

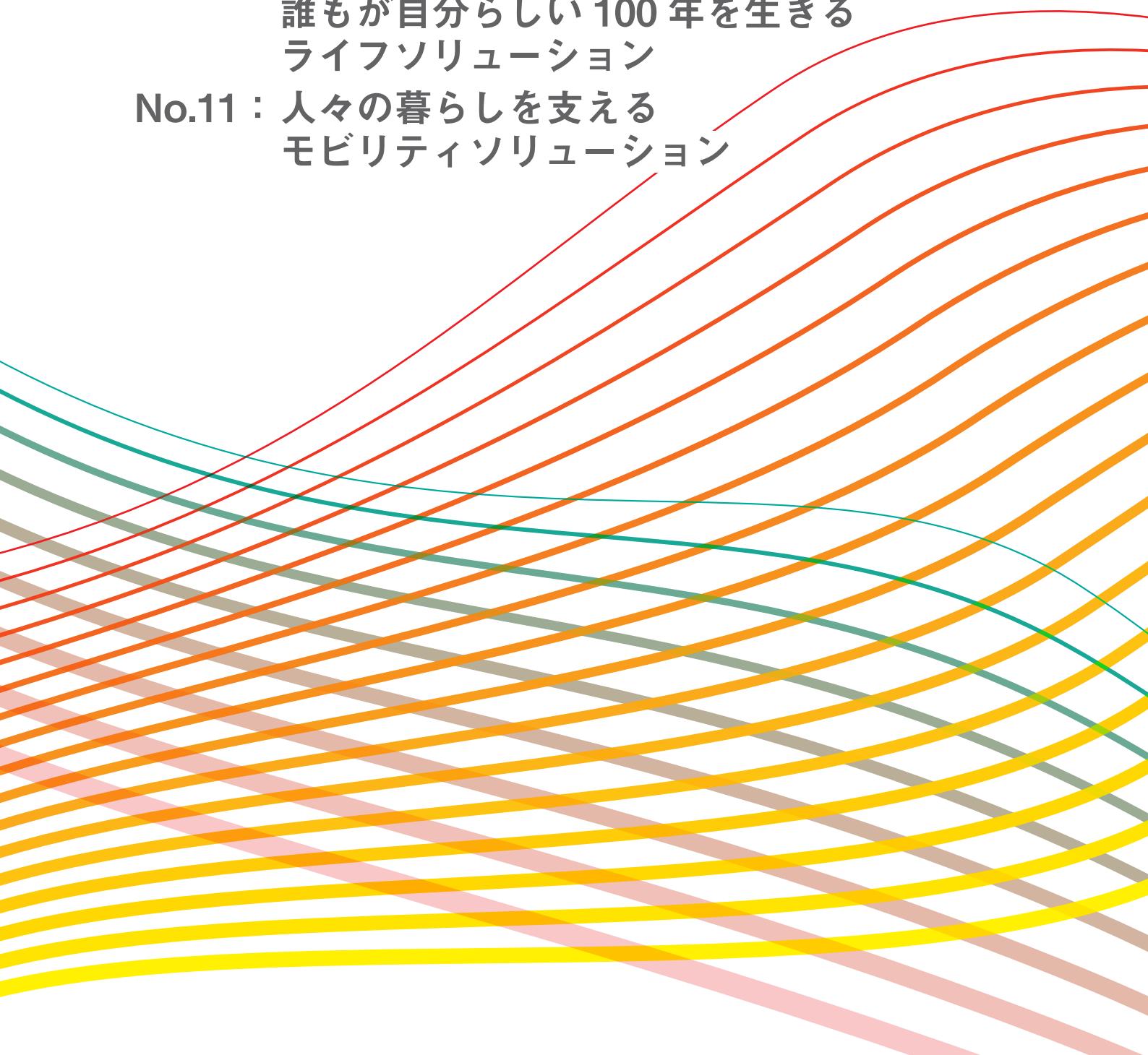


三菱電機技報

10-11 | 2022
Vol.96 No.10-11

No.10 : 働く人から暮らす人まで,
誰もが自分らしい100年を生きる
ライフソリューション

No.11 : 人々の暮らしを支える
モビリティソリューション



三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネスプラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集ではライフ領域の“働く人から暮らす人まで、誰もが自分らしい100年を生きるライフソリューション”(10月号)、モビリティ領域の“人々の暮らしを支えるモビリティソリューション”(11月号)をご紹介します。

No.10

特 集	働く人から暮らす人まで、誰もが自分らしい 100年を生きるライフソリューション	100-year Solutions that Allow People to Work and Live as They Wish
卷 頭 言	働く人から暮らす人まで、誰もが自分らしい 100年を生きるライフソリューション 4	100-year Solutions that Allow People to Work and Live as They Wish Toshie Hiraoka
卷頭論文	ライフソリューションの展開とIoT基盤の実装 5	Deployment of Life Solutions and Implementation of Internet of Things Platforms Nobuo Asahi
	IoTで生活を支えるスマート e-Flo システム 10 小前草太・廣崎弘志・長田福太郎・伊豆川聖司・矢野裕信・生田目祥吾	Smart e-Flo System that Supports Life with Internet of Things Sota Komae, Hiroshi Hiroaki, Fukutaro Nagata, Takashi Izukawa, Hirotoshi Yano, Shogo Namatame
	“ヘルスエアー”技術の空調機への適用 14 斎木あゆみ	Application of the "Health Air" Technology to Air Conditioners Ayumi Saiki
	自然冷媒CO ₂ ヒートポンプ給湯機 家庭用“三菱エコキュート2022年度モデル” 18 坂上智樹・池田一樹・高橋宗平	CO ₂ Heat Pump Hot Water System "Mitsubishi EcoCute 2022 Fiscal Year Model" for Household Use Tomoki Sakaue, Kazuki Ikeda, Shuhei Takahashi
	“中だけひろびろ大容量”，新しい選べる 2形態冷蔵庫“MZシリーズ”“WZシリーズ” 22 剣持正勝・前田 剛	Two New Forms Selectable Refrigerators, "MZ Series" and "WZ Series" with "Large Capacity and Spacious Inside" Masakatsu Kemmotsu, Go Maeda
	三菱電機ジャー炊飯器発売50周年記念モデル IHジャー炊飯器“本炭釜 紬(つむぎ)” 26 伊藤ちひろ・町井健太・高砂英之	Mitsubishi Electric Rice Cooker 50th Anniversary Model IH Rice Cooker "Pure Carbon Pot TSUMUGI" Chihiro Ito, Kenta Machii, Hideyuki Takasago

No.11

特 集	人々の暮らしを支えるモビリティソリューション	Mobility Solution to Support the Lives of People
卷 頭 言	“人々の暮らしを支えるモビリティソリューション” の特集号に寄せて 30 薮 重洋	For the Special Issue of "Mobility Solution to Support the Lives of People" Atsuhiro Yabu
	インフラ連携狭域自動運転システム 31 田中英之	Autonomous Driving Service in Dedicated Area Cooperated with Infrastructure Hideyuki Tanaka
	ADAS制御機能とボディ制御機能を統合したECU 35 森 正憲・竹内 佑・平出拓也・鴨井亮二	Electronic Control Unit Integrating ADAS and Body Control Function Masanori Mori, Yu Takeuchi, Takuya Hirade, Ryoji Kamoi
	車室内モニタリングのロバスト性評価 39 米山昇吾・藤田偉雄	Robustness Evaluation Using Simulation Tool for In-Vehicle Monitoring System Shogo Yoneyama, Takeo Fujita
	世界初の鉄道車両向け同期リラクタンスマータシステム 43 山下良範・金子健太・菅原徹大・寺本晃大	Synchronous Reluctance Motor and Inverter Traction System for Railway Yoshinori Yamashita, Kenta Kaneko, Tetsuo Sugahara, Kota Teramoto
	AIを活用した無線式列車制御システムでの電波監視 48 中畠祐輔	Radio Wave Monitor in the Wireless Train Control System Utilizing AI Yusuke Nakajima
	鉄道でのミリ波帯通信の利用 52 岡 智広	Use of Millimeter Wave Communication on the Railway System Tomohiro Oka

巻頭言

“人々の暮らしを支えるモビリティソリューション” の特集号に寄せて

For the Special Issue of "Mobility Solution to Support the Lives of People"



薮 重洋 *Atsuhiro Yabu*

常務執行役 自動車機器事業本部長

Executive Officer, Group President, Automotive Equipment

自動車や鉄道を始めとするモビリティは、その発達によってヒトやモノの移動範囲が拡大し、移動の自由度が高まり、今では人々の暮らしになくてはならない基盤になりました。

一方、モビリティの発達に伴い、交通事故、交通渋滞、地球温暖化といった社会課題の解決が必要な状況にあります。例えば、交通事故に関して、運転支援システムの実装などによって、2020年の国内事故件数は2010年と比較して58%減少したものの、高齢ドライバーによる事故件数の減少率は36%にとどまっており、依然、高齢者が関わる交通事故への対策が求められています。交通渋滞については、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の影響で交通量が減少した2021年でも、交通渋滞による経済損失はアメリカで約21兆円、イギリスで約6兆円、ドイツで約4兆円に及ぶと試算され^(注1)、大きな額になっています。また、地球温暖化については、各国でのCO₂排出量規制の強化などの対策で電動化車両への転換が進められていますが、予測によるとCO₂を排出しない電気自動車の割合は2030年でも約37%との試算になっており、温暖化抑制のための更なる加速が求められています。

さらに、地方都市での過疎化やEコマースの普及に伴い、地域住民の移動手段確保や物流処理能力の不足といった新しい課題の解決も求められています。例えば、人口が集中する都市部での移動手段が便利になる一方、過疎化が進む地方都市では、利用者数減少でバスや鉄道といった公共交通機関の維持費用を賄うことが難しくなり、運行便数の削減や路線廃止が生じています。その結果、過疎化に拍車がかかるとともに、自動車の運転ができない高齢者や障がい者の交通手段が失われつつあります。また、物流に関しては、Eコマース普及による宅配便の増加で輸送が小口化、多頻度化し、配達効率が悪化するとともに、厳しい労働環境にあるトラック運送業ではドライバー不足が進んでおり、ある試算によると、2030年には国内貨物輸送需要31.7億トンのうち約36%に当たる11.4億トンの輸送が処理できなくなると見込まれています。

これらモビリティに関する社会課題に対して、運転支

援・自動運転技術による自動車の安全性・効率性向上や複数の交通手段の統合で利便性が高く地球に優しいサービスの提供を目指す官民での取組みが世界各国で進められています。日本では、自動車の自動運転早期実現に向けて官民が一体になって取り組む戦略として2014年に“官民ITS(Intelligent Transport Systems)構想・ロードマップ”を策定しました。その後、毎年改定を行いながら、自家用車の運転支援技術や自家用車だけでなくトラックやバスを対象とした自動運転技術の高度化について実現目標を立てて取り組んでいます。アメリカでは、Googleの自動運転車開発部門が分社化して誕生したWaymoやGM(ゼネラルモーターズ)の自動運転車開発部門であるGMクルーズなどが、2019年に無人の自動運転サービスを開始するなど開発を先導し、連邦政府や州政府も安全性確保に向けたガイドラインの策定や法整備で自動運転技術の開発を支援しています。欧州では、自動車メーカーによる自動運転技術の高度化のほか、公共交通機関やカーシェアリングサービスなどあらゆる交通手段を統合しその最適化を図ることで、マイカー以上に快適で便利な移動サービスを提供するとともに、持続可能な社会を構築する取組みが盛んです。例えば、フィンランドのヘルシンキでは、様々な交通手段によるマルチモーダルな経路検索、予約、決済が一つのスマートフォンアプリで可能なサービス“Whim”^(注2)が2016年にリリースされ、その後、2018年にはイギリス、ベルギーに事業展開されています。

三菱電機も、モビリティが暮らしを支える重要な基盤であるとの認識の下、当社グループ内外の知見の融合と共創によってこれら社会課題を解決するため、“交通事故ゼロ”“渋滞解消”“快適な移動”“大気汚染の低減”“地球温暖化対策”“地域間格差の解消”“交通弱者のQOL(Quality Of Life)向上”というキーワードを設定し、開発に取り組んでいます。この特集では、これらの取組みの中から自動車と鉄道に関する技術について紹介します。

(注1) 経済損失額=各国ドライバー1人当たりの経済損失額／年
×各国人口2020年

(注2) Whimは、MaaS Global Oyの登録商標です。

インフラ連携狭域自動運転システム

Autonomous Driving Service in Dedicated Area Cooperated with Infrastructure

要旨

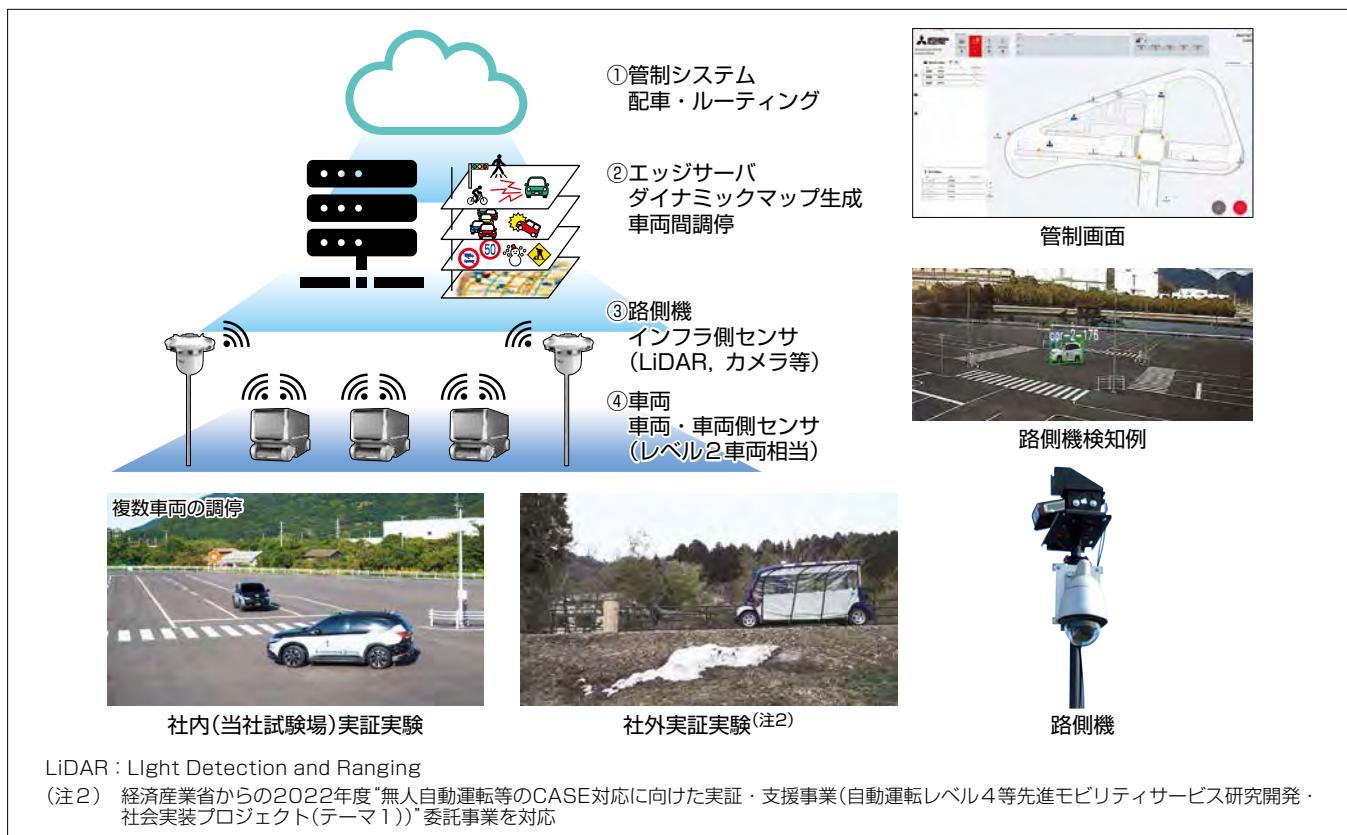
現在日本では少子高齢化に伴う労働人口の減少で、特にバス・トラックの運転などの労働力不足の問題が顕在化している。この問題は単なる産業低下ではなく、地方ではモノが届かない、移動できないという日常生活への影響へつながるため日本政府も力を入れて取り組んでいる。このような社会的背景の下、自動車産業に押し寄せる“CASE^(注1)”の波は、自動車業界だけにとどまらず、関係する周辺の産業までも巻き込んで、様々な変革を引き起こしている。

三菱電機は、あらゆる天候下で持続的にドライバーレスの自動運転が実現できるインフラ連携狭域自動運転システムの開発に取り組んでいる。このシステムでは、複数の路側機センサで検知した物標情報をあらかじめ持っている高

精度地図上にプロットし、リアルタイムに自動運転車両に配信することで、自動運転車両は自車両含めた周辺の情報を容易に取得できる。また自動運転の肝になる経路上の障害物情報をインフラで生成することで車両側は高精度に自車位置を検知する高精度ロケータの出力だけで経路に追従する制御が可能になる。

