

自動運転技術の発展

津川定之*

この論説では、欧米日における自動車の自動運転技術の発展を最初期の1950年代から現在まで述べる。20世紀の自動運転は安全を目的とし単独の乗用車を対象とした研究が多かったが、21世紀になって多くのプロジェクトが、省エネルギーを目的とした自動運転トラックの隊列走行、路線バスや小型低速車両の自動運転を扱った。さらにいくつかの自動車会社が近い将来の自動運転乗用車の導入を予告するに至っている。事故と渋滞という自動車交通問題の解決に自動運転の導入は必要であるが、技術、非技術の両面に依然として多くの課題が残されている。

A Technological History of Automated Driving of Automobiles

Sadayuki TSUGAWA*

This report describes the technological history of automated driving of automobiles in Europe, the United States, and Japan from the 1950s, the earliest period, to today. Much of the work on automated driving in the 20th century dealt with an automated passenger car aiming at safety, but that in the 21st century deals with automated truck platoons for energy saving, automated driving of transit buses and small, low-speed vehicles. Some auto makers will announce their introduction of automated passenger cars in the near future. Although it is necessary to introduce automated driving to provide solutions to the issues of accidents and congestion in road transportation systems, challenges in both technological and non-technological aspects still remain.

1. まえがき

自動車の自動運転^{1)~3)}は決して新しいテーマではない。最初の提案は、1939～40年に開催されたニューヨークの世界博覧会に米国の自動車会社ゼネラルモーターズ（GM）が20年後の生活を描いたジオラマのFuturama（FutureとPanoramaの合成語）に見ることができる。しかし、事故と渋滞という自動車交通問題を解決することを目的として自動運転の研究を最初に開始したのは1950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重大な交通事故を知った、当時のRCA副社長V. ツヴォル

キンの提案とされている。ゼネラルモーターズのエンジニアたちとテストコースに立つツヴォルキンの写真が遺されている。1960年代になるとヨーロッパやわが国でも自動運転の研究が開始された。しかしその後の進展は必ずしも順調ではなく、何回かの中止と再開が繰り返されている。21世紀になって、各国の自動運転システムに関するプロジェクトは、省エネルギーを目的とした自動運転トラックのプラトーン（隊列）走行など、実用化を目指したものとなり、加えて2013年頃から自動車メーカーや部品メーカーから乗用車の自動運転システムの販売が予告されるに至っている。

自動車の自動運転システムは、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る。その目的は、事故と渋滞という自動車交通問題の解決に加えて、ドライバー

* 国立研究開発法人産業技術総合研究所
知能システム研究部門客員研究員
Visiting Researcher, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology
原稿受付日 2015年6月1日
掲載決定日 2015年7月15日

や同乗者への快適性、利便性の提供にある。

この論説では、まず自動運転システムのメカニズムを説明し、その後1950年代からの自動運転システムとその技術の発展を詳述する。

2. 自動運転システムのメカニズム

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もつためには、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、ハンドルの制御であるラテラル制御（横方向制御）と、アクセル、ブレーキの制御、すなわち車速や車間距離の制御であるロンジチュージナル制御（縦方向制御）からなる。

ラテラル制御では、通常、車両が辿るべき軌道を示す路上の参照線を使用するが、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、本来は路上には存在しない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とよび、レーンマーカーなど通常は路上に存在するものを用いるシステム、またはGPSなど車載の装置だけによるシステムを自律型とよぶ。

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、ライダー（レーザーレーダー）、レーザース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よぶ。

単路を参照線に沿って、先行車が存在する場合は先行車に追従して、走行する場合は、上述したラテラル制御とロンジチュージナル制御を実時間で実行するだけで十分で、この層を物理層と呼ぶことがで

きる。しかし、交差点など他の車両や歩行者、信号機などが存在する複雑な交通環境では、人工知能的アプローチなどによって、周辺環境センシングに基づいて適切な軌道計画を事前に立てる必要がある。この上位層を論理層と呼ぶことができる。

