I. 自動車用マシンビジョン

正員 農 宗 千 典 (日産自動車(株)総合研究所)

正員 小 沢 慎 治 (慶應義塾大学 理工学部)

1. ま え が き

自動車の知能化は、快適でやさしく運転できる車を目指して、エンジンやシャーシ系の制御や経路案内など、急速に進展してきた⁽¹⁾。昨今では、交通安全、渋滞問題、地球環境保護など、新たな課題が話題になってきている。これらに対応するには、個々の車にさらなる高知能化が必要とされるとともに、道路側のインフラストラクチャを含めた交通システム全体の整備も重要で、国内外で各種のシステムの研究が進行中である⁽²⁾。

高知能自動車の究極は自動操縦であるが、それに至る過程で、安全を意識した各種警報装置や、運転者にアドバイスする支援装置が考えられる。人が車を運転するとき、必要な情報のほとんどを視覚に頼っており、したがって、人に代わる知能を車にもたせるとすると、目に相当するマシンビジョン(画像処理システム)が最も大きな役割を担う。

本稿では、車載のためのマシンビジョンについて、まず認識対象と自動車固有の課題について述べる。そして、研究事例として、高速道路の白線認識アルゴリズムと処理ハードウェアについて、筆者らの取り組みを紹介する。なお、自動操縦車や移動ロボットの研究動向の詳細については、文献(3)～(8)を参照されたい。

2. 自動車用環境認識

車両周囲の環境を認識することが、自動車用マシンビジョンの大きな役割である。運転に重要と思われる

図1 車両周囲の環境認識

認識対象を、時間変化の大きさによって分類したのが図1である。時間変化とは、本来の時間の流れによって変化するものと、車両が動くことでシーンが変化するものと両方を考慮した。時間的に大きく変化しないもの、これは地域的なものが多いが、これらについては道路側から近辺の車両に必要な情報を与えるインフラで対応することを考えれば、車両のごく近傍の、変化の激しい対象が車両側で処理すべき重要な認識対象といえる。すなわち、道路境界、他車、歩行者、静止障害物などがマシンビジョンの認識対象として特に重要である。

処理の結果としては、

(1)対象物の認識

(2)対象物までの距離や方位の計測

の二つが含まれる。また、認識対象や応用によって処理の困難さ(レベル)がいくつか考えられる。例えば、単に先行車の認識といっても、①高さのある障害物として検出(距離や相対速度を出力、衝突防止)、②車であることを認識(車という認識結果と距離などを出力、前車追従)、③ウィンカやブレーキランプの認識(先行車の動きや意図の予測、自動操縦)などのレベルが考えられる。

また、道路端やレーンマーキング(以下白線と略す)の認識では、①道路端や車線の認識、②道路に対する自車位置や姿勢の計測、③前方のカーブや勾配の

Pattern Recognition and Image Processing and Applications.

1. Machine Vision for Automotive Applications.

By Kazunori Nohsok, Member (Nissan Motor Co., Ltd., Yokosuka) & Shinji Ozawa, Member (Keio University, Yokohama)

キーワード: 自動操縦, 実時間画像処理, 道路環境認識, 走行路認識, カメラ姿勢推定

予測、といったレベルが考えられる。

走行道路によるレベルも考えられ、例えば、①高速道路や自動車専用道路に限定、②一般の舗装路、③未舗装道路、などである。

このように、応用によって要求レベルが変わり、逆に、実現レベルから応用システムを段階的に発展させることも考えられる。

3. 自動車の画像処理の諸課題

3.1 自動車固有の問題点

自動車用のマシンビジョンが対象とするシーンは、屋外で昼夜および天候を問わないこと、車が広い地域を移動するためシーンも大きく変化することなどから、例えば工場の生産現場に導入されるそれとは、以下の点で大きく異なる。

