

視覚情報と自律走行車

青木正喜*

人間による自動車の運転は視覚情報を前提としている。一方自律走行車の研究は、インフラストラクチャーを前提とした誘導方式と、車載カメラから得られる画像を処理して人間の視覚情報処理に近付けようとする画像方式の二つに大きく分けることができる¹⁾。本論文では後者の画像を用いたシステムについて概観し、技術的展望および位置付けを試みたものである。人間による自動車の運転自体が厳密に定義されているわけではなく、各種の側面を持ち広範囲の研究が必要とされる。また、自律走行車に関して開発された機能の一部は、人間以上の能力を発揮し、人間の運転への支援・援助に有効である。

Visual Information and Autonomous Vehicles

Masayoshi AOKI*

Visual information is a prerequisite for human driving operation of vehicles. On the other hand, research activities of autonomous vehicles can be divided into two systems, a guidance system which operates on the infrastructure, and an image oriented system which has its ultimate goal as human visual information processing. This paper presents an overview of the image oriented system. The task of vehicle operation conducted by human has not been completely defined and will require wide-ranging research from all aspects. Some of the functions developed in autonomous vehicles will exceed human performance level and, therefore, effective in aiding and assisting human driver operation.

1. はじめに

車載カメラを用いた自律走行車研究の歴史は古く、代表的なものとしては、機械技術研究所の知能自動車²⁾、ミュンヘン大学のVaMoRs³⁾、フォルクスワーゲン社のOpt Pilot、日産自動車・富士通のPVS⁴⁾、マツダのMOVER-2⁵⁾、マーチンマリエッタ社のALV⁷⁾、カーネギーメロン大学のNavLab⁸⁾、ベンツ社のVITA⁹⁾等がある。これらの中で最近結果発表・デモンストレーションがあったものとして、ベンツ社のVITA II、カーネギーメロン大学のNavLab V等がある。前者は乗用車にTVカメラを18台搭載

し、高速道路上で追い越しも自動的に行う機能を有し、1994年秋PROMETHEUS計画のボードメンバー会議の際にパリでデモンストレーションが行われた。後者は1995年にワシントンからサンディエゴまでの約3,000kmの自動走行実験に成功している。

インフラストラクチャーを前提とした誘導方式の歴史は古く、機械技術研究所において1970年頃から誘導ケーブルを用いた方式¹⁰⁾が研究されている。アメリカにおいては1997年に自動運転の実験が法律で定められており、PATHプロジェクトの磁気ネイル方式が有望視されている。日本においても1995年秋に、土木研究所において磁気ネイル方式を用いた自動運転のデモンストレーションが行われた。

自動車は人間が視覚情報を用いて運転することを前提としており、自由度が大きい。これをそのまま機械による自動運転に置き換えることは、人間の形

* 成蹊大学工学部教授
Professor, Faculty of Engineering,
Seikei University
原稿受理 1995年12月15日

をしたロボットを期待することと大差はない。人間における自動車の運転という「仕事」は、厳密には規定されておらず、人間の適応能力に依存する部分が多い。このような観点からすれば、自律走行車は奥が深く、永遠の研究課題と考えられる。そこで、自律走行車の研究においては、どのような状況設定をするかが重要になる。

例えば領域が限定された孤立系の中で、あらかじめ定められた軌跡を走行させることは、比較的容易に実現出来る。実用化の例としては自動車会社のテストコースにおける耐久走行試験¹¹⁾、工場における自動運搬車¹²⁾等があり、どちらかといえば軌道上を走行する電車に近い。誘導ケーブル、ループコイル、床の上に描かれた線、壁に描かれたマークにより走行すべき軌跡を規定している。場合によっては、慣性航法とこれらの組み合わせも考えられる。移動形の工業用ロボットもこの範疇に入ると考えられる。

他車両や障害物の無い、閉鎖された道路上の走行という条件下でも、走行すべき軌跡を自動車側で道路・車線上に設定する必要がある。磁気ネイル等が道路に埋設されていれば、これはインフラから与えられる。画像情報を用いる場合には、道路の端、車線の境界、車線の合流等の道路面内における二次元的構造、道路の上り、下り、傾き等の道路の三次元的構造を画像から検出する必要がある。車線の区切り等を表す白線がある場合にはこれが利用できるが、白線が無い場合には道路端等の検出に工夫が必要である。道路の走行は天然の状況下であるため、画像には光の状態、天候等環境の影響が大きい。

他の車両の存在する一般の交通状況下では、他の車両・障害物の検出を行う必要がある。高速道路や都市間の幹線道路においては、多くの場合白線は整備され、また通常は歩行者の存在は無いと考えられる。しかし他車両の存在により、白線、道路端、他車等の隠蔽も考慮する必要がある。画像情報から抽出すべき運転に必要な情報は、個々のシステムで独自に設定しているが、一般的な要求項目を検討する試み¹³⁾もなされている。発展のシナリオとしてはモニタ(警告と人間の機能の補強)、運転支援、自動運転(限定自動、完全自律)が考えられる。求められる認識対象とレベルはシステムの段階的發展に伴って変化する。