開発中の技術を活用した実証実験を通じて技術課題の解決を進めるとともに社会実装を進めて、持続可能なモビリティ社会の発展に貢献する。

(注1) Connected : コネクテッド
Autonomous : 自動運転
Shared & Service : シェアリング・サービス
Electric : 電動化



インフラ連携狭域自動運転システム

インフラ連携狭域自動運転システムは、エリア内の車両や歩行者を検知する路側機センサ情報から、エリア内の障害物情報を生成し車両に情報配信することで無人の自動運転を実現する。オンデマンド交通や物流センターなどへの展開が期待できる。

1. まえがき

政府がまとめた“官民ITS(Intelligent Transport Systems)構想・ロードマップ2020”(図1)にも述べられているとおり、現在の自動運転開発は、限られた時空間での自動運転を追求するもの(A=物流/移動サービス)とより多様な環境下での適用を追求するもの(B=オーナー・カー)という二つのアプローチで進められている⁽¹⁾。

実用化に関しては国内だけでなく世界中で多様な方式による自動運転の提案がなされ、多くの実証実験が実施中であるが、法令の整備や実現技術に関してまだ課題が残っており各社開発を進めている状況である。

本稿では、Aに関して当社が取り組んでいるインフラ連携狭域自動運転システムの開発及び実証実験の状況に関して述べる。

2. インフラ連携狭域自動運転システム

2.1 全体構成

物流/移動サービスの実用化のため、最も達成しなければならないのは車両から運転操作に係る対応に関するドライバーなし又はドライバーの主要なタスクを削減することである。エリアを狭域に限定して対応するのは、ドライバーには自動運転システムでは困難な個別具体的な対応が要求(例えば緊急車両への対応や警察官などの誘導指示など)されるが、運行条件を絞ることで実現可能な機能に特化し実用化するためである。

図2にこの開発でのインフラ連携狭域自動運転システムの構成図を示す⁽²⁾。インフラ側には車両の配車・走行経路を作成する管制システム、エリア内の物標を検知する複数の路側機、複数の路側機で得られた情報と高精度地図情報に基づいてダイナミックマップを生成するエッジサーバ(MEC: Multi-access Edge Computing)、自動運転車両をコールする停留所端末などで構成している。自動運転車

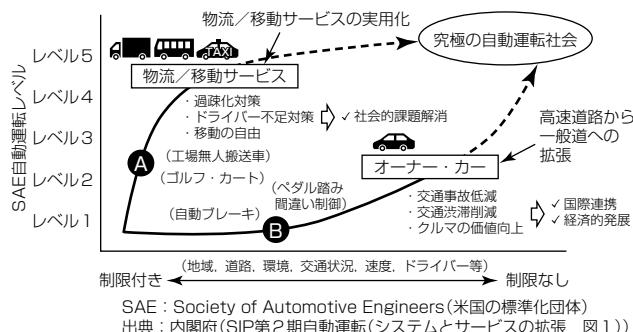


図1. 第2期SIP(Strategic Innovation Promotion Program)
自動運転の概要

両は通信アクセスポイントを通じて、ダイナミックマップ情報を取得し、高精度に自車位置を検知する高精度ロケータの情報に基づいて、最適な経路演算を実施し安全な車両制御を実現する。各システムで開発した機能移植性や演算処理・通信速度の進化に伴うスケーラビリティを考慮して、この開発では各システムのインターフェースにROS(Robot Operation System)2アーキテクチャを採用した。

2.2 路側機、MEC

インフラ監視の目的は自動運転車両を含めた自動運転走行路の安全監視及び最適化にある。2022年5月時点で多くの自動運転車両が実証実験を実施しているが、交差点、右左折など複雑な走行環境ではまだ安全面の課題を抱えている。これは、現在の交通社会で発生している交通事故と同様に死角が大きな要因の一つである。自動運転車両に多様なセンサを搭載しても大型車両や建物の物陰に隠れた物体の認知は困難である。インフラ監視の主要な目的は二つあり、一つはエリア内の全ての交通参加者の情報を高精度地図上にリアルタイムプロットすることで、自動運転車両の死角をなくして安全な走行を実現することである。もう一つは、エリア内の全ての自動運転車両の走行優先度を決めて、例えばドライバーが対応していた譲り合いの動作をシステム化して、運行サービスを最適化することである。

主な路側機及びMECの機能構成を図3に示す。路側機に設置されたLiDARとカメラのデータを各路側機に取り付けられた制御盤内の演算機で信号処理を行って物体を検出し、それらをMECで統合する。最後にMECで集約され

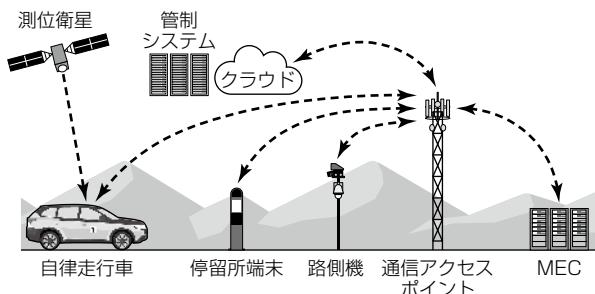


図2. インフラ連携狭域自動運転システム構成

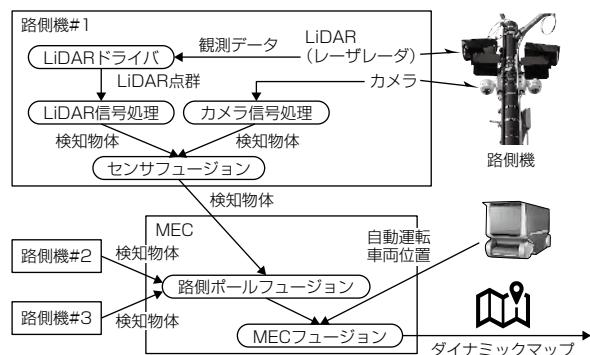


図3. 路側機及びMECの機能構成

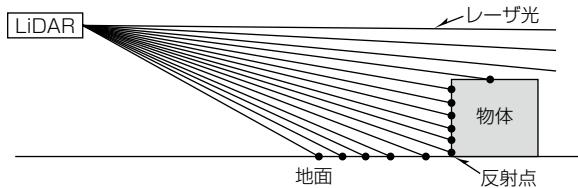


図4. LiDARによる照射と検知の概念

た情報をダイナミックマップとして統合し必要とする機器へ配信する。

米国AEYE社のLiDARを今回用いた。適用エリアによるが、半導体レーザよりも出力を高められるファイバーレーザを光源とした1,550nmの波長を使用し、FOV(Field Of View)をダイナミックに変更することで1km先まで認識できる性能を持っている。

図4にLiDARによる照射と検知の概念図を示す。LiDAR信号処理は、LiDARから取得した点群から、動的な物体(車両や人など)を検知する処理である。主に次の信号処理を施すことで物体を検知する。

(1) クロップ

高精度地図で指定された位置の不要な点群を除去する。

(2) 地面除去

平面に近似する点群を地面とみなして除去する。

(3) クラスタリング

一定距離内に集まる点群(クラスタ)ごとに分割する。

カメラはパナソニック社のWV-S2552LNJを用いた。信号処理として機械学習ベースの画像認識アルゴリズム(YORO v4, DeepSORT)を用いて、車両、トラック、二輪車、歩行者といった物体の種別と、その物体の三次元の位置算出を行う。このため、処理開始後の最初のステップとして一回だけ、①認識のためのネットワークモデルの構築が行われる。その後は、①カメラの各フレームでの画像を取得(読み込み)し、②取得したカメラ画像から物体検出アルゴリズムによって、物体の種別と、その二次元画像中の位置とサイズ(Bounding box)が検出され、③検出された物体は、フレーム間の相関処理(トラッキング)によってID(識別番号)が付加され、④物体の種別と二次元画像中の位置とサイズ、及びカメラのパラメータを用いて、三次元の世界座標系での位置とサイズを算出し、⑤物体種別と世界座標系での位置、サイズ、IDの情報を出力する。

最後にセンサフュージョンは物体同士の近さから相関を判断する仕組みを採用している。この処理は追尾処理も兼ねており、これによって物体が同じものであることを識別するためのIDを物体ごとに付加する。具体的にはある時刻で受信したLiDAR検知位置に対して、カメラ検知位置の予測移動位置を比較して近いものであれば、同じものとして扱い同じIDを付加する。予測移動位置はLiDAR検知時刻と最新のカメラ検知時刻との時間差と、検知物体の移

動方向、速度から運動モデル式を使用して算出する。運動モデル式は例えば等加速直線運動を表す式などを使用する。

2.3 自動運転車両システム

主要な車両システム構成図を図5に示す。ソナーシステム、ミリ波レーダーシステム、前方監視カメラシステムは主に自車両の走行経路を監視し、センサフュージョン処理に基づいて各障害物との衝突余裕時間を演算し、いざという場合の被害低減ブレーキの機能を持つ。通信機器システムはMECからのダイナミックマップ情報を受信し高精度ロケーターシステムの自車位置情報と合わせて経路生成を行う。高精度ロケーターシステムによる自車位置技術を制御の中心に置くことで、悪天候下などでも自車位置を検知することが可能になるため、システムの稼働領域が増える。またAD-ECU(Autonomous Driving - Electronic Control Unit)はハンドル、アクセル、ブレーキに相当する指令値を送信し、各アクチュエータが加速、操舵(そうだ)、制動を制御する。

経路生成には開発中の“PF-RRT”(Particle Filter Rapidly-Exploring Random Tree)⁽³⁾を用いた。パーティクルフィルタによって、車両が目標にする状態に近づくための状態変化を推定し経路を生成する。さらにRRTを用いて、ツリー(走行経路の候補)を拡大し、その中から到達コ

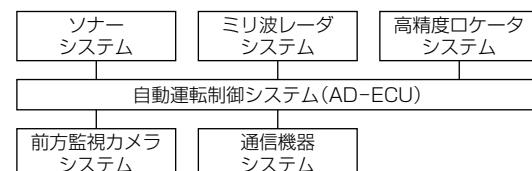


図5. 車両システム構成

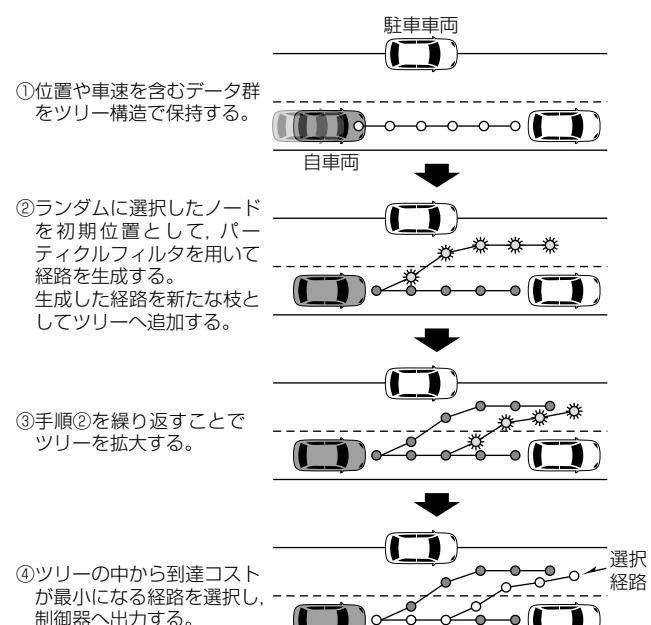


図6. PF-RRTによる経路生成の流れ

スト(距離等)が最小になる経路を選択する。これらによって複雑な環境に対応できる、滑らかな走行経路の生成が可能になる(図6)。

3. 実証実験

自動運転システムの実現のため、世界中で各社が実証実験を実施している。実証実験が必要な理由は主に、自動運転技術そのものの妥当性検証、実道路環境の椰証、サービス(ビジネス)妥当性の椰証、及び社会の受容性の椰証である。どれも技術に確立又は定式化されたものではなく各社独自に取り組んでいる。

3.1 社内実証実験

社内での実験は社外での実証実験の前評価や新しい機能の椰証を研究レベルから社外公開可能なレベルのものまで幅広く対応している。図7は兵庫県赤穂市にある当社の試験場であり、2021年10月に市街地路を模擬できる環境として新設した。

次にこの実験場を活用した椰証中の幾つかの結果について述べる。図8はインフラ連携狭域自動運転システムのシステム椰証の一部である。図8の左上から時計回りに、停留所端末を活用し乗車需要に応じたオンデマンド配車、狭域エリアを監視し故障などのトラブル対応を実施する管制システム、路側機で椰知した障害物をMECから車両に通信しその情報に基づく経路生成及び車両制御、複数台車両の優先車両を制御する調停制御をそれぞれ椰証している。どれも路側機で椰知された情報を用いて、MEC内で生成されたダイナミックマップ情報に基づいて制御されており、機能的な有効性は確認できた。このほかにも悪天候

下での評価、被害低減ブレーキ等危険な走行に関しても試験場内の椰証を実施中である。今後も実験シナリオを追加し、

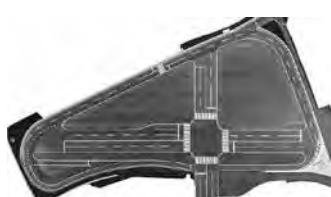


図7. 当社姫路製作所赤穂試験場



図8. 複数の実車を用いた椰証状況



(a) 自動運転車両

(b) 管制室

図9. 取組み成果の一部

信頼性を含めた評価を実施していく予定である。

3.2 社外実証実験

官民一体になって自動運転を活用して顕在化している多くの社会課題を解決するため、自動運転レベル4の社会実装を目的として、2021年度から“RoAD to the L4”が開始された⁽⁴⁾。この中でも2022年度“無人自動運転等のCASE対応に向けた実証・支援事業(自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト(テーマ1))”の取組みにに関して述べる。この取組みは①2022年度中途に限定エリア・車両での遠隔監視だけ(レベル4)で自動運転サービスを実現すること、②遠隔監視だけ(レベル4)の基本的な事業モデルや制度設計を確立することを成果目標とし、幹事機関の国立研究開発法人 産業技術総合研究所、ヤマハ発動機株、(株)ソリトンシステムズ及び当社でコンソーシアムを組んで2021年度から取り組んでいる(図9)。役割としては取りまとめを国立研究開発法人 産業技術総合研究所、車両対応をヤマハ発動機株、通信・遠隔制御を(株)ソリトンシステムズ、自動運行装置を当社が対応している。今後もサービス実現に向けたエコシステムを構築し他エリアへも展開していく予定である。

4. むすび

自動運転に関しては、交通事故削減、高齢ドライバー事故対策、少子高齢化に伴う労働力不足などの社会課題解決に強い期待がある。世界中でこのエリアの事業化競争が行われており技術開発・社会実装の遅れは日本の経済や国際競争力に影響を及ぼす可能性がある。引き続きミッシングを補完する企業と連携協力して安心・安全・快適な社会の実現に向けて貢献していく。

参考文献

- 官民ITS構想・ロードマップ2020 | SIP-adus : https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_2020.pdf
- 竹原崇成、ほか：インフラ協調型自動運転向け車両間調停システム、三菱電機技報、95、No.7、441～444 (2021)
- 三菱電機株：自動運転のための経路生成・車両制御技術 <https://www.MitsubishiElectric.co.jp/corporate/randd/list/mechatronics/b236/index.html>
- 経済産業省：「自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト(RoAD to the L4)」について https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/automobile/Automated-driving/RoADtotheL4.html

ADAS制御機能とボディ制御機能を統合したECU

Electronic Control Unit Integrating ADAS and Body Control Function

森 正憲*

Masanori Mori

鴨井亮二*

Ryoji Kamoi

竹内 佑*

Yu Takeuchi

平出拓也*

Takuya Hirade

要旨

近年、車の安全性向上のために、先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance System: ADAS)の普及が進んでいる。ADAS機能の高度化に伴い、機能を実現するためのECU(Electronic Control Unit)の搭載数は年々増加しており、搭載体積やコストの増加が課題になっている。

