運転支援／自動走行におけるコネクティビティ

Rethinking about Connectivity for ADAS and AD

牧戸知史 Satoshi Makido†

Summary

自律系のセンサを主体に設計、運用されてきた運転支援／自動走行は一定のレベルに達しつつあり、高速道路などでの部分的な自動走行の実用化についてはカーメカ各社がしのぎを削っている。一方で、死角が多い交差点を含む一般道での自動運転や、空港、工場などの特定領域での自動運転については、自律系のセンサのみで効率的に走ることは難しいことが明らかになってきた。本解説論文では、通信を活用した自動走行を中心に、通信に必要とされる主に遅延などの要件について議論する。制御、認知・判断の視点で、幾つかのアプリケーションの研究事例を示しながら、アプリケーションと通信要件との関係について解説する。自動走行技術や遠隔運転、制御などのための通信技術は、これから市場に普及していく技術であるため、両者を統合して評価、議論した例は少ない。模擬環境等を活用することで、実証を行いながら必要とされる要求仕様等について議論している点がこの解説論文の特徴である。

Key Words

自動運転、運転タスク、通信要件、遅延

1 はじめに

カーボンニュートラルなどの言葉に代表されるような自動車の環境への配慮と並んで、運転支援や運転の自動化に関するニーズは非常に期待が高い。近年、高度運転支援システム（ADAS: Advanced Driving Assistant System）と自動運転（Automated Driving）の境界はますます曖昧になってきている。例えば、高速道路で同一車線を維持しながら走行する技術は、従来の運転支援システムである車間距離制御装置（ACC: Adaptive Cruise Control）と車線維持支援制御装置（LKAS: Lane Keeping Assistant System）の組合せと考えることもできるし、機能制限された自動運転とみなすこともできる。

また、近年では省人化の観点から AMR（Autonomous Mobile Robot）など、物流分野での自動走行の応用も期待が高まっている^{(1), (2)}。AMR はロボットの自律走行と自動車の自動走行との中間的なものとして位置付けられる。直観的には自律走行に用いる要素技術はロボット、自動車のいずれにおいても共通に利用できると考えられるが、実際には、自動車では運用する速度域が高いこと、人を運ぶことを前提としていることなど、設計指針が大きく異なり、技術的な差異も大きい。

本解説論文では、自動走行技術と通信技術との関

連について述べる。論文の構成は以下のとおりである。**2.**では自動運転のレベルと動向について述べる。**3.**は自動運転における通信指標について述べる。運転タスクのモデルについて説明し、それぞれのタスクに対する通信遅延の考え方について説明する。**4.**及び**5.**では、具体的な自動走行への通信活用として、制御系に通信を用いる場合、認知・判断に通信を用いる場合の考え方についてそれぞれ議論し、**6.**で今後の展望について述べまとめとする。

2 自動運転のレベルと動向

SAE（Society of Automotive Engineers）では自動走行における自動化の度合いを議論しており、J3016⁽³⁾の中で自動運転のレベルとして定義している。J3016では、表1に示すように、運転タスク（DDT: dynamic driving task）をドライバーが行うのかシステムが行うかという観点と、システムの運行設計領域（ODD: Operational Design Domain）の観点、システムが正常に動作しない、あるいは動作できない場合の責任をドライバー、システムのいずれが持つのかという観点から、自動化のレベルを手動運転のレベル0から完全自動運転のレベル5までの6段階でレベルを定義している。

レベル1、及びレベル2は基本的にはドライバーの監視下においてシステムによる自動走行がなされるため、これまでの運転支援装置の延長と考えることができる。

一方、レベル3以上ではシステムは、どのよう

† （株）豊田中央研究所，長久手市
Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute-shi,
480-1192 Japan

表 1 自動運転のレベルの定義

SAE レベル		運転タスク（DDT）		フォールバック	運行設計領域（ODD）
		アクセル、ブレーキ、ステア操作の主体	認知・判断と判断に基づく操作（OEDR）	システムによる自動走行が困難な場合の操作の主体	
ドライバが部分的あるいはすべての運転タスク（DDT）を実施					
0	自動化なし	ドライバ	ドライバ	ドライバ	n/a
1	運転支援	ドライバ システム	ドライバ	ドライバ	限定的
2	部分的運転自動化	システム	ドライバ	ドライバ	限定的
システムがすべての運転タスク（DDT）を実施					
3	条件付運転自動化	システム	システム	ドライバ	限定的
4	高度運転自動化	システム	システム	システム	限定的
5	完全運転自動化	システム	システム	システム	限定なし

