

ITSにおける視覚の利用法

小野口一則 武田信之 仲野剛 中井宏章

† 株式会社 東芝 研究開発センター

あらまし 近年、渋滞緩和や交通事故の低減などを旨としたITS (Intelligent Transport Systems:高度道路交通システム) の研究・開発が盛んに行われている。安全運転を支援するためには、周囲の状況を把握するための情報入力手段が重要であるが、その中でもカメラからの画像は人間の視覚に対応した情報が得られるため、非常に有効な入力手段と言える。半導体技術の進歩やPCの普及に伴い、画像認識手段が安価に入手できる環境も整ってきており、今後、ITSの分野に盛んに利用されることが予想される。ITSへの画像の応用場面としては、道路に固定されたカメラを使うインフラ系の応用と、車載カメラを使う車載系の応用とがある。本稿では、車載系の応用、特に、安全性の向上に最も重要と考えられる前方監視への応用の中から、ステレオ視による前方障害物検出法及び多数の部分領域の追跡による割り込み車両検出法を紹介する。

キーワード 画像認識、ステレオ視、領域追跡、障害物検出、高度道路交通システム

Computer Vision Application to ITS

Kazunori ONOGUCHI, Nobuyuki TAKEDA, Tsuyoshi NAKANO, and Hiroaki NAKAI

† Corporate Research and Development Center, Toshiba Corporation

Abstract Recently, Intelligent Transport Systems(ITS) which aims at sorting out a traffic jam and supporting safety driving have been actively developed. Computer vision is one of the most important technologies in ITS because an image includes similar information as a human vision. Also, it has become much easier to apply because of today's semiconductor technology. Therefore, the computer vision technology will be more applied to ITS. It can be applied to major two fields. One is infrastructure systems using the camera fixed on the road, and the other is automobile systems using the camera mounted on the vehicle. This paper describes the front surveillance technology using computer vision in automobile systems.

Key words computer vision, stereopsis, tracking, obstacle detection, ITS

1. はじめに

人間は視覚から大半の情報を得ている。特に、周囲の状況を把握する際には、視覚から得られる情報に頼る部分が多い。ITSにおいても、情報の入力手段としてカメラからの画像を用いることは極めて自然なことと言える。ミリ波レーダーやレーザーレーダーにより先行車などの障害物を検出するシステムも実用化されているが、走行車線を示す白線などは画像でしか検出できないため、障害物が車線内に存在するか否かといった判断を下す場合、カメラとの併用が不可欠となる。画像からは、障害物と走行車線の情報が共に得られる。また、将来的には、

障害物の種別など、より高度な情報が得られる可能性もあり、非常に有力な情報入力手段と言える。

画像処理、特に動画画像処理は、処理データが膨大なため計算コストがかかり、従来は高価なシステムを必要としていたが、近年の半導体技術の進歩により、小型で低コストなシステムが実現されつつある。この面からも、今後、画像がITS分野に盛んに利用されることが予想される。

2. 車載画像認識の応用分野

図1に車載画像認識の代表的な応用例を示す。車両前方に向けて搭載されたカメラによる前方監視、ドアミラー

や車両後部に搭載されたカメラによる後側方監視、運転手に向けて搭載されたカメラによる車内監視などがある。

前方監視の例としては、ステレオ視により先行車の位置を検出し、衝突警報を出したり追従走行を行う装置が製品化されている [1]。また、高速道路における車線逸脱検知装置も実用化段階に入っている。後側方監視の例としては、バックカメラの画像からオプティカルフローを求め、フローの方向が FOE から湧き出す方向か否かで追い越し車両を検知する装置が開発されている [2]。画像認識用のメディアプロセッサに実装することで、低価格なハードウェアを実現している (図 2)。また、ドアミラー近辺に搭載したステレオカメラを用い、追い越しやすり抜け車両を検知する後側方監視装置 [3] も開発されている。車内監視では、顔向き検出 [4] や顔認証 [5] の脇見検知や個人認証への応用が考えられている。

