



環境認識（認知）技術

応
般

竹内栄二朗（名古屋大学）

自動運転と環境認識技術

自動運転車両は自車両の置かれた状態をさまざまな側面から認識し行動を決定しなければならない。たとえば今どこを走っていて、車線はどこで、車線上に障害物がないか、交通信号は何色で、ほかの車両とぶつかる危険はないか、障害物は動く可能性がないかなど、環境認識と一言と言っても、その対象となる問題は非常に広い。

それら環境を認識するための手法は目的によりまったく異なっており、個々の問題の特性に合わせ解いていく必要がある。本稿では自動運転車両の環境認識技術について、センサを利用した可視領域の認識と、センサの視野外の地図を利用した認識について、さまざまな目的に合わせ広く紹介する。

運転において認識が必要な情報

運転に必要な認識を説明するため、図-1に車両が道路上を走行している際の周辺状況の一例を示す。図中で自車両が右に向かって進もうとしているとしている場合、運転する際どのようなことを考えるであろうか。電柱等の障害物を見つけ距離を取って走行しなければならないであろう。また、前方車両Aが自車より低速で走行しているのであれば、自車も減速し車間を取る。対向車両Bはぶつかる危険はないだろうか。前方の人が道路に向かってきているがガードレールで阻まれているから安全だろうか。反対車線の人ぶつかる危険はないだろうか。交差点では死角から車両Cが接近してきているかもしれない。もしかしたら駐車場で停止中の車が動き出

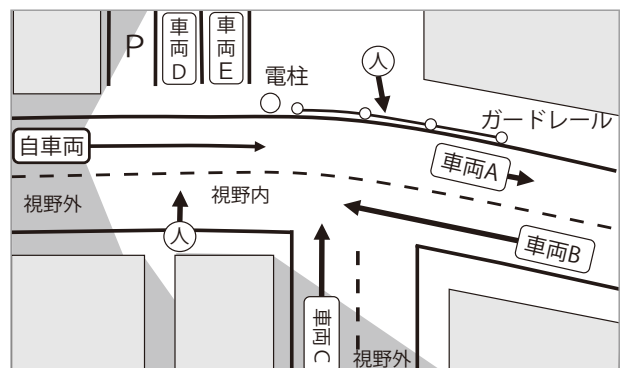


図-1 自動車と周辺状況

てくるかもしれない。そして目的地に移動するためには車線上を走行し、信号等を認識しつつ目的地へ移動する必要がある。

このような複雑な状況に対処するために、1つは得られたセンサ情報から、静止物体の位置、移動物体の位置と速度、静止・移動物体の移動特性などを知るための物体認識など、「可視領域」の認識が必要である。また、見えない場所などセンサでは得られない情報等については地図情報や事前情報等を利用し、経路の決定や認識の補助、危険の予測等を行う「不可視領域」の認識が必要である。以降これら可視領域と不可視領域に分け、詳細を述べる。

可視領域の認識

* 静止障害物検出

最も基本的な環境認識技術は障害物検出である。すなわち「物」と重複しない経路をとればたいていの衝突事故を避けることが可能となる。障害物検知での難しさとして、死角への対応と、移動物体への対応、そして路面の3次元的な変化が挙げられる。ここでは障害物情報を蓄積しつつ移動物体の影響を

