

5G で実現する自動運転

5G as an Enabler for Automated Driving

吉野 仁



5G は、従来からの大容量通信に加えて新たに高信頼・低遅延通信の実現を目指している。また、自動運転技術は、センサ技術、AI による画像認識技術などにより実現が近づいてきた。しかしながら、完全自動運転の実現にはまだ技術的難易度が高いと言われている。近年、自動車の制御技術に通信を応用する検討も行われ、車間距離制御 (ACC: Adaptive Cruise Control) に通信機能を付加した協調型 ACC などで成果を上げている。本稿では、5G の提供する大容量低遅延の通信能力が、どのように自動運転技術に活用できるかを解説する。

キーワード: 5G, 自動運転, 車両制御, センサ, ダイナミックマップ, 隊列走行

1. はじめに

2020 年の商用化に向けて第 5 世代移動通信システム (5G) の研究開発が行われている。5G は従来の能力拡張である拡張モバイルブロードバンド通信 (eMBB: enhanced Mobile Broadband) に加えて、超高信頼・低遅延通信 (URLLC: Ultra-Reliable and Low Latency Communications) や多数接続通信 (m-MTC: massive Machine Type Communications) を新たな領域としており、高度情報化社会の社会基盤として期待されている。特に URLLC と m-MTC は新しい市場を開拓できる可能性があり、具体的な 5G の適用事例の確立が急務である。

一方、自動車メーカーや IT 企業などが完全自動運転車の実用化に向けて開発を進めている。完全自動運転車の早期実現に向けて 5G URLLC の自動運転技術への応用も期待されている。本稿では、5G の自動運転への適用の可能性と最新動向について解説する。

2. 自動運転のレベル

自動運転のレベルは、米国 SAE (Society of Automotive Engineer) International によって定義されている⁽¹⁾。米国運輸省 (NHTSA) 及び日本の官邸 ITS 構想ロードマップも SAE の定義に合わせている⁽²⁾。SAE によれば自動運転のレベルは 0 から 5 までに分類される (図 1)。

レベル 0 は、加速、制動、操舵などの全ての運転操作を人間の運転者が行う。

レベル 1 では、車両の自動化システムが、人間の運転者を時々支援し、幾つかの運転操作 (動的な運転タスク: Dynamic Driving Task (DDT) という) を実施することができる。DDT は車両を操縦するために必要な全てのリアルタイムの運転または戦術的な機能と定義されているが、具体的には車両の左右方向の動き (操舵) や前後の動き (加速または減速)、運転環境の監視などを言う。アクセル、ブレーキ、ハンドル操作のいずれかを支援してくれるシステムのレベルを指す。

レベル 2 は、車両の自動化システムが複数の運転操作を同時に実施することができる一方、人間の運転者が常に周囲の運転環境を監視し、残りの部分の運転操作を行い続けることが必要となる。したがって事故を起こした場合は人間の運転者の責任となる。

レベル 3 の自動化システムは、高速道路など特定の場所に限り全ての運転操作を実施することができるとも

吉野 仁 正員 ソフトバンク株式会社先端技術研究部
E-mail Hitoshi.yoshino@g.softbank.co.jp
Hitoshi YOSHINO, Member (Advanced Technology Research Department, SoftBank Corporation, Tokyo, 105-7317 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.11 pp.1078-1084 2018 年 11 月
©電子情報通信学会 2018

