

自律型移動ロボット「DREAM-1」の走行制御

大北 正昭・宮田 仁志・小林 康浩*¹

電気電子工学科・知能情報工学科*¹

(1991年9月1日受理)

Travelling Control of An Autonomous Mobile Robot 「DREAM-1」

by

Masaaki OHKITA, Hitoshi MIYATA and Yasuhiro KOBAYASHI*¹

Department of Electrical and Electronic Engineering

* 1 Department of Information and Knowledge Engineering

(Received September 1, 1991)

A travelling robot controlled by the fuzzy theory, named DREAM-1, has been designed and constructed. In this robot, the location and position of the robot can be recognized with an aid of six supersonic distance meters. In this paper, we consider computer simulation of the fuzzy control of our autonomous robot with four wheels 「DREAM-1」 travelling on courses of right turning, crank and cross shape. Next, we describe an experimentation of travelling control of DREAM-1 on a crank shaped course.

Key words : Autonomous mobile robot with four wheels, The fuzzy control, Supersonic distance meters.

1. はじめに

ファジ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、すでに実用化されている¹⁾⁻⁴⁾。

我々は、ファジ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), 6)}。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との間の距離を、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することにより決定される。また、走行のための外部からの命令は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。

本報告では、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い、さらに、そのシミュレーション結果を考慮して行った走行実験について述べる。

2. 走行制御の原理⁷⁾

本報告で用いたファジ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 $0 \leq a_{ij}x + b_{ij} \leq 1$,

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, m, \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

である。 a_{ij} 及び b_{ij} は、ロボットの走行するコースの形状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 番目の制御規則は、次のように書ける。

$$\begin{aligned} R^j : & \text{ If } x_1 \text{ is } X_{1j}(x_1), x_2 \text{ is } X_{2j}(x_2), \dots, \\ & \text{ and } x_m \text{ is } X_{mj}(x_m), \text{ then } y \text{ is } Y_j(y). \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x_1, x_2, \dots, x_m は、制御対象の状態に関する情報を、 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制御機構の特性により決まる。

ファジ制御器に対する入力を

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_1^0, \\ x_2 &= x_2^0, \\ \dots &, \\ \dots &, \\ x_m &= x_m^0 \end{aligned} \right\} > \quad (3)$$

とすると、 j 番目の制御規則 R^j に対する適合度は、

$$\begin{aligned} w_j &= X_{1j}(x_1^0) \wedge X_{2j}(x_2^0) \wedge \dots \wedge X_{mj}(x_m^0) \\ &= \bigwedge_{i=1}^m X_{ij}(x_i^0) \end{aligned} \quad (4)$$

により与えられる。

次に、制御規則の後件部において、 y_j は次の関係を満足する値である。

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

(5) 式の 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、ファジ制御器への入力 y^0 は、

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

により決まる。

3. 移動ロボットの走行特性⁸⁾

本移動ロボットは四輪走行で、ロボットの前輪方向切り角と、ロボットの車体の向きの軌跡の関係は次のようになる。即ち、移動ロボットがごく低速で走行する場合を考えると、方向切り角 θ に対して、図1に示すように同心円の軌跡を描きながら移動しその方向を変える。同心円の曲率半径は前輪方向切り角 θ と移動ロボットの軸間距離及び輪距を用いることにより求められる。

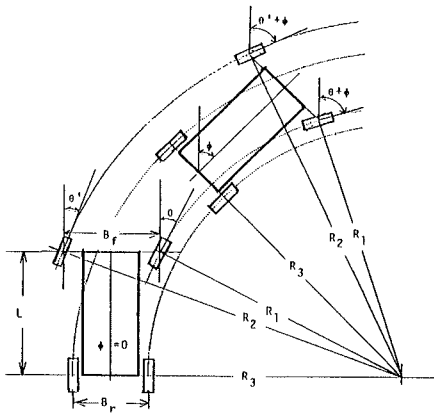


Fig.1. Relation between a steering angle θ and direction ϕ of the mobile robot.

Fig.1 に示すように、 R_1 、 R_2 、 R_3 及び R_4 をロボットの前後部の内外輪の旋回半径とし、 L 、 B_f 及び B_r を軸間距離 (wheelbase) および前後部の輪距 (treads) とするとこれらの諸量の間には次のような関係がある。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= L/\sin \theta, \\ R_2 &= L/\sin \theta', \\ R_3 &= R_1 \cos \theta - (B_r - B_f)/2, \\ R_4 &= R_2 \cos \theta' + (B_r - B_f)/2, \\ \theta' &= \tan^{-1} \{L/(B_f + L \cot \theta)\} \end{aligned} \right\} > (8)$$

ここで、 θ' は前輪車のうちの外輪車の切り角を示す。

4. 移動ロボットの計算機シミュレーション

ここでは、ロボットが、右折、クランク及び交差点形のコースを走行する場合の計算機シミュレーションについて述べる。

4.1 右折れコースを走行する場合

ロボットがスタートして右に曲がり始めるまでの、ファジィ制御規則 (Rules 1) は、

If x_1 is BIG and x_2 is SMALL
then θ is to be LEFT,

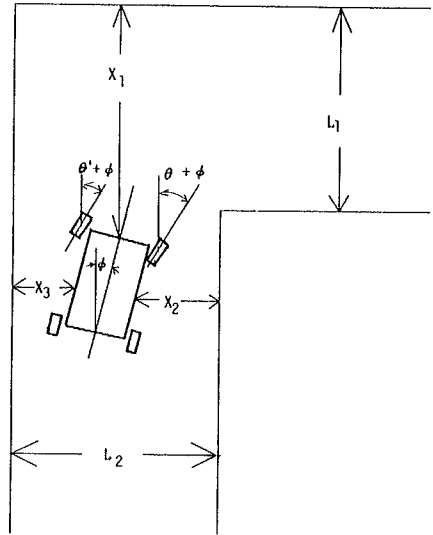


Fig.2. Definition of the input variables.

