特 集

自動車の自動運転システムの技術概要

Technical Overview of Autonomous Driving System

菅沼 直樹^{*1}

Naoki Suganuma

In recent years, the word "Autonomous vehicle" has come to be heard in various scenes including television, newspaper and other media. Autonomous vehicles are thought to have various advantages such as improvement of safety of cars, improvement of comfort of passengers, elimination of shortage of public transportation system. In this paper, we describe the outline of the technology required for autonomous driving system. In addition, we will outline the public road experiment which the authors' university is carrying out as the first trial at domestic university.

Keywords: autonomous vehicle, perception, localization, path planning, human machine interface.

(2017 年 10 月 17 日受付)

1 緒言

近年「自動運転」という言葉がテレビ、新聞等のメディアをはじめとして様々な場面で聞かれるようになってきた。自動運転自動車は、自動車交通の安全性向上、搭乗者の快適性向上、公共交通機関不足の解消など、様々な効果が期待されている。

実は、この自動運転に関する研究の歴史は大変古く、日本国内であれば 1960 年代から研究が開始されている[1]。またその後現在に至るまで、様々な研究機関における研究開発や、国家プロジェクトとしての研究プロジェクト[2]など様々な試みが行われてきた。一方、これまで研究開発されてきた自動運転システムの多くは、高速道路での走行を前提としたものがほとんどであった。例えば磁気ネイル[3]、誘導ケーブルといった設備をあらかじめ道路に敷設しておくことで自動運転を実現する例や、高速道路であれば白線が連続して引かれているためこれをカメラで読み取って自動運転を行う例[4]など、インフラに強く依存した自動運転システムが開発されてきた。

一方、今まさに脚光を浴びている自動運転システムでは、インフラに対する依存度がかなり下がっており、その結果として高速道路以外のいろいろな道で自動運転が可能となってきた。一例として、著者らの研究室

が国内の大学で初めての試み[5]として実施中の高齢過疎化が進む地方の一般道路における自動運転自動車の公道走行実証実験の例を示す。Fig. 1 は公道を自動運転中の様子を示しており、安全のためハンドルには添えているが、ステアリング、スロットル、ブレーキ、ウィンカーを含め自動車は完全にコンピュータで制御されている。このような地方の道路ではインフラにコストをかけることが難しいため、インフラに強く依存した従来の自動運転システムでは走行が難しかったが、現在ではこのような場所でも自動運転が十分可能になってきている。

著者らの経験から、このような柔軟な自動運転が可能になった理由は 3 つあると考えている。一番目の理由は、コンピュータの処理能力の向上である。現在のコンピュータは一昔前のスーパーコンピュータのレベルまで進化していて、従来車載装置としての演算が難しかった大規模な計算がリアルタイムかつ省電力で実現可能となってきている。二番目の理由は、人工知能技術、いわゆる機械学習技術の発展がその要因となっ

Fig. 1 Public road experiment on ordinary road.

連絡先：菅沼 直樹，〒920-1192 金沢市角間町，金沢大学新学術創成研究機構 自動運転ユニット，
e-mail: suganuma@staff.kanazawa-u.ac.jp

^{*1} 金沢大学

Fig. 2 Experimental vehicle equipped with many sensors.

Fig. 3 Example of point cloud obtained from LIDAR.

ている。特にここ数年の DNN (Deep Neural Network) に関連した技術の発展は目覚ましく、従来は認識が難しいと思われていたことが今の技術では比較的簡単に認識が可能となってきている。またそれに伴って、複雑な状況判断を行いながら柔軟な自動運転を実現することが可能となってきている。そして最後の理由が高精度地図の活用[6]である。従来の自動運転システムでは、道路にコストをかけて、ハード的なインフラを整備することによって自動運転の難易度を下げる試みが多く行われてきたが、現在では地図というソフトインフラにコストをかける形へと発想が大きく変わってきている。この場合、例えば著者らの取り組みのように地方の一般道であってもその場所の高精度地図を用意さえすれば柔軟に自動運転を行うことが可能となる。これらの3つの技術革新によって、現在の自動運転システムでは高速道路以外の一般道を含め、様々な自動運転が実現可能となってきている。