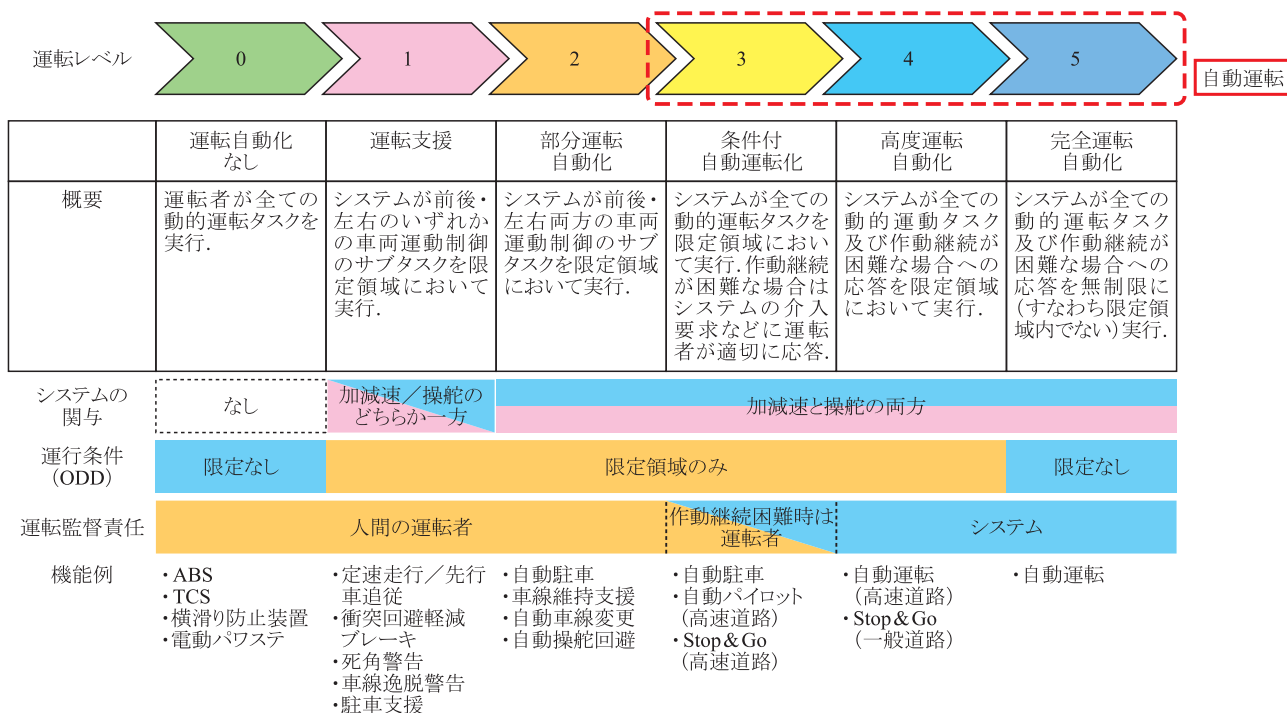


図1 自動運転のレベル

に、運転環境／交通状況の監視も行うことができる。しかし、緊急時に自動化システムから要請があった場合に備えて、人間の運転者は運転操作を引き継ぐ準備をしておかなければならない。

レベル4の自動化システムは、運転操作を実施し、運転環境の監視を行うことができる。レベル3との違いは、緊急時においても、人間の運転者は自動システムから運転操作を引き継ぐ必要がない点である。ただし、レベル4の自動化システムは、ある環境・条件下のみで運行することができる。この環境・条件のことをSAEでは、ODD（Operational Design Domain：運行設計領域）と定義している。ODDは自動運転の運行制約条件のことであるが、地理的な場所（都市部など）、道路（特定の路線、コースなど）、環境、交通状況、速度や一時的な限界などいろいろな条件や運転モード（高速道路や低速交通など）を含む概念である。

レベル5の自動化システムは、人間の運転者が運転できる全ての条件下において、全ての運転操作を実施できる。レベル4と比較して、レベル5はODDに関して制限がない点が特徴である。

レベル3から自動運転と呼ばれる。それ以下のレベルは安全運転支援と呼ばれている。ここで、重要な指標の一つが「運行設計領域（ODD）」である。ODDが限定されているほど、自動運転システムを導入するための技術的な難易度が低いことが分かる。

