによって得られるモデルの制御ルール、メンバーシップ関数の最適化を試みる。初めに、移動ロボットが駐車場へ入る場合、次に、駐車場から出る場合について考える。

4-1 移動ロボットが駐車場に入る場合

4-1-1 入力変数

ファジィ制御を実際に適用するとき、最初に問題となるのは、ファジィ制御ルールをどのように作成するかということである。従来の制御のようには設計手法は確立されていないが、設計の手順は整理されている。

その手順としては、制御ルールの形式と推論法を定めて、具体的に制御ルールを記述することである。従って、問題となるのは前件部と後件部を適当に決定することである。

そのために、まず、制御のための情報すなわちファジィ制御ルールの前件部変数の選択を行わなければならない。また的確な入力変数を選ぶことによって、モデルは

簡略化される。

ここでは、ファジィ推論に用いる入力変数 X_1 , X_2 , X_3 および X_4 を Fig. 2のように考える。具体的には、

X_1 は、移動ロボットのモデルの左側面から、側面と対面しているコースの端までの距離、

X_2 は、モデルの右側面から、側面と対面しているコースの端までの距離、

X_3 は、モデルの後面から対面している駐車場の端までの距離、

X_4 は、モデルの前面から対面している駐車場の端までの距離である。

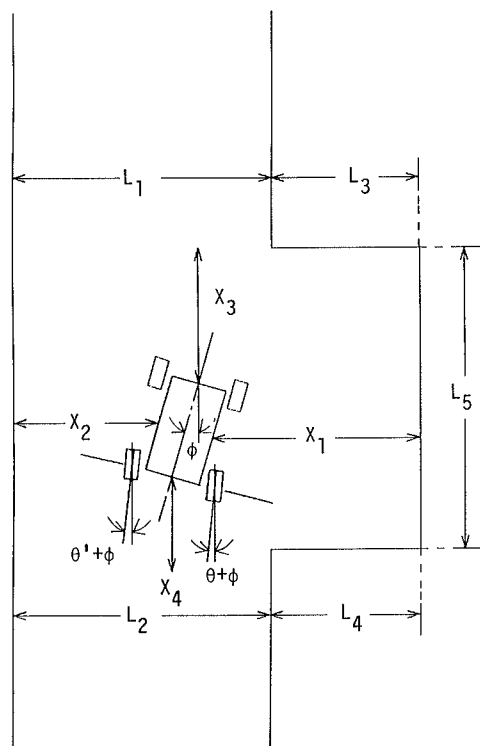


Fig. 2. Definition of the input variables for a flush parking.

4-1-2 計算機シミュレーションを行うための条件

縦列駐車を行う場合の移動ロボットの描く軌跡の計算機シミュレーションを行うために、いくつかの条件を定める。

移動ロボットのモデルの軸距（ホイールベース）と輪距（トレッド）の比は、移動ロボットの軸距と輪距の比と等しくする。また、駐車場の大きさ、位置はすでに分かっているものとする。駐車場の大きさによってはモデルが入りきらないということも考えられるが、ここでは、モデルが入ることが出来るだけの大きさがあるかという判断をせず、駐車場の大きさはモデルが十分に入れるような状態にあるとする。モデルの速度は一定にしてあり、加速、減速は行わないようにする。車輪の動きについては、移動ロボットの車輪の動きに合わせて、左右35度まで動かし、推論結果がそれ以上の動きを要求したときには、35度で止まるようにする。現実の車の場合にバックから駐車場へ入ることが多いので、モデルはバック走行により駐車場へ入るようにしている。

