



家庭から宇宙まで、エコチェンジ



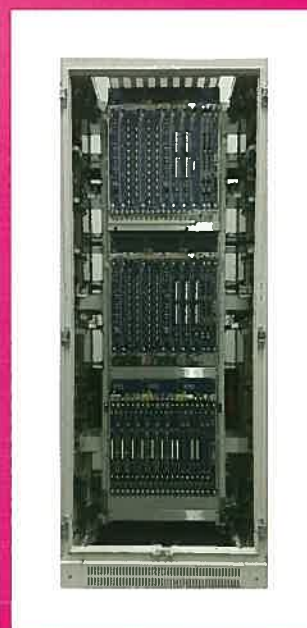
三菱電機技報

9

2019

Vol.93 No.9

安心・安全で快適な社会を支える映像・通信技術



目次

特集「安心・安全で快適な社会を支える映像・通信技術」

安心・安全で快適な社会を支える

映像・通信技術特集に寄せて…………… **巻頭言** 1
田中謙吉

安心・安全で快適な社会を支える

映像・通信技術の展望…………… **巻頭論文** 2
友江直仁・片山政利

広域監視ソリューション…………… 8
広瀬高久・桑原茂樹・田辺慎二

耐衝撃性能を向上させた固定ドームカメラ…………… 13
沖西佳雄・大内丈士・立花伸浩

製造ライン向け映像解析ソリューション…………… 18
松江将博・斉藤弘紀・磯貝元昭・清水尚吾・平松隆宏

IoT GWセキュリティ技術の実装…………… 23
泉 裕作・佐藤浩司・平井博昭

メッシュネットワークの光パス障害復旧技術…………… 29
中村徳昭・吉原直利・吉田聡太・山崎 創

沖縄都市モノレール線及び多摩都市モノレール線向け
デジタル列車無線システム…………… 34
山崎 守

第5世代移動通信システムの標準化…………… 39
長谷川史樹・平 明德・大賀正夫・長谷川文大

第5世代移動通信システム技術…………… 44
中澤正幸・井浦裕貴・渡辺 光・中溝英之・友江直仁

Audio-visual and Communication Technologies for Safe, Secure and Comfortable Society
Foreword to Special Issue on Audio-visual and Communication Technologies
for Safe, Secure and Comfortable Society
Kengo Tanaka

Perspective of Audio-visual and Communication Technologies
for Safe, Secure and Comfortable Society
Naohito Tomoe, Masatoshi Katayama

Wide-Area Surveillance Solution
Takahisa Hirose, Shigeki Kuwahara, Shinji Tanabe

Fixed Dome Camera with Improved Impact Resistance Performance
Yoshio Okinishi, Takeshi Ouchi, Nobuhiro Tachibana

Video Content Analysis Solution for Manufacturing Line
Masahiro Matsue, Hironori Saito, Motoaki Isogai, Shogo Shimizu, Takahiro Hiramatsu

Implementation of Security Technology for IoT Gateway
Yusaku Izumi, Koji Sato, Hiroaki Hirai

Optical Path Restoration Method for Mesh Network
Noriaki Nakamura, Naotoshi Yoshihara, Sota Yoshida, Hajime Yamasaki

Digital Train Radio System for Okinawa Urban Monorail and Tokyo Tama Intercity Monorail
Mamoru Yamazaki

Standardization Trends and Activities on 5th Generation Mobile Communication System
Fumiki Hasegawa, Akinori Taira, Masao Oga, Fumihiro Hasegawa

5th Generation Radio Communication System Technologies
Masayuki Nakazawa, Hiroki Iura, Hikaru Watanabe, Hideyuki Nakamizo, Naohito Tomoe

関連拠点紹介…………… 49

特許と新案

「照明付き監視カメラ装置」「通信システム」…………… 51

「URLフィルタリング装置およびURLフィルタリング方法」
…………… 52



表紙：安心・安全で快適な社会を支える映像・通信技術

三菱電機では、映像技術と通信技術を活用して、社会インフラ、産業、交通、生活の各分野に対して様々な製品を提供してきた。映像技術を活用した製品としては、セキュリティ用映像監視システムや広域監視用カメラなど、通信技術を活用した製品としては、大容量の基幹光ネットワーク向け伝送装置などを社会に提供している。

本号では、このような安心・安全・快適な社会の実現に貢献する、映像・通信の製品及び技術について紹介する。

- ①店舗、工場、ビル等のセキュリティを監視する映像監視システム
- ②河川や道路を監視する広域監視用フルHD(High Definition)カメラ
- ③IoT(Internet of Things)時代の通信トラフィックを支える大容量基幹光ネットワーク伝送装置

巻/頭/言

安心・安全で快適な社会を支える映像・通信技術特集に寄せて

Foreword to Special Issue on Audio-visual and Communication Technologies for Safe, Secure and Comfortable Society

田中謙吾

Kengo Tanaka



2015年9月の国連サミットで2030年までの主要な社会課題を解決する国際目標としてSDGs(Sustainable Development Goals)が採択されました。一方、日本では、第5期科学技術基本計画(2016~2020年)の中でSDGsと連動する形で超スマート社会の実現を目指したSociety5.0が提唱されました。どちらも現代の社会課題を解決することによって持続可能な豊かな社会の実現を目指すコンセプトです。三菱電機グループでは、“持続可能性と安心・安全・快適性の両立”をはじめとする“社会課題の解決による価値創出”を目標として掲げており、これは、Society5.0やSDGsの理念と軌を一にするものです。

IoT(Internet of Things)、ビッグデータ解析、AI(Artificial Intelligence)といった新たな先進技術が様々な分野で活用され、既存事業のデジタル化だけでなく、デジタルを活用した変革を意味するデジタル・トランスフォーメーション(DX)が世界で進行しています。国内では、DXの推進に欠かせないIoT実現の鍵となる第5世代移动通信システム(5G)のプレサービスが2019年9月に開始され、2020年夏には東京オリンピック・パラリンピックの開催に合わせて、スマートホスピタリティや次世代都市交通システム等の日本の科学技術イノベーションの成果を世界に示すことが計画されています。

IoTやAIの進展によって利便性・快適性が向上する一方で、あらゆるものがつながって情報が共有されることから、社会システムはリアルとサイバーの両面で拡大するとともに複雑さを増し、セキュリティとセーフティの両面にわたるリスクが急速に拡大しつつあります。IoTやAIを前提としたシステムでは、これらのリスクを十分に抑えることが欠かせません。この利便性・快適性の向上とリスクの抑制、すなわち安心・安全の確保を両立させるという観点から、映像・通信技術は重要な技術になります。

当社では、これまで映像・通信技術を通信、電力、交通などの社会インフラや産業、生活、ビルなど、当社が事業として関わる広範にわたる社会システムと分野に適用し、安心・安全で快適な社会の実現に貢献してきました。

今回の特集号では、映像監視技術や映像解析(Video Content Analysis: VCA)技術と、それらを適用したシステム

を支える通信技術について当社の取組みを紹介します。

映像技術の活用事例としては、従来、道路・河川、鉄道や店舗、工場対応にネットワークカメラシステムを数多く世に送り出してきましたが、近年は当社独自のコンパクトなAI“Maisart(マイサート)”やVCA技術を適用し、迷子や白杖(はくじょう)を持つ人の検出や工場作業員の動き解析による作業品質・生産性改善など、高度な監視や映像解析を実現しています。この取組みは、安全確保、人手不足解消、品質確保の観点で社会貢献に寄与しています。

光通信技術の関連では、当社は累計1,500万台以上のFTTH(Fiber To The Home)機器を出荷してきましたが、現在は10Gbpsクラスの機器の納入も開始しています。今後は5Gの展開による更なる高速化を見越して、次世代PON(Passive Optical Network)システムの開発も進めています。また、基幹系のコア・メトロ網では、高速化に加えて光クロスコネクタシステムの高信頼化にも取り組んでいます。これらの取組みは、通信インフラの快適な利用に貢献するものです。

無線技術については、電力インフラ対応で、M2M(Machine to Machine)無線通信技術を適用したスマートメータシステムを国内の電力会社向けに早期かつ広範囲にわたって提供し、電力検針システム運用のスマート化に貢献してきました。交通インフラ対応では、鉄道各社の列車無線のデジタル化、高速化、高機能化に取り組んでおり、運行管理の高度化や車内サービスの向上によって利便性・快適性の向上に貢献しています。また、5Gについては、国際標準化活動や、高速・低遅延通信技術の開発に取り組んできました。

IoTへの対応では、IoTゲートウェイをあらゆる分野へ適用することを想定し、処理性能の向上に加え、耐環境性能に応じたメニュー化やサイバーセキュリティ機能の実装などを実現しました。IoTゲートウェイは、今後のIoT本格化に向けて、セキュリティ機能の強化やAIの活用など、引き続き進化させていく予定です。

当社は、IoT、5G、AIなどの先進技術を適切に適用しながら継続して映像・通信技術を進化させ、これからも安心・安全で快適な社会の実現に貢献していきます。

巻頭論文

安心・安全で快適な社会を支える 映像・通信技術の展望



友江直仁*



片山政利**

Perspective of Audio-visual and Communication Technologies for Safe, Secure and Comfortable Society

Naohito Tomoe, Masatoshi Katayama

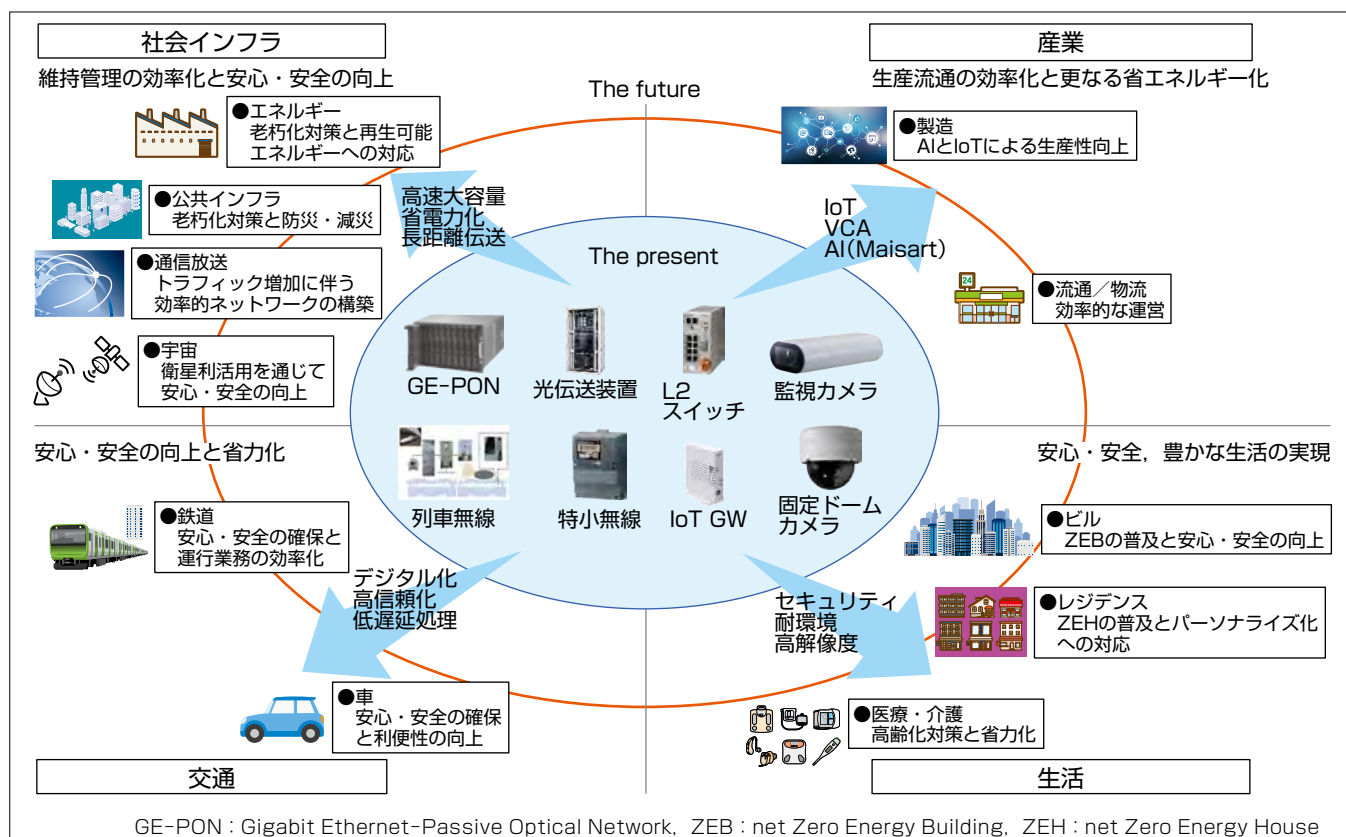
要 旨

東京2020オリンピック・パラリンピックに向け、社会インフラ、交通、産業、生活といった、様々な分野で安心・安全・快適な社会の実現への期待がますます高まってきた。三菱電機はこれらの期待に応えるため、映像技術と通信技術を活用した製品の提供に取り組んでいる。

映像技術を活用した製品としては、防災・減災等に活用される映像監視システムから、製造ラインの生産性改善等に寄与する映像解析システムまで広範囲にわたった製品を展開している。通信技術を活用した製品としては、セキュリティ性能が高いIoT(Internet of Things) GW(ゲートウェイ)、高速大容量の通信トラフィックを支える光通信システム、高信頼性が求められる列車無線システム等の製品を展開している。

本稿では、映像技術として、防災・減災等に活用される映像監視技術、製造ラインの生産性改善やマーケティング等への活用が期待される、AI(Artificial Intelligence)と組み合わせた最先端の映像解析(Video Content Analysis: VCA)技術についての展望を示すとともに、通信技術として、セキュリティの向上に応えるIoT GW技術、高速大容量・高信頼化に貢献する光通信技術、列車無線技術、移動通信技術の展望を示す。

当社は今後も、社会インフラ、産業、交通、生活の各分野に対し、これまで培ってきた映像・通信技術にVCA技術、セキュリティ技術、高速大容量・高信頼化技術等を取り入れ、豊かで安心・安全・快適な社会の実現に貢献していく。



映像・通信技術による安心・安全で快適な社会の実現

映像技術、通信技術を活用した当社現有製品(The present)に対し、VCA・セキュリティ・高速大容量・高信頼化等の様々な先端技術を取り入れて発展させ(The future)、社会インフラ、産業、交通、生活の分野で、更なる安心・安全で快適な社会の実現に貢献していく。

1. ま え が き

当社は、豊かな社会の実現に貢献するため、映像技術と通信技術を活用した製品展開で、安心・安全・快適性の提供に取り組んでいる。

本稿では、映像技術として、防災・減災等に用いられる映像監視技術、製造ラインの生産性改善等に寄与するVCA技術について展望を述べるとともに、これら映像技術を適用したシステムをも支える通信技術として、光通信技術、IoT GW技術、列車無線技術、移动通信技術について、展望を述べる。

2. 映 像 技 術

2.1 映像監視技術

安心・安全な社会に向けて、映像監視技術は、災害発生前の対応のための確認、又は災害発生後の状況確認を始めとして、店舗や施設での犯罪抑制と事後確認に使用されている(図1)。伝送技術の発達やアクセスサービスの普及によって、以前は送信が困難であった映像データも遠く離れた場所に、いつでも安価に届けられるようになった。これは、映像のアナログからデジタルへの変化とともに、映像の高解像度化、ダイナミックレンジの拡大(暗いところから明るいところまで)、加えて映像圧縮技術の進歩、高速・大容量伝送技術の発達の賜物(たまもの)である。

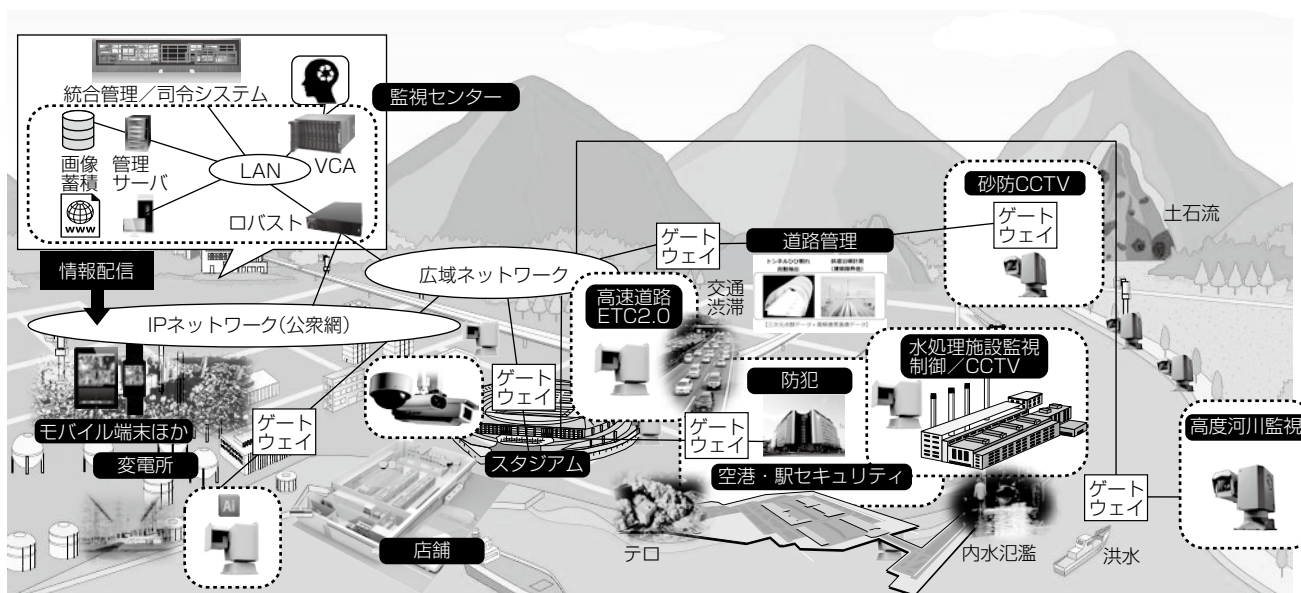
スーパーやコンビニ等の店舗では、万引き等の犯罪抑止を目的に映像監視が行われてきた。マンションではエントランスやエレベーターカゴ内、建物周辺や駐車場・駐輪場にカメラが設置され、犯罪抑止に使用されることが一般的である。スーパカー、空き巣、駐車場・駐輪場での車・自

転車へのいたずらや盗難防止、迷惑行為防止等の犯罪抑止である。オフィス・商用等の大規模ビルでは、フロア数が多く監視エリアが広いことやエントランス、ホール、地下街、ビル外周等監視対象が多いことから設置運用するカメラの台数が多い。これらのカメラ映像は、ビル設備を管理する防災センターでの24時間一括監視が求められる一方、ビルの駐車場管理室での映像監視等、複数拠点での監視業務に使用されている。河川や道路の監視は、監視エリアが更に広く、1台のカメラが監視する範囲も広い。そのため、ズームレンズの搭載、高速な旋回機能を保持したカメラが使用され、河川の水量、道路の凍結、保全状況を確認する。

これらの映像監視に共通するのは、監視員又は確認する人間の存在であり、人の目によってその判断が実施されてきた。これからの映像監視は、効率化・省人力化を目的に映像の内容をAIが自動的に理解し、人間に注意を促すVCA技術を適用したシステムへと変化していく。

2.2 VCA技術

映像監視システムの映像を活用した様々なVCA技術が市場に投入されている。映像の変化を捉える動き検知や、指定した画像エリアへの侵入検出等は、比較的簡易な処理で実現可能であることから、カメラ単体機能として実装されている製品も多い。しかし、事件事故の記録映像では特定の対象者を見つける要求が高く、顔認識⁽¹⁾や歩容認証⁽²⁾等の高度な画像解析技術の適用が進められている。これらのVCA技術は、セキュリティ用途だけでなく、マーケティングに活用するという期待も高い(顧客の動線解析や人数カウント等の解析)。当社では、製造現場での生産性の向上(効率化)を目的に、VCA技術“映紋”⁽³⁾を適用して



WWW : World Wide Web, IP : Internet Protocol, ETC : Electronic Toll Collection System, CCTV : Closed Circuit TeleVision

図1. 映像監視システムの適用例

自動で各作業時間を計測したり、間違った作業を検知する映像解析ソリューションを実現している。映紋は映像データに含まれる動き情報を可視化し、代表映像の映紋と、評価対象映像の映紋を比較することで、評価対象映像の動きが同等であるか否かを判定するものである。これらによって、作業時間測定の自動化や代表映像と異なった作業検知が可能になり、リアルタイムに作業現場の状況を把握でき、タイムリーに作業指示が行えるようになるので、生産性向上につながる事が期待できる。

また、あらかじめ所定の映像を学習させ、異常な作業等の検知を行う、AIとVCAを組み合わせた技術も利用されている。当社は、独自のコンパクトAI“Maisart”を開発し、監視機器でのAI映像解析処理を可能にしている。これによって、車いすを押している人や迷子、白杖(はくじょう)を持つ人の検出や、置き忘れた荷物の検知、ふらついている人の検知等、これまで人間が実施してきた判断の強力な支援技術として活用可能である。当社は、このようなAIとVCA技術を融合した技術・製品開発に取り組み、社会の発展に貢献していく。

3. 通信技術

3.1 IoT GW技術

近年、サービス価値・生産性・保守性等の向上を図るIoTシステムが多数構築されている。

IoTシステムに接続されるIoT機器数が増大する中、IoTシステムへのサイバー攻撃も増加している。その要因としては、CPUやメモリ等のリソース制約によるセキュリティ対策機能の脆弱(ぜいじゃく)性や、初期パスワードのまま運用されているIoT機器の存在等が考えられている。

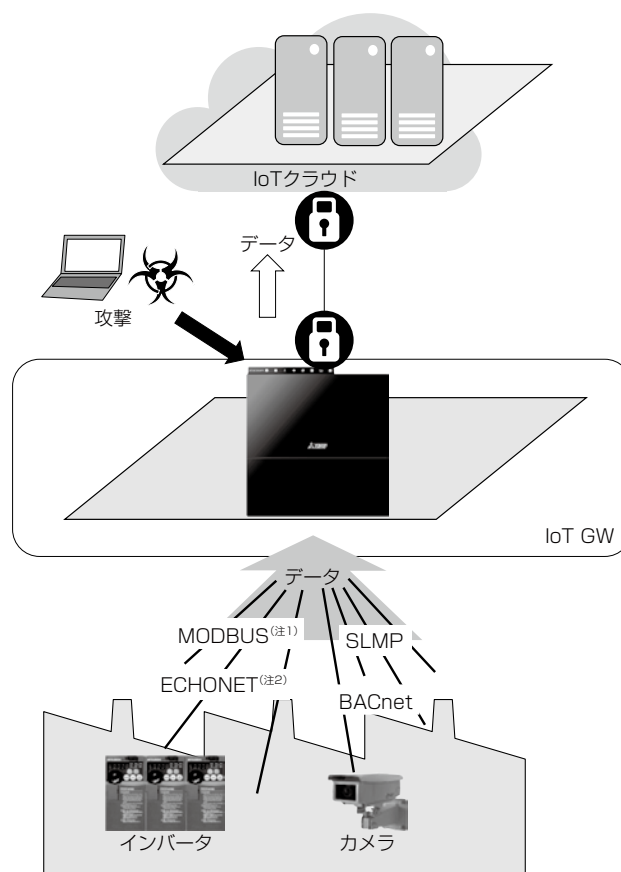
このため、IoT機器と外部ネットワークを接続するIoT GWは、自身のセキュリティ確保だけでなく、配下の脆弱なIoT機器をサイバー攻撃から守るための仕組みが近年ますます必要となっている。

このような状況で当社は、ファームウェア・アプリケーション・暗号モジュールの改竄(かいざん)防止機能の搭載によるIoT GW自身のセキュリティ確保(図2)に加え、異常検知機能を搭載することで配下のIoT機器を守り(図3)、サイバー攻撃に強いIoTシステムを実現している⁽⁴⁾。

2020年にはIoT機器数が約400億個に増大すると言われており⁽⁵⁾、多様なサイバー攻撃に対するセキュリティ確保がますます重要となる。今後も当社のセキュリティ技術に磨きをかけ、安心・安全で快適な社会の実現に貢献する。

3.2 光通信技術

平成の30年間で、通信コンテンツは音声からデータに、静止画から動画へと変遷し、携帯電話、スマートフォンの普及やモノとモノとのインターネット通信(IoT)の普及によって、通信トラフィックは爆発的に増加してきた。



ECHONET : Energy Conservation and Homecare Network
SLMP : SeamLess Message Protocol
BACnet : Building Automation and Control networking protocol

(注1) MODBUSは、Schneider Electric USA, Inc.の登録商標である。
(注2) ECHONETは、一般社団法人 エコネットコンソーシアムの登録商標である。

図2. IoT GW自身のセキュリティ確保

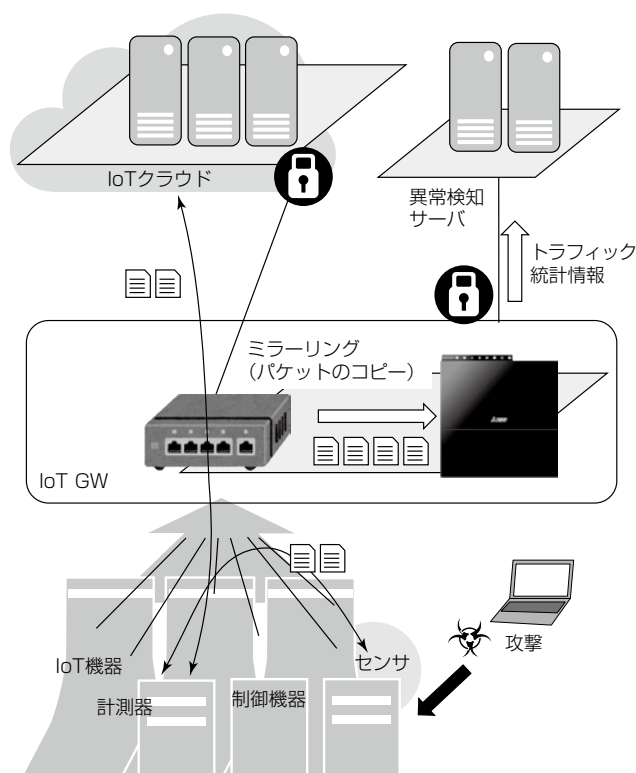


図3. IoT GW配下の機器に対するセキュリティ確保

各家庭と通信キャリアをつなぐ光アクセス網では、PON技術の実用化によって2004年に1.25GbpsのGE-PONシステムが本格導入された。現在は通信速度を10倍にした10G-EPON(10 Gigabit-Ethernet PON)システムの導入が始まり、トラフィック増大に対応している(図4)。当社はGE-PONシステムで累計1,500万台以上の宅内向け装置を出荷し、国内で3,000万加入を超えるFTTH(Fiber To The Home)の普及に貢献してきた。

一方、バックボーンとしてのコア・メトロ網では、波長多重技術やコヒーレント伝送技術等によって400Gbps、

1 Tbps等への大容量化が進んでいる(図5)。当社は自然災害時等での高信頼化の機能を盛り込み、安心・安全な大容量伝送の提供に貢献している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

今後、IoT化の更なる進展、遠隔医療、スマート工場等の産業用途、自動車・輸送機器の自動運転等、様々な分野で通信の大容量化・高速化が求められる。当社は、より高速な25G/50Gbps次世代PONシステムやデジタル信号処理技術の開発によってこれらの動向に対応していく。

3.3 列車無線技術

列車無線は、地上指令員と走行中の列車乗務員との間で

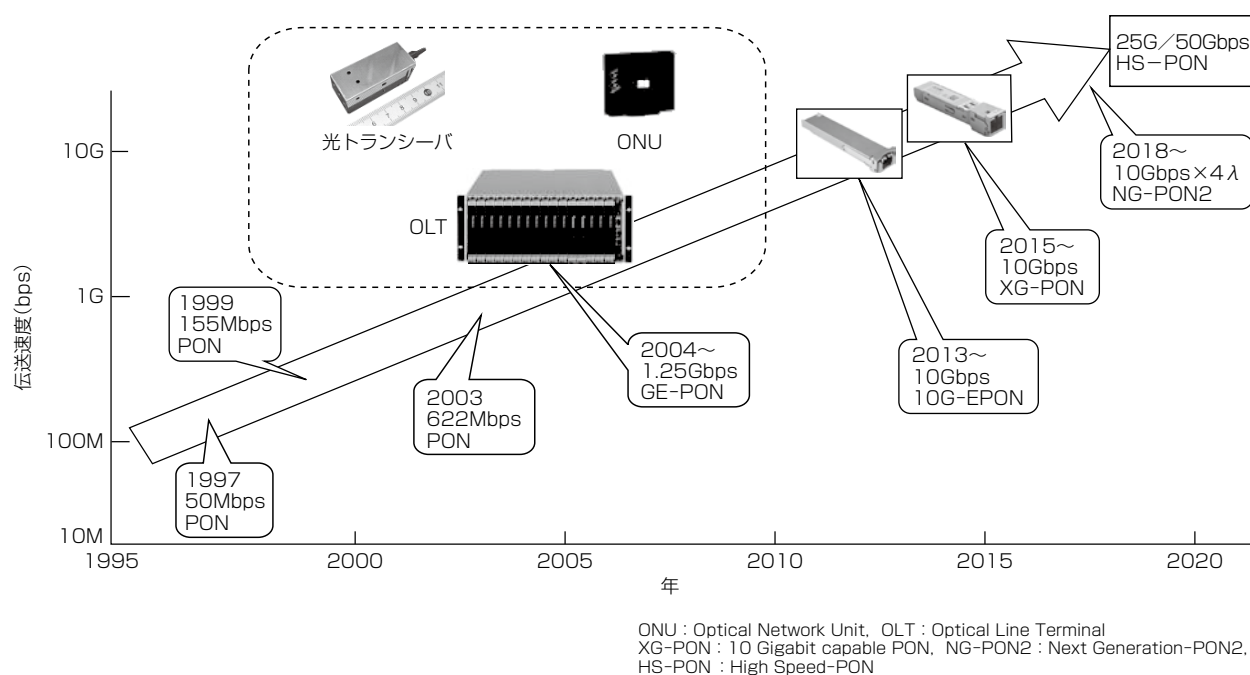


図4. 光アクセス網の進展

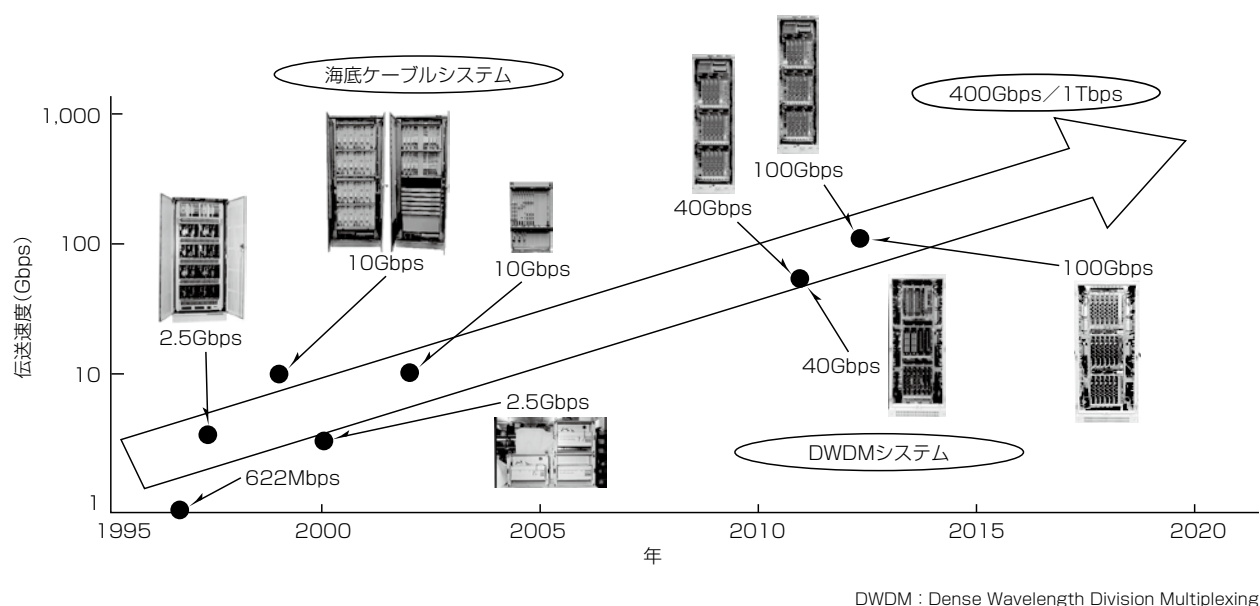


図5. コア・メトロ網の進展

音声通話するために用いるものとして、1960年代から導入が進められたものである。当社は新幹線を始め、在来線、公営・民営鉄道向けに広く列車無線システムを提供してきている⁽⁸⁾。