本稿では視覚情報と運転についてまず考察し、画像入力を含めた自律走行のための画像処理⁶⁾一般について概観した後に、自律走行のための典型的な画

像処理について述べる。

2. 視覚情報と運転

運転時において、運転者は外界に関するほとんどの情報を視覚情報として得ている。環境の中で運転に必要な近傍情報としては、道路領域、他車(二輪車、自転車を含む)、障害物、路面、気象状況、他車の運転者、規制情報、案内情報等である。音声情報は警報(クラクション、ブザー、チャイム、サイレン)が主であり、場合によっては低速時運転者同士の音声による情報交換も考えられる。路面の状況に関しては、音および振動もある。

音は比較的指向性が低いため、警告に向いているが情報量は少ない。一方視覚は、まずその方向へ視線を向けていなければならない点と、かつ注視をしなければならないという意味で、二重に見ていることが必要である。人間が運転中に視覚から得ている情報は、運転の熟練度その他に依存し、個人差、時間的変動が大きい。視線の広がりや範囲と、その特定の位置に停留する時間は運転の熟練度に依存する。また、熟練者は直前車両の前方の情報を前方車両の窓を通して得たり、車輪のちょっとした動きからカーボディランゲージ¹⁴⁾の検出や、他車の異常走行を早期検出したり、その他各種の前駆現象をいち早く見つけている。

道路環境を視覚的見地から見ると、各種の要素物体が存在している。ここでは、三次元的な道路環境を運転者の視覚情報に対応した二次元投影変換した画像(道路の進行方向と直角な平面に投影)として考える。ある位置での二次元投影画像を静止画とみなすと、この中に三次元の要素に対応した要素画像が存在する。二次元の要素画像は、視覚言語すなわち何らかの意味を持たせた記号を構成している。

運転者への意図的な情報伝達を目的とした道路側の記号としては、(1)規制標識、案内標識等、(2)道路や車線の境界を表す白線や縁石、場合によってはガードレール、(3)道路表面上に描かれた文字、記号等、(4)信号機、の4種類に大きく分けることができる。(1)と(4)は一般的に道路の進行方向と直角に設置され、前述の投影変換によっては縦横均一のスケール変換を受けるのみであり、そのほかの歪みはない。形状としては四辺形、円形が多く、三角形、五角形もあり、中に記号や文字が書かれることが多い。(2)と(3)は平行線がギリシャ建築でよく言われるエンタシス効果(写真の用語ではアオリ)を受け先が細くなる。

ただし(3)はこの効果を打ち消すように道路上で先の幅をあらかじめ広げることも行われる。これらの記号と背景とが明確に分離されているかどうかは、記号の伝達能力に大きく関係する。また意図的な記号が画像中にどのような相互位置関係で、いくつ存在するかも非常に重要である。記号間が近づき過ぎたり、近接の記号の意味が類似していたり、矛盾していたりすると言語としての意味が伝わらなくなる。また数が多すぎると人間の処理能力を越えて、パニックを起こしてしまう危険がある。

道路上に存在する要素としては、自動車、二輪車、自転車、障害物、人間、道路表面物質等がある。これらは、明白な特徴が意図されておらず、基本的には不規則形状であり記号としての定義が難しい。車両側からの情報伝達を意図して装備されているものとしては、ナンバープレート、ブレーキランプ、ターンシグナル、ハザードランプ等がある。トラックの速度表示ランプ、緊急車両の赤色灯、場合によっては前照灯もこの範疇とみなすことが出来る。また自動車の前面および後面は一般的には対称であり、これは記号としての明白な特徴となりうる。

自動車の移動に伴って、投影された二次元画像は時間と共に変化する。時間変化に関しては(1)画像自体の時間変化による影響と(2)記号レベルで一貫性の両者を考える必要がある。(1)に関しては、ベンサムのコマや出現時間差と濃度差による立体感に代表されるような、視覚の時間応答特性に関するものがあり、その発生機構について必ずしも細部まで解明されていない。また画像の入力系を通す事による影響として、エリアシングの問題がある。(2)に関しては、規制標識、案内標識等の出現系列の一貫性、白線、破線等の一貫性、カーブや傾斜パラメータの一貫性等がある。

運転者の第一義的な仕事、目的は安全走行であり、これは車をぶつけないこと、道路外に飛び出さないことである。このためには、通行可能領域を見出せばよい。通行可能領域は運転技量に依存し、ある運転者にとっての通行可能領域が、他の運転者にとっても通行可能領域であるとは限らない。通常走行時には通行可能領域として数センチメートルぎりぎりにはとらず、十分な余裕を安全側に取っている。運転者は全ての道路環境を四六時中認識してはおらず、個人個人の優先順位に基づいて要素の認識を行っている。また運転者による認識は、いわゆる測定とは異なり、大まかなものであり、実際には運転操作結