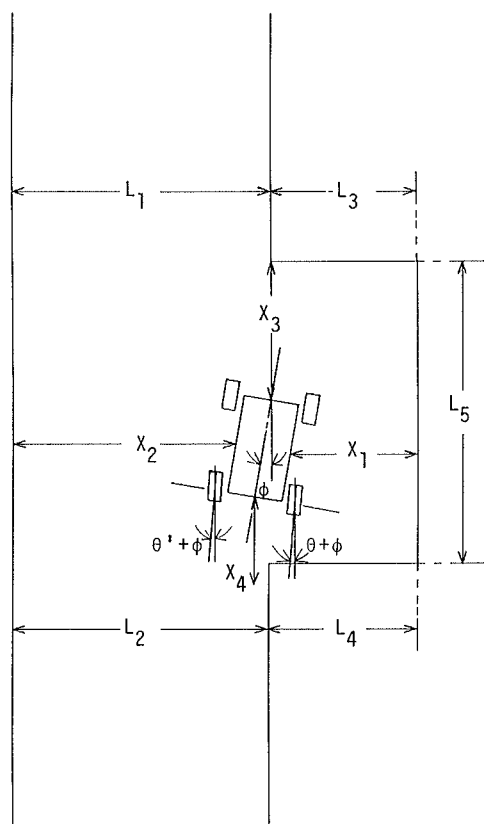


Fig. 3. Travelling of the mobile robot in a case of the fuzzy reasoning by the rule 2.

4-1-3 制御ルール[8]

Fig. 2に示すような駐車場を持つコースの中で、モデルが縦列駐車を行うときの走行制御について考える。走行制御をさせるにあたり推論ルールを作成するが、モデルがコースの初めの位置からバック走行によって駐車場近くまで行き着くまでの制御のための推論ルール1、次にモデルの一部または全部が駐車場へ入ってから前輪を切り替えて前進するための制御のための推論ルール2

(Fig. 3,4参照)、最後に駐車場でバック走行を制御するための推論ルール3 (Fig. 4参照) の、3種のルールを作成して考える。このときのファジィ制御ルールは、そ

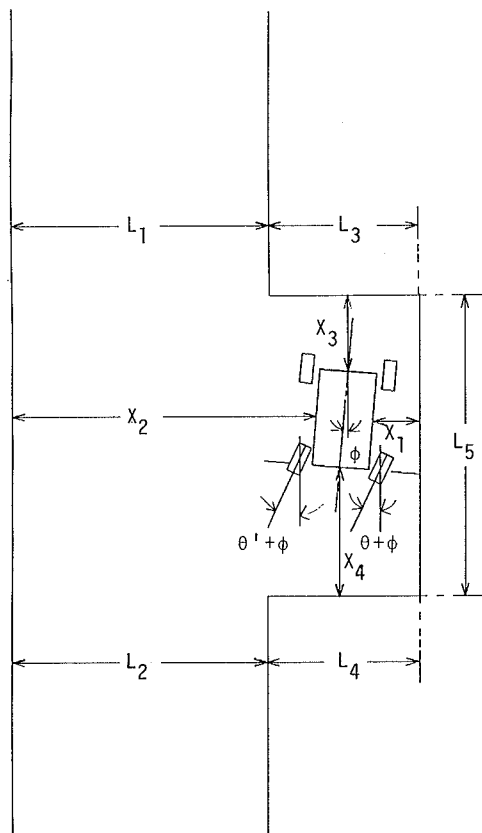


Fig. 4. Travelling of the mobile robot in a case of the fuzzy reasoning by the rules 2 and 3.