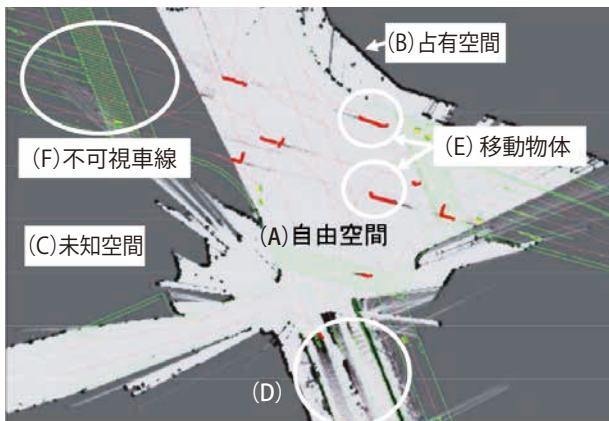


図-2 占有度グリッドマップと移動物体

軽減可能である占有度グリッドマップと、3次元空間での障害物検知について解説する。

《占有度グリッドマップ》

空間中の障害物の配置を表す表現方法として、図-2に示すような占有度グリッドマップがある。白色の部分はレーザが通過し、ものがないとされる自由空間(図-2(A))、黒色はレーザが当たり、ものがあるとされる占有空間(図-2(B))、灰色はいずれでもない未知空間(図-2(C))であり、各位置における占有度を逐次累積し更新する。占有度グリッドマップでは過去の計測値を蓄積するため死角が削減可能で、占有度を物体があるとされる場合と、レーザが貫通し物体がないとされる場合の相対関係で計算するため、単純に計測値を蓄積した場合に比べ雨等の動的物体に左右されづらく、また検出していない場所がどこであるかを扱えることが利点である。一方、2次元平面環境のみであることと細い物体や車等の大きな動的物体が残ってしまう可能性がある(図-2中(D)部)。3次元環境に対応する場合は高さを含めたボクセル空間で取り扱う必要があるが多くの計算量と記憶領域を必要とする。

《路面検知》

車両に水平にレーザスキャナ等を設置した場合、路面が水平である場合は障害物を検知するが、路面もしくは車両が傾斜している場合道路面に当たり障害物として判定される可能性がある(図-3(A))。このように存在しない障害物を検知しブレーキがかかると非常に危険である。これを避けるために

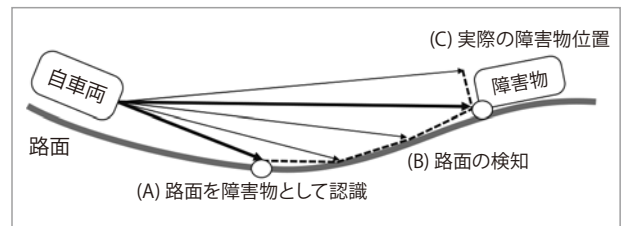


図-3 路面と障害物検知

は、地図の路面の形状情報を用いるか、複数の高さ方向のレーザスキャナ情報を利用し、路面と障害物を識別することが必要となる。すなわち、障害物を高さ方向に急峻に立ち上がった物体として考え、奥行き方向に対し傾斜を計算し、緩やかな場合は路面(図-3(B))急峻な場合は障害物として判定する(図-3(C))。この場合障害物として判定するためには異なる高さ方向に2点以上当たっている必要があり、遠距離からの検出のためには縦方向分解能が高いレーザスキャナもしくはステレオカメラが必要となる。

小物体を考慮した場合や、オフロード、雪上等では、障害物検知問題は車両が進めるか否かの踏破性分析問題になりさらに難しい問題となる。たとえば、速度抑制のために路上に段差が設けられる場合があるが、ゆっくり進むか、斜めに通過し車輪1つ1つ順に通ることで衝撃を緩和できる。このような判断を行うためには、路面形状の正確な計測と車両の予測通過軌跡、サスペンション等の動特性を考慮し踏破性を評価する必要がある。

＊ 移動物体認識

前方車両に後続して走行する場合、前方車両の走行速度に応じて車間を決定する必要があり、交差点等では対向車の将来位置を予測し衝突を回避する必要がある。ここでは障害物の将来位置を予測するための移動物体認識について触れる。