果のフィードバックが認識過程に重要な働きをしていると考えられる。たとえば、一般の走行では、車線の中を通行していればよく、走行の慣性もあり、車線中の正確な位置を意識しているわけではない。カーブに関しても、一般の走行では正確な道路線形(道路形状の数学的な記述)を意識しているわけではない。

運転者が自己の技量を過大に評価することは事故の一因となりうる。安全側の余裕が十分であれば、ちょっとしたミスは回復可能であるが、他の事柄に注意力を取られていると、回復が遅れ処理能力を越えパニックとなりやすい。運転者の環境認識における誤りに関しては、一般に再現が困難である。ある瞬間の環境を静止画として考えた場合には、要素間の関係があいまいであったり、一見矛盾しているように見えることはしばしば経験する。このような錯覚の可能性は、カモフラージュやエッシャーの「だまし絵」を思い浮かべればよい。これがたとえ一瞬であったとしても、印象が強いと後に影響を及ぼす可能性がある。さらにこれに時間の要素が加わると一層複雑になる。人間の注視点は範囲が狭いため、変化している画像のどの点をどのような順序で捉えたかによって、認識結果が大きく異なる可能性がある。事故の当事者の説明では、第三者にとっては考えられない様な事故で、当事者の思い込みと片付けられる事象のなかにも、本人にとってはその時点で真実であった可能性が否定できないものもありうる。ある種の認識モデルを仮定することにより、このような状況が再現できれば安全への寄与は大である。

現在の道路環境が、視覚情報を前提としている以上、これを自動的に認識することは非常に重要である。この究極の目的は、機械の認識能力をいかに人間のそれに近付けるかであろう。道路自動車交通への応用としては、警報、運転支援がまず考えられる。限りなく軌道車に近い隔離された環境下での自動運転は比較的实现しやすいと考えられるが、一般の交通との混合交通の状況下では解決すべき課題が多い。しかし、人間は間違いを起こすものであり、これを機械によってバックアップすることは安全上非常に大切である。

3. 処理対象画像と結果の記述

処理の対象となる画像は二次元の時系列データとして $f_i(x,y,t)$ のように一般化して記述することが出来る。ここで (x,y) は二次元の空間座標、 t は時間

座標、 i は同一時刻に発生するデータの識別番号である。単一の静止画であれば $f(x, y)$ と簡単化される。二次元の空間座標 (x, y) は基本的には連続座標であるが、多くの場合正方形格子状の離散座標系として、記憶素子の配列に対応させられる(画素)。時間座標 t も理論的には連続座標が考えられるが、実際には離散的な時間ごとの画像(フレーム)として与えられる。同一時刻に発生するデータが一つの場合には $f(x, y, t)$ は離散的な画像配列の時系列として表される。

f 自体の値としてはスカラーおよびベクトルが考えられる。カラー画像の場合には、たとえば R, G, B の三色とすれば R, G, B のそれぞれをスカラー量とする三枚の画像の組とみなすこともできるし、1枚の画像としてそれぞれの画素が R, G, B のベクトルを持つと考えることもできる。上式のように表された二次元の時系列データは、光学的画像とは直接関係のないデータを扱うことができる。たとえば奥行き画像(depth map)や温度分布(thermograph)がある。データの処理の過程においては、 f 自体の値には制限はない。ただし結果を画像として表示する場合には、画像表示装置の表現範囲にデータを制限する必要がある。これは疑似カラー表示等でよく用いられている。

複数個のカメラを使用する場合には、 i を用いることによりカメラを識別できる。ステレオ画像の場合には、 r と l により右と左を区別できる。マルチスペクトル画像の場合には、カラー画像と同様に、複数個の画像の組としても扱えるし、画素がスペクトル次元のベクトルを持つと考えることも可能である。画像ピラミッドの場合には、ピラミッドの各層を異なった画像として識別すればよい。ただし、各層間での空間座標の対応には注意が必要である。このように処理対象を記述することにより、通常の光学的画像のみでなく、奥行き画像等二次元データであれば扱うことが可能となる。

画像システムの処理結果はまず、道路、他車、障害物等の個別の記述として得られる。車の運転の立場からは、検出された個別の対象物が自車の走行にとって妨げとなるかどうか重要である。このような運転の立場からの周囲環境の記述として、通行可能領域やリスクマップが提案されている。道路の形状を考慮した場合には、CGにおける一般化円筒を路面に添った一般化四角柱ともいべき「ところてん」状の座標系におけるデプスマップの形式で記述