本稿では、この近年話題となっている自動運転システムに必要な技術の概要について述べる。また、著者らの大学が実施中の公道走行実験の概要について述べる。

2 自動運転に必要な技術

著者らの研究室では、1998 年ごろから約 20 年間市街地での走行を目指した自動運転システムの開発を行ってきた。この間、自動運転機能に関する様々な技術開発を行い、複数の試験車両も構築してきた。現在主に使用しているのが 4 台目の試験車両で、Fig. 2 に示すように、複雑な周辺環境を認識するため多数のセンサが設置されている。メインのセンサとして使用しているのが、車両上部に設置した Velodyne 社製の LIDAR(Light Detection and Ranging)である。Fig. 3 はこの LIDAR を用いて周辺空間を計測した結果を示している。Fig. 3 に示すように、LIDAR はレーザ光線を様々な方向に照射することで周辺環境の 3 次元的な距離分布(ポイントクラウド)を取得することが可能となっている。その他にも試験車両のバンパ内には 9 台のミリ波レーダ(富士通テン社製)、6 台の LIDAR(IBEON 社製)等が設置されている。またその他にも、カメラや GPS アンテナなど様々なセンサが設置されており、これらの 20 台近くのセンサを使用することで自動運転に必要な認知機能を実現している。

自動運転システムではこのような様々なセンサを駆使して周辺環境を認識し、その情報をもとに様々な状況判断を行う必要がある。著者らの長年の取り組みから、自動運転システムには周辺環境認識、自己位置推定、走行軌道生成、ヒューマンマシンインターフェースの 4 つの技術が必要であると考えている。下記に、これらの技術の概要について述べる。

2.1 周辺環境認識[7]

自動運転システムが障害物や周辺に走行する車や自転車、歩行者といった様々な物体に衝突せずに走行するためには、自車周辺の状況を正確に「認識」する必要がある。ただ、よくよく考えてみるとこの「認識」という言葉が非常にあいまいな言葉であり、実は「検出」、「識別」、「予測」という 3 つの技術の総称であると考えている。

検出とは、周辺に存在する物体がどこに存在するかを認識する技術であり、まさにセンサそのものの開発に相当する。自動車は様々な日照条件や天候条件のもとで走行する必要がある、このような環境下においても確実に物体をとらえることが可能な技術開発が重要な要素となる。一方、例えば Fig. 2 に示すような大

Fig. 4 Difference of avoidance behavior by object type.

量のセンサを搭載すれば自動運転が容易に実現できるかといえば、下記に述べる「識別」と「予測」という 2 つの技術が必要となるため、実際には容易に自動運転を実現することが難しい。

例えば LIDAR を用いると、Fig. 4 に示すように道路脇に存在するコーンや歩行者といった「障害物」を容易に検出することができる。このとき例えば人間が運転をする場合であれば、障害物が歩行者である場合とそうでない場合にその回避の仕方を変化させるものと考えられる。一方これらの物体の種別を「識別」せずに、単に物体を「検出」するのみである場合、その物体が何であったとしても単一の回避の仕方しか取れなくなってしまうため違和感のある走行となる。このため、物体種別を「識別」する技術が重要であるといえる。例えば、Fig. 5 は Deep Neural Network を用いて画像の各画素の意味を解析した例であり、現在の技術を用いると画像内の各領域に意味を持たせることが可能となっている。このような識別に関する技術は、近年の機械学習技術の進歩によってその能力が大きく向上している。

最後に、最も重要かつ困難な認識技術の要素が「予測」である。自動車は高速で走行しているため、衝突せずに走行するためにはあらかじめ衝突する可能性を予測して走行させる必要がある。一方、車載センサによって検出される情報は、あくまで計測した時点での情報しか取得することができないため、衝突したときにはじめて「ぶつかった」という情報を取得できることとなる。したがって、時系列的に得られる過去のセンサ情報から未来の情報をいかに予測するかが重要な

(a) Original image

Car Pole Road Tree

(b) Result of segmentation

Fig. 5 Semantic segmentation based on Deep Neural Network.