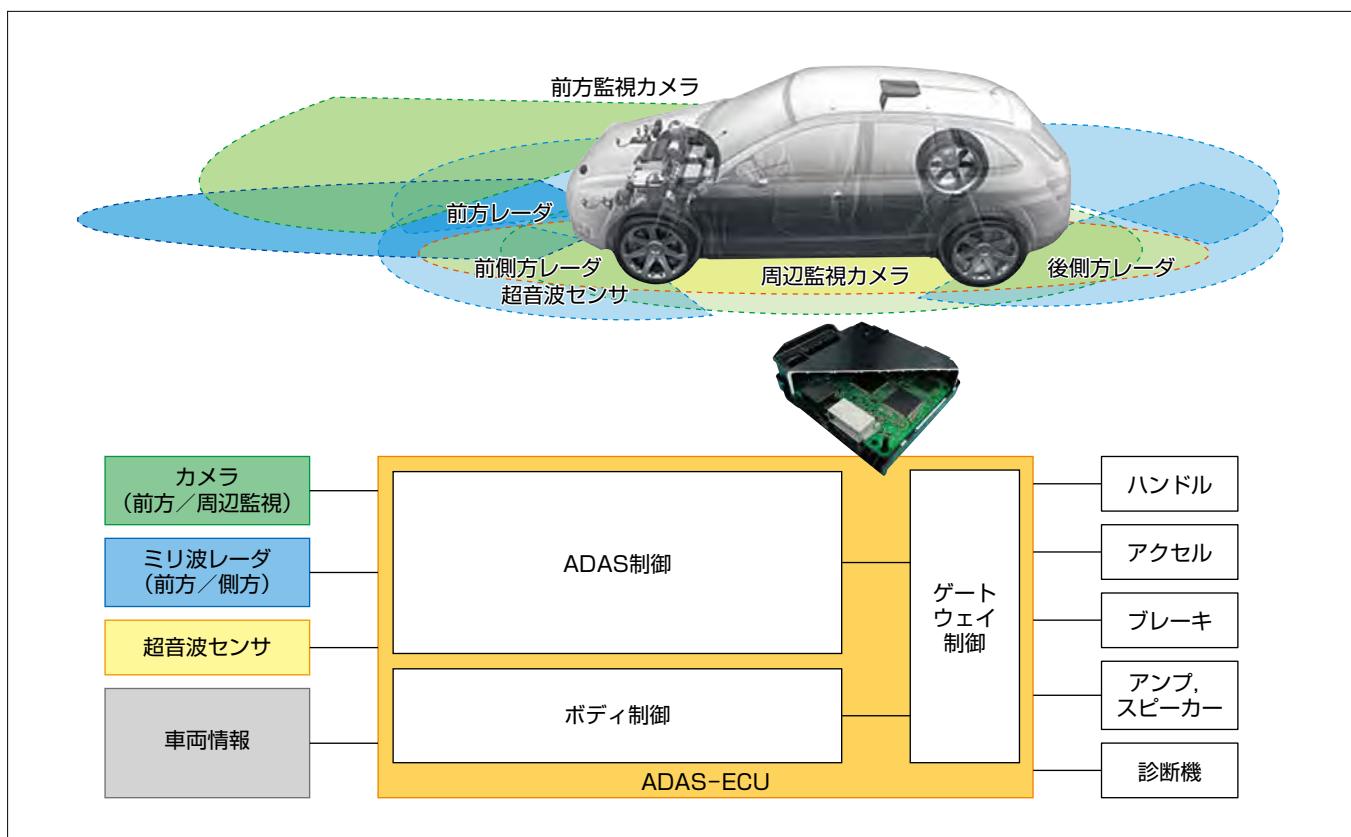
三菱電機では、ボディ制御機能とADAS制御機能を一つのECUに統合した統合ユニット(ADAS-ECU)を量産化した。

このユニットでは、従来ユニット⁽¹⁾に対するADAS機能の進化に対応するため、ボディ制御、ゲートウェイ制御、ADAS制御の各制御マイコンを高性能化した。これに伴い回路規模の増加と放熱が課題になったため、機能配分を見直して筐体(きょうたい)サイズの維持と放熱対策とを両

立した。

また、このユニットのシステム構成では、外部ユニットとの通信の信頼性の確保が重要になるため、機能安全規格に適合するよう各制御マイコンのタスク分離などの安全機構を設計した。さらに、自動車サイバーセキュリティ法規及びプロセスへの適合も実現した。

ADAS制御機能としては、予防安全に関する複数のセンサ情報の融合(センサフュージョン)で時刻同期を不要にする技術によって、搭載センサ数に対する拡張性を確保した。また、最適化問題を高速に解くためのソルバ(数値的に解を求めるプログラム)の開発によって、モデル予測制御のマイコン実装を可能にして、快適で高精度な車両制御を実現した。



ADAS-ECUアーキテクチャ

ADAS制御機能とボディ制御機能を一体型のADAS-ECUに統合することで搭載体積及びコストを低減する。各制御マイコンの高性能化によって機能高度化を実現するとともに、機能安全、自動車サイバーセキュリティに対応する。複数センサ情報の非同期融合、高速ソルバによるモデル予測制御の実装によって高度なADAS機能を実現した。

1. まえがき

近年、車の安全性を向上させるためのADASの普及が進んでいる。2021年11月以降の国産新型車には自動ブレーキが義務化されており、また2030年には自動運転レベル2の搭載率が全世界で26%になると見込まれている⁽²⁾。

ADAS機能は、光学カメラやミリ波レーダなどの予防安全に関する車載センサを用いて周囲の状況を認知し、最適な自車運動を判断し、アクセル・ブレーキ・ハンドルを制御するものである。具体的な機能には自動ブレーキ、先行車追従、車線維持支援などがある。ADAS機能の高度化に伴い、これらの機能を実現するためのECUの搭載数は年々増加しており、搭載体積やコストの増加が課題になっている。

そこで、ADAS制御機能と、車両電装品(ライト、ワイパー等)の駆動制御を行うボディ制御機能を一体型のECU(以下“ADAS-ECU”という。)に統合し、搭載体積及びコストを低減する。当社では機能安全規格への適合及び車に対するサイバーアクションへの対策を実装したADAS-ECUを開発し、当社として初めて自動車サイバーセキュリティに対応した製品を量産化した(図1)。

本稿では、開発したADAS-ECUのハードウェア構成、セキュリティ機能及びADAS機能の特長について述べる。

2. ADAS-ECUのハードウェア構成

このユニットでは、車両電装品の駆動制御(ライト、ワイパー、室内灯等の制御)を行うボディ制御、車両電装品からの信号に対して調停処理を行うゲートウェイ制御、及びADAS制御を行っている。

従来ユニット⁽¹⁾でもこれらの制御を一つのECUで実現していたが、ADAS機能の進化、各制御の高機能化やサイバーセキュリティに対応するため、それぞれの制御用マイコンを高性能化する必要があった。特にADAS制御



図1. ADAS-ECU

用のマイコンはCPUのコア数や周波数、メモリサイズ等、大幅な性能アップを要求された。一方、車両への取付け構造と外形サイズは従来ユニットと共通であることが求められた。筐体外形の変更ができない制限がある中で、マイコンの高性能化に伴う発熱対策が必要になった。

これらの課題に対応するため、従来ユニットではADAS制御でユーザーへの注意喚起として音での報知をするための音声出力用の回路を搭載していたが、機能配分の見直しを行い、高発熱素子が必要な音声出力用の回路を外部化した。これによって、マイコンの搭載スペースを確保し、高性能化した各制御用マイコンの放熱性と回路規模の増加への対応を成立させるとともに、大型のヒートシンクを廃止し、コストダウンを達成した。

また、ボディ制御、ADAS制御で求められるサイバーセキュリティに対応した回路を搭載した上で、筐体構造、回路構成は可能な限り従来ユニットから踏襲した。これらによって、筐体サイズの維持と放熱対策とを両立できた。

3. ADAS-ECUのソフトウェア構成

3.1 システム構成と機能安全及びセキュリティ

このユニットのシステム構成を図2に示す。基本的な構成として、ADAS機能に関連する通信はADAS制御用マイコン、ボディ制御やキーレス制御等に関する通信はボディ制御用マイコン、他のシステムやダイアグ通信のような外部通信はゲートウェイを介して接続する。また、2章で述べたとおり、従来ユニットと異なり音声出力用の回路は外部に配置し、このユニットとは通信によって接続する。なお、実装に当たっては車両のネットワーク構成に合わせたカスタマイズを行っている。

このユニットは機能安全規格ISO 26262に適合して開発を行っている。従来ユニットでも同規格に適合しており、マイコンを三つ搭載する基本構成が同じであるため、従来ユニットでの安全設計を大きく変更することなく実現している。

このユニットでは多くの機能を統合しているが、図2に示すように各機能が制御するアクチュエータ(ハンドル、アクセル、ブレーキなど)は直接駆動するのではなく、バスを介した通信で駆動指示を出力するものが多い。安全に関連する機能についても同様であり、例としてヘッドライト、ワイパーなど、運転手の視界確保という安全面で重要な機能では、運転手が操作するスイッチ入力を別の制御ユニットが行い、このユニットは通信で受け取る。出力についても、ヘッドライト駆動を担当する制御ユニットに通信で指示を出す。このため、安全設計では通信の信頼性確保

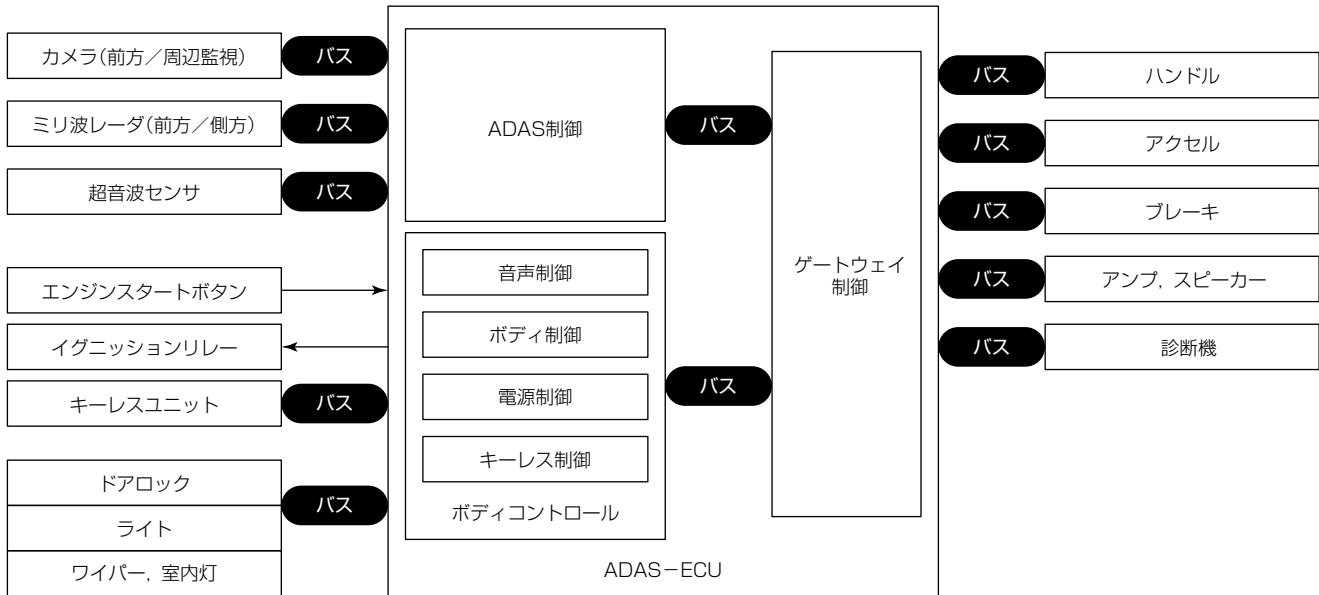


図2. ユニットのシステム構成

が重要になる。

そこで、通信の信頼性を担保する安全機構が確実に動作するよう、タスク分離などを考慮した安全設計を実施した。さらに、マイコン自体に異常が発生した場合に対処するため、マイコン外部監視を行っている。このユニットで複数のマイコンを搭載している特徴を活用して、マイコン間での相互監視を行い、異常時にリセットする機構を実装した。

また、自動車でのサイバーセキュリティに関する法規UN-R155が2021年に施行され、サイバーセキュリティ管理プロセスを持つことが求められている。その具体的なプロセスとしてISO/SAE(Society of Automotive Engineers)21434が発行されている。これらに適合するためのプロセスを整備し、このユニットの開発に適用した。

3.2 センサフュージョン機能

ADAS機能には自車周囲の状況認識が不可欠である。夜間や雨天、追越し・合流・交差点などといった多様な運転シーンに対応することが求められ、これには単独のセンサでは限界がある。このため、ミリ波レーダや光学カメラなどの複数のセンサ情報を融合するセンサフュージョンを用いることで、単独のセンサではなしえない認識精度や認識範囲を達成する。

センサフュージョンは、各センサが検出した車両や歩行者などのオブジェクトを同定した融合オブジェクトを生成し、それらの位置や速度などを推定する。ここで、センサは各々独立に観測を行うため、ADAS-ECUでのセンサデータの受信が非同期になる。センサの観測時刻がずれていると同定に誤りがあったり、融合オブジェクトの推定精度が劣化したりするため、観測時刻差を解消する必要があ

る。また、単純にセンサオブジェクト同士を直接組み合わせて同定する場合、その処理時間はセンサオブジェクト数の総乗に比例するため、搭載センサ数が増えると処理負荷が問題になる。

そこで図3に示すように、各センサからデータを受信するごとに、同センサの観測時刻での融合オブジェクトを予測し、センサオブジェクトと融合オブジェクトとを同定する。この方法では、融合オブジェクトの予測によってセンサの観測時刻差を解消することで、時刻同期を不要にする。また、処理時間はセンサオブジェクト数の総和に比例しており、搭載センサ数に対する処理負荷を軽減する。

図4に自車前方の先行車をセンサフュージョンした結果の例を示す。ここで、縦方向距離はカメラよりもレーダが高精度である誤差評価結果を反映し、非同期のセンサデータに対して融合オブジェクトは真値に近い精度を達成している。

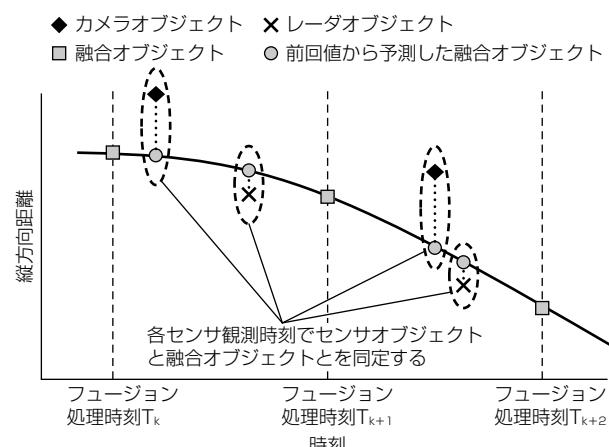


図3. 非同期データ融合によるセンサフュージョン

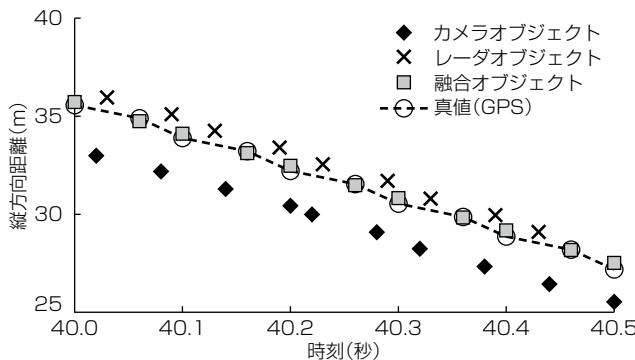


図4. センサフュージョン結果

3.3 モデル予測制御によるADAS制御機能

ADAS制御の高度化のため、モデル予測制御技術の開発に取り組んでいる。モデル予測制御では、モデル化された制御対象の未来の挙動を予測し、その予測挙動に対して最適な制御入力を演算する。この予測で多様な制約条件を考慮することで制御を高性能化できるため、複雑な条件下で最適な動作を実現できる。

モデル予測制御をADAS制御に適用する場合、まず車両諸元やアクチュエータの遅れなどの車両動作特性を数理モデル化し、考慮すべき要素の目標値との差分を評価関数として定義する。その上で設定した期間内の車両挙動を予測し、車両挙動に基づいた評価関数が最小になるような制御入力(操舵(そうだ)制御量や車両速度制御量)を算出する。ここで、モデル予測制御は複数の制御入力に対する評価関数を設定できるため、縦方向と横方向の運動の統合制御を適用できる。また、未来の車両挙動を含めて最適化問題を解くことで、設定車速や先行車との車間維持のための車速制御や、道路白線や先行車軌跡などの目標経路に対して車両を制御する経路追従制御などで、従来の制御手法よりも乗り心地性能や目標追従性能を改善し、ADAS機能全体の性能向上を図ることができる。

しかしながら、モデル予測制御はリアルタイムに最適化問題を解く必要があるため、処理負荷が非常に高くなるという課題がある。特にADAS制御では、乗り心地性能や目標追従性能の向上だけでなく、様々な交通環境へ対応する必要があり、考慮すべき制約条件が多くなる。制約条件が多いほど最適解の導出過程が複雑になるため、モデル予測制御を適用するには高価な高性能SoC(System on a Chip)が必要とされた。

この処理負荷の課題に対して、最適化問題を高速に解くためのソルバを開発し、車載向けマイコンへの実装を行った。当社ソルバ⁽³⁾は、有効制約法を用いたソルバであり、最適性条件から導かれる連立一次方程式を前処理によって

