

自律走行車のカメラによる視覚システム

西守 克己・岡田 又治*¹・石原 永伯・平川 進*²
徳高 平蔵・岸田 悟・藤村喜久郎

電気電子工学科・*¹(現)マツダ自動車工業(株)・*²(現)富士通(株)

(1993年9月1日受理)

Vision System for Driving Control Using Camera Mounted on an Automatic Vehicle

by

Katsumi NISHIMORI, Mataharu OKADA*¹, Naganori ISHIHARA, Susumu HIRAKAWA*²
Heizo TOKUTAKA, Satoru KISHIDA, Kikuo FUJIMURA

Department of Electrical and Electronic Engineering

*¹ Mazda Corporation

*² Fujitsu Corporation

(Received September 1, 1993)

We have proposed a vision system for an automatic vehicle which mounts a CCD camera as a vision sensor. This system is employed for the simulation of fuzzy driving control for a model car. The fuzzy control is based only on information of driving images processed by the vision system. The result shows that the fuzzy control is useful for automatic driving using a personal computer system applied to the vision system.

Key words : Vision system, Image processing, Fuzzy control, Simulation

1. はじめに

視覚は、人間が外界に関する情報を得る上で最も重要な役割を持ち、自動車の運転に必要な情報の大部分は視覚から得ていると考えられる。この優れた認識機能を機械で実現することが、コンピュータビジョンの研究目的の一つであり、ロボットや自律走行車のために画像による外界認識の研究¹⁾が熱心に行われている。

このようなコンピュータと結びついた画像情報処理技術により、将来はロボットや車両が人間と同等の環境認識機能を備えることが期待できる。しかし、今日のコンピュータビジョンが自律走行車の環境認識装置として十分な機能を達成しているとはいえないし、また、他のセンサーや情報通信のなかで視覚の役割も明確になっているとはいえないであろう。画像処理による自律走行技術を考えるには、画像処理による環境認識技術の特徴や技術的な問題、また、自律走行システムの全体のなかでの役割等を明らかにする必要がある。

本報告では、模型自動車をファジィ制御により自律走行させるためにカメラを視覚センサとし、道路等の走行環境を認識するための視覚システムを提案する。さらにその視覚システムの画像情報に基づいたファジィ制御法を開発し、模型自動車の走行制御シミュレーションを行う。以下に、その詳細を報告する。

2. 視覚システム

2.1 視覚システムの目的

視覚システムは、コンピュータビジョンを用いて環境認識を行うことを目的とし、次の3つに大別される。第一は自動車の操縦の自動化のために画像処理を用いたもの。第二は屋外環境で知的活動を行う自律走行車の環境認識機能として視覚を用いたもの。第三は主として室内を移動する知能ロボットの環境認識機能としての研究である。

これら視覚システムに関する研究は知能ロボットの環境認識機能の技術として発展してきたといえる。ただし、自律走行車と比べると知能ロボットの場合には、移動だけでなく環境を認識、理解し作業などにより外界に働きかけることを目的とする場合が多いこと、また、活動環境が主に室内であること、移動のための構造が特殊であること、等の違いをもっている。しかし、移動体の環境認識技術として、重要な技術が数多く研究¹⁾されており、将来の自律走行車にとって技術的に大きな意味をもっている。具体的には、多眼視による距離認識、環境認識と

モデルの構築、行動のプランニングと制御等、自律走行車に不可欠な技術の研究が多い。

2.2 模型自動車における視覚システムの構成

一般に自律走行車の視覚誘導システムを実現するためには、主として入力画像の領域分割、道路及び障害物の認識、道路境界エッジの抽出を行う画像処理モジュール、道路の3次元形状復元を行う状況認識・解析モジュール、障害物回避等のための走路選択を行うナビゲーションモジュール、そして、車両の制御を行う車両制御モジュールの4つが構成要素として必要である。

