

自動車と画像センシング技術

中 島 真 人

財団法人交通事故総合分析センターの平成10年度報告によると、全国の交通事故（人身事故）の発生件数は年間約80万件、負傷者数は年間約99万人、死亡者数は年間約9千人にのぼる。このような現状に対し、全国各地の国公立の研究機関や大学の研究室、また関連企業の研究施設において交通事故防止を目的としたシステムの研究や開発が行われている。

交通関係の画像センシング技術は、(1) 車に搭載したカメラから得られる画像を処理することによって得られる情報を用いての各種運転支援と、(2) 道路や駐車場等、車外に設置した固定カメラから得られる画像を処理して得られる情報を用いての、運転者や道路交通管制センターへの情報提供に大別できる。本稿では、前者(1)に関し、事故防止のために運転者へ発せられる警告、また各種の抑止操作のための情報を得ることを目的とした画像センシング技術の現状について解説するとともに、現在筆者の研究室で行われている同内容の研究のいくつかを紹介させていただく。

1. 交通に関する研究分野における画像処理技術の意義と位置付け

交通事故防止を直接の目的とした装置の登場は、古くは交差点への信号機の設置に始まるが、車載装置となると、初め車間距離計としてトラック等に搭載され、最近ではアダプティブ・クルーズ・コントロール・システム（以下、ACCS）の一部品として高級乗用車への搭載が始まったレーザレーダー装置（以下、LLS）^{1,2)}が、その代表的なものといえるであろう。LLSは、元来が自車両と同一車線

内を走る前方走行車両を検知して、運転者に異常接近を知らせる目的で開発された装置であるが、ACCSにおいては定速走行装置に先行車両までの車間距離情報を与え、それによって自車両の自動的な減速、加速を可能とする役割を担っている。現在は、月数百台程度の出荷台数のようであるが、今後の量産化と低価格化に伴い、搭載車両台数の増加は間違いのないところであろう。LLSの問題点は、曲線道路において遠方先行車両が検知し難くなることである。すなわち、曲線道路では、先行車両が自車線を走行しているのか隣車線を走行しているのかの判定が難しく、そこにLLS単独での使用の限界があるものと思われる。したがって、最近では、LLSとカメラ画像による白線検出結果を併用したり、LLSを用いずに、車内のバックミラーに前向きに仕組んだステレオ画像装置によって前方視界画像を取り込み、先行車両までの車間距離決定と白線認識による車線決定を行って、自車線を走行する前方車両を正確に検知するシステムの研究開発が進み、実際にその装置を搭載した乗用車が市販されはじめています。まさに車載画像センシングシステム実用化の先駆けといえるものであろう。

2. 基本的な手法

2.1 ステレオカメラ方式³⁻⁹⁾

人には、目が2つある。人は、この2つの目に映る光景のわずかな「ずれ」、すなわち視差から、その光景中に存在する物体の位置情報を得ている。これを工学的に行おうとする装置が、ステレオカメラである。一定の距離だけ離れた2台のカメラによって撮影された2枚の画像間で、画像内にある物体上の点の対応点を相互に検索し、得られた対応点間の距離をすべて求めることによって、その物体の位置を正確に知ることができる。

慶應義塾大学理工学部電子工学科（〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1）

E-mail: nakajima@njima.elec.keio.ac.jp

したがって、車載装置にこのステレオカメラを用いれば、視界がきわめて悪いなどの場合を除いて、自車両走行車線上を走る前方車両の位置を正確に求めることが可能となる。

この方式の最大の問題点は、カメラを2台用いることによる、それらのアライメントとメンテナンスであろう。監視距離を延ばして遠方にある車両を検出しようとするれば、どうしても基線長(2つのカメラ間の距離)が長くなる。2台のカメラを別個に車体へ取り付けるとなると、出荷時はもとよりメンテナンス時の調整がきわめて煩雑となるのである。実用化を進めるためには、2台のカメラをコンパクトにまとめ、しかも監視距離を100 m程度にまで延ばす方策を講じることが要求されるわけである。