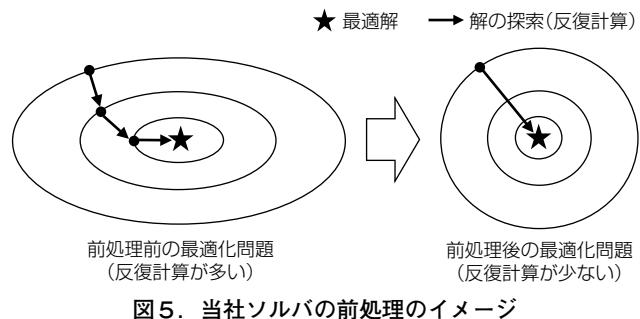


図5. 当社ソルバの前処理のイメージ

効率的に解くことで、最適解を導出する反復回数を抑制する(図5)。その結果、最適化問題を解くための処理負荷を大幅に低減し、汎用の最適化アルゴリズム(オープンソースの最適化ソルバ⁽⁴⁾)よりも高速な求解を達成した。これによって、モデル予測制御を廉価な車載向けマイコンへ適用することが可能になり、高度なADAS制御による車両制御を実現できた。

4. む す び

ボディ制御機能とADAS制御機能を統合したADAS-ECUについて述べた。

ハードウェア構成として、従来ユニットに対して筐体サイズを維持しながら機能高度化に対応するため、制御マイコンを高性能化するとともに機能配分を見直すことで放熱対策を行った。

システム構成として、外部ユニットとの通信の信頼性を確保するため、各制御マイコンのタスク分離などで機能安全規格に適合した。併せて自動車サイバーセキュリティのプロセスへの適合を行った。

ADAS機能として、時刻同期を不要にするセンサフュージョン機能によって搭載センサ数に対する拡張性を確保した。また、最適化問題を高速に解くためのソルバを開発し、車載向けマイコンへのモデル予測制御の適用を実現した。

今後、路車間・車車間通信との連携や車室内センサの活用等、より高度な自動運転レベルに対応した製品開発を進めて、安全で快適な交通社会の実現に貢献する。

参 考 文 献

- (1) ADAS統合ボディコントロールユニット、三菱電機技報, 94, No.1, 20 (2020)
- (2) 総合技研(株)：2022年版 自動運転システムの現状と将来予測 (2022) <http://www1.odn.ne.jp/sogogiken/jidounten/2022jidounten.mihon.pdf>
- (3) 車両制御向けモデル予測制御技術、三菱電機技報, 95, No.1, 71 (2021)
- (4) Ferreau, H.J., et al. : qpOASES : A Parametric Active-set Algorithm for Quadratic Programming, Mathematical Programming Computation, 6, 327~363 (2014)

車室内モニタリングのロバスト性評価

Robustness Evaluation Using Simulation Tool for In-Vehicle Monitoring System

米山昇吾*
Shogo Yoneyama
藤田偉雄†
Takeo Fujita

要旨

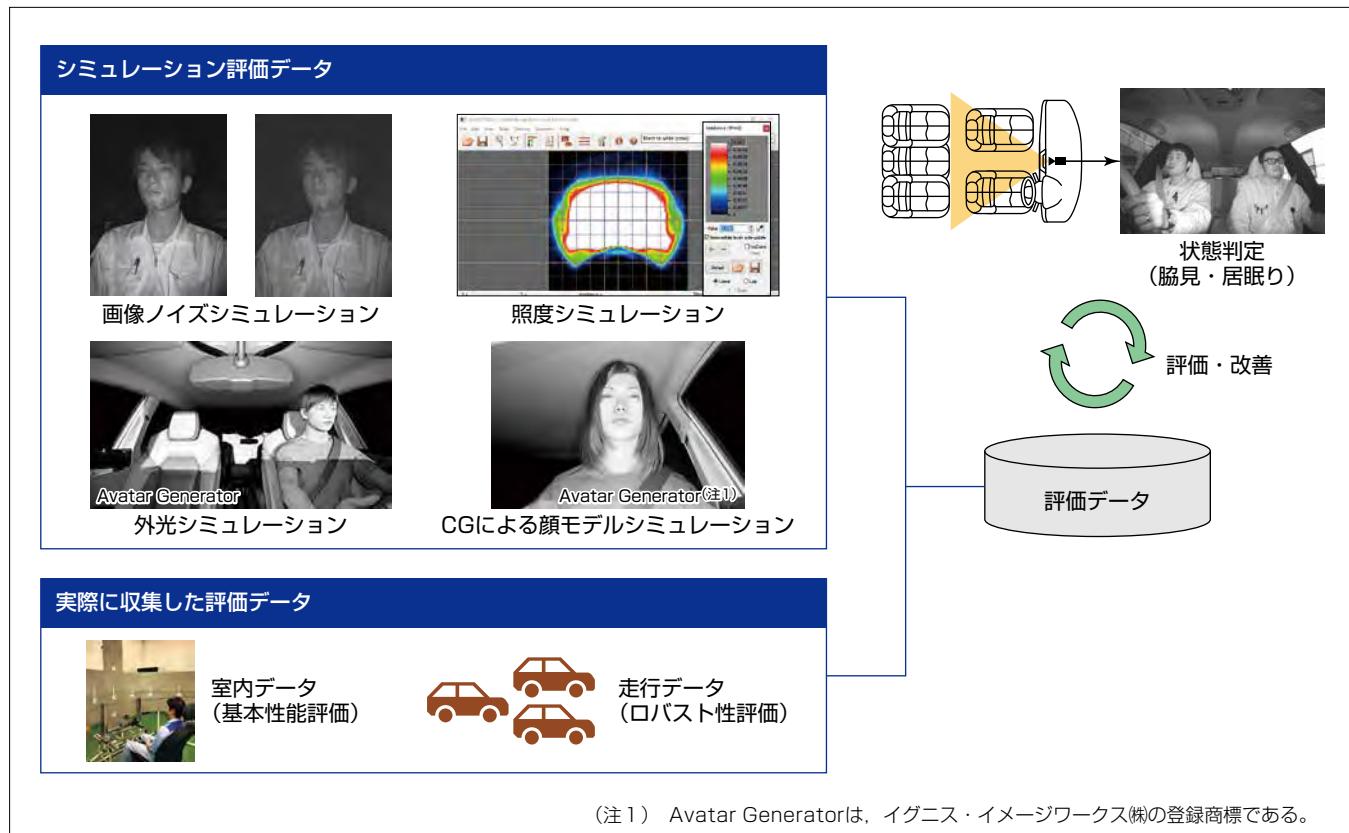
車内に設置したカメラを利用して乗員の状態を把握する車室内モニタリングシステム(IMS)は、先進運転支援システム(ADAS)の一つとして急速に普及しており、安全運転支援の重要な機能になっている。欧州連合は、自動車の安全性に関するアセスメントとして、EuroNCAP(The European New Car Assessment Programme)を規定し、2024年までに全車両への乗員モニタリング機能の搭載を促進している。

IMSでは、利用目的や車両のインテリアレイアウトなどの制限によって、カメラの設置位置や角度、撮影範囲が異なる。また、多種多様な環境・ユーザーに対するロバスト

性が確保できなければ、商品性を欠くことになる。これらの多岐にわたる変動要因に対して、安定した乗員の状態判定を行うために、三菱電機ではシミュレーションツールを利用した評価方法を実施している。

評価方法は、カメラ設置位置や、各種センサが高温状態になることで生じるノイズなどカメラ画像に与える要因の評価と、撮影対象とする乗員の変動要因(目の大きさやマスク有無など)に関する評価の大きく二つに分類できる。

今後は、シミュレーションツールを活用できるシーンを増やしていくとともに、IMS機能のロバスト性改善を進める。



IMSで利用する評価データ例

IMSで、乗員の状態判定を行う性能が担保できているかの確認に利用する評価データの例である。IMSでは、顔向き角度や、開眼度、視線角度の検出精度を評価する基本性能評価と、走行時での乗員の状態判定精度を評価するロバスト性評価を行う。これらの評価に加えて、シミュレーションツールを用いた評価によって、IMSのロバスト性向上が可能になる。

1. まえがき

ADASの急速な普及に伴い、車内に設置したカメラを利用して乗員の状態を把握するIMSは重要な機能になっている。IMSは、近赤外線LEDと近赤外線カメラで撮影された乗員の顔画像から、顔向き角度や、開眼度、視線角度といったセンシング情報を検知し、これらの情報から脇見や居眠りなど乗員の状態判定を行う⁽¹⁾。

カメラで撮影される車室内は、昼間、夜間での照度レベルの変動幅が大きく、車両の向きによって外光の影響も刻々と変化するので、対応すべき被写体の条件変化が激しい。また多種多様なユーザーが利用するため、これらの変動に対応しても安定した性能を発揮する必要がある。このためには、性能に影響を与える要因を評価し、抽出された課題の対策を事前に行うことが望ましい。

本稿では、シミュレーションツールを利用し、カメラ画像の変動をシミュレーションした評価と、撮影対象になる乗員の変動をシミュレーションした評価によって、IMSのロバスト性改善を効率的に行う方法について述べる。

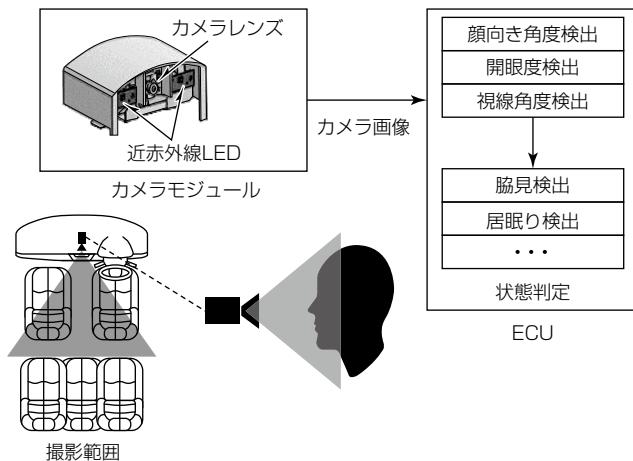
2. IMSのシステム構成と性能に与える要因

2.1 システム構成

IMSは、カメラモジュール(近赤外線カメラ、近赤外線LED)と、ECU(Electric Control Unit)で構成される。撮影対象とする範囲を近赤外線LEDで照射し、撮影された乗員のカメラ画像をECUで画像解析することで、乗員の状態判定を行う(図1)。

2.2 乗員の状態判定性能に与える要因

IMSでは、利用目的や車両レイアウトなどの制限によって、



カメラの設置位置や角度、撮影範囲が異なる。また、多種多様な環境・ユーザーに対するロバスト性が確保できなければ、商品性を欠くことになる。これらの多岐にわたる変動要因に対して、安定した乗員の状態判定を行うために、当社で実施しているシミュレーションツールを利用した効率的なロバスト性評価方法について述べる。シミュレーション評価に当たって、乗員の状態判定性能に与える影響を、カメラレイアウトや、ノイズなどによるカメラ画像に与える要因と、撮影対象とする乗員の変動要因(顔やマスク有無など)の大きく二つに分類し、3章以降で述べる。

3. カメラ画像への影響要因とシミュレーション評価

車載環境でカメラを使用する際、画像に影響を及ぼす要因は多岐にわたる。次に分類ごとに要因を述べる。

3.1 カメラ画像での性能低下要因

(1) 照明条件(時間帯、天候、対向車、LED照明強度)

車載カメラは、車両の移動によって頻繁に撮影条件が変動し、昼間／夜間で車内の照度変化が激しい。特に夜間は道路照明や対向車のヘッドライト等の強力な照明器具から入射する光の影響を受けて、一般的なカメラと比較し、急激な照度変化にさらされる傾向がある。これらの照度変化は、カメラ画像の白飛びや、乗員の顔に車両構造物の影などのコントラスト変化を生じさせる。

(2) レンズ種別(画角、F値、歪(ひず)み)

車載カメラは、利用目的や車両レイアウトによって、必要な撮影範囲(画角)が異なる。カメラの画角はレンズの焦点距離とセンササイズの組合せで決まり、焦点距離の値が小さいほど撮影画像の画角は広くなる。またF値はレンズの明るさを示し、値が小さいほど撮影画像が明るく、カメラとしての感度が高くなる。F値は焦点距離／レンズ口径の値に比例するため、画角を広くするために焦点距離の値が小さいレンズを使う場合には、同じ口径のレンズであってもカメラの感度は高くなる。一方で同一センサに広い画角のレンズを組み合わせた場合、画素ごとに割り当てる被写体画角が大きくなり、撮影画像の解像度は低下する。このようにレンズの特性は様々なトレードオフから成り立っており、製品の用途、目標性能に合わせて適切な組合せを選択することが重要になる。またレンズに起因する画質劣化要因として光学歪みが挙げられる。これは画像周辺部で曲がって撮影される現象である。

(3) デザイン(カバー有無など)

デザイン上の必要性から、装置自体が目立たないようにカバーを設けるケースもある。こういった場合、カバー越しに撮影することによる撮影画像のコントラスト低下、解

像度低下が発生し、検知処理精度に影響する可能性もあるので、十分な事前検討が必要である。

(4) 温度条件、経年劣化

(1)(2)(3)以外ではセンサ温度の影響や経年劣化による影響が挙げられる。センサ温度は一般に高温になるほど撮影画像に重畳されるノイズが増加する。経年劣化の影響には様々なものが考えられ、欠陥画素と呼ばれる被写体の明暗に反応しない画素の増加、高温環境に長時間さらされることによる表面部材の透過率低下のためセンサ感度の低下などが発生する。

3.2 照度シミュレーション評価

3.1節の(1)(2)で述べたとおり、車室内の照度変化は大きいため、IMSでは、太陽光に含まれる比率が低い波長の近赤外線LEDを用いることで、外光の変動を抑えて、安定した画像が得られるような対策を行っている。近赤外線LEDは、判定対象とする乗員のカメラ画像を適切な明るさで鮮明に撮影するために重要な役割を担っており、その配置や照射方向は対象とする撮影範囲で異なる。撮影対象とする乗員の撮影され得る範囲はあらかじめ定められており、シミュレーションツールを利用することで、この範囲内の被写体の照度分布を設計段階から予測可能になり、効率的な開発を行うことができる。図2に照度シミュレーションの画面例を示す。シート位置やユーザーの体格に基づいて定められた乗員の撮り得る範囲に対して、適切な照度条件を満たしているかの確認を行う。最後に、設計されたカメラモジュールで撮影したカメラ画像が、期待する照度条件で撮影されているかの検証を実施する。このシミュレーションは、被写体を一部遮蔽するような車両構造物が存在する場合など複雑な条件下で非常に有効である。

3.3 カメラ画像シミュレーション評価

3.1節で挙げた様々な影響要因を踏まえて、撮影画像シミュレーションツールを開発した。適用先の車種やデザインコンセプトによって要求仕様が変化するIMSでは、製品ごとに細かく構成部材の変更が発生する可能性がある。IMSで性能評価が必要な機能は多岐にわたり、変更のたび

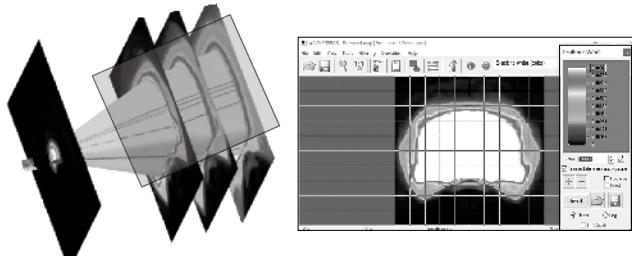


図2. 照度シミュレーションの画面例

に評価用画像を全て撮影し直すことは開発工数の増大につながる。これに対して、少数のサンプル画像を用いて部材変更に伴う画質への影響を予測し、既存の評価画像をベースに影響をシミュレートした画像を生成して性能評価に用いることができれば、効率的に性能を担保することが可能になる。

シミュレーションツールでは、考え得る全ての影響要因に對して影響を予測できることが理想であるが、今回は車種やデザインコンセプトによって影響を受ける3.1節(2)(3)(4)に着目し、次の三つの調整項目を策定した。

- ①ゲイン
- ②ノイズレベル
- ③解像度低下

このうちゲインとノイズレベルはセンサとレンズの組合せ、及びカメラ前面カバーによるカメラ全体での感度変化による影響を再現するための調整項目である。また解像度低下は主にカメラ前面カバーによる撮影画像のぼやけを再現するための調整項目である。

処理例を図3及び図4に示す。図3は元になるサンプル画像である。(a)が部材変更前のシステムで撮影した画像、(b)が部材変更後のシステムで撮影した画像である。図4はサンプル画像の特性の変化に基づいて、図3(a)の画像からシミュレーションツールを用いて生成した画像である。ノイズレベルやコントラストなど、図3(b)と同等の特性を再現できていることが分かる。

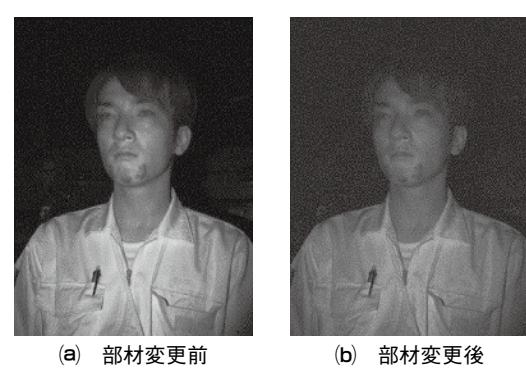


図3. サンプル画像例



図4. 撮影画像シミュレーション適用例

4. 乗員の変動に対するシミュレーション評価

この章では、当社で実施している乗員の変動に対するロバスト性検証の中から、特に“環境ロバスト性”“個人差ロバスト性”で利用しているCG(Computer Graphics)を活用したシミュレーション評価について述べる。

