

自動運転システムの展望

津川定之*

1950年代から始まる日欧米における研究開発の変遷を中心に、自動運転システムの機構、ニーズ、導入や法律・制度面の課題について述べる。2000年までの自動運転は主として乗用車を対象としていたが、最近は実用化を目指して省エネルギー化のためのトラックの自動隊列走行が主な対象となっている。自動運転のニーズは安全だけでなく、運転負荷低減、移動困難者の移動手段、利便性などにある。物流業者の反応などトラックの隊列走行導入の課題にも言及する。

Survey on Automated Driving Systems

Sadayuki TSUGAWA*

This paper presents a history of automated driving systems for automobiles starting in the 1950s as well as the mechanism, needs, and issues concerning their introduction and their legal and institutional aspects. While the automated driving systems before 2000 focused mainly on passenger cars, those since 2000 mainly cover automated truck platoons for energy savings, aiming to address the fear of future introduction. The objectives of automated driving are not only safety but also workload reduction, transportation means for the disabled and elderly, and convenience. The issues concerning introduction of an automated truck platoon, including the responses of freight operators are also described.

1. まえがき

自動車の自動運転システム^{1,2)}は、ヒューマンドライバーが運転するときに行う認知・判断・操作をすべて機械が行うシステムで、自動車交通へのオートメーションの導入であり、その目的は、事故と渋滞という自動車交通問題を解決し、自動車交通のパフォーマンスを向上させることにある。事故の防止に関しては、機械による認知・判断・操作によって、自動車交通事故の原因の90%以上を占めるヒューマンエラーを排除することができ、自動車交通の安全

に大きく寄与することが可能となる。

渋滞の解消に関しては、自動運転時の精密なラテラル制御(ハンドル制御)によって車両は狭いレーンを走行することが可能となり、これは道路の車線数の増加を意味する。また精密なロンジチュージナル制御(車速制御、車間距離制御)によって小さな車間距離での走行が可能となり、これはレーン当たりの交通量の増加を意味する。すなわち自動運転によって道路容量を増すことができ、渋滞発生を抑制することが可能となる。さらに小さな車間距離で車群を走行させると、特に高速走行時は空気抵抗を減らすことが可能となり、自動運転は省エネルギー化にも寄与する。

これらの精密な車両の制御はヒューマンドライバーには不可能なことである。さらに自動運転システ

*名城大学理工学部教授
Professor, Faculty of Science and Technology,
Meijo University
原稿受理 2012年10月22日

Table 1 路上の参照線と車載センサーの組み合わせ

路上の参照線	車載センサー	偏差検出特性
誘導（インダクティブ）ケーブル（A）	誘導コイル（P）	車両直下の偏差
磁気マーカー（A）	磁気センサー（P）	車両直下の偏差
レーンマーカー（P）	マシンビジョン（P）	車両前方（プレビュー）
レーダー・反射性テープ（P）	レーダー（A）	車両前方（プレビュー）
ガードレール（P）	超音波センサー（A）	車両側方
なし（車載の地図）	GPS受信機（P）、デッドレコニング（P）	車両絶対位置

注）（A）は信号を発信している能動デバイス、（P）は信号を発信していない受動デバイスを示す。

ムやその要素技術に基づく運転支援システムは、運転時の負荷を低減することにもなる。

鉄道や航空、船舶の分野ではすでにオートメーションが導入され、そのパフォーマンス向上に大きく寄与しており、自動車交通へのオートメーションの導入も必然であると筆者は考えている。この論説では、自動運転の機構に続いて、1950年代からの自動車の自動運転システムを紹介し、最後に自動車の自動運転システムの実用化に当たっての課題について考える。

2. 自動運転システムの機構

自動運転車両が障害物を回避しながら設定されたコースに沿って走行する機能を持つためには、フィードバック制御系を構成する必要がある。車両の制御は、ラテラル制御とロンジチュージナル制御からなるが、前者は車両の横方向の制御で、ハンドルの操作に対応し、後者は車両の縦方向、すなわち車速や車間距離の制御で、アクセル、ブレーキの操作に対応する。車両が設定されたコースに沿って走行するためにはコースの検出機能とラテラル制御機能が必要であり、安全な速度または車間距離で走行するためには、先行車が存在する場合には先行車までの車間距離の検出機能とロンジチュージナル制御機能が必要である。さらに障害物を回避するためには障害物検出機能と、ラテラル制御とロンジチュージナル