な走行条件を想定して機能開発を行っていけばよいのが定義。特に、レベル3の自動運転については、システムによる自動運転の継続が困難な場合には、十分な余裕をもってシステムからドライバへ運転タスクを引き継がせることが必要とされる。自動運転中のスマートフォンの使用について道路交通法の改正により認められ、国内でもレベル3の自動運転が法的にも認められることとなったが、セカンダリータスクをどこまで許容するかについては、今後の技術開発の動向によって大きく変わっていくものと考えられる。

近年ではレベル3を超えて、レベル4やレベル5の自動運転を実現しようという動きが活発になってきている。MaaS (Mobility as a Service) 向け自動運転や、空港内や工場内の自動走行など特定領域の自動運転については社会的な要請もあり、様々な試みが行われている。

一方、国も官民 ITS 構想・ロードマップ 2020⁽⁴⁾で2030年の将来像を描き必要な技術や実用化が期待される時期について議論している。具体的には2020年には①高速道路での自動運転可能な自動車(レベル3)の市場化、②限定地域(過疎地域等)での無人自動運転移動サービスの提供を行うことを目指すとしており、ここ数年の間に、カーメーカ各社から自動化レベルの高い運転支援車*が市販され

ている。更に、2025年を目途にレベル4の自動運転システムの市場化、物流での自動運転システムの導入普及、限定地域での無人自動運転移動サービスの全国普及を目指すものとしている。

3 運転支援／自動走行と通信の評価指標

運転支援や自動走行に通信を用いる場合、その通信の評価指標はどのようなものが望ましいであろうか。従来の通信の評価指標では、通信速度や遅延、収容台数などが挙げられるのが一般的である。3GPPでは5Gの車向けサービスの要件を22.186⁽⁵⁾で議論し、アプリケーションごとに必要とされる通信距離や許容遅延、ペイロードなどを仕様化しているが、アプリケーション視点で十分な検討されていないわけではない。

安全運転支援については、我々の研究グループも位置情報が更新されるまでに車両が移動する距離(情報更新距離)の概念を提案したが⁽⁶⁾、定着した評価指標にはなっていない。また、近年でも長谷部ら⁽⁷⁾がT秒Rmという評価方法を提案しているが、アプリケーション依存の大きい評価方法となっており、安全運転支援や自動走行に共通した万能な評価指標がないのが現状である。

次章では運転タスクについて着目し、運転タスク

*2020年12月、自動運転車の機能をユーザが過信しないように、国土交通省が主導する「ASV推進計画」では自動運転車に関する呼称を以下のように策定した。レベル1、レベル2は運転支援車。レベル3は条件付自動運転(限定領域)。レベル4は自動運転車(限定領域)。レベル5は完全自動運転車。

と許容される遅延がどのような関係にあるかについて述べる。

4 運転タスクのモデルと通信遅延

図1はJ3016に示されている運転タスクを示したものである。自動運転の開始時に設定される走行開始地点、目的地などの経路計画に関連する機能をStrategic functions、障害物検知や道路線形の把握など、数秒から数十秒先までの走行計画に関わる機能をTactical functions、車両の機能として具備されている「走る」・「曲がる」・「止まる」に関わる機能のことをOperational functionsと呼んでいる。

図のDDTで示された部分が自動走行におけるシステムが自動で行う運転タスクである。

OEDR (Object and Event Detection and Response) は、走行に応じて時々刻々と変化する自車の周辺環境を認知し、車両を操作する部分に該当し、通常はドライバーが実行するタスクである。自動走行では、センサによる周辺環境の認識に相当する。

ここで、「認知」とはセンサ等を用いて、車両の位置、速度などの走行状態、車両周辺の障害物などを検知することを意味する。また、「判断」とは「認知」により得られた情報から、加減速をしたり、ステアを切ったりといった行動決定を行うプロセスのことを意味する。