2.2 シングルカメラ方式¹⁰⁻¹⁴⁾

1台のカメラを用いる前方監視方式には、オプティカルフロー・ベクトル(以下、OFV)の検出に基づく方式と、そのほかの方式とがある。シングルカメラ方式は、上記ステレオカメラ方式と比較して、システム構成がシンプルであり、価格やメンテナンス面でのメリットが大きい。しかし、原理的にみて車間距離(自車両と前方車両との間隔)を正確に求めることができないため、それを補うためのインテリジェンスがアルゴリズムに別途要求されることになる。

車両に前方を向けてカメラを設置し、高速道路などを直線走行時に連続した光景を撮影する場合について考えてみよう。任意の時間における前後2コマの画像において、前コマの画像中にある物体上の任意の1点と、後コマ中の同一点を結ぶ移動ベクトルがOFVである。このOFVは、視野内に動きのある物体が存在しなければ、すべて画像の中心から放射状に周囲へ向かうものとなり、周囲へ向かうほど長くなる傾向を示す。ところが、視野内に単独に動く物体が存在すると、その物体から生じるOFVは、自車両とその物体の相対的な動きに基づいたものとなる。すなわち、その物体が自車両と同一方向に走行する先行車両であった場合、その先行車両から生じるOFVは、先行車両の速度が自車両のそれより遅くなればなるほど長くなり、速くなればなるほど逆向きに長くなる。また、前方車両が自車両と等速で等車間距離を保って走行していると、OFVはまったく現れない。ここで注意が必要なことは、OFVの長さが、自車両とそれ以外のすべての物体の接近速度および視野内での位置の両者に依存したものとなることを知ることである。すなわち、取得画像の中心部分(厳密には、カメラ光軸上)には、仮にそこにいくら速い物体があってもOFVは現れず、同一速度でも、周囲へ向かえば向

かうほどOFVが長くなる傾向にある。そして、2車両が互いに一定速度を保って直線走行し続けるものと仮定すれば、OFVの発生点およびその長さから、2車両の衝突時間(すなわち、このまま定速走行すると、何秒後に自車両が前方車両に追突するか)を厳密に算出できることがわかっている。

以上、車載カメラによる画像センシングにおいて最も代表的な前方監視を例に挙げ、ステレオカメラ方式とオプティカルフロー方式の特徴について述べてみた。

これら以外にも、白線検出に基づいて光景内の限定領域から得た微分画像について、横方向エッジと縦方向エッジを抽出し、それらの縦横の投影を取ることによって、簡単に前方走行車両を検出する方式などが提案されている。

3. 各種の応用

本稿冒頭で述べた「車載カメラから取得した画像の処理による、車外情報の把握」による具体的な応用を(1)前方監視、(2)後方・側方監視、(3)周辺監視、(4)その他、に分類し現状を簡単に説明する。

3.1 前方監視

前方監視の手法には、ステレオカメラ方式、シングルカメラ方式があることは前章で述べた通りである。ともに一長一短があり、今後どちらが主流になっていくかについて、現時点での明言は避けたい。できれば1台のカメラで済ませたいとの気持ちは、誰しも変わらないところであろうが、厳密な距離情報の取得という点で、1台のカメラでできることには限界がある。そのような判断から、すでにステレオカメラから取得される画像の処理を高速で行うための安価なICの開発を始めているところもある。

また、人身事故の発生件数は、その99%までが、一般道路上で発生しており、その事故による死者数も、97%までが一般道路上でのものである((財)交通事故総合分析センター平成10年度報告)。確かに高速道路上での事故は、一般道路上での事故より重大な結末に至ることが多い。しかし、事故数、死者数のどちらをみても、一般道路への対策を無視してよいわけではない。これがきわめて遅れている理由は、一般道路は高速道路等と異なり、白線がないところも多いこと、また白線があっても運転者のレーン走行に対する義務感が希薄であること、また道路環境が複雑であること等種々ある。しかも、一般道路での事故は、出会い頭の事故など、一瞬にして事故に至ることが多く、視覚的に危険を察知してからの対応では間に合わないことが、その大勢を占める。このように、一般道路での事故を防止するには、運転者の経験の蓄積に基づいた注意が

必要であり、センサーによる危険察知に基づく手法、すなわちセンサーが危険を判断してからの発報や抑止操作が、現実にどこまで有効であるかの判断については、さらなる検討やフィールドテストの実績を得てからのことにしたいと思う。