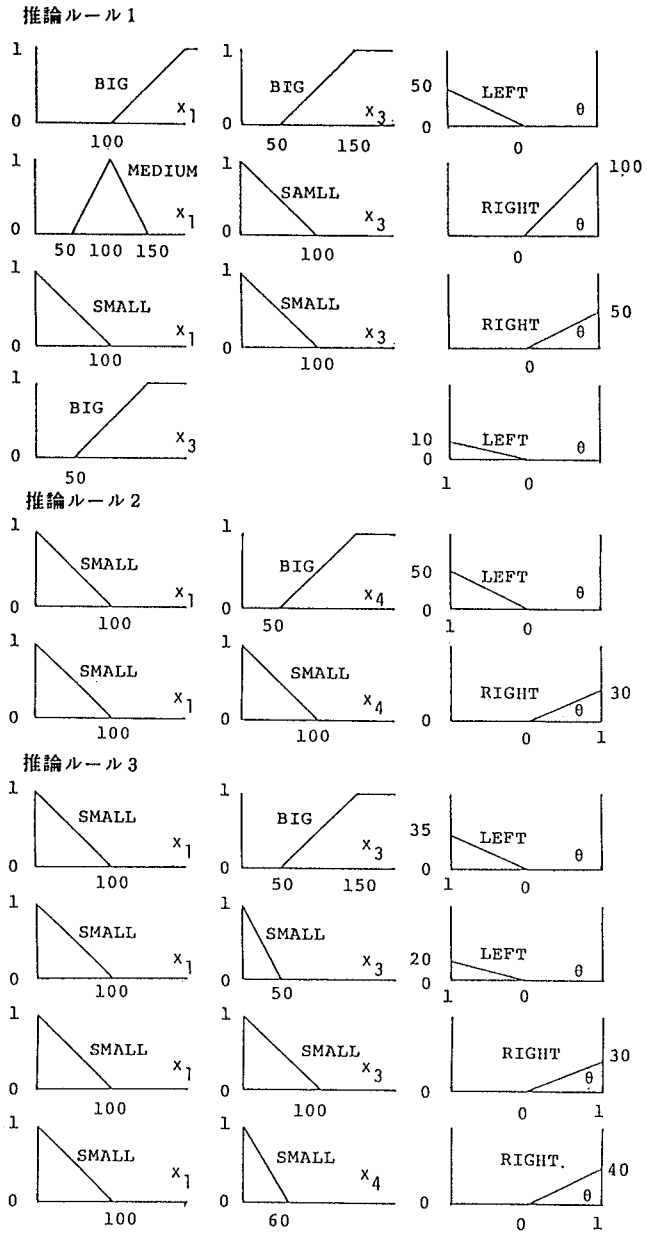


Fig. 5. Fuzzy variables to infer a steering angle θ for a flush parking.

れぞれ、次のように書ける。

推論ルール1 (バック走行)

If X_1 is BIG and X_3 is BIG then θ is to be LEFT.
 If X_1 is MEDIUM and X_3 is SMALL then θ is to be RIGHT.
 If X_1 is SMALL and X_3 is SMALL then θ is to be RIGHT.
 If X_3 is BIG then θ is to be LEFT.

推論ルール2 (前進走行)

If X_1 is SMALL and X_3 is BIG then θ is to be LEFT.
 If X_1 is SMALL and X_3 is SMALL then θ is to be RIGHT.

推論ルール3 (バック走行)

If X_1 is SMALL and X_3 is BIG then θ is to be LEFT.
 If X_1 is SMALL and X_3 is SMALL then θ is to be LEFT.
 If X_1 is SMALL and X_3 is SMALL then θ is to be RIGHT.
 If X_1 is SMALL and X_4 is SMALL then θ is to be RIGHT.

モデルが駐車場に入る場合の制御ルールのメンバーシップ関数を変えながら計算機シミュレーションを行い、モデルが描く軌跡の最適な場合のファジィ変数を Fig. 5 に示した。それぞれのルールで考えたファジィ変数のメンバーシップ関数を Fig. 5 に示す。

Fig. 5 で BIG, MEDIUM, 及び SMALL が前件部のファジィ変数であり、RIGHT 及び LEFT が後件部のファジィ変数である。後件部の傾きが変わっているのは、グレードの違いによるものである。また前件部のメンバーシップ関数の横軸は距離で縦軸はグレードである。

4-1-4 計算機シミュレーション

モデルが駐車場に進入する場合のフローチャートを Fig. 6 に示す。フローチャートに示した計算手順において $BA=-1$ のときは、モデルはバック走行を、 $BA=1$ のときは、