4.1 環境ロバスト性シミュレーション評価

環境ロバスト性の評価は主に、人工的な光や太陽光などの光環境の評価を指す。3.1節(1)で述べたように、車室内の照度変化は、乗員のカメラ画像で、影などのコントラスト変化を生じさせる。これらの影響に対する評価を行うには、朝日や日没、雪面反射などの様々なケースを実際に走行し、収集したデータを用いて、性能低下の有無を確認し、対策改善を行うプロセスを踏む必要があり、多大な時間を要する。また、運転者の体格や座席位置の調整によって陰影の生じる位置は異なるため、網羅的な評価をデータ収集で行うには限界がある。

シミュレーションツールでは、光源設定によって、車室内環境での照明変動環境のカメラ画像を生成できる。図5に実際に撮影した太陽光の影響で顔に生じたコントラストの例を示し、図6にCGによるシミュレーションツールで生成したコントラスト例を示す。シミュレーションツールで実際のコントラストと同様に車両の構造による影響を再現できていることが確認できる。このように、様々な光源位置で任意のコントラストを再現でき、ロバスト性評価を効率良く実施することが可能になる。また、シミュレーション評価では再現性が確保されるため、一つの機能に課題が見つかった場合、同一のコントラストを発生させた状



図5. 実際に撮影した太陽光のコントラスト例



図6. CGで作成した光のコントラスト例

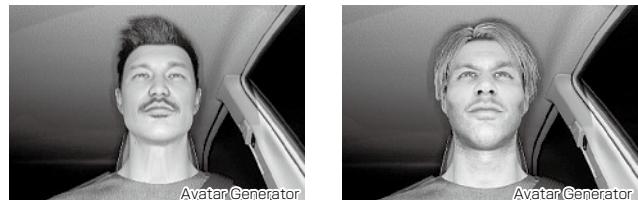


図7. CGで作成した顔(目が細い／鼻が高い)の例

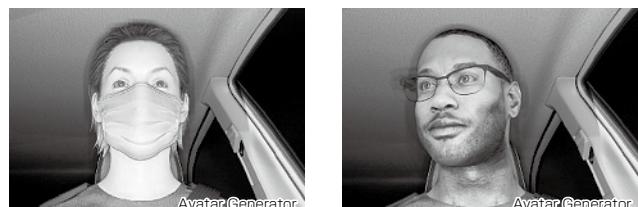


図8. CGで作成したアクセサリー(マスク／メガネ)例

態で乗員の行動を変更させ、IMSの提供する全ての機能が同一環境下で正しく動作するかの検証を行うことができ、ロバスト性の確認に有効に活用できる。

4.2 個人差ロバスト性シミュレーション

個人差ロバスト性は、人ごと及び同一人物内の変化に対してIMSが担保すべきロバスト性である。個人内での化粧の有無やひげの有無などによって、結果が大きく異なれば商品性を欠く。当社では、国内外でのデータ収集及び個人変動を再現したデータ収集を行っているが、十分とは言い難い。両目間の距離や、目の大きさ、鼻の高さなど統計データ上、両端に位置する顔をCGで生成し、性能評価を行うことで、ロバスト性の向上を行なうことが可能になる(図7)。同時に、メガネやマスクといった装飾品に関するロバスト性に関しても検証が可能であり、CGシミュレーションはロバスト性の向上に有効に利用できる(図8)。

5. むすび

IMSのロバスト性向上に対して、カメラ画像に影響を与えるノイズ要因や、撮影対象になる乗員の変動要因に関するデータシミュレーションの利用について述べた。ただし、シミュレーション評価の利用は、実際に収集したデータによる評価結果と、シミュレーションツールで生成した画像での評価結果が同じ傾向を示すことが前提条件になる。

今後は、IMSの機能のロバスト性改善を進めるとともに、性能限界の見極めを行うために、シミュレーション評価が適用できるシーンを増やしていく予定である。

参考文献

- (1) 熊谷太郎：車室内モニタリングシステム、三菱電機技報、93, No.5, 296~299 (2019)

特集論文

世界初の鉄道車両向け 同期リラクタンスマータシステム

Synchronous Reluctance Motor and Inverter Traction System for Railway

山下良範*
Yoshinori Yamashita

寺本晃大†
Kota Teramoto

金子健太*
Kenta Kaneko

菅原徹大*
Tetsuo Sugahara

要旨

近年、エネルギー、イノベーション、気候変動に対する国際目標であるSDGs(Sustainable Development Goals)によって、持続可能なエネルギーの確保と利用拡大に向けた活動に注目が集まっている。また、昨今のエネルギー需給を取り巻く情勢の変化や、レアアース等、希少材料の調達上のリスクが高まっており、省エネルギー化に加えて、省資源化についても以前にも増して必要性が高まっている。

今回、レアアースを用いず世界最高レベルの高効率化を実現する同期リラクタンスマータ(Synchronous Reluctance Motor: SynRM(シンアールエム))と、それを可変速制御す

るインバータ制御技術を鉄道車両では世界で初めて^(注1)開発し、SynRMで世界最大級となる最大出力450kWの高出力・可変速駆動に成功した。それらの技術を独自の鉄道車両推進システム“SynTRACS(シントラックス、Synchronous reluctance motor and inverter TRACtion System)”として開発を進めてきた。その適用性や省エネルギー性能を確認するため、東京地下鉄株日比谷線13000系車両へ試験搭載し、実環境での実証試験を実施した。

(注1) 2020年11月26日現在、三菱電機調べ



SynTRACSの特長

同期モータに分類されるSynRMは、鉄道車両に多く使われる誘導モータと比較して回転子の発熱損失が少なく、効率や質量特性に優れることが特長である。今回、高効率化技術の適用でSynRMの力率を改善した、世界最大級の最大出力450kW(定格200kW)を実現する鉄道車両用SynRMを開発した。また、インバータ制御技術として、鉄道車両用途で要求されるトルク制御を実現するためのベクトル制御を開発した。SynRMが持つ高効率という特長を最大限に発揮するインバータ変調方式を適用することで、省エネルギー化を実現した。

1. まえがき

1997年の京都議定書が採択されて以降、地球温暖化防止対策として鉄道の活用が進められてきたが、2018年に国連でSDGsが採択され、更に幅広い視野での社会課題解決が必要になっている。その中で当社は交通事業で培った技術で、持続可能で安心・安全・快適な、豊かな社会の実現に取り組んでいる。エネルギーの効率的な利用という面では、当社は2012年2月に従来よりも高効率な全閉形誘導電動機とハイブリッドSiCパワーモジュール(IGBTをSi(シリコン)、ダイオードをSiC(シリコンカーバイド)としたパワーモジュール)を適用したインバータ装置を組み合わせた主回路システムを世界に先駆けて^(注2)営業線に導入した。この主回路システムの適用によって、電力回生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与している。

SDGsの省エネルギー目標に対して更に貢献するためには、多様な主回路システムに柔軟に対応し、幅広い市場に高効率な主回路システムを使用できるよう新たな主回路システムを開発する必要があった。今回、レアアースを用いずに世界最高レベルの高効率化を実現するSynRMと、それを可変速制御するインバータ制御技術を鉄道車両では世界で初めて開発し、SynRMで世界最大級となる最大出力450kWの高出力・可変速駆動に成功した。それらの技術を独自の鉄道車両推進システムSynTRACSとして開発を進めてきた。

本稿では、このシステム開発の成果、及び試験搭載車両の営業線適用での実証結果について述べる。

(注2) 2012年9月27日現在、当社調べ

2. SynTRACS開発背景

2.1 省エネルギー主回路システムの開発変遷

鉄道車両を駆動する主回路システムは、鉄道車両の省エネルギー性能を高めるため、多種多様に進化を続けてきた。

特にSiC素子適用インバータ装置の誕生をきっかけに、従来よりも高効率な誘導電動機(Induction Motor: IM)や、全閉形主電動機の軽量化、主電動機⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾の高出力化

による回生性能向上等、継続した省エネルギー主回路システムの開発を経て、SynTRACSの開発検証・実証試験に至っている(図1)。

2.2 SynRM

SynRMは、産業用等で一般的に実用されている永久磁石同期電動機(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)と同じ同期モータに分類され、回転子の損失が少ないため高効率であることが特長である。また、自動車や鉄道等の可変速駆動用モータで採用されているPMSMは、埋め込み磁石型と呼ばれる、マグネットトルクとリラクタンストルクを併用した方式が一般的である。これらのトルク配分はモータの仕様や適用条件に応じて決定されるが、SynRMは100%リラクタンストルクで駆動するモータになる。SynRMの場合、回転子に永久磁石を使用せず、回転子は鉄心だけで構成されるモータになる(図2)。

2.3 SynRM方式採用の狙い

鉄道車両は主電動機の回転変化によって直接車両の速度が変化するため、主電動機は幅広い速度帯で駆動し、さら

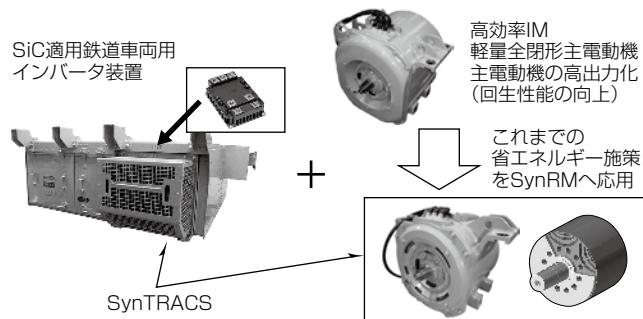


図1. 省エネルギー主回路システム開発変遷

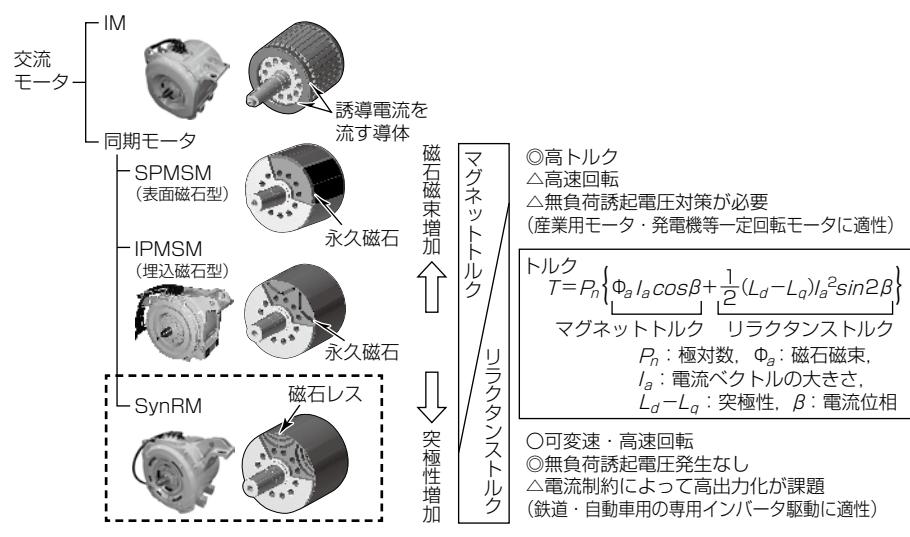


図2. 交流モータの分類とSynRMの位置付け

に惰行運転(無負荷回転)も多用する。そのため、同期モータ方式を採用するに当たっては、回転子に永久磁石がないことで、高速回転時の誘起電圧対策が不要なSynRM方式が最適と考えた。また、PMSMを可変速駆動で使用する場合、モータの回転上昇に伴い誘起電圧が上昇するため、回転子の磁石磁束を固定子巻線による磁束で打ち消す弱め磁束制御が必要になる。この際に固定子巻線で銅損が発生し、さらに、打ち消されなかった分の磁束によって鉄損が増加する。鉄道車両用主電動機では、最大出力域以降の高トルク帯の速度域で、このようなPMSM特有の損失の影響が大きいと考えられ、これらの観点で低鉄損特性に優れたSynRM方式が有利になる。

3. SynTRACS機器仕様

3.1 鉄道車両用主電動機へのSynRM適用

SynRMは原理的には以前から存在する方式であるが、永久磁石を使用せずリラクタンスマータだけを駆動するため、高出力化が難しい方式である。そのため、鉄道車両を駆動するような高出力化(高トルク・高回転)が難しいとされ、現在まで鉄道車両用主電動機として実用化されていない。今回、この課題に対して、次の二つのアプローチによって課題を解決し、世界で初めて鉄道車両用主電動機としてSynRMの実用に成功した。図3に外観を示す。

(1) 回転子鉄心形状の最適化

SynRMは、固定子の磁界と、回転子鉄心内の磁気抵抗差によって生じる磁極との相互作用によってトルクを発生



図3. 鉄道車両用SynRM

d軸(磁束の通りやすい磁路)とq軸(磁束の通りにくい磁路)のインダクタンスの差($L_d - L_q$)を利用してトルク発生

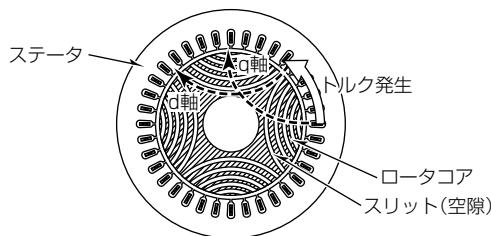


図4. SynRMの回転原理及び回転子イメージ

させるモータであるが、回転子鉄心内の磁気抵抗差を最大化するため、図4に示すように回転子鉄心に複数のスリット(空隙)を構成する。鉄道車両用主電動機の場合、産業用等と比較すると回転子径が大きいため、より磁気抵抗差を大きくするようなスリット形状の構成にできることから、自由度が高い。今回、最新の電磁界解析技術を用いてトルクを最大化する最適スリット設計を実現した。

(2) SiC適用インバータの特性の活用

SynRMを高出力化するには、(1)に加えて、固定子コイルの磁束を強める必要がある。そのためにはSynRMを駆動するインバータの電流容量を増加させる必要がある。通常、この点はインバータにとってデメリットになるが、SiC素子の低損失特性を生かして、モータの高電流駆動を実現した。

3.2 SiC適用インバータ仕様

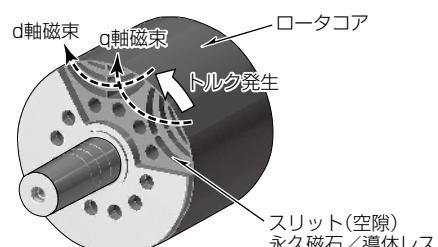
表1にフルSiC適用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータの主要諸元を示す。VVVFインバータは同期モータ対応のVVVFインバータとして開発され、フルSiC適用2レベルインバータが4群搭載されており、VVVFインバータ箱1台で4台のSynRMを駆動可能である。パワーモジュールには図5に示すLV100タイプのフルSiCパワーモジュールを採用している。

表1. フルSiC適用VVVFインバータの主要諸元

入力(架線)電圧	DC1,500V
主回路方式	2レベル方式電圧型PWMインバータ
制御単位	SynRM × 1台 × 4群
冷却方式	走行風利用自冷方式
パワーモジュール	3.3kV 750A フルSiC



図5. LV100タイプのフルSiCパワーモジュール



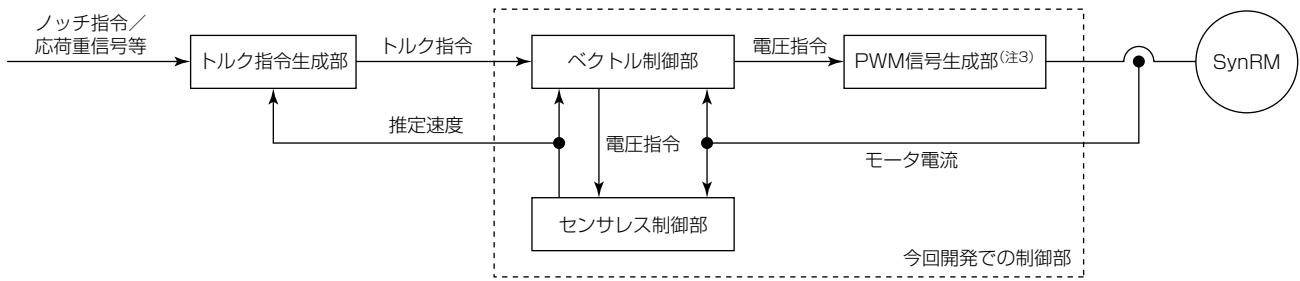


図6. SynRM制御ブロック

今回の開発では450kWの高出力SynRMに対応したインバータ制御技術として、鉄道車両用途で要求されるトルク制御を実現するためのセンサレスベクトル制御を開発した。なお、450kWのSynRMを可変速制御する技術は世界初である。