OEDRのレスポンスの結果としての行動計画（プランニングと呼ぶ）が車両の制御系への入力となる。一般的に、自動車の走行速度はロボットに比べ高い。このため、自動車ではロボットに比べ広い範囲をセンシングする必要がある。一方で、その挙動は道路に沿って走行するため予測がしやすい。

プランニングから制御系へ渡される制御指令値は、障害物回避のためのローカルなウェイポイントや、目標速度等であるが、最終的にはアクセル開度やステア角などのいわゆる操作量に変換され、それに応じて車両の挙動が変化する。この操作量に当たる行為を「操作」と呼ぶ。自動車は大きな質量を持っているため、操作量の指令値に対する応答が小形のロボットに比べて鈍く、車両の制御系に対する指令値の遅れは致命的なものになりかねない。制御指令値の遅延と車両挙動について検討した例については5.で詳細に議論する。

一方、認知や判断を行うOEDRの一部に通信が介在した場合は必ずしも低遅延である必要はない。現在の周辺車両の位置や速度を知りたい場合には遅延はできる限り小さい方が望ましいが、多くの場合は3秒とか5秒後の周辺車両の挙動を予測したいことが多い。このような場合には、遅延よりも過去の何秒間に遡って位置情報を欠落することなく得ることが重要になる。このような例の詳細については6.で述べる。

なお、旅行計画や経路計画については、渋滞を回

図1 運転タスクの概略図

表 2 自動走行の機能配置

	センシング	認知	判断	操作
(1) 自律型自動運転	車載	車載	車載	車載
(2) 遠隔運転	車載	人	人	車載
(3) 遠隔自動運転	車載	車載	クラウド	車載
(4) 管制型自動運転	車載 路側	車載	クラウド	車載

避するためのルート案内など、テレマティクスの分野では重要なテーマであるが、必ずしも高いリアルタイム性を要求するものではないため、以下の議論からは割愛する。

表 2 は自動走行の形態の違いによる、「認知」・「判断」・「操作」の各機能の機能配置について示したものである。(1) の自律型自動運転と呼ばれる自動運転については全ての機能が車両の機能として具備されるのに対し、(2) 遠隔運転では、車両の外部で人が認知判断を行う。(3) 遠隔自動運転、(4) 管制型自動運転になると車両の外部での判断を機械が行うことが特徴になる。いずれの場合においても、最終的な制御は制御指令値に基づいて車両側で行われる。

5 遠隔運転・遠隔制御のための通信

遠隔運転や遠隔制御などの自動走行の応用を考えた場合、自動走行における制御指令に関わる情報を通信でやり取りすることになる。このような場合、通信遅延はできる限り小さいことが望ましいことは明らかであるが、具体的な指針についてははっきりとしていない。

5.1 遠隔制御に必要とされる通信遅延⁽⁸⁾

我々の研究グループでは、実際のシステムを模擬する評価環境を構築し通信遅延やパケットの紛失が制御にどう影響するか評価した⁽⁸⁾。図 2 に評価システムの概要を示す。図 2 (a) に評価装置の概念図、(b) に外観を示す。評価システムは 1/10 スケールのラジコンカーを用いたスケールモデルとして構築し、無線部には WiFi を用いる構成とした。クラウドを想定したサーバとの間に WAN エミュレータを配置して、エミュレータで遅延やパケットの紛失を模擬することで、通信の特性が制御に及ぼす影響を評価した。

図 2 評価システムの概要

図 3 は PID 制御を用いた場合のクラウドとエッジでの車両挙動の違いを示したものである。クラウド

図3 クラウドとエッジの違いによる車両挙動の違い

図4 通信遅延と走行軌跡の関係

ドによる制御ではWANエミュレータで図2(c)に相当する実際のLTEネットワークで測定した遅延(15時~16時の遅延)を加えた時の挙動である。一方、エッジについてはエミュレータによる遅延を付加していない場合(WiFiの遅延のみ)の挙動である。図3から分かるように、エッジ相当での制御では車線内を維持する走行ができているのに対し、クラウドで制御した場合では車線を大きくはみ出るような挙動が見られる。