- (a) 照明環境が大きく変化する。晴雨、昼夜、逆光、トンネルなどである。
- (b) 広範囲をみる必要がある。車両前方のみならず側方や後方も含まれる。
- (c) カメラも動き、かつ、他車や歩行者など認識対象も動く場合がある。カメラの俯角（ピッチ角）なども激しく変化する。
- (d) 対象物は、それ自体さまざまな形状や色を有し、また、動きや照明によっても見え方が変化する。車種による違いや後面や側面でも見え方が異なる。歩行者も形状変化が大きい。
- (e) 背景が複雑で予期できない。

などである。また、処理速度の実時間性も重要な課題である。このほかにも、コストの問題やユーザとのインタフェースなどに、民生用としての課題がある。

このように、自動車用マシンビジョンシステムは照明条件や処理対象が多彩な環境下で、正確（頑健かつ精度よく）、かつ高速に動作し、さらに低コストという条件を満足しなければならない。

3.2 入力デバイスやセンサの課題

天候や照明環境に対する処理の頑健性は、入力デバイスの問題に因るところが大きい。現在の CCD カメラではダイナミックレンジが不足で、1枚の画像に日向と日陰が含まれると、両方の領域で鮮明な画像化を行うのは難しい。両角の問題は、NTSC 方式にとらわれなければ解決は可能であろう。移動ロボットではミラーを使って全方位のシーンを1枚の画像に入力することも研究されている⁽⁹⁾。

いわゆる機械の目としてのセンサは、可視光 CCD である必要性は特にない。遠赤外光のほうが歩行者や他車の検出に向くとされる⁽¹⁰⁾。また、レーザレンジ

ファインダ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾のようなアクティブな三次元センサは、天候や照明の影響が少なく、障害物や路面段差の検出に有効である。いずれも低コスト化が課題である。

3.3 処理アルゴリズムと処理装置

ここでは、対象物の認識と距離などの計測に分けて、アルゴリズムの諸課題を述べる。

(1) 認識

画像から白線を認識しようとするとき、影や路面の汚れのみならず、路面上の表示（横断歩道や制限速度表示など）も、ノイズとなりうる。一般に物体認識には、色の利用、形状情報の利用、動きの利用、などが考えられるが、前述の自動車固有の問題点から、

- (a) 色の利用については、さまざまな車体色や衣服が存在する
- (b) 形状も、車種による小変形から大型車・小型車などの区別、また、歩行者がシーンに含まれる場合は時間的に形状が変化するため、何らかの特殊なモデル化手法が必要である
- (c) カメラが固定の場合、動く物体は動画画像処理で切り出せるが⁽¹³⁾、自車も動くため正確なカメラの動き計測が必要である

など解決すべき課題は多い。

(2) 計測

距離や道路端の位置などの三次元計測については、単眼、多眼ステレオ、移動ステレオ、前述の三次元センサの利用、そして、これらや他のセンサとのフュージョン⁽¹⁴⁾が考えられる。

道路端は平行であるという拘束条件を使えば、単眼でも道路の三次元形状を計測することは可能である⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。また、路面の形状が既知で路面上の物体が切り出されていれば、その物体までの距離を知ることでもできる⁽¹⁷⁾。多眼ステレオは一般的には画像間の対応付けが課題であるが、路面上の物体検出に限定したり⁽¹⁸⁾、移動ステレオとの併用⁽¹⁹⁾により、対応付けに拘束条件を付加することができる。ステレオ方式の障害物検出の場合、障害物と路面との境界部分（エッジ）のみならず、模様のない面をも障害物として検出しなければならない⁽²⁰⁾。自律移動ロボットにおける移動ステレオでは、アクティブビジョンのように、自車の動きを制御しながら認識することも可能である⁽²¹⁾が、自動車の場合は自車の正確な動きの計測⁽²²⁾がまず必要である。

三次元センサは距離画像が得られるので、距離が直接求められるのみならず、路面のような水平面から障害物や壁などの高さのある物体を切り出すのに、非常

に有効である。

(3) 処理装置

白線に沿って自動走行する場合のレーン認識の処理時間は、0.1秒以内といわれており⁽²³⁾、また、障害物の発見は早ければ早いほどよい、このように、処理の実時間性が強く要求され、専用画像処理装置⁽²⁴⁾が必要である。ただし、過去数年のマイクロプロセッサの高速化が、そのまま将来も進展すれば、いずれ解決されるとも考えられる⁽²⁵⁾。