本研究では、ハードウェアを含む入力画像処理モジュールは開発途中にあるので、それらについては述べない。ここでは、視覚システムのモデルを用いて、直進走路を想定した道路画像から特徴抽出を行い、それらの特徴量から選択された、走行制御に必要な道路情報を基に環境を認識し、状況を判断して、自律走行車のファジィ制御を行うことを試みた。まず、そのために図1のようなファジィ制御モジュールを開発し、走行制御シミュレーションを行った。

上述の4つの構成要素モジュールを用いて、模型自動車をファジィ制御により自律走行させるために、カメラを視覚センサとして用いた状況判断システム、すなわち視覚システムを構成した。その主な特徴点を述べると、

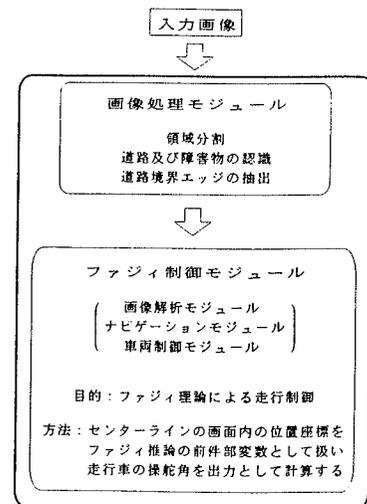


図1 ファジィ理論を用いた視覚システム

1) カメラは白黒単眼 CCD カメラを搭載する

カメラの搭載を行う模型自動車の仕様などを考慮すると、現状では簡便な白黒単眼 CCD カメラが適していると考えられる。

2) カメラは模型自動車の前面方向を向き、固定する、

3) 走行路にセンターラインを設定する

道路の中央にはセンターラインを設定し、基本的にはセンターラインを目標線として認識しながら走行する、である。

2.3 視覚画像情報に基づくファジィ制御の利点

自律走行車の視覚システムを実現するためには、前項 2.2 で述べたように主として4つのモジュールが必要となる。このうち状況認識・解析モジュールにおいては、単眼視による3次元空間、運動の復元を行う手法がさかんに論文^{1,2)}で紹介されている。

しかし、それらの手法手順の大半はハードウェアによって処理がなされている。したがって、現在使用しているようなパーソナルコンピュータを主としたシステムにより、ソフトウェアによってそれらの手法手順をこなしリアルタイムで模型自動車の走行制御が行えるかという疑問があった。そこで画像から目標物の3次元的情報を解析し、それを制御の要素として扱うのではなく、画像内の目標物から人間的な解釈、判断を行い、模型自動車を制御しようと考えた。

人間が視覚から情報を得て行動するとき、その情報を正確な数値として扱い行動しているのではなく、「近い」や「遠い」などの感覚に基づいて行動をしている。例えば車を運転する際、前方に車両が走行していたとしよう。高速道路のような車間距離測定用標識があれば、「前の車との距離は〇〇mだ」と判断できる。しかし標識がなければ、そのような数値は得られない。そのような時、人は前方車両の見え方によって車間距離を判断する。前方車両が小さく見れば「遠い」と、大きく見れば「近い」と判断する。また人は経験的知識からも判断することができる。前述の場合のように車間距離測定用標識によって正確な車間距離を得たとしよう。そのときの前方車両の像の大きさを覚えていれば、「さっきより少し小さく見えるので、〇〇m強離れているな」とか、「さっきよりだいぶ大きく見えるので〇〇mの半分くらいの距離かな」などと判断することができる。

そこで我々は、センターラインを目標対象として考察を行った。模型自動車をセンターラインに沿って走らせることを目標とし、2.2で考察したように、カメラは

模型自動車の前面方向を向き、固定したとする。ここで模型自動車の直進方向と画面の縦の中心線は一致するように設置する。このような設定状況において、任意の位置でどのようにセンターラインは画面上に映し出されるか、またそのときセンターラインに沿って走らせるにはどのような制御を行えばよいかを考察した。例えばセンターラインが画面の中心にまっすぐ映し出されていれば、模型自動車はセンターライン上に存在し、センターラインに沿って走っていることになる。またセンターライン全体が画面の左側に映し出されていれば、左にハンドルを切ればよいことがわかる。このように状況ごとにその状況に適した制御を行うことで目的を達成することができると考えられる。しかし扱うデータは模型自動車とセンターラインとの相対関係を明確な数値として表してはいない。そこで、このような状況に適応した制御を行える利点を持つファジィ制御の適用を考えた。

