

自律走行車用視覚情報処理システム

尾崎 暢 大空 真由美 平塚 芳隆
(株) 富士通研究所 富士通 (株)

高速動画画像処理システムを車輦に搭載し、そのシステム上に道路上の白線を検知するアルゴリズムをインプリメントし、ビデオレートで白線検知することが可能な視覚機能を実現した。また、高速両眼立体視機構を開発し、道路上に置かれた一辺が20cm以上の物体をビデオレートで障害物として検知可能な視覚機能を実現した。

そして、車輦静止状態において検知精度を測定した結果、車輦の自律走行に十分な精度であることを確認した。さらに、テストコースで種々の実験を行った結果、曲線路、交差点での円滑な走行、直線路における60km/h走行および障害物が道路上に存在するときの停止/回避走行ができることを立証し、本システムの有効性を確認した。

An Visual image processing system for an autonomous vehicle

Tohru Ozaki, Mayumi Ohzora, and Yoshitaka Hiratsuka
Fujitsu Laboratories LTD. Fujitsu LTD.
1015, Kamikodanaka Nakahara-ku, Kawasaki 211, Japan

We have developed a high speed image processing system for an autonomous vehicle PVS, Personal Vehicle System. The goal of PVS was to be able to run autonomously, detecting white lines and obstacles on a road including straightsections, curves, and intersections.

A video-rate image processing system was developed and utilized in order to realize high-speed image processing. Position data for white lines and for obstacles is obtained at every 30 milliseconds.

Exactly, the PVS was able to run autonomously at 60 km/h on straight sections, at 15 km/h on curves, and at 5 km/h through intersections in our testing ground.

1. まえがき

画像処理技術を用いた自律走行車の基礎研究は、1970年代より各国で研究されてきている。しかしながら、本格化し始めたのは1980年代中頃であり、米国のDARPA (Defense Advanced Research Project Agency) によるALV (Autonomous Land Vehicle)プロジェクトの開始以降である。

米国マーチンリエッタ社によるALV¹⁾は、環境を認識するセンサとしてカラーTVカメラとレーザ・レンジ・ファインダを搭載し、障害物を回避しながらクロスカントリを自律走行する車である。ALVは、センサと処理装置のボトルネックで走行速度が10~20km/h程度である。

米国カーネギーメロン大学のNAVLAB (Navigation Laboratory)²⁾は、カラーTVカメラ2台とレーザ・レンジ・ファインダを搭載し、障害物を回避しながらオフロードを自律走行する車である。NAVLABは、天候や道路の状況変化への対応や三次元物体の認識ができることを目指したもので、走行速度には主体をおいておらず高々3~5km/h程度である。

西ドイツBwミュンヘン大学のVaRoMs³⁾は、広角レンズ用とズームレンズ用の2台のTVカメラを入力機器とし、画像データを高速処理する専用プロセッサを搭載し、高速道路を自律走行できる車である。VaRoMsは、雨天時やトンネル内走行ができ、最高時速100km/hを達成した。しかしながら、単眼のため正確な距離情報を抽出するには至らず、完全な障害物回避走行は実現されていない。

今回の開発研究テーマは、通産省の外郭団体である(財)機械システム振興協会から受託したものであり、「だれでも」「いつでも」「どこでも」という移動の本質を有する自動車を開発し、21世紀に向けての新しい社会システムを構築することを

目指した。開発期間は1988年から3年間で、路上の白線と障害物を検知しながらあらかじめ指示された目的地まで自律走行できるPVS (Personal Vehicle System, 図-1)を開発することが目的であった。PVSは、視覚情報処理部と車輛制御部から成り、我々は視覚情報処理部の開発を担当した。

こうした状況のもとわれわれは、これまでに開発した動画像処理システムFIVIS/VIP (Fujitsu Integrated Visual Information System / Video-rate Image Processing system)⁴⁾を車輛に搭載し、これまで実現されていなかった二次元画像処理による白線検知と三次元画像処理による障害物検知を両立させた高速視覚情報処理システムの開発に成功した。本報告では、視覚情報処理部における白線検知方式と障害物検知方式に関して、開発したアルゴリズムとその検証実験/評価について述べる。



