

画像処理とファジィ理論による 視覚制御システム

鎌田 洋 直井 聡 後藤 敏行
株式会社 富士通研究所

移動車を無人化できる視覚制御システムを開発した。動画像処理プロセッサとファジィ制御を組み合わせたシステムであり、一定の間隔で並んだ路上の対象物を高速度で認識でき、しかもそれによって移動車を無人運転できる。色抽出と論理フィルタの2プロセッサのパイプライン処理により対象物体を実時間で抽出した後、改良型の高速ハフ変換により物体列を認識し、ファジィ推論によりハンドル量を決定する。ファジィ推論では、移動車の運動情報も加味するため、時間変化を扱うルールを設けた。実用化のため論理フィルタ部のLSI化などを行い、超小型システム(A4 x 10 cm)を実現した。移動車の無人走行実験により本システムの実用性を確認した。

A Visual Control System Using Image Processing and Fuzzy Theory

Hiroshi KAMADA, Satoshi NAOI, and Toshiyuki GOTOH

Pattern Information Processing Laboratory,
Fujitsu Laboratories Ltd.
1015 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki 211 Japan

We developed a visual control system for an unmanned vehicle. The system uses dynamic image processing and fuzzy logic control. It quickly recognizes markers along a road and steers the vehicle. The markers are detected in real time by pipeline processing in the color identification processor and logical filter; the marker sequence is recognized by an improved Hough transform, then fuzzy theory decides the steering angle. We developed an LSI chip for the logical filter to make the system compact and practical (A4 size x 10 cm). We mounted this system on a vehicle and it drove round a test track successfully.

1. はじめに

近年、移動車の無人運転の研究が米国(2)、西ドイツ(5)などを中心に盛んに行われている。世の中には自動車・各種作業車などの多品種かつ大量の移動車が様々な目的に使用されており、移動車の知能化による省力効果を狙った無人移動車の研究は大きな産業的意義がある。

このようなシステムは、次の2つの機能を満足する必要がある。

- ① 外界や移動車の状況を迅速に把握する。
- ② 上記のデータから移動車の車体条件を推論し制御する。

上記の機能を実現する手段を考案するには、人間自身の運転方法が良い参考となる。

①の目的には、TVカメラにより入力される画像が情報として十分である。画像はデータ量が膨大であり、従来は画像処理には多大の時間を要することが問題であった。ところが近年、動画像をビデオ速度(インタレースカメラの場合、30画像/秒)で実時間処理できる技術が開発され、無人作業車の視覚部に採用できる可能性が出てきた。特に「FIVIS/VIP」(3)は構造可変型のパイプラインアーキテクチャにより、汎用性と高速性を両立させた。

②のような推論と制御においては、人間の運転ノウハウを計算手段として利用できることが望ましい。このような曖昧なノウハウに基づき推論し制御する方法としては近年、ファジィ理論の応用が盛んである(4)。ファジィ理論は、1965年にZadeh (1)が提案した人間の感覚のような不確かさを数学的に扱えるようにした理論である。ファジィ理論に基づく推論方式では、人間の言葉で言い表された曖昧なノウハウをルールに記述でき、しかも制御に適用できる。既に、多くの実用例が報告されている(4)。

筆者らは、上記の動画像処理プロセッサとファジィ理論を組み合わせることにより、実用的な視覚制御システムを開発した。

移動車の最も基本的で重要な機能は、ガイドとなる線や一定間隔で置かれた物体などに沿って進む機能である。そこで、今回はこの機能に的を絞って実用的な機能を実現した。本システムによれば、一定間隔で並んだ路上の対象物を高速度で認識でき、しかもこれによって対象物の列にそって移動車を無人運転できる。

実現に当たっては実用性を最重要視した。小型の作業車にも搭載できるためには、視覚制御システム

はさらに小型でなければならない。このため、システムの小型化に最大の努力を払った。また、一般の移動車の作業条件を考慮して路上の条件は問わないものとした。移動車が追従する物体は、一定間隔であるか連続した線であり、一定の色をしているものと条件づけした。

本稿では、実現する上で生じた課題とそれを解決した技術、開発したシステム、実験結果について紹介する。

2. 開発した方式

2. 1 対象物の実時間抽出方式

第1の課題は対象物の実時間抽出であった。路上には、対象物以外に水溜りや泥など多種類の雑音が混在しており、その中から対象物だけをどのようにして実時間で抽出するかである。