死傷者事故の低減を考えると、以上の応用分野の中では前方監視の担う役割が大きい。既に製品化された例もあるが、装置価格が高いため、十分に普及しているとは言いがた、低価格な装置に実装できる手法が望まれている。本稿では、前方監視への応用例として、ステレオ視により走行レーン内の障害物を検出する前方障害物検出法、及び自車レーン内に割り込んでくる車両を検出する割り込み車両検出法を紹介する。本障害物検出法は、対応点探索が不要なため計算量が少なく、低価格な CPU でも実装できるとともに、天候に対するロバスト性が高く、雨天時や夜間においても安定に動作する。また、本割り込み車両検出法は、車両領域の一部から割り込みが検出できるため、近接領域での割り込みに対処できる。

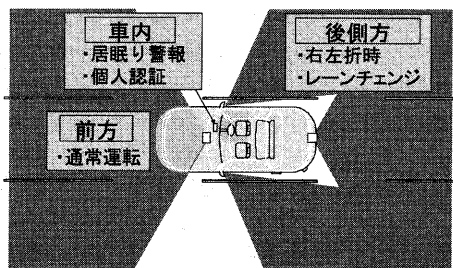


図 1 応用例

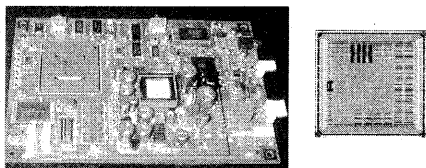


図 2 後側方監視装置とメディアプロセッサ

3. 前方障害物検出

3.1 従来手法

ステレオ視は、対象物の高さや位置を直接求めることができるため、非常に有効な手段であるが、左右画像間の対応点探索に多大な計算コストがかかり、低価格な CPU では実時間処理が難しいという問題点を抱えている。製品化された手法 [1] も、シーン全体の三次元情報を対応探索により求めるため、高価な処理装置を必要とした。装置単価を低く抑えるには、計算量の少ないアルゴリズムを開発し、低価格な CPU に実装することが必要である。

画像中のある領域が障害物であるか否かを判定するためには、その領域の高さが道路面と同じであるか否かを調べれば十分であり、シーン全体の三次元形状を獲得する必要は無い。この点に着目し、計算量を大幅に軽減した「平面投影ステレオ法」[6] [7] が提案されている。この手法は、左画像中に存在する全ての点が道路面と同じ高さを持つと仮定し、左画像を右画像面へ逆投影する。そして、この逆投影画像と実際の右画像との間の差を求め、差分値が大きい領域を障害物領域とする。

平面投影ステレオ法は画像のアフィン変換と差分処理により実現できるため [7]、従来の対応点探索に基づくステレオ法に比べ、計算量が大幅に少ないという利点を有している。しかし、予め道路面を表す平面を設定しておく必要があるため、車両のピッチングや勾配の変化によって生じる設定平面と実際の道路面との間の誤差に弱く、また、雨天時の映り込み領域や石畳、樹木の影など道路面上の細かいテクスチャー領域を誤検出するといった問題点も抱えている。本章では、疑似射影カメラモデルを用いることにより、平面投影ステレオ法に含まれるこれらの問題点を解決する手法を述べる。

3.2 疑似射影カメラモデルを用いた逆投影

走行レーン中の障害物を検出する場合を考える。走行レーンの検出には文献 [8] の手法を用いる。白線などのレーンマーカーが存在しない場合には、車幅を基準に設定した前方領域、あるいは操舵角や車速から推定した進行方向に相当する領域を障害物の検出領域とする。カメラと道路面との相対的な位置関係を図 3 に示す。カメラは互いに光軸が平行、かつ、車両前方の無限遠点を画像中心付近で捉えるように設置されている。

対象を道路面上の点だけに限定し、疑似射影カメラモデルのアフィン GP 拘束 (Affine Ground Plain Constraint) [7] を当てはめると、道路面上の点 P の左カメラ画像上への逆投影点 $u = (u, v)^T$ と、 P の右カメラ画像上への逆投影点 $u' = (u', v')^T$ との関係は (u' は、 u の対応点)、 A を 2×2 の行列、 t を 1×2 のベクトルと