If x_1 is BIG and x_3 is SMALL
then θ is to be RIGHT,
If x_1 is SMALL then θ is to be RIGHT

となる。ここで、 x_1 、 x_2 および x_3 は、Fig.2 に示すように、走行ロボットからコース壁面までの距離を示す。具体的には、 x_1 は、走行ロボット前面中央点から対向する壁面までの距離、 x_2 は、走行ロボット右側面中央点から内壁までの距離、 x_3 は、走行ロボット左側面中央点から外壁までの距離、 θ は、前輪方向切り角であり、同図に示す走行ロボット自体の方向角 ϕ とは区別する。

移動ロボットが右に曲がりきった場合、ファジィ制御規則は、上記の3つの制御規則の他に車体の向きを考慮に入れ次のような制御規則 (Rules 2) を考える。

If ϕ is POSITIVE BIG then θ is to be LEFT,
If ϕ is NEGATIVE BIG then θ is to be RIGHT.

移動ロボットの前輪方向切り角 θ の推論のファジィ変数の例を Fig.3 に、推論計算の手順を Fig.4 に、得られた計算機シミュレーションの例を Fig.5 に示す。Fig.5 により明らかなように、ファジィ制御理論を適用すれば、ロボットの出発点の位置の如何にかかわらず同一の制御規則を用いて都合よく走行させることができる。

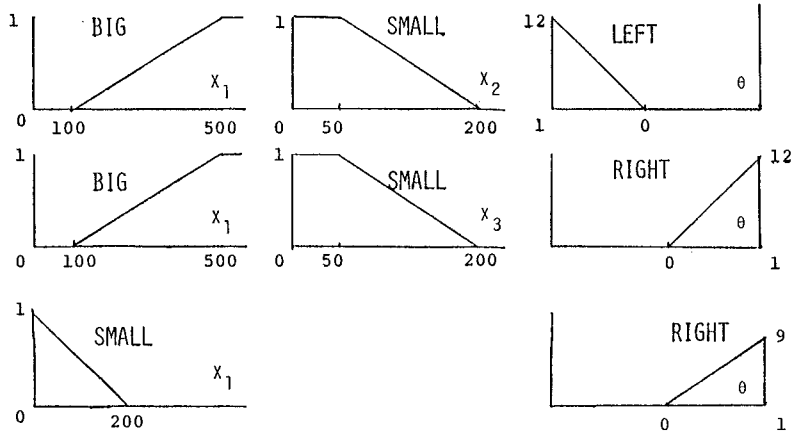


Fig. 3. Fuzzy variables to infer a steering angle θ for turning to the right.

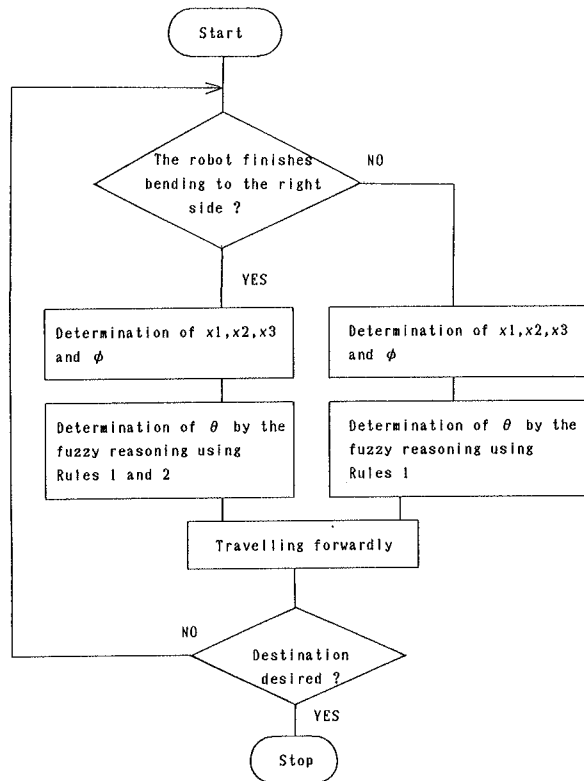


Fig. 4. A procedure of a computer simulation.