アスファルトの道路を走行する移動車の視覚部には、低価格性と処理の容易さにより白黒カメラが一般に使用される。しかし、一般の作業車が走行する道路では泥などによる反射があり、白黒カメラでは対象物体のみを抽出できない。そこで、筆者らは、カラーカメラを用いて対象物体を抽出することにした。

解決のため、路上の雑音の種類をカラー依存型と大きさ依存型に分類し、各型に応じた雑音除去方式を開発した。

カラー依存型では、対象物体は一定色であるとの条件に基づき、水溜りや泥などの他色のものを除去するようにした。特に、太陽光の水溜りにおける反射などの白色の部分は、カラー3原色RGBを同じ強度で含んでおり、対象物の色である指定色の強度の検出だけでは、白色の部分をも抽出することになってしまう。そこで、カラー3原色全体の輝度における指定色の強度の比率を用いた色抽出機能を盛り込んだ。具体的には

$$\text{色比率} = \frac{\text{指定色の強度}}{\text{輝度}}$$

により、指定色のみを抽出するようにした。

大きさ依存型では、対象物体は一定以上の大きさであるとの条件に基づき、それ以外の微小部分を除去するようにした。例えば、対象物体の色が緑である場合に雑草が除かれる。具体的には、ある画素に対し、その画素と上下左右の画素が全て指定色であるときのみ、その画素を対象物を構成する点として抽出する機能を盛り込んだ(図1)。

実際には、色抽出プロセッサと論理フィルタプロセッサを開発し、パイプライン接続することで対象物の実時間抽出を実現した(図2)。

2.2 対象物体列の高速認識方式

第2の課題は、抽出された対象物体を移動車のハンドル量に対応づけられる情報として、高速に認識することである。

これを解決すべく、筆者らは人間の自動車の運転方法を参考とした。つまり、人間が自動車を運転する時も、何らかの対象物に沿うようにしていると考えた。人間は、対象物を1点や1個単位ではなく、対象物全体からその方向を意味する線を思い浮かべ、車の方向がその線に一致するようにハンドルを切る。このハンドルを切る尺度として、抽出された対象物体を次の①②として認識することにした。

- ① 位置 ρ : 画面の中心から、物体列に降ろした垂線の水平成分
- ② 向き θ : 物体列が画面の中心線に対して成す角度

①で、一般には垂線の長さが考えられるが、その水平成分としたのは、移動車の慣性を考慮したためである。移動車はある速度を持って進んでおり、画面の中心と物体列が離れていようとも、物体列が車体の進行方向の前方にあるならば、ハンドルを切らずとも車体は物体列に自然に近づく(図3)。

従って、画面の中心から物体列に降ろした垂線において、車体に平行な成分は重要でなく、車体方向に直交する(画面上での水平)成分が重要であると判断した。

抽出した対象物体の画像から、このような尺度を認識する手段としては、一般にはハフ変換が用いられる。しかし、移動車のハンドルを実時間で制御するには時間がかかり過ぎるという欠点がある。従来のハフ変換では、対象物体列の点の集合を直線として認識するには、次のような処理を実行しなければならないからである。

- ① 抽出された対象物の任意の1点を通る直線のパラメータ (ρ, θ) をパラメータ空間 $\rho-\theta$ の曲線として求める。この処理により、対象物の任意の1点をパラメータ空間の曲線に対応づける。
- ② ①を対象物の全ての点について行う。この処理により、パラメータ空間 $\rho-\theta$ には、対象物の点の数だけの曲線が生成される。
- ③ パラメータ空間 $\rho-\theta$ において、曲線を点の

集合と見做す。最も密度の濃い点の座標を、対象物体列を表す直線のパラメータと認識する。ここで、①②の計算量が非常に多いことが分かる。

そこで、筆者らはハフ変換を下記の①②の手段で高速化した(図4)。

- ① 抽出された対象物の任意の(1点ではなく)2点を結ぶ直線のパラメータを求める。
- ② 2点 $(X1, Y1), (X2, Y2)$ の組み合わせを、次の2式で制限し、計算量を削減する。