して、

$$u' = Au + t \quad (1)$$

というアフィン変換の形式で表せる。(1)式により、左画像中の道路面上の点は、右画像中の対応する道路面上の点に変換されるため、左画像中の全点を(1)式で変換した画像と実際の右画像との間の差から、道路面と高さが異なる領域を求めることができる。

3.3 アフィン変換パラメータの補正

(1)式中的アフィン変換パラメータ A 及び t は、道路面上の点の左右画像上での投影点を4点以上指定することで算出できるが、擬似射影カメラモデルの下では、車体のピッチングなどで生じる道路面の傾きの変動により、 t の値が変化する (A は不変) [7]。このため、 A はカメラ取り付け時に求めた値をそのまま用いることができるが、 t はフレーム毎に補正しなければならない。図4に示すように、ある一定の角度 $\Delta\theta$ で設定面の傾きを変化させた場合を考える。左右カメラの光軸が平行であり、道路面に対するロール角が無視できるとすると、道路面の傾きの変化によって生じる左右画像中の各点の垂直方向の変位量は等しくなる。このため、カメラ取り付け時に求めたアフィン変換パラメータ A 、 t を用い、左画像を(1)式で変換する。この変換画像を水平方向に平行移動させた画像が、道路面の傾きを変化させた際のアフィン変換パラメータによる変換画像に相当する [7]。よって、この水平移動量 d_i を求めれば、ピッチングなどで生じる道路面の傾きを補正したパラメータ $t' = t + (d_i, 0)$ が得られる。

以下に、 d_i を求める手法を記す。走行レーンの検出結果を用い、図4に示すような走行レーンを含む台形領域 R_l を左画像中で設定する。次いで、領域 R_l を(1)式で変換した領域 R_l' を求める。 R_l が道路面のみを含む場合、変換画像 R_l' を d_i だけ平行移動させると、右画像と照合するはずである。このため、図4に示すように、右画像中で R_l' を水平方向に走査しながら相関を求め、最も高い相関値を示す水平移動量を d_i とする。 R_l 内に障害物が含まれると相関値のピークが低くなる。このような場合は、 $d_i = 0$ とし、カメラ取り付け時のアフィン変換パラメータをそのまま変換に用いる。(1)式の t を、 $t' = t + (d_i, 0)$ とすることで、道路面の傾きを補正した左画像から右画像への変換画像が得られる。

3.4 障害物検出法

水溜りに映る像は、道路面の下に存在するように見える。つまり、道路面に対し負の高さをもつ領域となり、従来の平面投影ステレオ法では、障害物として誤検出される。例えば、濡れた道路面に車両の背面が映り込んでい

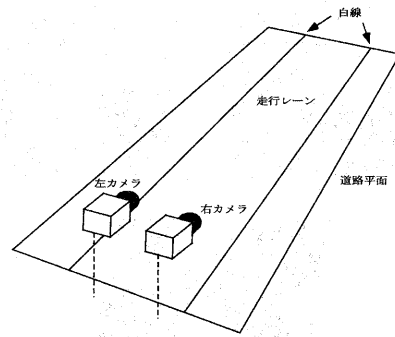


図3 カメラと道路面の位置関係

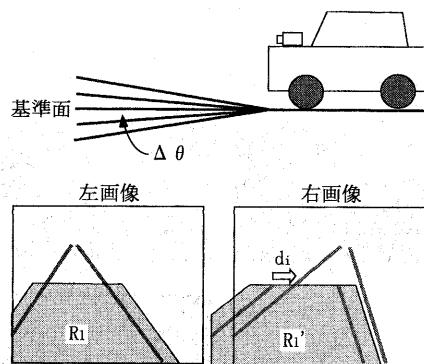


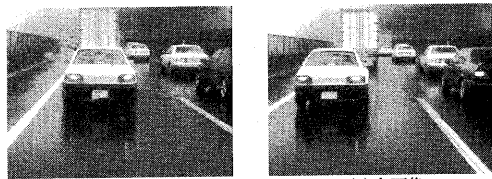
図4 道路面の補正

る図5(a)(b)の例では、(c)に示すように道路面に映り込んだ車両領域の変換画像-右画像間差分値 ((1)式により求めた左画像の変換画像と、右画像との間の差分値) も高くなり、映りこみを含んだ領域が障害物として検出される。ここでは、このような映り込み領域の誤検出を防ぐ手法について述べる。