Fig. 6 Simultaneous recognition of plural traffic lights.

技術となる。

これらの検出、識別、予測という三つの技術が確立されて初めて、認識という技術が成り立つ。周辺環境を「認識」と一言と言っても、実際には複雑な技術の統合によってはじめて成立する技術であるといえる。

その他、市街地での走行では標識や信号機の認識も必要となる。このうち標識に関しては、制限速度や止まれ標識など、多くの情報が時間的に変化のない情報であるため、地図情報にこれらの情報を埋め込んでおくことでオンボードセンサによる認識を必ずしも行う必要がないものもある。一方、信号機や可変制限速度標識のように時間的に変化する情報を提示しているものに関しては、オンボードセンサでの認識が必要となる。このような場合、単なる提示情報の認識以外にも様々な課題が存在している。例えば Fig. 6 は一般道の交差点付近を自動走行中にオンボードカメラで画像を

撮影し、信号機の認識をしている様子を示している。この例では、複数の信号機が1枚の画像中に同時に現れている。このような場合、認識した信号機がどの交差点と意味として紐づいているのかを適切に判断できないと交差点への侵入判断自体ができなくなる。このため、単純に「認識」という機能を実現するだけでなく、交通環境への意味の紐付を考慮した状況判断も必要となる。

2.2 自己位置推定

自動運転に必要な技術の二つ目は自己位置推定である。1章において、近年の自動運転システムではソフトインフラとして地図を活用することによって様々な環境における自動運転が柔軟に行えるようになってきていると述べた。しかし、たとえ高精度な地図が用意されていたとしても自動運転は容易には実現できない。例えば人間が、土地勘のない場所で地下鉄に乗ってある特定の目的地に訪問することを考える。この場合、まず地下鉄の駅から地上に出た後、手持ちの地図と周辺の道路や建物といった情報をもとに自分が地図上のどこにいてどちらを向いているのかを把握するであろう。その後、初めて現在位置から目的地まで進む方向を把握して、地図を用いて目的地まで到達するという行動をとると考えられる。実は地図を活用した自動運転システムでもこれとほとんど同じ動作を行う必要があるため、自車が地図上のどこに存在しているのかを常に把握する技術が必要となる。

現在、日本国内では準天頂衛星が打ち上げられ、人工衛星を用いた高精度な位置推定技術が比較的容易に行えるようになってきている。しかし、例えばトンネルの中など人工衛星の電波を取得することが難しい環境はたくさんある。このため、人工衛星に頼らない自

己位置推定手法が必要となる[6]。一例として、著者らの研究室では Fig. 7 に示すように道路を上空から見た画像(オルソ画像)を地図として持たせておき、これを用いて自己位置推定を行う方法を用いている。この場合、人工衛星からの位置計測値を用いなくても、概ね 15cm 程度の精度で自己位置を推定することが可能となっている。

2.3 走行軌道生成

自動運転に必要な三つ目の技術は走行軌道生成(パスプランニング)技術[8]である。パスプランニングでは、主に目的地までの走行ルートを選択、交通ルールへの準拠、障害物の回避と先行車両追従といった項目について検討する必要がある。

このうち走行ルートの選択に関しては、概ねカーナビゲーションシステムで培われてきた技術を活用することができる。ただし、従来のカーナビゲーションシステムとは異なり、複数車線ある道路のどの車線を走行するのかという細かいレベルまでの計画を立てる必要がある。

一方地図から選択した走行ルートは、あくまで目的地までの道のりを表した経路情報にすぎないため、このルート上をどのように走行すべきかに関してはさらなる詳細検討が必要となる。例えば、走行ルート上に一旦停止の交差点を右折する状況が発生した場合、停止線で一旦停止後、交差点の左右から他車両が接近していないかどうかを確認し、安全が確認されれば交差点へ侵入するといったいわゆる交通ルールや、場合によっては交通マナーといった観点で運転行動を適切に管理しながら走行を行う必要がある。さらには、このような交通ルールを守って走行するとしても、例えば走行ルート上に存在する停止車両等の障害物へのハンドルによる回避や先行車との車間距離を維持するための速度制御など様々な状況を考慮する必要がある。