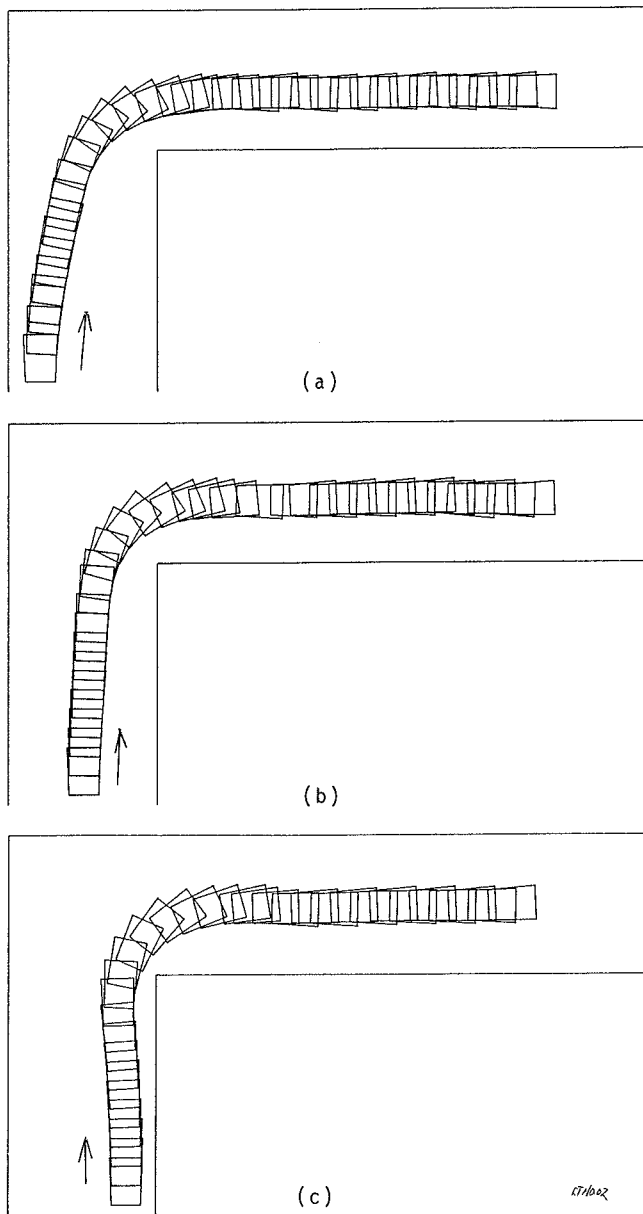


Fig. 5. Results of the computer simulation for turning to the right .
A robot starts (a) in the vicinity of the left sided wall, (b) near the center of the walls, and (c) in the vicinity of the right sided wall.

4. 2 クランク形のコースを走行する場合

クランク形コース内を走行する場合の入力変数は、Fig. 6 に示すように、走行ロボットから前方の壁面までの距離を x_1 、走行ロボット右側面中央点から右側壁面までの距離を x_2 、走行ロボット左側面中央点から左側壁面までの距離を x_3 とする。

ファジィ制御規則は、

If x_1 is BIG and x_2 is SMALL
then θ is to be LEFT,
If x_1 is BIG and x_3 is SMALL
then θ is to be RIGHT,
If x_1 is SMALL and x_2 is BIG
then θ is to be RIGHT,
(右折れ走行の場合)

If x_1 is SMALL and x_3 is BIG
then θ is to be LEFT,
(左折れ走行の場合)

If x_1 is MEDIUM and x_2 is SMALL
then θ is to be LEFT,
If x_1 is MEDIUM and x_3 is SMALL
then θ is to be RIGHT

のように表される。以上のような6個の制御規則を用いて推論計算を行い、前輪方向切り角 θ を決定する。この場合のファジィ変数の例を Fig. 7 に、推論計算の手順を Fig. 8 に示す。計算機シミュレーションの結果の例を Fig. 9 に示す。

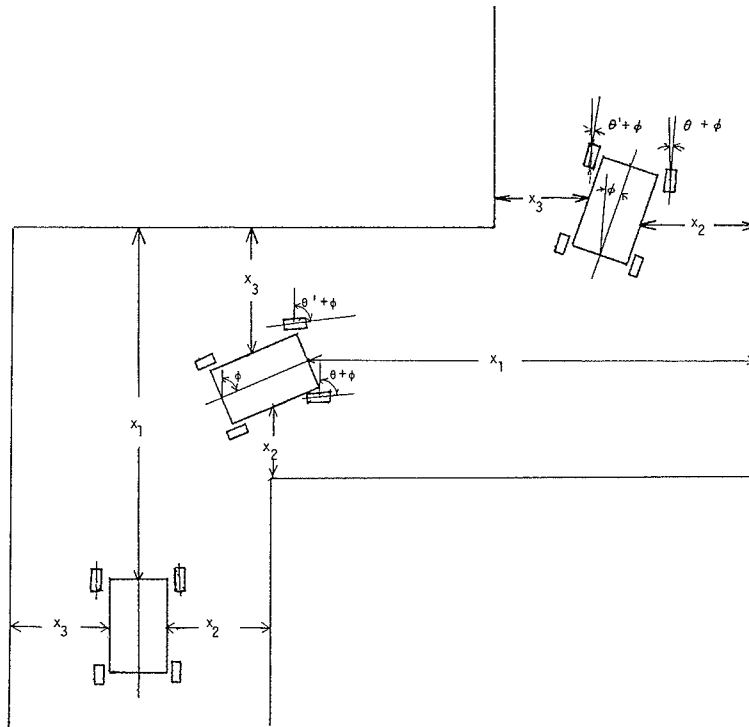


Fig. 6. Definition of the input variables.

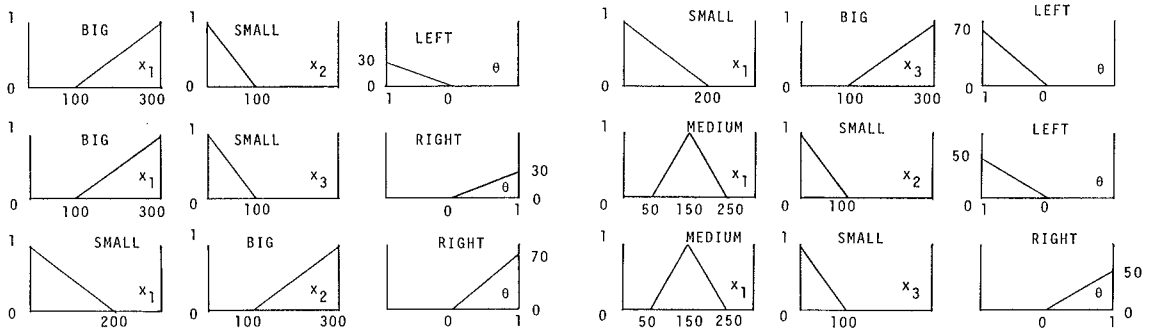


Fig.7. Fuzzy variables to infer a steering angle θ for travelling on a crank shaped course.