3.2 後方・側方監視¹⁵⁻¹⁷⁾

高速道路走行中、レーンを変更したくなるときには、誰でもバックミラーやサイドミラーで隣のレーンを走行する後続車を確認する。しかし、それにもかかわらず実際にウィンカーを出してレーンを変えようとする、後続車にけたたましく警笛を鳴らされ、慌ててレーン変更を諦めるといったケースは少なくない。このような事故の回避には、サイドミラー等に後ろ向きに仕込んだカメラによる後側方監視が有効であると考えられる。後ろ向きに取り付けたカメラから得られる OFV は、ほとんどが画像の中心へ向かうものである。しかし、後方より高速で接近する車両があると、その車両から発せられる OFV は、他のベクトルとは反対に、中心より外へ向かうものとなる。したがって、方向の異なるベクトルのみを抽出すれば、それが後方よりの接近車両ということになるのである。このように前方監視の場合とは異なり、後側方監視において欲しい対象を見つけるアルゴリズムはいたって簡単である。

すでに、この考えに基づいて筆者の研究室で開発した後方監視の手法の製品化を検討しているメーカーもある。

3.3 交差点監視¹⁸⁻²¹⁾

見通しの悪い交差点での出会い頭の事故は、つねに交通事故原因の上位にランクされている。車両先端に横向きに付けたカメラによって得られる画像を用い、車両が交差点に鼻を出した時点で、交差道路を交差点に向かって進んでくる車両がないかどうかを確認し、必要に応じて自車両を停止せしめる装置の研究が進んでいる。しかし、この装置が有効なのは、自車両があくまで瞬時に停止できる程度の低速で走行している場合に限られ、一時停止を無視して突っ込んでくる他車両との衝突を回避する等は、まずもって無理な注文であろう。

3.4 周辺監視

車両周辺の監視としては、(1) 巻き込み監視と (2) 後退監視が考えられる。前者は、交差点などを曲がろうとしている車両が、隣を走っている自転車やバイク、また歩行者を巻き込んでしまう事故であり、後者は、後退時や車庫入れ時に、後ろにいる幼児を轢いてしまったり、車輪を側溝に落としてしまったり、構造物にぶつかってしまう事故である。後者のような事故への対応は、比較的早く、前後のバンパー部に超音波センサーを取り付けた乗用車や後ろ

向きにテレビモニターを取り付けたバスやトラックなどの大型車両をみかけることも少なくない。超音波センサーは、その安価さがゆえに相当普及しているといえるが、巻き込み監視装置への利用には効果が薄く、新たな手法の開発が望まれている。

3.5 その他

その他の車載型画像センシングシステムとして、今後その実用化が望まれるものに、(1) 道路標識、路面表示、交通信号の認識システム、(2) 運転者監視装置、(3) 運転の質の監視装置、がある。

3.5.1 道路標識の認識システム²²⁻²⁶⁾

まず、車載の道路標識認識装置の必要性に関しては、いづれ、道路側の情報インフラシステムとして、各走行車両に無線で情報提供されるようになるであろうとの意見も多い。確かに、高速道路や一級国道等はそうなる可能性が高い。しかし、無数にある無名の道路がすべてそうなるとは考えにくいのではなかろうか。だが、そのような道路においても事故は起きるし、その数はけっこう多い。そう考えると、やはり車載の道路標識認識装置は必要ということになる。

そのような観点に立ち、筆者の研究室では車載用道路標識認識装置を開発してきた。試作システムは、ビデオカメラとノート PC のみの簡単な構成からなっており、認識の対象は、見落とすと重大な事故につながる可能性のあるものとして選択された 20 種類の道路標識である。1 コマ当たりの演算処理時間は、0.2~0.3 秒と走行中のリアルタイム処理が可能で、読み取り結果は音声で運転者に知らされる。図 1 は、試作道路標識認識システムの表示画面で、ちょうど時速 40 km の速度制限表示が認識された場面を示している。

3.5.2 運転者監視装置²⁷⁻²⁹⁾

運転者にとって、高速道路での長時間運転は、その単調さとの戦いでもある。よそみやうとうとが重大な事故につながることになる。そこで、運転中の運転者のよそみやうとうとを監視し、即座に運転者に警告を発することによって事故を防止するシステムがあればよいといわれている。