されていけばよいと考えられる。

4. 画像入力

4-1 可視画像

人間の目に対応する入力装置としては可視領域のTVカメラが多く用いられている。汎用のCCDカメラは、インターレース方式で1秒間に30画像得られる。人間の目に比べるとダイナミックレンジが狭く、コントラストの強い環境、太陽の角度が低い場合、トンネルの出入り口等での使用には改善が必要である。一般的なCCDのダイナミックレンジは 10^3 程度、目のダイナミックレンジは 10^5 (暗順応を含めると 10^9)といわれている。ソフトウェアの面も含めて改善が試みられている。人工網膜的に局所的に適応化させる、分散方式が一つの方向である。時間軸方向の分解能は、用途によっては1秒間に30画像では不足すると考えられるが、特殊用途の高速度カメラにおいて、1秒間に数百フレームが得られている。解像度については、特殊用途のカメラとしては高解像度が実現されている。一方レンズ自体の解像度は、中心が高く周辺は低い。人間の網膜では、解像度は中心のごく限られた部分のみが高い。そこで、全面の解像度を一様に上げるよりは、局所的/適応的な解像度の制御が望ましい。人工網膜の研究¹⁵⁾はこの方向の一つの試みである。

4-2 カメラの群構成

複数個のカメラによる画像入力としては、2台のカメラを用いたステレオ画像がよく用いられる。この場合のカメラの配置としては、左右に配置されることが多いが、用途によっては上下に配置¹⁶⁾することもある。二つの画像間での対応を取ることで、三角測量の原理を用いて距離が求められ、距離画像が得られる。距離画像自体は、レンジファインダからも直接求められるが、ステレオ画像の場合にはその元になる画像自体の情報も利用できる。なお、ステレオ画像は、カメラの移動を利用することでも、実現できる。これは、モーションステレオ¹⁷⁾と呼ばれており、合成開口面レーダ(SAR)の考え方につながる。自動車の周囲の情報を画像により得ようとすると、カメラを前後左右に複数個配置する必要がある。カメラの数が増えていくことは、現状の一点集中形のカメラから、面的に分散した検出器への方向を示唆している。また得られた画像情報を分散的に前処理する事も必要になるであろう。

4-3 マルチスペクトル画像

波長領域を可視領域から紫外領域や赤外領域に広げた画像も考えられる。特に赤外領域は人間の検出等に有効であり、研究が行われている。波長領域としては大気窓の近赤外(波長700nm~1200nm)および遠赤外(波長1500nm~1800nm)が用いられている。赤外領域の撮像装置としては実時間のビデオ信号が得られる装置があるが、解像度、感度等改善が必要である。集積回路による検出器の研究も行われている。

4-4 距離画像¹⁸⁾

距離画像は時系列二次元データとして、通行可能領域の判定に用いられる。距離画像はステレオ画像からも得られるが、レンジファインダによって直接得ることが出来る。レンジファインダとしては、レーザーレーダー、マイクロウェーブレーダーや超音波レーダーが用いられる。

4-5 道路表面画像

車載カメラから得られる道路表面の画像は一般には投影変換を受けており、元の平面図形を得るためには逆投影が必要である。これは、画像として得られてからの処理であるが、光学系によって撮像時に直接平面図形として得ることも可能である。一つのやり方は、鏡を用いるもので、鏡面を適切に設計することにより、レンズの焦点面に道路面の画像を正しい比率で結像させる手法である。もう一つは、レンズのアオリを利用するもので、焦点面と道路面を平行に保ち、レンズの光軸をずらす手法である。非球面鏡を用いて前方の路面をスクリーン上に正しい縦横比で得る試みや、円錐状の鏡を用いることにより360度の視野を得る試み¹⁹⁾も行われている。カメラを別の位置に移動させた場合の画像をソフト的に得る、バーチャル・カメラ²⁰⁾も提案されている。

5. 道路の認識

自律走行車の研究としては、走行領域は必ずしも道路上に限られているわけではなく、道のない原野も対象とされている。さらには、惑星探査も対象とされ、JPL等においてビデオカメラを用いた自律走行車が作成されている。地上においても、オフロード車では、畦道、獣道、野原、サバンナ、砂漠等道なき道を走行する。ここでは問題を単純化するために、いわゆる道路上を走る事を前提とする。しかし道路と言っても、高速道路、市街地、田園等で、白線(または車線の区切りを示すもの)の有無、舗装、石畳、未舗装等の路面状況等条件は大きく異なる。

他車や障害物のない理想的な状態を仮定すれば、道路に関して必要な基本的情報は、100~200m先までの道路形状、路面状況(場合によっては道路の障害も含む)である。

レーンマーカとしての白線が存在する場合には、車線の検出手段として白線を検出することが非常に有効であり、多くの研究が行われ、個別の自律運転システムに組み込まれている²¹⁾。白線はその描かれている道路表面より輝度が高いことを利用して、二値化や微分により検出を行う。二値化の結果としては白線が幅をもってそのまま検出されるので、幅の中心を求め長手方向に直線または曲線をあてはめればよい(たとえば直線の場合はハフ変換が一つのやり方である)。微分した結果は白線の端に対応した2本の線分が出てくるので、これらに直線または曲線をあてはめればよい。白線の探索領域としては、カメラの光軸が水平であれば、まず画面の下半分に限定される。さらにカメラの位置が車線の中央にあり、光軸が道路の進行方向を向いているとすれば、画像上における白線の位置を予測して検出用のウィンドウを配置する²²⁾。時系列画像においては、それまでに検出された白線情報を白線位置の予測に用いる²³⁾。