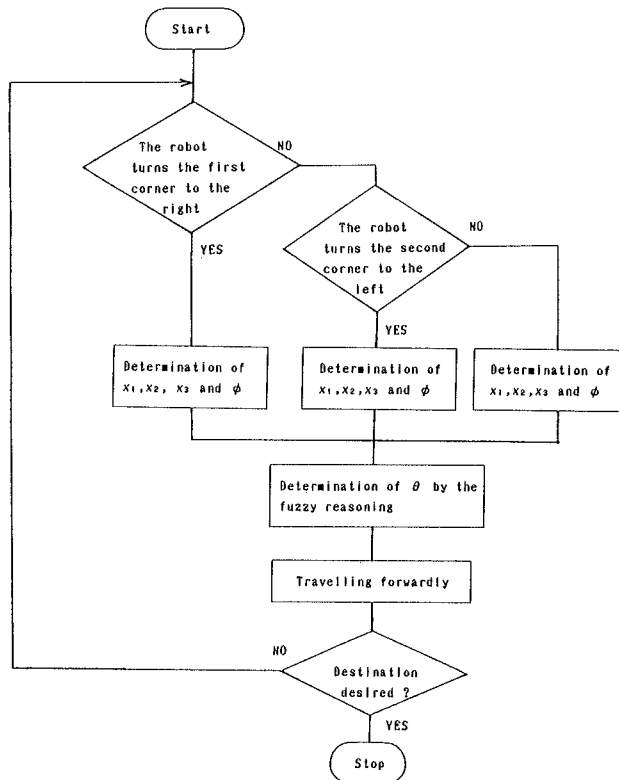


Fig.8. A procedure of a computer simulation.