新幹線では、東北・上越新幹線を皮切りに2002年からデジタル化が進められた。当社独自の送信ダイバーシチ技術等の採用によって、全線にわたり安定した回線品質を実現し、従来の音声通話に加えて高速データ伝送が可能になった。これによって、新幹線指令伝達システムや、メンテナンス効率化等の業務用途にとどまらず、情報提供サービスや車内インターネット等、列車内乗客向けの車内サービスの充実に寄与することになった。

在来線でも、2007年に首都圏で列車無線のデジタル化が始まった。これによってデータ伝送が可能になり、列車運行情報の伝送による乗務員支援や、客室への運行情報案内等のサービス充実化によって、スマートな列車運行の実現に貢献している⁽⁹⁾。また、首都圏だけでなく京阪神エリアや地方線区、今回の特集で紹介するモノレールや新都市交通でも導入が活発化している。

列車無線は今後さらに信頼性の向上、伝送容量の増加を進めながら、データ伝送主体に軸足を移し、乗務員支援、旅客向けサービスの充実化に加え、無人運転化を含む無線式列車制御システム、車内防犯システムや、メンテナンスの省力化への活用等が期待される(図6)。

3.4 移動通信技術

移動体通信は、1Gの音声主体のアナログ通信、2Gのデータ通信にも対応したデジタル化、3Gの画像伝送等に対応したマルチメディア化、4Gの快適なスマートフォン利用を可能にした高速化等を経て、5Gの世代を迎えようとしている。5Gでは、これまでの技術トレンドであった通信速度の高速化だけでなく、超低遅延、多数同時接続という特長を持っている。このため、5Gは、携帯電話サービスだけでなく、自動車、産業機器、ホームセキュリティ等の様々な産業での、AI・IoT時代のICT(Information and Communication Technology)基盤となり得る。

5Gの標準仕様を策定する機関である3GPP(3rd Generation Partnership Project)では、Release 16なる標準仕様策定でのユースケースとして、エンターテインメント産業のAR(Augmented Reality)・VR(Virtual Reality)だけでなく、FA(Factory Automation)、Transport Industry、Electrical Power Distributionといったユースケースでの活用も前提とした仕様策定が行われており、5Gの本格普及以降、様々な産業での利活用が予測される。

このような状況で、当社は、5Gの特長である高速・低遅延・多数同時接続のうち、高速・低遅延を可能にする、Massive MIMO(Multiple Input Multiple Output)⁽¹⁰⁾技術と装置実装技術を確立した。

Massive MIMO技術は、多素子アンテナとMIMOを組

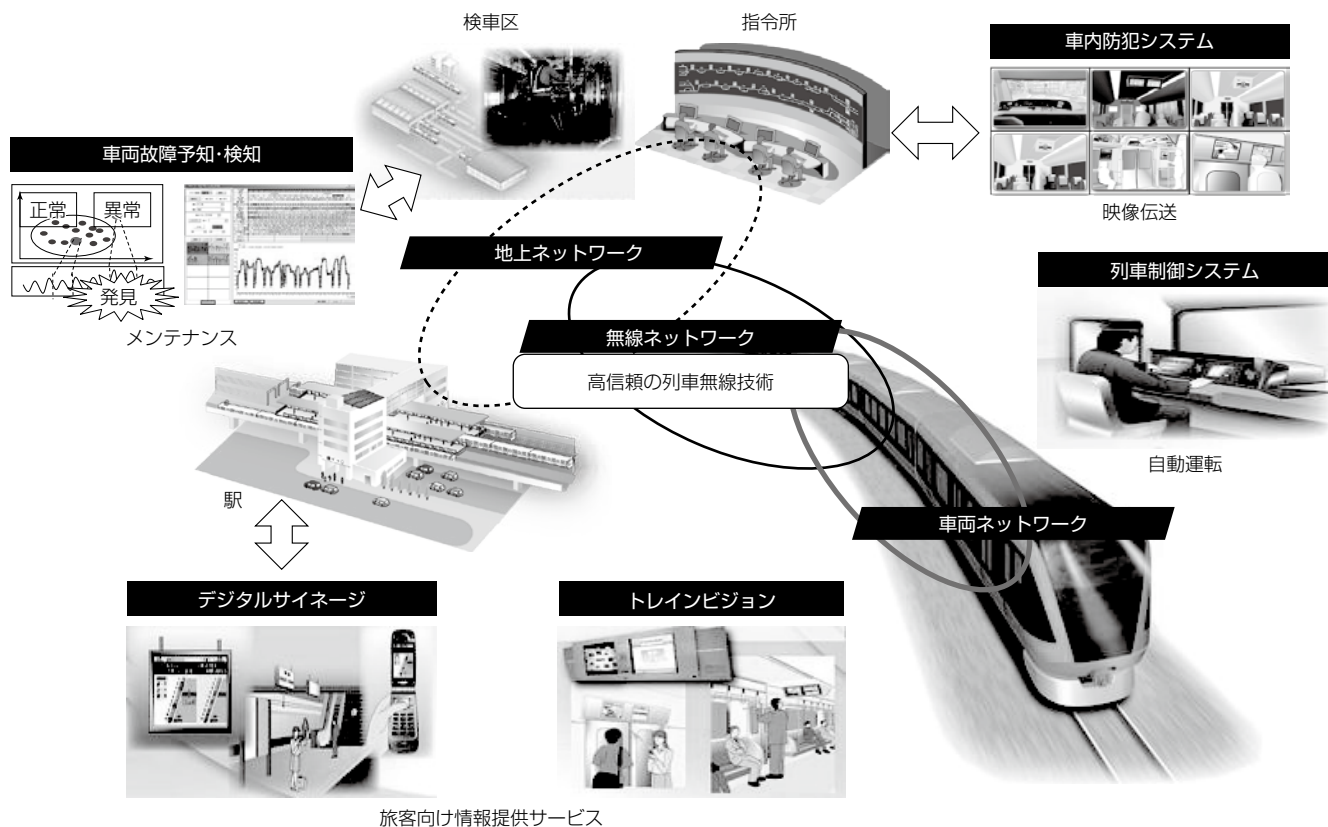


図6. 列車無線の展開事例



図7. 5G通信技術の屋外・移動環境試験

み合わせて無線信号の空間多重度を上げることで飛躍的に周波数利用効率を向上させ、高速通信を可能にする技術であり、これまで当社が培ってきた、アンテナ、高周波回路、信号処理等の要素技術にシステム構築技術を組み合わせることで、世界で初めて^(注3)屋外・移動環境、28GHz帯16ビーム空間多重で、周波数利用効率67bps/Hz、通信速度27Gbpsを実現した(図7)⁽¹¹⁾。また、装置実装技術では、高速演算回路技術等によって、4Gの1/4以下の低遅延となる0.25ms単位の信号処理を実現した。

Massive MIMO技術では、パネル型APAA(Active Phased Array Antenna)、可逆性プリコーディング、ビーム制御といった技術が凝縮されている。パネル型APAAは、従来のブリック型から容積と質量を減らすため、多素子アンテナと受動回路をプリント基板上で構成するとともに、移相器、可変利得増幅器等の能動回路を同プリント基板上に表面実装したパネル型アンテナ・RF(Radio Frequency)モジュール構成技術である⁽¹²⁾。可逆性プリコーディングは、基地局が受信信号から基地局-端末間の伝送路推定を行い、この伝送路推定結果を基に、移動端末が受信する空間多重信号間の干渉をあらかじめキャンセルするよう基地局送信信号に重み付けを加える技術であり、空間多重度を上げるとともに高速通信を可能にする⁽¹³⁾。ビーム制御は、高周波数利用に伴い生じる電波伝搬損を補うために形成した、ビーム幅の狭い指向性ビームであっても、回線品質を保てるように移動端末の初期補足と追従を可能にする技術である。

移動体通信では、今後、更なる高周波数の利用、空間多重の高度化が進むと予測され、当社は、これに供する高速・低遅延通信技術を確認した。今後、この技術を様々な産業に活用し、社会の発展に貢献していく。

(注3) 2018年11月22日現在、当社調べ

4. む す び

当社の映像・通信技術について、展望を述べた。

当社は、これまで培ってきた映像・通信技術に、VCA技術、セキュリティ技術、高速大容量、高信頼化技術等を取り入れ、豊かで安心・安全・快適な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 今岡 仁：世界一の顔認証アルゴリズム開発の舞台裏，NEC 情報・メディアプロセッシング研究所，第5回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム
- (2) 八木康史：歩容鑑定～深層学習でどんな向きの人物も認証可能に～，大阪大学プレスリリース (2017)
- (3) ネットワークカメラの付加価値向上技術“映紋”，三菱電機技報，**92**，No.1，25 (2018)
- (4) 佐藤浩司，ほか：IoTゲートウェイのセキュリティ技術，三菱電機技報，**92**，No.6，356～360 (2018)
- (5) 総務省：平成30年版 情報通信白書
- (6) Yoshima, S., et al.: Experimental Investigation of an Optically-superimposed AMCC in 100 Gb/s Coherent WDM-PON for 5G Mobile Fronthaul, ECOC 2016, Th.1.D.1 (2016)
- (7) 三菱電機(株)：三菱電機の100Gソリューション
http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/carrier_network/index.html
- (8) 伊村 真：無線通信システム技術の変遷と今後の展望，三菱電機技報，**88**，No.9，552～555 (2014)
- (9) 三瀬敏生，ほか：デジタル列車無線システム—東日本旅客鉄道(株)首都圏在来線への導入—，三菱電機技報，**82**，No.2，167～170 (2008)
- (10) 奥村幸彦，ほか：第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発，「電波資源拡大のための研究開発」第12回成果発表会 (2019)
- (11) 酒井 学，ほか：5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMOシステムを用いたフィールド環境SU-MIMO伝送実験，信学技報，**118**，No.435，RCS2018-277 (2019)
- (12) 渡辺 光，ほか：5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向けアンテナRFフロントエンドモジュールの開発，電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会，AP2018-180，59～64 (2019)
- (13) 西本 浩，ほか：超多素子アンテナシステムでのマルチビーム空間多重・制御技術，三菱電機技報，**92**，No.5，296～299 (2018)

広域監視ソリューション

広瀬高久*
桑原茂樹*
田辺慎二**

Wide - Area Surveillance Solution

Takahisa Hirose, Shigeki Kuwahara, Shinji Tanabe

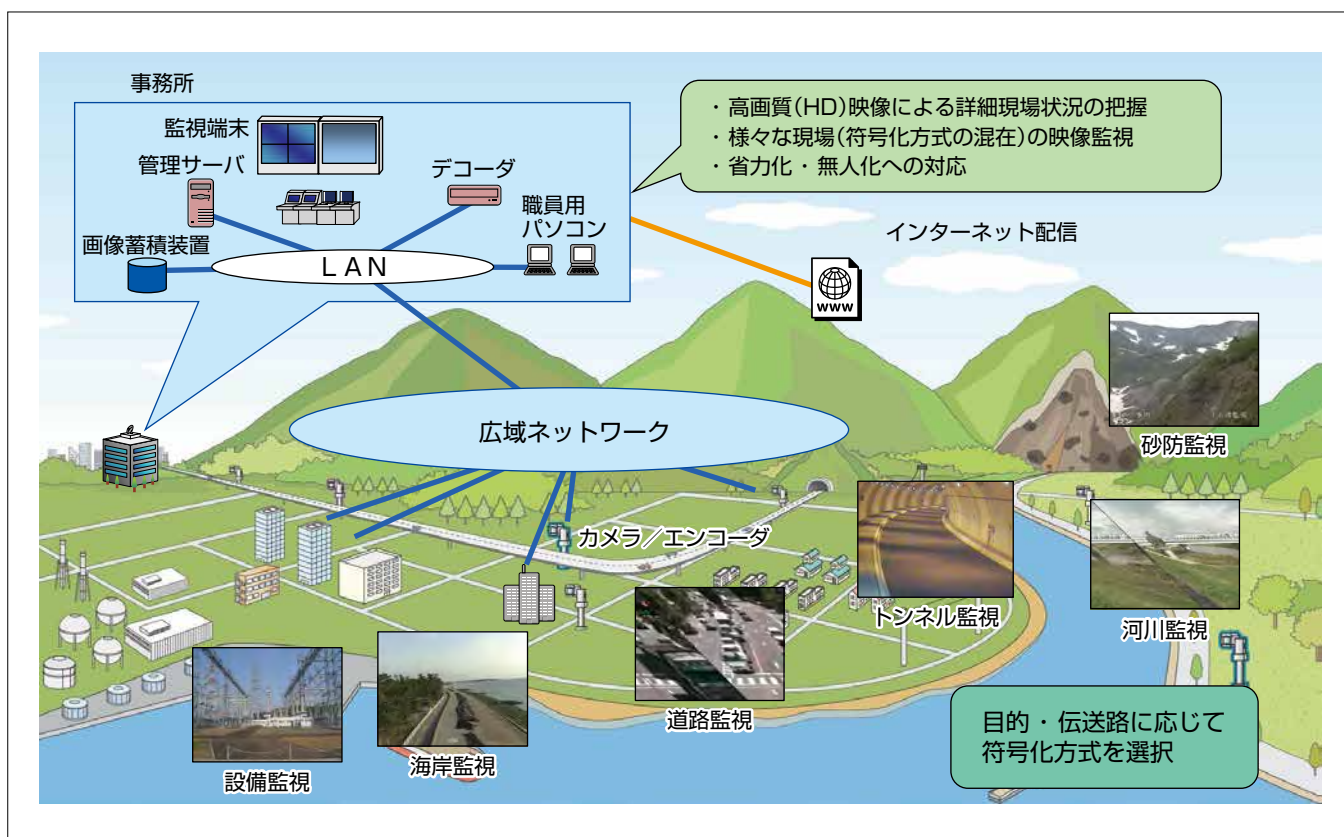
要 旨

広域監視システムは主に国土交通省や地方自治体が整備する河川や道路に設置され、“防災・減災”を目的として災害の抑制、災害発生時の状況・状態をリアルタイムに把握するため広範囲の管理エリア内に設置されたカメラ映像を集中監視するシステムで運用されている。また、有料道路での交通状況の監視、電力設備、水処理施設等様々な設備の維持管理用途でも導入されている。

これらは昼夜を問わず、台風や地震などの自然災害発生時でも監視できることが重要であるため、高感度・高倍率・高速旋回の耐環境型カメラ装置を始め、遠隔地へ高品質

画像を送るためのエンコーダ／デコーダ、画像蓄積装置、管理サーバ等でシステムを構成している。

三菱電機では、単なる映像監視ではなく整備されたカメラをセンサとして利用し、画像解析処理技術で映像から監視に必要な情報を提供することによる監視運用支援の実現、3Dレーザスキャナで収集する3D点群データを基にした三次元監視やAR(Augmented Reality：拡張現実)を使用した監視支援表示の提供、超広角画像補正技術を使用して広範囲を撮影することによる監視効率向上など、新たなアイテムを取り入れた広域監視ソリューションを展開している。



広域監視ソリューション

広域監視ソリューションは“防災・減災”を目的として社会インフラ監視のために河川、海岸、道路(トンネル)に設置されるほか、電力設備、水処理設備等に設置され、監視運用を支援するために用途に応じた様々な機能を提供している。

1. ま え が き

広域監視システムは、主に国土交通省や地方自治体が整備する河川や道路に設置され、“防災・減災”を目的とした監視運用に使用されている。また、有料道路の交通状況、SA(Service Area)／PA(Parking Area)の状況やインターチェンジのレーン監視等のほか、電力設備、水処理設備、港湾施設等、様々な監視用途に使用され、設備維持や災害発生時の状況をリアルタイムに監視することで、社会インフラの維持に貢献している。これらの監視では、昼夜、災害時にかかわらず安定して監視できることが重要であるため、耐環境性を持つとともに監視用途に合わせた製品をラインアップし、各製品を組み合わせるシステム構築を行っている。

本稿では、広域監視システムと三菱電機の監視カメラ装置の特長について述べるとともに、三菱電機が手掛ける広域監視システムの代表的な応用例でのカメラ装置の特長と監視支援機能について述べる。

2. 広域監視システムと三菱電機の監視カメラ装置の特長

広域監視システムでは、夜間や悪天候時でも監視が行える高性能なカメラ仕様が求められている。また、多数のカメラ装置が設置される中で、映像による監視だけではなく、監視映像を利用した情報提供や効率的な監視運用などの要求が高まってきている。これらの状況から、三菱電機では監視映像を利用した画像解析技術を用い、カメラをセンサとして活用することで、効率的な監視運用支援を行う取組みを行い、より利便性の高いシステム提供を行っている。

広域監視システムでは、屋外環境下での監視目的としてカメラ装置が運用されるため、様々な気象条件や設置環境でも安定した監視映像を提供する必要がある。三菱電機のカメラ装置は、それに対応する次のような特長を持っている。

(1) 耐温度性能

屋外の直射日光を受ける環境での使用のため、直射による温度上昇を考慮した構造・耐熱設計にすることで、直射日光の温度上昇にも耐え得る性能を持っている。

(2) 耐腐食対策

屋外での使用に際し、特に河口付近や沿岸部での飛来塩分による腐食対策として、本体はアルミニウム合金、ねじ類はステンレスといった耐食性に優れた材料を使用し、塗装にも耐塩性を考慮した対策を講じている。また、アルミニウム合金の本体とステンレスねじの接合面で発生する電食(異種金属接触面の電位差による腐食)の対策としてステンレスねじへのジオメット(電食を抑えるめっき)処理を施している。

(3) 積雪地域対策

着雪・凍結による旋回動作不良を防止するため、可動部には着雪や水分の付着を抑制する目的で、撥水(はっすい)性の高いフッ素系樹脂で可動部を覆い、雪や氷の付着による凍結を防止する工夫をしている。また、豪雪地域の家屋の屋根のような急傾斜形状のオプションの防雪用フードをカメラ装置上部に装着することで、カメラ装置への積雪量を減らし、旋回動作への影響を軽減する対策を行っている。

(4) 視界確保

カメラ装置のレンズ前面はガラスになっており、雨や雪付着、ガラスの曇り、凍結、汚れの付着などを排除し、視界を確保する必要がある。良好な視界を確保するために、自動車と同様にワイパとデフロスタを標準装備している。また、ウォッシャーユニットを追加することで、カメラ前面ガラスに付着した海水塩や泥などの汚れを洗浄可能にしている。

(5) 旋回停止精度

あらかじめ登録した監視ポイントにカメラを向けるプリセット機能を使用して重要監視箇所や画像解析処理を行う場合、カメラ装置の旋回停止精度が重要となる。特に望遠で遠方を監視する場合は、旋回停止位置の僅かなずれ発生によって遠方の監視ポイントを捉えることができなくなる。三菱電機のカメラ装置は高精度駆動機構によって高旋回停止精度を実現し、監視ポイントを捉えることを可能にしている。

3. 広域監視システムの応用例

この章では、三菱電機が手掛ける広域監視システムでの代表的な応用例である河川監視システム、道路監視システム及び有料道路監視システムでのカメラ装置の特長と監視支援機能について述べる。

3.1 河川監視システム

河川の流況とともに、護岸状態の監視を目的としてカメラ装置が設置運用されている。主に国土交通省と地方自治体が管理する河川に設置され、特に大雨時で、水位増加に伴う護岸決壊による洪水を監視するために運用されている。

3.1.1 河川監視用カメラ装置の特長

昼夜を問わず、大雨等の悪天候時でも視野を確保して映像監視ができることが求められており、次の特長を持つ河川監視用カメラ装置が適用されている。

(1) 高感度化

河川では、夜間の照度が確保できない環境下での監視となるため、カメラ装置自体の高感度化が求められている。

現在では星明かり程度の照度下(0.02ルクス程度)でも監視可能な最低被写体照度が国土交通省の標準仕様で定められている。一般的なHD(High Definition)カメラ装置と高感度HDカメラ装置の夜間での視認性の比較を図1に示す。

この仕様に対応するために、三菱電機では三板フルHDカメラ装置“HM-3000”やカラー／白黒機能を搭載した単板フルHDカメラ装置“HM-7630”を製品化している。

(2) 高解像度

現在、国土交通省で整備されているカメラ装置はフルHD(1920×1080ピクセル)カメラが主流となっており、従来のSD(Standard Definition)(720×480ピクセル)カメラと比較し、高解像度化が進んでいる(図2)。

(3) 照明灯搭載

夜間監視での更なる視認性確保のために、カメラ装置への照明灯搭載が要求される場合がある。従来はハロゲン照明灯を搭載していたが、近年は長寿命化と低消費電力化を図るためにLED照明灯を採用している。

3.1.2 河川監視での監視支援機能

(1) 画像式水位計測機能⁽¹⁾

近年、集中豪雨や局地的な大雨などによる河川氾濫、堤防決壊等によって各地で甚大な被害が発生しており、洪水時の情報収集の迅速化と住民への適切な情報提供が重要になっている。三菱電機では、現場に設置されているカメラ装置の映像を利用して水位計測を行う画像式水位計測を開発して市場投入している。画像式水位計測は、主に現場の画像を取得する撮像機能と、その画像から水位解析を行う計測処理機能で構成している。河川に設置されたフルHD

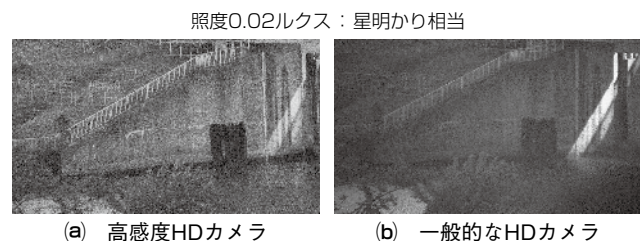


図1. 高感度カメラと一般的なHDカメラとの夜間映像比較

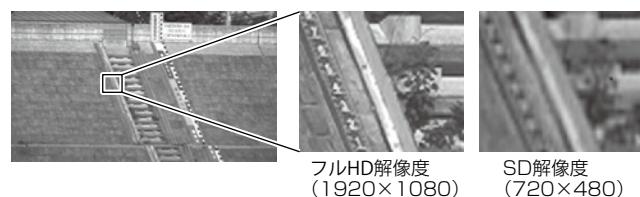


図2. フルHD／SD解像度の比較

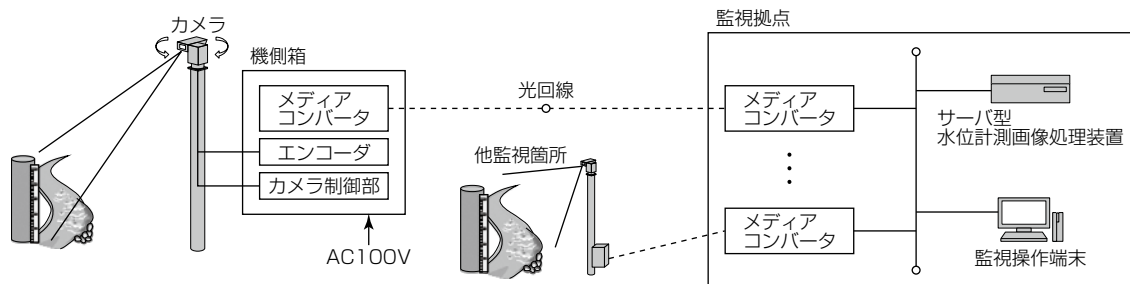


図3. 画像式水位計測システムの構成

カメラ装置が撮影した量水板の画像を水位計測画像処理装置で画像相関方式を用いて解析を行い、水位計測を精度±1cmで実現する画像水位計測システムを開発した(図3)。

(2) AIを使用した画像解析型水位計測機能

従来の画像式水位計測には、計測対象として量水板が必要であったが、AI(Artificial Intelligence)による深層学習方式を用いた画像解析型水位計測機能では、量水板の代わりに橋脚や護岸堤防の画像を対象に水位計測が可能になり、量水板のない水位計測箇所の追加が容易となった。また、光IP(Internet Protocol)網やクラウドを利用することで、計測データを集約管理することが可能になり、ユーザーへの情報提供を広く行うことができる(図4)。

(3) 3Dレーザスキャナによる監視の高度化機能

河川監視を強化する上で、従来の映像情報による二次元監視に加え、3Dレーザスキャナで収集する3D点群情報を基にした、三次元監視に関心が高まっている。三菱電機の3Dレーザスキャナ機能を搭載したカメラ装置“FV-2100”によって次の機能を提供できる。

①メジャー表示

画像中央の被写体までの距離をリアルタイムに計測することで、カメラ装置の旋回、ズーム動作によるカメラ視野範囲の変化に追従してメジャー表示が可能であり、おおよその水位や橋脚などへ付着したゴミの大きさの概況把握を可能にした(図5)。

②AR重畳表示

3D点群データと視野情報を活用し、広角視野範囲から望遠による詳細視野範囲まで、レンズの画角に追従して水位標を映像上にAR重畳表示が可能である。

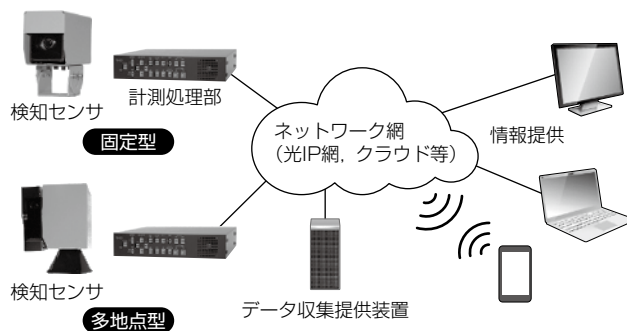


図4. AIを使用した画像解析型水位計測システムの構成

線や文字をカメラ装置の旋回、ズームに追従して表示することによって、実在する映像内の風景に仮想的な追加情報を表示する(図6)。

3.2 道路監視システム

国土交通省が管理する国道沿線にカメラ装置を設置し、降雪時での路面の凍結状況、大雨時での法面(のりめん)の崩落や落石等の監視を行うことを目的として運用されている。

3.2.1 道路監視用カメラ装置の特長

国道の監視では道路の新設に伴い、監視カメラ装置の増設が行われるとともに、東京2020オリンピック・パラリンピックに向けた計画によって、設置台数が増加する傾向にある。そのため、性能を維持しながら価格を抑えたカメラ装置が要求されている。

三菱電機では、新型LSIを採用して道路監視用に必要な環境・機能・性能に対応させた低コストのカメラ設置“HM-7030”を開発した。

道路監視用カメラ装置の特長を次に示す。

(1) 感度

道路照明が整備されているため河川監視用カメラ装置ほ

どの高感度化は求められていないが、峠部・山間部での夜間監視を考慮して、月明かり程度の照度下での監視が可能になる0.5ルクスの最低被写体照度が標準仕様化されている。

(2) 近赤外LED照明灯搭載

従来、道路監視用カメラ装置で照明灯を照射した場合、運転者の視界に影響が出るため、照明灯は搭載しないことにしていたが、近赤外LED照明灯を搭載することで運転者の視界に影響を及ぼすことなく、峠部・山間部の低照度環境での監視を可能にする要求が出ている。近赤外LED照明灯を照射する場合、カメラ装置側は白黒モードに切り替えて、近赤外領域での監視を可能にする機能を持つ。

3.2.2 道路監視での監視支援機能

(1) 方向表示機能

道路を監視する上で、カメラ装置の視野が“上り方面”を向いているか、“下り方面”を向いているかが判別しにくい。そのため、どの方向を監視中であるかを映像上に文字重畳する機能が求められている。三菱電機では、監視事務所でカメラ制御を行うカメラ管理サーバとの連携によって、カメラ管理サーバからカメラ装置の旋回位置に基づいた方向表示の文字切替えを実現している。今後はカメラ装置の旋回に追従してカメラ装置が自動的に方向表示を映像上に文字重畳する機能を開発する。

3.3 有料道路監視システム

有料道路では、一般道路監視の用途に加え、交通流監視、トンネル坑内監視、路面監視、ETC(Electronic Toll Collection)レーン監視、SA/PAの監視等の交通・利用者状況把握や施設管理、防災を目的として運用されている。交通流監視では、事故発生時の対応を迅速に行うための状況把握に必要なシステムとなっており、常に安定稼働が求められている。

特に、トンネル坑内監視では各種防災設備(火災検知器、非常通報装置等)との連動によって、異常が発生した地点を的確に捉え、火災発生時には消火設備を動作させるとともに、トンネルを封鎖する等の処置を行うために重要な役割を担っている。

3.3.1 有料道路監視用カメラ装置の特長

有料道路監視用カメラ装置でも、一般道路監視用カメラ装置同様に東京2020オリンピック・パラリンピックに向けた計画によって、設置台数の増加が見込まれており、性能を維持しながらの低価格が望まれている。