図6にこの開発でのSynRM制御ブロックを示す。ベクトル制御部・センサレス制御部とも図4に示すインダクタンスの差を利用して制御することを特徴としている。また、SynRMが持つ高効率という特長を最大限に発揮するため、フルSiCの低損失特性を最大限に活用した高周波スイッチングインバータ変調方式を適用した。この変調は、PWM (Pulse Width Modulation)信号生成部で実施し、電力損失を大幅に低減できるため省エネルギー化の実現に貢献した。通常、ベクトル制御にはモータの回転角情報が必要であるが、センサレス制御技術の導入によって、位置センサが不要になり、保守の省力化を実現した。

4. 営業車両への試験搭載

4.1 車両諸元

東京地下鉄(株)日比谷線13000系の1編成にSynTRACSを搭載して走行試験及び営業線での評価を実施した。図7に13000系の外観を示す。

1編成7両中の2両にSynTRACSを搭載した。搭載位置を図8に示す。4台のSynRMで既存モータ(PMSM)を載せ替えて、それらを1台のフルSiC適用VVVFインバータ装置で駆動する構成にしている。既存のPMSM方式と装置構成は変えずに機器(ぎそう)配線は現状のままにして、ユニットだけ変更して、容易に搭載できる構成にした。

4.2 主回路の構成

図9に搭載したSynTRACS主回路システム構成を示す。主回路システムは断流器箱、フィルタリアクトル(FL),



図7. 日比谷線13000系車両

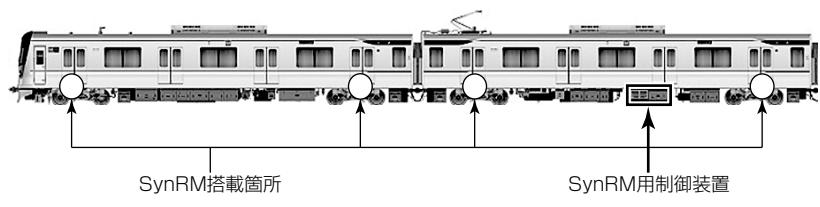
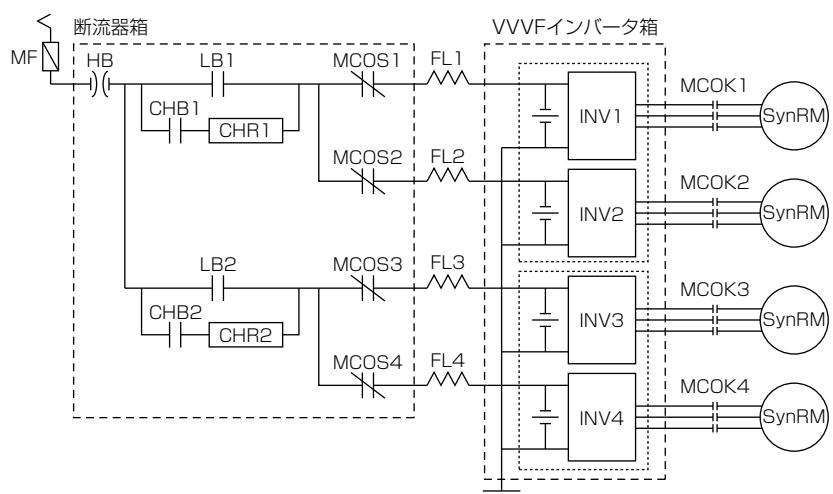


図8. SynTRACS搭載位置



MF: 主ヒューズ, HB: 高速度遮断器, LB: 断流器, CHB: 充電接触器, CHR: 充電抵抗器, MCOS: 群開放接触器, INV: インバータ

図9. SynTRACS主回路システム構成

表2. 試験搭載のSynRMと全閉IMとの比較

13000系試験搭載SynRM	高効率全閉IM
	
定格250kW (+ 11%)	定格225kW
562kg (- 7.1%)	605kg
全閉自冷式(走行風利用自冷)	全閉自冷式
フレーム内外気通風なし	フレーム内外気通風あり

VVVFインバータ箱、モータ開放接触器(MCOK)箱、SynRMで構成している。

SynTRACSを実現するに当たって、既存システムからVVVFインバータ内に搭載されている制御ユニット及びモータを変更した。先に述べたとおり、SynRMは惰行時にモータが発電しないため、開放接触器が不要であるが改造を簡単にするためMCOKは搭載した状態とし、惰行時に開放せず、常時接触器を投入した状態で走行試験を実施した。さらに、試験搭載に当たって、機器配線は現状のままにして、ユニットだけ変更して、容易に搭載できる構成にした。

4.3 全閉自冷式SynRM(高エネルギー密度化)

試験搭載に向け製作したSynRMは、高効率特性を生かして冷却構造を簡素化することで、表2に示すように従来の全閉IMと比較して軽量かつ高出力化を実現した。

5. システムの評価結果

今回の実証試験では、まず夜間試運転を行い、全ての試験条件下で安定したモータ制御ができていることや、鉄道車両が加速・減速する際に使用する広い速度範囲で高効率特性を発揮できること、それに加えて、工場内で事前評価した消費電力量と同等であることなどを確認した。実証試験結果の概要を表3、代表的な力行・回生ブレーキの試験結果を図10及び図11に示す。どの試験でも、安定した動作を確認し、良好な結果であった。

表3. 本線試運転結果

実証試験の項目	実証試験の結果
加速度・減速度評価	既存システムと同等の車両性能を持つことを確認
運転操作評価	既存システムと同等の挙動であることを確認
特殊環境評価	雨天条件、上り勾配条件、回生ブレーキ時の負荷変動等の特殊環境下で既存システムと同等の挙動であることを確認
騒音評価	既存システムと同等以下の騒音レベルになることを確認

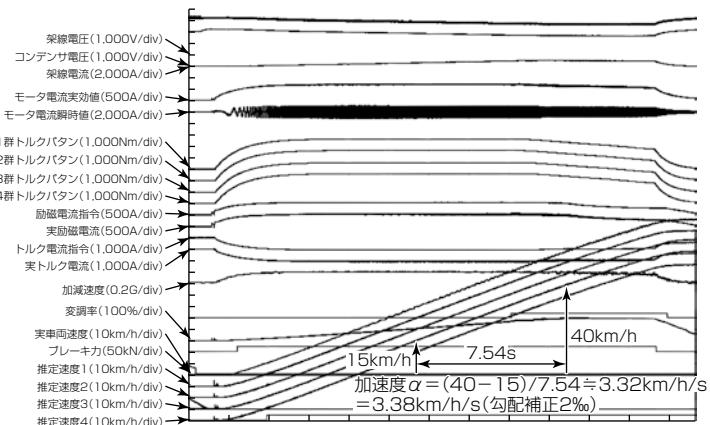


図10. 力行試験結果

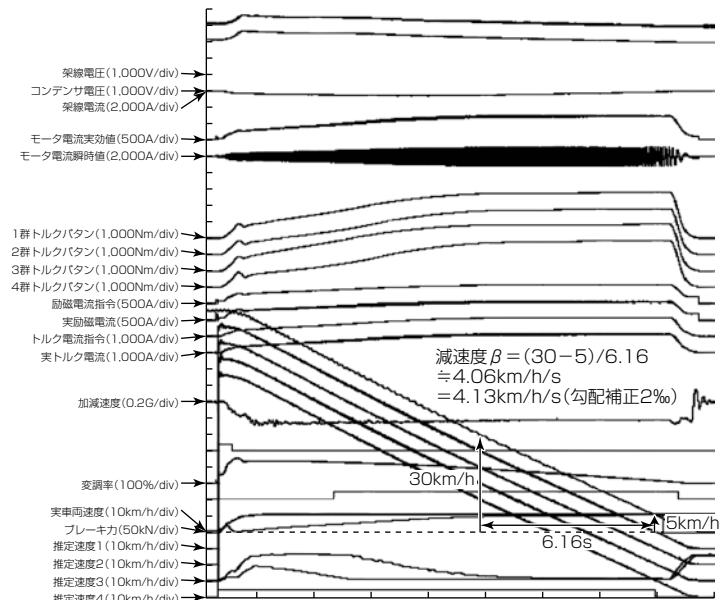


図11. 回生試験結果

6. む す び

世界最高レベルの高効率化を実現し、レアアースを使用しないSynRMと、それを可変速制御するインバータ制御技術を世界で初めて開発し、鉄道車両推進システム“SynTRACS”としての開発成果を述べた。それに加えて、東京地下鉄株日比谷線13000系車両へ試験搭載し、実環境での評価結果を述べた。

今後、これらを主回路システムの選択肢に加えることで、地球資源の節約(レアアース)とともに世界最高レベルの効率によって、鉄道車両の更なる省エネルギー化を実現して、持続可能性の確保に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 菅原徹大, ほか: SiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置, 三菱電機技報, 94, No.12, 694~697 (2020)
- (2) 根岸 哲, ほか: 3.3kVフルSiCパワーモジュール, 三菱電機技報, 92, No.3, 175~178 (2018)
- (3) 金子健太, ほか: 全閉形主電動機の環境配慮型社会への適用技術, 三菱電機技報, 90, No.9, 521~524 (2016)

AIを活用した無線式列車制御システムでの電波監視

Radio Wave Monitor in the Wireless Train Control System Utilizing AI

中畠佑輔*
Yusuke Nakaue

要 旨

近年、鉄道事業者は、労働力減少の対策や鉄道運営の変革推進として列車の自動運転の高性能化を検討しており、無線で列車を制御する無線式列車制御システムが実現方式の一つとして期待されている。

このシステムは、無線を使用して列車を制御するという特性から、無線区間の電波環境の健全性の維持が重要なファクタになり、無線電波の安定した高い受信率を保証する必要がある。このため、無線電波が受信不可になる前に、電波環境異常や装置異常による受信率低下の予兆を捉えて、対策を講じることが重要になる。そのためには、無線電波の常時監視が必要である。

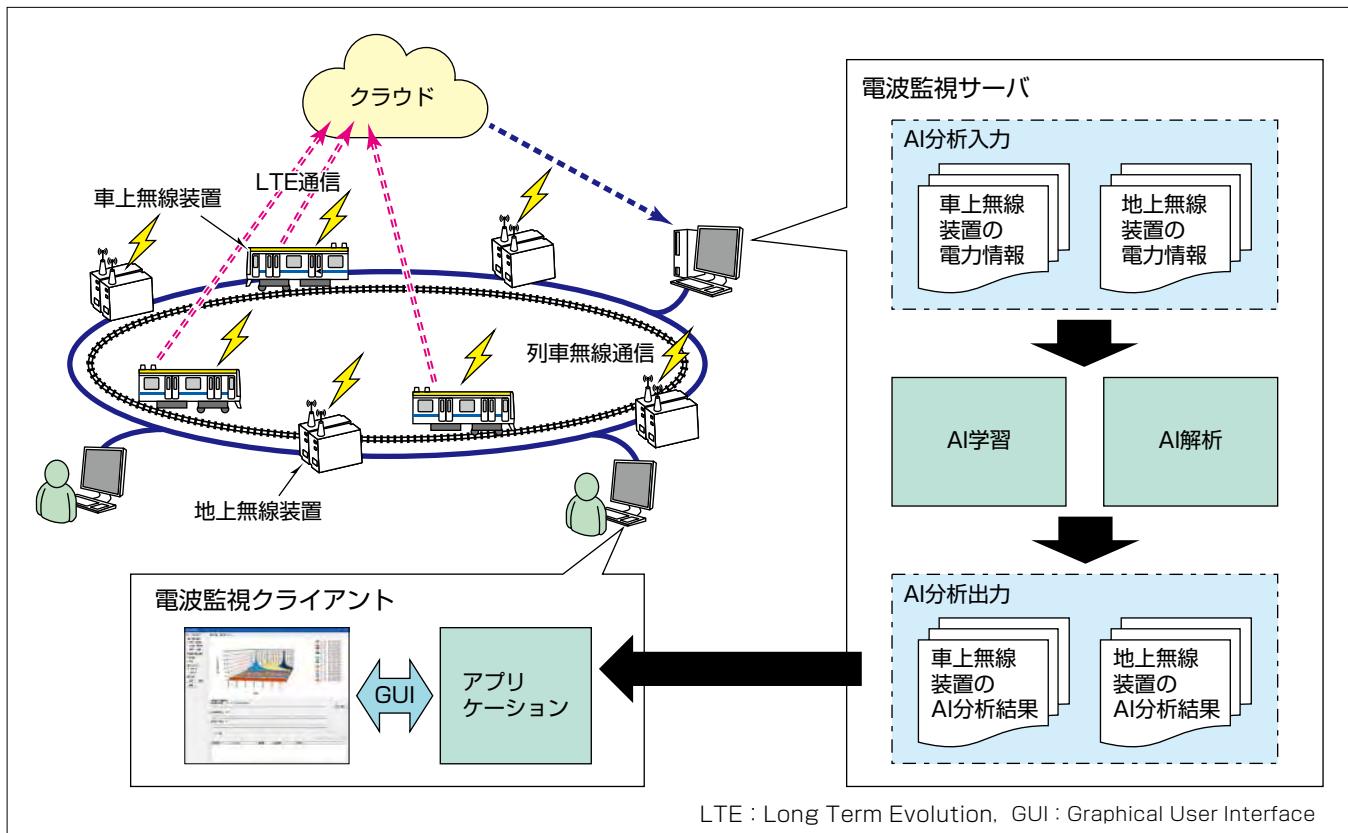
そこで、三菱電機では、無線電波の電力を常時測定し、

AIを活用した“学習”と“解析”によって、受信率低下の予兆を検知する電波監視機能を検討している。

電波監視機能は、地上に設置する地上無線装置と列車に搭載する車上無線装置で一定周期で測定した無線電波の電力情報を蓄積し、蓄積した電力情報をAI分析（“学習”と“解析”）する電波監視サーバと、AI分析結果を画面表示する電波監視クライアントで構成している。

無線電波の電力情報の可視化とAI分析によって検知した予兆を画面表示することで、無線電波が受信不可になる前に、受信率低下を捉えることが可能になる。

今後は、AI分析を更に発展させ、受信率低下の予兆検知の精度向上、装置故障の予測への拡張を検討する。



無線式列車制御システムと電波監視機能の構成

無線式列車制御システムの無線装置は、地上に設置する地上無線装置と列車に搭載する車上無線装置で構成しており、各装置で測定した無線電波の電力情報は有線ネットワーク又はLTE通信によるクラウド経由で電波監視サーバに蓄積する。電波監視機能は、蓄積した電力情報をAI分析（“学習”と“解析”）する電波監視サーバと、AI分析結果を画面表示する電波監視クライアントで構成している。

1. まえがき

近年、鉄道事業者は、労働力減少の対策や鉄道運営の変革推進として列車の自動運転の高性能化を検討しており、無線で列車を制御する無線式列車制御システムが実現方式の一つとして期待されている。

このシステムは、無線を使用して列車を制御するという特性から、無線区間の電波環境の健全性の維持が重要なファクタになり、無線電波の安定した高い受信率を保証する必要がある。このことから、このシステムで、無線区間の電波を監視し、電波環境異常や装置異常による受信率低下の予兆を捉えて、無線電波が受信不可になる前に対策を講じることが重要になる。

本稿では、このシステムでの各無線装置で測定した無線電波の電力情報を、AIを活用した“学習”と“解析”によって、受信率低下の予兆を検知する電波監視機能を当社で検討した結果について述べる。

2. 電波監視機能

2.1 電波監視の必要性

無線式列車制御システムで、無線電波の受信率低下が発生し得るケースを図1に示す。これらのケースの発生の予兆を捉えて、無線電波が受信不可になる前に対策を講じることが重要であり、そのためには、無線区間の電波の常時監視が必要になる。

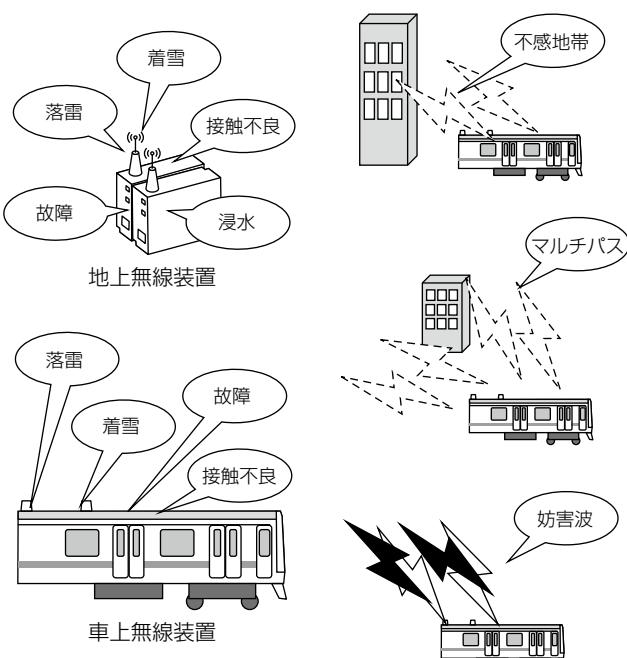


図1. 受信率低下が発生し得るケース

2.2 無線式列車制御システムと電波監視機能の構成

無線式列車制御システムと電波監視機能の構成を図2に示す。

このシステムの無線装置は、地上に設置する地上無線装置と列車に搭載する車上無線装置から構成され、地上無線装置では、一定周期で電力を測定して時間情報を付加した電力情報を有線ネットワーク経由で電波監視サーバに送信する。車上無線装置では、一定周期で電力を測定し、時間情報と位置情報を付加した電力情報をLTE通信によってクラウド経由で電波監視サーバに送信する。