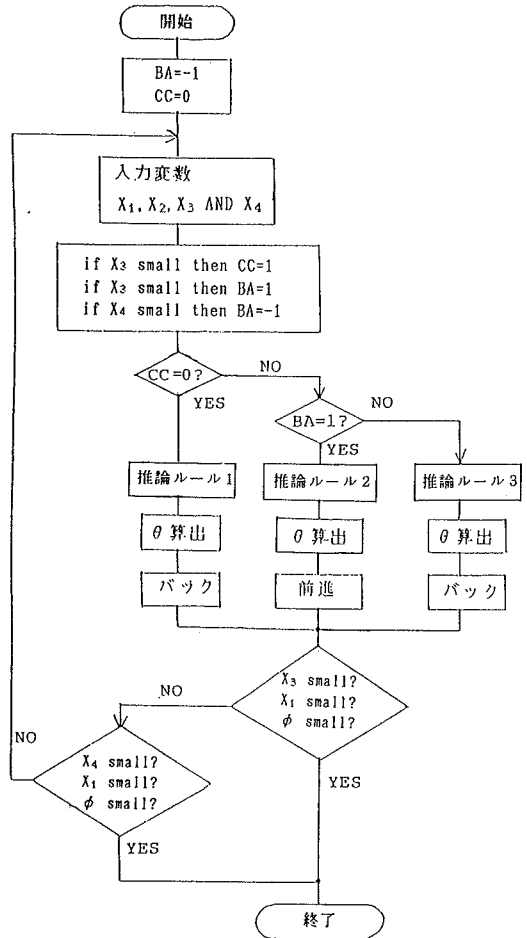


Fig. 6. A procedure used for computer simulation to the flush parking.

前進走行をすることを意味する。さらに、 $CC=0$ のときはモデルは駐車場に進入することを、 $CC=1$ のときはモデルが駐車場に進入の後、適当な停止位置に至るまで駐車場の中のどこかで前進・バック走行をしていることを意味する。

第4章1節3項(4-1-3)の制御ルールを用いて行った計算機シミュレーションの結果は Fig. 7 のように表すことができる。Fig. 7(a), (b) 及び (c) は、それぞれ、モデルの最初にいる位置を変えて計算したものである。

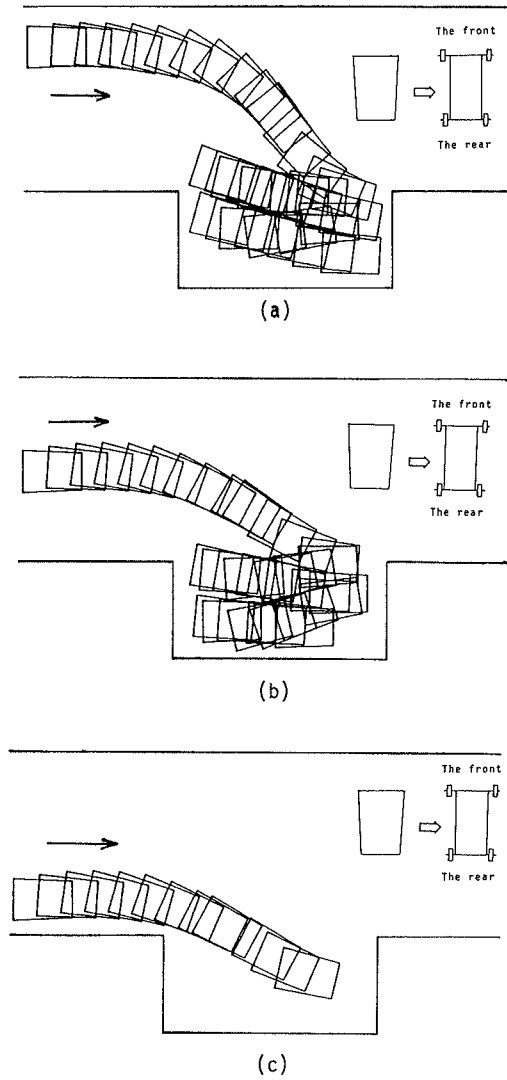


Fig.7. Results of the computer simulation for the flush parking. A robot starts (a) on the opposite side of a parking lot, (b) near the center of the walls, and (c) on this side of a parking lot.