左画像にて走行レーンが検出されているとすると、左画像上での障害物接地位置に対応する右画像上の障害物接地位置が(1)式の関係から容易に求まる。アフィン変換パラメータは、道路面の傾きを補正したものをを用いる。左右画像で接地位置上方の領域がどのように異なるかを調べ、障害物を検出する。

参考に、実際の障害物検出処理例を図6に示しておく。図中、(a)は左画像、(b)は右画像、(c)は変換画像である。また、左右画像中の斜め線は白線の検出結果、矩形は検出された障害物領域、水平線は検出された障害物の接地位置を示している。

最初に、障害物検出を行う画像領域 (以降、検出領域) の設定法を説明する。検出領域の形状は矩形とする。今、



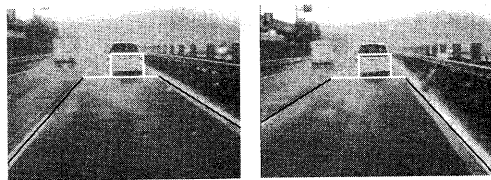
(a) 左画像

(b) 右画像



(c) 右画像-変換画像間差分

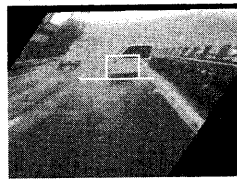
図5 濡れた道路面への映り込み



(a) 左画像

(b) 右画像

(1)式の変換



(c) 右画像

図6 障害物検出処理例

左画像中の接地位置 v での領域 R を、図7(a)中の矩形のように設定したとする。 R の位置は、ほぼレーン中央で下端が接地位置となるようにする。走行レーン検出結果から位置 v での走行レーンの幅が得られるので、 R の幅はレーン幅に対して決まった割合となるよう設定する。 R の縦横比も、障害物検出に適したものとなるよう予め決めておく。 R の下端の点は道路面上の点の投影点であるため、図7(a)に示す R の両下端点 A, B は、(1)式により図7(b)中の A', B' に変換される。よって、領域 R と同じ大きさの領域 R' が右画像中で設定できる。画像上の障害物の大きさは、消失点からの距離に比例するため、消失点からの変位 y に比例した大きさで R および R' を設定すれば、任意の距離で検出領域が設定できる。(図7(c)(d))。

次いで、検出領域内での障害物検出法を説明する。ある接地位置における左右画像中の検出領域 R 及び R' と、

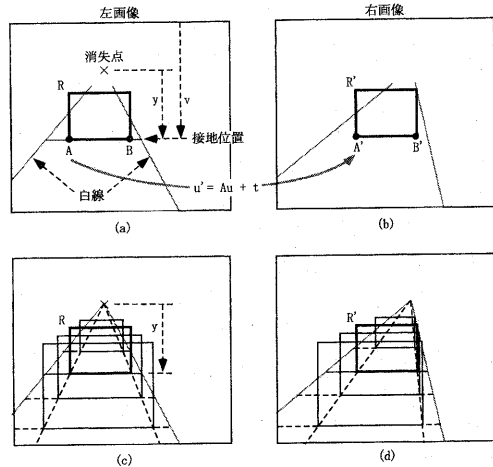


図7 検出領域の設定

変換画像中の検出領域 R'' の例を、図8及び図9に示す。 R'' の位置は R' と同じである。図8は障害物がある場合、図9は障害物が無い場合である。検出領域 R 内に障害物が存在する場合、障害物がカメラから遠ければ障害物背面はカメラ光軸に対しほぼ垂直であると仮定できる。従って、図8のように R と R' の画像パターンはほぼ等しくなる。つまり、左右画像の障害物像は、平行移動しているだけで画像パターンは同一となる。逆に、 R には道路面と高さが異なる障害物が含まれるため、 R' と R'' の画像パターンは異なる。