3. 自動運転の仕組み

自動運転の処理プロセスは、認識、認知、判断、制御と言われている^{(3)~(5)}。図2に自動運転システムの構成例を示す。

3.1 認識

認識部は、車載カメラ、ミリ波レーダ、ライダ（Lidar：Light Detection and Ranging、レーザレーダとも言う）、超音波センサなどで構成させる。車載カメラは人間が肉眼で見ている画像と同じ画像データを取得し、画像解析により、人、車や障害物を検知する。標識などに書かれた文字／数字も認識することができる。ミリ波レーダは他のセンサと比較して霧や降雨、降雪、外乱光などの環境条件の影響を受けにくいいため広く用いられている。ライダは、レーザ光を使って物体の検知と測距を行うセンサである。近赤外光のレーザパルスを発射し、そのパルスが反射して戻るまでの時間を計測し測距を行う。ライダを中心に全周囲方向にレーザ光パルスを照射することで距離情報を三次元的に取得できる。現在では、100 m先の物体を1秒間に100万回以上計測できるため、高解像度の物体検知が可能である⁽⁶⁾。また、基本的にレーダであるので、標識の記号や文字を読むことはできない。超音波センサは車両周辺の障害物検知など近距離の物体検出に使用されている。以上のようにセンサには一長一短があるので、実際にはこれらの複数のセンサからの情報を統合して使用するセンサフュージョンが

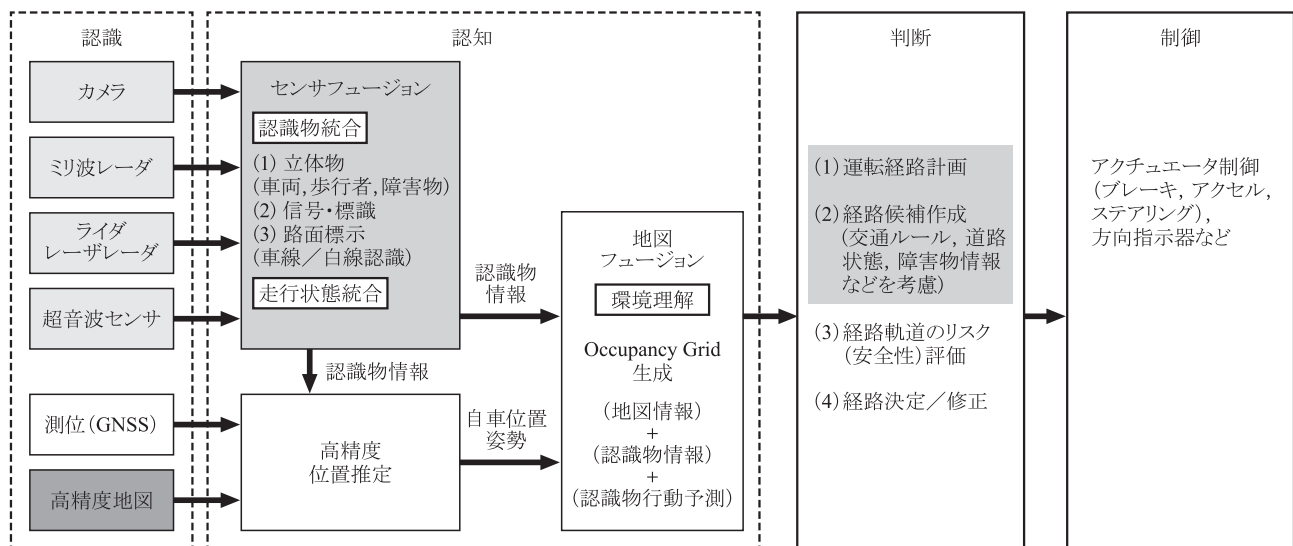


図2 自動運転システムの構成例

行われている。

3.2 認知

複数のセンサからの情報を基に、障害物、信号、標識、走行レーン、他車両、歩行者などの認知を行うのが、センサフュージョン部である。自車の走行環境を認知する部分であり、ニューラルネットによる深層学習の結果などを利用したAI認知が用いられている。