3. 模型自動車のファジィ制御走行シミュレーション

前項で述べたように、画像から目標物の3次元的情報を解析し、それを制御の要素として扱うのではなく、画像内に映っている目標物（ここでは道路のセンターライン）の画像上での位置、形状をファジィ推論の前件部変数として扱い、走行制御を行うことを検討した。シミュレーションの流れを図2に示す。

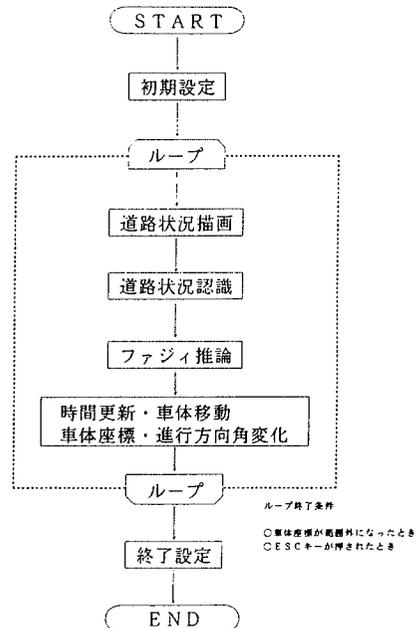


図2 走行シミュレーションプログラムの流れ

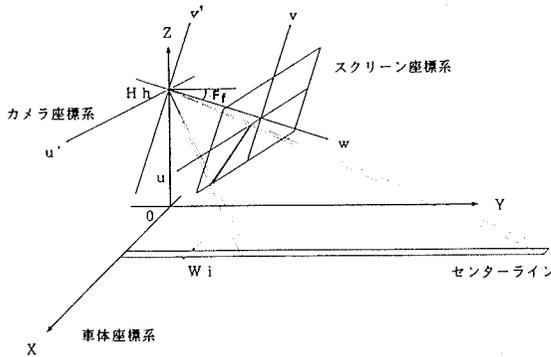


図3 車体(ワールド)・カメラ・スクリーン座標系の関係

3. 1 視覚システムと制御モデルの設定

3. 1. 1 視覚システムの設定

カメラに関する設定は2. 2で述べたように、白黒単眼のCCDカメラを用い、模型自動車の前面方向にその向きを固定する。カメラ本体は、理想的な透視投影法により3次元物体を2次元スクリーンに投影し、レンズの歪みなどはないものとする。走行制御シミュレーションに用いたカメラの設定環境において、走行路のセンターラインと、車体(ワールド)座標系(X, Y, Z), カメラ座標系(u', v', w')およびスクリーン座標系(u, v, w)との関係²⁾を図3に示す。車上のカメラは、道路面(X-Y面)からHhの高さにあり、カメラのスクリーンに写し出される画像はスクリーン座標系のu-v面上にある。今の進行方向はY軸方向である。スクリーン面上でのセンターラインの描画は縦400, 横400ドットの画面内で行われる。

3. 1. 2 制御モデルの設定

制御目的は、模型自動車を、センターライン上でセンターラインに沿って走らせることである。模型自動車の走行する範囲、すなわちワールド座標系の設定を図4に示す。一辺2000[mm]の正方形を成す各エリアごとに道路状況を設定し、これを5×5で構成する。この範囲内を模型自動車は走行する。範囲外になった時点でシミュレーションは終了する。また、縦の中央5エリアの中心線に沿って直線センターラインを設置する。