図-1 自律走行実験中のPVS

2. 座標系の定義

本システムを開発するにあたり、座標系を図-2のように定義した。図に示すように、XZ平面 ($Y=0$) を道路面とし、それに垂直なXY平面 ($Z=0$) を車輛の前面とする。画像座標は、図のような撮像面上にxy平面があり、走査線の方角をx軸とし、それに垂直な方向をy軸とした。そして、白線検知用の中央TVカメラは、その撮像面のx軸とX軸を平行に、また、そのレンズ焦点をY軸上になるように設置した。撮像面の中央p点からZ軸方向へ垂線を引き、Z軸と交わった点をPとする。この直線p-PをTVカメラの視軸と呼ぶ。

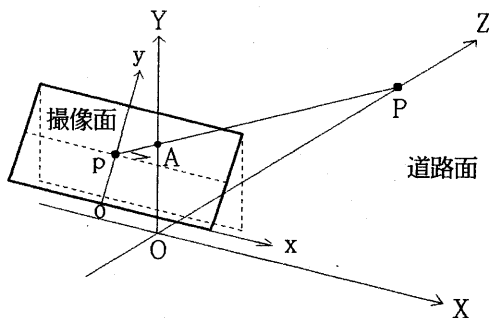


図-2 座標系の定義

3. システム構成

開発したPVS用視覚情報処理システムの構成を図-3に示す。

白線検知部は、3台の白黒TVカメラ、その内1台を選択するスイッチャ、ビデオレート (30画像/秒) で画像処理を行うFIVIS/VIP、制御コンピュータIにより構成した。3台のTVカメラは中央前方、斜め右前方および斜め左前方を撮像し、それら3つの画像のうちの1つを直線カーブおよび交差点などの状況に応じてビデオスイッチャの切り換えを制御コンピュータIによって行うことにより選択する。FIVIS/VIPは、次章で述べるアルゴリズムに従って道路上の白線の領域を抽出する。制御コンピュータIは、TVカメラの設置パラメータと抽出された白線領域を使って、白線の道路上の位置データを算出する。

障害物検知部は、2台の白黒TVカメラ、ビデオレートで両眼立体視により距離情報を出力するFIVIS/VIPと、制御コンピュータIIから構成した。FIVIS/VIPでは、2台のTVカメラから同時に得られる画像を使って、視差画像を算出する。制御コンピュータIIは、視差画像とTVカメラの設置パラメータを使って、対象物までの距離データを算出する。そして、その距離デ