対照的に、 R 内に障害物が存在しない場合は、図9に示すように R と R' の画像パターンは異なり、 R' と R'' の画像パターンがほぼ同一となる。これは、左画像中の検出領域 R 内の点が全て道路面上にあるため、(1)式により右画像中の検出領域 R' 内の点と一致するよう変換されたためである。以上から、検出領域内の障害物の有無に関し、 R と R' 、 R' と R'' の画像パターンの相関関係をまとめると表1のようになる。これに基づいて画像パターンの相関を判断すれば、検出領域内の障害物の有無が判断できる。この障害物検出法を、図7(c),(d)に示す全ての y の検出領域について実行すれば、走行レーン内部に存在する障害物が検出できる。

従来の平面投影ステレオ法は、 $R' - R''$ 相関のみで障害物を検出しているため、 $R' - R''$ 相関が低い映りこみ領域を障害物として誤検出する。本手法では、検出領域の道路接地位置に立てた垂直平面上に障害物が存在する場合のみ、 $R - R'$ 相関が高くなることを利用して映りこみ領域の誤検出を防いでいる。

$R - R'$ 相関の大小だけからでもある程度障害物は検出

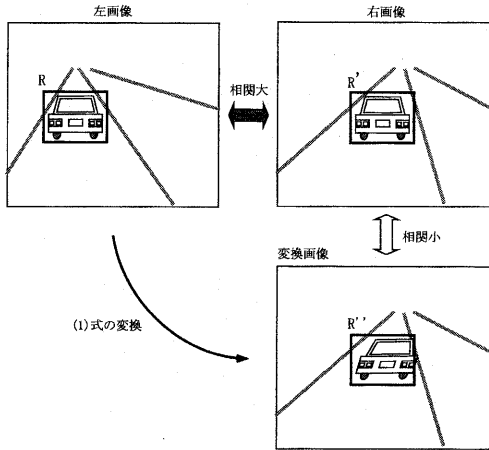


図 8 画像パターン (障害物有り)

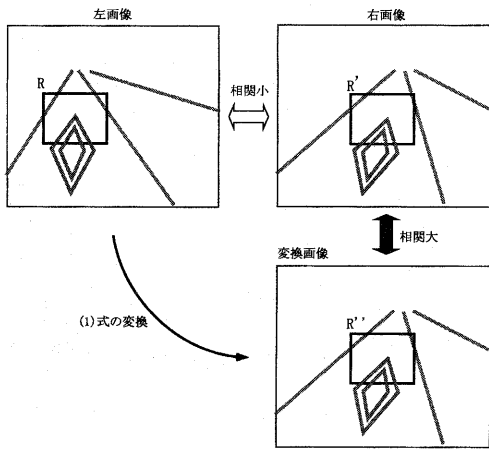


図 9 画像パターン (障害物無し)

可能であるが、検出領域内に雨滴が多く見られたり、フロントガラスへの映り込み等がある場合、障害物が存在しても $R - R'$ 相関が低くなり、検出漏れの頻度が高くなる。また、白線のかすれなど道路面上のテクスチャが弱い場合には、障害物が存在しなくても $R - R'$ 相関が高くなり、誤検出が増加する。よって、2つの相関関係が障害物の有無により相補的に変化することを利用し、性能の良い障害物検出法を実現した。

3.5 実験結果

本手法により前方の先行車両を検出した例を図 10 に示す。 $R - R'$ 相関、 $R' - R''$ 相関ともに SAD(Sum of Absolute Difference) を用いており、 $R - R'$ 相関が高く、 $R' - R''$ 相関が低い検出領域の中で、最も自車両に近い検出領域の接地位置をレーン内の障害物位置としている。

表 1 障害物有無と画像パターン相関の関係

障害物	$R - R'$ 相関	$R' - R''$ 相関
あり	大	小
なし	小	大

Pentium 4 1.7GHz の PC を使い、ビデオレートで動作している。

濡れた道路面に車両背面が映り込んでいたり、激しい水煙や夜間時の暗がりにより車両の接地位置が見えない場合においても、先行車の接地位置が正しく検出されている。また、図 10(d) では、樹木の影などが多数道路面に射しているが、アフィン変換パラメータの補正により、これらの影を誤検出していない。