《移動物体検知の基本処理》

移動物体検知では、計測値の中で同一物体がどれであるかを判別する必要があり、判別問題を含む複雑な処理を必要とする。次に移動物体の認識処理の典型例を示す。

1. **移動物体候補検出** 図-2中(E)部のように、占有度グリッドマップ上の自由空間に障害物情報が生じた場合、移動物として抽出する。
2. **ラベリング** 計測データ内で空間的な対応付けを行い、同一物体がどれであるかを判別する。
3. **トラッキング** 異なる時刻の計測データ間で移動物体候補の時間的な対応付けを行う。
4. **フィルタリング** カルマンフィルタやパーティクルフィルタ等の確率的状態推定手法を利用し、移動物体の動作モデルをもとに位置・速度・加速度等を推定する。

以上の処理は手法により順序や実現法は異なり、パーティクルフィルタ等のようにトラッキングとフィルタリングが同時に行われるものも多い。

《より高度な移動物体認識》

車両や人は等速直線運動をするわけではなく、ドライバーにより動作が変更される。たとえば図-1のように道路が曲がっていれば対向車両Bは道路に沿い曲がって走行することが想定される。そのため、より長い時間（数秒から十数秒）の予測のためには、道路構造の認識を併用するか、地図情報を利用しどの車線を走ろうとしているかなどの運転意図推定が必要となってくる。

* 物体認識

図-1で示したような、動かない電柱の近くを通る場合と、立っている歩行者や駐車車両の近くを通る場合取るべき行動は異なってくる。移動していない物体に対して、将来の変化を予測するためには知識情報が不可欠であり、その知識情報を引き出すため、その物体が何であるかを特定する物体認識技術が必要となる。

これら物体認識技術は密度の高い情報を取得可能な画像情報を利用するものが多く、HOG (Histograms of Oriented Gradients) や DPM (Deformable Part Model) など特徴量に基づく手法や、CNN (Convolutional Neural Network) に代表されるいわゆるディープラーニングによる特徴量自体を学習する手法が存在し、現在も活発に研究されている分野である。

* センサフュージョン

自動運転システムの難しさの1つにその要求される安全率の高さがある。たとえば障害物認識においても、道路を障害物として判定し緊急停止した場合には追突される危険があり、一方障害物検知が遅れば衝突の危険があるため、安全率を向上するためには認識率の向上が不可欠である。また認識情報を意思決定および制御に反映する上で重要となるのがその連続性である。たとえば実際に回避を行う場合、そのもととなる認識情報が断続的である場合や、結果が毎回変化すると制御が不安定となってしまう。そのため、複数のセンサや複数の処理法により認識を多重化し、トラッキング処理等を利用し複数情報を統合するとともに連続性を確保する必要がある。

複数のセンサ情報を融合する場合には、状況や利用目的に応じその検出精度と再現率のどちらを優先するかを考える必要がある。すなわち、同時に認識した場合のみ検知したとする場合、対象と異なるものの検出は減り検出精度は向上するが、対象を検出できない場合が増え再現率が低下する。またどちらか一方を認識した場合に検出したとする場合、対象の検出は増え再現率は向上するが同時に対象以外の検出も増え精度が低下する。

多くの場合遠くの対象に対する検出精度や再現率は低い危険性も低く、また近くの対象に対する検出精度や再現率は高い危険性も高い。そのように精度や再現率、危険性はその対象との距離等により依存するため、走行の安全性と認識の精度・再現率を統合して考え、センサの特性や状況に応じた統合法を考える必要がある。

地図情報と位置推定

高速走行する場合はより遠方の車両を検知する必要があるが、センサの検出距離が限られ検出できない場合があり、またカーブや見通しの悪い交差点などではそもそも隠蔽により対向車が検知できない場合もある。そのような場合においてはその場で計測した情報だけに頼って走行すると危険を避けられな