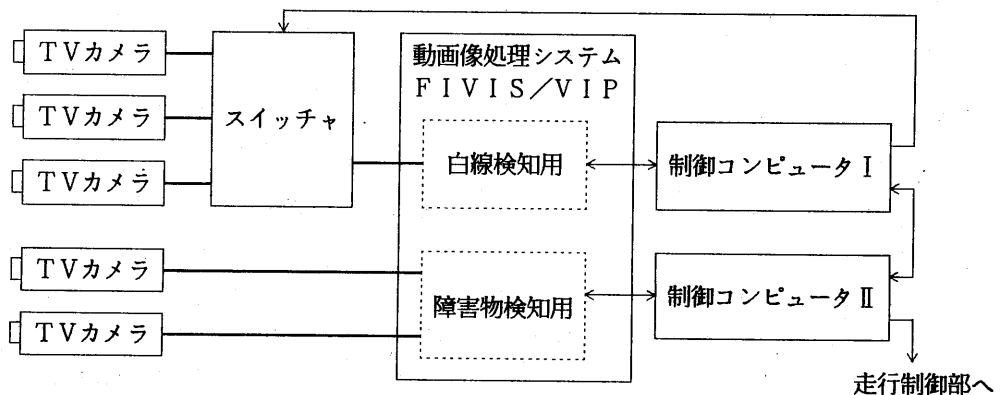


図-3 システム構成

ータと制御コンピュータ I との通信によって得られる白線位置データを比較することによって、道路上の三次元物体のみを障害物として検知する。

最終的には、白線と障害物の位置情報だけを車輛の走行制御部へ転送する。

5台のTVカメラは、FIVIS/VIPからの同期信号によって外部同期がかけられているためにすべて同じ同期で画像が得られる。

4. アルゴリズム

4.1 開発条件

本アルゴリズムは、表1に示すような開発条件の下で、道路上の白線および障害物を検知できるように開発した。

4.2 白線検知方式

4.2.1 道路上の白線条件と表現形式

道路幅4m、白線幅15cmの道路条件の下で、高さ2.43mの車輛の前方5mから25m程度の視野を検知対象とした。この視野範囲は、上記の道路を時速30km/hで走行した場合、カーブや交差点を発見してから安全に車輛制動できる範囲である。

TVカメラで得られる画像は、図-2から明らかのように、三次元のXYZ空間が二次元のxy平面に投影されたものである。したがって、xy平面上で画像処理を行った後、TVカメラの設置位置とレンズパラメータを使ってXYZ座標へ変換する。白線の位置はZ軸方向に1m間隔にサンプリングし、車輛制御部へ転送する。

4.2.2 白線検知アルゴリズム

白線検知の処理フローを図-4に示す。

1) 領域分離

画像中の白線と路面の濃度差から決定した閾値によって画像を二値化し、領域ごとに異なる番号を割り付ける(ラベリング)。これによって、入力画像中の濃度の高い領域だけを抽出でき、しか

表-1 開発条件

項目	内容
天候/時間	晴天, AM10時頃~PM4時頃
白線	道路幅4m, 白線幅15cm, 白線上に汚れ/影がない
障害物	幅および高さが20cm以上, 静止物体, 物体は視野内に1個

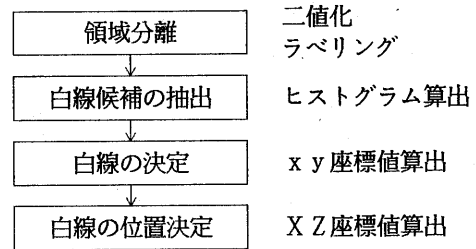


図-4 白線検知の処理フロー

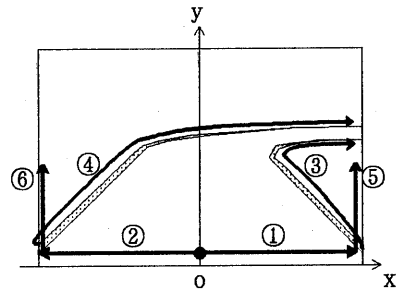


図-5 白線決定のための探索シーケンス

も領域ごとにラベルで管理をすることができる。

2) 白線候補の抽出

ラベル付けした画像のヒストグラムを算出することで、領域ごとの面積を算出する。

3) 白線の決定

図-5は白線候補を探索するシーケンスを示したものである。探索開始点は、xy平面の原点0であり、y座標値を変化させずにx座標の正方向①へ、つぎに負方向②へ探索する。探索中に領域を発見したらその領域の面積値を確認し、その領域があらかじめ与えられた閾値以上の面積値をも

っているならば、その領域に沿って③④のように追跡する。①②のように探索しても領域が見つからない場合には、⑤⑥のように画像の端に対して、同様の探索を行う。また、破線の場合には、両側の白線を検知した後片側の白線の位置からx方向に4m分だけ離れた付近を探索する。交差点などの場合には、追跡していくと端点が画像端になるため、その地点からy軸方向に道路幅4m分だけ離れた付近を探索する。

4) 白線の位置決定

投影されたx y平面上の座標が決まれば、TVカメラの設置位置とレンズパラメータを使って、XYZ空間上での白線の位置を計算することができる。ここで、デジタル画像におけるx方向の解像度(画素数)を R_x 、y方向の解像度(画素数)を R_y とし、TVカメラの設置高をH、俯角を θ とする。レンズパラメータとしては、水平面角を ϕ_H 、垂直面角を ϕ_V とする。この時、XZ平面上での白線の位置座標は式(1)と式(2)のように表現できる。

$$Z = H \tan \left[\frac{2\pi\theta}{360} - \tan^{-1} \left\{ \left(1 - \frac{2y}{R_y} \right) \tan \left(\frac{\pi\phi_V}{360} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

$$X = \frac{2}{R_x} (y^2 + H^2)^{0.5} \left(\frac{R_x}{2} - x \right) \tan \left(\frac{\pi\phi_H}{360} \right) \quad (2)$$