少々以前のことになるが、筆者の研究室では、ファイバースコーピング (FG) 視覚センサーを利用した運転者監視装置を開発した。高速でしかも精度よく 3 次元形状を計測することができる FG 視覚センサーを用いて常時運転者の顔の向きを監視し、よそみやうとうと等にもなって生じる異常な顔の向きを検知し、運転者に音声で警告を発する装置である。

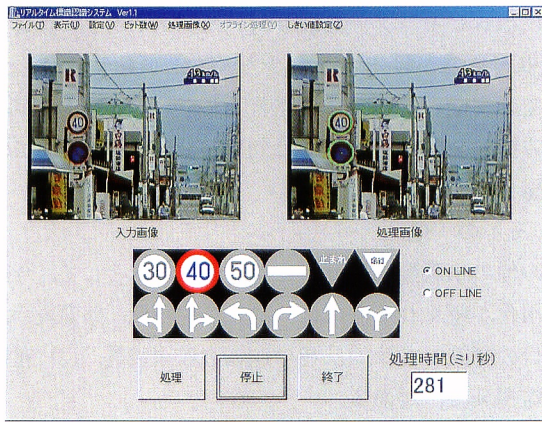


図1 試作道路標識認識システムの表示画。

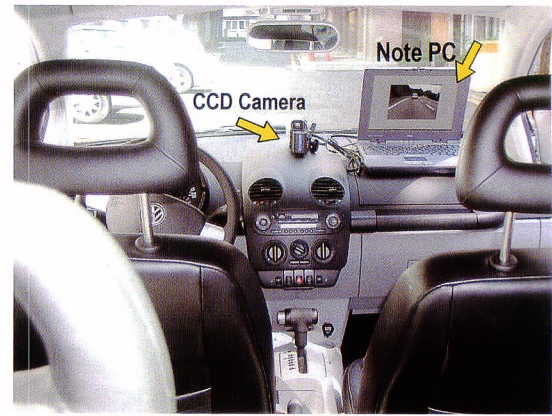


図2 ダッシュボードに試作QODシステムを搭載した実験車両。

3.5.3 運転の質の監視装置³⁰⁻³⁶⁾

最後になるが、今筆者が提唱しているQODという新しいコンセプトについて紹介してみたい。これは、有名な「QOL」(quality of lifeの略)をもじって私が作った新語である。もうおわかりのことと思うが、Quality of Drivingの略なのである。

現在、営業用車両には、タコグラフなる装置の搭載が法律で義務付けられている。この装置の目的は、車両の加速度の変化の推移を記録することで、運転者の運転状況を分析し、必要に応じてアドバイスを与えることである。また、飛行機には、フライトレコーダーとかボイスレコーダーとよばれる装置が搭載されている。ご存知の通り、これらの装置が活躍するのは、事故発生の後である。墜落機等から回収された上記装置をプレイバックし、事故発生直前の飛行状況やコックピット内での操縦士達の会話等を分析することによって、事故発生原因を究明することが目的である。このような装置の存在が、今回筆者をして、QODシステムの開発を想起せしめた要因である。

図2は、筆者の研究室で試作したQODシステムを筆者の車のダッシュボードに搭載した様子である。試作QODシステムは、上記道路標識認識システムと同様、市販のビデオカメラと市販の安価なノートPC (CPU: Celeron 433 MHz) からなり、開発したアルゴリズムは、完璧にリアルタイム (1コマ当たりの演算処理時間0.4秒) で動作する。取得画像からは路面上の白線が抽出され、車の蛇行の程度が定量化される。次に、日本の高速道路は、つねに白線の片方が一定の破線になっていることに着目して、その情報から自車両の車速が算出され、速度の不安定性 (制限速度違反の様子) が定量化される。そして最後に、自車線内にある縦横両エッジの検出とそれらの縦横両方向へのプロジェクションによって、車線内前方走行車両が存在を検出され、前方走行車両がある場合には、それと自車両との

車間距離の変動の様子が定量化され記録される。

このシステムの利用法であるが、それはまず、前記タコグラフのインテリジェント化バージョンとしてである。営業用車両の運行管理装置として、従来のタコグラフよりはるかに多くの情報が保存される。また、フライトレコーダーのように、事故の発生後、それにかかわったQODデータを分析することによって、その事故が発生した要因や責任の所在などを正確に特定することが可能になるものと思われる。さらに、高速道路走行時には、運転者の疲労状態を判断して、「貴方は疲れてきたようです。…そろそろお休みください」などのアドバイスを与えるなど、事故の未然防止効果を発揮させることも可能となるであろうと期待している。