有料道路監視用カメラ装置の特長を次に示す。

(1) ワイドダイナミックレンジ機能の搭載

高速道路でのトンネル入り口／出口付近の監視では、トンネル内部とトンネル外部の双方を同時に監視する必要がある。このような監視に対応するために、暗部から明部まで同時に撮影できるワイドダイナミックレンジ機能を搭載している。



図5. メジャー表示例



(a) 広角時



(b) 望遠時

図6. AR重畳表示例

(2) 機器小型化

機器構成を簡素化し、トンネル坑内への設置機器を小型化するため、メディアコンバータをカメラ装置に内蔵し、光出力での伝送に対応している。カメラ映像に関しては、H.264で圧縮符号化されることが標準仕様になっており、カメラ装置内蔵のエンコーダで対応し、国土交通省で定められている符号化フォーマットに準拠している。

(3) トンネル監視用固定カメラ装置の環境性能

トンネル坑内に設置されるカメラ装置については、主に非旋回の固定カメラ装置が採用される。構造面として、トンネル壁面清掃時の水洗浄噴射に耐え得るために、IP65以上の防塵(ぼうじん)・防水性能を実現している。

(4) 制振機能の搭載

有料道路では特に都市部で、道路が高架となっており、通行する自動車、トラック等の影響によってカメラ装置も振動するため映像の揺れが発生する。その振動を吸収するため、カメラ装置本体に制振機能を搭載している。

(5) 超広角カメラ

トンネル坑内で、カメラ装置の設置場所を通過する車の前方・後方の監視を180°以上の水平画角を持つ超広角カメラ1台で可能にしている。

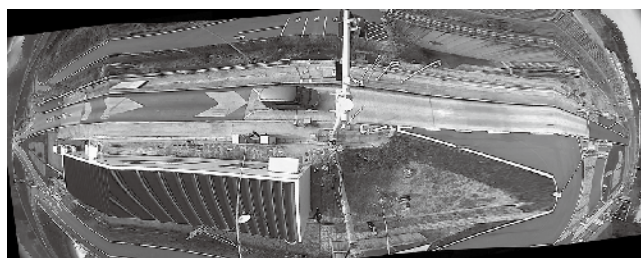
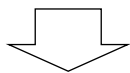
3.3.2 有料道路監視での監視支援機能

(1) 車線監視装置との連携によるETCレーン監視機能

インターチェンジでのETCレーンを操作管理する車線監視装置と連携し、ETCレーンでのバー開閉異常発生時等にカメラ映像での状況確認が行えるシステムを構築している。



超広角カメラで撮影した原画



平面化処理後の画像

図7. 超広角カメラ映像の平面化処理

(2) 超広角カメラ映像の平面化処理機能

水平画角180°以上の超広角レンズによって広範囲監視を実現しているが、レンズの特性上、周辺部分が湾曲した映像となるため、超広角カメラ映像の平面化処理機能を導入している。中央部は平面化処理を強め、周辺部は平面化処理を弱めることで、自然な距離感での監視と周辺部の滑らかな表示の両立を実現している(図7)。ETCレーン全体を真上から見た映像にすることによって、視認性が改善され全体の状況把握が可能になり、監視効率が向上する。

4. 今後の課題

4.1 運用支援機能の開発

広域監視では、主に“安心・安全”の社会を目指し、社会インフラの維持を目的とした“防災・減災”や電力設備、水処理設備等の各種設備管理を目的として監視カメラ装置が導入されている。その中で、監視効率化や省力化に結び付く運用支援機能を継続して開発し、提供していくことで社会に貢献していく必要がある。

4.2 監視カメラ装置の更なる高感度化と高倍率化

夜間での河川流況監視を行うとともに、安定して画像処理による事象検知を行うためにも、監視カメラ装置の更なる高感度化が要望される。また、広範囲で遠方監視を行うために、ズーム倍率の向上が求められる。

4.3 電源

災害発生による停電時での電源バックアップ方法について検討が進められている。発電機や蓄電池による電源バックアップ運用時での長時間稼働を可能にするために、構成機器の省電力化を進めていく必要がある。

5. む す び

国土強靱(きょうじん)化計画の一つとして取り組まれる国土交通省の電気通信技術ビジョン3にも掲げられている⁽²⁾、映像データを用いた画像処理による事象検出システムに対応する広域監視ソリューションについて述べ、同時に今後の課題も提示した。今後も主製品の性能・機能向上は元より、画像処理関連技術やAI、その他技術との融合による新たな監視技術の開発に努め、監視業務支援・監視効率向上、自然災害に対する防災・減災・復旧支援、社会の安心・安全につながる広域監視ソリューションを提供していく。

参 考 文 献

- (1) 本田吉朋, ほか: 非接触型画像式水位計, 環境システム計測制御学会誌, 23, No.1, 22~26 (2018)
- (2) 国土交通省: 電気通信技術ビジョン3 (2018)
<https://www.mlit.go.jp/common/001226690.pdf>

耐衝撃性能を向上させた固定ドームカメラ

沖西佳雄*

大内丈士*

立花伸浩*

Fixed Dome Camera with Improved Impact Resistance Performance

Yoshio Okinishi, Takeshi Ouchi, Nobuhiro Tachibana

要 旨

東京2020オリンピック・パラリンピックを見据えたセキュリティ強化のため、監視カメラシステムの需要が高まっている。監視カメラが、低い天井等の手の届く場所に設置される場合は、いたずらによる破壊が懸念されるため、強度、特に耐衝撃性能が求められる。

今回、三菱電機では耐衝撃性能を向上させた固定ドームカメラ(型名NC-6710, NC-8610)を開発した。次に述べる二つの方策によって耐衝撃性能50Jを実現した。

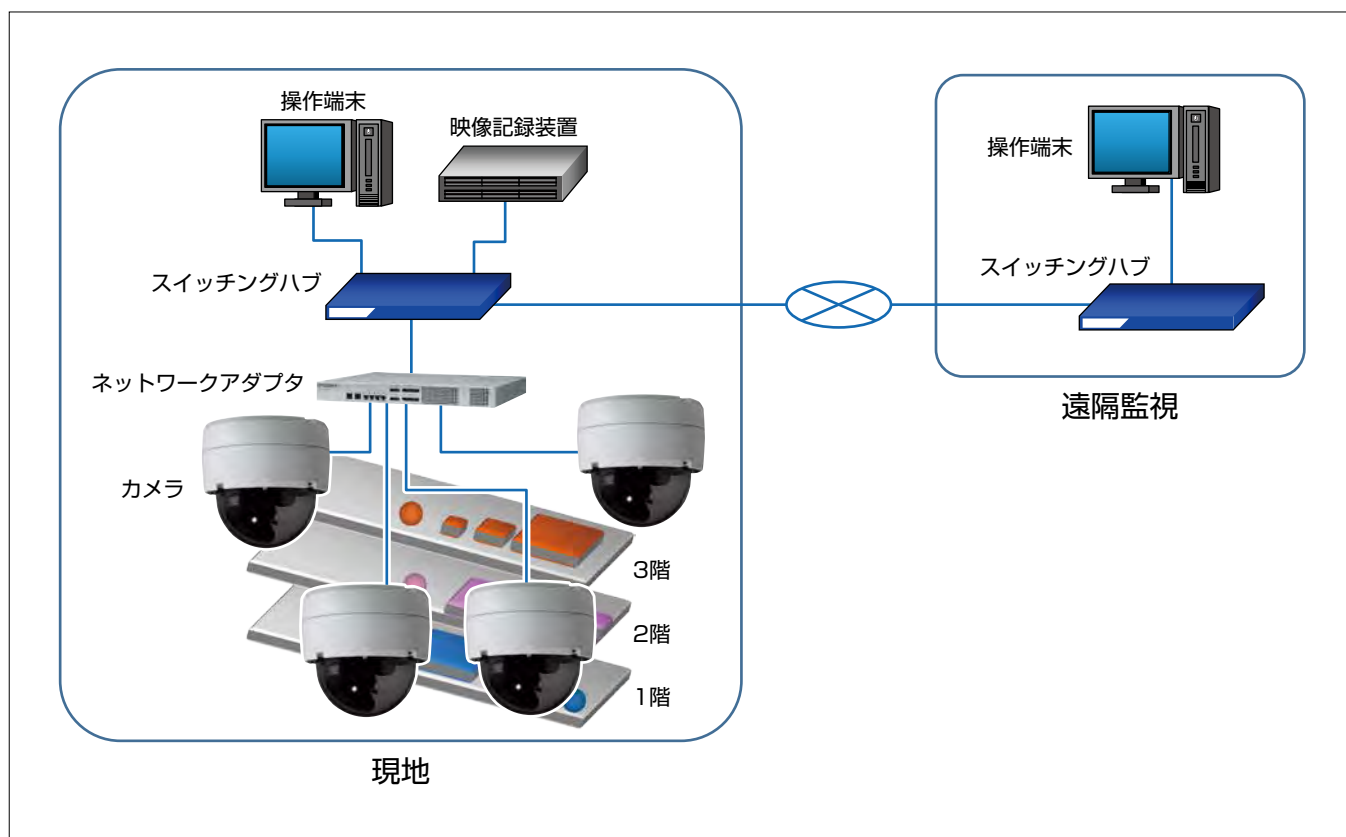
(1) 耐衝撃性を確保するドームカバー肉厚の決定

耐衝撃性能を向上させるために、固定ドームカメラのレンズユニットを保護する半球状のドームカバーが衝撃印加時の瞬間的な変形時でもレンズユニットと接触しない材質と肉厚の必要条件を求めた。ドームカバーの肉厚を増すと、

肉厚内での屈折によってレンズに入射する各光線の光路差が大きくなり、焦点位置にずれが生じることで解像度が低下する。そこで、ドームカバーの曲率半径、肉厚等をパラメータとした光学解析によって、光学性能を満足する肉厚を求め、その上で耐衝撃性と光学特性を両立させ、かつ、生産性の観点からも優れた最適なドームカバーの肉厚を決定した。

(2) 迷光現象の抑制と衝撃緩和構造

衝撃が伝わらないようにするためにレンズユニットとドームカバーのクリアランスを増すと不要な光がレンズに取り込まれ、ゴーストやフレアのような迷光現象が発生して映像品質が低下する。そこで光路解析で迷光現象発生光路を特定し、ゴム製の遮光フードをレンズ近傍に設けることによって迷光現象抑制と衝撃緩和を実現した。



固定ドームカメラを活用した監視カメラシステムのイメージ

建物などの天井や壁面に設置されたこのカメラによる撮影画像は、同軸ケーブル又はLANケーブルで上位装置であるネットワークアダプタ及びスイッチングハブを介して操作端末で監視され、映像配信データは映像記録装置に記録される。上図はこれらを実現する固定ドームカメラを活用した監視カメラシステムのイメージ図である。

1. ま え が き

東京2020オリンピック・パラリンピックを見据えたセキュリティ強化のため、監視カメラシステムの需要が高まっている。

監視カメラは用途に応じて様々なところに設置され、その中でも低い天井や壁面等、手の届く場所に設置される監視カメラは、いたずら(傘による打撃)などによる破壊が懸念される。そのような破壊を防ぐため、特に耐衝撃性能を持つ監視カメラが求められている。

今回当社では、この要求に応えるために、耐衝撃性能を向上させた固定ドームカメラ(以下“耐衝撃性固定ドームカメラ”)を開発した。

2. 耐衝撃性固定ドームカメラ

2.1 仕 様

図1に耐衝撃性固定ドームカメラ外観を、表1に仕様を示す。

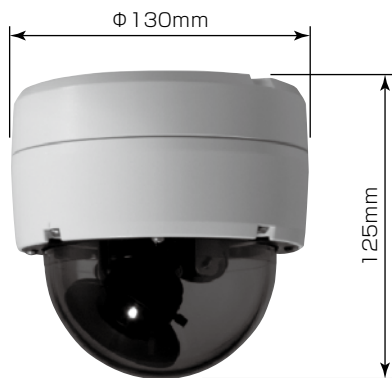


図1. 耐衝撃性固定ドームカメラ

表1. 仕様⁽¹⁾

項目	仕様
撮像素子	1/3型 CMOS
有効画素数	約131万画素
画像サイズ	①SXVGA ②VGA ③QVGA
ダイナミックレンジ	あり
電子増感	最大16倍
自動電子増感機能	自動/手動切換え
デジタル増感	最大8倍
最低被写体照度	スモークドーム装着時 標準時: 0.50ルクス 0.04ルクス (電子増感16倍) クリアドーム装着時 標準時: 0.250ルクス 0.016ルクス (電子増感16倍)
耐衝撃性	50J (JIS C 60068-2-75準拠)
使用温度・湿度	-10℃~50℃, 80% RH以下 (ただし結露しないこと)
外形寸法	約φ130×125(H)(mm)
質量	900g以下

CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor
VGA : Video Graphics Array
SXVGA : Super eXtended VGA
QVGA : Quarter VGA
RH : Relative Humidity

2.2 特 長

耐衝撃性固定ドームカメラの特長は、次のとおりである。

- (1) 破壊防止のための耐衝撃性向上
ハンマー試験(JIS C 60068-2-75)耐衝撃性50Jを実現
- (2) 解像度の確保
ドームカバーの解像度200万画素を確保
- (3) 迷光現象の抑制
画角外からの入光による映像品質低下を軽減

3. 開発内容

3.1 課題と解決方法

図2に開発フロー及び課題と解決方法を示す。

3.2 耐衝撃性仕様と試験規格

3.2.1 耐衝撃性仕様

固定ドームカメラの市場では、耐衝撃性仕様は、欧米向けのIEC62262に基づく衝撃エネルギー“20J”と日本国内向けのJIS C 60068-2-75に基づく衝撃エネルギー“50J”に大別される。

当該ドームカメラでは、業界最高水準のJIS C 60068-2-75に基づく衝撃エネルギー“50J”を採用した。

3.2.2 試験規格

耐衝撃性能“50J”とは、ハンマー試験規格の衝撃エネルギー値50J(最大)である。この試験は、図3に示すとおり、10kgのハンマーを0.5mの高さから振り子を用いて供試品を3回打撃するものである。

3.3 開発内容

固定ドームカメラの構成を図4に示す。内部部品であるカメラユニットとレンズユニットは、ケースによって固定され、透明なドームカバーで保護される構造である。今回

【開発フロー】

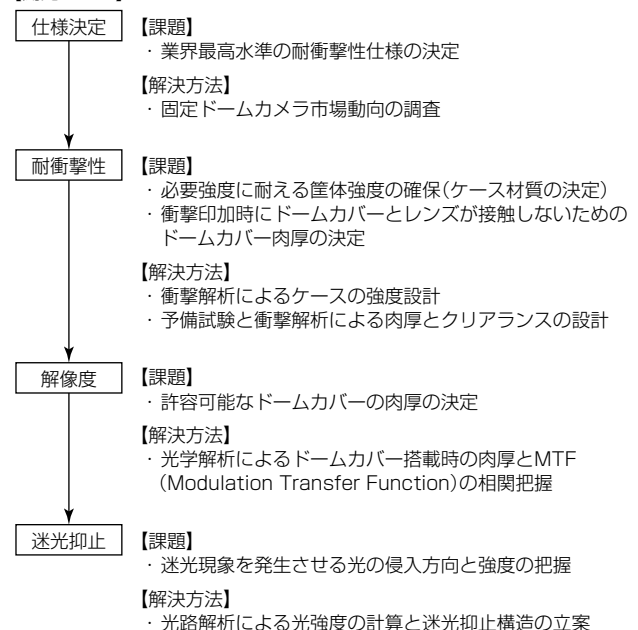


図2. 開発フロー及び課題と解決方法

開発した耐衝撃性固定ドームカメラは、カメラユニットとレンズユニットを既存製品から流用し、ケース及びドームカバーを新規開発することで、製品外部からの衝撃をケース及びドームカバーで吸収するとともに、衝撃緩和構造のゴム製遮光フードをレンズの近傍に設けることで耐衝撃性50Jを実現した。

これまで述べてきた設計を行うことによって、光学性能を満たしつつ、耐衝撃性50Jを満足する固定ドーム型カメラの製品化を実現した。

3. 3. 1 耐衝撃性を確保するドームカバーの肉厚⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

(1) ケース材質の変更

ドームカバーに印可される衝撃はケースに伝達されるため、ケースは十分な強度を持っている必要がある。そこで、ケースの材質を既存製品の樹脂からアルミダイキャストに変更した。

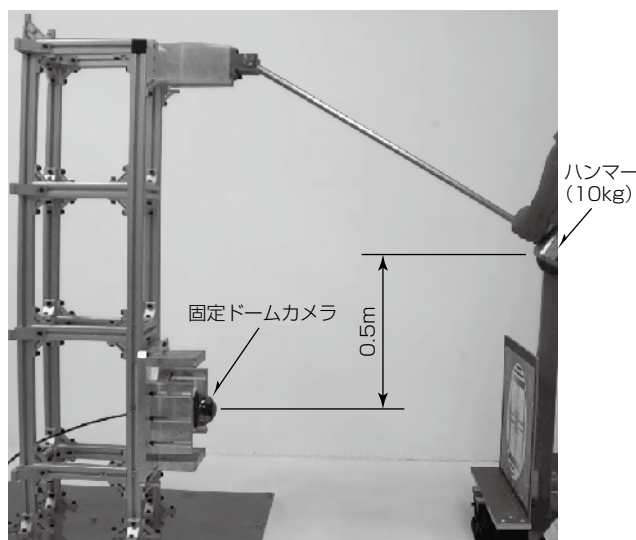


図3. ハンマー試験の様子

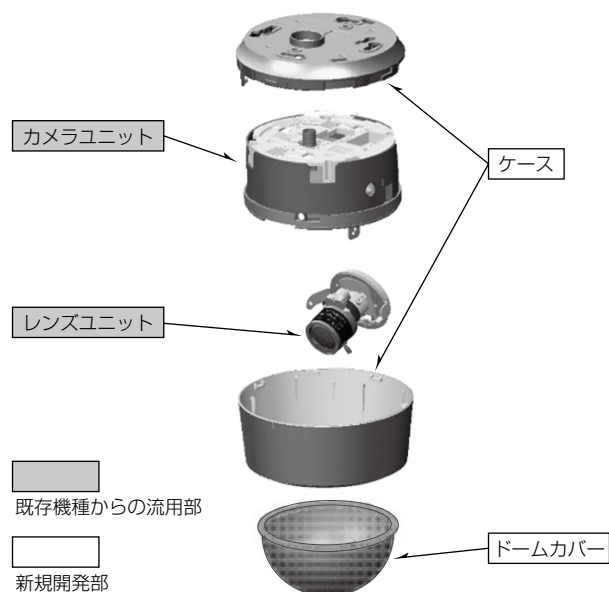


図4. 固定ドームカメラの構成

(2) ドームカバーの耐衝撃性設計

ドームカメラ内部のレンズユニットは半球状のドームカバーで保護される構造である。このドームカバーに衝撃が印加されると、ドームカバーが瞬間的に変形してレンズユニットに接触することで、レンズユニットが破壊されるおそれがある。これを避けるためには、ドームカバーが変形してもレンズユニットに直接衝撃が加わらないよう、ドームカバーの肉厚と、ドームカバーとレンズユニットのクリアランスを確保する必要がある。一般に、ドームカバーの肉厚を増せば衝撃を受けた時の変形量は小さくなるが、ドームカバーの肉厚は後述の3. 3. 2項に示す制約があり、最適化が必要である。衝撃解析による衝撃印加時のドームカバー変形量の算出に加え、予備試験を行うことでばつきを把握するとともに解析値の誤差を補正する係数を求めた。これによって設計精度を高めた。

求められた補正係数を用いてドームカバーの曲率半径、肉厚等をパラメータとして図5に示す衝撃解析を行うことで、レンズとドームカバー間のクリアランスに対し、ドームカバーが瞬間的に変形した際にレンズには接触しないドームカバー肉厚の必要条件(Amm以上)を求めた。

3. 3. 2 解像度を確保するドームカバーの肉厚

ドームカバーの肉厚を増すと、屈折による光路差が大きくなるため、レンズの集光性能に影響して解像度を低下させてしまう。解像度が確保可能かを確認するため、ドームカバーの曲率半径、肉厚等をパラメータとして光学解析を行い、ドームカバーの肉厚を決定した。図6は光学解析のモデルである。無限遠からドームカバーに入射した光がレンズで集光されてCMOSが受光した際の焦点ずれ量を計算しており、解像度の指標としてMTFが求められる。図7は、光学解析の結果から求められたMTFとドームカバーの肉厚の相関をまとめたものである。この結果を基にMTF基準値を満足するドームカバー肉厚の必要条件をBmm以下が求められ、3. 3. 1項(2)で求めた耐衝撃性を確保する必要条件である肉厚Amm以上の条件から、ドームカバーの肉厚はA~Bmmとする必要があることが分かった。ドーム

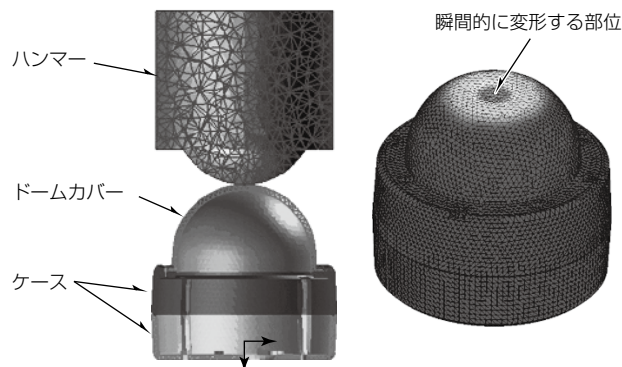


図5. 衝撃解析の結果

カバーの肉厚は、成形性(ヒケ等の外観不良)や材料強度(脆性(ぜいせい))を考慮すると薄肉の方が低リスクであることから耐衝撃性と解像度を両立できる肉厚Ammをドーム肉厚として決定した。

3.3.3 迷光現象の抑制

レンズユニットとドームカバーのクリアランスを増すと迷光現象が発生しやすくなり、映像品質が低下する。この迷光現象による映像品質の低下を抑制するため、光路解析によって迷光を発生させる光線経路を特定し、光の侵入を遮蔽するフードを設けることで迷光を抑制するとともに遮光フードをゴムで構成した衝撃緩和構造を持たせることで耐衝撃性も合わせて確保した。

(1) 迷光現象

迷光現象は光学機器の鏡筒内部などで発生する不必要な光の散乱のことであり、監視カメラの場合はレンズ画角外からの光がレンズへ不要に反射・屈折して画像に取り込まれ、画角内には存在しない被写体が映像として映し出される現象のことである。図8は迷光現象が発生した事例であり、レンズ後方などから侵入した蛍光灯などの光がドームカバーなどに反射して映像にフレアとして写り込んでいることが分かる。

(2) 光路解析の実施

(1)の迷光現象の発生を抑制するため、今回の固定ドーム

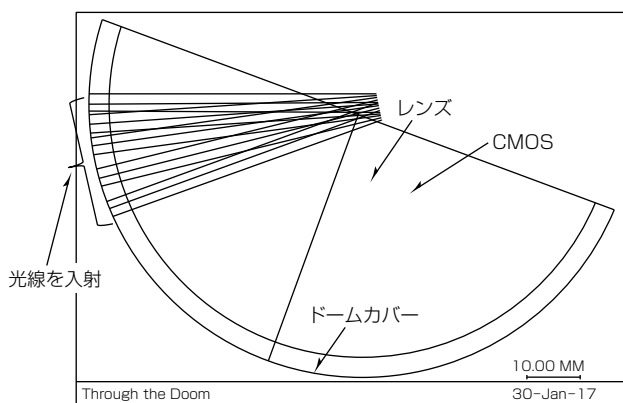


図6. 光学解析モデル

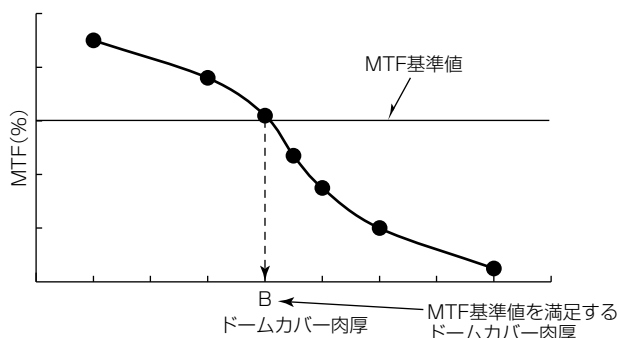


図7. 光学解析の結果

カメラ開発では、光路解析を活用してレンズ部を通過する光の経路と強度を計算によって把握した。図9は光路解析結果で、①レンズ後方からの光がドームカバー内面に反射してレンズに入射した場合と②レンズ側面からの光がレンズの縁とドームカバー内面に反射してレンズに入射した場合に迷光現象が発生することが判明した。

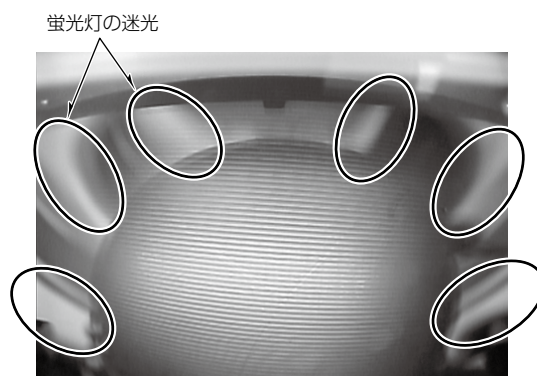
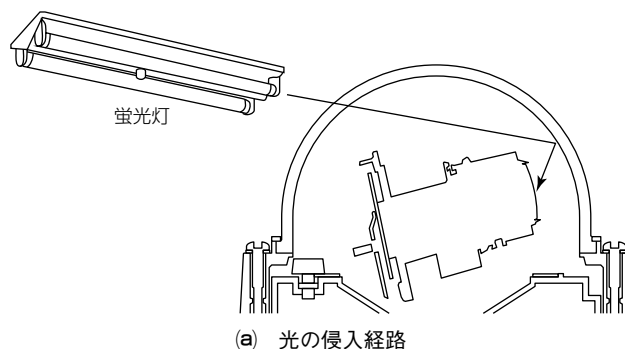


図8. レンズへの光の侵入経路と迷光現象の発生事例

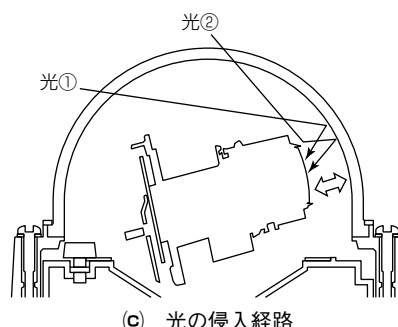
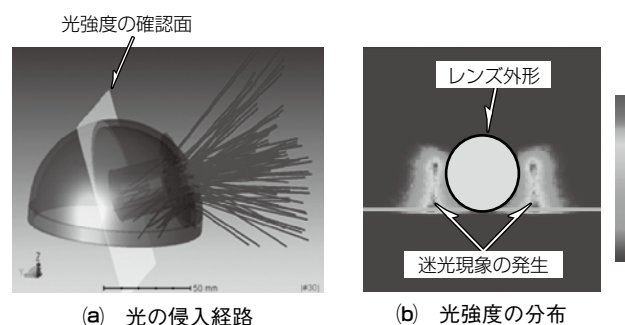
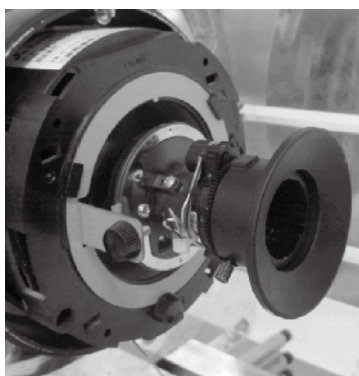
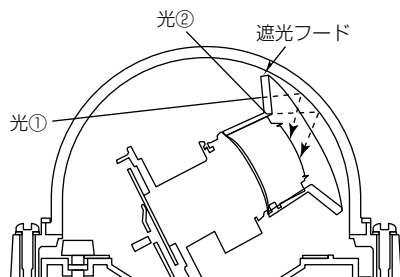


図9. 光路解析の結果

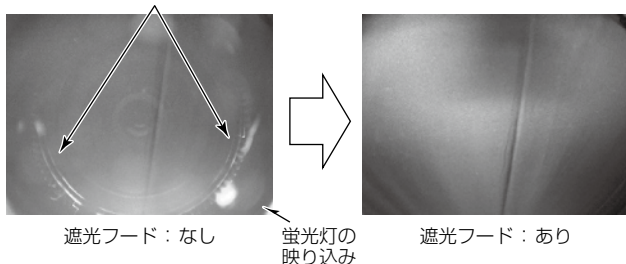


(a) 遮光フード



(b) 遮光フードによる光の侵入遮断

レンズが映像に映り込んでいる。



遮光フード：なし 蛍光灯の映り込み 遮光フード：あり

(c) 改善効果

図10. 迷光抑制構造と改善効果

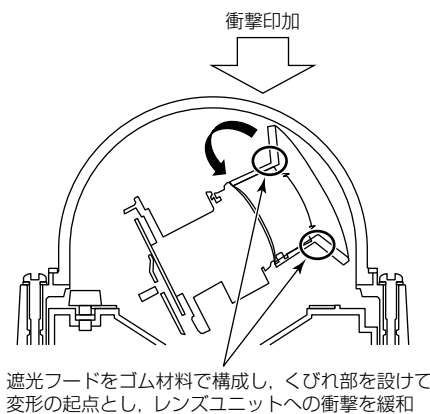
(3) 迷光抑制構造

(2)の光路解析の結果から図9に示す2経路によって迷光現象が発生することが明らかとなったため、光の侵入を遮断するフードを追加し、迷光現象を抑制することにした。図10(c)は対策前後の映像である。対策前の映像ではドームカバーにレンズが映り込んでいるが、対策後では改善していることが分かる。

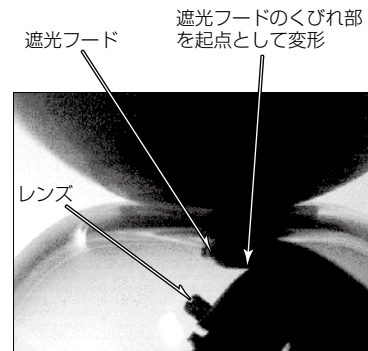
3.3.4 衝撃緩和構造

先に述べたとおり、迷光現象を抑制するために遮光フードをレンズ近傍に追加したことからドームカバーに受けた衝撃をレンズが受けやすい構造となった。そのため、遮光フードで以下の二つのことを行うことで製品外部からの衝撃を吸収する構造にした(図11)。