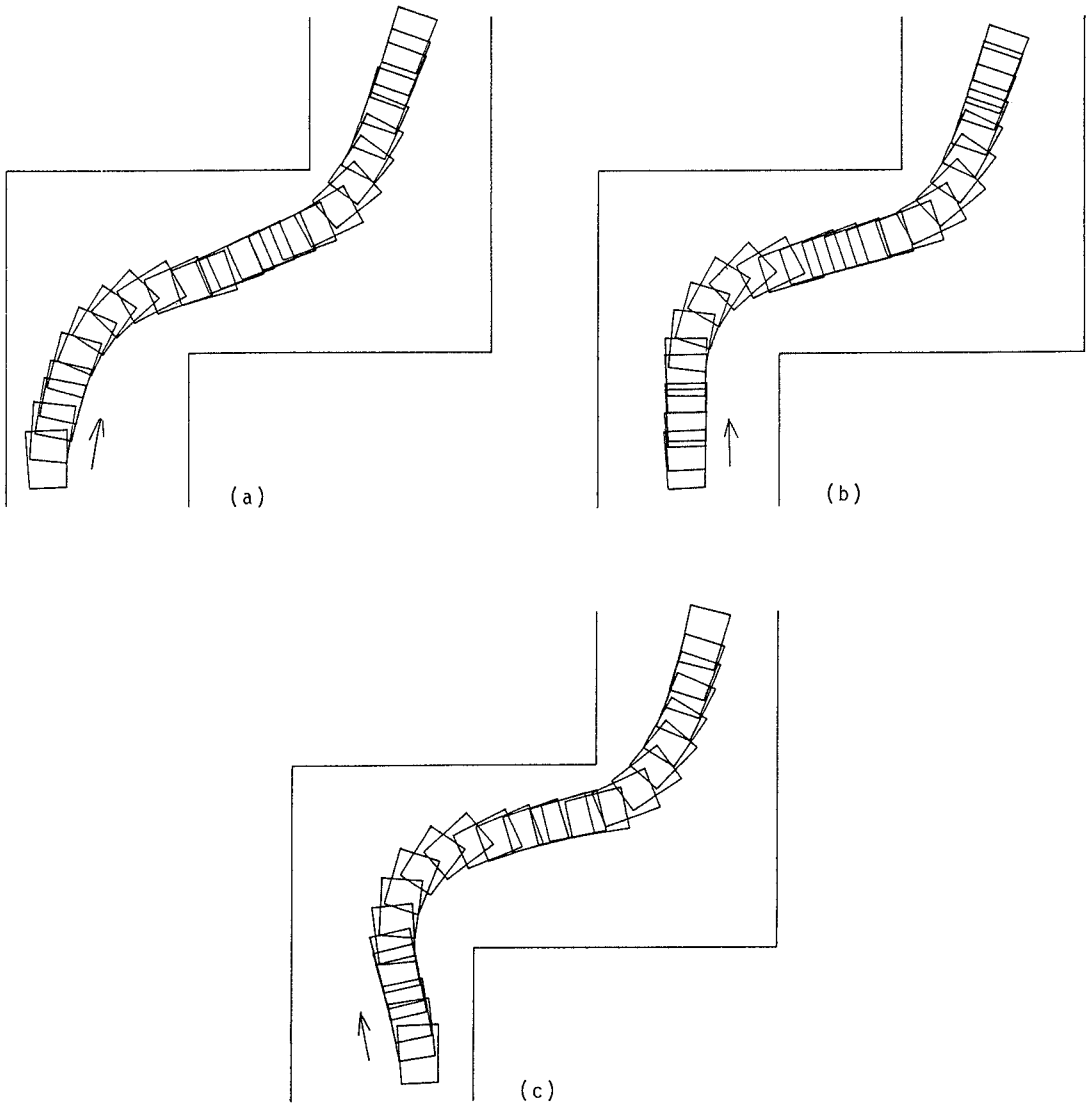


Fig. 9. Results of the computer simulation for travelling on a crank shaped course. A robot starts (a) in the vicinity of the left sided wall (b) near the center of the walls, and (c) in the vicinity of the right sided wall.

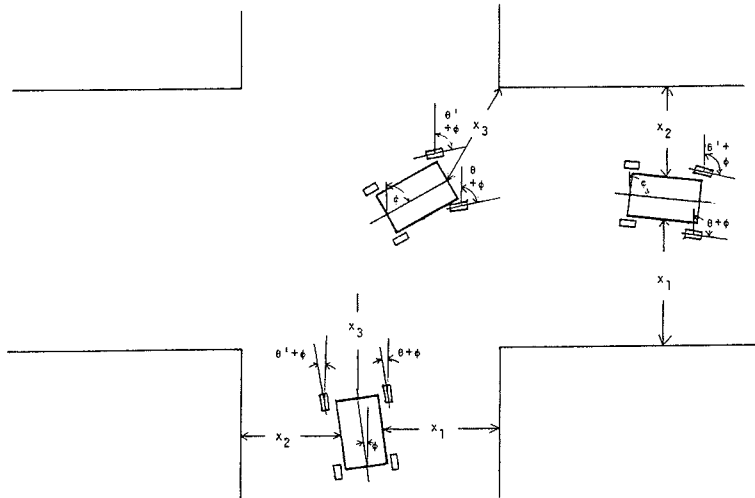


Fig. 10. Definition of the input variables.

4. 3 交差点形のコースを走行する場合

Fig. 10 に示す交差点形コースを右折れして走行する場合を例にとり入力変数を同図に示すように考える. 移動ロボット右側面中央点から右側壁面までの距離を x_1 , 移動ロボット左側面中央点から左側壁面までの距離を x_2 とする. また, 移動ロボットから前方の壁面までの距離を x_3 とする. この場合のファジィ制御規則は,

- If x_1 is SMALL then θ is to be LEFT,
- If x_2 is SMALL then θ is to be RIGHT,
- If x_1 is BIG then θ is to be RIGHT,
- If x_3 is SMALL then θ is to be RIGHT,
- If ϕ is POSITIVE BIG then θ is to be LEFT,
- If ϕ is NEGATIVE BIG then θ is to be RIGHT

のように表される. 交差点形のコースを走行する場合の前輪方向切り角 θ を決定するファジィ変数の例を Fig. 11 に示す. 得られた計算機シミュレーションの例を Fig. 12 に示す. (推論の計算手順は, クランク形コースを走行する場合のそれと類似のものとなるので省略する).

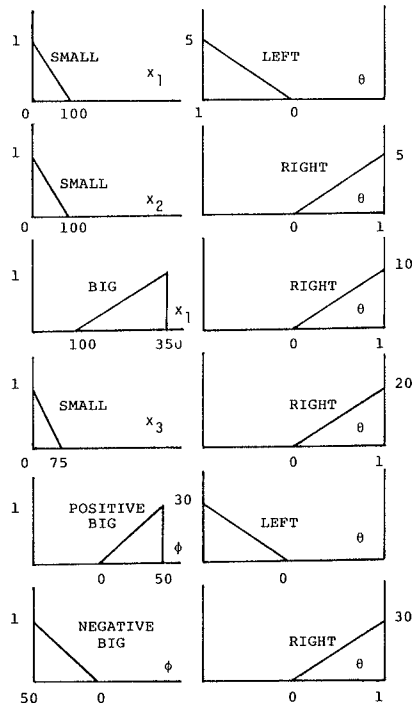


Fig. 11. Fuzzy variables to infer a steering θ angle for travelling on a cross shaped course.