以上、車載カメラから取得した画像の処理による車外情報の把握、運転支援システムの構築などに関し、最近の研究の動向と筆者の研究室で行われている研究およびその成果について述べた。この種の研究の歴史は意外と長い。しかし、その成果が実際に車載された実例は、そう多くない。その理由はいろいろあるが、それらを大別すると、(1) あらゆる環境下に対して、高い信頼性と耐久性が要求されること、(2) 自動車搭載装置はコスト面での制約がきわめて厳しいこと、となる。

事故は人命にかかわることなので、採用の基準が高くなるのはいたしかたないことではあるが、反面つねに100%の信頼性と耐久性を要求するとすると、採用していれば救えたはずの多くの人命を失うことともなりかねない。新しい装置の積極的な採用によって、それを採用しなかった場合に失われるであろう人命を50%でも救うことができるならば、そこに行われるいたづらな躊躇は無用なのではなかろうか。

また、装置のコストの低減は、それを商品とする限り、きわめられねばならない重要な課題である。自動車メーカー側には、われわれ自動車メーカー以外の機関に所属する研究者が開発した装置を前向きな姿勢で検討し、必要に応じて協力研究体制をしいて積極的な活用を進めるなど、交通戦争の緩和に向けたいっそうの努力を惜しむことのないようお願いする次第である。