自動車が車線内を走行する場合には、車線の両側の2本のレーンマーカの位置から車線内の横方向の相対位置が求められる²⁴⁾。車線変更等でレーンマーカをまたいでいる場合には、またいでいるレーンマーカの画面上での位置と二車線の端のレーンマーカの位置が用いられる。車の道路に対する相対的な方向(ヨー角)は、画面上のレーンマーカの向きから求められる。たとえば、近傍のレーンマーカを直線で近似し、交点を求めれば、平行線の消失点が得られる²³⁾。これとカメラの光軸方向すなわち画面の中央とのずれから、カメラの道路の進行方向に対する相対的な向きが求められる。これらの結果も、予測を取り入れたり、データの平均をとることにより信頼性の向上が計られる。縦方向すなわち道路の進行方向に関しては、レーンマーカが破線であれば、その端点を画像上で時系列として追跡することにより移動速度が求められる。これは、画像内処理では本質的に不可能であり、画像間での時間的な変化から求められる。

走行に必要な情報は、現在走行中のレーンも含めてこの先どこに道路が存在するかということである。走行可能領域は道路領域、路面を基準として記述することが自然であり、他車、障害物等の検知は基本

的には道路領域について行えばよい。レーンマーカが検出されていれば、レーンマーカに挟まれている領域を車線とみなすことが出来る。しかしレーンマーカが検出されない場合でも、道路領域を特定するためには道路の境界を検出する必要がある。道路部分の輝度値が比較的均一であり道路以外とは差があるという性質を利用することにより、微分により道路境界の検出が試みられている²⁵⁾。逆に均一領域に着目することにより、直前の道路輝度と類似の輝度の領域拡大により道路領域を検出する試みもある²⁶⁾。石畳道路等を対象とした場合には、均一な輝度という考え方を、均一なテクスチャに拡張する必要がある。また交差点を考えると、交差している道路の領域を得ることが重要になる。

道路、車線に沿って自動車を制御するためには、前方の道路形状、道路線形が必要である。車載カメラからの画像から道路形状を復元する研究²⁷⁾が数多く提案されている。この場合道路設計における線形形状の制約を考慮に入れる必要がある²⁸⁾。車線（道路自体）の境界線を局所的平行として対応する点を求める試みも提案されている。また道路の勾配を検出する手法も提案されている。このようなアルゴリズムを画像に適用した結果として得られる道路線形と、運転者の道路の見え方との比較は、たとえば勾配を逆に知覚してしまう錯覚の解明にも役立つものと考えられる。なお、あらかじめ詳細な道路データベースが車載側に用意されている場合には、これは車載カメラからの画像を用いて正確な現在位置の同定に帰着する。これは、画像自体、レーンマーク検出結果、特徴記述等と詳細な道路データベースとのマッチングにより実現される。この場合も、時系列画像の特徴を生かして、予測、積分効果を活用することにより、信頼性の向上が計れる。

道路を平面と仮定すれば、車載カメラから得られた道路画像を逆投影変換することにより道路画像がえられる。逆投影変換は4点の対応で決定され、道路が局所的平行となるように投影結果を集積していけば、必ずしも正確なカメラパラメータは必要としない。道路平面上に描かれている文字、記号もこの集積結果としてぼけが補正され、認識に適した画像が得られる。道路画像の集積結果は道路地図の作成にも有効である。

路面のハードとしての状況、すなわち舗装状況、石畳、非舗装、轍、凹凸等は画像処理的にはテクスチャ解析の対象と考えられ、これからの研究が期

待される。気象による路面の状況、雨による濡れ、冠水、積雪、凍結、ぬかるみ等も視程の検出も含めて、これからの研究が期待される分野である。たとえば逃げ水や蜃気楼のような現象は、人間の錯覚ではなく、光学的な現象であり、画像としてどのように自動的に解釈されるかも興味深い。また道路の亀裂・流出といったような事象、障害の検出も将来は必要とされるであろう。

6. 先行車・障害物検出²⁹⁾

車載カメラではカメラの移動を前提として考える必要がある。カメラパラメータに関しても、一部は画像から求めることも行われている。カメラの移動、振動に起因する画像の変位をあらかじめ打ち消すことにより、真の移動物体の検出が容易となる。画像中に何点かの参照点を定め、一方の画像を参照画像とし、これらの点が一致するように他方の画像を変形することが考えられる。この変形としてはアフィン変換、投影変換等が考えられる。