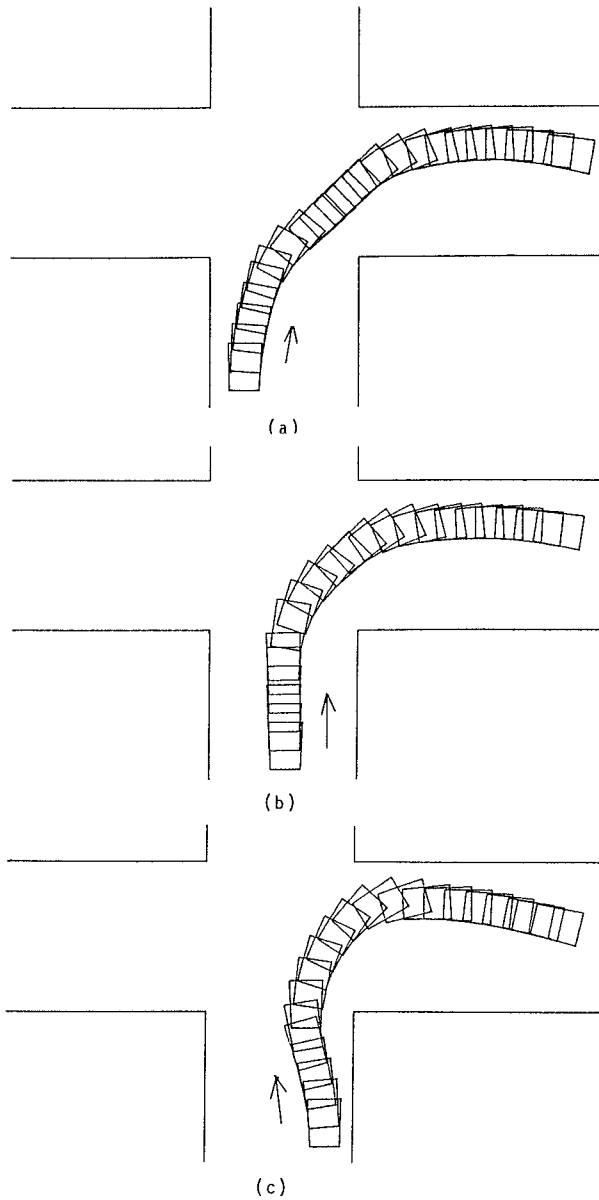


Fig.12. Results of the computer simulation for travelling on a cross shaped course. A robot starts (a) in the vicinity of the left sided wall (b) near the center of the walls, and (c) in the vicinity of the right sided wall.

5. 走行実験

これまで計算機シミュレーションにより移動ロボットの走行制御について検討してきたが、それらの結果を基にして、自律型走行ロボット DREAM-1 の走行実験を行った。走行実験は、右折れ、左折れ、クランク形のコース内で行ったが、以下において DREAM-1 がクランク型コース内を走行する場合について述べる。

5. 1 ファジィ制御規則

走行制御に使用したファジィ制御規則は、3つの前件部変数、1つの後件部変数によりなる if-then 形式で表される。それらの変数を、第4.2節で掲げた Fig.6. のように割り当てた。即ち、前件部変数については、ロボットの前面から壁までの距離を x_1 、ロボットの左右側面から壁までの距離をそれぞれ x_3 , x_2 とし、ロボットの姿勢角を ϕ とし、後件部変数については、前輪の方向切り角を θ としている。

前件部変数であるロボットの位置及び姿勢角は超音波距離センサによって得られる距離データをもとに算出される。超音波トランスデューサの配置を Fig.13 に示す。

クランク形コース内での走行では次のようなファジィ制御規則を使用した。

- If x_1 is BIG and x_3 is BIG and ϕ is ZERO
then θ is to be LEFT,
- If x_1 is BIG and x_2 is BIG and ϕ is ZERO
then θ is to be RIGHT,
- If x_1 is BIG and x_3 is BIG and ϕ is CW
then θ is to be LEFT,
- If x_1 is BIG and x_2 is BIG and ϕ is CCW
then θ is to be RIGHT,
- If x_1 is BIG and x_2 is MEDIUM and ϕ is ZERO
then θ is to be ZERO,

If x_1 is SMALL then θ is to be LEFT,
(ロボットが左折れ走行する場合)

If x_1 is SMALL then θ is to be RIGHT
(ロボットが右折れ走行する場合)

ここで、ファジィ変数 CW 及び CCW は、それぞれ、ロボットの姿勢角 ϕ が時計回り (RIGHT) か反時計回り (LEFT) を示す。

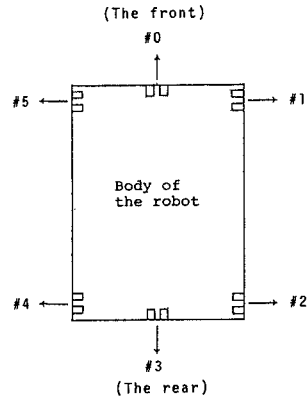


Fig.13. Numbering of supersonic sensor position.

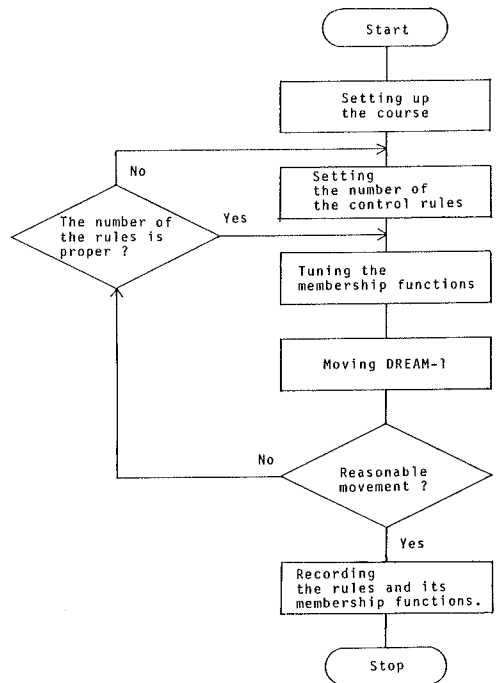


Fig.14. Preparation and implementation of the travelling experiment.