電波監視機能は、地上無線装置と車上無線装置で測定して送信された電力情報を蓄積し、蓄積された電力情報をAI分析（“学習”と“解析”）する電波監視サーバと、AI分析結果を画面表示する電波監視クライアントから構成される。

2.3 電波監視の仕組み

地上無線装置と車上無線装置では、常時、一定周期で無線電波の電力を測定し、時間情報と位置情報を付加した電力情報を電波監視サーバに送信する。電波監視サーバは受信した電力情報を蓄積する。この電力情報を入力データとした電波監視の処理の流れを図3に示す。

電波監視機能を利用するに当たって、まずは、AI分析の“学習”によって、先に述べた入力データ（正常データ）を読み込ませて学習させ、しきい値データを算出しておく。

学習させたしきい値データを用いて、入力データに対してAI分析の“解析”を行い、出力データを算出する。

電波監視クライアントでは、この出力データの内容を画面表示する。

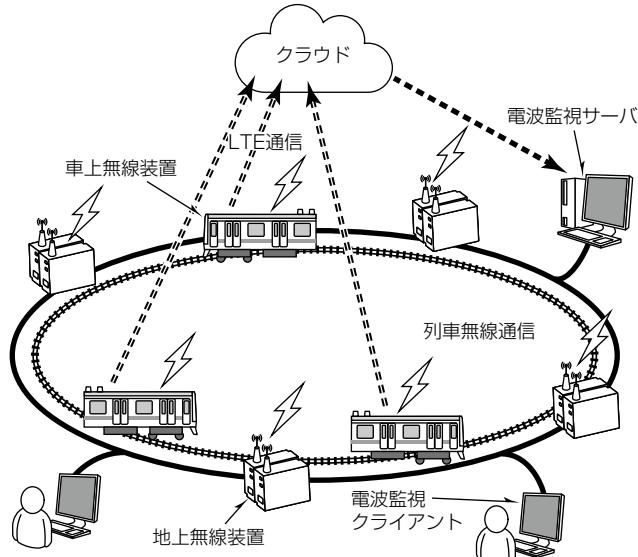


図2. 無線式列車制御システムと電波監視機能の構成図

電波監視サーバ

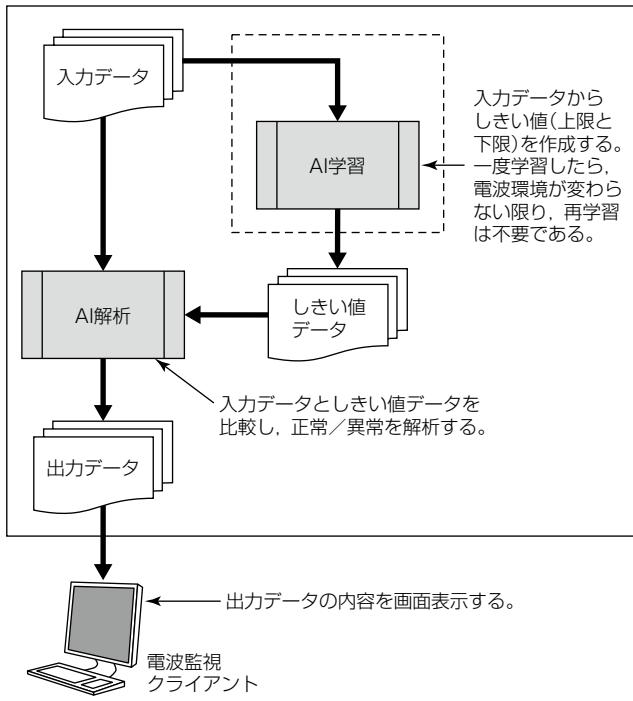


図3. 電波監視の処理の流れ

3. AI分析

AI分析の“学習”では、地上無線装置と車上無線装置で測定して時間情報と位置情報を付加した電力情報の入力データ(正常データ)を基に、Dメートルごとに区切ったx地点の無線区間の電力の平均値 A_x と標準偏差 σ_x を算出し、次の式に従って上限と下限のしきい値を算出してしきい値データとして保存する。このしきい値データは、一度学習したら、新規遮蔽物ができたことなどで電波環境が変わらない限り、再学習は不要である。

$$x \text{ 地点の上限しきい値: } T_{up}(x) = A_x + k\sigma_x$$

$$x \text{ 地点の下限しきい値: } T_{down}(x) = A_x - k\sigma_x$$

k : 1 以上のパラメータ

AI分析の“解析”では、各装置で測定し時間情報と位置情報を付加した電力情報の入力データが、AI分析の“学習”で算出した無線区間の上限しきい値と下限しきい値の範囲内に入っているかどうかをDメートルごとに区切った無線区間ごとに比較判定する。判定方法と異常原因の可能性を表1に示す。

表1. AI分析の“解析”の判定方法と異常原因の可能性

判定条件	判定結果	異常原因の可能性
上限しきい値以上	異常	妨害波の受信の可能性あり
上限しきい値と下限しきい値の間	正常	—
下限しきい値以下	異常	不感地帯、装置故障、着雪などの可能性あり

4. 電波監視

AI分析の“解析”的結果の出力データを電波監視クライアントで読み込むことで、無線電波の電力情報の可視化と、AI分析によって検知した予兆を画面表示することで、無線電波が受信不可になる前に受信率低下を捉えることが可能になる。

この章で述べる例では、電波監視で表示するデータとして表2に示した諸元のデータを生成し使用している。

まず、電波監視クライアントで画面表示した電波監視の一例を図4に示す。上段には、時刻、周波数、電力値、又は、位置、周波数、電力値を軸とした三次元グラフを表示する。画面を三次元回転させることも可能である。中段は、三次元グラフの拡大、縮小を行うスケーラーである。下段は、AI分析の“解析”的判定結果で異常が発生した場合にそのイベントを表示する画面である。

次に、図4の三次元グラフからある特定の周波数だけを選択した場合の時間と電力値、又は、位置と電力値を軸とした二次元グラフの一例を図5に示す。AI分析の“解析”的結果、上限しきい値と下限しきい値の範囲内に電力値が入っており、正常であることを示している。

また、AI分析の“解析”的結果、上限しきい値以上の電力異常を検出したケースを図6に示す。このケースの場合、画面を見ることで、何らかの妨害波を受信している可能性があると判断することが可能になる。

表2. 表示データ諸元

項目	仕様
電波伝搬モデル	自由空間電波損失モデル ⁽¹⁾⁽²⁾
ノイズモデル	加算性白色ガウス雑音
地上無線装置数	5台(2 km等間隔で設置)
列車移動速度	時速45km(停車なしで一定速度で走行)

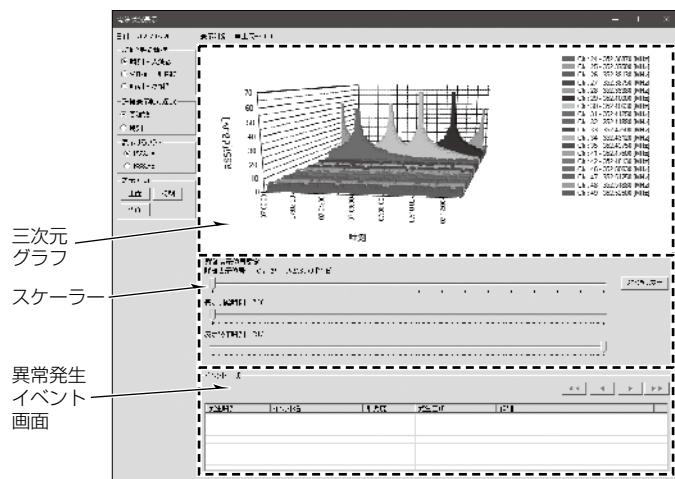


図4. 画面表示した電波監視の一例

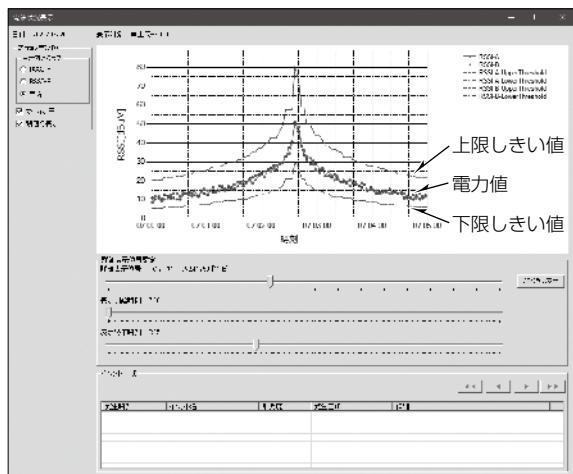


図5. AI分析の“解析”結果(しきい値範囲内)

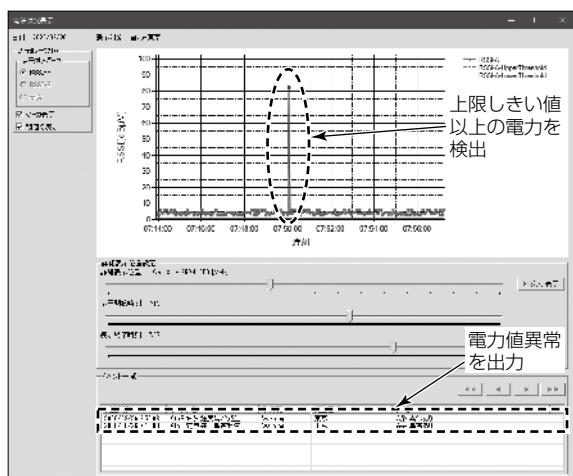


図6. AI分析の“解析”結果(上限しきい値以上)

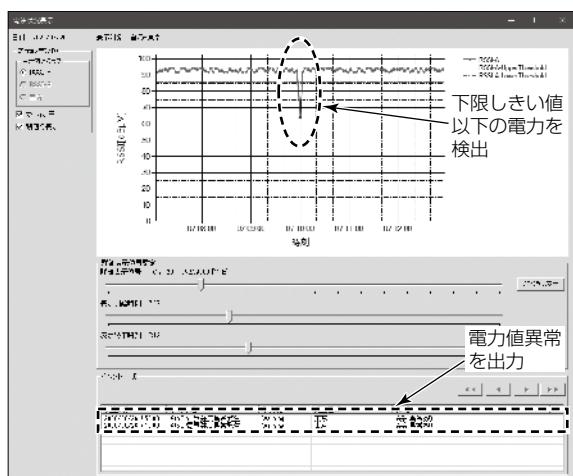


図7. AI分析の“解析”結果(下限しきい値以下)

最後に、AI分析の“解析”の結果、下限しきい値以下の電力異常を検出したケースを図7に示す。このケースの場合、画面を見ることで、何らかの遮蔽があった可能性があると判断することが可能になる。

5. 今後の展望

現状は無線電波の電力情報だけをAI分析に使用して受信率低下の予兆を検出しているが、今後は、AI分析を更に発展させ、無線電波の電力情報に加えて、無線電波を復調して誤り訂正した結果の誤り訂正ビット数、無線電波の周波数偏差、装置内の温度情報、無線電波の送信電力などもAI分析対象データに含めることで、受信率低下の予兆検知の精度向上、装置故障の予測へ拡張検討する。

また、天候情報(位置情報に応じた積雪や雷雨など)もAI分析対象データに含めることで、アンテナの着雪による受信率低下の予兆、落雷による装置故障の予測などの検出へも拡張検討する。

6. むすび

無線式列車制御システムでの地上無線装置と車上無線装置で一定周期で測定した無線電波の電力情報を、AIを活用した“学習”と“解析”によって、電波環境異常や装置異常による受信率低下の予兆を検知する電波監視機能について述べた。無線電波の電力情報の可視化と、AI分析によって検知した予兆を画面表示することで、無線電波が受信不可になる前に、受信率低下を捉えることが可能になる。

今後は、AI機能を更に発展させ、受信率低下の予兆検知の精度向上、装置故障の予測への拡張を検討する。

参考文献

- (1) 笹岡秀一：ウェーブサミット講座 移動通信、オーム社 (1998)
- (2) 一般社団法人 電気情報通信学会 アンテナ・伝播研究専門委員会 (A・P)：自由空間伝搬損失
https://www.ieice.org/cs/ap/misc/denpan-db/prop_model_db/model_list/free_space_path_loss/

鉄道でのミリ波帯通信の利用

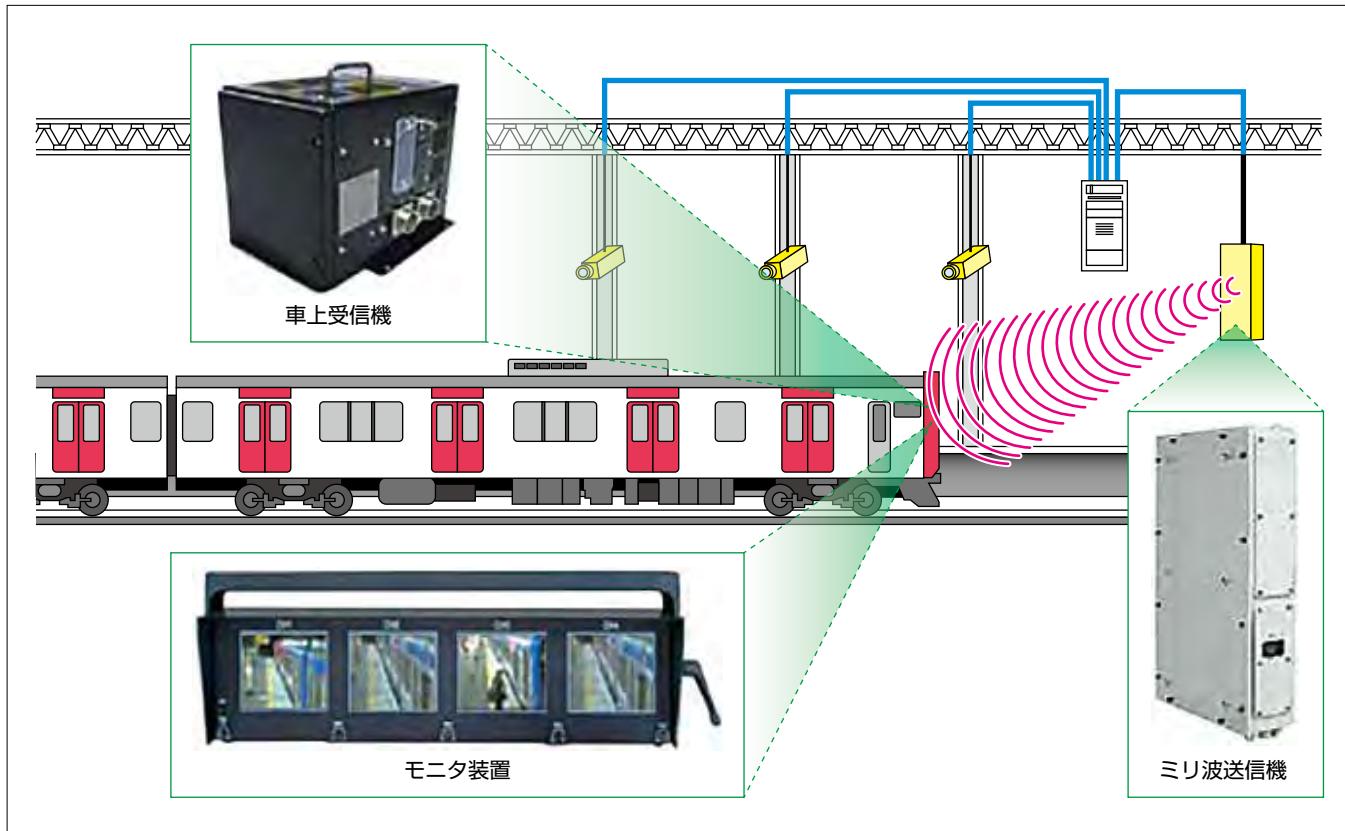
Use of Milli-Meter Wave Communication on the Railway System

要 旨

5G(第5世代移動通信システム)等に代表される通信技術の進歩に伴い、電波の需要も増大してきている。近年では、5G、無線LAN等の市井のユーザーが使用する携帯端末の規格でも、それぞれ28GHz、60GHz帯等の準ミリ波、ミリ波帯の周波数を使用するようになってきている。このような動きは、通信速度の向上を目指しての高効率な変調技術や情報データの圧縮技術とともに、純粋に広い通信帯域を用いての通信速度の向上を図ることを意味する。使える周波数帯はほぼ使い尽くされて、ミリ波は最後に残ったフロンティアとされてきた⁽¹⁾。

三菱電機は無線通信でのミリ波帯の重要性に早くから着目しており、2000年から鉄道会社向けのホーム監視画像伝送システムを市場展開し、今日まで多くの顧客に納入して安全な鉄道運行に貢献してきた。