AIの認知認識力を向上させるためには、様々な走行場面を経験させて学習させる必要がある。そのため、実際に公道を走行しAIに経験を積ませる作業が行われている。更に認知部では、信号、標識、走行レーン(路面標示を含む)、道路周辺の建物などの認知された情報と、3Dダイナミックマップと呼ばれる高精度地図、GNSS(GPSなど)の位置情報とから、自車の位置を高精度に推定する。こうして得られた高精度の位置情報と認識物情報や走行状態情報を加味して、自車の走行環境を認知する(地図フュージョン)。その一例としてはOccupancy Grid(OG)を作成する方法がある^{(7),(8)}。OGには自車の周囲の状況を数十cm単位のグリッドに分割して障害物などの存在確率が書かれている。

3.3 判断

判断部では、自車の運転環境などの認知情報や安全上の制約条件を考慮し、例えばOGを基に数単位時間先までの障害物の存在確率を予測し、自車の運転経路の安全性を評価し、通るべき運転経路を決める。図2の判断部においても灰色で囲まれた項目は先に述べた深層学習(AI)が関与できる部分である。

3.4 制御

判断部で決めた運転経路に従って、ブレーキ、アクセル、ステアリングなどのアクチュエータを制御する。

4. 自動運転実現への5Gの貢献の可能性

ITU-R(国際電気通信連合無線通信部門)の勧告M.2083-0は、5Gの無線能力として最大データ速度20 Gbit/s、無線区間の伝送遅延1ms以下を目標としている。実際には、ネットワーク区間を含むエンドツーエンドの伝送遅延でも数~10数ms程度になると言われている。本章では、大容量かつ高信頼低遅延通信が可能となる5Gの自動運転への適用の可能性について述べる。

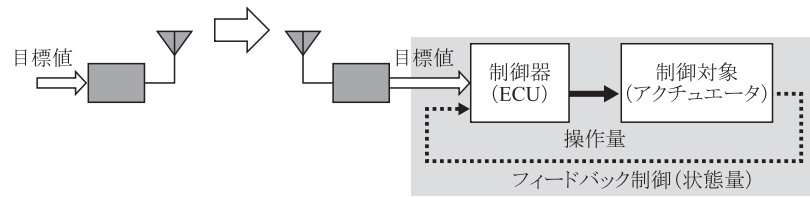
4.1 車両制御のための5G通信

車両制御のための5G通信では、車両制御や計器データなど小容量のメッセージ通信が主となるが、低遅延が要求される。

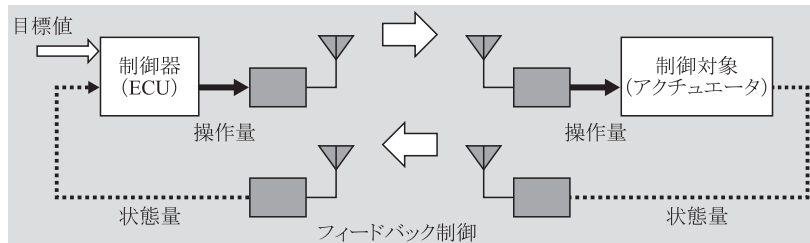
無線通信を制御系に利用する方法は二つ考えられる⁽⁹⁾。文献(9)を参考に修正したものを図3に示す。図3(a)は、無線回線を通して制御器に目標値を伝送し、受信側の制御器が目標値となるように、制御対象(パワートレーン(動力)系や操舵系など)を制御する方法である。図3(b)は、制御器からの操作量の伝送と制御対象からの状態量のフィードバック伝送の両方が無線回線を介する場合である。

4.1.1 無線が制御目標値を伝送する場合

図3(a)の目標値を無線で伝送する例としては、協調型ACC(CACC:Cooperative ACC)がある^{(10),(11)}。既に



(a) 目標値を伝送する場合



(b) 操作量と状態量が無線回線をまたぐ場合

図3 無線制御の形態 (文献(9)の図1を基に修正)

商用化された車間距離制御 (ACC) 機能は、車載レーダなどを用いて先行車両と後続車との車間距離を測定し、速度に応じた安全な車間距離を保持するものである。

しかし、車間距離情報だけの制御では前方を走る車の加減速の発生開始から車間距離が変化するまでに時間的に大きな遅れが生じる。後続車の加減速が発生するまでには更に遅れが生じる。このため ACC だけで追突を防止するには長い車間距離を維持する必要がある。