模型自動車の大きさは、車長がC1=400[mm], 車幅がCw=200[mm]であり、センターラインの幅はWi=10[mm]とした。また車体のワールド座標を X

[mm], Y[mm]で表し, Y軸(センターライン)に対する車体の傾きθ[deg](左回りを正)とする。ハンドルの切り角φ[deg](左回りを正)は最大20度以内で瞬時に切れるものとし, 速度は50[mm/sec]である。車の軌道方程式³⁾は次式に示す。

$$\begin{aligned} \phi_n &: \text{ファジィ推論より得る} \\ \theta_{n+1} &= \theta_n + \Delta\theta_n = \theta_n + (V\tau/C1)\phi_n \\ X_{n+1} &= X_n + V\tau\cos(\theta_n + \Delta\theta_n/2 + \rho\phi_n) \\ Y_{n+1} &= Y_n + V\tau\sin(\theta_n + \Delta\theta_n/2 + \rho\phi_n) \\ (V &= 50[\text{mm/sec}], C1 = 400[\text{mm}], \tau = 1.0[\text{sec}], \\ &\rho = 0.5) \end{aligned}$$

... (1)

計算機シミュレーションを行うに当たり, 以下のようにモデルを理想化した。

すなわち,

- 1) センターラインの認識, ファジィ推論に要する時間は無視できるものとして, 1.0秒ごとに推論結果に応じてハンドルが切られるものとする,
 - 2) ハンドルは推論時に瞬時に切れ, 時間遅れは無視できるものとする,
 - 3) 模型自動車の一定速度の低速で走行しており, 車と走行路との摩擦は無限大とし, スリップしないものとする,
- である。

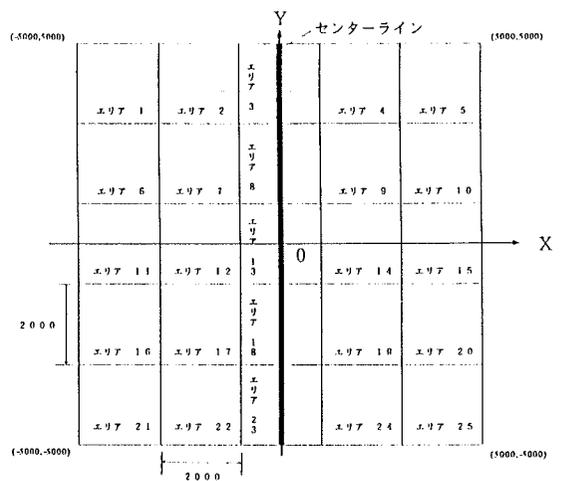
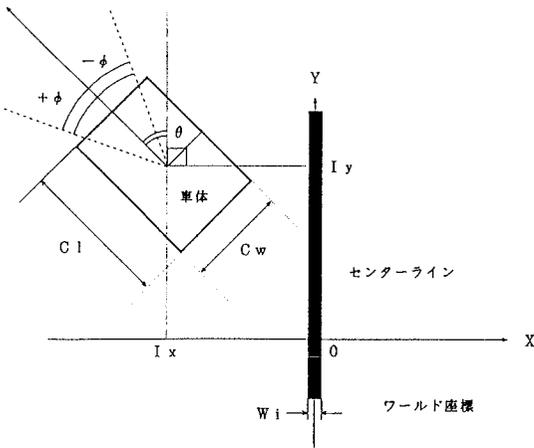
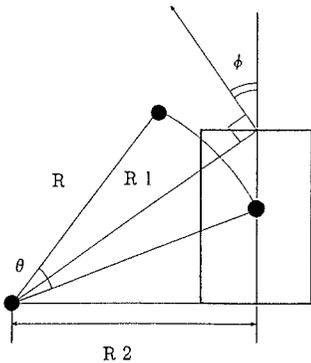