$$|X1 - X2| < \text{定数1} \quad (1)$$

$$|Y1 - Y2| > \text{定数2} \quad (2)$$

②は、移動車が対象物体に追従する際に、車体方向は対象物体列に大きくはずれないという事実に依っている。

具体的には、パラメータ (ρ, θ) は、2点 $(X1, Y1), (X2, Y2)$ から式(3)(4)で求められる。

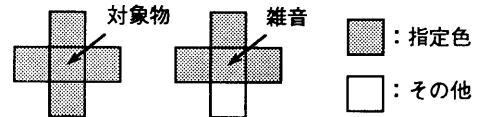


図1 大きさ条件

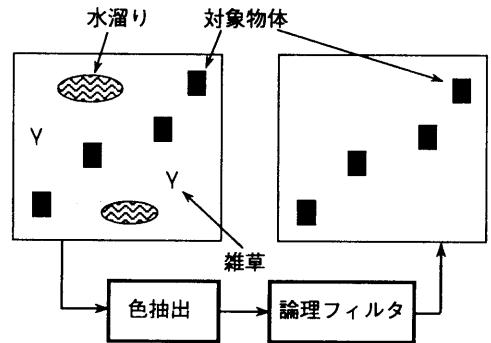


図2 対象物の実時間抽出

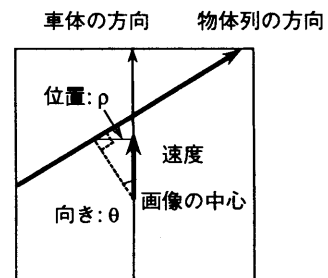


図3 物体列が車体の前方にある場合

$$\theta = \text{atan} \frac{|X1 - X2|}{|Y1 - Y2|} \quad (3)$$

$$\rho = (X1 \cos \theta + Y1 \sin \theta) \cos \theta \quad (4)$$

本方式によるハフ変換は以下の処理プロセスとなる。

- ① 抽出された対象物の任意の2点のうち、上記の制限式(1)(2)を満たす組み合わせを選ぶ。
- ② ①における2点を通る直線のパラメータ (ρ , θ) を式(3)(4)によりパラメータ空間 $\rho-\theta$ の1点として求める。
- ③ ①②を(1)(2)を満たす対象物の任意の2点の組み合わせについて行う。この処理により、パラメータ空間 $\rho-\theta$ には複数の点が生成される。
- ④ パラメータ空間 $\rho-\theta$ において、最も密度の濃い点の座標を、求める直線のパラメータと認識する。

このように改良したハフ変換により、抽出された対象物体の画像から対象物体列を認識した(図5)。

2.3 ハンドル量の決定方式

第3の課題はハンドル量の決定であった。ハンドルの操作は人間の感覚的な運転ノウハウの集合であり、それをどのようにして物理的な操作量に置き換えるかである。

これを解決するため、人間の持つ運転ノウハウと対象物体列の認識情報をファジ理論により結合し、ハンドル量を決定した。

対象物体列の認識情報としては既に述べた位置： ρ と向き： θ に位置の時間変化： $\Delta\rho$ を加えた。これは、車体の動きを考慮せずには、正確なハンドル量が求まらないためである。例えば、図6のように対象物体列が時間によって大きく変動していると、1時点の(ρ , θ)だけでは、ハンドル量が求まらないことが分かる。

認識情報 ρ , θ , $\Delta\rho$ に関して、“少し右”、“大きく左”などの5種類の感覚を山形のメンバシップ関数として表現している(図7)。

そして、人間の運転時におけるノウハウを抽出し、認識情報からハンドル量を求めるファジルールとして表現した。ファジルールは、IF-THEN形式であり、

IF [(変数が~である) AND ...]
→ THEN [ハンドル量が~である]