- (1) 遮光フードの材質をゴム材料で構成
- (2) 遮光フード根元にくびれ構造を設け変形の起点とした



遮光フードをゴム材料で構成し、くびれ部を設けて変形の起点とし、レンズユニットへの衝撃を緩和



衝撃印加時のフード変形状態

図11. 衝撃緩和構造

4. む す び

今回開発した耐衝撃性能を向上させた固定ドームカメラ(型名NC-6710, NC-8610)によって、既設監視カメラシステムの同軸/LANケーブル網を最大限活用可能な状態で破壊防止のための耐衝撃性能を向上させることを実現した。今後とも引き続き製品ラインアップの強化を図り、社会インフラ整備を支えることで安心・安全な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 三菱電機(株)：三菱ネットワークカメラ・システム MELOOK3
http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/support/catalogue.html
- (2) 笠井康行, ほか：広域監視ネットワーク向けHD・IP複合一体型カメラ, 三菱電機技報, 90, No.6, 357~361 (2016)
- (3) 吉沢二郎, ほか：制御盤の放熱・耐震設計検証技術, 三菱電機技報, 87, No.4, 244~248 (2013)
- (4) 谷 則之, ほか：大型板金筐体の落下衝撃強度検証技術, 三菱電機技報, 84, No.12, 681~684 (2010)

製造ライン向け映像解析ソリューション

松江将博* 清水尚吾**
 齊藤弘紀* 平松隆宏***
 磯貝元昭*

Video Content Analysis Solution for Manufacturing Line

Masahiro Matsue, Hironori Saito, Motoaki Isogai, Shogo Shimizu, Takahiro Hiramatsu

要 旨

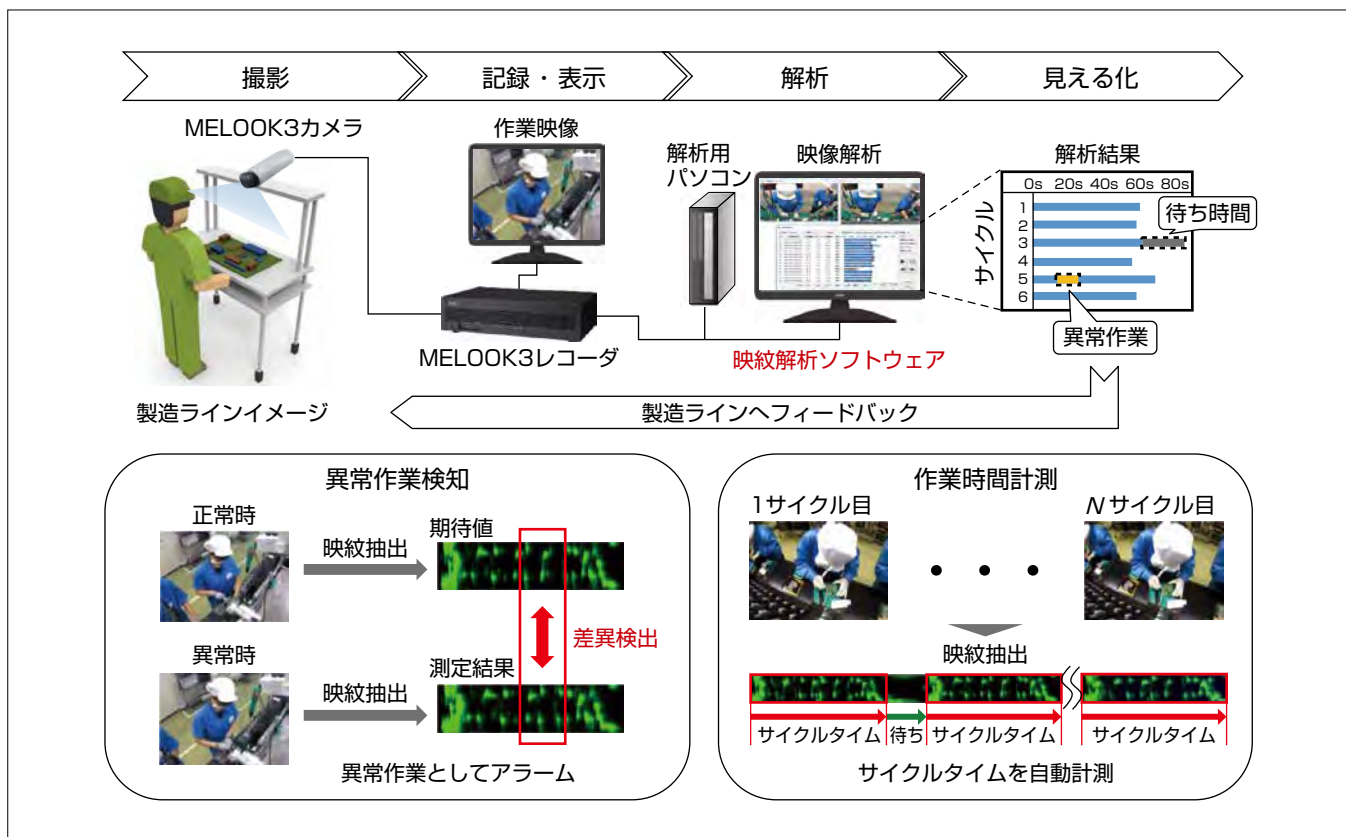
近年、生産性の向上を目的に、IoT(Internet of Things)機器やロボットによる自動化が進んでいる。しかしながら、人の手で組立てや検査等を行う工程も依然として数多く存在し、人為的な作業ミスによる品質低下や、作業者のばらつきによる作業効率低下などの生産性の課題がある。

三菱電機では、これらの課題に対し、映像解析(Video Content Analysis : VCA)技術を活用した取組みを進めている⁽¹⁾。今回、当社のVCA技術である“映紋”を活用し、製造ラインの生産性改善に貢献する映像解析ソリューションを開発した。

映紋は映像の動きベクトル情報を基に算出した映像特徴量であり、作業動作に対して固有なパターンを生成できる。さらに解析時の映像特徴量の抽出における計算量を、従来

の画像処理手法に対し約65%削減(当社比)することで、解析のリアルタイム性を実現した。この映紋を映像ごとに生成して分析することで、正規の作業と異なる動きの有無を検知する“異常作業検知”や、同一作業パターンを検出・分析する“作業時間計測”が可能になり、作業分析結果を見える化できる。

さらに、これまで主に映像監視用途に展開してきた“MELOOK3システム”と組み合わせ、当社工場での実績を積み重ねることで、映像の撮影・記録から解析結果の提供までをカバーした製造ライン向けのトータルソリューションを実現した。今後もVCA技術を活用した製品・ソリューションを展開し、社会の安心・安全だけでなく、快適な社会の実現に貢献していく。



VCA技術“映紋”を活用した映像解析ソリューションのイメージ

図は映像解析ソリューションのイメージを示している。製造現場に設置したMELOOK3カメラ⁽²⁾の映像をMELOOK3レコーダ⁽³⁾に記録・画面表示しつつ、映紋によるリアルタイム／オフライン解析を実施することで、異常作業検知や作業時間計測を自動化し、簡単に見える化できる。得られた解析結果から改善点を抽出し、製造ラインへフィードバックして作業改善につなげる。

1. ま え が き

近年、労働人口不足や、食の安全意識の高まり等を背景に、製造ラインの生産性改善や品質保全に対するニーズが高まっている。これに伴い、製造現場の監視や作業分析を目的としたカメラが設置されるケースが増えている。一方で、監視・分析者はカメラから送られる膨大な映像データを閲覧して対応する必要があるため、効率化に向けたこれらの業務の自動化が求められている。

このような市場ニーズに応えるべく、当社ではVCA技術“映紋”を軸とした製造ライン向けの映像解析ソリューションを開発した。“映紋”の活用によって、製造工程の各作業時間の見える化や異常作業の検知を自動化し、監視・分析者の負荷軽減を可能にする。加えて、これまで監視・防犯向けの監視カメラシステムとして市場投入したMELOOK3シリーズと連携させることで、製造ラインへの設備導入から作業研究までを映像解析ソリューションとして提供できるようにした。

本稿では、製造分野の動向を踏まえつつ、VCA技術“映紋”による作業分析技術を軸に、MELOOK3システムを活用した映像解析ソリューションの当社工場での実証実験の結果や、今後の展開を述べる。

2. 製造分野の動向と課題

2.1 製造分野でのIoT技術活用状況

2011年の“インダストリー4.0”(ドイツ)の発表以降、IoT技術を活用した製造業革新が注目を集めており、“コネクテッドインダストリー”(日本)、“中国製造2025”など同様のコンセプトを各国政府が打ち出している。

“インダストリー4.0”の中心は、IoT技術を用いて製造設備やセンサなどの工場内の機器を接続し、見える化や効率化を行うスマートファクトリである。当社では、スマートファクトリを実現するトータルソリューションとして“e-F@ctory”を2003年から推進しており、生産性・品質・安全性の向上などの付加価値を提供している。

スマートファクトリで、更なる効率化を進めるためには、モノの情報に加えヒトの情報の活用が重要となる。ただし、設備などのモノの情報はIoT技術によって比較的容易に収集可能であるが、作業員などヒトの情報を収集することは一般的に困難である。センサを用いてヒトの情報を収集する方法が考えられるが、接触型のセンサは作業員の肉体的・精神的負担が大きいため、画像センサなどの非接触型のセンサを用いることが望まれる。

製造業での画像センサの主な活用例として、製品の外観上の異常を検知する外観検査が挙げられる。従来の画像解析システムは、検知したい対象ごとにアルゴリズムを選択して組み合わせる必要があったのに対し、近年ではAI

(Artificial Intelligence)技術によって正解(良品)画像と不正解(不良品)画像を一定数用意して学習させることで、高い精度で検査を行うことが可能になっている。

このように、外観検査用途では多くの場合、静止画像を対象とするのに対し、スマートファクトリで必要なヒトの情報はヒトの様々な動きをセンシングする必要があるため動画画像が対象となる。動画画像は静止画像と比べて、解析のために多くの計算機リソースを必要とすることなどから利活用が遅れているが、画像センサからヒトの移動の軌跡を解析し、工場内配置の最適化に役立てるなどの活用が今後期待されている。

2.2 製造分野での課題

スマートファクトリの実現に向け、最新技術の導入が進む一方で、製造業の現場では他の業種と同様に労働力の確保が大きな課題となっている。経済産業省の2017年版ものづくり白書によれば、現場力を維持・強化する上での課題として、57.1%の製造業企業が“人手不足によって人材の確保が難しくなっている”ことを挙げている(図1)。また、人材不足で最も重視する今後の取組みとして、21.7%の企業が“ITの活用や徹底した合理化による業務プロセスの効率化”を挙げている(図2)。

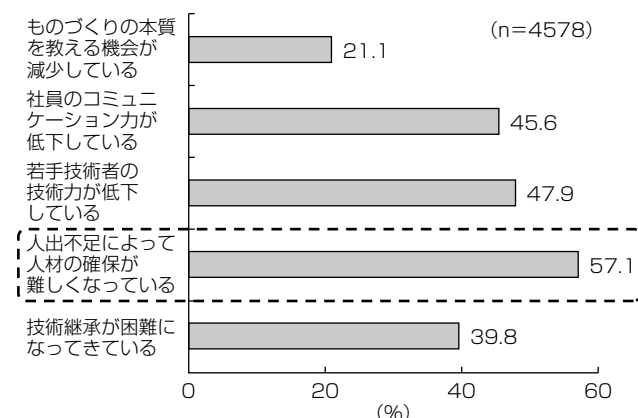


図1. “現場力”の維持・強化を図る上での課題⁽⁴⁾

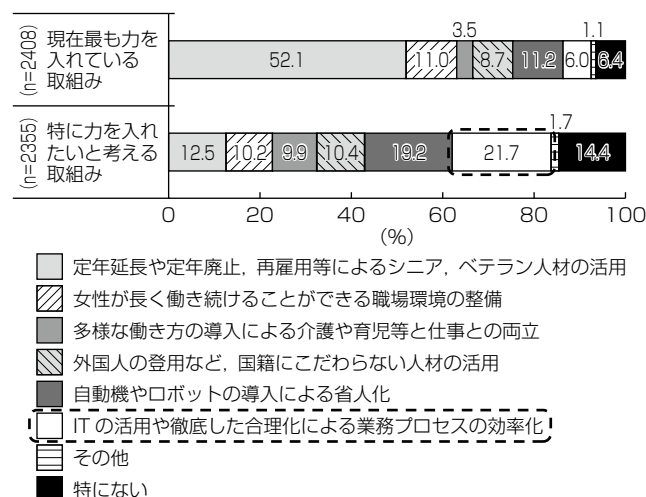


図2. 人材不足で最も重視している取組み (現状と今後)⁽⁴⁾

3. 製造ライン向け映像解析ソリューション

3.1 取り組むべき課題

このような状況に対応するためには、IoT技術やAI技術などの最新技術も取り込みながら、現場が持つ人的リソースを最大限に活用して生産性を高める必要がある。

製造ラインでは、日々の生産効率を高めて計画どおりの生産性を達成するため、ヒトの作業を分析し、ムダの削減に取り組んでいる。作業分析の際は、組立てや検査といった作業工程ごとに分析を実施して標準時間と実際の作業時間の差異を把握し、ムダを見つけて改善につなげる。

従来は目視で計測を行い、また同時に異常作業や正常作業を分析していたが、作業工程を何度も確認したり、複数サイクルを計測したりと分析者の負担が大きいという課題があった。

3.2 映紋を活用した作業分析技術

3.1節の課題に対し、VCA技術“映紋”を活用した作業分析技術を開発した。開発技術は、実際に作業している映像(入力映像)と、事前に記録した作業映像(基準映像)とを比較分析することで、これまで分析者が目視をベースに行っていた作業時間計測及び異常作業検知を自動的に行うことができる。比較分析には、両映像から生成した映像特徴量(映紋)を用いる。映紋は、映像を構成する各フレームについて、動きベクトルの方向別発生数を算出し、時系列に並べた映像特徴量であり(図3)、作業動作に対して固有なパターンを示す性質を持つ。

一般に製造ラインでの作業は、同じ動作の繰り返しで構成されるため、入力映像の映紋には、基準映像の映紋と同じパターンが繰り返して現れる。この繰り返されるパターンを検出することで作業が行われたことを検知し、パターンの長さから作業時間を計測する。また、工場稼働時で基準映像の映紋と類似しない区間を検出することで、異常作業の発生を検知する(図4)。

映紋を生成する上で重要となる動きベクトル情報を得る

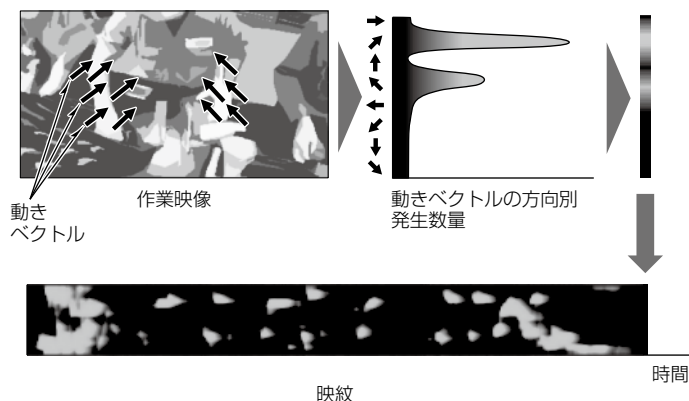


図3. 映紋生成処理

ためには、通常、圧縮符号化された映像データをデコーダで復号した後、オプティカルフローなどの画像処理手法を用いて動きベクトルを算出する必要がある。しかし、復号処理と動きベクトル算出の処理負荷が大きく、作業映像をリアルタイムで解析できないことが課題であった。

そこで今回、圧縮符号化された映像データに含まれている動きベクトルに着目した。圧縮符号化された映像データの動きベクトルは、復号処理の一部を行うことで抽出するため、復号処理負荷の低減及び動きベクトル算出処理の省略が可能になる。これによって、映像データから映紋を生成する処理の計算量を約65%削減(当社比)し、作業映像のリアルタイム解析が可能になった(図5)。

3.3 映像解析ソリューション

3.2節の作業分析技術をベースに、製造ラインで人の動きを映像解析し、作業時間計測や異常作業検知を行うことで、作業分析や品質向上を支援する映像解析ソリューションを開発した。主な特長を次に述べる。

3.3.1 作業内容を判別しやすい画面

作業サイクルごとの作業時間等の数値データだけでなく、作業の正常・異常を色分けし、作業時間をグラフで表現す

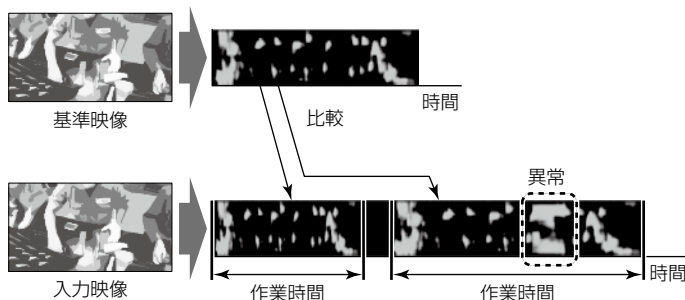


図4. 同一パターン検出及び異常区間検知

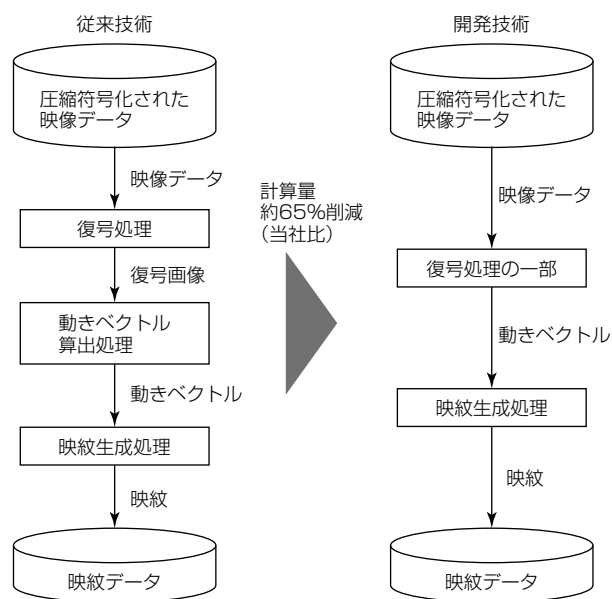


図5. 従来技術と開発技術の比較

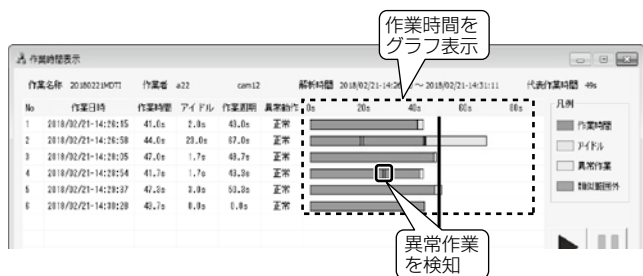


図6. 解析結果の画面

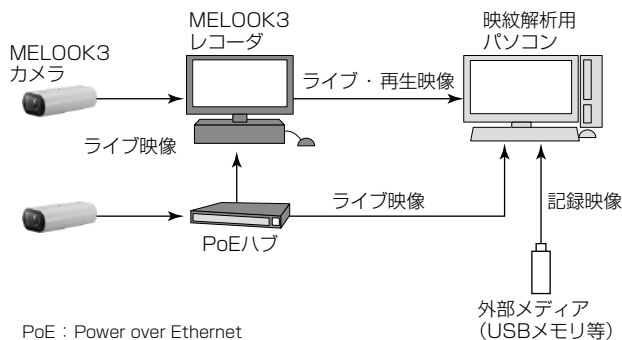


図7. システム構成

表1. リアルタイム解析の主要諸元

解析ストリーム数	1ストリーム
映像符号化方式	H.264(ハイプロファイル)
対応カメラ	MELOOK3カメラ
対応レコーダ	MELOOK3レコーダ
プロトコル	RTP/UDP
解像度	1920×1080(FHD)/1280×720(HD)

RTP: Real-time TransPort Protocol, UDP: User Datagram Protocol, HD: High Definition, FHD: Full HD

ることで、複数サイクルの解析結果を視覚的に確認できる(図6)。

3.3.2 用途に応じた解析

(1) オフライン解析

MELOOK3レコーダやUSBメモリ等の外部メディアに蓄積した過去の作業映像データをインポートし、作業分析することで作業時間計測と異常作業検知をオフラインで解析できる(図7)。

(2) リアルタイム解析

MELOOK3システムと接続することで、MELOOK3カメラのライブ映像ストリームを取得し、リアルタイムで作業時間計測と異常作業検知が可能である(図7, 表1)。これによって、異常作業発生時は作業者へ即座にフィードバックできる。

4. 当社工場での実証実験

実運用での効果及び現地据付け時のポイント等を確認するため、MELOOK3シリーズを生産している当社工場で実証実験を行った。



図8. 分析カメラの画角

4.1 適用ラインの選定

当社工場の生産ラインは、多くの作業を実施するラインや作業数を細かく区切って複数人で構成するライン等、多種多様な生産ラインがある。今回、映紋による作業分析の適用ラインとして①頻繁に作業分析を実施するラインと②サイクリックに作業が行われる生産ラインを考慮し、MELOOK3カメラの生産ラインを選定した。

4.2 分析用カメラの設置

分析用カメラを設置する際、動きを十分に捉えられる位置に固定することが重要となる。今回は特に動きの多い腕から指先を含む上半身、組立て用部品、生産に使用する工具類が分析用カメラで捉えられるよう画角を合わせた(図8)。

4.3 基準映像の選定

映紋を使った作業分析には、基準映像が必要である。基準映像は、標準時間で決められた手順どおりに作業をしている“お手本作業”の映像を記録した。次に作業サイクルの開始と終了を決め、各作業の区分を明確にした映像を基準映像とした。

4.4 作業時間計測と異常作業検知

MELOOK3カメラの生産ラインを終日撮影してリアルタイム解析を実施した。作業時間計測機能を活用することで、作業時間をグラフ化でき、作業サイクルのばらつきを容易に確認が可能になった。また、異常作業の検知結果もリアルタイムに通知され、画面上で異常作業を一目で確認可能になった(図9)。

従来の目視での時間計測は、計測の手間に加えて計測結果のデータ整理・グラフ化などの作業が必要であった。例えば、今回検証したラインは3工程に分かれており、平均的な作業サイクルは約90秒である。10サイクル分の作業分析を人の目で分析するには、90秒×10サイクル×3工程で約45分かかり、集計やグラフ化作業等を含めると1時間以上を要していた。

今回、映紋の活用によるリアルタイムでの分析に加え、測定結果を自動でグラフ化できるため、分析者の作業は数

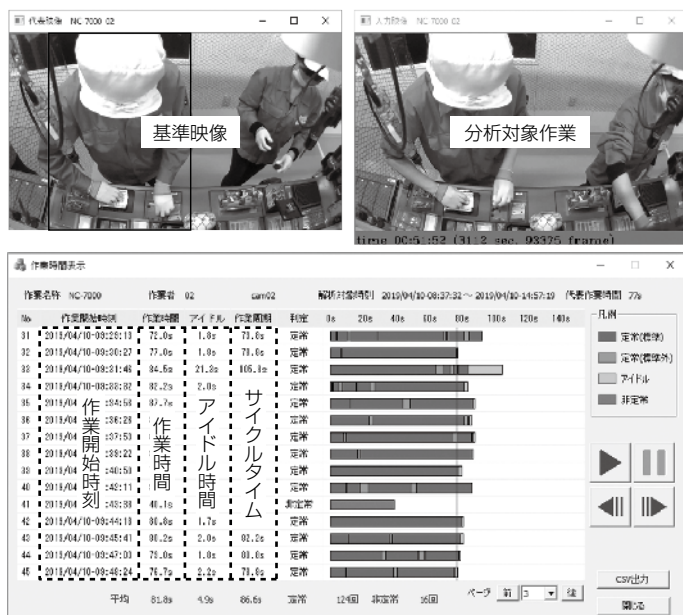


図9. 映紋分析

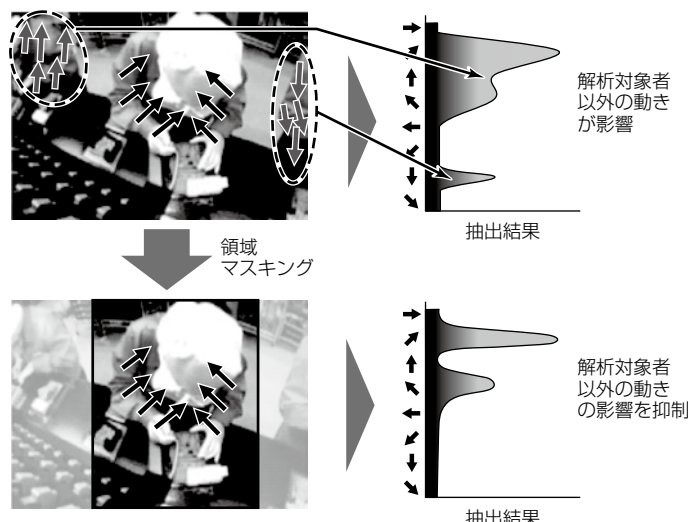


図10. 解析対象者以外の動きによる影響

分程度で済む。これによって、分析者の負担は1/10以下となり、大幅に改善された。

4.5 実験結果のまとめ

映紋による作業分析を当社工場での製造ラインへ適用した結果、作業時間の計測結果をリアルタイムに取得して自動でグラフ化が可能になった。これによって作業時間分析の効率化が図られ、分析者の負担軽減や拘束時間の短縮を実現した。

また、想定外作業による作業時間のばらつき等をリアルタイムに検出が可能になり、さらにこれまで実施できなかったような全サイクルの作業時間分析も人的コストを大きくかけることなく実施できる。これによって、品質不具合の未然防止及び早期解決や、これまで見つけられなかった新たなムダ・改善ポイントを見つけることができ、更な

る製造ラインの効率化が期待できる。

分析精度については、当社工場での検証の結果、約92%の精度で作業サイクルを検出し、平均誤差は約3%で作業時間を計測できることを確認した。加えて、異常作業検知によって今まで気づけにくかった細部の作業動作の違いをタイムリーに発見することが可能になった。

分析精度を低下させる要因として、対象者以外の動きが映像内に含まれ、映紋の生成結果に影響を与えてしまうことが分かった(図10)。画角の最適化や対象者以外の領域へのマスキング処理の実施等によって、改善できることも分かった。

5. 今後の展開

映像解析ソリューションではさらに“ねじを締める”“ラベルを貼る”といった要素作業を事前に定義することで、より詳細な作業分析ができる。これによって、要素作業単位で分析し、ボトルネック工程を抽出することで、より細かな作業改善が可能になる見込みである。

今後も当社工場での実証実験を積み重ね、製造ラインでの現場で得られる知見を活用して、分析精度の向上やユーザーの使い勝手の改善等、製品価値を高めて製造ラインの生産性改善に貢献していく。

6. む す び

VCA技術“映紋”とMELOOK3システムを組み合わせることで、映像の撮影から異常作業検知や作業時間計測の自動化までをカバーし、生産性改善に貢献できる映像解析ソリューションを開発した。また、当社工場での実証実験を通じて実運用での知見を蓄積しつつ、分析者の負担軽減が図れることを確認し、このソリューションの有用性を示した。

将来的には、ディープラーニング等のAI技術を活用した様々なVCA技術も取り込みながら、防犯用途以外の領域のニーズに対してもVCA技術を活用した新たな付加価値を創出し、ソリューションを提供できるよう開発を進める予定である。

参 考 文 献

- (1) 齊藤弘紀, ほか: 監視システムでの映像解析, 三菱電機技報, 92, No.6, 366~370 (2018)
- (2) 蓬田 仁, ほか: “MELOOK3”カメラ, 三菱電機技報, 89, No.6, 343~347 (2015)
- (3) 辻 亮宏: “MELOOK3”レコーダ, 三菱電機技報, 89, No.6, 348~352 (2015)
- (4) 経済産業省: 2017年版ものづくり白書 (2017)
https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2017/honbun_pdf/index.html

IoT GWセキュリティ技術の実装

泉 裕作*
佐藤浩司*
平井博昭**

Implementation of Security Technology for IoT Gateway

Yusaku Izumi, Koji Sato, Hiroaki Hirai

要 旨

近年、サービス価値、生産性、保守性などの向上を図るIoT(Internet of Things)システムが多数構築されている。

IoTシステムを構成するIoT機器は、CPUやメモリなどのリソース制約によって、十分なセキュリティ対策機能を持っていないものが多い。また、IoT機器を初期パスワードのまま運用してしまうケースも見られ、これらを背景として、IoTシステムへの攻撃事例が増えている。