図4 模型自動車の走行範囲, ワールド座標系の設定

図5にその制御モデルを示す。(a)は走行道路面上での、ワールド座標(X, Y)と車体位置(Ix, Iy), Y軸(センターライン)と進行方向との角度差θの関係、およびハンドル切り角φの方向指定を表し、(b)は低速時における車の旋回モデル³⁾を表している。Rは車体中心の旋回半径、R1およびR2はそれぞれ前輪および後輪の中心までの距離を表し、φはハンドル切り角、θは車体角の変化を示している。



a) ワールド座標と各変数設定



b) 模型自動車の低速旋回モデル

図5 制御モデル

- (a) ワールド座標と各変数の設定
- (b) 模型自動車の低速旋回モデル

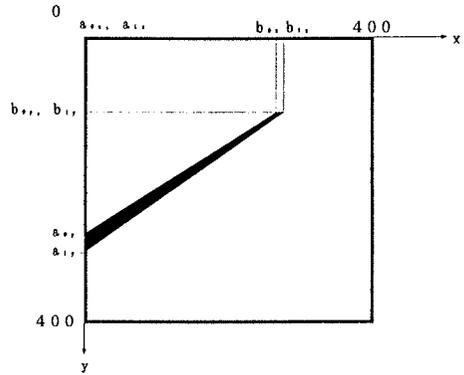


図6 センターラインとスクリーン座標の関係

3.2 推論方法

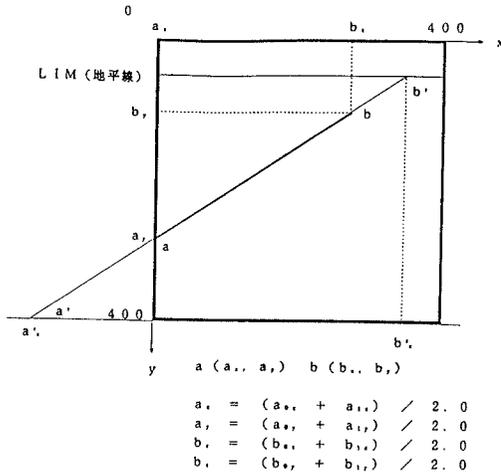
我々は画面上のセンターラインを認識し、その画面上での位置をファジィ推論の要素として扱い、直進走行シミュレーションを行った。まずセンターライン認識ルーチンにおいて、図6に示すように境界線とセンターラインが交錯した地点a0すなわち座標(a0, a0)から検索を行い、センターラインを形成する4頂点a0, a1, b0, b1の画面内座標を検出する。この4頂点の座標をファジィ推論ルーチンが受け取り、図7にあるように線分ab, さらに線分a'b'を計算する。ここで画面内のセンターラインが画面の縦の中心線(D軸)と重なるような新たな座標系LR-Dを考え、a', b'のLR成分をそれぞれα, βとする。HALFはスクリーン画面の縦、横それぞれ200ドットの点を示し、LIMは画面内の地平線の縦位置を表す。このα, βを前件部変数とし、ファジィ推論を行い操舵角を出力する。ファジィ推論には簡略法⁴⁾を用いた。入力は上記のα, βを用い、出力はハンドルの切り角φ[deg]とする。

シミュレーションには2つのファジィルールを作成し、図8に以下のそれらのメンバーシップ関数を示す。すなわち、

- a) ラベルの設定(rule-1, rule-2とも共通)
- b) rule-1: αに用いるメンバーシップ関数
- c) rule-1: βに用いるメンバーシップ関数
- d) rule-1: 出力に用いるメンバーシップ関数

数

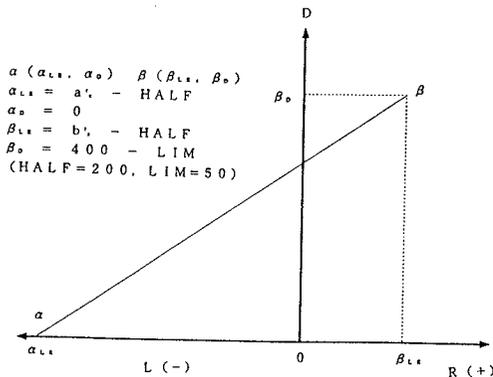
- e) rule-2 : α に用いるメンバーシップ関数
 - f) rule-2 : β に用いるメンバーシップ関数
 - g) rule-2 : 出力に用いるメンバーシップ関数
- である。