文 献

- 1) H. Nakagawa, K. Miyauchi and K. Osugi: "2次元スキヤニングレーダの開発", 電子情報通信学会技術研究報告, **99** (1999) 38-42.
- 2) 山田憲一, 伊東敏夫, 西岡邦雄: "画像処理とレーザーダの融合による走行環境認識方法の検討", 自動車技術会学術講演会前刷集 (1995) pp. 239-242.
- 3) R. Mandelbaum, L. McDowell, L. Bogoni, B. Reich and M. Hansen: "Real-time stereo processing, obstacle detection, and terrain estimation from vehicle-mounted stereo cameras," *WACV '98* (1998) pp. 288-289.
- 4) Q. Luong, J. Weber, D. Koller and J. Malik: "An integrated stereo-based approach to automatic vehicle guidance," *Comput. Vision* (1995) 52-57.
- 5) 小野田一則, 武田信之, 渡辺 睦: "車載画像認識技術—ステレオ画像の平面投影による移動障害物位置検出", 画像ラボ, **10** (1999) 33-37.
- 6) T. Williamson and C. Thorpe: "A trinocular stereo system for highway obstacle detection," *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom.*, **3** (1999) 2267-2273.
- 7) 実吉敬二, 埴 圭二, 十川能之, 荒井一真: "ステレオ画像を用いた運転支援のための前方状況認識システム", 電子情報通信学会技術研究報告, **97** (1997) 39-46.
- 8) 宮岡大定, 網島宣浩, 中澤和夫, 中島真人, 石川直人: "両眼道路画像処理による前方車両検出", 画像センシングシンポジウム講演論文集 3rd (1997) pp. 303-306.
- 9) 網島宣浩, 中島真人, 佐々木一幸: "投影視差画像を用いた前方車両の検出", 画像センシングシンポジウム講演論文集 7th (1998) pp. 301-304.
- 10) J. Goldbeck and B. Huertgen: "Lane detection and tracking by video sensors," *Intell. Transp. Syst.* (1999) 74-79.
- 11) F. Pardo, I. Llorens, F. Mico and J. A. Boluda: "Space variant vision and pipelined architecture for time to impact computation," *Comput. Archit. Mach. Percept.* (2000) 122-126.
- 12) A. Giachetti, M. Campani and V. Torre: "The use of optical flow for road navigation," *Proc. IEEE Trans. Rob. Autom.*, **14** (1998) 34-48.
- 13) 真島憲仁, 竹内勝利, 永野 俊: "Optical Flowによる先行車両領域抽出に関する一考察", 電子通信学会技術研究報告, **97** (1995) 113-120.
- 14) 農宗千典, 小沢慎治: "単眼連続道路画像からの実時間障害物検出", 画像センシングシンポジウム講演論文集 1st (1995) pp. 209-214.
- 15) P. H. Batavia, D. E. Pomerleau and C. E. Thorpe: "Overtaking vehicle detection using implicit optical flow," *ITSC '97* (1997) pp. 729-734.
- 16) 宮岡大定, 中島真人, 佐々木一幸: "動画画像処理により後側方監視", 画像センシングシンポジウム講演論文集 4th (1998) pp. 351-354.
- 17) 辻 正文, 山田勝規, 是石 純: "後側方領域の障害物警報システム", 電子情報通信学会技術研究報告, **97** (1997) 33-38.
- 18) G. Siegle, J. Geisler, F. Laubenstein, N. Nagel and G. Struck: "Autonomous driving on a road network," *Intelligent Vehicles '92* (1992) pp. 403-408.
- 19) H. S. Hsieh, K. L. Ting and R. M. Wang: "An image processing system for signalized intersections," *6th International VNIS* (1995) pp. 28-34.
- 20) 上条俊介, 松下康之, 池内己克史, 坂内正夫: "隠れマルコフモデルを応用した交差点における事故検出", 情報処理学会研究報告, **99** (1999) 45-52.
- 21) 松本美智子, 須藤 智, 小沢慎治: "交差点における接近車両の検出", 電気学会交通・電気鉄道研究資料, **TER-99** (1999) 19-24.
- 22) S. K. Gehrig and F. J. Stein: "Cartography and dead reckoning using stereo vision for an autonomous car," *ICIP '99. Proceedings 4* (1999) pp. 24-28.
- 23) D. Ghica, S. W. Lu and X. Yuan: "Recognition of traffic signs by artificial neural network," *IEEE Int. Conf. Neural Networks*, **3** (1995) 1444-1449.
- 24) W. Ritter: "Traffic sign recognition in color image sequences," *Intelligent Vehicles '92* (1992) pp. 12-17.
- 25) 八文字聡, 田中久弥, 出井英人: "テンプレートマッチングを用いた道路交通標識の認識", 電気学会論文誌 C, **120-C** (2000) 174-175.
- 26) 粟倉崇充, 柳田 曜, 中島真人: "道路標識の自動認識", 画像センシングシンポジウム講演論文集 5th (1999) pp. 383-388.
- 27) 中野倫明, 山本 新: "ドライバを視る ドライバの居眠り, 不注視の検知", 情報処理学会シンポジウム論文集 '98, **I.** (1998) pp. 147-152.
- 28) 中野倫明, 杉山和彦, 山本 新: "運転中のドライバのまばたき計測", 画像センシングシンポジウム講演論文集 1st (1995) pp. 59-64.
- 29) 岩井嘉昭, 伊藤隆太郎, 中島真人, 石川直人: "ファイバースコーピング視覚センサを用いたドライバの顔の向きを検出", 画像センシングシンポジウム講演論文集 2nd (1996) pp. 87-90.
- 30) C. Kreucher and S. Lakshmanan: "A frequency domain approach to lane detection in roadway images," *ICIP '99* (1999) pp. 31-35.
- 31) V. Kamat and S. Ganesan: "A robust Hough transform technique for description of multiple line segments in an image," *ICIP '98* (1998) pp. 16-17.
- 32) K. Kluge and G. Johnson: "Statistical characterization of the visual characteristics of painted lane markings," *Intelligent Vehicles '95 Symposium* (1995) pp. 488-493.
- 33) 太田充彦, 高橋 新, 二宮芳樹: "レーン検出のための高速パターン照合装置の開発", 情報処理学会研究報告 '99 (1999) pp. 123-128.
- 34) 大池達也: "モデルベースの認識手法による道路白線認識", 電子情報通信学会技術研究報告 '99 (1999) pp. 53-60.
- 35) 網島宣浩, 佐藤泰教, 中澤和夫, 中島真人: "回転型フィルタを用いた車両前方走行画像からの白線認識", 電子情報通信学会論文誌, **J81-D-2** (1998) 1470-1473.
- 36) 玉井透友, 長谷川為春, 小沢慎治: "雨天時における走行レーンの認識", 電気学会道路交通研究会資料 RTA-95 (1995) pp. 21-28.

(2001年2月26日受理)