一方、CACC では前方車両の速度や加速度の情報を後続車に無線伝送し車速を制御するため、前方車両が急制動したときの車間距離制御性を大幅に改善することができる。また、制御の遅れによるハンチング (車間距離の変動／振動) の少ない安定した走行も可能となる。文献 (10)、(11) では車々間通信に DSRC (Dedicated Short Range Communications)^{(12),(13)} を使用している。先行車の速度情報を後続車に伝送 (DSRC なのでブロードキャスト送信) し、後続車は目標値を受け取り、先頭車と常に同じ速度と車間距離を維持するように制御を行う。実際には、車間距離を一定に保つために、速度制御誤差を車間距離センサが補正する仕組みとなっている。

また、車間距離制御も、文献(10)では 30 m 程度、文献(11)では最小 4 m の車間距離を想定している。したがって、制御目標値の送出頻度も数十～数百 ms 間隔でよいと考えられる。

5G で無線区間 1 ms 以下の遅延で通信が可能となれば、車々間直接通信で、精度の高い車間距離制御が可能になると思われる。精度の高い車間距離の実現でトラックの隊列走行の場合、車間距離を 2 m まで短縮できれば空気抵抗の低減などにより、約 25% の燃費改善が可能となるという報告もある⁽¹¹⁾。車間を詰めて走行できるので道路の単位長当りの交通容量 (走行車両台数) を

増加させることも期待でき渋滞を発生しにくくすることが可能となる。

4.1.2 操作量と状態量が無線回線をまたぐ場合

フィードバック制御は、一般に、目標値設定型のフィードフォワード制御と比較して外乱がある場合に強く、精度の高い制御が可能である。しかしながら、図 3 (b) に示す車両制御系のフィードバックループが無線回線をまたぐ事例は、現在のところ自動運転への応用事例では見当たらない。

図 4 に車両制御から見た自動運転システムのブロック図を示す。文献(14)、(15)を基に修正を加えている。図 4(a)の自動運転レベル 0 では、全てを人間の運転者が操作するので、運転操作に係るフィードバック制御系では運転者自身が制御器となる。同図(b)の安全運転支援システムでは、制御の主体は運転者であるが、操作量には運転支援系システムからの調整を受ける。ACC や衝突回避軽減ブレーキなどの作動である。同図(c)の自動運転レベル 2 以降では、制御器の主体は自動運転システムとなるが、レベル 2, 3 においては HMI (Human Machine Interface) を通して運転者の介入を受ける。したがって、現在の自動車が個々に自律的に行う自動運転には 5G を含むフィードバック系のユースケースはないと考えられる。しかし、将来、複数の自動車がネットワークでつながり、複数の自動車が相互に制御し合う協調型自動運転ではフィードバック制御系への 5G の応用が考えられる。交通全体がシステムとなる場合である。例えば、車群の中における最適な追い越し制御や、交通流量を考慮した高速道路での最適な合流制御などである。文献(16)に人間の触覚、視覚、聴覚、動作の分析がある。筋肉の反応速度は 1 s、聴覚の知覚できる遅延は