Table 2 自動運転システムの分類

分類項目	キーワード
車種	乗用車、路線バス、トラック、特殊車（除雪車、工事車両など）
動力源	内燃機関、電気モーター
走行場所	高速道路、市街路、過疎地、専用道
走行形態	単独（free agent）、隊列（platoon）
設備	自律型、路車協調型、車車協調型
障害物の管理	ドライバー、道路管理者
ドライバー・乗客の存在	ドライバーが必要な場合、ドライバーが不要な場合
ドライバーの種類	職業ドライバー、一般ドライバー

ル制御の両方の機能が必要である。

Table 1は、現在までにラテラル制御で使用されてきた路上の参照線と参照線検出のための車載センサーの組み合わせを示す。路上の参照線のうち、誘導ケーブルや磁気マーカーなど、本来路上には存在せず、自動運転のために設置されたデバイスを用いるシステムを路車協調型または

単に協調型、通常は路上に存在するもの、または車載のデバイスだけによるシステムを自律型と呼んでいる。

先行車が存在する場合のロンジチュージナル制御では、車間距離の測定に、レーダー、レーザーレーダー、レーザーキャナーなどが用いられている。先行車の加速度など、後続車のセンサーでは測定できない、または測定誤差が大きい場合には、車車間通信を用いて対象車両から直接にデータを受信することが行われる。小さな車間距離で隊列を形成して走行する場合（プラトーン）や、近傍の車両間で通信を行って走行する場合を車車協調型と呼んでいる。

Table 2は自動運転システムをいくつかのキーワードで分類したものである。この中のいくつかの項目について説明を述べよう。

2-1 動力源

自動運転車両の動力源が自動運転機能に関係するのは、まず、自動運転のためのアクチュエーターである。電気自動車では、自動運転のためのコントローラとモーターの相性が良いために、内燃機関の車両よりもアクチュエーターの構成を簡単化することができる。さらに、車輪内にモーターを内蔵するホイールインモーター車両では、左右の車輪速度を変化させることで、ロンジチュージナル制御だけでなくラテラル制御が可能で、例えば通常の自動車では不可能なその場での方向変換までが可能となる。

次に電気自動車の充電方法がラテラル制御に関係する場合がある。電気自動車が、路面からの非接触充電機能（Road-Powered Electric Vehicle：RPEV）を持つとき、路面下の装置をラテラル制御の参照線として利用することができる。

2-2 走行場所

自動運転の最初期の導入場所は、専用道以外では高速道路であろう。高速道路は道路構造が整えられており、障害物の管理が容易で、歩行者や自転車が存在しないため、自動運転には最適な環境である。

一方、市街路は、障害物が多く走路環境が複雑で、自動運転車両を走行させるためには、高度な障害物検出・回避機能が要求され、容易ではない。

山間僻地の過疎地では、高齢者が多く、その移動手段として自動運転車両は有力な手段である。歩行者や自転車もほとんど存在せず、低速小型の自動運転車両を運用するのに適している。

2-3 障害物の管理

障害物検出は、予期できない対象を検出しなければならぬため、ラテラル制御やロンジチュージナル制御に比べて困難である。そのためか過去の自動運転車両には障害物検出機能を持たないものが多かった。しかし、後述するDARPAのUrban Challengeでは、障害物検出機能が要求されたため、レーダー、マシンビジョン、視角360度のレーザースキャナーなどを備えた自律型自動運転車両が開発されている。また近年では運転支援システムとして、レーダーやマシンビジョンを用いて先行車や歩行者を検出するシステム³⁾が商品化されている。

2-4 ドライバー・乗客の存在

自動運転車両は、ドライバーが必要な車両とドライバーが不要な無人車両に大別される。ドライバーが必要な車両では、ドライバーが走行場所に依じて手動運転と自動運転を切り替える必要がある。手動から自動への遷移は、ドライバーが覚醒状態にあるため、問題はないが、自動から手動への遷移は、ドライバーを覚醒状態にすることが必要となる。無人車両では利用者は常に乗客として自動運転車両に乗ることになる。無人の自動運転車両は、盲人などの身体障害者や高齢者のモビリティの確保に有効である。

3. 自動運転システムの発展

世界で最初の自動車の自動運転の提案は、おそらく1939年に米国ニューヨークで開催された世界博にGMが出席したFuturamaであろう。しかし自動車の自動運転の研究が自動車交通問題を解決することを目的として最初に開始されたのは50年代の米国である。その発端は、吹雪のフリーウェイで発生した悲惨な交通事故を知った、当時のRCAの副社長ツボルキンの提案とされている。