3. 自動運転システムとその技術の発展

1950年代に始まる自動運転システムに関する研究の歴史は、用いられた技術と時代背景によって、1950年代から1960年代にかけての第1期、1970年代から1980年代にかけての第2期、1980年代後半から1990年代後半までの第3期、21世紀に入ってからの第4期に分けることができる。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さまざまな技術の開発と試用、第4期の特徴は実用化を目指した開発である。さらに2009年ごろからグーグル社による自動運転乗用車の実験が始まり、2013年ごろから自動車メーカーや部品会社から自動運転乗用車の販売が予告されるに至っている。これらの車両は、単路にそって走行するだけでなく市街路を対象とした自動運転が可能である。

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。1950年代末から60年代にかけて米国のRCA⁴⁾、GM⁵⁾、R. フェントン教授を中心とするオハイオ州立大学⁶⁾、英国の道路交通研究所（信号制御プログラムSCOOTを開発した研究所）、ドイツのジーマス社⁷⁾などで研究が行われた。わが国では1960年代前半に通商産業省機械技術研究所（現産業技術総合研究所）⁸⁾で研究が行われ、その自動操縦車は1967年にはテストコース上で100km/hで走行した。オハイオ州立大学はその後も精力的に研究を続けたが、1980年に米国政府からの資金が打ち切れ、研究を中断した。しかしオハイオ州立大学はU. オズグユナー教授に率いられて、後述するように、1990年代にはサンディエゴのデモに参加し、2000年代に

Table 1 道路上の参照線と対応する車載センサー（Aは自ら信号を出す能動的素子、Pは自らは信号を出さない受動的素子を示す）

	道路上の参照線	車載センサー	備考
路車協調型	誘導ケーブル (A)	ピックアップコイル (P)	設置・維持が高コスト
	永久磁石列 (A)	磁気センサー (P)	「安価なインフラストラクチャー」(カリフォルニアPATH)
	レーダー反射テープ (P)	レーダー (A)	
自律型	レーンマーカー (P)	カメラ (P)	もっとも一般的
	なし	GPSと地図	



Fig. 1 路面下に埋設された誘導ケーブルとバンパー両端近くに装着された一対のピックアップコイル

はGrand ChallengeとUrban Challengeに参加している。

誘導ケーブルを用いたラテラル制御は、1950年代に工場内無人搬送車の誘導方式に開発されたシステムに基づいている。路面下に埋設した誘導ケーブルに交流電流を流すと周囲に交流磁界が発生し、車両の前バンパー両端に装着した一対のピックアップコイル (Fig.1) がこの交流磁界内を移動する際に発生する電流からコースずれを検出することができる。

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もつが、走路への誘導ケーブルの埋設という工事上だけでなく、交流電流の供給という運用上の欠点のために、限定された場所、たとえばテストコースにおける自動車の各種試験⁹⁾、¹⁰⁾ やタイヤの耐久試験⁷⁾ 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1980年代のハルムスタード (スウェーデン)¹¹⁾ やフルト (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、これらのプレジジョンドッキングでは停留所近傍だけにケーブルを敷設するため、工事や運用が大きな負担にはならない。

3-2 第2期の自動運転システム

1970年代から1980年代にかけてのマシンビジョン (テレビカメラとコンピューターを組み合わせた人工の眼) 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年にわが国の通商産業省機械技術研究所が開発した知能

自動車で、知能自動車は速度30km/hで路側のガードレールを検出してテストコースを走行することができた¹²⁾。1980年代にはこの知能自動車に差動オドメーター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) をもたせ、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。

1980年代後半にはわが国の通商産業省の提案で自動運転車両PVS (Personal Vehicle System) が試作されている。マシンビジョンによってレーンマーカーを検出し、自動運転を行った。PVSには地図作成機能があり、走行したコースの地図を生成し、この地図を用いて次回の走行時には目的地までの最短経路で走行することができた。使用した車両は、コンピュータービジョンのための画像処理コンピューターが大きかったために、使用車両はマイクロバスであった。

1980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マ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1980年代半ばからE. ディックマンズ教授に率いられたミュンヘン連邦国防大学で自動運転車両VaMoRs (Versuchsfahrzeug fuer autonome Mobilitaet und Rechnersehen)¹⁷⁾ の研究が行われている。PVSと同じく、マイクロバスをベースとしたVaMoRsは、1980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

1980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隊列 (プラトーン) 走行が新たに出現した。また第2期までは自動運転の対象とされた車両は乗用車が中心であったが、第3期では乗用車に加えて路線バスや大型トラックも