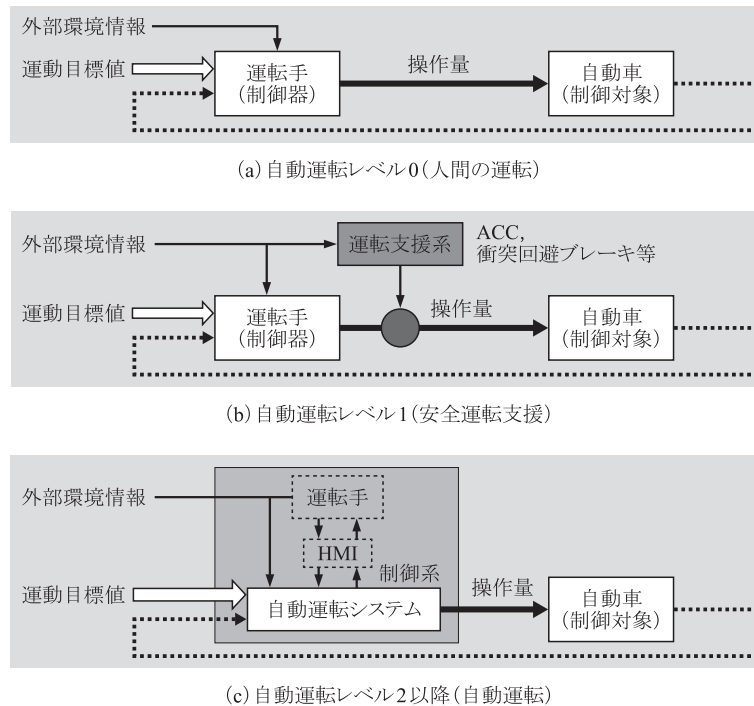


図4 車両制御から見た自動運転システム

100 ms, 視覚の知覚できる遅延は 10 ms, 触覚のそれは 1 ms という。現在の自動運転の目標が、従来の人間の運転操作の置き換えであると考え、視覚の知覚できる遅延 10 ms レベルの遅延が許容できる制御システム (5G 通信系を含む) で、5G を使用することが可能と考えられる。ただし、車速 300 km/h での車の自動合流など、人間の知覚を超えた制御が必要な場合は新たな検討が必要となるかもしれない。

5G のユースケースとして有望なものに遠隔操作 (遠隔運転) がある⁽¹⁷⁾。自動車運転のフィードバック制御ループに、5G の通信回線が入る図 3(b) の例に相当する。このフィードバックループには運転者も含まれる。これまで完全自動運転に焦点を当てて各国で研究開発が盛んに行われてきたが、米国での公道走行実験での事故を受けて、自動運転に遠隔操作を併用する提案が出ている。HMD (Head Mounted Display) を用いて遠隔地にいる運転者が状況によっては安全確保のため、自動運転車 (乗用車) を遠隔操作する事例である。また、無人運転トラックであっても、高速道路では自動運転モード、一般道では自動運転モードを解除して運転者が遠隔操作するモードに切り換わる試作車が GPU Technology Conference (GTC) 2018 で公開された。自動運転でも安全を担保するために、合流、分岐のときに、運転者が遠隔操作を行う仕組みである。レベル 5 の自動運転の実用化初期の段階で有効な手段である⁽¹⁸⁾。図 3(b) の構成で、5G の低遅延通信を利用する事例となる。また、この事例では、監視画像を送送する大容量低遅延通信と、制御

メッセージ等を伝送する小容量低遅延通信が要求される。

4.2 外部環境情報を取得するための 5G 通信

4.2.1 ダイナミックマップのダウンロード

図 4 に示されるように、自動運転においては外部からの環境情報が必要である。その一つにダイナミックマップと言われる三次元高精度地図がある。ダイナミックマップは、高精度な道路地図上に、階層的に様々な情報を載せた地図である。まず、(1) 静的情報レイヤとして、道路や建物情報など長期間にわたって変化の起こらない地図情報を持つ。その上に、(2) 交通標識や道路工事情報、広域気象情報など数日から数か月にわたって変化の起こらない情報の準静的情報レイヤを持つ。更に、(3) 事故情報、渋滞情報、狭域気象情報など数時間から数日にわたって変化のない情報を記録する準静的レイヤを持つ。最後に、(4) ITS 予測情報、周辺車両、歩行者などの数分から数時間にわたる情報を記録するレイヤを持つ。このように、鮮度の異なるデータから成る地図データは、通信を介して常に更新する必要がある。このような大容量通信は 5G の事例になると考えられる。更に、5G には MEC (Mobile Edge Computing) 技術があり、ダイナミックマップのように一定エリアにローカル配信する必要がある場合には有効である。