筆者は、50年代後半から始まる自動運転システムに関する研究の歴史を、用いられた技術と時代背景によって、50年代から60年代にかけての第1期、70年代から80年代にかけての第2期、80年代後半から



Fig. 1 1960年代の自動操縦車：路車協調型

90年代後半までの第3期、21世紀に入ってからの第4期に分けている^{1,2)}。第1期の特徴は路車協調型、第2期の特徴は自律型、第3期の特徴はITSプロジェクトにおける各種方式の使用、第4期の特徴は実用化を目指した両方式の使い分けということが出来る。

3-1 第1期の自動運転システム

第1期の自動運転システムでは、道路に誘導ケーブルを敷設してラテラル制御を行う協調システムである。50年代末から60年代にかけて米国のRCA⁴⁾、ゼネラルモーターズ⁵⁾、オハイオ州立大学⁶⁾、英国の道路交通研究所、ドイツのジーメンス⁷⁾などで研究が行われた。わが国では60年代前半に機械技術研究所(現産業技術総合研究所)⁸⁾で研究が行われ、その自動操縦車(Fig.1)は1967年にはテストコース上で100km/hで走行した。

誘導ケーブルを用いたシステムは、能動的に走行コースを示すという利点を持つが、走路への誘導ケーブルの埋設と交流電流の供給という欠点のために、限定された場所、例えばテストコースにおける自動車の各種試験^{9,10)}などでの実用にとどまっている。

誘導ケーブルが公道で用いられた数少ない例として80年代のハルムスタード(スウェーデン)¹¹⁾やフュルト(ドイツ)の路線バスのプレジジョンドッキングがある。プレジジョンドッキングとは、バスを停留所に正確に停車させて車椅子や乳母車での乗降を容易にするシステムで、近年では路線バスの自動運転システムの一環として研究が行われている。

3-2 第2期の自動運転システム

70年代から80年代にかけてのマシンビジョンを用いた自動運転システムの研究を第2期とする。マシンビジョンを用いると、特殊なインフラストラクチャーが不要の自律型の自動運転システムを構成することができる。世界で初めてのマシンビジョンを利用した自動運転システムは、1977年にわが国の機械技術研究所が開発した知能自動車(Fig.2)で、知能自動車は速度30km/hでテストコースを走行することが



Fig. 2 1970年代の知能自動車：自律型

できた¹²⁾。80年代にはこの知能自動車に差動オドメータに基づくデッドレコニング機能（自車の位置と方位を車上の装置だけで測定する機能）を持たせ、自律ナビゲーションの実験を行った¹³⁾。この自律ナビゲーションの実験では、マシンビジョンによって障害物を検出しつつ、デッドレコニング機能と経路地図に基づいて、200m~300mの距離を速度10km/h程度ではあったが、出発地から目的地まで車載センサーだけによって知能自動車を自律走行させた。

80年代に入ると、アメリカで軍用車両のALV(Autonomous Land Vehicle)¹⁴⁾がメリーランド大学やマーチンリエッタ社によって開発されたが、オフロード走行を指向したものであった。この研究はカーネギーメロン大学のNavLab(Navigation Laboratory)¹⁵⁾や国立標準技術研究所のHMMWV(High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle)¹⁶⁾に引き継がれた。

ドイツでは80年代半ばからミュンヘン連邦国防大学で自律走行車VaMoRs(Versuchsfahrzeug fuer autonome Mobilitaet und Rechnersehen)¹⁷⁾の研究が行われている。マイクロバスをベースとしたVaMoRsは、80年代の終わりに約90km/hで自動走行している。

3-3 第3期の自動運転システム

80年代後半からの各国のITSプロジェクトにおいて自動運転システムは大きく取り上げられ、単独車両の自動運転だけでなく、複数台の自動運転車両による、小さな車間距離を保ったプラトーン走行が新たに出現した。

1) ヨーロッパの自動運転システム

PROMETHEUS(Programme for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety)は、ヨーロッパの自動車会社を中心として1986年から8年間行われた車両指向のITSプロジェクトである。このプロジェクトで開発されたタイムラベンツのVITAII(Vision Technology Application)¹⁸⁾