以上のように、アルゴリズムについての課題が現状では最も解決が難しく、2章で述べたように認識レベルを段階的に設定し、それぞれに適した処理を研究しながら着実に開発を進めていく必要があると感じる。

4. 研究事例

自動車用マシンビジョンの第一歩として、筆者らは2車線高速道路を対象に、自動操縦を想定した白線の実時間認識を行った。ノイズや途切れ線に対する処理の頑健性を目標として白線を直線近似によって認識する手法⁽²⁶⁾、白線認識結果に基づいて自車線前方の先行車を検出する手法⁽²⁷⁾、前方のカーブや勾配変化からなる三次元道路形状とカメラの5自由度姿勢を精度よく推定する手法⁽²⁸⁾などを開発した。いずれも高速画像処理装置⁽²⁹⁾によって実時間(30画面/秒)で処理される。

4.1節で直線近似による白線認識の手法について、4.2節で道路形状とカメラ姿勢の計測について、4.3節で高速画像処理装置について、それぞれ簡単に紹介

図2 直線近似による白線認識

図3 直線近似による白線認識の実験結果（他車を追越すシーン）

する。

4.1 直線近似による白線認識⁽²⁶⁾

本手法は、路面上のノイズや混在走行する他車の影響に対して頑健な白線認識を行うことをねらいとするものである。2車線高速道路の3本の白線を直線近似によって求めるが、各直線は消失点にて1点に交わるよう、消失点座標と各直線式を推定する。消失点の xy 座標はそれぞれ道路に対するカメラのピッチ角とヨー角に対応し、各直線の傾きから偏位が求められる、なお、カメラのピッチ角変動は無視できないが、カメラの高さ変動やロール角変動はないものと仮定した。

図2に処理の流れを示す。入力画像からエッジ検出を行い、画面の上下方向の振動成分（ピッチ角変動成分に対応）を求め、また、各白線の左右端エッジに対して直線適合を行う。直線適合によってノイズや他車の影響が緩和される。次に、直線適合の結果に基づいて、消失点座標と各直線式を最小自乗推定する。このとき、消失点の y 座標と画面振動成分の関係、道路幅と直線間の傾き差の関係、消失点の x 座標と各直線の時間的変化に対する条件、などを用いる。

処理結果の例を図3に示す。ある白線が他車に隠される場合においても、良好な推定が行われた。

4.2 道路形状とカメラ姿勢の同時推定⁽²⁸⁾

全体の処理の流れと各処理部の要点や式をまとめて図4に示す。推定するパラメータは、偏位 D_x 、カメラの路面からの高さ D_y 、道路の方向に対するヨー角 θ 、路面に対するピッチ角 ϕ 、ロール角 ψ と、図4中の(1)式で表わされる道路形状パラメータ $a_2 \sim a_4$ 、 $b_2 \sim b_3$ である。この方式では道路の三次元形状とカメラのヨー角や偏位を精度よく求めることをねらいに、ピッチ角や高さやロール角をも同時に推定している。

1画面前（前時刻）に推定された道路形状パラメータを基に、点列データからなる三次元の道路モデルを作成する。次に、やはり前時刻に推定された姿勢パラメータを用いて、各モデル点を画像座標系に変換す

図4 道路形状とカメラ姿勢推定の処理の流れ

る。入力された画像中の白線位置と、モデル点とを対応付けることによって、各パラメータの単位時間あたりの変動量を推定し、補正更新する。各時刻ごとに変動量を積分することになるが、モデルを基準としているため、蓄積誤差のない手法である。

図5(a)~(e)に実画像の処理結果の表示例を、図5(f)に実験で得られた各パラメータの時間変化(走行に伴う変化)を示す。他車の影響については4.1節の手法より敏感で、ロール角や勾配変化(μ)に誤差が現われるもの、カーブの曲率(ρ)を含む他のパラメータは良好に推定された。