(a) スクリーン座標でのセンターラインの表示

$a'(a'_s, a'_s)$ $b'(b'_s, b'_s)$

$a'_s = a_s + (b_s - a_s) \times (400 - a_s) / (b_s - a_s)$
 $a'_s = 400$
 $b'_s = b_s + (b_s - a_s) \times (LIM - b_s) / (b_s - a_s)$
 $b'_s = LIM$
 (ただし、 $a_s \neq b_s$)



(b) センターライン位置の α , β 変数への変換

図7 センターライン画像からの α , β の導出

3.3 制御規則

模型自動車が、センターライン上を走るための基本的な制御規則を、前項で述べた α , β を用いて作成した。基本的な制御規則を以下に示す。ラベルとその意味については、

(ラベル) : (意味)

- CC : 中央に、位置する
- LL : 左に、位置する
- RR : 右に、位置する
- ZR : ハンドルを切らない
- LX : 左へ x 度、ハンドルを切る
- RX : 右へ x 度、ハンドルを切る

であり、以下で述べる $\alpha : \sim$, $\beta : \sim$ には車体とセンターラインの具体的な関係を示し、 $\phi : \sim$ は結論を示す。その一例を示すと、

R1: if α is CC and β is CC
 then ϕ is ZR

- α : 車体が、センターライン上に、あり、
- β : 進行方向がセンターラインに、沿ってれば、
- ϕ : ハンドルを切らない。

... (2)

となり、このような基本的な制御規則が R1 から R9 まで 9 個ある。 α , β が求められないとき、またセンターラインが認識できないときには前回の操舵を繰り返す。これらの制御規則を基にして、3.2 推論方法で述べた 2 種の推論法のそれぞれについて作成したファジールールを図 9 に示す。(a) は rule-1 に対するものであり、(b) は rule-2 に対するものである。

4. シミュレーションの結果と検討

視覚システムのモデルから得られた特徴抽出シミュレーション画像を基にして、ファジィ制御による走行シミュレーションプログラムを作成した。そのフローチャートを図 10 に示す。初期設定後のループ内では、時々刻々に変化している車の或る走行地点において、視覚システムによりセンターラインの認識を行い、そしてファジィ推論により操舵角を決定し、1 ステップ分だけ車を進める。このループ内の作業が終了すれば 1 つの直進走行軌跡が得られる。

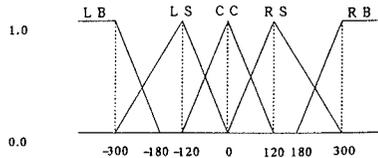
前述した視覚システムと制御システムの各設定を用い、rule-1, rule-2 のそれぞれについて走行シミュレーションを行った。初期設定値を表 1 に示す。r

a) ラベルの設定
(rule-1, rule-2とも共通)