4-2 移動ロボットが駐車場から出る場合

4-2-1 入力変数

モデルが駐車場へ入る場合に考えた入力変数と同様の変数 X_1, X_2, X_3 及び X_4 を使用する (Fig. 2参照)。

4-2-2 制御ルール

この場合は上記の走行制御よりも、より簡単な手順でモデルを制御することができる。つまり駐車場でモデルが前進・バック走行を繰り返すという点では同じであるが、駐車場へ入る場合とは逆で狭い空間から広い空間への移動であるから適当な場所に位置することができれば、

1回の前進走行のみによって駐車場から出ていくことができる。この場合の推論ルールは次のように書ける。

If X_1 is SMALL and X_3 is MEDIUM then θ is to be RIGHT.

If X_3 is SMALL then θ is to be RIGHT.

If X_2 is SMALL then θ is to be LEFT.

If X_3 is MEDIUM and X_2 is SMALL then θ is to be LEFT.

If X_3 is BIG and X_2 is MEDIUM then θ is to be LEFT.

駐車場からモデルが出る場合のファジィ変数を Fig. 8 に示した。

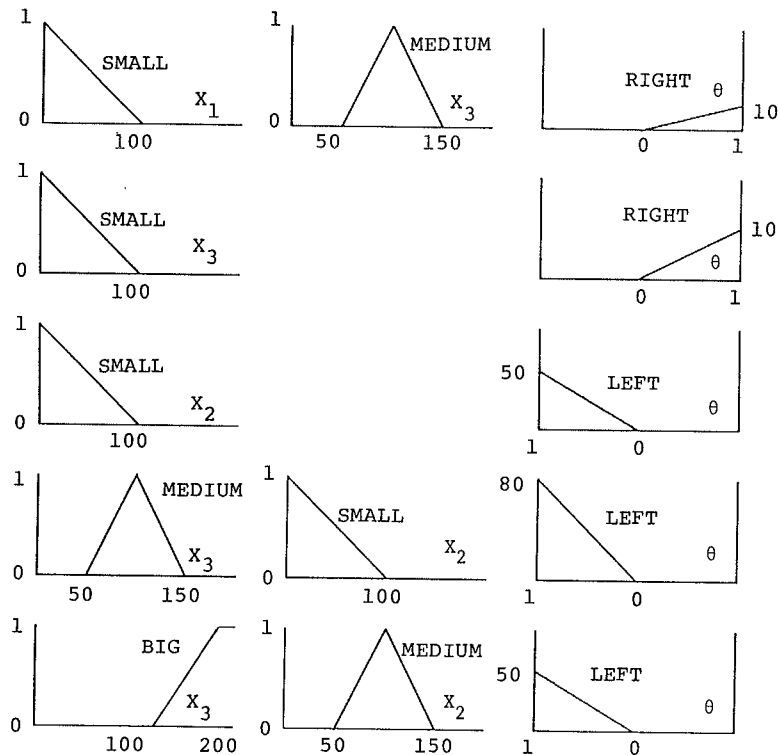


Fig. 8. Fuzzy variables to infer a steering angle θ for a flush parking.

4-2-3 計算機シミュレーション

駐車場からモデルが出る場合の計算手順のフローチャートを Fig. 9 に示す。モデルは前進走行によりその移動を開始する。BA=1はこの状況を意味する。また、BA=-1のときはバック走行を意味する。これらの状況は、我々が車を運転して縦列駐車を行っている場合を想起すれば明らかであるが、移動ロボットが駐車場の内避近傍から出る場合、または、前輪切り角が小さい場合には前進・バック走行を何回か繰り返す必要があるからである。

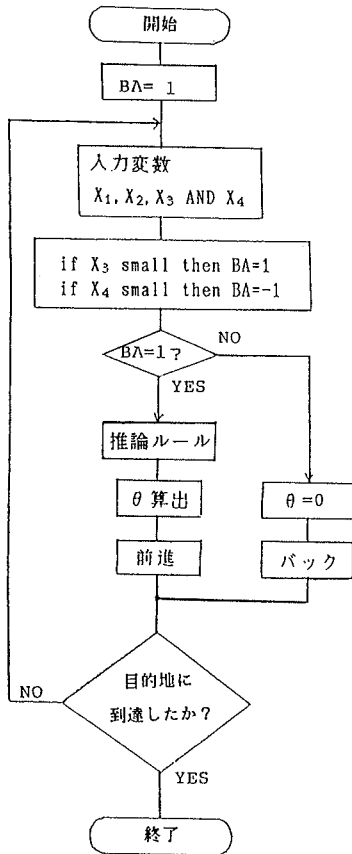


Fig. 9. A procedure used for computer simulation to enter into the parking lot.