4.2.2 センサ情報の共有

3.1 で述べたが、道路上の交通信号や道路標識、電柱、ガードレールなどの構造物、道路 (車線情報を含

む), 及び道路上の自動車, 歩行者, 障害物などを認知するためには, 多くのセンサからの情報が必要である. 1 台の車両に設置されたセンサ群から得られる情報には限りがある. 例えば, ライダは高性能化が進み有望なセンサであるが, レーザパルスを照射してその反射波で測距を行うため, ライダの位置から見て道路上の自動車などの物陰については情報が得られない. もし, 道路を走行する複数の車両が個々に集めたデータを共有できれば, 道路環境の認識の精度向上に役立つ. カメラから得られる画像情報も同様である. しかし, ライダやカメラ, ミリ波レーダからの情報は膨大である. そこで, これらのセンサ情報を 5G 通信を用いて共有することが考えられる. 共有方法としては, 車々間直接通信で直近の車両間でリアルタイムに共有する場合と, MEC サーバ上にアップロードし情報の鮮度に応じて処理を行い, 近くを通る車両に配信する場合が考えられる. いずれも大容量低遅延通信をサポートする 5G の有用な応用事例と考えられる.

4.2.3 人工知能の学習

3.2 で述べたように, センサ情報による認知認識には深層学習を基にした AI 技術が用いられている. 認知認識力を向上させるためには, 発生し得る運転操作, 天候など様々な場面で, 学習データを取得しニューラルネットワークのトレーニングをする必要がある. データを収集するテスト車両がカメラ, ライダ, ミリ波レーダなどを複数台搭載していることから推定するとかなりのデータ量になると思われる. Deep Neural Network (DNN) を用いた画像認識は, 歩行者などの高い検出率を持つ. DNN の事例では車載チップでデータの前処理が行われ, そのデータを車外のデータセンターに送り, データセンターのスーパーコンピュータで学習させ, 認知ソフトのパラメータの最適化を図る. そして, パラメータは車載チップにダウンロードされる. テスト車で既にかなりの学習をさせているが, 個々の自動車に対処すべき新たな状況を発見した場合, そのデータをデータセンターに送り, そのデータを基に最適な対処法を再学習し, その結果を最新のパラメータファイルとして個々の自動車にダウンロードする必要がある. 認知認識率向上のための大量のデータによる学習作業は, 実用化後も絶え間なく必要と思われる. このための大量のデータのやり取りも 5G の応用事例と考えられる.

5. 具体的な取組み例

——トラックの隊列走行——

ソフトバンクでは, 5G の新領域である高信頼低遅延通信 (URLLC) に向けた実証実験を行っている⁽¹⁷⁾. 実証試験では, (1) 隊列走行における隊列内の車々間通

信及び (2) トラック隊列全体の遠隔監視/遠隔操作の二つのユースケースに取り組んでいる. 2018 年度は, 隊列走行の後続車自動運転への 5G 通信の適用を検討するため, 車両制御及び後続車周囲のビデオ監視に必要な通信の基本性能評価を行った.

5.1 遅延特性

隊列走行の車両制御への適用を考慮して, 5G 通信装置の遅延特性を実験により測定した. 図 5 に測定結果の一例を示す. 車速 87 km/h において無線区間の伝送遅延が 0.58 ms であることが分かる.

5.2 スループット特性

隊列走行では安全のため後続車両周囲の監視が必要である. そのための低遅延大容量通信の実現性について試験した (図 6). 車間距離 10 m 程度の車々間直接通信である. 約 2 Gbit/s のスループットが得られることを確認した.