通常自動運転システムでは上記の複雑な運転行動を適切に実施可能な軌道(走行経路と速度プロファイル)をオンボードセンサ情報や地図情報に基づき、リアルタイムに生成する。そして、最終的には生成された軌道に対して精密に追従できるようにハンドル、スロットル、ブレーキを制御し、必要に応じてウィンカー、ハザードを点滅させることで自動運転が実現される。

Fig. 7 Example of ortho-image used for localization.

2.4 ヒューマンマシンインターフェース

前節までに述べた技術を組み合わせると、自動車を自動的に走行させることが可能となる。しかし実際の自動車が道路を走行するためには常に車両内外の人間とのコミュニケーションを図る技術(ヒューマンマシンインターフェース)が必要となる。

例えば車内の人とのコミュニケーションが必要な例として、普段自分が手動で運転している場所をたまたま自動運転で走行した場合を考えてみる。この場合、自分がいつも通る道と違うルートを自動運転車が選択する可能性があり、自分が想像すらしていない交差点を右左折する場合がある。このような場合、自動運転車が何をしようとしているのかが分からないと、搭乗者が予期していない場所で交差点の右左折に伴う加減速が突然起きてしまうため、その行動に不安になってしまう可能性がある。また、車外の人とのコミュニケーションが必要な例として、横断歩道がある。例えば無人で走行する自動運転車両が横断歩道手前で停止をした場合を考える。このとき歩行者から見ると、中に運転者が存在していないため、自動運転車は本当に自分が横断歩道を渡るのを待機してくれるのかどうか不安になる可能性がある。

このように、自動運転自動車が何を考え、何をしようとしているのかを適切に車両内外の人への提示し、人間に対する安心感を与えるヒューマンマシンインターフェースも、実際の自動運転には重要な技術の1つであると考えられる。

3 自動運転自動車の公道走行実験

最後に、著者らの研究室が実施中の公道走行実証実験の概要について述べる。

著者らの研究室では、前章までに述べてきた技術や、自動運転に必要な地図生成技術を含め、様々な技術を約20年にわたって開発を続けてきた。この過程では、大学構内の駐車場や構内道路を用いた走行実験や、自動車学校のテストコースを活用した走行実験等を実施してきた。特に自動車学校のテストコース内には様々な交通環境が存在しているため、いわゆる交通ルールに相当するパンプランナの設計を行う際には大変重要な過程であった。そして現在では、これらの成果をもとに日本国内の様々な公道で走行実証実験を行っている。

Fig.8 Autonomous driving in Kanazawa city with heavy traffic.

公道走行実験を最初に実施した場所は石川県珠洲市である。石川県珠洲市は、著者らの大学がある石川県に存在する能登半島の先端に位置しており、人口が約1万5千人程度の自治体である。このうち65歳以上の高齢者の人口の割合が既に46%を超えており、高齢化、過疎化が深刻な課題となっている。このような背景から生じる交通に関する諸問題の解決を目的として、自動運転自動車の実証実験を2015年2月24日から開始している[5]。

実験開始当初は、珠洲市内の病院が存在する市街地や、山間部等を含む約6.6kmの特定のルートを走行しており、このルートの走行から生じる様々な問題について検討を行っていた。たとえば市街地であれば、信号機の有無や様々な交差点形状など、多種多様な交差点が存在している。また様々な車両、自転車、歩行者といった交通参加者の挙動など、テストコースでは得られない様々な状況が発生し、これらの環境で適切な状況判断を行うための認識手法の検討やセンサレイアウトの検討、パンプランナの設計等が重要なテーマとなっていた。また、山間部であればGPSや携帯の電波環境の悪い中での走行なども検討課題の一つであった。そして現在では、概ねこれらの問題が解決されつつあり、珠洲市内のほぼ全域となるトータル60kmの道で走行実験(2015年10月~)を行っている。