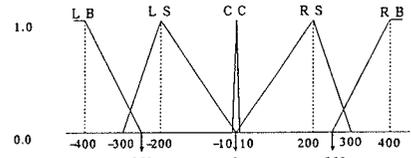
ラベル: 言葉の意味

LB: 左に遠く位置する
LS: 左に近く位置する

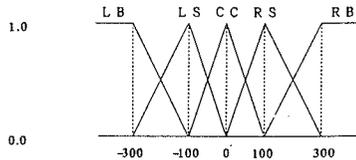
CC: 中央に位置する
RS: 右に近く位置する
RB: 右に遠く位置する



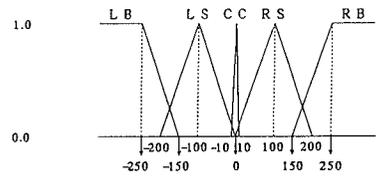
b) rule-1: α で用いるメンバーシップ関数



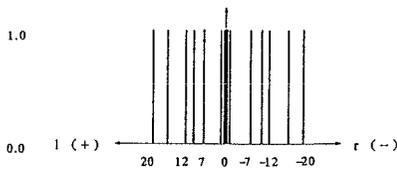
e) rule-2: α に用いるメンバーシップ関数



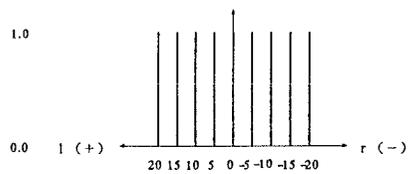
c) rule-1: β で用いるメンバーシップ関数



f) rule-2: β に用いるメンバーシップ関数



d) rule-1: 出力に用いるメンバーシップ関数



g) rule-2: 出力に用いるメンバーシップ関数

図8 シミュレーションに用いたメンバーシップ関数

α

	LB	LS	CC	RS	RB
LB	20	7	3	-2	0
LS	16	10	1	-2	-9
CC	12	3	0	-3	-12
RS	9	2	-1	-10	-16
RB	0	2	-3	-7	-20

(a)

rule-1 に用いたルール

α

	LB	LS	CC	RS	RB
LB	20	20	10	-10	-20
LS	15	5	5	-5	-15
CC	10	5	0	-5	-10
RS	15	5	-5	-5	-15
RB	20	10	-10	-20	-20

(b)

rule-2 に用いたルール

図9 直進走行用ファジィ制御ルール

(a) rule-1 に用いたルール

(b) rule-2 に用いたルール

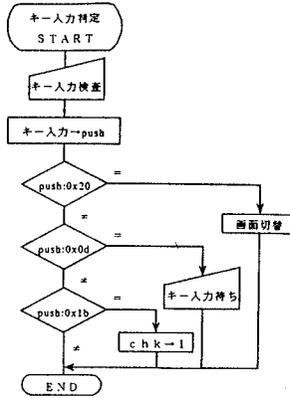
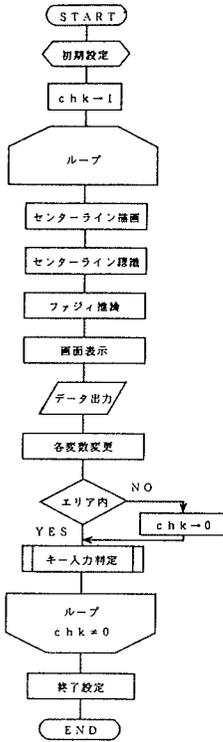


表1 走行シミュレーションにおける初期設定値

座標	Ix: 950.0 [mm]
	Iy: 5000.0 [mm]
車体角	Dg: -5.0 [deg]
速度	Vv: 50.0 [mm/sec]
カメラの仰角	Ff: 10.0 [deg]
カメラの視界幅比	Dd: 1000.0 [(1/2)^-1]
カメラの高さ	Hh: 300.0 [mm]
車体長	Cl: 400.0 [mm]
車体幅	Cw: 200.0 [mm]
センターライン幅	Wi: 10.0 [mm]