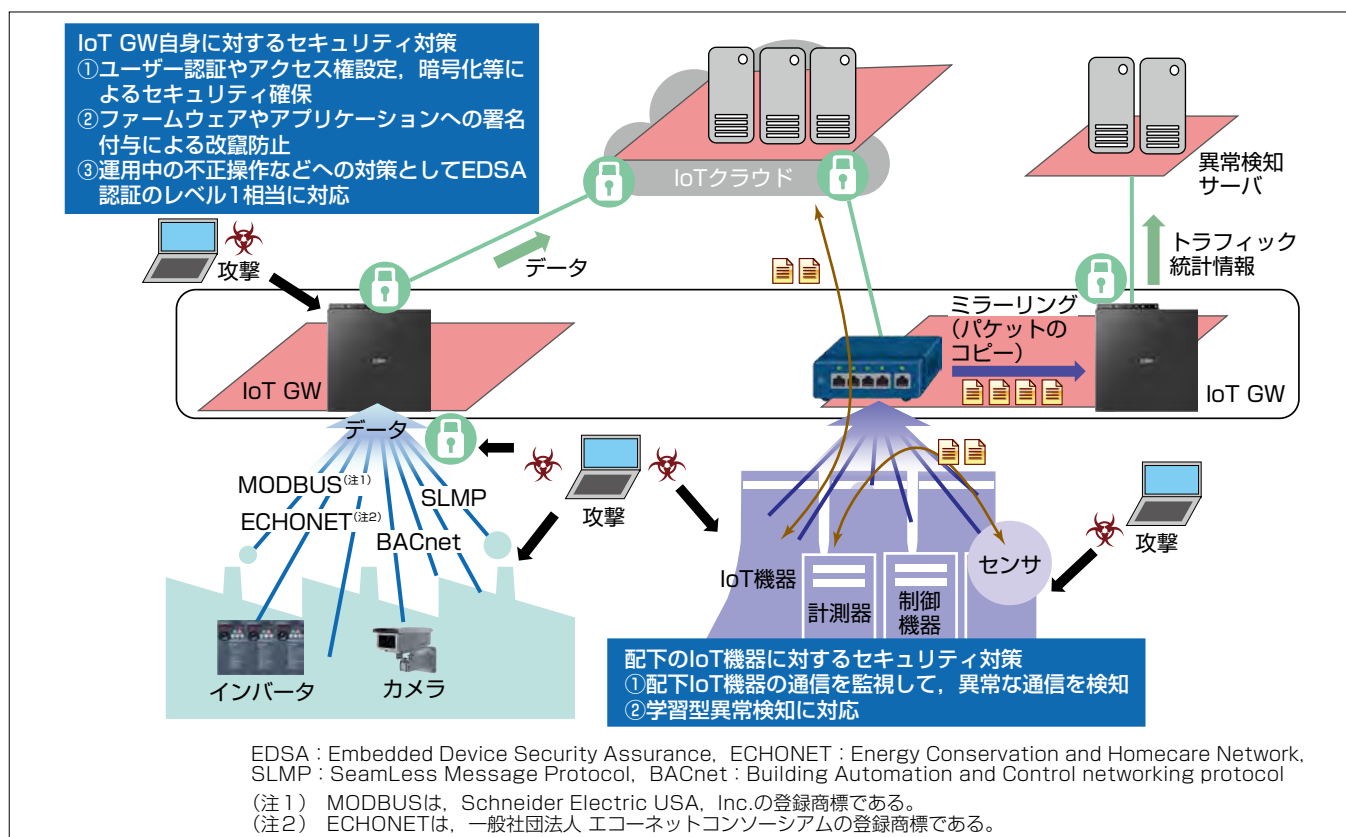
次から次へと新しい攻撃手法が生み出されていく中、既に運用されている多数の脆弱(ぜいじゃく)なIoTシステムのセキュリティを将来にわたって守ることができる仕組みを実現することが喫緊の課題となっている。

三菱電機は、この課題に対し、IoT機器と外部ネットワークを接続するIoTゲートウェイに配下のIoT機器を守

る仕組みを搭載することが有効な手段の一つと考える。

この実現に向け、IoTシステム向けゲートウェイ装置(以下“IoT GW”という。)上に、自装置そのもののセキュリティを高める機能を実装したことに加え、サーバ機器と連携して配下のIoT機器に対する異常な通信を検知する学習型異常検知機能を実現した。さらに、IoT GWを既存システムに後付けするだけで、異常検知機能を提供できる仕組みを整え、これを活用して、既存の工場生産ライン設備を対象に評価・検証を行った。

今後、この技術を活用して、既存IoTシステムのセキュリティ向上に貢献し、IoTシステムがもたらす恩恵を安心して享受できる社会の実現を目指す。



IoT GWのセキュリティ技術

IoT GW自身に対するセキュリティ対策としてファームウェアやアプリケーションの改竄(かいざん)防止機能の実装や、運用中の不正操作対策としてEDSA認証のレベル1相当に対応している。また、セキュリティ的に脆弱な配下のIoT機器をサイバー攻撃から守るために、異常検知機能を搭載し、未知の攻撃も検知可能な学習型異常検知に対応したことで、IoT機器に新規機能を追加せずに、既存のIoTシステムのセキュリティ確保を実現できる。

1. ま え が き

近年、サービス価値、生産性、保守性などの向上を図るIoTシステムが多数構築されている。また、IoTシステムに接続されるIoT機器数も、2015年の約200億個から2020年には約400億個へと急増すると予想されている⁽¹⁾。

機器のIoT化は多くの利点をもたらす一方で、IoT機器を対象としたサイバー攻撃を増大させる要因にもなっている。しかし、多くのIoT機器やそこに実装されているソフトウェアは、セキュリティを意識した設計になってはいるものの、十分な対策がなされていないのが実情である。

実際に、2016年には、145,000台を超えるIoT機器からのDDoS(Distributed Denial of Service)攻撃によって、ピーク時に1Tbpsを超えるDDoSトラフィックが発生したとする報告が挙がっている⁽²⁾。今後もIoT機器は増加と多様化することが予測されているため、未知のサイバー攻撃が発生する可能性がある。

IoT機器が攻撃者から狙われる理由としては、機器数が多いだけでなく、パソコンと比較して、CPUやメモリのリソースが少なく、セキュリティ対策機能が搭載できないことが挙げられる。また、ファームウェアを最新化する機能の実装やメンテナンスがなされておらず、脆弱性への対策が不十分であることも理由の一つである。さらには、IoT機器の管理画面へのアクセス用アカウントやパスワード情報が工場出荷時の初期値のまま運用されているケースがあり、攻撃者の侵入を容易に許してしまうことも挙げられる。このような背景に基づき、2019年2月から総務省及び国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT)では、サイバー攻撃に悪用されるおそれのあるIoT機器の調査及び当該機器の利用者への注意喚起を行うため、NOTICE(National Operation Towards IoT Clean Environment)と呼ばれる取組みが行われている⁽³⁾。

今後、注意喚起によるセキュリティの向上が、ある程度進んだとしても、先に述べたハードウェアリソースの制約によってセキュリティ的に脆弱な機器は残存すると考えられる。そのため、IoT機器と外部ネットワークを接続するIoT GWには、IoT GW自身のセキュリティを十分確保する仕組みと、セキュリティ的に脆弱な配下のIoT機器をサイバー攻撃から守るための仕組みが求められる。

当社は、IoT GW上で動作する、IoT GW自身のファームウェアやアプリケーションの改竄を防止する仕組みを搭載することで、IoT GW装置自身の改竄防止機能を実装した。また、重要なシステムで使用されることを考慮して、産業用制御機器のセキュリティ保証に関する認証制度であるEDSA認証のレベル1⁽⁴⁾相当の機能を実装した。さらに、配下のIoT機器をサイバー攻撃から守るための仕組みとして、配下のIoT機器が行う通信の振る舞いから、通常とは

異なる異常な通信を検知する、異常検知機能の実装と評価に取り組んでいる。

本稿では、IoTシステムでのセキュリティ脅威を2章で、IoT GW自身のセキュリティ対策を3章で、IoT GWによる配下IoT機器のセキュリティ対策を4章で述べる。

2. IoTシステムでのセキュリティ脅威

IoT機器を対象にしたサイバー攻撃は、脆弱なIoT機器を狙うウイルスとして2016年に問題になったMiraiによるIoT機器のボット化、及びサーバを対象としたDDoS攻撃など、国内外で急速に増大している。IPA(情報処理推進機構)の情報セキュリティ10大脅威では、IoTを対象とする脅威は、2016年度以降継続してランクインしている⁽⁵⁾。このような状況に対して、2017年度以降国内外で多数のIoTセキュリティに関するガイドライン文書などが作成された。表1に主な文書とその公開年月を示す。

表2には、近年のIoT機器への攻撃事例を示す。交差点監視カメラや石油プラントなどの物理的なシステムに対するサイバー攻撃によって、サービス停止や遅延といった深刻な被害をもたらされている⁽⁷⁾。IoT GWは、これらの脅威に対する対策となるように、IoT GW自身と配下のIoT機器のセキュリティを確保することが求められている。

表1. 2017年度以降に公開されたIoTセキュリティ関連文書

機関名/団体名	公開資料名	公開年月
【国内】		
日本防犯設備協会	“防犯カメラシステムネットワーク構築ガイドⅡ—インターネットとの接続に係る脅威と対策—”	2017年5月
CCDS(重要生活機器連携セキュリティ協議会)	“製品分野別セキュリティガイドライン IoT-GW編 Ver 2.0”	2017年5月
IPA(情報処理推進機構)	“つながる世界の開発指針 第2版”	2017年6月
IPA(情報処理推進機構)	“IoT製品・サービス脆弱性対応ガイド”	2018年3月
JNSA(日本ネットワークセキュリティ協会)	“IoTセキュリティ標準/ガイドライン ハンドブック2017年度版”	2018年5月
【海外】		
OTA(Online Trust Alliance)	“IoT Security & Privacy Trust Framework v2.5”	2017年6月
OWASP(Open Web Application Security Project)	“IoT Vulnerabilities”	2017年8月
GSMA(GSM Association)	“GSMA IoT Security Guidelines Version 2.0”	2017年10月
ENISA(European Union Agency for Network and Information Security)	“Baseline Security Recommendations for IoT”	2017年11月
(出典) IPAの“情報セキュリティ白書2018” ⁽⁶⁾ の表から抜粋		

表2. IoT機器への攻撃事例

発生	対象設備・機器	事象
2017年6月	自動車生産工場のパソコン	生産ライン停止
2017年6月	交差点監視カメラ	不正制御による動作不安定
2017年6月	物流業務システムのコンピュータ	サービス遅延
2017年8月	安全計装システムのコントローラ	一部システムダウン
2018年8月	半導体生産工場のコンピュータ	生産ライン停止
(出典) IPAの“制御システムのセキュリティリスク分析ガイド第2版” ⁽⁷⁾ の表から抜粋		

3. IoT GW自身のセキュリティ対策

IoT GWは、IoTシステムの外部ネットワークとの接続点となることから、IoT GW自身のセキュリティを十分確保する必要がある。当社は、IoT GW自身のセキュリティを確保するために、起動時のセキュアブートと、ファームウェア及びアプリケーションをインストールする際の改竄防止機能を実装した。また、重要なシステムで使用されることを考慮して、産業用制御機器のセキュリティ保証に関する認証制度であるEDSA認証のレベル1相当に対応した開発を行った。

3.1 ファームウェアの改竄防止機能

IoT GWのファームウェア改竄防止のために、当社では、RSA(Rivest, Shamir, Adleman)公開鍵暗号を用いた署名アルゴリズムによる署名を生成し、IoT GWのファームウェアに付加している。

また、IoT GWではプロセッサ内のOTP(One Time Programmable)メモリを信頼の起点とするセキュアブート機能によって、署名が正しく検証できた場合にだけ当該ファームウェアを起動する仕組みとしている。

3.2 アプリケーションの改竄防止機能

IoT GW上で動作するJava^(注3)バンドルや、Java以外のC言語などで作成したOS上で直接動作するネイティブアプリケーションに対しては、RSA公開鍵暗号を用いた署名アルゴリズムによる署名を付与し、署名が正しく検証できた場合にだけ、インストール／起動を許可する改竄防止機能を提供している⁽⁸⁾。この機能を用いた、ネイティブアプリケーションインストール機能の仕組みを図1に示す。

(注3) Javaは、Oracle America, Inc.の登録商標である。

3.3 運用時の不正操作に対するセキュリティ対策

IoT GWでは、運用中の不正操作や不正プログラムの実行といった攻撃を防ぐために、産業用制御機器のセキュリティ要件を規定した、EDSA認証のレベル1相当の機能を

実装した。これによって、ユーザー認証や各機能の使用制御に加え、送信中のデータの完全性や機密性も確保している。

4. IoT GWによる配下IoT機器のセキュリティ対策

4.1 ネットワーク異常検知方式

IoT GWの配下に接続されるセキュリティ的に脆弱なIoT機器を守る手段として、当社は、IoT GWでIoT機器が行う通信を監視し、異常な通信を検知する技術開発を行っている。

検知する方式として、ホワイトリスト型の異常検知と、学習型の異常検知の二つの方式を開発した。ホワイトリスト型では、あらかじめ、通信の“正常な状態”を定義しておき、定義から不一致が発生したことによって異常を検知する技術である。一方、学習型では、システムの正常状態での通信トラフィックを、機械学習によって、ホワイトリスト型と同様に“正常な状態”を表すモデルを構築し、これに基づき異常な振る舞いを検知する技術である⁽⁹⁾。

次に、ホワイトリスト情報の生成が困難な通信のタイミングや内容が変化するシステムに適している学習型異常検知機能の実装について述べる。

4.2 トラフィック統計監視機能の実装

IoT機器、IoT GW及びIoTサーバからなる基本的なIoTシステムの構成を図2に示す。この構成でIoT GWは、IoT機器から送信された通信の転送や、IoT機器及びIoTサーバの通信を終端する。IoT GWを通過する通信のトラフィック統計監視を、各IoT機器単位で行うことで、異常な振る舞いを検知する。

次に、表3に上記のトラフィック統計監視機能を実装するプラットフォームであるIoT GWのハードウェア仕様を示す。

IoT GWは、パケット転送エンジン(Packet Forwarding Engine : PFE)を搭載したデュアルコアCPUを備えて

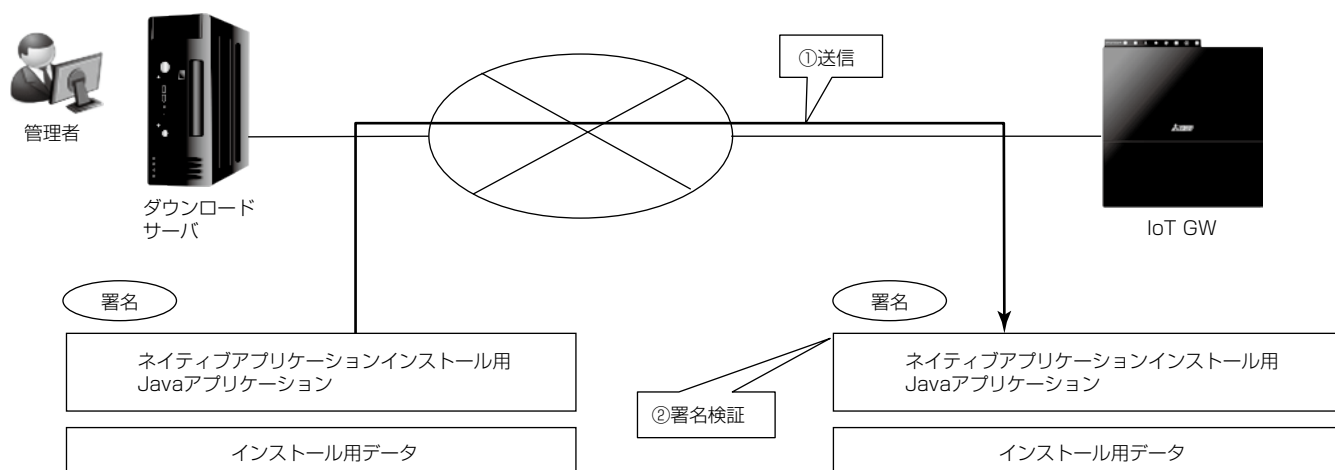


図1. ネイティブアプリケーションインストール機能の仕組み

おり、1 Gbpsの双方向通信が可能である。IoT GW上の大半のIPパケット転送処理はPFEにオフロードされるため、アプリケーションソフトウェアはCPUパワーの90%以上を使用できる。

図3には、IoT GWの転送処理機能ブロック図の一部を

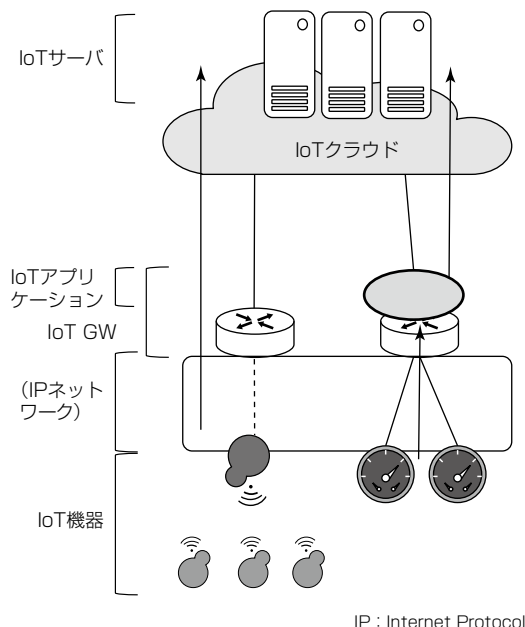


図2. 基本的なIoTシステムの構成

表3. 当社IoT GWのハードウェア仕様

SoC	CPU	ARM ^(注4) Cortex ^(注4) A9(900MHz) × 2
		Lv1 cache : 32KB(Data)+32KB(Instruction)
		Lv2 cache : 256KB
	PFE	Total 2Gbps IP forwarding with NAT/NAPT, PPPoE
DRAM		512MB DDR3
Flash		256MB
OS		Linux ^(注5) 3.2
インタフェース	WAN	(1000BASE-T) × 1
	LAN	(1000BASE-T) × 4
	Wireless LAN	IEEE802.11a/n/ac, b/g/n selectable
	USB	USB2.0 type A receptacle × 2

SoC : System on Chip, DRAM : Dynamic Random Access Memory, NAT/NAPT : Network Address Translation/Network Address Port Translation, PPPoE : Point to Point Protocol over Ethernet, WAN : Wide Area Network

(注4) ARMとCortexは、ARM, Ltd.の登録商標である。

(注5) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標である。

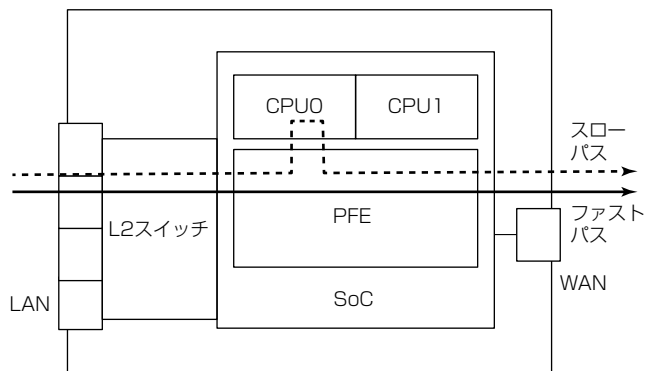


図3. IoT GWの転送処理機能ブロック図

示す。IoT GWは、LANからWAN方向のIPパケットを受信すると、そのパケットが通信フローの最初のパケットの場合は、CPUに転送され、一方、PFEが既に通信フローを認識できている場合は、受信パケットをWAN側に直接転送することができる。これは、通信フローの最初のパケットをCPUが受信した場合は、フロー情報がPFEに入力され、残りのフローはPFEによって直接転送可能になり、ファストパスと呼ばれる高速転送処理が可能になるためである。そのため、もしこのファストパス機能を無効にした場合、転送処理は全て、CPU上でソフトウェア処理されるスローパスとなる。また、ファストパス機能が有効になっている場合は、通信フロー情報がPFEに設定されると、PFEだけで処理を行うため、転送タスクと転送されたパケット情報は、CPUで監視することができなくなってしまう。

そのため、IoT機器用のネットワーク異常検知システムに必要なトラフィック統計監視機能をPFEの専用ファームウェアとしてIoT GWに実装した。

4.3 IoT機器のネットワーク異常検知システム

IOT機器のネットワーク異常検知システムの構成を図4に示す。

IOT GWのトラフィック統計監視機能は、IoT機器のトラフィック統計情報を収集し、その情報を定期的に異常検知サーバに送信する。異常検知サーバは受信したトラフィック統計情報からトラフィックの特徴セットを計算し、学習プロセスがまだ終了していない場合はそれらを学習する。IoT機器の学習プロセスが終了したら、IoT機器の受信トラフィック統計情報を使用して異常を検知する。新規のIoTシステム構築に併せてネットワーク異常検知システムを導入する場合は、この構成が適している。

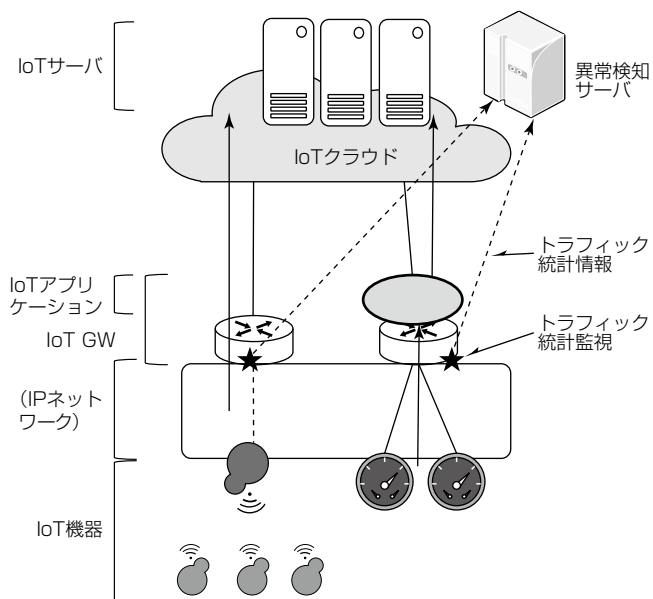


図4. IoT機器のネットワーク異常検知システムの構成

4.4 ボルトオン型のネットワーク異常検知システム

4.3節で述べたIoT GWをゲートウェイとして設置する構成とは異なり、L2スイッチなどの既存のネットワーク機器からのミラーリングトラフィックを使用して、トラフィック統計情報を生成する、ボルトオン型のネットワーク異常検知システムの構成を図5に示す。この構成では、IoT GWはネットワーク異常検知のセンサとしてのみ機能し、ユーザーは既存のシステムに大きな変更を加えることなく、

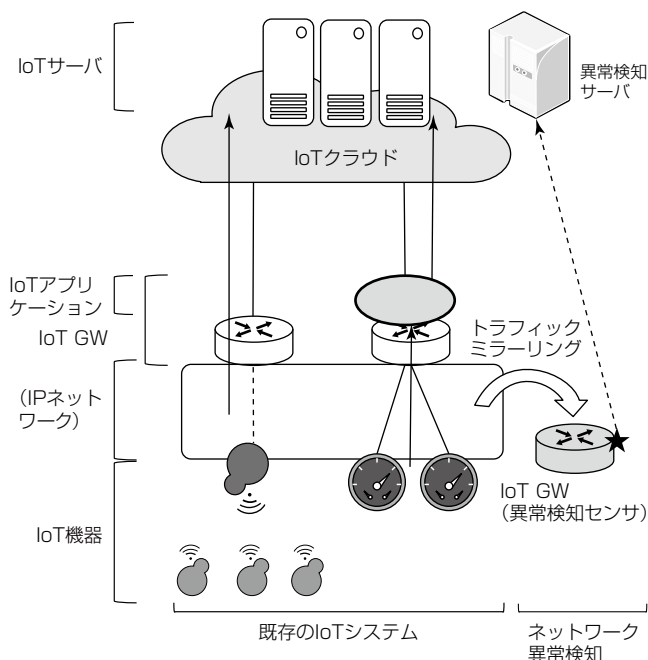


図5. ボルトオン型ネットワーク異常検知システムの構成

ネットワーク異常検知機能を簡単に追加できる。

次に、IoT GW上での、ミラーリングされたトラフィック処理のフローを図6に示す。

IoT GWはミラーリングされたトラフィックの処理を全て、ソフトウェアで実行するため、IoT GWがトラフィックをPFEで処理する場合と比較して、CPU使用率が高くなるため、リソース消費状況を考慮する必要がある。

この点に関しては、表3でも示したとおり、当社IoT GWはハードウェア仕様として、デュアルCPUコアを採用しており、この評価中でも、常にCPU使用率が20パーセント未満であったことから、性能上問題ないことは確認済みであり、更に大容量のトラフィック処理も可能と考えている。

4.5 異常検知システムの実環境評価

当社では、図4に示した汎用的なIoTシステムのモデルとして、100台の監視カメラで構成されるIoTシステムを構築し、4.3節で述べたネットワーク異常検知システムを評価した結果から、監視可能であることは確認済みである。

今回、さらに4.4節で述べたボルトオン型のネットワーク異常検知システムのモデルとして、約100台のIoT機器で構成される工場の生産ラインネットワークを対象にボルトオン型のネットワーク異常検知システムの評価を実施した内容を述べる。評価構成を図7に示す。

また、評価条件として監視対象にした生産ラインネットワークでの通信トラフィック情報を表4に示す。IoT機器数は100を超えているが、トラフィック量は最大でも

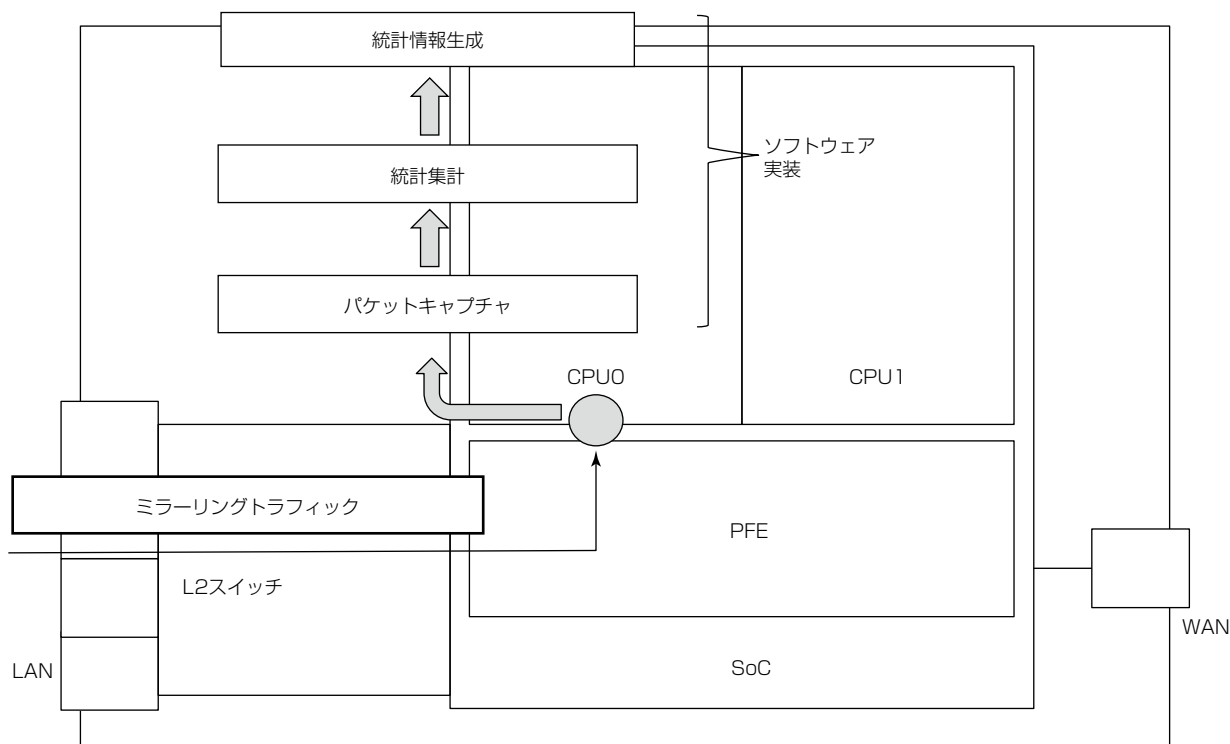


図6. ミラーリングされたトラフィックの処理フロー

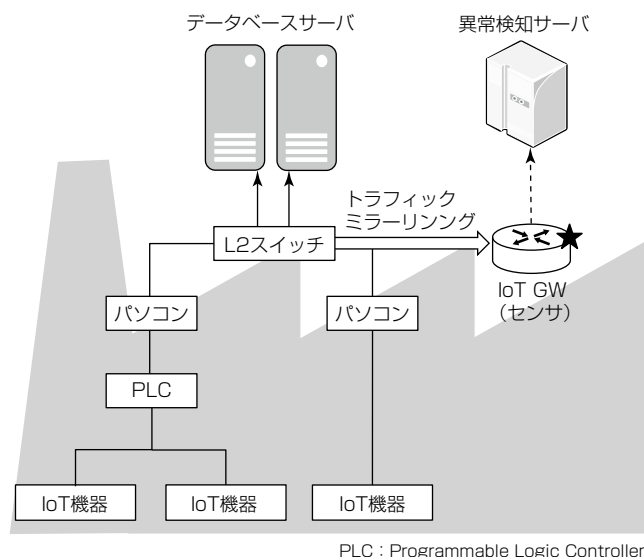


図7. ボルトオン型ネットワーク異常検知システムの評価構成

表4. 評価環境の通信トラフィック情報

パラメータ	値
IoT機器数	108
平均トラフィックフロー数/台	8
プロトコル数	50
平均トラフィック量	80kbps
最大トラフィック量	1.4Mbps

1.4Mbpsであった。この環境では、1台のIoT GWで処理が可能であり、トラフィック統計情報の生成及び送信が正常に行われることが確認できた。

この評価によって、工場の既存生産ラインネットワークに対して、IoT GWを付け足すだけで、ネットワーク異常検知を利用できることが確認できた。

5. む す び

IoT化が急速に進む中、IoT機器を狙うサイバー攻撃が急増している現状を示した。そのような中、IoTシステムを構成するIoT GW自身のセキュリティ確保と、配下のIoT機器のセキュリティ確保に向けた当社の取組みについて述べた。IoT機器のセキュリティを確保するために、IoT機器の通信を監視し、異常な通信を検知する異常検知システムと、これを実現するために必要なトラフィック統計監視技術について述べた。

さらに、既設のネットワークへの適用を考慮して、ボルトオン型で動作可能なネットワーク異常検知システムの開発を行い、100台の監視カメラで構成されるIoTシステムと、OT(Operation Technology)システムの一つである

工場生産ラインシステムでの評価結果を述べた。

今後も、様々なセキュリティ装置やセキュリティサービスとの併用・連携を推進しつつ、さらには当社IoT GWの処理能力の向上を実現することでネットワーク異常検知システムの適用範囲拡大を図り、安心・安全にIoTシステムを活用できる社会の実現を目指す。

異常検知サーバの研究開発は、日本電信電話(株)セキュアプラットフォーム研究所の協力で実施された。ここに謝意を表する。

この研究の一部は、内閣府が進める戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)“重要インフラ等におけるサイバーセキュリティの確保”(管理法人：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO))によって実施された。

参 考 文 献

- (1) 総務省：平成30年版 情報通信白書
- (2) OVH：The DDoS that didn't break the camel's VAC
<https://www.ovh.com/world/news/articles/a2367.the-ddos-that-didnt-break-the-camels-vac>
- (3) NOTICEホームページ
<https://notice.go.jp/>
- (4) ISASecure：EDSA-311 ISA Security Compliance Institute-Embedded Device Security Assurance-Functional Security Assessment(FSA)v1.4 (2010)
- (5) 独立行政法人 情報処理推進機構(IPA)：情報セキュリティ10大脅威2019
<https://www.ipa.go.jp/security/vuln/10threats2019.html>
- (6) 独立行政法人 情報処理推進機構(IPA)：情報セキュリティ白書2018
<https://www.ipa.go.jp/files/000070313.pdf>
- (7) 独立行政法人 情報処理推進機構(IPA)：制御システムのセキュリティリスク分析ガイド第2版 (2018)
<https://www.ipa.go.jp/files/000069436.pdf>
- (8) 佐藤浩司，ほか：IoTゲートウェイのセキュリティ技術，三菱電機技報，92，No.6，356～360 (2018)
- (9) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：IoT機器向けゲートウェイによる動作監視・解析技術
<https://www.nedo.go.jp/content/100863673.pdf>