は、衝突回避を目的とするビジョンに基づく自動運転システムで、TVカメラ計18台と、総計850MFL OPSの演算能力を持つ60台のマイクロプロセッサからなるマシンビジョンを持ち、100km/h以上でのレーン追従、車線変更を行うことができた。このマシンビジョンにはミュンヘン連邦国防大学が開発したVaMP(Versuchsfahrzeug fuer autonome Mobilitaet Pkw)のマシンビジョンが用いられている。

このVaMPは、VaMoRsを乗用車に発展させた自動運転車両で、マシンビジョンでレーンマーカーだけでなく先行車を検出することができる。このマシンビジョンの特徴は、長短二種類の焦点距離を持つカメラ（直接に距離の測定が可能なステレオビジョンを構成しているわけではない）を用い、撮像した道路シーンに対してカルマンフィルターを適用している点にある¹⁹⁾。撮像した連続道路シーンにカルマンフィルターを適用することによってレーンや先行車両を高精度で検出することが可能になる。VaMPは、1995年にミュンヘンからオーデンセ（デンマーク）までの1,700kmのうち1,600km以上を400回以上の車線変更を行いつつ平均速度120km/hで自動運転で走行した²⁰⁾。

2) 米国の自動運転システム

米国では1991年に制定されたISTEA(総合陸上交通効率化法: Intermodal Surface Transportation Efficiency Act)に基づいてAHS(Automated Highway Systems)計画が開始され、1997年に大規模な自動運転のデモがカリフォルニア州サンディエゴで行われた。このAHS計画に際してコンソーシアムが結成され、そのコアメンバーは、Bechtel、カリフォルニア運輸省、カーネギーメロン大学、Delco Electronics、GM、Hughes Aircraft、Lockheed Martin、Parsons-Brinckerhoff、カリフォルニア大学/PATHであった。このコアメンバーに軍需産業が参加しているのは冷戦の終了という時代背景がある。

カリフォルニアPATH(Partners for Advanced Transit and Highways)は、1986年に発足した米国カリフォルニア州のITSプロジェクトで、カリフォルニア大学バークレー校を中心に当初から道路容量の増加とそれによる渋滞の解消を目的として自動運転システムの研究開発を行っている。その自動運転システムは路車協調型で、走行コースに沿って埋設した永久磁石列(磁気マーカー列)を用いたラテラル制御と、小さな車間距離を保ってプラトーン走行させるためのロンジチュージナル制御に特徴があ

る²¹⁾。

カーネギーメロン大学は、1995年にはミニバンをベースとしたNavLabVでピッツバーグ（カーネギーメロン大学がある町）からサンディエゴまでの4,800kmの98%以上の行程をマシンビジョンによる自動運転で走破した。ただし、自動化されていたのは操舵だけでブレーキとアクセルはドライバーが操作した。

AHSの大規模なデモは1997年夏にサンディエゴ近郊のI-15にあるHOV（High Occupancy Vehicle）レーン内の約12kmのコースで行われ、以下の7チームが協調型または自律型の自動運転車両を走行させた。車両に関しては、ほとんどのチームが乗用車を用いたが、一部のチームは、路線バスや大型トラックを用いた。

〔カリフォルニアPATH〕 8台の乗用車が、車間距離6.3m、速度96km/hでプラトゥーン走行を行った（Fig.3）。ラテラル制御は路面に1.2m間隔で埋設した磁気マーカー列による。

〔カーネギーメロン大学〕 乗用車2台、ミニバン1台、路線バス2台がマシンビジョンによる自動運転で走行した。混合交通下での自動運転システムを目指した。

〔オハイオ州立大学〕 2台の乗用車が追い越しを含むシナリオで自動運転を行った。ラテラル制御には、マシンビジョンに加えて路面に貼付したレーダー反射テープを使用した。このテープは車両からのレーダー波を反射したとき横偏差を検出することができるので、衝突防止レーダーを自動運転用センサーとしても利用可能な点が特徴である。

〔トヨタ〕 ACC（Adaptive Cruise Control）からの自動運転の発展シナリオ。ACCによる車間・速度の制御による運転支援システムからラテラル制御の自動化までの自動運転の発展シナリオを示した。

〔ホンダ〕 マシンビジョンを用いた自動運転とPATHの磁気マーカー列を用いた自動運転の併用。前者は道路側設備が貧弱な僻地に対応し、後者は道路側設備が充実した都市部に対応している。