図10 走行シミュレーションプログラムのフローチャート

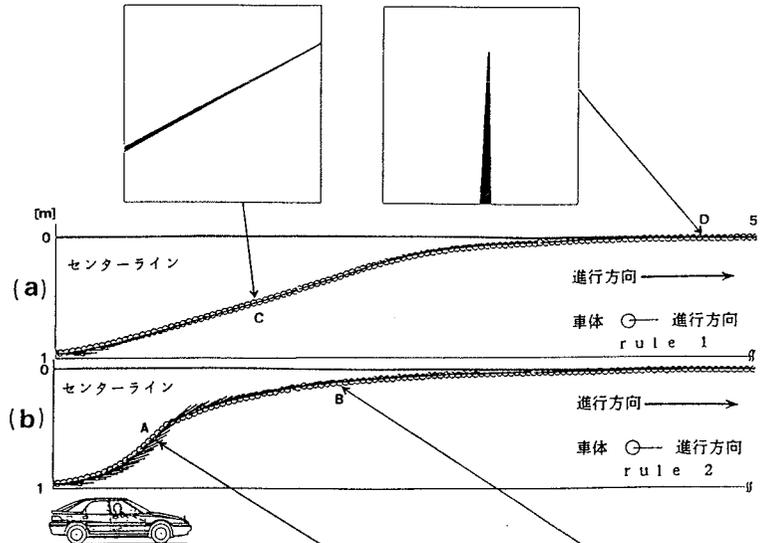
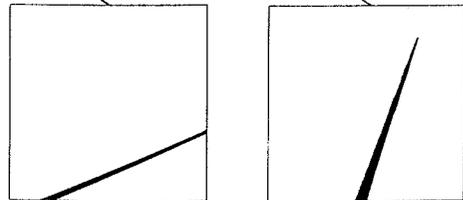


図11 視覚システムを用いたファジィ制御走行シミュレーション

- (a) rule-1 に用いたときの走行軌跡と走行画面
- (b) rule-2 に用いたときの走行軌跡と走行画面



rule-1によるシミュレーション結果(走行軌跡)を図11(a)に, rule-2による結果を図11(b)にそれぞれ示す。(a)では画面内のセンターラインが右上がりの傾きが余り変化せず徐々に下がってきて,画面の下線と交わる頃から立ち上がり下線中央に垂直に立つように変化する。それに伴い,車の軌跡も滑らかにセンターライン上に移行している。一方(b)では一定速度にも拘らず,スタートから画面のセンターラインが,その傾きが右上がりのまま急激に画面下線に近づき,その後,徐々に下線中央に近づきながら垂直に立ち上がる。これに伴い,軌跡もA地点のように急激な方向変化を示した後,ゆっくりとセンターラインに近づいていることがわかる。このように視覚システムからの画像情報のみでも,ファジィ制御を使えばいずれの場合でも簡単に走行が可能となろう。したがって,我々の提案する視覚システムを用いれば,ファジィ制御による走行制御が可能であり,精確な位置情報を必要としない,あいまいな画像情報でも目標対象が明確であれば,人間が行うような操舵制御ができ得るものと思われる。

5. まとめ

視覚センサとしてCCDカメラを想定した自律走行車の視覚システムを提案し,それを用いたファジィ制御シミュレーションを行った。その結果,パーソナルコンピュータを主としたシステムにより,模型自動車の視覚画像情報に基づくファジィ制御を行える可能性を見いだした。またこの応用により,前方車との車間距離保持,障

害物回避等の機能を備えた視覚システムを構築することができると考えられる。

今後の課題としては,本研究で設定した α , β よりもルールの作成が容易であり適用範囲の広い前件部変数の適用が必要である。またさらに実機に対応させることのできる多機能の視覚システムの構築が望まれる。

参考文献

- 1) 例えば,平松:"自動車のドライビング・シミュレーション",シミュレーション,10-3,pp.199-206(1991),久田見:"画像認識による自律走行技術",45-2,pp.25-31(1991).
- 2) 丹波,千葉,小沢:"連続道路画像からの車両姿勢角の推定",信学論(D-11),J75-D-11,3,pp.490-499(1992).
- 3) 平川,西守,徳高,濱野,岸田,石原:"模型自動車におけるファジィ制御法の研究-右折,左折シミュレーションの場合-",鳥取大学工学部研究報告,22巻1号,pp.183-192(1991).
- 4) 平川,西守,藤村,徳高,岸田,平賀,石原:"メンバーシップ関数のオートチューニング法-模型自動車の走行制御シミュレーション-",電気学会産業計測制御研究会資料,IIC-93-20,pp.117-126(1993).