対象物体までの距離が直接得られる距離画像は先行車、障害物等の検出に多く用いられている。各画素の持つ距離情報は、視点と各画素を結ぶ放射状の直線上に存在する一番近い物体までの距離を与える。たとえばこれを道路に沿った、一般化円筒系座標を拡張した「ところてん」のような長方形座標系に変換して考えれば、道路に沿っての物体の存在位置を得ることが出来る。これは、通行可能領域を直接表していることになる。距離画像から、こちら側に面している物体表面の形状を記述する試みもある³⁰⁾。表面形状を時間的に追跡することにより、相対的な運動に基づいた対象物体のグループ化も可能である。距離画像はレンジファインダを用いることにより直接得られる。この場合、カーブに関してはガードレール等を障害物として捉える可能性があるので注意が必要である。可視画像を用いる方法としては、ステレオ画像ペアを用い、画像間の対応をマッチング等により求め、三角測量の原理で距離を求めるものが広く用いられている。カメラとしては2台を水平に配置するものが多いが、上下に配置するものも得られる情報に特徴があり有効である。

ある時刻における画像中の点が、異なった時刻において画像中のどこへ移動したかを表したものがオプティカルフローである。これは、各点の速度であり、前述したように動画像を、時間軸での微分と空間微分との関係から求められる。この求め方として

は、時刻の異なる二つの画像の小領域について、マッチングを用いて互に対応する点を求めればよい。これには、ステレオマッチングと同様な技術を用いることが出来る。また、動画の符号化³¹⁾においても、動きの検出に同様な技術が用いられている。カメラの光軸方向と異なった方向に運動している物体は、オプティカルフローに特徴的に現われるので検出が容易である。撮影対象環境が静止していて、カメラが光軸方向に運動している場合には、全ての点のオプティカルフローはカメラの光軸すなわち一般には画像の中心から放射状に伸びる線を形成する。先行車が撮影しているカメラの光軸方向に運動している場合にも同様であり、相対速度の差を検出するためには、オプティカルフローの大きさの微妙な違いをグループ化する必要がある。相対速度が零の物体に関しては、オプティカルフローは生じない。

ある時刻における画像を静止画像として、その中から先行車を検出することは、パターン認識の典型的な問題の一つである。これは基本的には検出対象に関する知識・モデルを用意し、画像中の対象候補から、知識・モデルとの間であらかじめ与えられた一致度に関する評価基準を満足するものがあれば、対象が検出されたとする。知識としては、自動車の背面の対称性、水平エッジ線分の存在、リアウィンド・ランプ・ナンバープレートの存在等が用いられている。モデルとしてはワイヤーフレームを用いた、背面の二次元モデル、側面まで含んだ三次元モデルが使われている。モデルとしてはその構成要素である線分の相互の関係にどのように自由度を持たせるかが重要である。たとえば顔画像に関して、顔を構成する各要素をバネで結合させているような手法³²⁾がある。典型的な処理としては、画像を微分し、エッジ画像を求め、線分で近似し、この線分近似画像と知識・モデル間で対応を取り、一致度を評価する。この対応の取り方においては、多くの組み合わせが可能であり、優先順位を用いたり、ヒューリスティックな手法を用いる必要がある。また画面全体に対して適用する必要はなく、先行車の存在しうる範囲に限って適用すればよい。車は道路上にあるという前提の下に、前方の道路の自転車に近い領域から遠方に向かって調べていき、道路と異なる部分について検出を実行する事も考えられる²⁹⁾。また車の下には影があると仮定し、影を検出しその上部を車の存在候補とするやり方もある。ナンバープレート部分³³⁾が十分な解像度で検出させれば、文字認識も適用可

能である。

車載カメラから得られる時系列画像においては、その時刻以前に検出された先行車の情報を利用することが出来る。カメラ、先行車の運動に何らかの一貫性を仮定すれば、ある時刻における画像中で先行車の存在する可能性のある位置を予測することにより、検出領域を限定することが可能である。先行車の追跡には、それまでに得られている先行車の背面の画像自体やナンバープレート部分の画像を用いてマッチングをとる手法も用いられる。先行車に標的となる光(赤外線)マーカを付けることができれば³⁴⁾、画像による先行車の認識・追跡が比較的容易に行える。この手法は、先行車を後続車が追従走行するための技術として、近い将来の実用化を目指して実験が行われている。また、マーカの光を変調することにより、先行車と追従車の通信も行うことができる³⁵⁾。

先行車との衝突の危険性が生じる場合には、先行車は障害物と見做される。これは後方から接近してくる車や、隣の車線を走っている車にも同様に適用できる。衝突の危険性は、相対距離と相対速度から計算される。これは対象が自動車として認識される事を前提としている。二輪車、歩行者、道路上の落下物等は、形状がはっきりしないためモデル化が難しく、現状では認識が大変困難である。人間の検出には赤外線の応用が研究されている。画像を用いて、近接領域の障害物を検出する手法としては、一定の伏角で道路を撮影したステレオ画像を仮想的な道路平面に逆投影する手法²⁹⁾がある。道路表面の模様は逆投影により一致するが、道路表面から高さのある物体は逆投影によりずれを生じる。この原理も用いることにより、高さを持った物体が障害物として検出される。