ータは良好に推定された。

4.4 高速画像処理装置

本装置は、新規に開発されたアルゴリズムでも高速に実行できることを目指した汎用の画像処理装置である⁽²⁹⁾。大きさは約400mm³である。

本装置は全体アーキテクチャを図6に示す。

(1) IPU アレー

IPU アレーは、16個のIPUとバスセクタ、バッファなどよりなる、機能可変構造可変型パイプラインプロセッサである。できるだけ多くの種類の前処理や

図 5 道路形状とカメラ姿勢推定の実験結果

特徴抽出処理がビデオレートで実行できるよう、処理の柔軟性の向上をねらいとして設計した。

IPU には内部機能として、二つの ALU、可変ディレイ、9 ビット×512 ワードの RAM などが含まれ、各インストラクションレジスタに命令をセットすることによって、機能を可変にすることができる。また、IPU の内部バス、IPU 相互間のバス、IPU や画像メモリ間のバスとして、多数のパイプラインバスを備え、バス構造も各インストラクションレジスタに命令をセットすることで変更できる。機能および構造の両者について一度設定された命令は次に変更するまで有効で、命令セット後、画像を走査しながらデータを次々に入力していくことにより、同一の演算が画面全体に施される。

(2) メインプロセッサ

MPU (メインプロセッサ) は、マイクロプログラム式プロセッサで構成した。装置全体の制御のほかに、IPU アレーでは実行できない複雑な計算を実行する。

算術論理演算または浮動小数点演算のほかに、2 枚の画像メモリの同時読み出しと他の画像メモリへの書

図 6 高速画像処理装置の全体構成

き込み、画像メモリの x アドレスや y アドレスの更新、ループ時の判断分岐などを 1 クロック (320 ns) で同時に実行できる。よって、汎用マイクロプロセッサと比較して高速処理が可能である。

4.4 インプリメント

4.1 節、4.2 節で述べた処理はいずれも実時間 (30 画面/秒) で実行される。画像サイズは 256×240 とし、第 1 フィールドで画像入力しながら、同時に前処理を IPU アレーで実行する。第 2 フィールドで MPU によって後処理を行う。MPU と IPU アレーは同時に実行することが可能であるため、次の第 1 フィ

ールドまで MPU 処理に費やしてもよい。この場合でも、画像入力開始から 50 ms 後には処理結果は出力され、スループットの高さは一つの特徴である。

5. む す び

自動車用の環境認識として、マシンビジョンの役割と課題について論じた。そして、研究事例として高速道路の実時間白線認識システムを紹介した。

自動車用画像処理の現状は、民生用としての実用化レベルから考えると、まだ基礎的な段階である。屋外で昼夜天候を問わないという環境下で、さまざまな形状をもつ対象物を、100%の成功率で認識するのは現状技術では不可能といえる。入力デバイス、処理アルゴリズム、処理装置と、課題もまた解決策も多岐にわたる。

画像処理の早期実用化のためには、画像処理の限界を見極め、他のセンサとの有機的統合による応用システムを研究することも一つの解決策である。また、画像処理しやすい道路環境整備や、画像処理を補う通信インフラの整備など、高知能交通システムにも期待できる。

(平成 5 年 10 月 13 日受付)