メッシュネットワークの 光パス障害復旧技術

中村徳昭* 山崎 創*
吉原直利*
吉田聡太*

Optical Path Restoration Method for Mesh Network

Noriaki Nakamura, Naotoshi Yoshihara, Sota Yoshida, Hajime Yamasaki

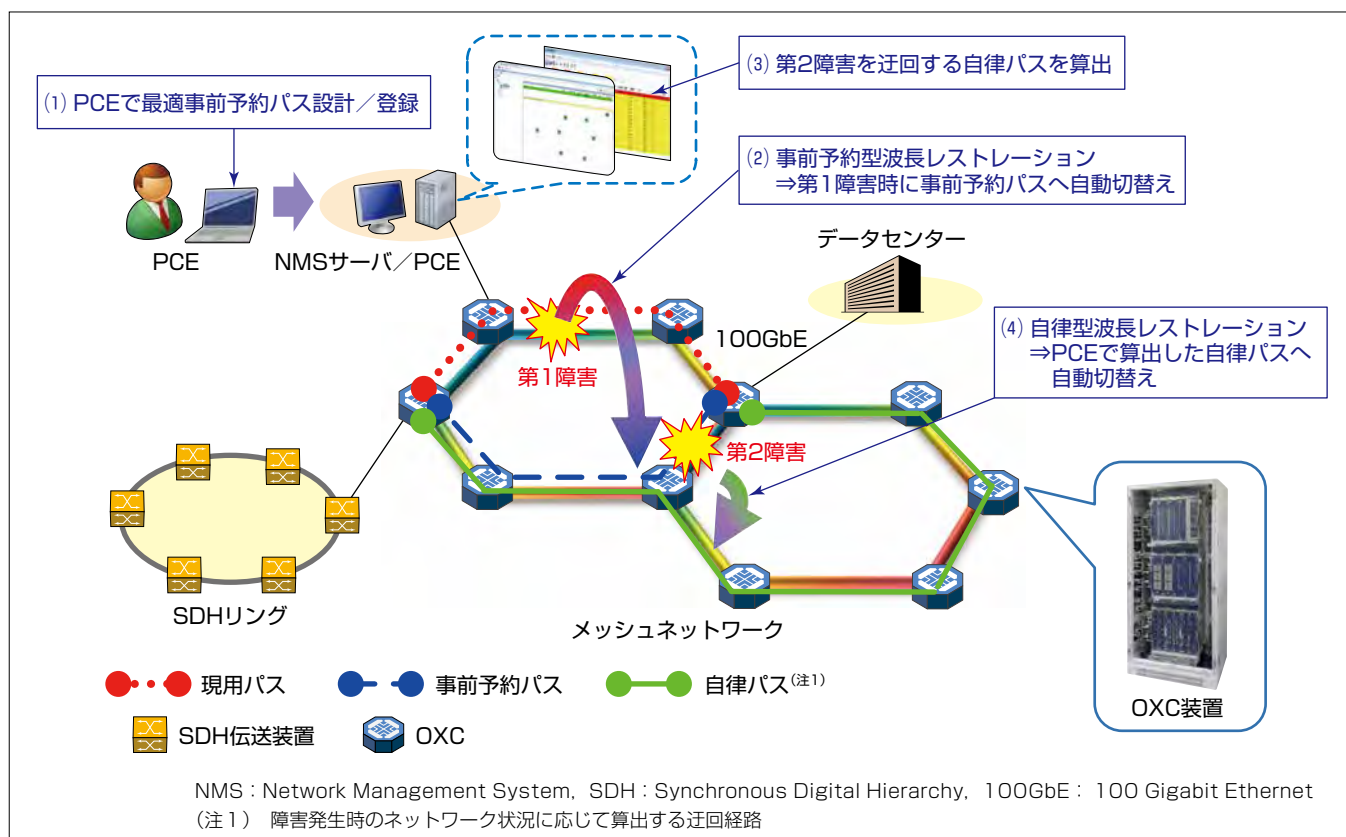
要 旨

スマートフォンやタブレット端末の高機能化，企業のクラウドサービス利用の普及によって，通信サービスは我々の日常生活や産業経済活動に必要な不可欠なものになっている。加えて，第5世代移動通信システム(5G)の実用化開発や，IoT(Internet of Things)／M2M(Machine to Machine)といった5Gを活用した新サービスの検討が各所で進められており，通信トラフィック需要の継続的増加が見込まれる。

これら通信サービスを支える基幹光ネットワークでは更なる高信頼化への要求が高まっている。三菱電機は，障害発生時にあらかじめ設定した迂回(うかい)経路に切り替える波長レステーション機能等を具備し，高信頼なメッシュネットワークの構築を可能にする100Gbps×88波×8方

路光クロスコネク(Optical Cross-Connect：OXC)の開発を進めてきた⁽¹⁾。

将来の通信トラフィック需要増を見据えて基幹光ネットワークの大規模化が進められている中で，自然災害等による複数地点での障害同時発生や，想定外の広範囲障害発生に対する経済的な光パス障害復旧技術がより一層求められている。大規模ネットワークの経済性と高信頼性を確保するために，迂回経路構築に必要なリソース(波長資源と3R再生中継装置)を抑制し，経済的な装置設計を自動化するPCE(Path Computation Element)機能と，災害等による障害発生時にそのリソース状況下で算出した迂回経路に切り替える自律型波長レステーション機能を新たに開発した。



メッシュネットワークの光パス障害復旧技術

基幹光ネットワークを構築する光クロスコネクシステムには，障害発生時に事前登録した迂回経路(事前予約パス)に切り替える事前予約型波長レステーション機能など，可用性を確保する各種機能が実装されている。迂回経路設計を自動化するPCE機能と，障害発生時のネットワーク状況に応じた迂回経路(自律パス)を自動算出して切り替える自律型波長レステーション機能に対応したことで更なる高信頼化を実現した。

1. ま え が き

インターネットアクセス回線やモバイルのブロードバンド化が進み、トラフィックが急増している。光アクセスでは、高速回線を安価に提供する10G-EPON(10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network)の導入が可能になってきている。モバイルに関してもLTE(Long Term Evolution)等高速通信サービスの普及や5Gサービス導入に伴い、今後も大容量化が進んでいくと考えられる。昨今はSNS(Social Networking Service)の普及によって、大多数のユーザーがインターネットを通じて日常生活に必要な情報収集を行っており、通信サービスは我々の生活や社会にとって不可欠なものになっている⁽²⁾。通信サービスを支える基幹光ネットワークに障害が発生した際の社会生活に及ぼす影響は大きく、基幹光ネットワークの高信頼化への要求は年々強まっている。この要求に対応するため、障害発生時に迂回可能な経路を複数備えたメッシュネットワークを構築可能な光クロスコネクトシステムの導入が進められている。

当社は、柔軟なメッシュネットワーク構築に適した波長及び方路の独立性が高いCDC(Colorless, Directionless and Contentionless: 波長無依存, 方向無依存, 無競合)機能と装置間監視制御機能、障害発生時にあらかじめ設定した迂回経路に信号を切り替える事前予約型波長レストレーション(光パス障害復旧)機能を具備した光クロスコネクトシステムの開発を進めてきた⁽¹⁾。

近年、将来の通信トラフィック需要増を見据えてメッシュネットワークの大規模化が進められている中で、自然災害等による複数地点での障害同時発生や、想定外の広範囲障害発生に対する経済的な光パス障害復旧技術がより一層求められている。この要求を満たすため、当社は大規模ネットワーク内の複雑な迂回経路の最適化を自動設計するPCE機能と、障害発生時のリソース状況に応じて算出した迂回経路に信号を切り替える自律型波長レストレーション機能を具備した光クロスコネクトシステムを追加開発した。

本稿では、2章で従来の当社光クロスコネクトシステムのCDC機能、装置間監視制御機能、及び事前予約型波長レストレーション機能の特長について述べ、3章で今回追加開発したPCE機能、及び自律型波長レストレーション機能について述べる。

2. 当社の光クロスコネクトシステム

基幹光ネットワークでは、従来のリング・リニアネットワークから、メッシュネットワークへの移行が進んできた。メッシュネットワークに適した高信頼な光クロスコネクトシステムの実現には、既存光信号に影響を与えることなく遠隔から波長や方路を設定変更可能なCDC機能や、耐障

害性の高い装置間監視制御機能、障害発生時に遠隔制御であらかじめ設定した迂回経路に信号を切り替える事前予約型波長レストレーション機能が不可欠となる。

2.1 CDC機能

CDC機能は、既存光信号に影響を与えずに光パスの切替え作業を可能にする機能である。従来は光パス構築のたびに人手でファイバを再接続して波長や方路を切り替えていたが、任意のポートにあらかじめファイバを接続することによってCDC機能を実現し、全て遠隔から波長や方路を自由に切り替えることができる。また、CDC機能を実現するMUX/DEMUX(光合分波)機能部、MSW(メッシュスイッチ)機能部を図1に示すように機能ごとに独立した物理構成にすることで、波長及び方路の独立性を高くし、物理的な波長干渉を抑制できる。これによって、波長・方路増減設時や障害発生時の他方路への主信号影響を抑止可能な高信頼なシステム構成を実現している。

2.2 装置間監視制御機能

メッシュネットワークでは、複数障害発生時にも装置間監視を継続できるネットワーク管理の実現が課題である。図2に示すように、装置の外部回線を使用するアウトバンド通信と装置間の空き通信領域を使用するインバンド通信を組み合わせ、それぞれで同報する構成を適用することによってメッシュネットワークの装置間監視技術を実現した。装置のアウトバンド通信では任意に定義可能なサブネットワークごとにGNE(Gateway Network Element)を3か所設置し、NMSに対して3経路で同報する構成にした。インバンド通信では装置から各経路に対して同一メッセージを同報し、受信側で重複する通知を削除することでロバストな経路冗長構成とした。これらの構成によって、複数の

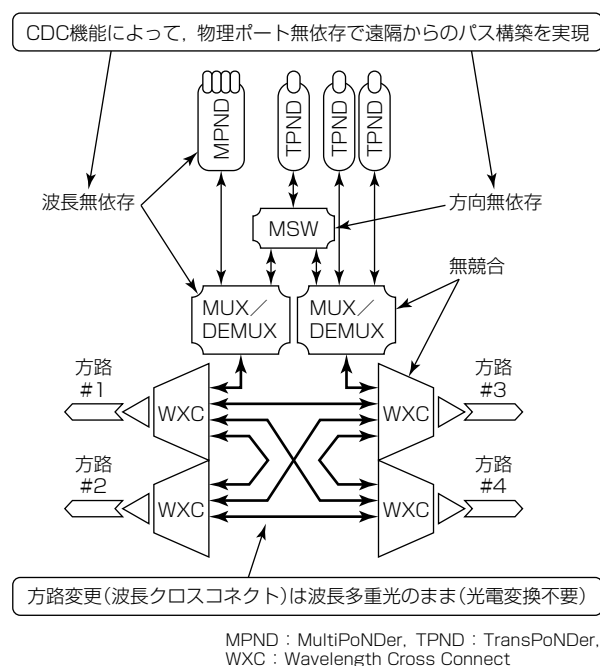


図1. CDC機能構成

障害発生時でも光信号の監視制御に影響を与えることなく、継続管理可能な装置監視を実現している⁽³⁾。

2.3 事前予約型波長レストレーション機能

事前予約型波長レストレーション機能を図3に示す。事前予約型は、現用パスに対してあらかじめ迂回ルートと迂回波長(事前予約パス)をNMSに登録しておき、障害発生時に登録した予備の事前予約パスを確立し、現用パスを切り替える。現用パスに対して、複数の事前予約パスを登録することで、多重障害発生時での信号復旧を可能にする⁽⁴⁾。現用パスで障害検出した後にシグナリングを行い、事前予約パスを設定するため、複数の現用パスに対して事前予約パスのリソース共用が可能であり、波長資源及び3R再生

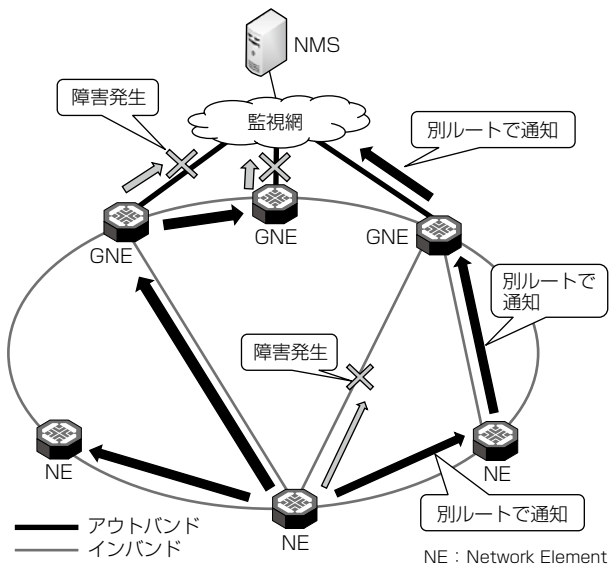


図2. メッシュ監視ネットワーク

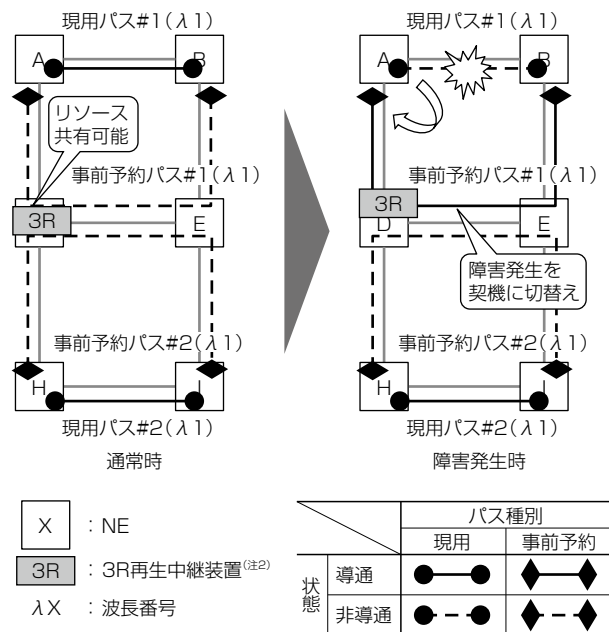


図3. 事前予約型波長レストレーション機能

中継装置の高効率活用を実現した。リソース共用は、現用パス同士が同一リンクを経由しない場合だけ許容する条件を設定したことで、単一障害発生時には100%復旧可能にした。

3. 大規模メッシュネットワーク向け光パス障害復旧技術

大規模メッシュネットワークでは、多数の冗長経路が構築可能なため、経済的に高信頼な迂回経路の導出と、多重障害時でもサービス継続可能とする光パス障害復旧技術の実現が重要となる。

3.1 PCE機能

大規模メッシュネットワークでは、光信号の始点から終点まで取りうる経路パターンが膨大に存在するため、経済性／信頼性に優れた光パスを選択することが難しい。特に事前予約型波長レストレーション方式では、複数の現用パスに対して事前予約パスのリソース共用が可能であるため、リソースの高効率化を考慮した光パス群を自動算出する技術が求められている。オペレータが入力する経路探索条件を満たし、波長資源及び3R再生中継装置の割当てが可能で限り少なくなるような光パス群を算出するPCE機能⁽⁵⁾を開発した。

図4に既存メッシュネットワークへの光パス追加設計時のPCE機能による経路探索の流れを示す。NMSからネッ

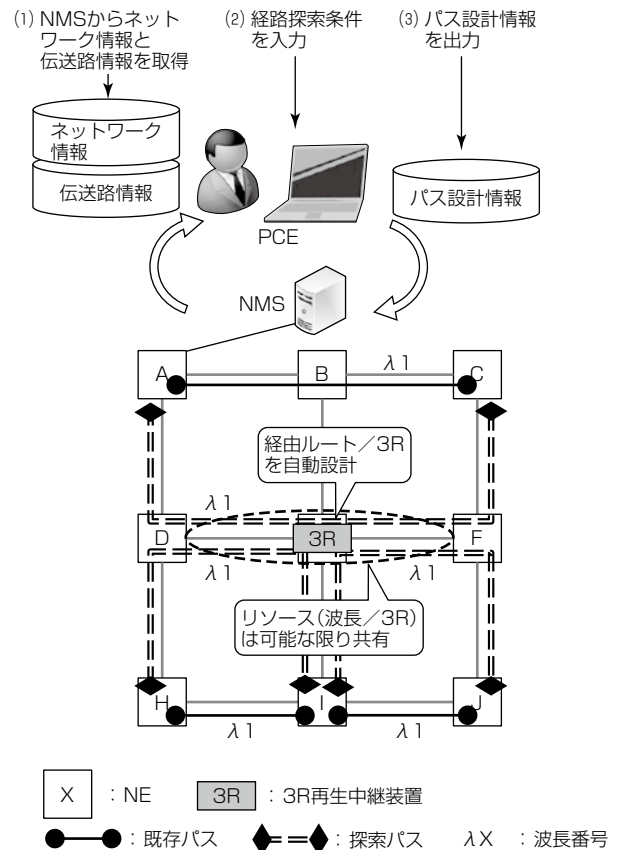


図4. PCE機能による経路探索の流れ

トワーク情報(NE配置, OTS(Optical Transmission Section)リンク接続, 既存パス情報等)と伝送路情報(伝送距離, 伝送路損失値等)を取得してPCEに入力する。PCEでは, オペレータが入力する経路探索条件(パス種別, 経路ノード・リンク, 事前予約パス本数等)と伝送路情報を基にOSNR(Optical Signal to Noise Ratio)を算出し, 伝送性能の補償が必要な場合は, メッシュネットワーク全体で3R再生中継装置の数が必要最小限となるように経路ルートと3R再生中継装置の配置を自動設計し, 最適な光パス群を導出する。光パス群の探索結果はパス設計情報として出力されるため, オペレータは出力された情報に従って簡単に光パス追加が可能になる。

現用パス同士が完全に別ルートである場合, 事前予約パスの波長資源と3R再生中継装置をできる限り共用する設定を可能にすることで, 単一障害時の復旧率100%を達成しつつ, リソースの高効率化を達成する経路探索アルゴリズムをPCE機能に搭載した。また, 事前予約パスを設計する場合, 現用パス1本について複数の事前予約パスを探索指定可能にすることで, 現用パスの重要度に応じて複数の事前予約パスを確保し, 耐障害性を向上させた。

また, ネットワークの複雑化に伴い, オペレータが直感的に操作できるPCE機能のGUI(Graphical User Interface)を開発した。図5にPCEの画面例を示す。NMSから取得したネットワーク情報をPCEにインポートすることによって, NE配置, OTSリンク接続, 既存パス情報等を一覧表示する。インポートした既存パス及びPCE上で設計した新規パスは, 光パス表示部で一覧表示することができ, 任意のパスをクリックすることで, 当該パスの経路ルートをグラフィカルに確認できる。

3.2 自律型波長レステレーション機能

PCE機能をNMSに搭載することによって, 障害発生時に最新のネットワーク状況に基づき, 迂回経路をリアルタイムで算出し, 当該パスへ切替えを行う自律型波長レステ

レーション機能を開発した。自律型は, 切替え可能な迂回ルートを障害発生時にNMSでリアルタイムで算出することによって迂回ルートと迂回波長(自律パス)を確立し, 現用ルートの光パスを切り替える。事前予約型と同様, 現用パスで障害検出した後にシグナリングを行うため, 予備リソースの高効率活用が可能である。図6に自律型波長レステレーション切替え例を示す。自律型と事前予約型の併用によって, 全ての事前予約パスへの切替えが失敗した場合, PCE機能が搭載されたNMSで自律パスを算出して自動切替えを行う。想定内障害の場合は事前予約パスへの切替えで計画復旧し, 想定外の大規模障害の場合は自律パスへの切替えによる光信号導通の維持が可能になる。

3.2.1 リアルタイム経路計算技術

図7にPCE機能による自律型波長レステレーション切

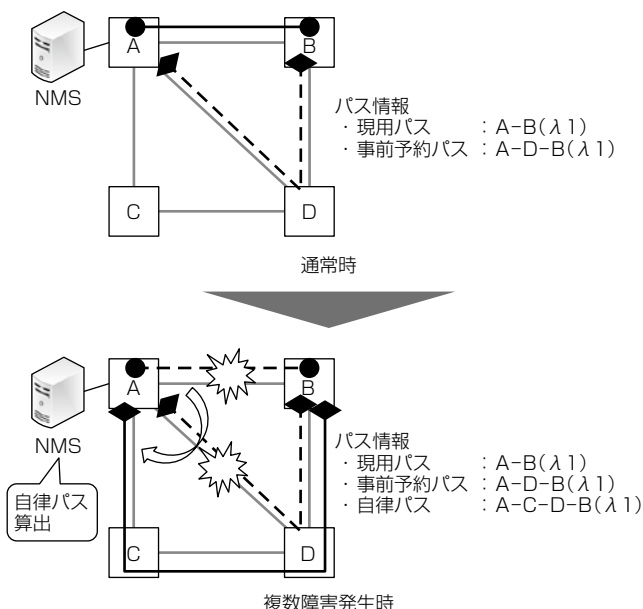


図6. 自律型波長レステレーション切替え例

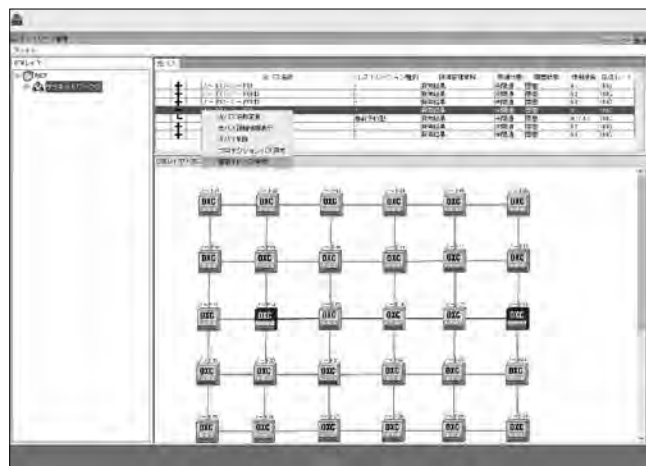


図5. PCEの画面例

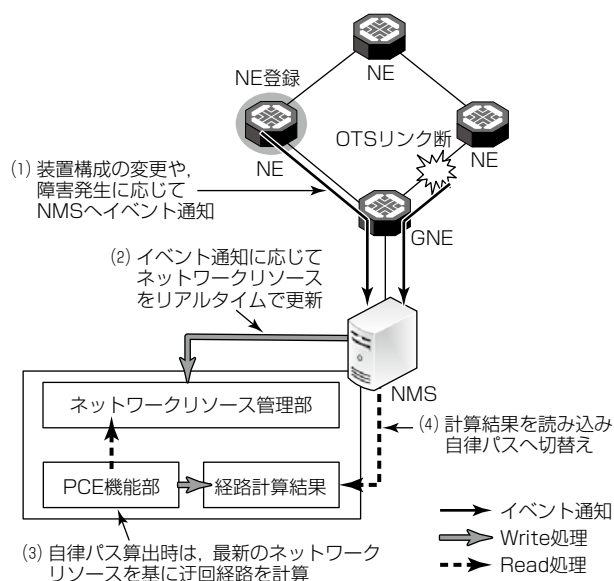


図7. PCE機能による自律型波長レステレーション切替え

替えを示す。NMSサーバはネットワーク構成情報の変更や、障害発生／障害復旧等の通知に応じて、ネットワークリソース(NE接続情報、OTSリンク、波長資源、3R再生中継装置)をリアルタイムで逐次更新する。現用パスの障害発生時には、最新のネットワークリソースを基にPCE機能部で自律パスを算出し、当該パスへ自動切替えを行う。経路切替え制御及びネットワークリソース管理はNMSサーバによって一元管理されているため、経路間の衝突を回避した確実な切替え制御が可能である。この機能によって、利用可能なネットワークリソースを有効活用し、想定外の大規模障害に対して柔軟な切替え方式を実現した。

また、NMSサーバはホットスタンバイ方式で0系ACT、1系STANDBYの冗長構成をとっており、常に両系サーバがデータ整合して動作している。片系サーバで障害が発生した場合でも監視・制御状態は切れることなく、常に監視・制御可能である。これによって、波長レステーション切替え動作中に片系サーバで障害が発生した場合でも、経路算出及び光パス切替え処理の継続が可能である。

3.2.2 切替え優先度による高信頼パス切替え技術

このシステムは、現用パス1本について複数本の事前予

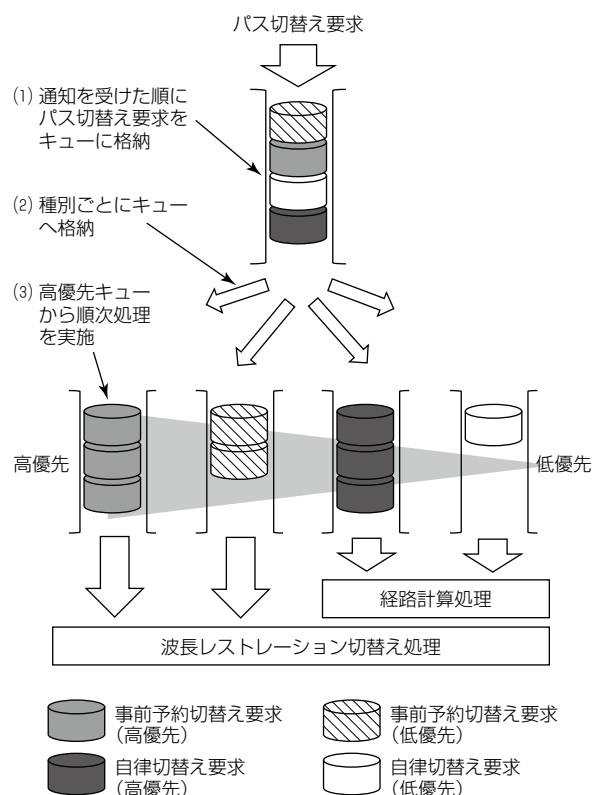


図8. 切替え優先度による波長レステーション切替え

約パスと自律パスを設定できる。各現用パスに対して切替え優先度を設定することによって、波長レステーション切替え発動時には、優先度の高い現用パスから順に切替えが可能になる。図8に切替え優先度による波長レステーション切替えを示す。NMS内で通知を受けた順にパス切替え要求をキューに格納後、さらに切替え種別(波長レステーション種別と優先度)に応じたキューへ格納する。高優先キューから切替え処理を実施することによって、ネットワークリソースが不足している場合でも、重要度の高いパスを優先的に障害復旧させることが可能になる。光パス閉塞解除失敗などの要因によって切替えが失敗した際には、切替え未実施の事前予約パス又は自律パスに対する切替え要求を再度通知する。この技術によって、迂回経路構築に必要なリソースを抑制した経済的かつ確実な障害復旧と、災害による複数障害や想定外障害の復旧の両立を実現した。

4. む す び

メッシュネットワークでの光パスの最適設計を自動化するPCE機能及び障害発生時にリアルタイムで算出した迂回経路に切り替える自律型波長レステーション機能について述べた。これらの技術によって、柔軟かつ高信頼な基幹光ネットワークを構築可能であり、今後想定される南海トラフや首都圏直下型地震を見据えたBCP(Business Continuity Plan)への備えとしても有用である。

引き続き、災害に強い高信頼なネットワークを実現するために、ネットワーク装置のようなハードウェア面だけでなく、障害復旧オペレーションを含めたソフトウェア面にも新技術を取り入れ、より安心・安全な社会インフラの構築に努めていく。

参 考 文 献

- (1) 山崎 創, ほか: 88波×8方路光クロスコネクシステム, 三菱電機技報, 90, No.6, 327~331 (2016)
- (2) 総務省: 平成30年版 情報通信白書
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/index.html>
- (3) 片岡久宜, ほか: 監視制御装置, 特開2014-232944
- (4) 吉原直利, ほか: 光伝送システム, 管理装置, 光伝送ノード及び光伝送方法, 特許第6465627号
- (5) 中村徳昭, ほか: 経路探索装置及び経路探索方法, 特開2017-98593

沖縄都市モノレール線及び多摩都市モノレール線向けデジタル列車無線システム

山崎 守*

Digital Train Radio System for Okinawa Urban Monorail and Tokyo Tama Intercity Monorail

Mamoru Yamazaki

要 旨

現在、私鉄、地下鉄、モノレールや新交通システムの列車無線は、その多くがアナログ方式や誘導無線方式で運用されているが、今後は無線回線品質の向上や信頼性の強化、データ通信やアプリケーション連携等の付加価値を求めて、デジタル化が加速する見込みである。