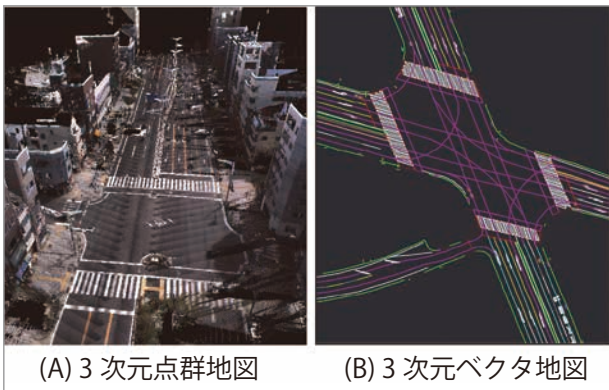


図-4 3次元点群地図とベクタ地図

い場合が生じる。一方、地図等の事前情報を用いることができれば、視野外の情報やセンサで直接得られていない情報を補うことが可能となる。ここでは、3次元地図の作成法と、利用のための位置推定、3次元地図を利用した認識について解説する。

* 3次元地図と構築手法

《MMSとベクタ地図》

近年 Mobile Mapping System (MMS) と呼ばれる計測車両の開発が活発である。MMSは測位衛星により地球上の位置を計測する Global Navigation Satellite System (GNSS) の高精度版である Real Time Kinematic GNSS (RTK-GNSS) や光ファイバジャイロ、ホイールエンコーダ等により自車位置を数センチ精度で測位し、レーザスキャナやカメラにより計測した周辺情報を地図上にマッピングすることで3次元地図を構築する。図-4(A)にMMSにより計測された点群地図を示す。MMSを利用することにより、ほぼ全域の道路環境を3次元計測することが可能となる。

一方、MMSにより計測された点群地図は膨大な情報からなるため、その保持と直接的な利用が難しく、また意味情報が含まれないため利用目的が限られる。そのため、点群地図から自動もしくは手動にて物体の情報を含めた形でベクタ地図を構築する。図-4(B)に点群地図から主要な情報を抽出したベクタ地図を示す。ベクタ地図には形状に加え走行レーンネットワーク情報や区画線、停止線、信号等さまざまな情報が付加されており、ベクタ地図を利用

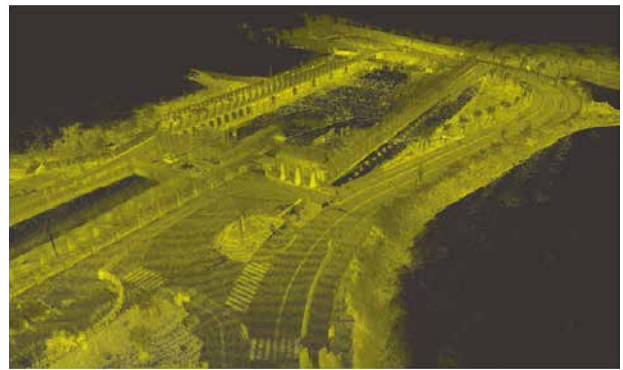


図-5 SLAMにより生成した3次元点群地図

することにより、自車位置と周辺環境の幾何学的関係および意味を理解することができる。

《SLAM》

MMSは高精度な位置情報をもとに地図を生成するが、3次元LIDAR (Light Detection and Ranging) 等利用している環境計測センサが高性能である場合、単体で3次元形状を実時間で正確に計測することが可能となる。この形状情報を逐次的もしくは大域的に照合し幾何学的制約条件を最適化していくことで、広域の3次元地図を構築することが可能となる。このようなSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術はさまざまなセンサ、手法が提案されており、すでに実用技術となりつつある。図-5に3次元LIDARを用いて地図を構築した例を示す。この例では、車両が3次元LIDARにより周辺を計測し走行したデータを用いて実時間で3次元地図を構築している。

* 位置推定技術

地図情報を利用する上で欠かせない技術が地図上での自車位置を求める位置推定技術である。GPS (Global Positioning System) に代表されるようなGNSSは主要な位置計測手法の1つであるが、都市部では電波の反射等の影響が無視できず、単独で自動運転を実現するには課題が多い。そのため車輪回転量やジャイロ、車線情報等、複数のセンサ情報を確率的な状態推定手法を利用し複合して位置推定する方法が多く用いられる。近年ではMMS等により高精度な3次元地図を計測できるため、これと3次元