7. 標識類の認識

道路環境において、運転者への情報伝達を明確に意図した記号言語の典型は標識である。このような観点からは、各種規制等の目的で路肩に設置される規制標識、交通信号、案内標識、可変表示版、路面上に描かれたマーク等を同一の範疇として考えることができる。これらは、運転者に認識されることを目的としているため、単純・明確な形状・色・構造を持っている。

一般的にはまず、形状情報や色情報により、画面の中から対象とする領域を切り出す。形状情報を用いる場合には、エッジを求めた後、四角形を主とす

る多角形は線分の組み合わせ、円形の場合には一般化Hough変換やパターンマッチングが用いられる³⁶⁾。色情報を用いる場合には、使用されている色の数が限定されている事を利用して、色を用いた領域分割を行う³⁷⁾。検索領域は道路が検出されれば、道路との位置関係から限定できる。

対象が視線方向と直交した面上に設置されている通常の場合には、画像の中における対象については、平行移動と形状の相似的变化であるスケールのみを考えればよい。自動車が対象に接近していく過程において、画面上の対象が、特定の距離においてあらかじめ定めた大きさになることを利用することもできる。たとえば、対象が一定の大きさになってから内部の記号・文字等の認識を開始すればよい。

内部の記号・文字等をその領域によって分割し、認識結果とあらかじめ用意してあるモデルとの照合を行う。この場合、文字認識の前に記号・文字領域の二次元構造記述を用いることで、候補の絞り込みを行うことが可能である。道路と標識の詳細なデータ・ベースを用意することにより、現在位置が高い精度で検出でき、また次に検出すべき標識が予測出来る。また国による標識等の違いに対応するためには、モデルとしての記述と、認識アルゴリズムを分離することで適応性を持たせる必要がある。

8. おわりに

自律走行車の走行環境認識手段としての画像技術は有望視されており、着実に応用を広げている。解決すべき課題も多いが、特にダイナミックレンジの拡大、二輪車・人間の認識が重要である。ハードウェアの面からは前者は人工網膜や分布型検出器、後者は赤外線の利用等が当面の課題であろう。ソフトウェアの面からは、人間の視覚における大雑把さと敏感さをどのように組み込んでいくかが大切であるが、行動結果のフィードバックが有効に作用していると考えられる。また、人間の視覚は凹凸、対称性、平面性、直線性、平行性、滑らかさ等に関しては非常に敏感であり、かつ適応性が高い。

画像を用いた環境認識システムの性能評価・検証・相互比較も重要である。車載装置として組み込んだ試験の前に、各種のアルゴリズムの実験・検証・相互比較を行うためには、共通の道路シーン画像データベースが必要である³⁸⁾。またソフトウェアの移植性も重要な課題である。画像を用いた環境認識システムは、自律走行という本来の目的のほかに、

道路環境の評価、錯覚等の危険性の検出等、安全向上のための広い応用が考えられる。視覚情報の利用については、霧、雨、雪等の悪環境が課題とされることが多いが、これは人間が運転する場合との関係で論じるべきであろう。他のセンサとのセンサ・フュージョンも重要である³⁹⁾。

参考文献

- 1) 「知的交通計測」電気学会技術報告、第512号、1994年9月
- 2) 津川定之、広瀬武志、谷田部照男「知能自動車に関する研究」『機械技術研究書報告』第156号、1991、11
- 3) E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek, J. Schiehlen: The Seeing Passenger Car 'VaMoRs-P', IVS '94, pp.68~73
- 4) 保坂明夫「自動運転の実験-II-自律走行車PVSとその走行実験」自動車技術会、Smart Vehicleの現状と課題シンポジウム資料、pp.43~49、1992年
- 5) 高橋弘行、久田見篤「視覚を用いた自動車の安全走行システム」日本機械学会第1回交通・物流部門大会、No.920-98、pp.548~553、1992年11月
- 6) Matthew A. Turk, David G. Morghenthaler, Keith D. Gremban, and Martin Marra: VITS-A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.3, pp.342~361, May 1988
- 7) K. I. Kim, S. Y. Oh, S. W. Kim, J. H. Han, C. N. Lee, B. S. Kim, C. S. Kim: An Autonomous Land Vehicle PRV II, Performance Results and Potentials, IVS '94
- 8) Charles Thorpe, Martial H. Hebert, Takeo Kanade, and Steven A. Shafer: Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No.3, pp.362~373, May 1988
- 9) Berthold Ulmer: VITA II-Active Collision Avoidance in Real Traffic, Proc. of Int.