〔イトン・ボラド社〕 大型トラック用ACC。トラックの先行車にはレーダー波の反射が少ないFRP製のボディータを持つスポーツカーを使用した。

〔カリフォルニア運輸省〕 磁気マーカー列のメンテナンスを行う車両。マシンビジョンで走行した。

サンディエゴでのデモの後、1998年初頭に米国運輸省はAHSに関するプロジェクトを中止した。その

理由は、自動運転システムは近い将来導入される可能性がなく、産業への寄与が期待できないというものであった。

3) わが国の自動運転システム

建設省は、1995年秋にテストコースで²²⁾、それを踏まえて翌1996年秋には未供用の上信越高速道路の小諸付近で、磁気マーカー列を用いた路車協調型の自動運転道路システムのデモを行った。しかし、建設省も米国同様、1997年頃、自動運転道路システム（AHS: Automated Highway Systems）のプロジェクトから走行支援道路システム（AHS: Advanced Cruise-Assist Highway Systems）のプロジェクトに方向を変えた。

通商産業省機械技術研究所と自動車走行電子技術協会（現日本自動車研究所）は、2000年11月に5台の自動運転車両を車車間通信でリンクし、柔軟な隊列走行を行う協調走行システムの実験を行った²³⁾。各車両の自動運転は、RTK-GPSによる自車位置計測結果と地図データベースで行い、リアルタイムで各車両の位置と速度の情報を全車両間で送受することによって二つの隊列の合流、車線変更などを実現した（Fig.4）。

3-4 第4期の自動運転システム

今世紀になって、第3期までとは異なって、乗用車ではなく、トラックや路線バス、小型低速の車両を対象として近い将来の実用化を目指した研究開発が進んでいる²⁴⁾。

1) 路線バスの自動運転

カリフォルニアPATHでは、サンディエゴのデモの後、路線バスの自動運転の研究を行っており、2003年夏には、1997年のデモを行ったサンディエゴのHOVレーンで路線バスの自動運転のデモを行った。



出典) カリフォルニアPATH広報資料より。

Fig. 3 カリフォルニアPATHの8台の乗用車によるプラトゥーン

路線バスの自動運転の目的は、プレジジョンドッキングに加えて、定時性を確保するためにヒューマンドライバーでは運転が困難な、例えば路側帯を転用した狭い専用レーンを走行することにある。このプレジジョンドッキングはカリフォルニア州やオレゴン州の公道で既に試用されている。路線バスは定められたルートで走行するため、乗用車やトラックとは異なってルートが限定されており、路車協調型の自動運転でも道路側設備が膨大になることはなく、合理的である。

トヨタ自動車が90年代後半に開発したIMTS(Intelligent Multimode Transit System) と呼ばれるシステムは、一般道では手動運転を行い、専用道ではラテラル制御に路面に埋設した磁気マーカー列を用いて自動運転を行うデュアルモードバスである。このシステムの目的は中量輸送システムにあり、淡路島のテーマパークや2005年の『愛・地球博』で運用された。

2) 大型トラックのプラトーン走行

ドイツのアーヘン工科大学を中心としたチームは、トラックの輸送量増強を目的として4台のトラックからなる自動プラトーン走行システムのプロジェクトKONVOIを2005年から2009年まで実施し、公道で車間距離10m、速度80km/hのデモを行った²⁵⁾。先頭トラックはヒューマンドライバーが運転するが、後続トラックはマシビジョンで検出したレーンマーカーに沿って自動運転を行う。車間距離はレーダーやレーザーレーダーで測定し、無線LANによる車車間通信機能を備えている。

カリフォルニアPATHでは大型トラックの自動隊列走行の研究を2000年代初頭から行っている。この目的は高速走行時に空気抵抗を減らすことによる省エネルギー化にある。2011年にはネヴァダ州の公道(高度1,800m)を閉鎖して3台のトラックを速度約90 km/h、車間距離6mで走行させ、燃費改善率が、先頭車4.3%、中間車10%、後尾車13~14.5%という結



Fig. 4 5台の乗用車による協調走行

果を得ている。ロンジチュージナル制御はレーザーレーダー、ミリ波レーダー、車車間通信を用いて自動化したが、操舵はヒューマンドライバーが行った。

わが国の経済産業省は2008年から開始したエネルギーITSプロジェクトでトラックの自動隊列走行システム(Fig.5)を取り上げている²⁶⁾。その目的は、カリフォルニアPATHと同様、空気抵抗の減少による省エネルギー化とCO₂排出削減による地球温暖化防止にある。自動運転の方式はマシビジョンを用いた自律型で、システムの信頼性を向上させるために多種のセンサーが用いられ、プラトーン内では車車間通信を行い、制御装置には高信頼性設計が施されている。2011年には3台の25トントラックによる速度80km/h、車間距離10mでのプラトーン走行を行った。このときの燃費改善率は、先頭車10.0%、中間車17.5%、後尾車14%である。