という形式である。ファジルールは、IF部の変数の種類により2種類から成り、合計18個である(表1)。

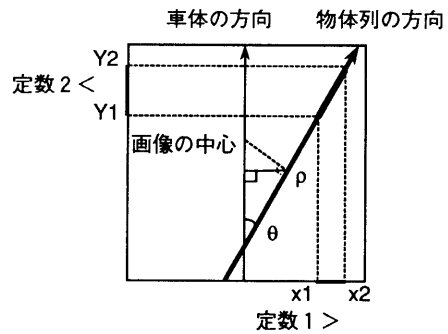


図4 ハフ変換の高速化方法

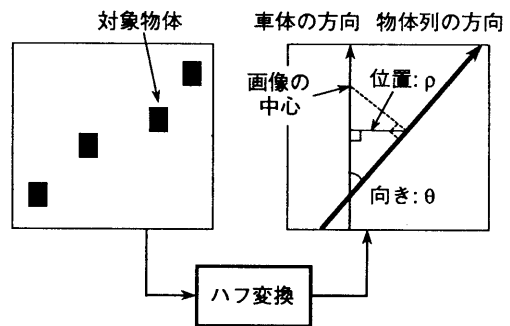


図5 対象物体列の認識

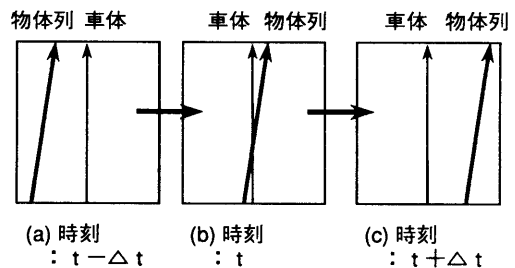


図6 対象物体列の時間変化例

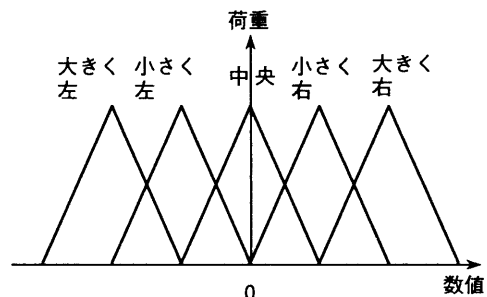


図7 メンバシップ関数の種類

ハンドル量は、次のように決定した。

- ① ファジィルール毎に車体の進行条件を推論する。
 - (1) IF部の各変数のメンバシップ関数に物体列の情報を入力し、信頼度を求める。
 - (2) IF部の変数はAND関係で結合されているので、(1)で求めた信頼度の最小値を求める。
 - (3) THEN部のメンバシップ関数を(2)で求めた最小値で台形状に制約する。
- ② 全てのファジィルールに関する推論結果を統合することでハンドルの回転角を算出する。
 - (1) 全てのルールについて、各々の推論結果である台形状の分布を重ね合わせる。つまり、最大値を取る操作をする。
 - (2) 台形状の分布を重ねて得られた図形の重心をハンドルの回転角とする。

以上の①②の原理を図8に示す。

図7に模式的に示したメンバシップ関数は、実際には計算速度を上げるため離散型を採用した。台集合の要素数は9~11、確信度の荷重は4~5段階とした。表2にメンバシップ関数の例を示す。

表1に示したファジィルールベースの具体的な内容を表3、4に示す。

2.4 対象物体列の選択方式

第4の課題は、対象物体列が複数あり、入力画面に他の対象物体列が入って来た時の正しい列の選択を如何にするかである。

実際、単に1列の対象物体列に追隨して走行するだけでなく、複数の対象物体列がある場合が多い。例えば複線化された電車の線路のように対象物体列を設定する場合がこれに当たる。最初に、どの対象

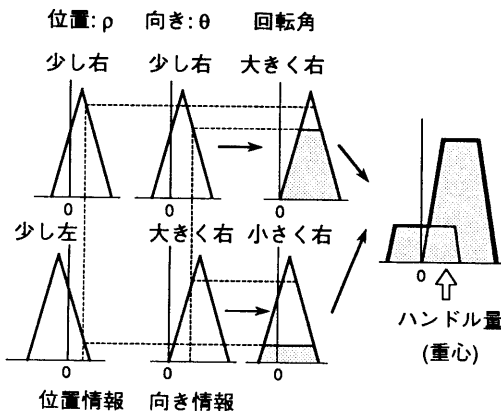


図8 ファジィ推論の原理

物体列に追隨して走行するかを決めるのは人間であるが、追隨の途中で画面に他の対象物体列が入って来るのは避けられない。

表1 ファジィルールの種類と数

IF部変数 (AND 関係で結合)		数
位置: ρ	位置の時間変化: $\Delta\rho$	9
位置: ρ	角度: θ	9

表2 角度: θ のメンバシップ関数

	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
大右	10	8	5	3							
小右	3	5	8	10	8	5	3				
0			3	5	8	10	8	5	3		
小左					3	5	8	10	8	5	3
大左								3	5	8	10

(単位: 1/20 rad)