図4はWANエミュレータで一定の遅延を加えて、走行軌跡が車線中心からどれほどずれるか評価した結果を示したものである。図から分かるように、数十ms以下に遅延が抑えられれば、車線を逸脱するような挙動はおおむね抑えられる。

5.2 エッジサーバ配置に関する検討⁽⁹⁾

実際のLTEネットワークで実施した遅延測定⁽¹⁰⁾

では、MNO (Mobile Network Operator), MVNO (Mobile Virtual Network Operator) のいかんによらず、どのサービス事業者でも平均的には数十ms以下の遅延に抑えられていた。一方で、トラヒックが集中する時間帯では100msを超える遅延が発生することが頻繁にあった。

このような遅延の変動に対応するため、文献(10)では制御を行うサーバを通信遅延に対応した複数のレイヤに配置し、切り換えながら遠隔制御を行う方法を提案し、サーバの主要台数に関するスケーラビリティの問題について議論している。全ての基地局(eNB)にエッジサーバを配置することはコスト的に現実的でないが、局舎レベルにサーバを集約させれば、通信遅延と収容台数のバランスが取れたシステム運用ができることを示している。

5.3 エッジサーバの活用における課題⁽¹¹⁾

エッジサーバを活用できれば遠隔運転や遠隔制御の実現に必要な低遅延を実現できることが分かったが、文献(11)では商用ネットワークを用いて遠隔サービスを行おうとした場合に生じるキャリア間接続の課題について議論している。具体的には、複数キャリアのeNBを無線バックホールで接続することで、遅延が劇的に低減されることを示している。

図5にキャリア間バックホールの概念を示す。図5ではキャリアA, B, Cの三つのキャリア間の相互接続について模式的に示している。キャリアCにエッジサーバが配置されると仮定した場合、キャリアCのユーザはその恩恵を受けることができるが、キャリアAのユーザはキャリアCのエッジサーバへ接続するために、モバイル網からインター

図5 キャリヤ間バックホールの概念

ネットを経由してキャリアCのエッジサーバに接続することになる。

多くの場合、プロバイダ間の相互接続点IX (Internet Exchange) は都市部に集約されていることが多いため、地理的に数百m程度しか離れていないサーバとの接続にネットワーク上では何百kmの通信経路をたどることになる。もし、図5のキャリアBとCのようにキャリア間バックホールで基地局同士を接続することが可能であれば、ネットワーク上の物理的な距離は劇的に軽減される。このことによって遅延が大きく軽減できるというのが文献(11)の主張である。

6

認知・判断及びプランニングのための通信

前節では制御に関わる情報伝達に通信を用いる場合の通信遅延について議論した。以下では、運転タスクにおけるOEDRに関連する情報のやり取りについて考える。

いわゆる認知や判断を行うための情報は制御の前段階で必要となる情報である。一般的な車両の運動特性を考えると、車両が制御指令を受けてから実際に車両挙動が変化するまでには遅れが生じる。し

たがって、OEDRでは何秒か先の状況を予測することが主なタスクとなる。

6.1 ダイナミックマップ

自動運転の認知・判断を行うためのプラットフォームの一つとして、ダイナミックマップがよく知られている^{(12), (13)}。ダイナミックマップは元々車車・路車間通信を用いた安全運転システムのプラットフォームとして検討されたものであり、100ms程度の周期で車両の位置、速度などの情報を収集し、動的な地図として表現することを目指していたが、近年では、周辺車両の挙動などのリアルタイム情報のみでなく、レーン情報などの詳細な情報を含む自動運転用の高精度地図を含む地図プラットフォームとしての概念が定着している。

6.2 ダイナミックマップの通信トラフィック試算⁽¹⁴⁾

多くの場合、ダイナミックマップの情報の更新周期は1秒程度とされている。このため、リアルタイムな制御への活用というよりは、数秒先の状況を予測し加減速を含む走行プランニングに活用することを意図していると考えるのが妥当であろう。全ての車のリアルタイムな情報を集約することは一見すると無謀な取組みと感じるかもしれないが、位置、