3) 新しいコンセプトの自動運転

最近ヨーロッパで行われた二つのプロジェクト、HAVEit (Highly Automated Vehicle for Intelligent Transport) とSARTRE (Safe Road Trains for the Environment) は、従来にない新しいコンセプトに基づく運転支援、自動運転システムである。

2008年から2011年まで行われたHAVEitは、自動運転に極めて近い運転支援を目指したプロジェクトである。運転支援のコンセプトは、作業者の作業パフォーマンスは、負荷が大きくなるにつれて増加するが、最適なレベルを超えると減少するというヤーキーズ・ドットソンの法則²⁷⁾に基づいて、ドライバーの負荷が非常に大きいときだけでなく、渋滞時のノロノロ運転時など負荷が非常に少ないときも運転支援を行うものである²⁸⁾。対象とした車種は乗用車と大型トラックで、乗用車では、高速道路での自動運転、衝突回避エマージェンシーブレーキ、道路工事中の狭い軌道での自動操舵、運転支援から自動運転までの制御、ACCおよび白線追従の自動操舵制御な



Fig. 5 エネルギーITSの3台のトラックによるプラトーン

どの機能を持つ車両が開発され、トラックでは、渋滞時などの0~30km/hでの先行車自動追従、白線追従の自動操舵制御など機能を持つ車両が開発され、2011年6月にスウェーデンでデモが行われた。

環境を目的として2009年に開始されたSARTREでは、先頭車をトラック、後続車群を自動運転の乗用車群とするプラトーンが開発されており、これをAutonomous Road Trainsと呼んでいる。先頭車となるトラックにはHAVEitで開発したヒューマンドライバーが運転するトラックを使用し、後続の乗用車にはすでに商品化されている衝突防止システム³⁾や車線維持支援を装備する。2012年9月にスウェーデンでデモを行ってプロジェクトは終了する。

4) DARPAのUrban Challenge

米国国防総省のDARPA(国防高等研究計画局)は、軍用車両の無人化の研究開発の一環として、砂漠のオフロードを無人車両で走破するコンペティションGrand Challengeを2004年と2005年に、模擬市街路を無人車両で走破するコンペティションUrban Challengeを2007年に開催した。これらのコンペティションでの無人車両は、自律型で、自動車交通における自動運転システムとは全く異なった目的、背景を持つ。Urban Challengeでは、指令に沿って経路計画を行う、カリフォルニア州の交通規則に従う、制限速度を守る、交通標識に従う、無信号交差点では優先順を遵守する、駐車場では固定障害物と移動障害物を回避して駐車する、など実際の交通に即した制約が課せられた。

両Challengeの優勝車をベースにGoogleが乗用車をベースとした自動運転車両を試作した。この車両は、センサーとして視角360度のレーザースキャナー、マシビジョン、レーダーを持つ自律型の自動運転システムである。Googleの自動運転車両は、カリフォルニア州の公道で走行実績を積み、現在ではネヴァダ州とフロリダ州で合法化されている。Googleは自動運転の目的を安全としている。

4. 自動運転システムのニーズと課題

現在までに専用道で自動車の自動運転システムが運用されたことや実験車両が公道を走行したことはあるが、Googleの車両を除いては公道上での運用はまだ行われていない。自動運転システムの実用化にむけてそのニーズと課題について考える。

4-1 自動運転システムのニーズ

1) 安全の確保

この論説の冒頭に自動運転システムの目的は安全であり、事故の原因の90%以上を占めるヒューマンエラーを排除することができるかと述べたが、実はこれには注釈が必要である。平成24年版交通安全白書²⁹⁾によれば、わが国の交通事故死者数は、近年、1億走行台キロ当たり約0.7人、交通事故死傷者数は1億走行台キロ当たり約100人である。これを30km/hで走行する1台の車両で考えると、死亡事故についてのMTBF(1名の死亡事故の発生間隔)は、約 4.7×10^6 時間(約535年)、死傷事故についてのMTBF(1名の死傷事故の発生間隔)は、約 4.2×10^4 時間(約5年)となる³⁰⁾。これはヒューマンドライバーが極めて優秀であることを示している。しかしながら、居眠り運転時や脇見運転時にはこのMTBFは年のオーダーから秒や分のオーダーに極端に小さくなり、これが運転支援システムや自動運転システムが必要な所以である。