対象となった。

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ダイムラーベンツの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850MFLOPSの演算能力をもつ60台のマイクロプロセッサからなるマシンビジョンをもち、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乗用車で、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もつカメラ（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訳ではない）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⁾。VaMPのマシンビジョンが検出した道路シーンをFig.2に示す。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1700kmのうち1600km以



Fig. 2 VaMPのマシンビジョンが検出した道路シーン（レーンマーカーと先行車を検出している）(Dickmanns教授提供のビデオから)

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、カリフォルニア州運輸省、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った。

カリフォルニアPATH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車群（プラトーン）を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⁾。磁気マーカーを用いると磁石のN極、S極を組み合わせることで前方の道路の曲率を表現することが可能となる。したがって車両直下のコースずれだけでなく車両前方の曲率まで考慮したラテラル制御が可能になり、円滑な走行を実現した。カリフォルニアPATHは、磁気マーカーを設置費も含めて1カ所につき5米ドル程度で、安価なインフラストラクチャーと評価している。いっぽう車載の磁気センサーにはフラックスゲート型センサーを用いており、このセンサーは高価である。Fig.3に2種の磁気マーカーと前バンパー下に装着された磁気センサーを示す。

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でワシントンDCからサンディエゴまでの4800km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ラテラル制御だけでブレーキとアクセルはドライバーが操作した。ラテラル制御アルゴリズムには、マシンビジョンで検出したレーンマーカーの位置に基づくニューラルネットが用いら

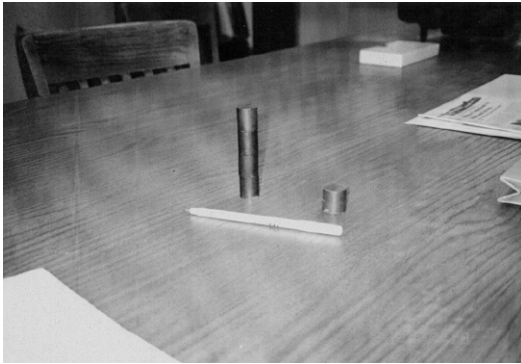


Fig. 3 2種の磁気マーカー(左は通常型、右は強力型)(左)と前バンパー下に装着された3個の磁気センサー(右)

れている。

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でプラトーン走行を行い、先頭から2台目の乗用車が車線変更したのち速度を減じ、最後尾車の後ろに合流すべく再び車線変更を行った。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

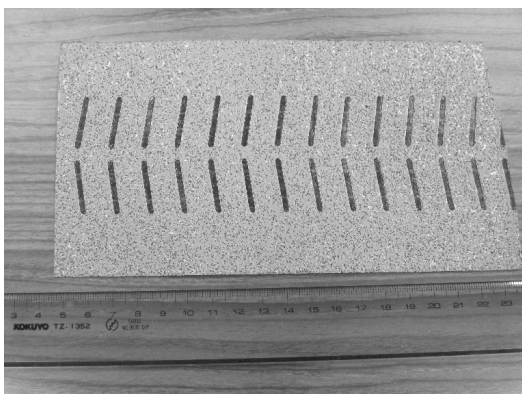


Fig. 4 レーダー波反射テープ

は、マシンビジョンに加えて路面に貼付したレーダー波反射テープ (Fig.4) 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コースずれを検出することができる。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であることから、自動運転の進化的導入のシナリオを描くことができるが、テープに設けられたスリット列にはほこりやゴミが入って性能が劣化することが欠点である。

- 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へき地に対応し、後者は道路側設備が充実した都市部に対応している。
- イートン・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製のボディーをも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作業用車両。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(現国土交通省)は、1995年秋にテストコースで²²⁾、それをふまえて翌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、建設省も米国同様に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台の自動運転乗用車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。

3-4 第4期の自動運転システム

21世紀になって、第3期までとは異なり、公的プロジェクトでは乗用車ではなく、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⁾。さらにグーグル社の自動運転車に触発されてか、2013年頃に自動車会社から自動運転車両の販売が予告されている。