4. 3 障害物検知

4. 3. 1 道路上の障害物条件と表現形式

2台のTVカメラで得られる画像は、図-6 a) から明らかなように、それぞれが三次元のXYZ空間を二次元x y平面へ投影したものである。2つの入力画像の同じ対象を見つけその位置の違いを視差として求め、三角測量の原理を利用して物体までの距離情報を算出する。このとき、ガードレールなども三次元物体として抽出されるものの、

白線検知部で得られる道路領域の位置情報を利用して、路上内だけの物体を障害物として見なす。

抽出した物体までの距離情報は、図-6 b) のようにXZ平面上に写像し、車輛に一番近い物体上の点A、物体の最左点B、最右点Cの三点のXとZの値を車輛制御部へ転送する。

4. 3. 2 障害物検知アルゴリズム

障害物検知のための両眼立体視方式は、路上に対して垂直方向に置かれた物体を検知することから2台のTVカメラを縦方向に配置し、上下方向で濃淡変化の激しい部分(水平エッジ)の対応付けを基本とする。たとえば、図-7に示すようなエッジ画像が抽出された場合、三次元物体は上下方向に正極性エッジ(暗→明)と負極性エッジ(明→暗)がペアで存在する。このとき、正・負極性エッジ間の距離D1とD2は、 $D1 \neq D2$ ならばペアのエッジは上画像と下画像間で同時に合致することはなく、 $D1 = D2$ ならば下画像を視差S画素分だけ移動させることで上画像のペアと合致する。この視差を抽出できると、TVカメラの設置位置とレンズパラメータから、XYZ空間内における距離情報を算出することができる。

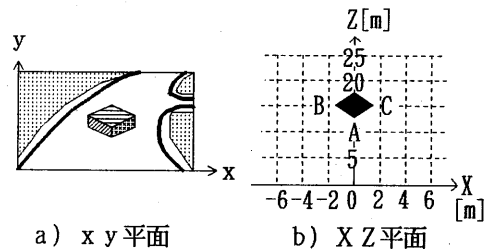
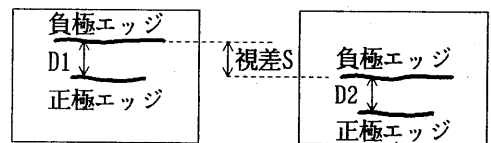


図-6 障害物の表現形式



a) 下エッジ画像 b) 上エッジ画像

図-7 二重像合致の原理

障害物検知の処理フローを図-8に示す。

1) 水平エッジ抽出

図-9に示すようなウィンドサイズ3×3の空間フィルタを走査し、y方向微分を算出する。その後、その結果をテーブル変換することにより、符号付の水平エッジを抽出する。

2) 視差生成

画像をx y平面のy方向に1画素分ずつ平行移動することで(m+n)種類の視差画像を同時に生成する。

3) 二重像合致

(m+n)種類の視差画像を比較し、合致したエッジのペアに対して、その区間内を視差Sで置換する。これにより、正極性エッジと負極性エッジで囲まれた領域(線/面)は同一の視差Sをもつ。この処理を高速化するために、(m+n)種類の画像の比較を並列に実行できるプロセッサを開発した。

4) 合致点のXYZ座標計算

2台のTVカメラは図-10に示すように設置した。すなわち、2台の焦点はY軸上にあり、下カメラの視軸はZ軸に平行であり、上カメラの視軸はZ=Bの地点で下カメラの視軸と交わっている。また、TVカメラ間の距離をAとする。このようにTVカメラを設置した場合、各パラメータを使って、XYZ空間上での障害物までの距離を算出することができ、XZ平面上での障害物の位置座標は式(3)と式(4)のように表現できる。ここで、デジタル画像におけるx方向の解像度をR_x、y方向の解像度をR_yとし、レンズパラメータとしては、水平画角をφ_H、垂直画角をφ_Vとする。

$$Z = B \left\{ \frac{2S \tan(\phi_H / 2)}{R_x} + \frac{A}{B} \right\} \quad (3)$$

$$X = \frac{2Z}{R_x} \left(y - \frac{R_y}{2} \right) \tan\left(\frac{\phi_V}{2}\right) \quad (4)$$