図 5 車両遠隔監視制御を想定した V2N 低遅延通信性能 (4.7 GHz 帯)



図 6 車々間直接通信による後続周辺監視用高精細画像伝送 (28 GHz 帯)

6. お わ り に

本稿では、まず自動運転レベルの定義について解説した。次に、現在の自動運転技術の概要を述べた。そして、自動運転への5Gの貢献の可能性について事例を交えて議論した。最後に、ソフトバンクのトラック隊列走行通信実験への取り組みを紹介した。本稿が自動運転技術への5Gの応用に少しでも役立てば幸いである。

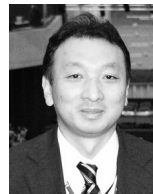
謝辞 本研究には総務省の「高速移動時において無線区間1ms, End-to-Endで10msの低遅延通信を可能とする第5世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討」の成果の一部が含まれている。

文 献

- (1) SAE Standard J3016_2018609, "Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles," Sept. 2016.
- (2) 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戦略会議, 官民 ITS 構想・ロードマップ2018, June 2018.
- (3) 保坂明夫, 青木啓二, 津川定之, 自動運転—システム構成と要素技術—, 森北出版, 東京, 2015.
- (4) 児島隆生, 長田健一, 伊藤弘朗, 堀田勇樹, 広津鉄平, 小野豪一, "自動運転の高度化を支える知能化技術," 日立評論, vol. 99, no. 5, pp. 52-56, Oct. 2018.
- (5) 菅沼直樹, "金沢大学における自律型自動運転車の開発の実例," 情報学コンピュータビジョンとイメージメディア研報, vol. 2014-CVIM-192, no. 3, pp. 1-4, May 2014.
- (6) 渡辺孝弘, 塚本明利, "画像センサーとLiDARによるセンシング融合技術を用いた現場管理ソリューション," OKI テクニカルレビュー, vol. 84, no. 2, pp. 14-17, Feb. 2017.
- (7) A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," Computer, vol. 22, no. 6, pp. 46-58, June 1989.
- (8) 馬路 徹, "人の眼を超える認識力と熟練運転車をしのぐ判断

- 力," 日経 Automotive, no. 95, pp. 78-81, Feb. 2018.
- (9) 片山正昭, "頼れる無線制御を目指して," 信学誌, vol. 98, no. 10, pp. 864-867, Sept. 2015.
- (10) V. Milanés, S.E. Shaladoover, J. Spring, C. Nowakowski, H. Kawazoe, and M. Nakamura, "Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 1, pp. 296-305, Feb. 2014.
- (11) 青木啓二, "自動運転・隊列走行の実現に向けて—自動運転技術の開発状況について—," 情報処理, vol. 54, no. 4, pp. 303-309, April 2013.
- (12) 平山泰弘, 澤田 学, "V2X 通信技術の動向と将来展望," 信学誌, vol. 98, no. 10, pp. 860-863, Sept. 2011.
- (13) 工藤理一, 安川真平, 丸小倫己, Huan WANG, 永田 聡, 中村武宏, "コネクテッドカーサービス実現に向けた LTE V2X 技術," 信学論(B), vol. J101-B, no. 6, pp. 417-433, June 2018.
- (14) 川邊武俊, "自動車の運転支援・自動運転とセンシングと通信," 平成 27 年度九州電波協会の主催講演会講演資料, 九州電波協会の会, Dec. 2015.
- (15) 川邊武俊, "自動車制御技術と制御工学," 第 49 回自動制御連合講演会資料, Nov. 2006.
- (16) G. Fettweis, "The tactile internet: Applications and challenges," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, March 2014.
- (17) 吉野 仁, 山口 良, 三上 学, "自動運転を支援する 5G 超低遅延通信の実証実験—トラックの隊列走行への適用—," 2018 信学総大, no. BP-1-5, March 2018.
- (18) Automotive Report, "NVIDIA の AI コンピュータ「ウーバー実験車につかっている」," pp. 18-21, 日経 Automotive, June 2018.

(平成 30 年 7 月 3 日受付 平成 30 年 7 月 10 日最終受付)



吉野 ひとし (正員)

昭 61 東京理科大学・工・電気卒。昭 63 同大学大学院工学研究科修士課程了。以来、移動通信システムの研究に従事。平 21 ソフトバンク株式会社入社。現在、同社先端技術研究部担当部長、SB ドライブ株式会社取締役兼任。博士(工学)(東工大)。平 6 年度本会論文賞、平 20 年度日本 ITU 協会業績賞各受賞。