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。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、たと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を走行するため、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1990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ル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ン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。車間距離はレーザ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年にはネバダ州の公道(高度1800m)を閉鎖して3台のトラックを速度約90km/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%、最後尾車13~14.5%という結果を得ている。ロンジチュージュ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ン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を用い、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。ラテラル制御用のマシンビジョンのカメラは、外部からの光に対するロバスト性を確保するために下向きに装着し、車両側方のレーンマーカーを検出した。2013年には3台の25トントラックによる速度80km/h、車間距離4.7m(トラック後部に長さ0.7mの衝突安全用バンパーを装着したため、バンパー間距離は4m)でのプラトーン走行を行った。エネルギーITSでの3台のトラックによるプラトーン走行時の燃費改善率は、車間距離4.7mのとき、先頭車で9%、中間車で22%、最後尾車で15%であった。

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、自動運転にきわ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、道路工事中の狭いレーンでの自動操舵、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どの機能をもつ車両が開発され、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の機能をもつ車両が開発された。

環境負荷低減を目的として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 (自律型道路列車) とよんでいる²⁹⁾。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³⁰⁾や車線維持支援を装備する。このシステムの特徴は、現存の機器をできるだけ利用し、新たに装備する機器の価格は2000ユーロ程度としている点にある。しかし、トラックの直後を走行する乗用車のラジエーターが巻き上がる土砂によって汚損するなどの難点がある。

4) DARPAのGrand Challengeと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には、カーネギーメロン大学、スタンフォード大学、マサチューセッツ工科大学、オハイオ州立大学など米国の大学だけでなく、ブラウンシュバイク工科大学やカールスルーエ工科大学などドイツの大学も参加している。

これらのコンペティションでの無人車両は、走行

環境から、自律型で、そのうえ、制御システムには物理層だけでなく論理層をもつ必要があった。Grand Challengeでは、オフロードを走行するためにGPSと地図の組み合わせでナビゲーションを行い、屋根に装着した複数台のレーザースキャナーで障害物を検出して自動運転を行った。優勝したのはスタンフォード大学の車両である。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、混合交通で他の車両が走行している、など実際の交通に即した制約が課せられ、また道路上のレーンマーカーは必ずしも描かれていないという条件もあった。優勝したのはカーネギーメロン大学の車両である。上位入賞の車両のほとんどは屋根の上に、ヴェロダイン社製の視角360度のレーザースキャナーを装着していた。このレーザースキャナーは、その後、多くの自動運転車両が使用することになった。

両Challengeの優勝車をベースに、S. トルン博士を中心とするグーグル社のチームが乗用車をベースとした自動運転乗用車を試作した。この車両は、センサーとして屋根の上に設置された視角360度のレーザースキャナー、マシビジョン、レーダーをもつ自律型の自動運転システムで、ラテラル制御、ロンジチュージナル制御とも自動化され、さらに信号交差点を含む市街路を自動運転で走行することができる。グーグルの自動運転乗用車は、2009年頃からカリフォルニア州の公道で走行実績を積み、2015年4月現在、自動運転による総走行距離は160万kmに達し、この間、グーグル社によれば、自動運転に起因する事故は発生していない。グーグル社は自動運転の目的を安全としている。

自動運転車両が公道を走行することに関しては、2015年までにネバダ、フロリダ、カリフォルニア、ミシガンなどの州で合法化されているが、オレゴン、アリゾナ、コロラド、テキサスなどの州では公道走行を認める法案が否決されている。合法化されている州でも、特別な訓練を受けたドライバーが運転席にいたことが義務づけられており、無人運転は認められていない。

2013年ころから自動車会社や自動車部品会社による自動運転乗用車の発表と公道走行が相次いで行われている。たとえば、ダイムラー社は、2013年8月

にマンハイムからプファルツハイムまでの市街路や田舎道を含む100km余の行程を自動運転で乗用車を走行させている^{31), 32)}。用いたセンサーはマシンビジョンとミリ波レーダーで、ゲートル車をはじめとして多くの自動運転車両が用いている視角360度のレーザーキャナーは用いていない。

4. あとがき

自動車の自動運転システムの発展を中心に紹介した。2013年にダイムラー社の乗用車は100km余を自動走行したが、その報告には「自動運転はヒューマンドライバーに比べてはるかに劣る」と書かれている³¹⁾。自動運転によって自動車交通問題が解決され、移動困難者に移動手段を提供することが可能となる。しかしながら、周辺環境のセンシング技術、制御システムのうち特に論理層の制御技術など技術面だけでなく、ソフトウェアや機器の信頼性、ヒューマンファクター上の課題、法律・制度上の課題、ドライバー受容性、社会受容性、アフォーダビリティなど、自動運転の実用化や導入には多くの解決すべき課題が依然として残っている。