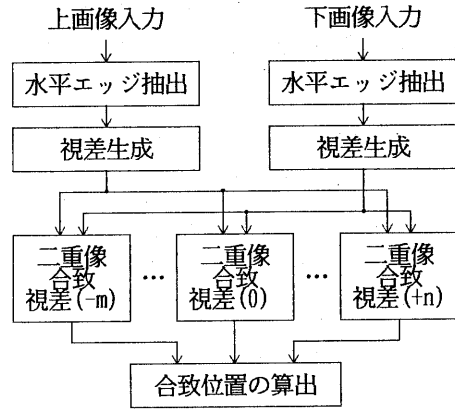


図-8 障害物検知フロー

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

図-9 空間フィルタの係数

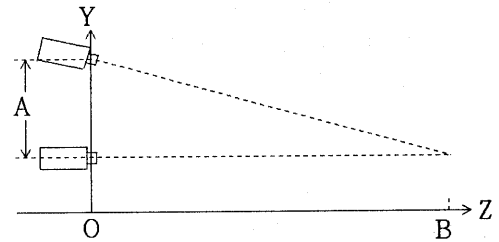


図-10 障害物用TVカメラの位置

5. 実験結果

5.1 白線検知

白線検知用のTVカメラは地上高2.43mに、俯角71.7度、垂直画角42.8度で設置した。さらに、水平画角55.5度の3台のTVカメラの視野が車輪前方約5mの地点で交差するようにしたことによって、スイッチングはするものの全体で約120度相当の水平画角を得た。

図-11は、中央のTVカメラから入力された画像の一例であり、図-12は、XZ座標へ変換後の

表-2 白線検知位置精度

Z [m]	5	10	15	20	25
精度 [cm]	±1	±2	±3	±4	±4

白線の位置算出結果を2m間隔でプロットしたものである。

表-2は、車輛を停止させた状態での検知結果と実測値を比較した結果の検知精度である。本評価から、路上の白線を高精度で検知できることを確認した。

5.2 障害物検知

障害物検知用の2つのTVカメラのうち下方は地上高45cmの位置に俯角90度で、上方のTVカメラは地上高92cmの位置に俯角87.3度で設置した。これらの値は、路上の物体の高さ平均が100cm程度であることから決定したものである。レンズパラメタとしては、垂直画角60.8度、水平画角44.5度とした。

図-13および図-14は、上および下TVカメラから入力された画像対の一例である。これらの画像に対する検知結果の対象物の最左点、最右点および最近点は、 $(X, Z) = (-77\text{cm}, 2152\text{cm})$, $(87\text{cm}, 2152\text{cm})$, $(33\text{cm}, 2152\text{cm})$ であった。

また、車輛を停止させた状態で、検知結果と実測値とを比較した結果が表-3の検知精度である。本評価結果から言えることは、車輛前方5~10mの検知精度はまずまずであるが、前方距離が遠ざかるにつれて精度がかなり悪くなっていることが

表-3 障害物検知精度 単位:m

Z方向距離	5	10	15	20	25	
Z軸方向精度	-0.3	-0.9	-1.7	-3.5	-4.2	
	0.1	0.3	0.6	1.2	0.7	
X方向精度	0m地点	±0.0	±0.0	±0.1	±0.1	±0.1
	±2m地点	±0.1	±0.2	±0.3	±0.4	±0.4
	±4m地点	—	±0.4	±0.5	±0.8	±0.8



図-11 白線検知TVカメラ入力画像

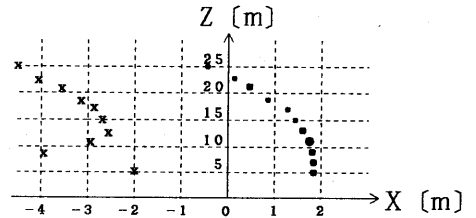


図-12 白線検知結果(白線の座標)