今後も開拓が進められるであろうミリ波帯で、ホーム監視画像伝送システムを中心とした現在ミリ波を使用しているシステム及び今後のミリ波を使用した鉄道システム等をあらためて認識することによって、社会に貢献できる様々な製品への適用を進めていく。



ミリ波を用いたホーム監視画像伝送システムのイメージ

駅に設置されたミリ波送信機から電車に搭載している車上受信機へ、ホームの乗降監視カメラの映像を瞬時に伝送する。運転士は運転席からモニタ装置を通してリアルタイムに乗降監視が可能で、安全なワンマン運転に貢献する。

1. まえがき

ミリ波帯とは、電波行政的には30~300GHzの周波数帯を指す。図1に総務省の周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴を示す⁽¹⁾。

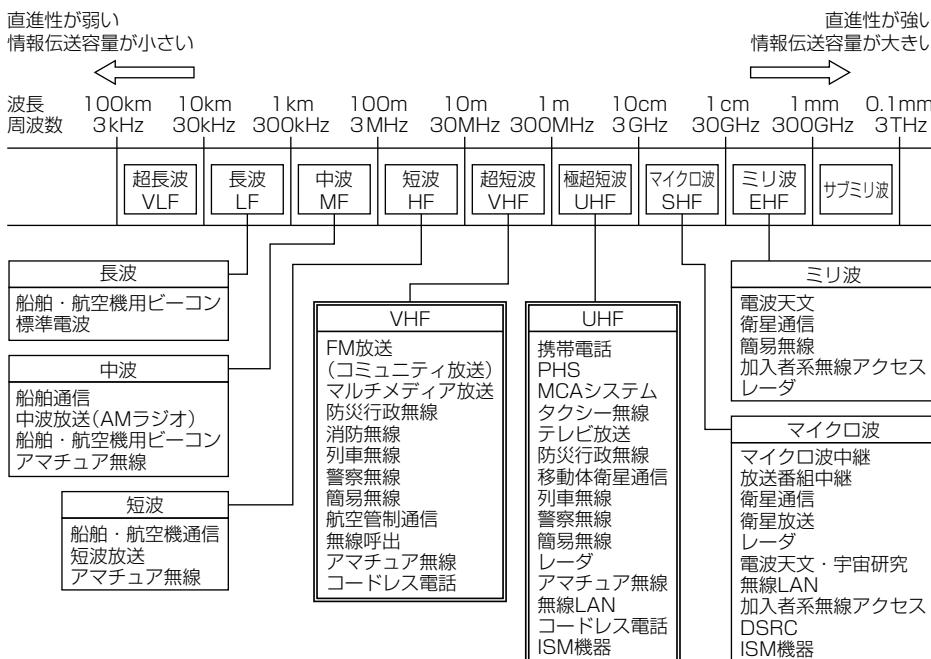
一般的に、補助単位のミリ(mm), マイクロ(μ)はそれぞれ1/1,000, 1/1,000,000を意味して、“マイクロ”の方が“ミリ”より小さいことを示すが、図1のとおり、波長の長い方が“マイクロ波”と呼ばれ、マイクロ波より波長が短いにもかかわらず“ミリ波”と呼ばれている奇妙さがある。ミリ波帯の電波が持つ特徴としては次の四つが挙げられる。

- (1) 大容量通信
- (2) 距離減衰が大きい
- (3) 電波の直進性
- (4) 小型化特性

本稿では、まずこれらミリ波帯の電波の特徴について述べた後、ホーム監視画像伝送システムを中心とした現在ミリ波を使用しているシステム及び今後のミリ波を使用した鉄道システム等について述べる。

2. ミリ波の特徴

この章では、1章で挙げたミリ波帯の電波が持つ四つの特徴についてそれぞれ述べる。



VLF : Very Low Frequency, LF : Low Frequency, MF : Medium Frequency, HF : High Frequency, VHF : Very High Frequency, UHF : Ultra High Frequency, SHF : Super High Frequency, EHF : Extra High Frequency, AM : Amplitude Modulation, FM : Frequency Modulation, MCA : Multi-Channel Access, ISM : Industrial, Scientific and Medical, DSRC : Dedicated Short Range Communications

図1. 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴⁽¹⁾

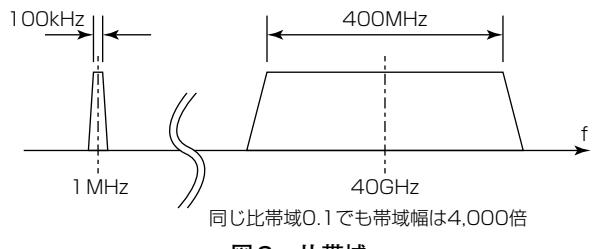


図2. 比帯域

(1) 大容量通信

通信容量を表すシャノンの式を次に示す。

$$C = B \cdot \log 2 (1 + SN) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、C : 通信容量(bps)

B : 帯域幅(Hz)

SN : 信号対雑音電力比(真数)

式(1)はSNを一定と考えれば、通信容量Cは帯域幅Bに比例して周波数帯域幅が広いほど扱える通信容量は大きくなることを意味する。また、フィルタなどの部品技術の設計では帯域幅を中心周波数で正規化した値である“比帯域”を用いた設計になる。例えば比帯域0.1では、中心周波数が1MHzの場合、100kHzの帯域幅しかないが、ミリ波で40GHzが中心周波数であれば同じ比帯域0.1では400MHzの帯域を持つことになる(図2)。帯域幅と通信容量が比例関係にあることを考えれば、ミリ波帯等の高い周波数帯の通信が大容量通信に適した帯域であることが分かる。

(2) 距離減衰が大きい

自由空間での電波の伝搬損失(L)は、 $L = (4\pi d/\lambda)^2$

で示される。ここで、dは送受信間の距離、λは電波の波長である。40GHzでのLを図3に示す。図3には無線LANでよく知られる2.4GHzの伝搬損失特性も併せて示している。

40GHzでは60mで約100dBの損失になる。これは、60mで 10^{-10} (=1/100億)になることを意味している。もちろん送受信間の通信を成立させるための設計(回線設計)では、送信電力及び送受信のアンテナ利得を適切に設定することが必要だが、2.4GHz帯無線LANに比べて300倍ほど減衰が大きいため、2.4GHzと40GHzで同じ条件(送信電力、アンテナ利得、変調方式)で比較した場合、40GHzの電波は2.4GHzの電波と比べて1/300の距離しか飛ばないという見方ができる、他システムに与え

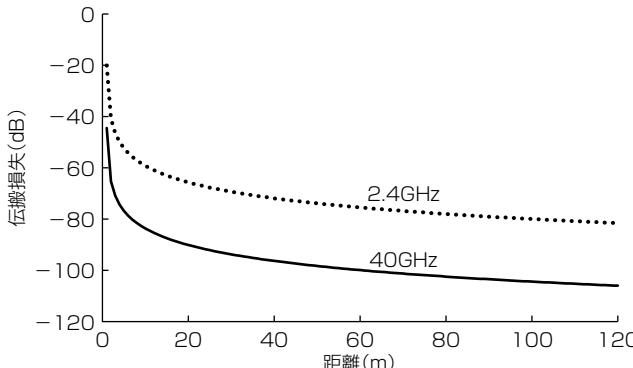


図3. 自由空間伝搬損失

る干渉(与干渉)が少ないとも言える。

(3) 電波の直進性

ミリ波は、1章で述べたとおり30~300GHz帯の電波であるが、ミリ波より更に高い周波数としてサブミリ波がある。サブミリ波は遠赤外線レベルの波長であり、電波と光の境界領域である。ミリ波は電波としては光に一番近いところに位置しており、その性質も光に近く、光の持つ直進性をミリ波も持っていると言える。また光同様に金属以外の物体に遮られる性質も持っている。この直進性及び遮蔽特性は、見通し通信以外は電波が届きにくく、先に述べた距離減衰と同様に他システムに与える干渉(与干渉)、他システムから受ける干渉(被干渉)を生じにくいことを意味する。

(4) 小型化特性

アンテナ等の電波の波長に依存する構造的電気部品が存在するが、周波数が高く波長の短いミリ波では、この構造的電気部品をより小さくできるメリットがある。ホーンアンテナの設計寸法を通じて、小型化の例を次に述べる。

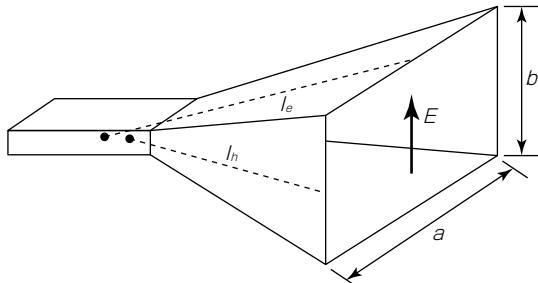
図4に示すようなホーンアンテナのフレアの長さ l を一定として、開口径を変えたとき、利得が最大になる開口径にした場合のホーンアンテナを最適ホーンと呼ぶ。最適ホーンの利得は次式で表すことができる⁽²⁾。

$$G = 10\log_{10}(ab/\lambda^2) + 8.08 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $a = \sqrt{3l_h\lambda}$, $b = \sqrt{3l_e\lambda}$

λ : 波長

2.4GHzと40GHzで同じ利得のアンテナの寸法を比較すると、2.4GHz比で40GHzは約1/16の波長になるため、 a , b

図4. ホーンアンテナ⁽²⁾

の各寸法値もそれぞれ約1/16と小型化されることになる。

このように、“大容量通信に適しているが、減衰が大きいため長距離通信には適さず、直進性が高い電波”，一言で言えばそのような特徴を持つミリ波であるが、干渉を抑制するためにあまり電波を遠方へ飛ばさず、公共インフラのように傍受行為に対してセキュリティ性の高い通信をしたい場合には大容量以外の用途にも好適であると言える。中でも43GHz帯の通信は免許波であり、法的な面からの干渉低減も十分効果が高い。

3. 鉄道分野でのミリ波通信システム

この章では、ミリ波帯を用いた通信システムとして、ホーム監視画像伝送システム、検査ミリ波伝送装置について述べる。

3.1 ホーム監視画像伝送システム

要旨に述べたとおり、ホーム監視画像伝送システムで当社は20年以上の歴史を持つ。このシステムでミリ波によって伝送する情報は、電車運転士が電車のドアの開閉操作を行う際に確認するドア付近の乗降確認の映像である。システム概要を図5に示す。

最も簡易な構成としては、駅ホームのカメラの画像をミリ波送信機でミリ波帯の変調波として送信し、電車側の運転台に設置したミリ波車上装置で受信・復調した信号をモニタ装置に映し出して、運転士がその画像を確認するというものである。

システムとしては非常にシンプルであるが、そのシンプルさがこのシステムの特徴でもある。

ミリ波電波は直進性が高いことを2章で述べたが、ホーム監視画像伝送システムではこの物理特性を積極的にシステムに取り込んでいる。

画像情報の伝送は、駅ホームに設置されたミリ波送信機から、ホームへ入った車両に対して行われるが、アナログ

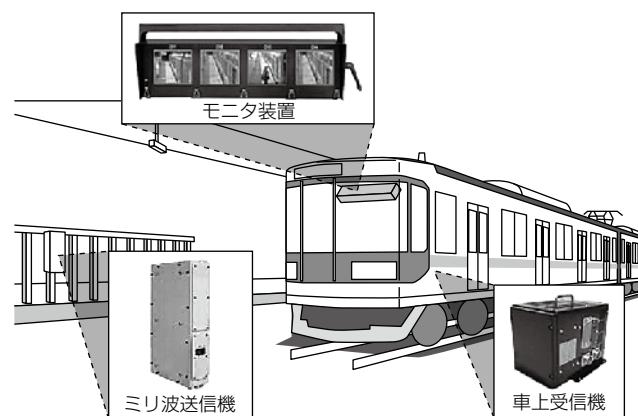


図5. ホーム監視画像伝送システム

方式のホーム監視画像伝送システムでは、ミリ波電波が届く送受信間に遮蔽物のないエリアに電車が進入することで自動的に画像の結実までの処理(復調)が行われるという、電波の有無で通信の確立がなされるアナログ通信の良い面を利用している。

また、ミリ波電波は限られたエリアにしか飛ばず、直進性を持っていることから駅の上下ホームで同じ周波数を用いても相互の影響が小さく、周波数の有効利用も図ることができている。

無線LANのようなネットワーク接続型システムと比較するために、図6にOSI(Open Systems Interconnection)参照モデルを示す。

アナログ通信をOSI参照モデルに当てはめるのは少々強引だが、装置のシンプルさ、情報伝達までの処理の少なさ(遅延の少なさ)が見て取れて、無線区間の遅延はμs(マイクロ秒)のスケールである。また、現在のホーム監視画像伝送システムと同様の動作をネットワーク型システムを用いて実現するような場合、システムとしての遅延のほか、画像をデータ化する必要があるため、通信の遅延以外にエンコード/デコード処理(いわゆるコーデック)で遅延時間を生じるという問題もある。5Gでは無線区間での遅延性は1msとなっているが、データの加工に必要な時間は含まれていないことに注意が必要である。

ホーム監視画像伝送システムで、当社が目指すところは次の3点である。

(1) 運行の安全性

信号の低遅延をポリシーとして、乗降客の安全に加えてユーザーである運転士も精神的安全性を持てるシステムである。

(2) 運行の継続性

装置品質を維持・確保する。

(3) 装置供給の継続性(保守性)

互換を持った装置を供給可能にする製造継続性を維持する設計である。

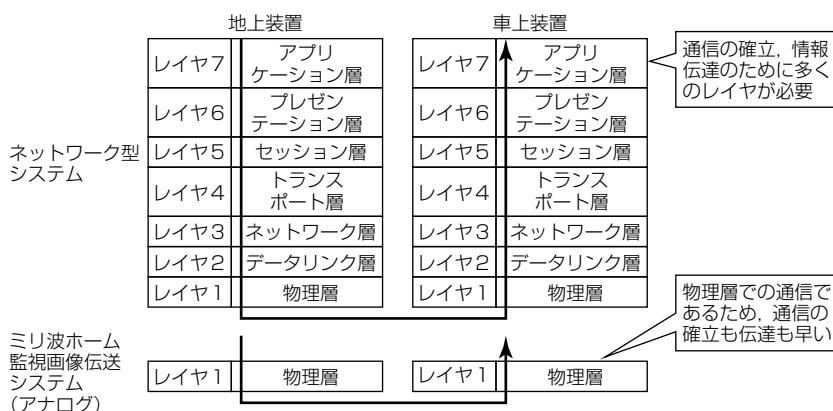


図6. OSI参照モデル

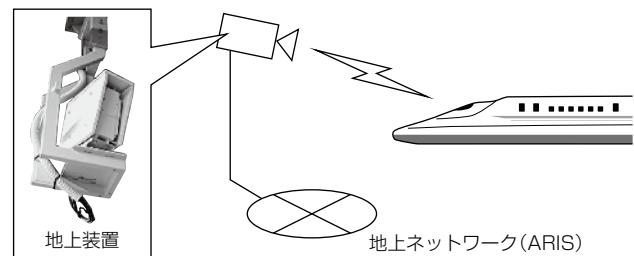


図7. 検修ミリ波伝送装置

3.2 検修ミリ波伝送装置

東海道新幹線では、車両搭載機器の動作記録データを走行中に蓄積し、車両基地や一部駅で地上システム(新幹線車両検修管理システム(ARIS))に送信することで、取得した車両データを分析し劣化状態や故障の進行に応じた予知保全を行っている。このデータの地車間通信で使用されているのが検修ミリ波伝送装置である。図7に装置及びシステムイメージを示す。検修ミリ波伝送装置では、駅到着から出発までの時間内に規定量の検修蓄積データを通信できる能力を持ち、より安全で安定した新幹線運行につなげている。

4. む す び

ミリ波帯の電波が持つ特徴を挙げて、鉄道システムでのシステム事例について述べた。鉄道でのミリ波帯電波との親和性(相性)は、大容量通信が必要とされてきたという理由ももちろんあるが、鉄道での列車の動きが直線的であるため、ミリ波電波としての直進性と見合っていることも関係していると考える。5Gやプライベート5Gなどのキャリア系通信による大容量通信が行われてきている現在、それら通信で用いられている高速通信技術を活用・発展させることによって、ミリ波帯は更なる発展を遂げる可能性があり、今後もフロンティアとして存在していくものと考える。当社としては、ホーム監視画像伝送システムのようなミリ波の電波的特徴を上手に活用するアプリケーションの製品なども含めて、公共機関を利用する乗客だけでなく、運転士などのユーザーにも安心して利用してもらえる通信システムの開発・供給を続けていく。

参考文献

- (1) 総務省：電波利用ホームページ | 周波数割当て | 周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴 <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>
- (2) 一般社団法人 電子情報通信学会：知識の森 4群(通信工学) - 2編(アンテナ・伝搬) 6章 開口面アンテナ https://www.ieice-hbkb.org/files/ad_base/view_pdf.html?p=/files/04/04gun_02hen_06.pdf