参考文献

- 1) 津川定之「自動車の自動運転システムー自動車とロボットの接点ー」『自動車技術』Vol.64, No.5, pp.25-30, 2010年
- 2) 自動車の自動運転システム調査専門委員会編「自動車の自動運転システム」『電気学会技術報告』第1220号、2011年
- 3) 津川定之「自動運転システムの展望」『IATSS Review』Vol.37, No.3, pp.199-207, 2013年
- 4) Flory L. E., et al.: Electric Techniques in a System of Highway Vehicle Control, RCA Review, Vol.23, No.3, pp.293-310, 1962
- 5) Morrison H. M., et al.: Highway and Driver Aid Developments, SAE Trans. Vol.69, pp.31-53, 1961
- 6) Fenton R. E., et al.: One Approach to Highway Automation, Proc. IEEE, Vol.56, No.4, pp.556-566, 1968
- 7) Drebinger P., et al.: Europas Erster Fahrerloser Pkw, Siemens-Zeitschrift, Vol.43, No.3, pp.194-198, 1969
- 8) Ohshima Y., et al.: Control System for Automatic Automobile Driving, Proc. IFAC Tokyo Symposium on Systems Engineering for Control System Design, pp.347-357, 1965
- 9) 堺司、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) 大西謙一、ほか「悪路走行の高信頼自動操縦システム開発」『自動車技術学会学術講演会前刷集921』Vol.3, pp.21-24, 1992年
- 11) 岡並木『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) 谷田部照男、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』Vol.30, No.11, pp.1014-1028, 1991年
- 13) Tsugawa S., 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) Terry R., et al.: Obstacle Avoidance on Roadways using Range Data, SPIE, Vol.727, Mobile Robots, 1986
- 15) Thorpe C., et al.: Vision and Navigation The Carnegie Mellon Navlab, Kluwer Academic Publishers, 1990
- 16) Juberts M., et al.: Vision-Based Vehicle Control for AVCS, Proc. IEEE Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp.195-200, 1993
- 17) Graefe V.: Vision for Intelligent Road Vehicles, Proc. IEEE Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp.135-140, 1993
- 18) Ulmer B.: VITA II - Active Collision Avoidance in Real Traffic, Proc. the Intelligent Vehicles '94 Symposium, pp.1-6, 1994
- 19) Dickmanns E. D., et al.: Recursive 3D Road and Relative Ego-State Recognition, IEEE Trans. PAMI, Vol.14, No.2, pp.199-213, 1992
- 20) Behringer R., et al.: Results on Visual Road Recognition for Road Vehicle Guidance, Proc. IEEE Intelligent Vehicles '96 Symposium, pp.415-420, 1996
- 21) Chang K. S., et al.: Automated Highway System Experiments in the PATH Program, IVHS Journal, Vol.1, No.1, pp.63-87, 1993
- 22) 上田敏、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) Kato S., 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) Bishop R.: Intelligent Vehicle Technology and Trends, Boston & London, Artech House, 2005
- 25) Kunze R., et al.: Organization and Operation of Electronically Coupled Truck Platoons on German Motorways, Xie M. et al. (Eds.) : ICIRA 2009, LNAI 5928, Springer, pp.135-146, 2009
- 26) Tsugawa S.: Results and Issues of an Automated Truck Platoon within the Energy ITS Project, Proc. 25th IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.642-647, 2014
- 27) Yerkes R. M., Dodson J. D.: The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-formation, Journal of Comparative Neurology and Psychology, Vol.18, pp.459-482, 1908
- 28) HAVEit Final Report, 2011年9月23日
- 29) Project Final Report SARTRE, 2013年1月
- 30) Coelingh E., 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
- 31) Ziegler J., et al.: Making Bertha Drive – An Autonomous Journey on a Historic Route, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol.6, No.2, pp.8-20, 2014
- 32) Dickmann J., et al.: Making Bertha See, IEEE Spectrum, 08.14, pp.40-45, 2014