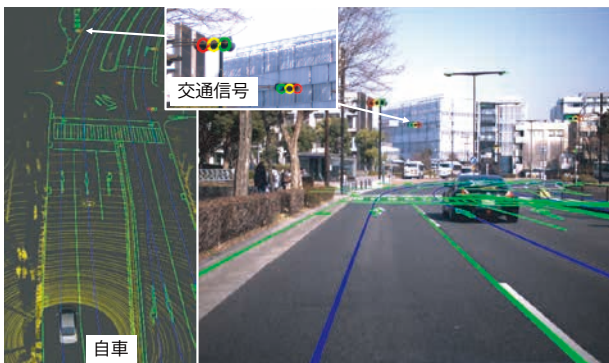


図-6 カメラ画像上に重畳したベクタ地図情報

LIDAR を用いることで高精度な位置推定が可能である。

前述した SLAM 技術と位置推定技術は技術的に共通する部分が多いが、位置推定は既存の地図に対しての位置を求めるものであり、異なる時期の情報との照合や、情報量が少ない地図情報を利用して頑健な処理を実現するなど、求められる性能は異なるものとなる。

* 地図による認識の補助

センサ情報のみからシーンを理解することは非常に興味深いテーマではあるが、現状の技術では難しい部分もある。たとえば交通信号は自ら光るため容易に認識可能であるように思われるが、夜間の繁華街等、背景に多数の照明がある場所や、紅葉した樹木が背景にある場合等、誤認識する可能性がある。また、信号が多数ある環境ではどの信号がどの道路と関連しているかなど、検出だけでなく高次の判断が必要となる。一方、地図情報を持っていれば、位置精度によるがセンサ座標系上でのおよその信号位置を特定することが可能となり、また同時に車線との関連付けもできるため現実的な問題となる。図-6 に車載カメラ情報に対し推定位置をもとにベクタ地図を重畳した事例を示す。地図と自己位置を利用することにより、交通信号の画像中の位置(図-6 中拡大部)や車線の位置等を認識する前から知ることができる。

* 「見えていない」ことの認識

出会い頭事故は日本の事故の中で 24% を占める要

因である。出会い頭事故では飛び出し対象が物陰から出てくるため、ほとんどのセンサで事前に検出することができない。そのため出会い頭事故では、交差する車線など想定される危険に対してどこが見えていないのか、ということを知ることが重要となる。たとえば前述した占有度グリッドマップでは、現在のセンサ情報で計測している(見えている)場所と計測していない(見えていない)場所を識別できるため、自己位置により地図を占有度グリッドマップ上に重畳することで地図上のどこが見えていないかを判別することが可能である(図-2(F))。これに加え、道路構造や、各道路での移動体の頻度や速度分布等の事前情報を利用することにより、見えていない車線での交通を予測することが可能となり、見えない場所からの飛び出しを予測することが可能となる。

環境認識から行動決定へ

本稿では、自動運転システムの認識に焦点をあて解説した。安全な自動運転の実現のためには認識技術として、得られた情報を分析する「見えている場所」の認識技術と、地図と自己位置を利用し、情報が得られていない「見えていない場所」の認識技術を併用し、多様な状態を認識する必要がある。本来認識処理はその後の行動決定に密接に関連し、分離して議論することができない。自動走行にはほぼ 100% の安全性が求められる。一方、単一のセンサでは 100% の認識は困難であるため、センサフュージョンや地図情報により補い、また状況に応じて精度と再現率の優先度のどちらを優先するか設計する必要がある。自動運転の認識では問題を単一の問題として考えず、どう利用するか、どこまでの認識精度が必要であるか等、統合的に考える必要がある。

(2016年2月17日受付)

竹内栄二郎 takeuchi@coi.nagoya-u.ac.jp

2008年東北大学助教、2014年より名古屋大学未来社会創造機構特任准教授。現在に至る。移動ロボットの自律化や自動車の運転支援に関する研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、計測自動制御学会、IEEE 各会員。