5. 2 実験準備及び手順

実験準備及び手順を Fig. 14 のフローチャートにより示す。まず使用するコースの形を決定し、そのコースの両側にベニア板を用いて高さ 90 [cm] の壁を構成する。これによって超音波トランスデューサは壁の平面に対して超音波の送受信を行うことができ距離センサの動作が確実となる。Fig. 15 はクランク形コースの寸法を示したものである。次に、コースの形を考慮して、使用する制御規則の数を決定する。更に、個々の規則を定めてゆき、メンバーシップ関数の調整を行う。そしてロボットを実際にコース内で走らせてみる。走行がスムーズでない場合には制御規則の数及びメンバーシップ関数の再調整を行う。スムーズに走行することを確認したらその時の制御規則とメンバーシップ関数を記録し実験を終了する。

Fig. 16. は、ロボットの走行制御プログラムのフローチャートである。ロボットは距離データをもとに前件部入力値を算出しファジィ推論を行う。そして推論結果を非ファジィ化して得られた値がその時点での前輪方向切り角となり、ステッピングモータを駆動する。

5. 3 実験結果

前述の手順に従って走行実験を行った。最初は前輪方向の調整操作のタイミングが合わず壁に衝突することもあったが、メンバーシップ関数を調整していったところ、ついには、クランク形コースをスムーズに走行するに至った。走行の軌跡には多少のばらつきがあり同じコースを走行することはないが、壁に衝突することなく良好な結果を得た。なお、ロボットの走行速度は、約 43 [m/min] であった。

走行実験の際の DREAM-1 の外形を Photo 1 に、公開実験風景を Photo 2 に、クランク形コースを走行中の DREAM-1 を Photo 3 にそれぞれ示す。

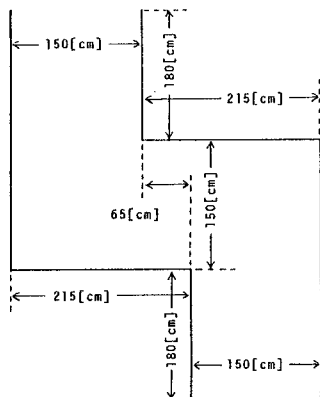


Fig. 15. A crank shaped course.

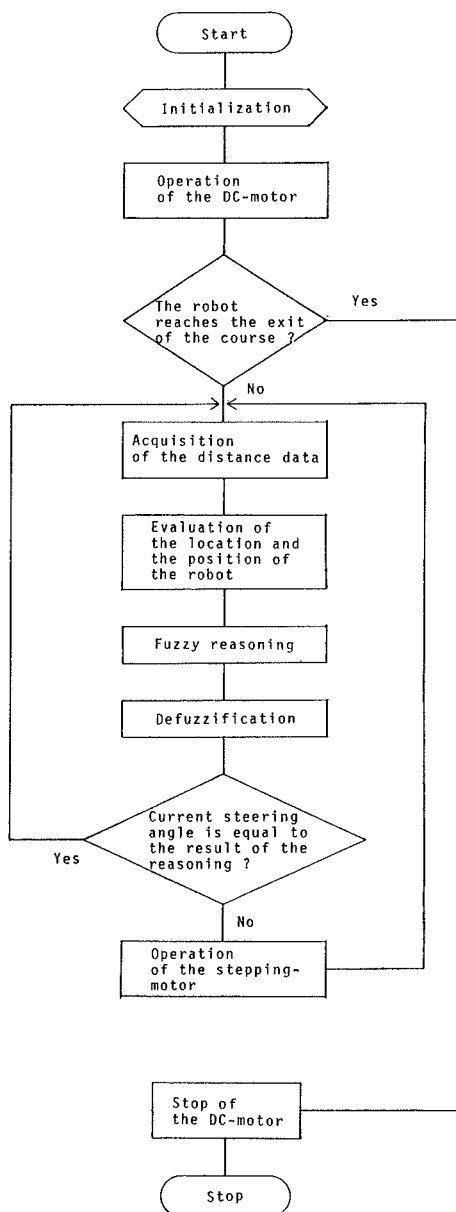


Fig. 16. A procedure of the travelling control of DREAM-1.

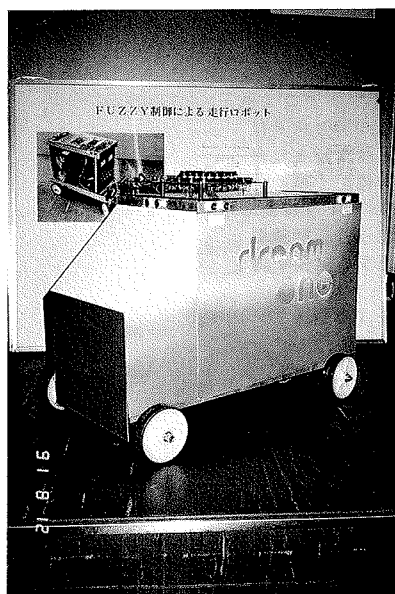


Photo 1 An outside view of DREAM-1.

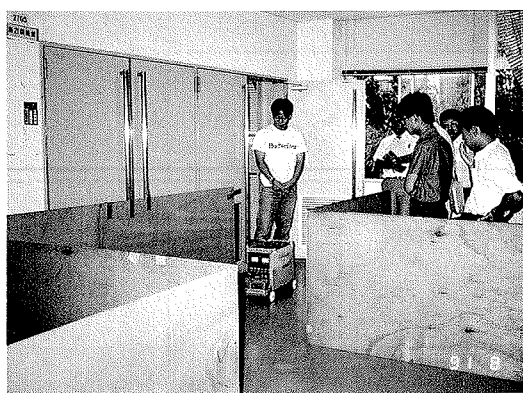


Photo 2 A view of the public exhibition of travelling control of DREAM-1.