- Symp. on Intelligent Vehicles, Paris, pp.1~6, Oct. 94
- 10) 菊池英一「自動車の無人運転」『計測と制御』Vol.11, No.1, pp.83~89, 1972年
 - 11) 堺司ほか「自動車無人走行実験システム」『日産技報』Vol.22, pp.38~47, 1986年12月
 - 12) チャムノタイ・コーシン、小沢慎治「ランドマークを利用した無人搬送車の走行誘導の一手法」電子情報通信学会論文誌、D-II、Vol. J74-D-II、No.7, pp.895~907, 1991年
 - 13) 『スーパースマートビークルシステム(SSVS)の開発と関連技術に関する調査研究報告書』機械システム振興協会(自動車走行電子技術協会)、平成5年3月
 - 14) 青木正喜ほか「カーボディーランゲージの研究」国際交通安全学会、1992年
 - 15) Yang Ni, Bogdan Arion, Francis Devos: Investigation on an Analog Stereo Retina for Automobile Applications, IVS '94, pp.320~325
 - 16) 津川定之、谷田部照男、村田智、広瀬武志「自律車両の走行制御」電気学会道路交通研究会資料、RTA-89-12, pp.9~18, 1989年
 - 17) 築山俊史「自律的な車の走行のためのモーションステレオ」計測自動制御学会論文集、第22巻、第9号、pp.968~975, 1986年
 - 18) M. Garduno, B. Vachon: A Range Security System for Vehicle Navigation, IVS '94, pp.357~362
 - 19) Yasushi Yagi: Real-Time Omnidirectional Image Sensor(COPIS) for Vision Guided Navigation", IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.10, No.1, pp.11~22, February 1994
 - 20) Todd Jochem, Dean Pomerleau, Charles Thorpe: Vision Guided Lane Transition, Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles, Detroit pp.30~35, Sep. 95
 - 21) W. Enkelmann: ROMA - A System for Model-Based Analysis of Road Markings, Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles, Detroit, pp.356~360, Sept. 1995
 - 22) R. Behringer : Road Recognition from Multifocal Vision, Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles, Paris, pp.302~307, Oct. 94
 - 23) 農宗千典、小沢慎治「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』113巻、2号、pp.139~148, 1993年
 - 24) 浅野耕児、青木正喜「白線検出による自車位置検出」画像電子学会誌、第21巻、第2号、1992年
 - 25) Karl Kluge: Extracting Road Curvature and Orientation From Image Edge Points Without Perceptual Grouping Into Features, IVS '94, pp.109~114
 - 26) Jinyou Zhang, H. -H. Nagel: Texture-Based Segmentation of Road Images, IVS '94, pp.260~265
 - 27) 農宗千典、小沢慎治「連続道路画像からの道路構造とカメラ姿勢の同時推定」電子情報通信学会論文誌D-II、Vol.J76-D-II No.3, pp.514~523, 1993年3月
 - 28) Michael E. Brauckmann, Christian Goerick, Jurgen Gross, Thomas Zidlke: Towards All Around Automatic Visual Obstacle Sensing for Cars, IVS '94, pp.79~84
 - 29) F. Thomanek, E. D. Dickmanns, D. Dickmanns : Multiple Object Recognition and Scene Interpretation for Autonomous Road Vehicle Guidance, IVS '94, pp.231~236
 - 30) 脇迫仁「距離画像処理による3次元物体検出システム」電子情報通信学会論文誌、Vol.J77-D-II、No.7, pp.1282~1292, July 1994
 - 31) B.Girol: The efficiency of motion-compensating prediction for hybrid coding of video sequence, IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. SAC-5, No.7, 1987
 - 32) Gloria Chow et al.: Towards a System for Automatic Facial Feature Detection, Pattern Recognition, Vol.26, No.12, pp.1739~1755, 1993
 - 33) P.Comelli, P. Ferragina, M. N. Granieri, and F. Stabile: Optical Recognition of Motor Vehicle License Plates, IEEE Trans. VT, Vol.44, No.4, pp.790~799, 1995
 - 34) 鈴木康子、青木正喜「テールランプによる先行車検出」画像電子学会誌、Vol.20, No.6, pp.652~658, 1991年12月

- 35) 関馨ほか「光応用車々間通信距離計測・通信システムのフイージビリティスタディ」電気学会道路交通研究会資料、RTA94-10、pp.35~44
- 36) Y. -J. Sheng, W. Ritter, R. Janssen: An Adaptive System for Traffic Sign Recognition, Proc. of Int. Symp. on Intelligent Vehicles, Paris Oct. 94, pp.165~170
- 37) Jill D. Crisman and Charles E. Thorpe: SCARF: A Color Vision System that Tracks Roads and Intersections, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 1, pp.49~58, February 1993
- 38) O. Shimizu, K. Mitoh, and M. Aoki: Road Scene Data Collection Along With Navigation Related Data, The 26th International Symposium on Automotive Technology & Automation, pp.671 ~ 678, No.93 AT102 September, 1993
- 39) Joachim Horn, Joachim Russ: Localization of a Mobile Robot by Matching 3D-Laser-Range-Images and Predicted Sensor Images, IVS '94, pp.345~350