駐車場から出る場合のシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 (a), (b) 及び (c) はそれぞれ、モデルの最初にいる位置を変えて計算したものである。

5. 検討

推論法には主として3つの方法が提案されている[9]。推論法1を用いて推論を行うと前輪切り角の算出に積分演算が必要なので、区分積法を用いたために推論に時間がかかる。また、推論法3の場合には、後件部を決定するのに余分の計算が必要である。しかし、推論法2を用いて推論を行った場合には、計算が簡単なために推論速度が速く、しかも、シミュレーションの結果が、推論法1を用いた推論で行った場合に比べて劣らないということが計算により明らかになったので、ここでは、推論法2を用いた。

上記の計算では移動ロボットがごく低速度で走行する場合即ちロボット自体の慣性が無視できる場合を考えている。移動ロボットには自重があるので、慣性について検討し、「すべり」の効果を考慮したシミュレーションを行う必要がある。それゆえ、移動ロボットを走行させるには多少の調整が必要であると考えられる。

前述したように、ロボット自体と走行路端との間の距離は、ロボットの前後及び側面に搭載した6組の超音波センサを用いて決定される。この場合、超音波センサ送波器から発射されたパルス信号が、対象物に垂直に当たる場合には対象物からの反射波がセンサ受波器により受信され、センサと対象物との間の距離を正確に測定できる。しかしながら、移動ロボットが駐車場に入る場合、または駐車場から出る場合には、移動ロボットがその方向及び姿勢を変えるので、この条件から外れる場合が多い。この問題が今後の課題として残される。

本シミュレーションの結果に基づいて「DREAM-1」の縦列駐車実験を行い一応の成果を納めた。Photo 1 は、鳥取大学医学部での公開走行実験風景を示す。ページ数の制もありその詳細は別稿に譲ることとする。

6. おわりに

すでに試作したファジィ制御理論を用いた自律型四輪移動ロボット「DREAM-1」の走行実験を意図して、縦列駐車の場合の計算機シミュレーションを行った。これにより、縦列駐車のような複雑な走行制御が単純なファジィ