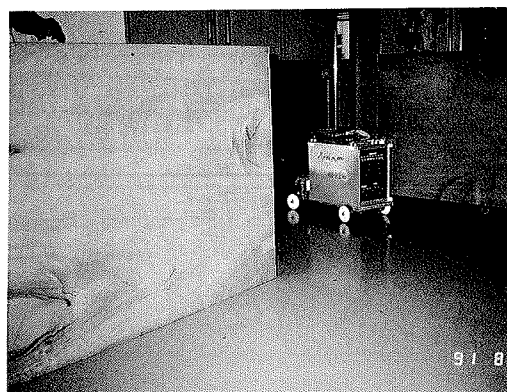


Photo 3 DREAM-1 travelling on a crank shaped course.

6. 検討

6.1 計算機シミュレーション

本移動ロボットは、四輪走行で移動ロボットがごく低速で走行する場合を考えているので、方向切り角 θ に対して、Fig.1に示すように同心円の軌跡を描きながら移動しその方向を変える。ロボット本体がその向きを変えて走行する場合には、Fig.17に示すように曲率中心はその都度その位置が変化する。従って、計算機シミュレーションの際にはこの点を考慮する必要がある。

本報告では、重心を計算しない簡便法（推論法2⁹⁾）を用いているが、重心を計算する方法（推論法1⁹⁾）と比較して、Fig.18の例をみても明らかのようにシミュレーション結果はほぼ類似のものとなる。推論法2の計算手数は、重心計算の必要がないので、推論法1のそれに比較して軽減出来るので都合がよい。

6.2 走行実験

走行実験を実施して概ね次のような改善すべき点が明らかになった。

- 1) 超音波距離センサからの距離データの取り込みの際に、時々ノイズ成分を取り込み前輪方向切り角を不必要に大きく設定する場合がありますこの点を改善する必要があります。
- 2) 後輪駆動部のDCモータの回転数をほぼ一定にしているが速度センサを搭載し移動ロボットの走行速度

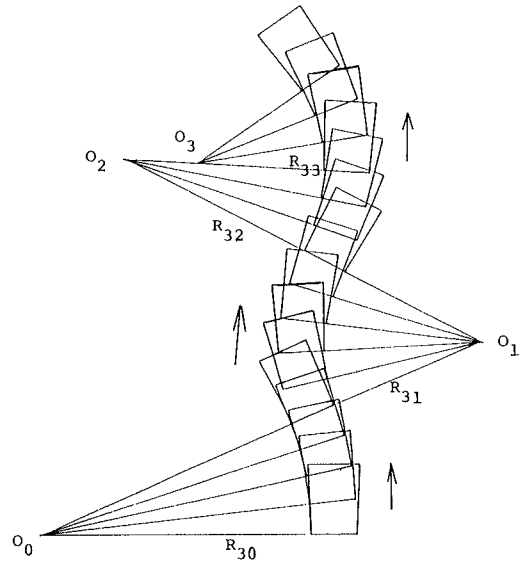


Fig.17. Relation between direction of a mobile robot and location of the center of the curvature.

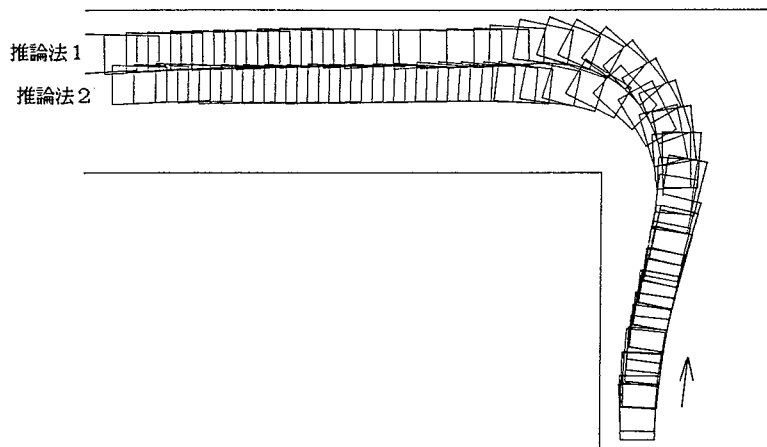


Fig.18. Comparing simulation results due to the second reasoning method with that to the first one.

も入力変数として用いたファジィ制御規則を構成すればよりきめの細かい走行制御ができ縦列駐車等⁷⁾のようなより複雑な走行制御も可能になるものと考えられる。

クランク形コース内での走行実験において得られたファジィ制御規則は、計算機シミュレーションにおいて用いた制御規則と一致していないが、これは、超音波センサの指向性からくる走行中における死角の問題及び前輪方向調整操作の時間的遅れ等に関係しているものと考えられる。

7. 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、右折れ、クランク及び交差点形コースでの走行の場合の計算機シミュレーションを行った。

また、クランク形コース内での走行実験及びその結果より DREAM-1 の改善すべき問題点が明らかとなった。

謝辞

移動ロボット DREAM-1 は、ここ数年にわたる当該学生諸氏の研究の成果によるものである。ここに記して謝意を表します。また、移動ロボット駆動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、本学工学部公開講座「暮らしに役立つファジィとニューロ」¹⁰⁾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った本学工学部関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) L. P. Holmlad 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) 宮田, 大石, 松本, 齊下, 大北, "ファジィ理論を用いた走行ロボットの制御", 平成2年度電気関係学会中国支部連合大会, 051916, 1990.
- 7) 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.
- 8) 下田茂: 自動車工学(大学講座機械工学21) 共立出版 1975.
- 9) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社 1988.
- 10) 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「暮らしに役立つファジィとニューロ」講義用テキスト, 1991.