表3 ファジィ推論ルールベース1

No.	IF部変数		THEN部変数
	位置: ρ	$\Delta\rho$	ハンドル量
1-1	ずれ無し	変化無し	中央
1-2	小さく右	小さく左	中央
1-3	小さく左	小さく右	中央
1-4	小さく右	小さく右	小さく右
1-5	小さく左	小さく左	小さく左
1-6	小さく右	大きく左	小さく左
1-7	小さく左	大きく右	小さく右
1-8	大きく右	変化無し	大きく右
1-9	大きく左	変化無し	大きく左

表4 ファジィ推論ルールベース2

No.	IF部変数		THEN部変数
	位置: ρ	角度: θ	ハンドル量
2-1	ずれ無し	同方向	中央
2-2	小さく右	同方向	小さく右
2-3	小さく左	同方向	小さく左
2-4	小さく右	小さく右	大きく右
2-5	小さく左	小さく左	大きく左
2-6	小さく右	大きく左	大きく左
2-7	小さく左	大きく右	大きく右
2-8	大きく右	同方向	大きく右
2-9	大きく左	同方向	大きく左

これを解決するため、直前の対象物体列のパラメータ (ρ, θ) に応じて、画面にマスクをかけて他の対象物体列が入ってきても、本来追従すべき対象物体列のみを抽出できるようにした (図 9)。

3. 開発したシステム

開発した方式をもとに移動車の視覚制御システムを開発した。筆者らは、単なる実験用システムでなく、実用的なシステムの開発を目的とした。このためシステムは、下記の①②を満足する必要があった。

- ① 実時間でハンドル制御できる高速処理
- ② 移動車に容易に搭載できる小型・軽量システム

これらの条件を満たすため、本システムを画像処理ボードと CPU ボードの 2 枚のプリント板から構成した (図 10)。画像処理ボードでは、色抽出と論理フィルタ機能を実行する。特に論理フィルタ機能は LSI 化した。CPU ボードでは、ハフ変換とファジィ推論をファームウェアとして実行する。この結果、本システムを約 A 4 版 \times 10 cm と超小型化できた (図 11)。以下、各部の詳細を述べる。

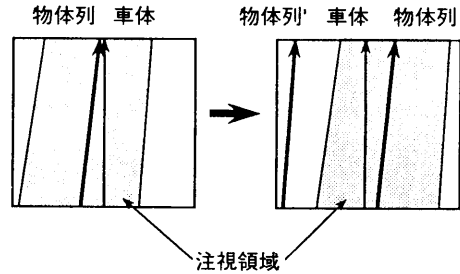


図 9 対象物体列の選択

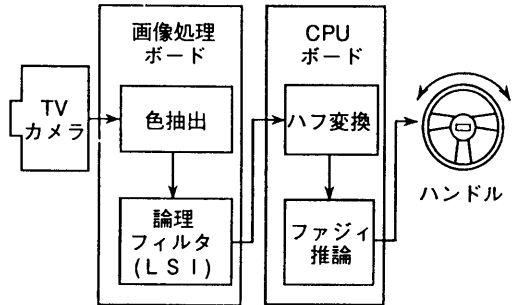


図 10 システム構成

3. 1 画像処理ボード

色抽出部と論理フィルタ部は電源部と合わせて、1 枚の画像処理ボードとして実現した。

3. 1. 1 色抽出部

デジタル回路を用いると、カラー 3 原色 RGB の信号をそれぞれ A/D 変換する必要があり、これではシステム全体が大きくなる。

そこで、色抽出部をアナログ回路を用いて構築し、A/D 変換部を一箇所とした (図 12)。任意の色をアナログ回路で抽出するのは困難であるので、抽出色はカラー 3 原色 RGB (赤、緑、青) のうちの任意の 1 色とした。アナログ色抽出部において画面全体から指定色を抽出した後、2 値化している。