4. 割り込み車両検出

3. 章において、走行レーン中に存在する障害物の検出手法を述べたが、この手法では隣接車線から割り込んでくる車両を早期に発見することはできない。渋滞時など、自車両の直前に割り込んでくる車両もあり、検出が遅れると非常に危険である。このため、動きの情報を用いて隣接車線からの割り込み車両を素早く検出する手法を提案する。

4.1 従来手法

画像により割り込み車両を検出する手法としては、単眼視によるもの [9] とステレオ視によるもの [10] がある。ステレオ視による手法は、検出領域が共通視野内に限られるため、狭くなるという問題を抱えている。割り込み車の早期発見という点では、単眼視による手法が有利である。単眼視による手法としては、前方車両の後部全体を追跡する手法 [9] が提案されているが、車両の後部全体がカメラの視野内に完全に入るまで、追跡の対象になら

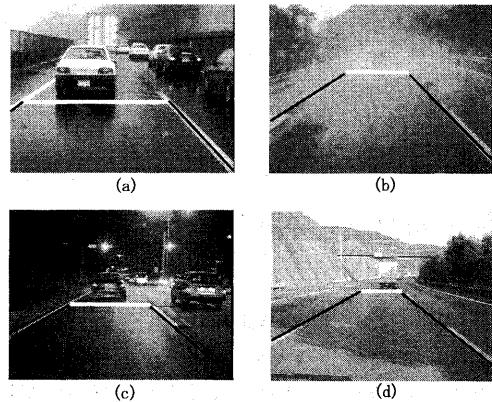


図 10 障害物検出結果

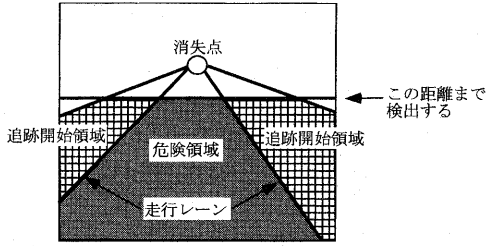


図 11 処理領域の設定

ないため、車体の側面しか見えていない状況には対処できない。自車両の直前に割り込んでくる車両は、側面しか見えない段階で検出する必要がある。本章では、複数の部分領域を追跡することにより、車両の一部しか視野内に入っていない場合にも対処できる割り込み車両検出手法 [11] を述べる。

4.2 複数の部分追跡による割り込み車両検出手法

隣接車線を走行する車両の移動軌跡が自車両の走行レーンの境界と交差する時、割り込み車両と判断する。遠方での割り込みは、安全性に影響を及ぼさないため、自車両から一定の距離までを処理領域とする。図 11 に示すように、走行レーン内の処理領域を危険領域、走行レーン外の処理領域を追跡開始領域とする。

まず、追跡開始領域において、車両部分領域を検出する。画像中の水平線が地平線と平行になるようカメラを設置すると、前方の車両は水平エッジ、垂直エッジを多数含んでいる。このため、追跡開始領域内で水平エッジ及び垂直エッジを求め、その周囲の矩形領域を車両部分領域とする。水平エッジ及び垂直エッジは、分離度フィルタ [12] を用いて検出する。図 12 において、領域 1、2 の分離度 η は、以下の式から求まる。

$$\eta = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_T^2} \quad (2)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^{n_1+n_2} (P_i - \bar{P}_m)^2 \quad (3)$$

$$\sigma_b^2 = n_1(\bar{P}_1 - \bar{P}_m)^2 + n_2(\bar{P}_2 - \bar{P}_m)^2 \quad (4)$$

n_1, n_2 : 領域 1、2 内の画素数

P_i : 画像における位置 i の輝度

\bar{P}_1, \bar{P}_2 : 領域 1、2 内の平均輝度

\bar{P}_m : 領域全体の平均輝度値

分離度 η の値が 1 に近い時、領域 1、2 の間にエッジが存在する。図 13 に示すように、水平エッジの検出には上下に並んだ矩形領域、垂直エッジの検出には左右に並んだ矩形領域を用いる。領域のサイズは消失点に近づく