事故の重大さや道路の閉鎖など、事故の影響の甚大さを考えると、自動運転の導入は、高速道路を長距離走行するトラックから始めるのが妥当と筆者は考えている。トラックは、職業ドライバーが運転する、保守が十分に行われる、乗用車に比べて稼働率が高い、車両単価が高価である、といったこともトラックへの導入を容易にする。

2) 人間にとって困難な作業の自動化

オートメーションによって人間には困難な、または不可能な作業を機械に行わせることができる。路線バスのプレジジョンドッキング、小さな車間距離での隊列走行、駐車などは、自動化する意義が十分にある。このような自動化によって省エネルギー化や利便性、快適性の向上を図ることが可能になる。小さな車間距離での隊列走行では、後続車からは先行車の陰になって路面が見えないために自動運転を行わざるを得ない。また自動駐車システムは、フィードバック制御ではないが、すでに商品化されている。

3) 運転負荷の低減

自動運転によって長距離を走行するトラックドライバーの運転負荷の低減を図ることができるだけでなく、現在すでに乗用車やトラックに商品化されているACCや近い将来導入が考えられているCACC(cooperative ACC)によってもドライバーの運転負荷を減らすことができる。ACCやCACCは、ドライバーの負荷を減らすだけでなく、交通流を円滑化し、特にCACCは道路容量を増すことができ、渋滞



Fig. 6 フランスの研究所INRIAで開発中のCyber Car

発生を抑制する効果がある。

4) ドライバーの急病・急死時の二次事故回避

わが国においてドライバーが急病・急死したために発生する事故は、死亡事故の1%程度を占めているとされている。このようなときに短時間、短距離の自動運転を行って車両を路側などに安全に停止させれば、二次事故の発生を防ぐことが可能となる。

5) 移動困難者の移動手段

自動運転は、身体障害者や高齢者の移動手段となり得る。この場合、通常は短距離の移動が主体であるから、車両は1人または2人乗りの小型低速車両で十分である。このような自動運転システムはヨーロッパのプロジェクトではCyber Carと呼ばれている(Fig.6)。

4-2 自動運転システム導入の課題

自動運転システムは、少なくともわが国では公道を走行することが認められていないために、導入について十分な検討が行われていない。ここでは経済産業省のプロジェクトであるエネルギー ITSで検討した結果を紹介しよう。

1) 法律、制度上の課題

エネルギー ITSで開発したトラックの隊列走行システムは最初期は運転支援システムとして導入することになるが、その場合以下のような課題がある。
・各トラックにドライバーが乗車して車間距離10mで走行するとき、隊列の長さが50m以上となり、ランプでの出入時など、他の交通の障害になる。

・さらに車間距離4mで走行すると、後続車のドライバーは路面が見えないために運転ができない。

一方、先頭トラックはドライバーが運転し、2台の後続トラックは自動で先行車に追従する場合は、この隊列を1台の車両とみなせないかという考え方もある。この場合に限らず、自動運転を行う場合、要求される機器の信頼性を定量的に定める必要があり、これは大きな課題である。

2) トラックの隊列走行の市場

トラックの隊列走行に試乗後、物流業者に行ったアンケートでは、省エネルギーに効果がある(是91%)、渋滞解消に効果がある(是79%)という肯定的な面と、安全に効果がある(是39%、不明39%、否21%)、運転負荷低減に効果がある(否67%)という否定的な面とがあった。受容性の向上や市場の開拓には、自動運転や隊列走行について物流業者、トラックドライバーの理解を得る必要がある。

3) 運用上の課題

トラックヤードで隊列を形成するには広いスペースが必要なため、エネルギー ITSでは現在は走行中に隊列を形成することを考えている。ドイツのKONVOIでも走行中の隊列形成を考えていた。また、異なった業者が一つの隊列を組んだとき、便益の配分や事故時の責任の所在が課題となる。

5. あとがき

自動車の自動運転システムの機構、研究開発の変遷と現状を紹介し、そのニーズと課題について考えた。自動運転によって、安全が確保され、狭いレーンでの走行や小さな車間距離での走行が可能になり、長時間長距離走行時の運転負荷が低減され、移動困難者に移動手段を提供することが可能となる。新しい技術の出現に呼応して法律や制度が見直されることを期待したい。