図6 ダイナミックマップで発生する通信トラヒック

速度などの基本的な情報のみの集約に限定すれば現実的な解が見えてくる。

例えば、文献(14)ではペイロードが100 Byte程度で、100 ms周期でのデータのやり取りを行った場合の通信トラヒックの試算を行っている。図6は平成27年に愛知県内で行われた道路交通量調査⁽¹⁵⁾の結果を基に、道路長2 kmのエリアを通信範囲と想定して発生するトラヒックを試算した結果である。

図6の各点は交通量調査の調査地点ごとのサンプルを示しており、青色の点は幹線道路、赤色の点は高速道路を示している。図6(a)からも分かるように、各車両の通信エリア内の滞在時間は数百秒程度である。また、図6(b)が示すように一般的な交通量を想定する範囲では、数Mbit/s程度の通信トラヒックまで抑えることが可能であることが分かる。

6.3 レベル4実現に向けたインフラセンサの活用

現在の自動運転車は車載センサのみを用いて走行しているため、交差点など見通しが悪いシーンでは減速し低速で走行せざるを得ない。このため、自動運転での通信活用が注目されている。インフラ側にあらかじめ設置されたセンサでセンシングを行い、通信を用いて情報提供を行うことで、運行設計領域ODDを拡大しようという動きである。

奥村らの検討⁽¹⁶⁾では、ダイナミックマップを交差点における走行プランニングに活用している。問題設定として自動走行車と一般車両が混在する環境で自動運転車両の交差点通過のプランニングを考えている点がユニークである。図7は文献(16)で

述べられている交差点での交錯を回避する手法の概念を示したものである。図において車両Aは通常運転（ドライバの判断・操作によって運行されている車両）を車両Bは自動運転車を示している。双方の車両は道なりに走行しているものとし、図中の青、及び緑で示された帯は道なりの走行距離と到達が予想される時刻の関係を示している。現在の位置からの走行距離が大きくなるにつれて到達時刻の曖昧さが増える様子を帯の縦方向の幅が広がることで表現している。二つの道路が交わる地点が交差点に相当し、交差点位置で二つの帯が重なる場合には交差点で交錯することを示している。図7(a)では二つの帯が交差点の位置で重なっているため、自動運転車両Bは衝突の可能性があるかと判断し、図7(b)のように減速を行い交差点への到達時間を遅らせることで同じ時間に交差点に進入することを回避することができる。奥村らの提案では、交錯の可能性をインフラ側で判断して自動運転車両に進入禁止情報を送信することで、このような機能を実現しており、制御のための通信と対比させて「判断レベルの通信」と表現している。

このような判断を行う場合には、制御指令値を与え制御を行うアプリケーションに比べ通信遅延に対する要求は大きく緩和される。このようなアプリケーションでは車両の将来の挙動を予測するために、交差点到達する数秒前に予測に必要な情報を入手できていることが必要な要件となるため、通信遅延よりも情報の更新頻度や、通信途絶がないことが重要な評価指標となる。実際、文献(16)では0.3秒程度の通信遅延があっても問題なく動作したことを報告している。

図 7 交差点における交錯回避の考え方

7 まとめと今後の展望

運転支援／自動走行へ通信を活用する場合の通信要件の考え方について、実際の研究事例を示しながら解説した。自動走行における運転タスクの考え方について説明し、タスクにより求められる通信要件が異なることを説明した。自動走行のための通信要件という点、通信速度や遅延などを想定されがちであるが、運転タスクによっては通信遅延に対する要求を大きく緩和できることを示した。

近年の自動運転技術の発展は目覚ましいものがあり、高速道路や自動運転などで運転支援装置はかなりの部分で自動化されている。一方で、一般道などの複雑な環境への ODD の拡大や、完全自動運に向けては課題が多い。また、AMR のようなロボットと自動車の自動走行技術をつなぐような応用展開も活発になってきていることから、複雑な環境での自動走行を実現するためには、通信技術の活用が必要不可欠となってくるのは間違いない。

誌面の都合で、この解説論文では述べられなかったが、自動走行は単に車の利便性を向上するのみでなく、MaaS など新たなサービスや、スマートシティなどとの連携についても期待されており、単なる個人の移動手段から社会インフラとしての移動手段へと、更なる拡張と発展が期待されている。