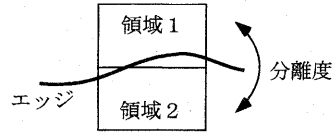


図 12 分離度フィルタの原理図

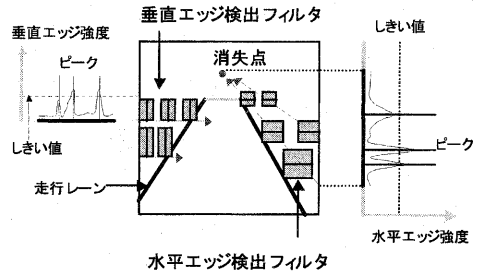


図 13 分離度フィルタによるエッジ検出

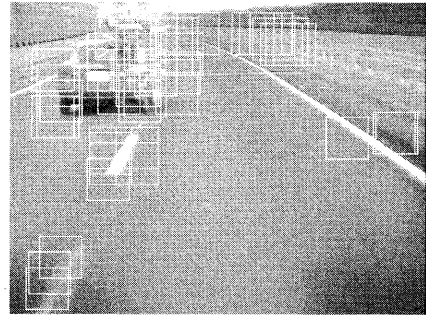


図 14 車両部分領域

につれ小さくなるよう設定する。水平エッジは、消失点方向へ向かう直線を追跡開始領域内で複数設定し、これらの直線上で求めた分離度の極大値が一定の閾値よりも大きくなる位置から求める。同様に、垂直エッジは、水平線を追跡開始領域内で複数設定し、これらの水平線上で求めた分離度の極大値が一定の閾値より大きくなる位置から求める。得られた水平及び垂直エッジの周囲に矩形領域を設定し、その領域内のエッジ密度が大きい場合、車両部分領域と判断する。図 14 に車両部分領域の設定例を示す。

次いで、車両部分領域を SAD (Sum of Absolute Difference) により追跡する。画像上で車両の見かけの大きさや向きが変化するため、車両部分領域が一定距離以上動いた時、照合に用いるテンプレートを更新する。追跡中、SAD 値が大きくなったり、テンプレート内部のエッジ密度が低くなったりした車両部分領域は、車両から外れた可能性が高いため、追跡を打ち切る。同様に、左 (右) 側

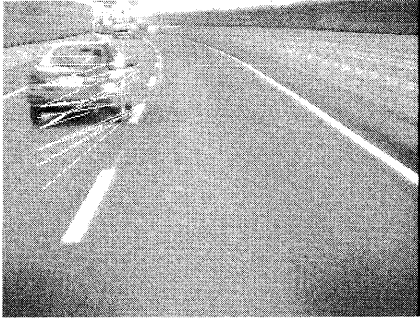


図 15 運動軌跡

のレーンから割り込む車両は、右（左）方向に移動するため、左（右）側の追跡開始領域において、車両部分領域の追跡方向が右（左）でなければ追跡を打ち切る。車両部分領域の運動軌跡は、追跡を開始した画像中の位置と現在の位置を直線で結び、近似する（図 15）。追跡時間が十分長い、または運動軌跡が十分な長さを持っている車両部分領域が、以下の 2 つの条件を満たす時、割り込みが生じたと判定する。

- (1) 運動軌跡が危険領域の境界線と交差する。
- (2) 運動軌跡と危険領域の境界線の成す角が大きい。

上記条件を満たす車両部分領域が存在した場合、運動軌跡の方向が類似している周辺の車両部分領域同士をマージする。そして、マージされた車両部分領域の中で、割り込み判定条件を満たす領域の最下端位置を割り込み位置とする。

4.3 実験結果

本手法により割り込み車両を検出した例を図 16 に示す。(a) は昼間の晴天時、(b)、(c) は夜間の晴天時、(d) は昼間の雨天時における結果である。走行レーン内の線に囲まれた領域は危険領域、矩形領域はマージ後の車両部分領域、白い水平線は割り込み位置を示す。併走車を誤検出しないよう、危険領域の幅は走行レーン幅より若干狭く設定している。Pentium 4 1.7GHz の PC を用いた処理時間は、ほぼビデオレートである。