参考文献

- 1) 津川定之「自動車の自動運転技術の変遷」『自動車技術』Vol.60, No.10, pp.4-9、2006年
- 2) 津川定之「自動車の自動運転システム-自動車とロボットの接点-」『自動車技術』Vol.64, No.5, pp.25-30、2010年
- 3) E.Coelingh et al.: Collision Warning with Full Auto Brake and Pedestrian Detection - a practical example of Automatic Emergency Braking, Proc.IEEE ITSC 2010, pp.155-160, 2010
- 4) L.E.Flory et al.: Electric Techniques in a System of Highway Vehicle Control, RCA Review, Vol.23, No.3, pp.293-310, 1962
- 5) H.M.Morrison, et al.: Highway and Driver Aid Developments, SAE Trans. Vol.69, pp.31-53, 1961
- 6) R.E.Fenton et al.: One Approach to Highway Automation, Proc.IEEE, Vol.56, No.4, pp.556-566,

- 1968
- 7) P.Drebinger et al. : Europas Erster Fahrerloser Pkw, Siemens-Zeitschrift, Vol.43, No.3, pp.194-198, 1969
 - 8) Y.Ohshima et al. : Control System for Automatic Automobile Driving, Proc.IFAC Tokyo Symposium on Systems Engineering for Control System Design, pp.347-357, 1965
 - 9) 堺ほか「自動車無人走行実験システム」『日産技報』第22号、pp.38-47、1989年
 - 10) 大西ほか「悪路走行の高信頼自動操縦システム開発」『自動車技術会学術講演会前刷集』921、Vol.3、pp.21-24、1992年
 - 11) 岡『これからのクルマと都市の関係』ダイヤモンド社、pp.212-213、1985年
 - 12) 谷田部ほか「ビジョンシステムをもつ車両の自律走行制御」『計測と制御』総合論文、Vol.30、No.11、pp.1014-1028、1991年
 - 13) S.Tsugawa et al. : An Intelligent Vehicle with Obstacle Detection and Navigation Functions, Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.303-308, 1984
 - 14) R.Terry et al. : Obstacle Avoidance on Roadways using Range Data, SPIE Vol.727, Mobile Robots, 1986
 - 15) C.Thorpe et al. : Vision and Navigation The Carnegie Mellon Navlab, Kluwer Academic Publishers, 1990
 - 16) M.Juberts et al. : Vision-Based Vehicle Control for AVCS, Proc.IEEE Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp.195-200, 1993
 - 17) V.Graefe : Vision for Intelligent Road Vehicles, Proc.IEEE Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp.135-140, 1993
 - 18) B.Ulmer : VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic, Proc. the Intelligent Vehicles '94 Symposium, pp.1-6, 1994
 - 19) E.D.Dickmanns et al. : Recursive 3D Road and Relative Ego-State Recognition, IEEE Trans. PAMI, Vol.14, No.2, pp.199-213, 1992
 - 20) R.Behringer et al. : Results on Visual Road Recognition for Road Vehicle Guidance, Proc.IEEE Intelligent Vehicles '96 Symposium, pp.415-420, 1996
 - 21) K.S.Chang et al. : Automated Highway System Experiments in the PATH Program, IVHS Journal, Vol.1, No.1, pp.63-87, 1993
 - 22) 上田ほか「自動運転道路システムの開発」電気学会道路交通研究会論文番号RTA-96-13、1996年
 - 23) S.Kato et al. : Vehicle Control Algorithms for Cooperative Driving with Automated Vehicles and Inter-Vehicle Communications, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.3, No.3, pp.155-161, 2002
 - 24) R.Bishop : Intelligent Vehicle Technology and Trends, Boston & London, Artech House, 2005
 - 25) R.Kunze et al. : Organization and Operation of Electronically Coupled Truck Platoons on German Motorways, M.Xie et al. (Eds.) : ICIRA 2009, LNAI 5928, Springer, pp.135-146, 2009
 - 26) Sadayuki Tsugawa, Shin Kato, and Keiji Aoki : An Automated Truck Platoon for Energy Saving, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2011 (CD-ROM) , 2011
 - 27) R.M.Yerkes and J.D.Dodson : The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-formation, Journal of Comparative Neurology and Psychology, 18, pp.459-482, 1908
 - 28) HAVEit Final Report、2011年9月23日
 - 29) 『平成24年版交通安全白書』内閣府、p.7、2012年
 - 30) 津川定之「ITSの課題」『電子情報通信学会 Fundamentals Review』Vol.2、No.3、pp.59-65、2009年