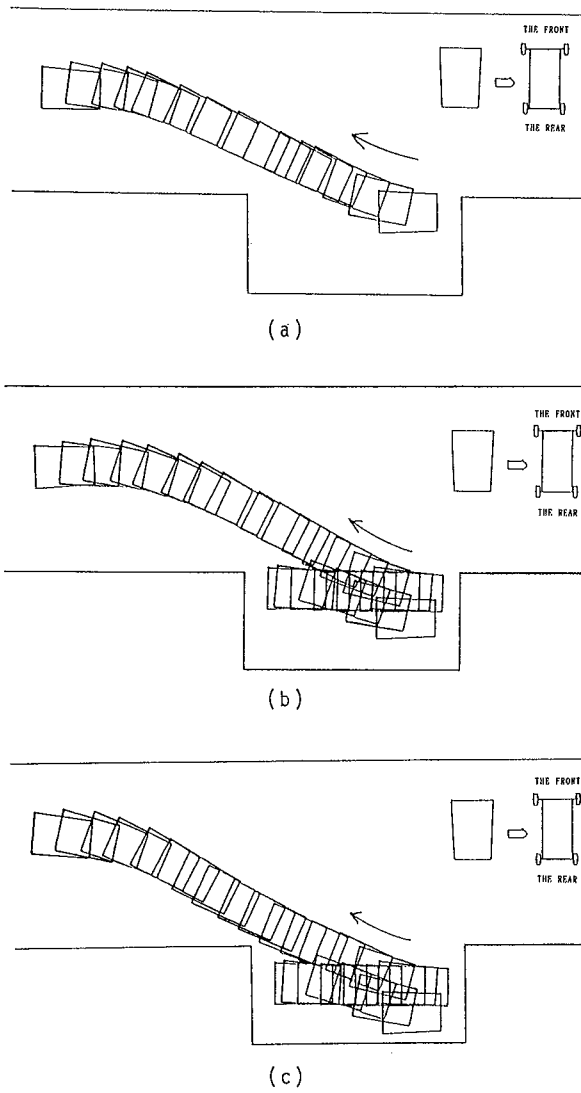


Fig.10. Results of the computer simulation for removal from a parking lot. A robot starts (a) in the vicinity of the inner course in a parking lot, (b) near the center of a parking lot, and (c) from the interior of a parking lot.

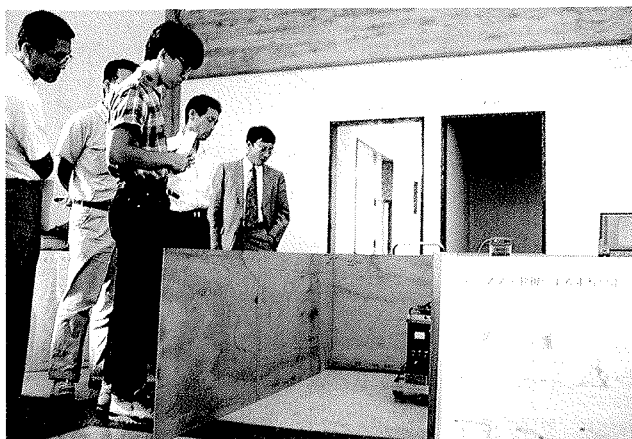


Photo 1. A view of the public exhibition of control for the flush parking of DREAM-1.

制御ルールの組み合わせにより実行できることを明らかにした。

謝辞

移動ロボットの姿勢制御部の機械加工に御協力を頂いた本学工学部機械実習工場の方々に御礼申し上げます。

最後に、平成4年7月に鳥取大学医学部において開催された、本学工学部主催のファジィとニューロに関する公開講座の一貫として、「DREAM-1」の走行制御にも公開実験の場を提供して下さいました本学工学部関係各位に深謝致します。

参考文献

- [1] L.P. Holmblad and J.J. Ostergaard, "Control of a cement kiln by fuzzy logic", in "Fuzzy information and decision processes", (M.M. Gupta and E. Sanchez, Eds.), North Holland, p. 389-399, 1982.
- [2] 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巻, 11号, 873-880頁, 1983.
- [3] 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巻, 10号, 597-604頁, 1984.
- [4] 日本ファジィ学会, 特集 ファジィ応用製品・技術 日本ファジィ学会誌, 3巻, 2号, 2-59頁, 1991.
- [5] 大北, 宮田, 前田, 神井, 小林, "ファジィ理論を用いた走行ロボットの試作", 鳥取大学工学部研究報告, Vol. 21, No. 1, pp. 75-90, 1990.
- [6] 大北, 宮田, 小林, "自律型移動ロボット「DREAM-1」の走行制御", 鳥取大学工学部研究報告, Vol. 22, No. 1, pp. 67-81, 1991.
- [7] 大北正昭: "模型自動車の自律走行", 鳥取大学工学部公開講座「暮しに役立つファジィとニューロ」講義用テキスト, 1991.
- [8] M. Ohkita, H. Miyata, T. Ohishi, M. Kanazaki and Y. Takeda, "Control of a mobile robot by the fuzzy theory", Proc. of the 13th IMACS World Congress on Computation and Applied Mathematics (July 22-26, Trinity College, Dublin, Ireland), vol. 3, p. 1217-1219, 1991.
- [9] 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社 1988.
- [10] 下田茂: 自動車工学(大学講座機械工学21) 共立出版 1975.