さらに現在では、例えばFig.8に示すように多数の車両が存在している街中での自動運転システムの動作検証を目的として著者らの大学が存在する金沢市内の街中での走行実験(2016年5月~)や、冬季における様々な天候下での走行実験を目的として北海道網走市での走行実験(2016年12月~)も行っている。

4 まとめ

本稿では、近年さまざまな場所で話題となっている自動運転システムに関する技術概要と、著者らの大学が国内の大学で初の試みとして実施中の一般道での公道走行実証実験の概要について述べた。

自動運転システムは近年のコンピュータ処理能力の向上、人工知能技術の進歩、高精度地図の活用などによって大幅に能力が向上しており、現在では市街地を含め様々な場所で柔軟に走行することが可能となってきた。一方、現状の自動運転システムではまださまざまな技術課題を抱えているのも確かである。

例えば、現在の自動運転システムでは様々なセンサを用い、それらのセンサ情報を融合して信頼性のある状況判断を行う場合がほとんどとなっている。これは、個々のセンサ情報のみでは必ずしも十分な能力を発揮できないので、それを補うために複数センサ情報が必須であるためである。しかし、本来真に信頼性のある自動運転を実現するためには、個々のセンサのみでも十分な能力を発揮している状態が必要であり、それらを組み合わせることにより信頼性のある状況判断を行うシステムを構築すべきであると考えられる。このため、個々のセンサのさらなる能力向上といった根本的な部分での能力改善も必要となる。

また、自動車が走行する環境は雨や雪などの様々な状況が存在している。現在の自動運転システムでは、概ね雨が降っていたとしても自動運転を継続することはもちろん可能ではあるが、大雨の場合や、雪が降っている場合では自動運転を継続することが難しい。このため、このような状況下でも適切に状況判断ができるシステム設計も必要となる。

さらには、技術的課題以外にも法律的な課題、社会受容性に関する課題、新しい保険制度の確立など多岐にわたる課題が存在しており、その社会導入には多くの検討が必要となる。一方、自動運転システムには交通事故の削減、移動の快適性、公共交通不足の解消など大きな期待が寄せられており、その社会導入が切望されている。このため、今後も自動運転システムの技術開発とともに様々な分野の専門家との連携を図りつつ、自動運転システムの社会導入を進める検討を積極的に進めることが重要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は総務省 戦略的情報通信研究開発推

進事業 (SCOPE) 地域 ICT 振興型研究開発「自動運転車の地域振興へ活用に向けた研究開発 (No.152305001)」, 文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究 (B)「市街地交差点における自然な走行を実現可能な完全自動運転システムの開発」等による成果を活用して行われた研究である。

参考文献

- [1] 津川定之, 自動運転システムの 60 年, 計測と制御, Vol.54, No.11, pp.789-802, 2015.
- [2] 青木啓二, 森田康裕, 自動運転・隊列走行システムの開発 (第 1 報), 自動車技術会学術講演会 講演予稿集, No.94-09, pp.1-4, 2009.
- [3] 水間毅, IMTS の安全性評価について, 電子情報通信学会技術研究報告, DC2003-89, pp.75-80, 2003.
- [4] 毛利宏, 白土良太, 古性裕之, 画像処理による車線追従制御の検討, 電子情報通信学会技術研究報告. Vol.101, No.285, pp.55-60, 2001.
- [5] 菅沼直樹, 林悠太郎, 永田大記, 高橋謙太, 高齢過疎地域における自動運転自動車の市街地公道実証実験概要, 自動車技術会学術講演会 講演予稿集, No.14-15S, pp.390-394, 2015.
- [6] 菅沼直樹, 米陀佳祐, 自動車の自動運転におけるデジタル地図の活用, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.10, pp.760-765, 2015.
- [7] 菅沼直樹, 米陀佳祐, 自動車の自動運転システムにおける交通環境認識, 自動車技術, Vol.71, No.2, pp.42-47, 2017.
- [8] 菅沼直樹, 米陀佳祐, 自動運転自動車のパスプランニング, 情報処理, Vol.57, No.5, pp.446-450, 2016.