文献

- (1) M. B. Alatis and G. P. Hancke, "A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods," IEEE Access, vol. 8, pp. 39830-39846, Feb. 2020.
- (2) E. A. Oyekanlu, A. C. Smith, W. P. Thomas, G. Mulroy, D. Hitesh, M. Ramsey, J. D. Mcghinnis, N. A. Looper, M. Ng, A. Ng'oma, W. Lin, P. G. McBride, M. G. Shultz, and C. Cerasi, "A review of recent advances in automated guided vehicle technologies: Integration challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications," IEEE Access, vol. 8, pp. 202312-202353, Nov. 2020.
- (3) SAE, "Surface vehicle recommended practice J3016, Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles," June 2018.
- (4) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進会議, "官民 ITS 構想・ロードマップ 2020," July 2020.
- (5) 3GPP, "Enhancement of 3GPP supports for V2X scenarios Stage 1 (TS 22.186 V16.2.0)," June 2019.
- (6) 伊藤健二, 田所幸浩, 鈴木徳祥, 今井純志, 牧戸知史, "車車間通信による安全運転支援システムのアプリケーションレベル QoS 評価," 情報学論, vol. 51, no. 1, pp. 83-100, Jan. 2010.
- (7) 長谷部壱佳, 長谷川孝明, "あるべき ITS 情報通信と評価法について〜T 秒 Rm 評価法における通信設計およびセンサと通信システムの搭載率による情報取得率に関する検討〜," 信学技報, vol. 119, no. ITS2019-65, pp. 63-68, March 2020.
- (8) K. Sasaki, N. Suzuki, S. Makido, and A. Nakao, "Vehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing," 55th Annual Conf. Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp. 1122-1127, Sept. 2016.
- (9) K. Sasaki, N. Suzuki, S. Makido, and A. Nakao, "Layered vehicle control system coordinated between multiple edge servers," 2016 IEEE Conf. NetSoft, July 2017.
- (10) 牧戸知史, 佐々木健吾, 中尾彰宏, "5G 時代の自動車のコネクティビティ〜リアルタイムサービスの実

- 現に向けた期待～,” 信学技報, vol.118, no. RCS2018-12, pp. 59-63, April 2018.
- (11) K. Sasaki, S. Makido, and A. Nakao, “Edge eXchange: eNB with wireless backhaul communication among carriers,” 2019 IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2019.
- (12) Y. Watanabe, K. Sato, and H. Takada, “DynamicMap 2.0: A traffic data management platform leveraging clouds, edges and embedded systems,” International J. Intelligent Transportation Systems Research, Nov. 2018.
- (13) 山田峻也, 渡辺陽介, 高田広章, “エッジコンピューティングを利用した自動運転のための環境情報分散管理システム,” 日本ロボット学会誌, vol. 38, no. 2, pp. 199-209, March 2020.
- (14) 牧戸知史, 佐々木健吾, 中尾彰宏, “車における MEC の利用可能性について～オープンデータを活用したシステム試算～,” 信学技報, vol. 119, no. RCS2019-175, pp. 139-141, Aug. 2019.
- (15) 国土交通省, “平成 27 年度全国道路・隘路交通情勢調査,” June 2017. <http://www.mlit.go.jp/road/census/h27/>
- (16) 奥村文洋, 藤井亮暢, 中村亮裕, 加藤武男, 大濱吉紘, 下岡和也, 後藤邦博, 和田錦一, 鋤柄和俊, 長坂直樹, 佐々木健吾, 清水 司, “自動運転車の運行設計領域拡大のための時空間制約を用いた交通管制システム,” 信学論 (D), vol. J104-D, no. 1, pp. 2-10, Jan. 2021.

(2021 年 2 月 4 日受付, 5 月 6 日再受付)

牧戸知史 (正員)

平 8 名大・工中退, 飛び級にて大学院進学. 平 10 同大学院工学研究科修士課程了. 平 15 同大学院博士課程了. 平 13 (株) 豊田中央研究所に入社. 令 3-04 から名大大学院情報学研究科客員教授. 自動車用レーダ, 車車間通信, 衛星測位技術, スパース信号処理などの研究に従事. 現在, 環境センシング研究領域, リーディングリサーチャー.