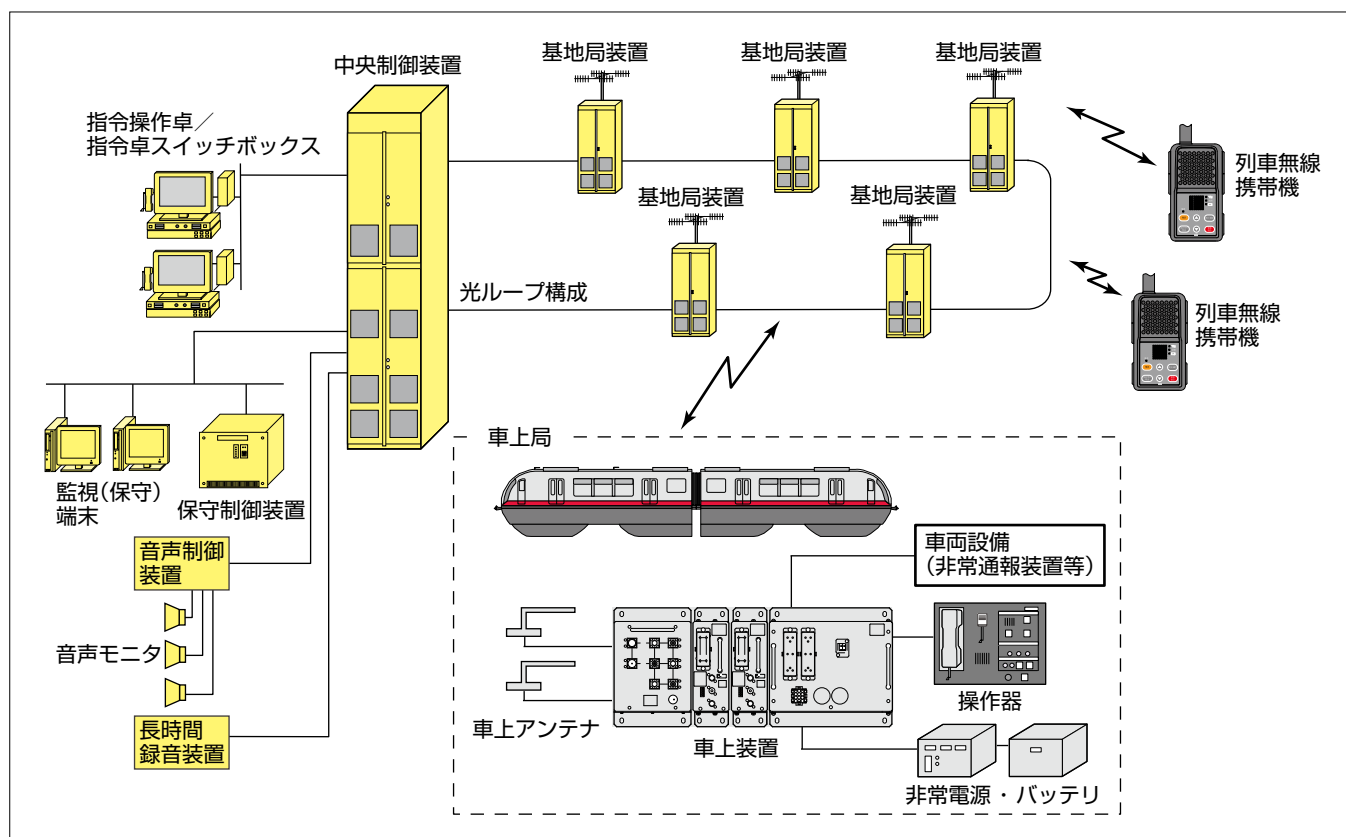
このような状況下で、三菱電機は、沖縄都市モノレール(株)及び多摩都市モノレール(株)のアナログ列車無線システムの老朽化に伴う設備更新のため、デジタル列車無線システムの機器の開発を行った。

このシステムの主な特長は次のとおりである。

- (1) 同一波電波干渉存在下では送信時間ダイバーシチ・適応等化技術を適用することで通信品質劣化を防ぎ、高品質な無線回線を提供した。

- (2) 基地局、移動局に複数CH(チャンネル)対応の無線機を搭載し、音声とデータの同時伝送を実現した。
- (3) 誤り訂正を備えた列車無線専用の高音質な音声コーデックを適用し、クリアな音声を実現した。
- (4) 移動局を機能ブロックごとにユニット化することで、保守性を向上した。

これらの特長に加え、沖縄都市モノレール線では複数の通話回線を選択制御可能な列車無線携帯機を導入し、保守員の利便性向上に貢献した。多摩都市モノレール線では当社フルカラーLED式車内案内表示器と組み合わせた運行情報配信サービスを実現し、乗客向け案内サービスの向上に寄与した。



沖縄都市モノレール線向けデジタル列車無線システム

沖縄都市モノレール線のデジタル列車無線システムの構成を示す。中央機器室に中央制御装置、保守制御装置、監視(保守)端末、指令所に指令操作卓、線路沿線に基地局装置、列車に車上装置を設置し、無線伝送によって地上側の指令員と列車の乗務員間の通話やデータ伝送を行う。また列車無線携帯機によって、保守員と指令員間の通話、又は保守員同士の通話を行う。

1. ま え が き

高速走行する列車と地上間の無線通信には、安心・安全の厳しい要求に対応するため、高品質、高安定性、高速伝送などが求められる。

当社は、列車無線システムのデジタル無線方式への切替えに数多く携わり、関連する技術・ノウハウを蓄積してきた。

私鉄、地下鉄、モノレールや新交通システムの列車無線は、現状、ほとんどがアナログ方式又は誘導無線方式で運用されているが、今後は無線回線品質の向上や信頼性の強化、データ通信やアプリケーション連携などの付加価値を求めて、デジタル化が加速する見込みである。

このような状況下で、当社は、最新の無線技術を適用した150MHz帯のデジタル列車無線システムを開発した。

本稿では、2016年に納入した沖縄都市モノレール(株)のデジタル列車無線システムを中心に、その概要と特長を述べる。また2018年には、多摩都市モノレール(株)に類似システムを納入しており、新たな機能として運行情報配信サービスを実現したので、それについても述べる。

2. デジタル列車無線システムの概要

2.1 システム構成

デジタル列車無線システムは、中央制御装置、基地局装置、車上装置、その他で構成され、地上-列車間の通信はデジタル無線回線を使用する。各装置の機能概要を表1に示す。

2.2 無線諸元

地上-列車間の無線通信システムとしてFDMA(Frequency-Division Multiple Access)/SCPC(Single Channel Per Carrier)方式のデジタル無線回線で構築している。無線諸元を表2に示す。

2.3 機能

このシステムでは、次の機能を備える。

(1) 音声通話・放送機能

- ①一斉指令通話：指令員-全列車乗務員間の通話。
- ②個別指令通話：指令員-指定列車乗務員間の通話。
- ③客室非常通報：指令員-列車乗客間の通話。
- ④個別車内放送：指令員から指定列車乗客への放送。

(2) データ伝送機能

- ①車両デッドマン通報：列車運転中に列車乗務員の意識喪失などの事態が発生した場合に、車上装置で車両からデッドマン情報を検出し、指令員に対して列車乗務員の異常事態を通報。
- ②非常発報通知：人身事故などの緊急時に、指令所及び全列車に警報を発する。警報内容によっては列車への送電を止めて、強制的に停車させる。

表1. 各装置の機能概要

装置名	設置場所	機能概要
中央制御装置	中央機器室	①音声通信、データ通信の回線制御 ②基地局装置とインタフェース ③指令操作卓、外部装置とインタフェース
基地局装置	線路沿線	①車上装置との無線通信 ②中央制御装置とインタフェース
車上装置	車両	①基地局装置との無線通信 ②指令との音声通信制御 ③車両の他装置とのインタフェース
指令操作卓	指令所	①指令員が操作する、音声通信、データ通信のユーザーインタフェース
保守制御装置	中央機器室	①監視制御及び保守運用に関わる情報を一元管理
列車無線携帯機	-	①保守員と指令員間の音声通信 ②保守員同士の音声通信

表2. 無線諸元

項目	仕様
伝送路	空間波/LCX
アクセス方式	FDMA/SCPC方式
周波数帯	150MHz帯
周波数間隔	6.25kHz
変調方式	$\pi/4$ シフトQPSK
伝送速度	9.6kbps
送信出力	基地局装置：4W、車上装置：1W
ダイバーシチ構成	基地局装置：送信時間ダイバーシチ 受信ダイバーシチ 車上装置：受信ダイバーシチ

LCX：Leaky Coaxial Cable

QPSK：Quadrature Phase Shift Keying

(3) 音声モニタ機能

- ①音声モニタ：指令員-列車乗務員間の音声を、中央及び駅務室にモニタ出力。

(4) 通話記録機能

- ①通話記録：指令員-列車乗務員間の音声を常時録音。

(5) 遠隔監視制御機能

- ①遠隔監視：監視(保守)端末によって、遠隔で各機器及びネットワーク回線の動作状態の監視制御。

3. デジタル列車無線の特長

3.1 送信時間ダイバーシチ・適応等化による品質向上

一般的に、同じ周波数の同じ信号を複数のアンテナから送信すると、同一波干渉によって、逆位相となったところでは電波が消失し、受信側で大きな誤りが生じる(図1)。この電波の消失は、送信機の周波数差に従って周期的に発生する(ビート干渉)。

この課題を解決するため、このシステムでは隣接する基地局、又はアンテナからの送信信号に固定の時間差をつけて送信する送信時間ダイバーシチ⁽¹⁾を導入し、移動局での受信信号の打ち消し合いを回避した(図2)。また移動局には適応等化による推定技術(図3)を採用し、先に述べた送信時間ダイバーシチによる遅延波も信号成分として利用し、復調することを可能にした。さらに無線回線品質を向上させるため、基地局、移動局共に、受信ダイバーシチを採用した。

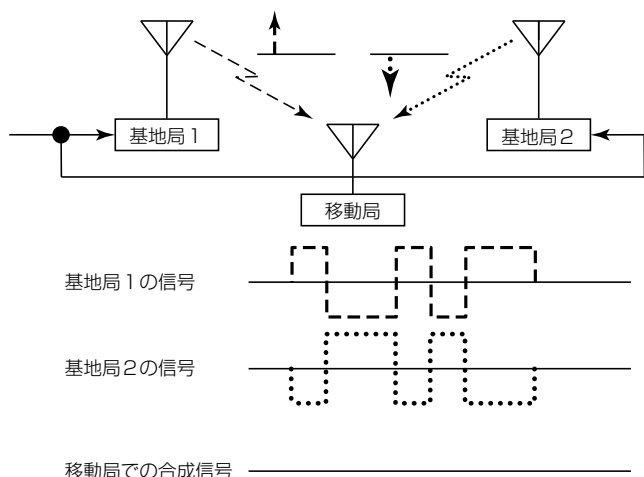


図1. 同一波干渉による信号消失

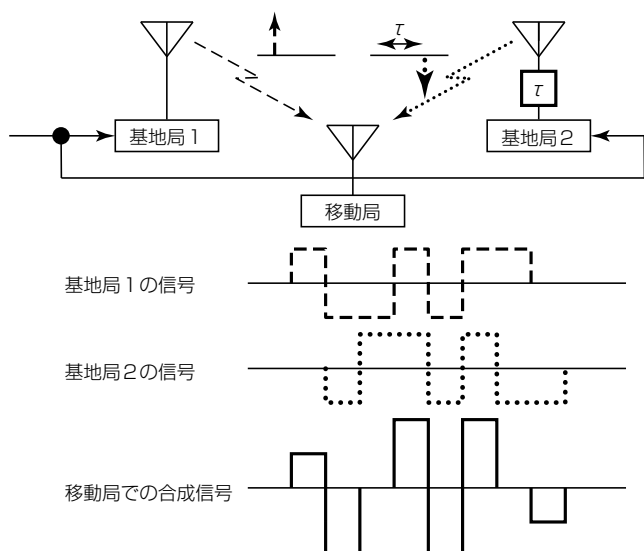


図2. 送信時間ダイバーシチ

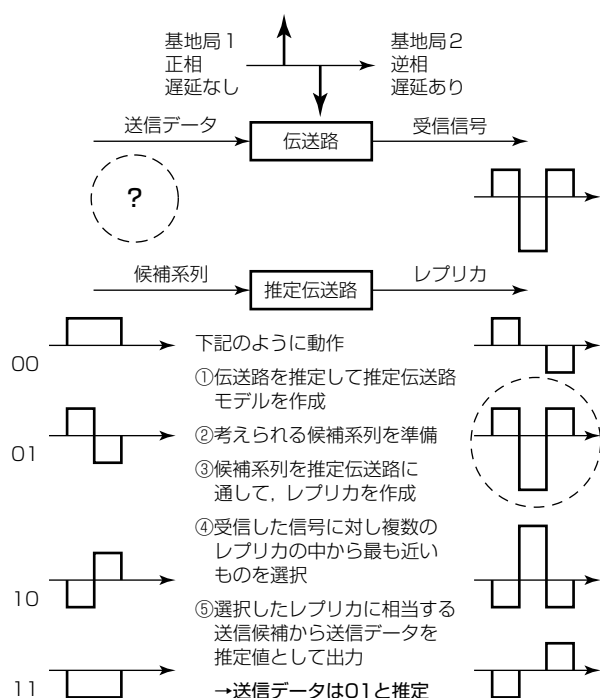


図3. 適応等化による推定

3.2 不感地帯・弱電界対策

将来的には、ビル建設等によって周囲電波環境の変化が生じ、無線回線品質が劣化する場合が考えられる。その場合には、3.1節で述べた干渉対策技術を適用することによって、基地局の増設又はサテライトアンテナを設置するだけで(図4)、容易に回線品質の劣化を解消できる。

3.3 車両設備との接続

ワンマン運転に対応するため、このシステムでは、車両デッドマン装置、客室非常通報器、車内放送装置を車上装置と接続している。これによって、例えば列車運転中に列車乗務員の意識喪失などの非常事態が発生した場合、図5のように、①車上装置で車両デッドマン通知を検出後、②車両デッドマン通報で指令員に通知し、③指令員が車内放送で列車乗客に状況連絡し、④客室非常通報で指令員-列車乗客間の相互通話を行うなど、非常事態が発生した場合に指令員-列車乗務員、列車乗客間で確実に連絡を取ることができるシステムにしている。

3.4 音声とデータの同時伝送実現

列車安定輸送のため、音声通信中であっても車両デッドマン通報などの重要データを即時に伝送する必要がある。このシステムの車上装置及び基地局装置の無線機は、通話CH及び制御/データCHをそれぞれ送受信する機能を持つため2CH同時使用が可能であり、これによって音声及びデータの同時伝送を実現している。図6に車上装置の構成を示す。

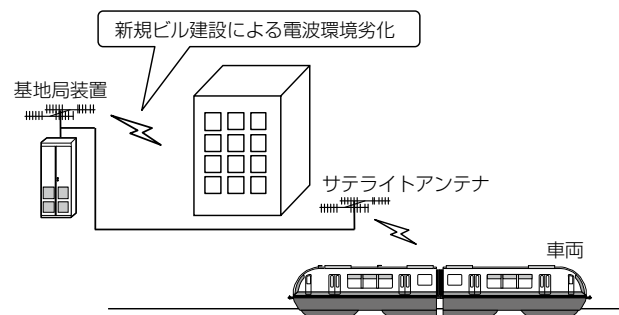


図4. 不感地帯・弱電界対策のイメージ

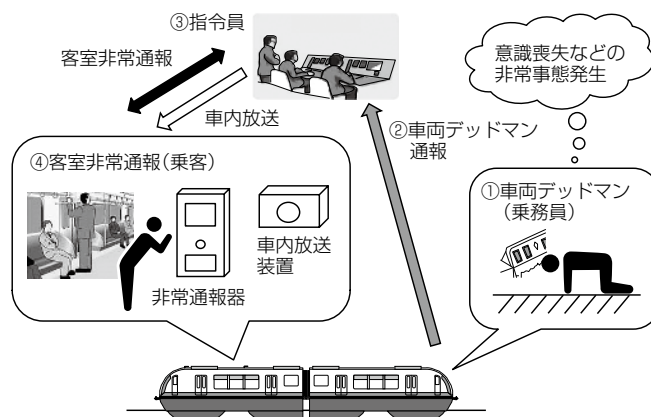


図5. 車両設備との接続イメージ

(1) 通話CH

音声通話・放送時に使用するCHであり、第1通話CHと第2通話CHの2回線を持つ。

(2) 制御／データCH

通信制御時に使用する制御CH、車両デッドマン通報や非常発報などに使用するデータCHから構成される。

3.5 高音質音声コーデックでクリアな音質の実現

このシステムでは、音声重視の符号構成とした当社独自開発の列車無線専用音声コーデックRL-CELP(Rail system-Code Excited Linear Prediction)を適用して雑音のない高音質な通話を実現し、地上の指令員と車両の乗務員、乗客間の正確な通話をサポートしている。

3.6 中央制御装置と基地局装置間のアプローチ回線

中央制御装置と基地局装置間のアプローチ回線をデジタ

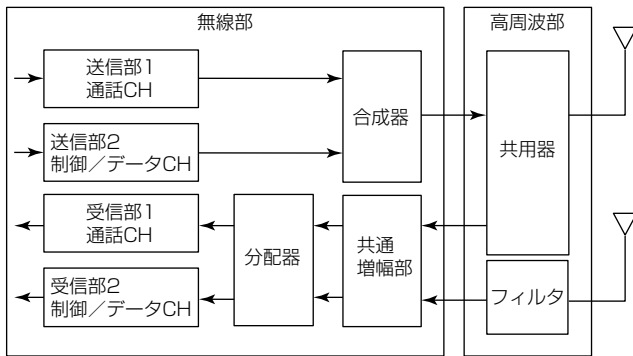


図6. 車上装置の構成

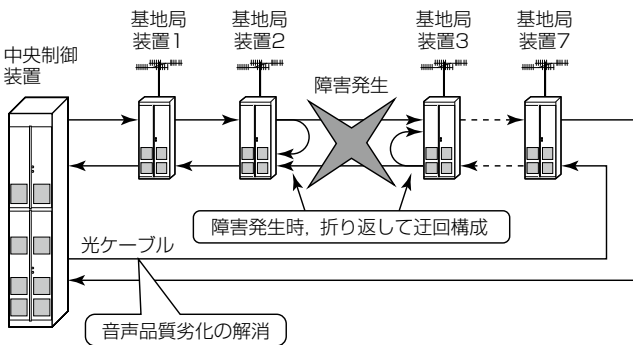


図7. アプローチ回線の光ネットワーク化



図8. 監視(保守)端末の操作画面例

ル信号によって光ネットワーク化し、中央制御装置からゾーン内全基地局装置を光ファイバケーブルで直列に接続した二重化ループ構成とすることによって、ケーブル等の障害発生時でも迂回(うかい)構成で継続運用が可能になり、信頼性を向上させた(図7)。

3.7 遠隔監視制御によるメンテナンス性の向上

運営基地に設置する監視(保守)端末では、各装置やネットワーク回線の動作状態の遠隔監視、各装置の冗長構成部品の切替えなどの遠隔制御、各装置の遠隔ログ収集、ソフトウェア等のダウンロード機能を備える。図8に、監視(保守)端末の操作画面例を示す。これらの機能によって保守員が各駅に設置した設備まで行かずに、運営基地で遠隔で各機器の状態監視、制御が可能になり、メンテナンス性を向上させた。

4. デジタル列車無線の付加機能

3章で述べた特長に加え、沖縄都市モノレール線の列車無線システムでは、指令員の介入なく通話回線を制御可能な列車無線携帯機を導入し、保守の省力化に貢献した。また多摩都市モノレール線の列車無線システムでは、当社フルカラーLED式車内案内表示器と組み合わせた運行情報配信サービスを実現し、乗客向け案内サービスの向上に寄与した。次に、それぞれの機能について述べる。

4.1 通話回線の選択制御可能な列車無線携帯機

従来の列車無線携帯機は、固定の通話回線1回線で通話を行うものであり、例えばゾーン内で複数の携帯機が使用されている場合など、通話回線をシェアするのが困難であった。沖縄都市モノレール線向けに納入した列車無線携帯機では、携帯機で2回線の通話回線を使用可能にすることで保守員の利便性向上に貢献した。図9は携帯機の回線制御イメージであり、通話回線選択から終話までの流れを示すものである。

4.2 運行情報配信サービスによる付加価値の向上

運行情報配信サービスは、多摩都市モノレール線に導入したデータ伝送機能であり、最新の運行情報(各路線の運

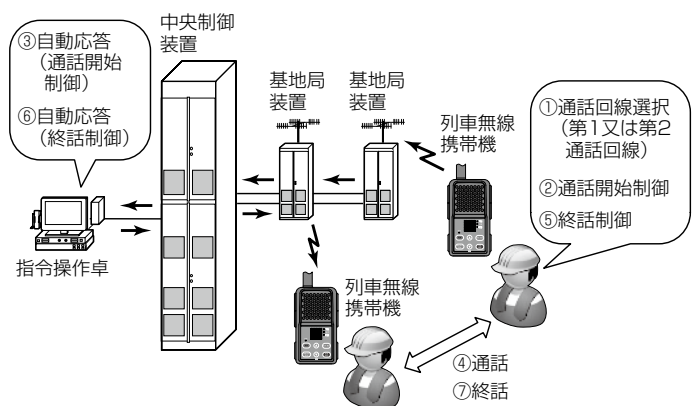


図9. 携帯機の回線制御イメージ

表3. 携帯機の無線諸元

項目	仕様
伝送路	空間波
アクセス方式	FDMA/SCPC方式
周波数帯	150MHz帯
周波数間隔	6.25kHz
変調方式	$\pi/4$ シフトQPSK
伝送速度	9.6kbps
送信出力	0.8W
ダイバーシチ構成	ダイバーシチなし

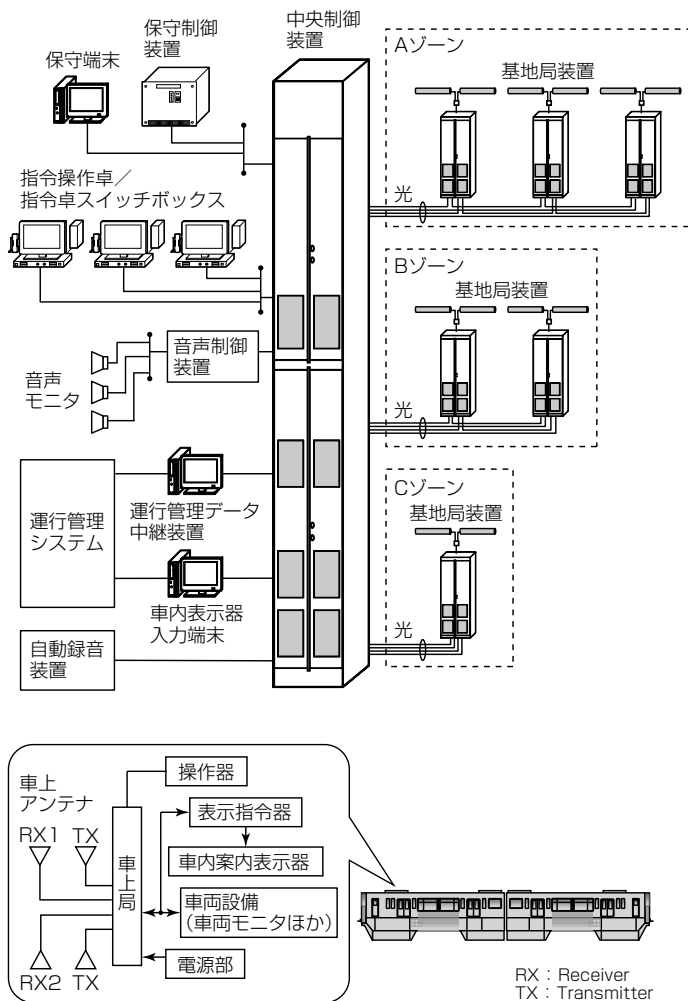


図10. 多摩都市モノレール線向け列車無線システム

行状況)を、デジタル列車無線を介して車上に伝達し、その情報を客室の車内案内表示器に表示するものである。当社列車無線システムと車両システムの事業連携によって実現し、乗客向けサービスを発展させて付加価値の向上に寄

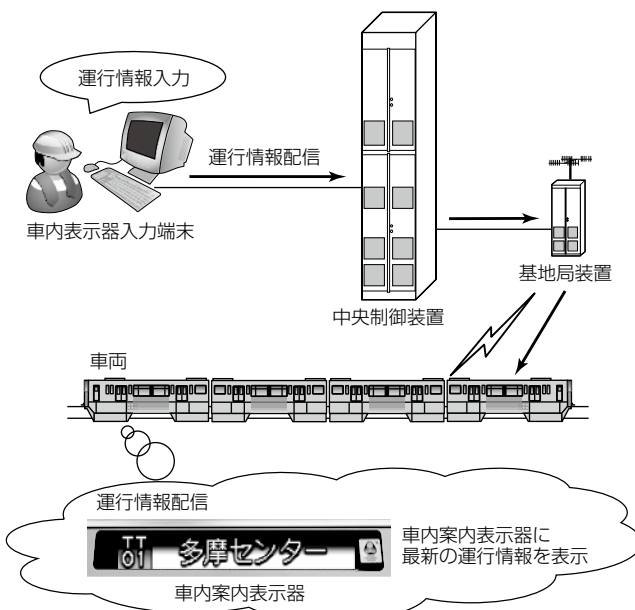


図11. 運行情報配信サービス

与した。図10に多摩都市モノレール線向け列車無線システムの構成図を、図11に運行情報配信サービスの機能イメージを示す。

5. む す び

沖縄都市モノレール線及び多摩都市モノレール線に納入したデジタル列車無線システムの概要と特長について述べた。

デジタル列車無線システムの現在の運用は主に通話用として使用されているが、今後、データ伝送機能を活用したアプリケーションの充実化を検討し、乗務員支援や旅客サービスの向上、防犯対策、省メンテナンスといった新たな付加価値を創造し、鉄道分野の発展や社会インフラの構築に貢献していく。

このシステムの開発に当たり多大なるご指導をいただいた沖縄都市モノレール(株)、多摩都市モノレール(株)を始めとする関係各位に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 久保博嗣, ほか: 送信ダイバーシチと適応等化器によるビート干渉抑圧方式に関する一検討, 電子情報通信学会論文誌(B), J86-B, No.3, 468~476 (2003)

第5世代移动通信システムの標準化

長谷川史樹* 長谷川文大**
平 明德**
大賀正夫***

Standardization Trends and Activities on 5th Generation Mobile Communication System

Fumiki Hasegawa, Akinori Taira, Masao Oga, Fumihiro Hasegawa

要 旨

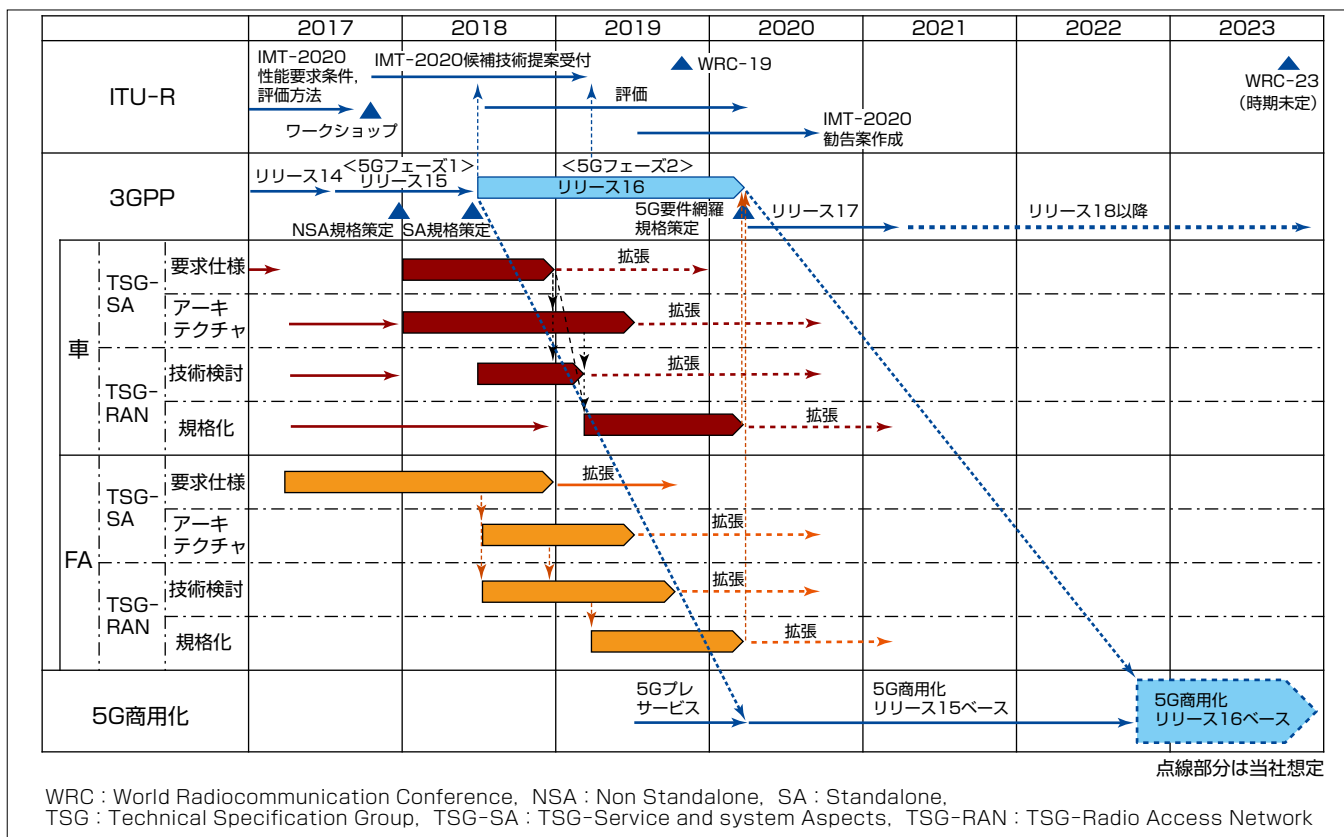
移动通信トラフィックの世界的な増大とIoT(Internet of Things)時代の多種多様なニーズに応えるため、高速大容量、多数同時接続、超高信頼・低遅延を実現する第5世代移动通信システム(5G)の国際標準化が進められている。

国際電気通信連合無線通信部門(International Telecommunication Union Radiocommunication sector: ITU-R)は、5Gに相当するIMT-2020(International Mobile Telecommunications-2020)の無線インタフェース技術勧告案を2020年秋に完成させる予定である。

3GPP(3rd Generation Partnership Project)は、2020年の5G商用サービス開始に向けて二つのフェーズ(フェーズ1: リリース15, フェーズ2: リリース16)でNR(New

Radio)規格策定を進めている。リリース15で策定する5G機能は、高速大容量を実現するeMBB(enhanced Mobile BroadBand)と一部の低遅延機能となる。リリース16では、車やFA(Factory Automation)といった産業用途への適用を目指し、多数同時接続を実現するmMTC(massive Machine Type Communication), 超高信頼・低遅延(Ultra Reliable and Low Latency Communication: URLLC)機能の策定を予定している。

三菱電機は、5Gの産業用途への適用に向け、通信の信頼性向上に関連する技術提案を行い、3GPP規格策定に貢献している。



2020年商用開始、及び2020年以降の商用に向けた5G標準化の主なスケジュール

3GPPは、2020年の商用化に向けて、リリース15(2017年3月~2018年6月)の規格策定が完了した。この規格を用いて国内では、2019年9月頃にプレサービスが予定されている。また、2018年6月からリリース16の規格策定が開始された。リリース16では、コネクテッドカー(Connected Car)向け、FA機器向けといった産業用途への適用を目指し、規格策定を進めている。

1. ま え が き

5Gは、携帯電話方式の国際標準規格作成を行っている3GPPで5G規格策定のフェーズ1が完了し、韓国、米国等の一部地域でサービスが開始された。日本でも2019年9月頃からプレサービスの開始が予定されている。

5Gは、スマートフォンなどに代表される高速データ通信eMBBの更なる大容量化に加えて、センサ等のmMTC、URLLCの三つの特長と、特定アプリケーションごとに必要となるQoS(Quality of Service)を保証する仕組みを導入することで、様々な要件が求められる産業用途への適用を目指している。eMBBとURLLCの一部については、2018年に標準化が完了した。現在、2023年以降の産業用途への適用を目指して、mMTC、URLLC等の標準化が進められている。