文 献

- (1) 保坂・谷口：「自動車の知能化」、計測制御, 30, 1, 46~51 (平 3)
- (2) 「自動車の情報化・知能化」、日経メカニカル, 324, 46~84 (平 2-5)
- (3) 金出：「米国における自律移動ロボット研究の動向」、日本ロボット学会誌, 5, 5, 376~383 (昭 62)
- (4) 白井・大田：「自律移動ロボットにおけるセンシング技術」、日本ロボット学会誌, 5, 5, 391~397 (昭 62)
- (5) 森：「道路環境認識とナビゲーション」、計測制御, 30, 1, 21~26 (平 3)
- (6) 久田見：「画像認識による自律走行技術」、自動車技術, 45, 2, 25~31 (平 3)
- (7) 倉見：「自動運転技術の開発動向」、自動車技術, 45, 2, 6~12 (平 3)
- (8) 小沢, 金：「自律走行への視覚応用」、信学誌, 74, 4, 403~408 (平 3)
- (9) 八木・川戸：「円盤投影による全方位環境認識」、信学技報, PRU 89-46 (平元)
- (10) J. M. Callahan: "Sight At Night", *Automotive Industries*, 171, 10 (1991)
- (11) C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade, S. A. Shafer: "Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Nablav", *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, PAMI-10, 3, 362~373 (1988)
- (12) T. Kanade, A. Gruss, & L. R. Carley: "A Very Fast VLSI Rangefinder", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1322~1329 (1991-4)
- (13) 塩・スクランスキー：「動画像からの歩行者検出法」、情報処理学会コンピュータビジョン研究, CV 75-5 (平 3)
- (14) 浅田：「センサ統合と環境モデルの構築」、情報処理学会コンピュータビジョン研究, CV 65-8
- (15) 全・桜井・小林・小沢：「車両から見た道路像の解析」、信学論, J71-D, 9, 1709~1717 (昭 63)
- (16) 渡辺・金谷：「局所平面近似による道路形状復元」、情報学コンピュータビジョン研究, CV 62-3 (平元)

- (17) 中嶋, 尾形, 安居院：「道路画像中の物体の奥行き認識」、平 3 信学秋季全大, D-263 (平 3-9)
- (18) F. Ferrari, E. Grosso, G. Sandini, M. Magrassi: "A Stereo Vision System for Real Time Obstacle Avoidance in unknown Environment", *IEEE Int. Workshop on Intell. Robots & Systems, IROS'90*, (1990)
- (19) 鈴木, 谷内田：「移動視における対応付けと 3 次元情報の獲得」、信学技報, PRU 88-88 (1988)
- (20) 津戸・八木・谷内田：「移動視により得られたワイヤフレームモデルからの空間的構成の理解」、情報学コンピュータビジョン研究, CV 73-9 (昭 63)
- (21) 小野田・渡辺・I. S. Kwcon, 久野：「注視点追跡による移動制御」、情報学コンピュータビジョン研究, CV 73-12
- (22) S. Carlsson, J. O. Eklundh: "Object Detection Using Model Based Prediction and Motion Parallax", *Proc. Roundable Discussion on Vision-Based Vehicle Guidance '90*, p. 5-1 ~5-2 (1990)
- (23) V. Graefe, K. D. Kuhnert: "A High Speed Image Processing System Utilized in Autonomous Vehicle guidance", *IAPR workshop on CV*, p. 10~13 (1988)
- (24) 榎並・八木：「映像信号の汎用リアルタイム処理」、テレビ誌, 43, 12, 1314~1319 (平元)
- (25) 江尻：「マシンビジョン技術：その過去・現在・未来」、第 5 回産業における画像センシング技術シンポジウム講演集, 121~131 (平 2)
- (26) 農宗・小沢：「高速道路走行画像からの消失点推定に基づく実時間白線検出」、電学論 C, 113-C, 2, 139~148 (平 5)
- (27) 農宗：「高速道路走行画像のリアルタイム処理」、日産技報論文集 1991, 76~82 (平 3)
- (28) 農宗・小沢：「連続道路画像からの道路構造とカメラ姿勢の同時推定」、信学論, 76-D-II, 3, 514~523 (平 5)
- (29) 農宗・芥川：「機能可変構造可変型バイプラインプロセッサをもつ高速画像処理装置」、電学論 C, 112-C, 81~88 (平 4-2)

農 宗 千 典 (正員)

昭和 52 年東京農工大学工学部電子工学科卒業。54 年同大学院修士課程終了。同年日産自動車(株)入社。現在同社中央研究所基礎研究所主任研究員。主として画像処理の研究に従事。電子情報通信学会会員。

小 沢 慎 治 (正員)

昭和 42 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。47 年同大学院博士課程修了。54 年同大助手。専任講師・助教授を経て現在同大電気工学科教授。その間、59 年アメリカ・メリーランド大学訪問助教授。デジタル通信および画像・音声のデジタル信号処理の研究に従事。著書「デジタル信号処理」, 「基礎通信工学」(実教出版), 工学博士。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。