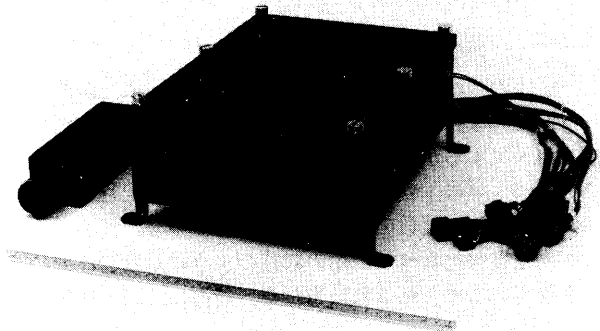


図 11 装置外観

3. 1. 2 論理フィルタ部

大きさ依存型の雑音は、論理フィルタ部で除去する。局所並列パイプラインアーキテクチャを採用した論理フィルタ部 (図 13) により、

- ① ビデオ速度による高速処理
- ② フレームメモリの不要化による小型化を実現した。

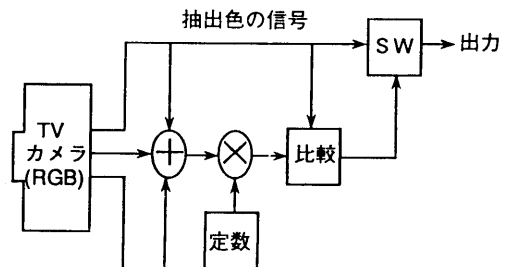


図 12 アナログ色抽出部の構成

しかし、これでもプリント板で実現するとA4版程度となり大き過ぎるので、LSI化を実施し、さらに小型化を実現した(図14)。

さて、TVカメラとしては、標準の2:1インタレースのものを用いたが、本システムのような使い方をする場合には1画素レベルの細部の情報は不要である。そこで、インタレース処理せずに、1フィールドを1画面として処理し1秒間に60枚の画像を取り込むことで、さらに高速処理できるようにした。

論理フィルタ部の処理結果は2値画像であるが、画面全体の処理結果は情報量が多過ぎ、CPUボードで実時間処理できない。そこで、論理フィルタには圧縮効果があることを利用して入力画像の横中央を4画素毎に処理することで、63×63の2値画像に圧縮するようにした(図15)。

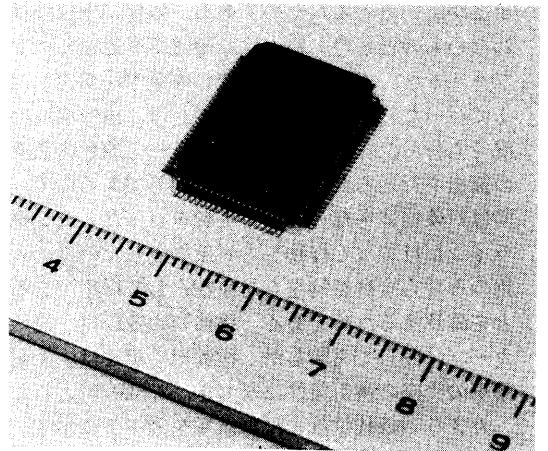


図14 論理フィルタLSI

3.2 CPUボード

CPUボードは、制御用に専用化することにより小型化した。CPUにはi80286(8MHz)を用いた。構成を図16に示す。

画像処理ボード・インタフェースとしては、画面全体において対象物体の部分の割合が少ないことを利用し、指定色の部分の座標情報のみを送り、CPUボードで実時間処理できるようにした。