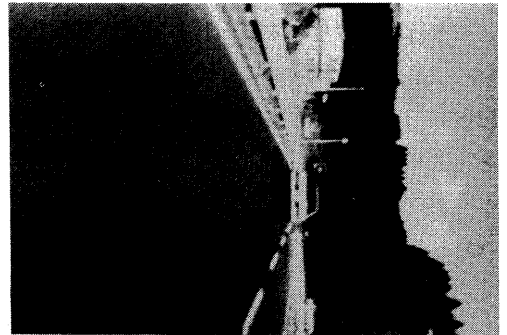


図-13 障害物検知上TVカメラ入力画像

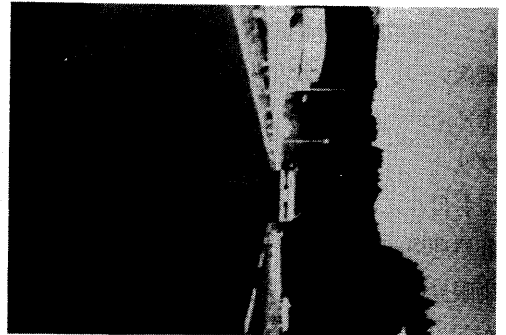


図-14 障害物検知下TVカメラ入力画像

明らかである。しかし、自律走行車においては、障害物の有無を遠くで発見しブレーキ制動を行い、車輻に近づくにつれて障害物の大きさと距離情報の精度が向上すればよく、満足できる精度である。

5. 3 走行実験

御殿場にある(財)機械システム振興協会のテストコースで走行実験を行った結果、直線路(最長80m)で30km/h、半径15mのカーブで時速15km/h、交差点で時速5km/hを達成した。また、機械技術研究所所有のテストコースにおいては、直線路で60km/hで走行させることができた。障害物検知実験では、路上に自動車を障害物として置き、障害物前での停止や自動回避を実現できた。

これらの実験において、視覚情報処理の結果はビデオレート(周期33ms)で出力したが、車輻制御周期は200msであり検知範囲が前方25mであることを考慮しても、障害物がなければ白線検知による走行はかなりのスピードアップが可能である。

これらの走行実験によって、富士通の開発した白線検知方式と障害物検知方式が有効であることを実証した。

6. むすび

道路上の白線と障害物をビデオレートで検知しながら、目的地へ向かって自律的に走行できる自律走行者用の視覚情報処理システムについて述べた。具体的な開発内容は、これまでに開発した動画像処理システムを車輻に搭載し、そのシステム上に道路上の白線を検知するアルゴリズムをインプリメントし、直線路はもちろん曲線路や交差点でも自在に走行できる自律走行車PVS用視覚情報処理機能を実現した。また、バイブライン型の両眼立体視機構を開発し、道路上に置かれた一辺が20cm以上の物体を障害物として判断して、停止や回避走行できる視覚機能を実現した。そして、

開発した技術を統合しテストコースでの種々の実験を行った結果、曲線路や交差点で円滑な走行ができ、直線路では最高60km/hで走行できることを実証した。

今後さらに実用化へ近づけるためには、我々人間の視覚機能と同様に影や天候などさまざまな環境変化に柔軟に対応できる視覚情報処理機能を実現しなければならない。

謝辞

本システムを開発するにあたり、御助言を頂いた大阪大学白井良明教授、東北大学中野栄二教授および富士通研究所の吉田真澄様、佐々木繁様に感謝する。

参考文献

- 1) A. Waxman, et.al: "A visual navigation system for autonomous land vehicles," IEEE Trans. on Robotics and Automation 2, pp.124 - 142(1987)。
- 2) C. Thorpe, et.al: "Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab," IEEE Trans. on PAMI 10, pp. 362 - 373(1988)。
- 3) E. D. Dickmanns: "Subject-object discrimination in 4d-dynamic scene interpretation for machine vision," IEEE Proc. In Workshop on Visual Motion, pp. 298 - 304(1989)。
- 4) 佐々木他: "構造可変型ビデオレート画像処理システム「韋駄天」", 情報処理学会研資, CV27-1, 1985。