図 16(a)、(d) では、車両の側面しか見えない段階で、割り込み車両が検出できている。図 16(b)、(c) ではヘッドライトの反射などに影響されず、割り込み車両が検出できている。図 16(d) は雨天時であり、ワイパーに遮られて追跡に失敗する車両部分領域も現れるが、多数の車両部分領域を追跡しているため、問題なく割り込み車両が検出できている。

5. おわりに

本稿では、車載画像認識の応用例として、計算量が少

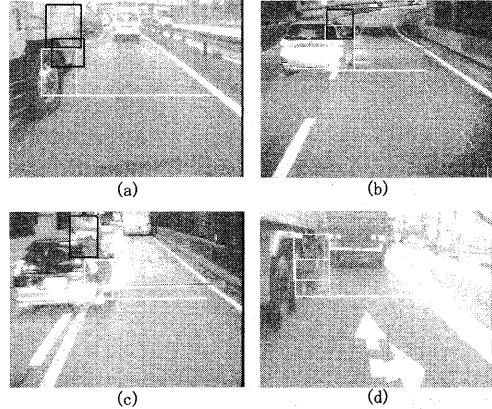


図 16 割り込み車両検出結果

なく、雨天や夜間においても安定動作する前方障害物検出法、及び車両の一部しか見えない近接領域での割り込みにも対処できる割り込み車両検出法を紹介した。現在、これらの手法を実装するチップ及び処理装置を開発中であり、衝突警報や ACC などに適用できる低価格な前方監視装置が実現できると考えている。

画像からは、人間が視覚より得ている情報が得られる可能性がある。また、半導体技術の進歩により、小型・低価格なシステムが構成できるようになってきている。このため、ITS 分野、特に車載系の応用に画像がより一層利用されることが予想される。

文 献

- [1] K. Hanawa and Y. Sogawa, "Development of Stereo Image Recognition System for ADA," Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2001, pp.177-182, 2001.
- [2] 谷口 恭弘, 石川 直人, "画像処理による後側方自動監視システム", 第6回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.23-28, 2000.
- [3] T. Yoshioka, H. Nakaue and H. Uemura, "Development of Detection Algorithm for Vehicles Using Multi-line CCD Sensor, Proceedings of the ICIP'99", 1999.
- [4] 山田 貢己, 中島 朗子, 福井 和宏, "因子分解法と部分空間法による顔向き推定", 信学技報 PRMU2001-194, 2002-02.
- [5] 山口 修, 福井 和宏, "顔向きや表情の変化にロバストな顔認識システム - Smartface", 信学論 DII, vol.J84-D-II, no.6, pp.1045-1052, 2001.
- [6] K. Onoguchi, N. Takeda and M. Watanabe, "Planar Projection Stereopsis Method for Road Extraction," IEICE Trans. Inf. and Syst., vol.E81-D, no.9, pp.1006-1018, 1998.
- [7] H. Hattori and A. Maki, "Stereo without Depth Search and Metric Calibration," Proceedings of the CVPR 2000, pp.177-184, 2000.
- [8] 中山 啓満, 窪田 進, 谷口 恭弘, 小野口 一則, "逆投影画像上での候補追跡処理による白線検出", 信学技報, vol.101, no.302, pp.15-22, 2001.
- [9] H. Morizane, "Cut-In Vehicle Recognition System," Proceedings of the ITS'99, pp.976-980, 1999.
- [10] 実吉 敬二, "ステレオ画像を用いた前方車両の検出", 第4回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.301-304, 1998.
- [11] 仲野 剛, 岡田 隆三, 小野口 一則, "多数の領域追跡による割り込み車両検出", 第8回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.275-280, 2002.
- [12] K. Fukui, "Edge Extraction Method Based on Separability of Image Features," IEICE Trans. Inf. and Syst., vol.E78-D, no.12, pp.1533-1538, 1995.