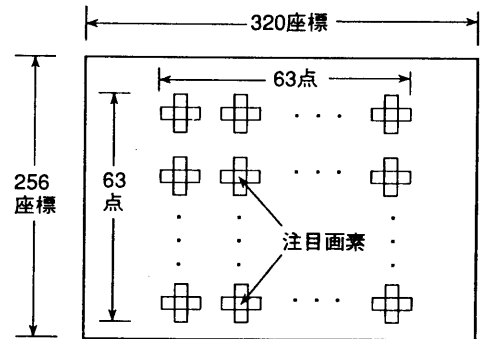


図15 論理フィルタの処理位置

4. 実験

4.1 内容

開発した装置を移動車に搭載し、表5の条件で無人走行実験を行った。実用化を考えて、様々な条件を設定した。

屋外で無人走行実験を行なったのは、屋内よりも

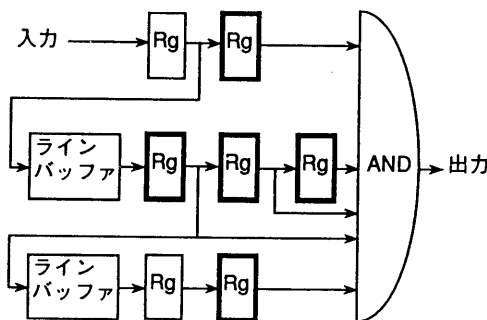


図13 論理フィルタ部の構成

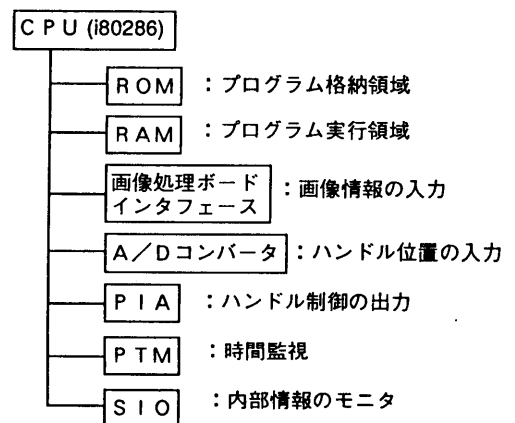


図16 CPUボードの構成

用途が広いと考えたためである。気象は雨以外は問わないものとした。路上は、搬送車を想定したアスファルトと、工所用や農林業の作業車を想定した泥土で行った。アスファルトの場合は、雨で濡れた状況でも行った。本システムはカラー三原色の任意色の抽出を行えるが、どの色でも同じであるので、今回は対象物体を緑色として実験を行った。センターラインだけでなく作物をも対象物としたのは、人工物のみならず自然物をも対象物として採用できることを確認するためである。物体列の並びは、直線とカーブに関して実験した。移動車の車速は、上記作業車の実際の運用条件に基づき、2.5km/時とした。カメラの搭載位置と視野領域を図17に示す。

4. 2 結果

この結果、画像処理ボードでは16.7msで対象物体を抽出できるが、画像入力からハンドル制御まで平均100ms という高速処理が確認できた。また、対象物に沿って±5cmの精度で追従して無人走行でき、十分実用的であることが判明した。

5. 考察

屋外の現場試験で実用性が確認できた。今回の無人走行実験は屋外で行ったが、屋内の蛍光灯のもとでも対象物体の抽出ができており、屋内でも無人走行できると考える。

本視覚制御システムの実用性は、動画像処理プロセッサとファジィ理論を組み合わせたことによる効果であると考えられる。動画像処理により高速性が実現でき、ファジィ理論により人間の運転ノウハウによるハンドル制御が実現できた。また、画像処理部のLSI化などにより、超小型にでき移動車の搭載も容易となっている。

6. まとめ

動画像処理プロセッサとファジィ理論を組み合わせた移動車の視覚制御システムを開発した。専用画像処理LSIと専用CPUボードにより超小型化しており、画像を実時間で処理できるので画像入力からハンドル制御まで非常に高速に処理できる。

実用化を想定した実験において非常に劣悪な環境を設定したにもかかわらず、実用的な性能を確認できた。本システムは、非常に広汎な産業応用に適用可能であると考えられる。

謝辞

本システムの研究開発に当たり、多大な御支援をいただきました吉田パターン研究部部長、棚橋情報処理研究部門長に深謝いたします。

文献

- (1) L. A. Zadeh : Fuzzy Sets. Information & Control, 8, pp.338-358 (1965).
- (2) 金出他 : 3-D vision for an autonomous vehicle. Proceedings of International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence. (1987).
- (3) 吉田他 : カラー動画像処理システム : FIVIS/VIP. FUJITSU 39, 4, pp.206-213 (1988).
- (4) 廣田 : ファジィ制御の現状と展望, 計測と制御, Vol. 27 No. 5 (1988).
- (5) E. D. Dickmanns : Subject-object Discrimination in 4D-Dynamic Scene Interpretation for Machine Vision. Proceedings of Workshop on VISUAL MOTION, IEEE (1989).

表5 実験仕様

環境	屋外、晴れ&曇り
路上	アスファルト、泥土
対象物	センターライン (緑色) 作物 (10cm高, 2cm直径, 20cm間隔)
物体列	直線, カーブ (3m半径)
車速	2.5km/時

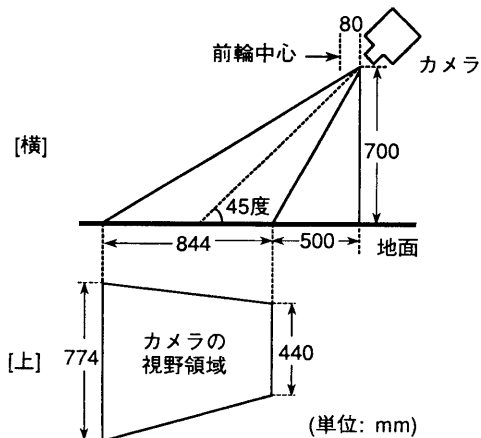


図17 カメラの搭載位置と視野領域