本稿では、3GPPでの5G標準化動向と当社の取組みについて述べる。

2. 5G標準規格状況

3GPPでは、二つのフェーズ(フェーズ1：リリース15、フェーズ2：リリース16)で5G規格化を進めている。フェーズ1(2017年3月～2018年6月)は、eMBBを中心とし、スマートフォンなどへの更なる高速データ通信を可能にする規格となる。

一方、フェーズ2(2018年6月～2020年3月)は、産業用途への適用を目指し、機器制御を可能にするURLLCや低消費電力で多数端末の接続を可能にするmMTCに対応した規格となる。

表1、表2にフェーズ2で規格化を進めている産業用途向けの検討項目を示す⁽¹⁾。

表1に示すとおり、サービス要件検討、システムアーキテクチャ検討で、産業分野へ5Gを適用するための要件、システムの検討が行われている。5Gサービス要件検討で、5Gを活用した新たなサービスの検討や、市場要求を明確にする。さらに、5Gシステムアーキテクチャ検討で、5Gの特徴である低遅延・高信頼・低ジッタで3GPPデータサービスを行うためのシステムアーキテクチャの検討が行われている。また、サービスごとの要件に合わせてネットワークを運用可能にするネットワークスライシングについての検討も行われている。ネットワークスライシングのビジネスモデル検討は、ビジネスモデルを実現するために必要となる要件検討が行われ、これらの検討を基に実現に向けたアーキテクチャの検討が進められている。

表2は、全体の検討(表1)を基に、車、FA等の特定産業用途向けの検討項目を示す。車関連として3項目、FA関連として2項目、その他として3項目の規格化が行われている。

表1. 産業用途向けの3GPP検討項目(全体)

分類	アイテム名	概要
全般	サービス要件検討(SMARTER_Ph2)	市場要求の分析、5Gを活用した新たなサービスの検討
	システムアーキテクチャ検討(5G_URLLC)	低遅延・高信頼・低ジッタを実現する5Gシステムアーキテクチャの検討
	ネットワークスライシングのビジネスモデル検討(BRMNS)	ネットワークスライシングのビジネスモデルとそれを実現するための要件の検討
	ネットワークスライシングのためのアーキテクチャ検討(eNS)	ネットワークスライシングを実現するためのアーキテクチャの検討

表2. 特定分野向けの3GPP検討項目

分類	アイテム名	概要
車関連	V2X機能拡張の検討(V2XIMP)	V2Xシナリオの追加とそれに関連する要件の検討
	V2X追加シナリオのアーキテクチャ検討(eV2XARC)	V2X追加シナリオを実現するためのアーキテクチャの検討
	V2Xアプリケーション検討(V2XAPP)	V2Xアプリケーションを利用するためのアーキテクチャ検討
FA関連	産業分野への5G適用検討(cyberCAV)	産業分野へ5Gを適用するための性能要件の検討
	産業分野向けのアーキテクチャ検討(Vertical_LAN)	産業分野へ5Gを適用するためのアーキテクチャの検討
その他	鉄道通信システム検討(MONASTERY2)	鉄道通信へ5Gを適用するためのサービスシナリオとそれに関連する要件の検討
	衛星サービス検討(5GSAT)	衛星サービスに5Gを適用するためのユースケース及びサービス要件の検討
	測位サービス検討(5G_HYPOS)	測位サービスに5Gを適用するためのユースケース及びサービス要件の検討

車関連の項目では、LTE(Long Term Evolution) V2X(Vehicle-to-Everything)をベースとし、5Gの特長を生かした機能拡張の検討が行われている。

FA関連の項目では、工場内に5Gを適用するための性能要件とアーキテクチャの検討が行われている。

その他の項目では、鉄道分野への5G適用や、衛星分野への5G適用、測位サービスへの5G適用などを検討し、規格化が行われている。

3. 標準規格と当社活動

この章では、3GPP規格作成段階で当社が関与した技術項目を取り上げ、規格内容と当社活動を述べる。

3.1 車向け規格

3GPPの車向けサービスはV2Xシナリオと呼ばれ、V2V(Vehicle-to-Vehicle)、V2I(Vehicle-to-Infrastructure)、V2N(Vehicle-to-Network)、V2P(Vehicle-to-Pedestrian)の4タイプのアプリケーション収容が要求された⁽²⁾。2016年9月の端末間通信機能を用いるV2V/V2I/V2P規格を皮切りに、基地局-端末間通信機能を用いるV2N規格を加えたV2X Phase-1が2017年3月にリリースされ、さらに大容量化と低遅延化による端末間通信機能の強化などを行ったV2X Phase-2が2018年6月にリリースされた。V2X Phase-1、及びPhase-2共に4Gとして利用されているLTEをベースとした規格である。2019年3月現在、5G向けに開発されたNR(New Radio)を活用し、伝送容量、信頼性、伝送遅延、利用周波数帯域などの強化を目指

すV2X Phase-3の議論が進行中である。3GPPの規格策定に当たっては、車向けに25種のユースケースを想定し、これらを4カテゴリーにグループ化して通信システムとしての要求性能を導いている⁽³⁾。具体的には、①Vehicles Platooning(隊列走行)、②Extended Sensors(車両・路側装置・歩行者間でのセンサ情報共有)、③Advanced Driving(自動運転)、④Remote Driving(クラウドベースの遠隔操作)という異なる性質のアプリケーションを想定し、必要とされる通信パラメータとしてパケットサイズ、頻度、遅延時間、信頼性、伝送速度、通信距離が示されている。

V2Xシナリオで特徴的な機能の一つとして、端末間通信が挙げられる。一般的に用いられるスマートフォンなどは、基地局を介して無線接続が行われており、基地局→端末がダウンリンク(DL)、端末→基地局がアップリンク(UL)と呼ばれている。これに対して、V2Xシナリオでは車と車、又は車と人など端末同士が基地局を介さずに直接通信を行う機能が大きな役割を果たし、サイドリンク(SL)と呼ばれている。技術的には、高速移動環境での安定した情報伝送、端末間での時間・周波数同期が重要な課題となる。SLは専用周波数での運用も可能であるが、基地局-端末間通信と同一周波数で運用する場合には、ULフレームの一部がSLに割り当てられる。基地局による制御を行わない場合、ランダムリソース選択に基づくSPS(Semi-Persistent Scheduling)による伝送が行われる⁽⁴⁾。SPSとランダムリソース選択の概念図を図1に示す。送信情報を持つ端末は、20~100m秒の送信ウィンドウ内で半固定的に送信リソースを設定する。SPSによる情報の送信周期は20、50、100、200、…、1,000m秒の中から選択可能である。各端末はリソース選択時に「再選択カウンタ」に乱数をセットする(例えば送信周期100m秒以上の場合は5~15回)。この回数送信が完了したタイミングで、一定確率でリソース切替えが行われる。リソース選択を行う際には、直前1秒間の干渉測定が義務付けられており、一定強度以上の干渉が生じない時間・周波数リソースが優先的に選択される。この仕組みによって、各端末は自律的に干

渉を回避しつつ、端末間通信を実現できる。

当社ではV2Xシナリオでの安定した情報伝送に向け、ダイバーシチ方式や参照信号の構成、端末間同期方式に関する提案を行っている。

3.2 FA向け規格

3GPPのFA向け規格検討は、“Factory of the Future”と呼ばれ、表3に示す5種類のユースケースと9種類のアプリケーションエリアを定義して要求条件及び技術検討が進められている。

リリース16では、CPS(Cyber Physical System)向けアプリケーションのサービス要求条件が2018年12月に規格化された⁽⁵⁾。特に、モーションコントロールなどのユースケースでは、500μ秒間隔の周期的な通信の実現やクロック同期精度1μ秒以下など非常に厳しい要求条件となっている。

また、FA向けサービスを提供するネットワークは、公衆網(Public Network)の利用だけではなく、工場などの建物内に構築し、5G通信機能を持つFA向け産業機器や特定のユーザーなど限られた範囲内でサービスを提供できるNPN(Non Public Network)が新たに導入されている⁽⁶⁾。NPNは2種類のカテゴリーに分類され、①完全に独立したスタンドアロンなネットワーク構成、②公衆網と連携したネットワーク構成、を想定している。また、NPNの保守運用では、これまで公衆網で同サービスを提供してきた通信事業者ではなく工場のオーナーや委託されたシステムインテグレータが担当する。

近年、産業用通信規格として、CC-Link IE、PROFINET^(注1)、EtherCAT^(注2)など産業用イーサネット^(注3)系の通信プロトコルの導入が進んでいる⁽⁷⁾。そのため、FA向け規格では、これらの産業用アプリケーションを5Gシステム上で通信するための技術課題を解決するソリューションが提案され、主要な技術課題としては、①5G LAN-typeサービス(LANアプリケーションのサポート)、②クロック同期(Time Sensitive Communication)、③低遅延・高信頼無線通信などが挙げられる。

表3. FA向けユースケースとアプリケーションの対応

	モーションコントロール	安全機能付き可搬制御盤 制御装置間通信	モバイロロボット	遠隔アクセスと保守	拡張現実	閉ループプロセス制御	プロセス監視	プラントアセットマネジメント
ファクトリーオートメーション	×	×	×					
プロセスオートメーション			×			×	×	×
HMIと生産IT		×			×			
物流と倉庫保管		×	×					×
監視と保守				×				

HMI : Human Machine Interface

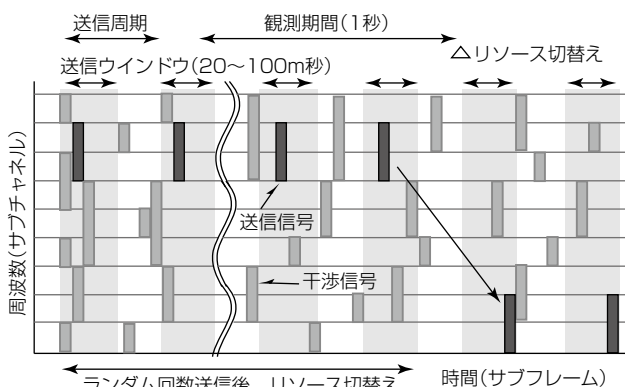


図1. SLでのSPSとランダムリソース選択の概念図

(1) 5G LAN-typeサービス⁽⁶⁾⁽⁸⁾

5G LAN-typeサービスでは、5Gシステム上で従来のIP(Internet Protocol)データに加え、イーサネットなどの非IPデータの通信を提供する。このサービスを利用する端末は、同じグループに登録された端末のみがアクセス可能な5G LANの仮想ネットワーク(5G LAN-Virtual Network)内で、イーサネットデバイスが接続された端末と端末間を1対1又は1対多接続によるプライベートな通信を行う。なお、端末間のプライベート通信は、基地局及びコアネットワークを経由した通信経路上で実施される。トランスポート層プロトコルがイーサネットの場合、QoS制御やVLAN-ID(Virtual LAN-IDentifier)に基づくルーティング機能などのサポートが要求されている。

(2) クロック同期

産業用イーサネットでは、ネットワークのリアルタイム性を保証するためTSN(Time Sensitive Networking)技術への対応が進んでいる。3GPPでは、TSN規格のうち時刻同期規格であるIEEE802.1AS及び時分割スケジューリング規格であるIEEE802.1Qbvに対応し、TSNブリッジやエンドステーションとの接続をサポートする。図2は、TSNソリューションのうち、5Gシステムを一つの論理的なTSNブリッジとみなすアーキテクチャ例と完全な

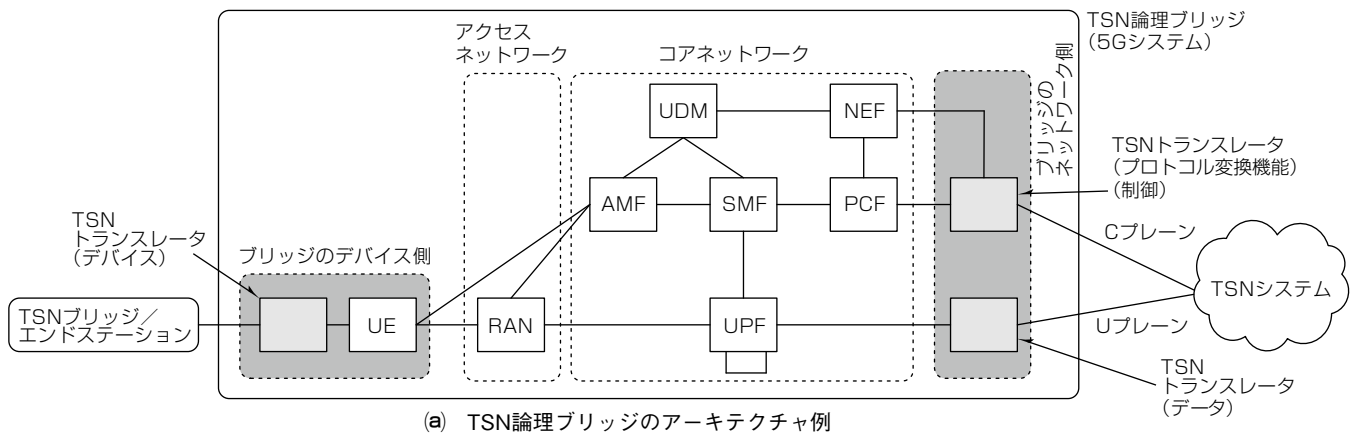
産業用イーサネットの置き換えとなるTSNリンクのアーキテクチャ例を示している。図2(a)では、新たにTT(TSN Translator)と呼ばれるTSNを終端する機能を5Gシステム内に備えるブリッジモデルを構成する。このモデルでは、5Gシステム内の遅延量から新たにバウンダリー・クロックを生成することでTSN規格に対応した通信装置やFA向け産業機器間のクロックを同期させ、TSN接続を保証する。一方で、図2(b)は、5Gシステムを介して接続されたTSN規格対応機器間で直接クロック同期処理を行うリンクモデルを構成している。なお、ブリッジモデルでもリンクモデルと同様にTSN規格対応機器間で同一のクロックに同期するトランスペアレント・クロックの接続形態も技術課題の一つに挙げられている。表4にTSN接続モデルとクロック同期の関係を示す。

(3) 低遅延・高信頼無線通信技術

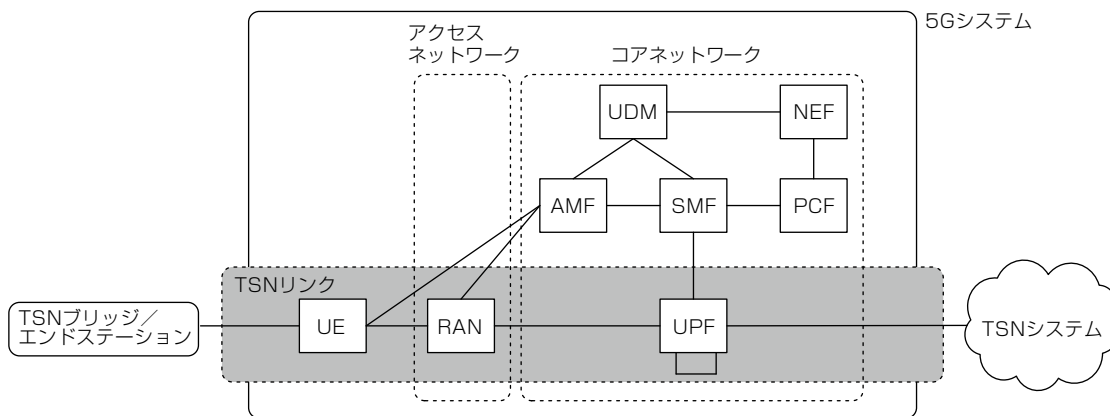
FA向けアプリケーションに要求される高可用性を保証するために、3GPPではDC(Dual Connectivity)やCA(Carrier

表4. TSN接続モデルとクロック同期の関係

モデル	クロック同期の形態
ブリッジモデル	トランスペアレント・クロック
	バウンダリー・クロック
リンクモデル	—



(a) TSN論理ブリッジのアーキテクチャ例



(b) TSNリンクのアーキテクチャ例

UE : User Equipment, UDM : Unified Data Management, AMF : Access and Mobility Management Function, NEF : Network Exposure Function, SMF : Session Management Function, PCF : Policy Control Function, UPF : User Plane Function

図2. 5GSのTSN接続アーキテクチャ例⁽⁷⁾

Aggregation)技術を活用し、レイヤごとに①Multi-TRP (Transmission Reception Point), ②PDCP duplication, ③High Layer Multi-Connectivity, と呼ばれる複数の通信経路を用いた冗長的な無線通信によって高信頼性を確保する無線通信技術が検討されている(図3)⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2019年3月時点では、リリース17でのFA向け規格のサービス要件が提案され、新たにTSNの複数タイムドメイン対応など産業用イーサネット向け機能追加、NPNの運用管理機能及びデバイス間通信(Device to Device Proximity Services)などFA向け規格の機能拡張に向けた技術課題として挙げられている。

当社では、3GPPでの提案活動を通じて、FA向け産業機器に対する5G技術の適用範囲を明確にしつつ、工場の無線化に向けた検討を進めている。

(注1) PROFINETは、PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.の登録商標である。

(注2) EtherCATは、Beckhoff Automation GmbHの登録商標である。

(注3) イーサネットは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

3.3 その他の産業向け規格

3GPPで、NR向け測位の技術の検討が行われている。ダウンリンクで複数基地局を用いて測位を行うOTDOA (Observed Time Difference Of Arrival), アップリンクで隣接セルに向けて測位用参照信号を送信し、測位を行うUTDOA(Uplink-Time Difference of Arrival)手法、そしてアップリンク及びダウンリンクを用いて1台の基地局で測位を行うE-CID(Enhanced-Cell Identifier)方式が測位手法として提案されている。無線アクセス技術を用いた手法で、FR1(Frequency Range 1)と呼ばれる4GHz帯-及びFR2と呼ばれる30GHz帯-の周波数帯を想定した技術が検討されており、PRS(Positioning Reference Signal)と呼ばれる測位用参照信号設計もダウンリンク及びアップリンク向けに提案されており、信号設計の枠組みが議論されている。また、FR2向けにはビームを用いた測位も検討されており、測位時にビームを動かしながら送信に用いるビームの候補の中から最適なビームを選べる仕組みも議論されている。併せて衛星を用いた測位手法の規格化も行われている。先に述べた手法は基地局又は端末から送信される信号を用いた無線アクセス技術に基づいた測位手法であるが、衛星を用いた測位手法も3GPP規格として検討されている。QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)⁽¹¹⁾で規格化されている測位精度及び収束時間に優れるPPP(Precise Point Positioning)-RTK(Real Time Kinematic)方式の規格化が3GPPで行われている⁽¹²⁾。

また、リリース16でのMIMO(Multiple Input Multiple Output)議論でURLLC向け技術議論が行われており、基地局間で同期又は非同期を想定した複数基地局を用いて信頼性を高める技術が提案されている。また、空間多重、周波数多重及び時間多重を用いる技術が提案されている。

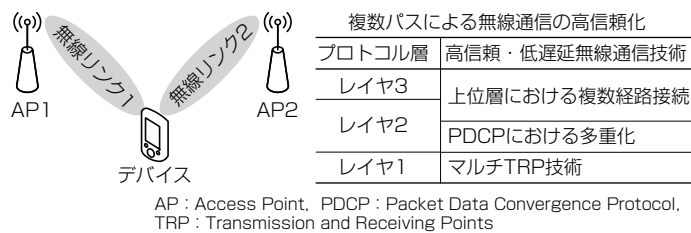


図3. 複数パスによる低遅延・高信頼無線通信技術

4. む す び

3GPPでの5G標準化に関して、規格策定状況を述べ、さらに、当社が産業用途向け規格策定に対して技術提案した信号伝送の信頼性向上技術に関して述べた。当社は、今後も3GPPへの継続的な参加と技術提案を行い、2020年の5G実現及び2020年以降の5G要件を網羅した国際標準化へ貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 3GPP : TSG SA Report to TSG RAN 83 (2019)
- (2) 3GPP : Service requirements for V2X services, TS22.185 V14.3.0 (2017)
- (3) 3GPP : Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services, TR22.886 V15.1.0 (2017)
- (4) 工藤理一, ほか : コネクテッドカーサービス実現に向けたLTE V2X技術, 電子情報通信学会和文論文誌B, J101-B, No.6, 417~433 (2018)
- (5) 3GPP : Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage1, TS22.104 V16.1.0 (2019)
- (6) 3GPP : Service requirements for the 5G system; Stage1, TS22.261 V16.1.0 (2019)
- (7) 堀田善文, ほか : IoTを支えるイーサネット規格TSN技術, 三菱電機技報, 90, No.7, 406~410 (2016)
- (8) 3GPP : Study on enhancement of 5G System(5GS) for vertical and Local Area Network(LAN) services, TR23.734 V16.1.0 (2019)
- (9) 3GPP : Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case(URLLC), TR38.824 V16.0.0 (2019)
- (10) 3GPP : Study on enhancement of Ultra-Reliable Low-Latency Communication(URLLC) support in the 5G Core network(5GC), TR23.725 V16.1.0 (2019)
- (11) Cabinet Office : Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification, Centimeter Level Augmentation Service, IS-QZSS-L6-001 (2018)
- (12) 3GPP : Study on NR positioning support, TR38.855 V1.1.0 (2019)

第5世代移動通信システム技術

中澤正幸* 中溝英之**
井浦裕貴** 友江直仁*
渡辺 光**

5th Generation Radio Communication System Technologies

Masayuki Nakazawa, Hiroki Iura, Hikaru Watanabe, Hideyuki Nakamizo, Naohito Tomoe

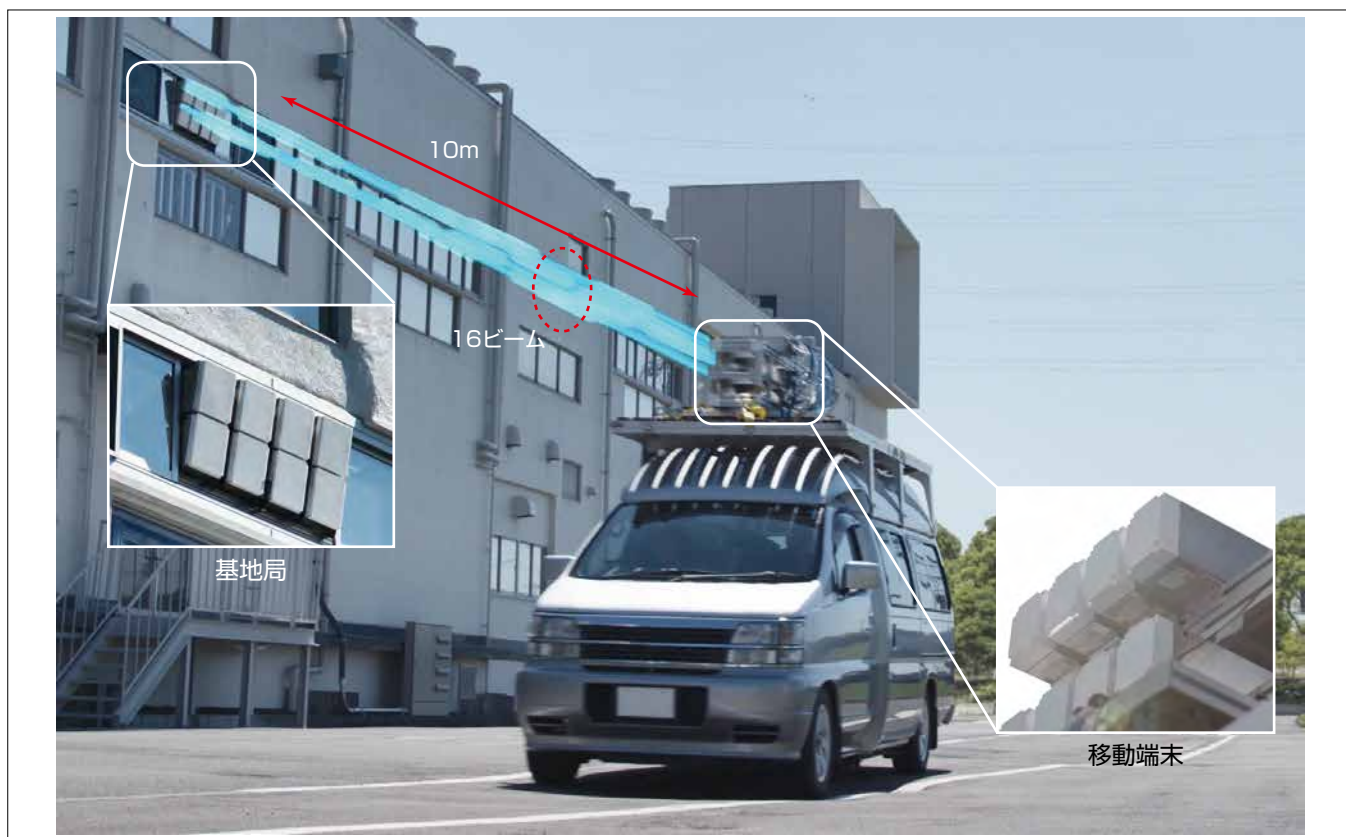
要 旨

AI(人工知能)・IoT(モノのインターネット)時代のICT(Information and Communication Technology)基盤となる第5世代移動通信システム(5G)について、5Gの特長である高速・低遅延・多数同時接続のうち、高速・低遅延を可能にする高速・低遅延通信技術を開発した。

高速通信技術として、多素子アンテナとデジタルプリコーディングを組み合わせることで無線信号の空間多重度を上げることによって周波数利用効率を向上させ、高速通信が可能になるMassive MIMO(Multiple Input Multiple Output)技

術を適用し、これまで三菱電機が培ってきた、アンテナ、高周波回路、信号処理等の要素技術にシステム構築技術を組み合わせることで、世界で初めて(注1)屋外・移動環境、28GHz帯16ビーム空間多重で、周波数利用効率67bps/Hz、通信速度27Gbpsの実験に成功した。また、低遅延通信技術として、高速演算回路の適用等によって、4Gの1/4以下の低遅延となる無線フレーム長0.25msの信号処理を実現した。

(注1) 2018年11月22日現在、当社調べ



28GHz帯16ビーム空間多重伝送によるSU-MIMO(Single User-MIMO)伝送実験

2020年に本格導入される5Gに向けて、高速・低遅延通信技術によって、世界で初めて屋外・移動環境、28GHz帯(500MHz帯域幅)、16ビーム空間多重で、周波数利用効率67bps/Hz、基地局・端末間距離10mで通信速度27Gbps、100mで25Gbpsの実験に成功した。

1. ま え が き

第5世代移動通信システム(5G)は、AI・IoT時代のICT基盤として、スマートフォンだけではなく、4K/8Kデジタルサイネージ、自動運転、遠隔医療、産業機器等への活用が期待されており、第4世代移動通信システム(4G)の規格上の最大伝送速度3 Gbpsを大きく超える20Gbpsの超高速伝送や、無線区間全体で4Gの1/10以下となる1 ms(無線フレーム長は4Gの1/4の0.25ms)の低遅延伝送が要求されている⁽¹⁾。その実現方法の一つとして、Massive MIMOの研究開発が盛んに行われている⁽²⁾。

当社は、これら高速・低遅延伝送の要求に対し、Massive MIMOの回路方式の一つであるハイブリッドビームフォーミング⁽³⁾を用いて、16ビーム空間多重の高速伝送を実現するとともに、演算アルゴリズム最適化や高密度基板実装などによって、低遅延の信号処理を実現した。

本稿では、当社が開発した高速・低遅延通信技術、この技術を実装した装置・システム構成、及び屋外での16ビーム空間多重のMIMO伝送実験の結果について述べる。

2. 高速・低遅延通信技術

5Gの実用化には、4Gでも使用されている6 GHz以下の周波数帯に加え、広帯域幅を確保できる28GHz帯などの高周波帯が利用される。28GHz帯の利用では、同周波数帯で大きくなる伝搬損失を補償しながら、同一周波数、同一時間に複数信号を空間多重伝送するMassive MIMOが有効である。しかし、それを全てデジタル信号処理で実現する場合、回路規模や消費電力が膨大になる。その解決策として、アナログビームフォーミングとデジタルプリコーディングを組み合わせたハイブリッドビームフォーミングが有効となる。

当社は、256素子の多素子アンテナRF(Radio Frequency)モジュール(サブアレー)を16台用いて16ビームを形成し、ビーム単位でデジタルプリコーディングを行うことによって、ビーム間干渉を低減するハイブリッドビームフォーミング(図1)の開発を進めてきた⁽⁴⁾。これによって、4096素子アンテナ(256素子アンテナ/サブアレー×16台

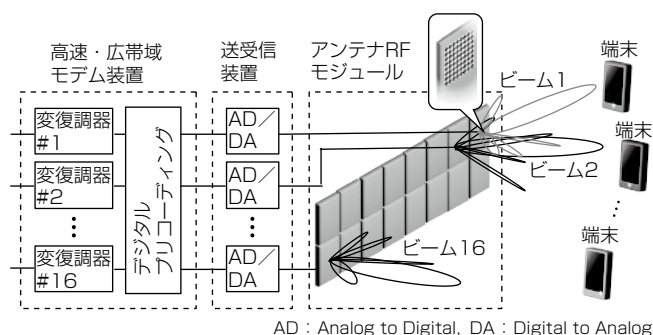


図1. ハイブリッドビームフォーミング

分)による16ビーム形成を16素子アンテナ分のデジタルプリコーディングと同等の低演算量の信号処理を実現した。さらに、演算アルゴリズム最適化、搭載デバイス間的高速データ伝送や高密度基板実装などの高速演算回路技術によって、無線区間全体で1 ms以下の遅延を可能にする無線フレーム長0.25msの低遅延信号処理を実現した。

次に、ハイブリッドビームフォーミング実現に当たって、当社が適用した技術である“パネル型APAA(Active Phased Array Antenna)技術”“可逆性プリコーディング技術”“ビーム制御技術”に関して述べる。

2.1 パネル型APAA技術

サブアレーとして利用するアンテナRFモジュールは多素子アンテナとRFモジュールを持ち、RFモジュールに搭載した移相器、可変利得増幅器で各素子の振幅、位相を調整することによって、所望のアナログビームを形成する。当社は、多素子アンテナと受動回路をプリント基板上で構成するとともに、移相器、可変利得増幅器等の能動回路を同一基板上に高密度に表面実装することで、従来のブリック型から容積と質量を減らすことが可能なパネル型APAAの技術を確立した。

図2に開発したパネル型APAAの構成を示す。表面に256素子の多素子アンテナを形成している。また、裏面に能動回路として、四つの移相器(6 bit)、可変利得増幅器、合成分配回路を集積したRFコアICを16個配置し、RFコアIC一つに対して、四つの増幅器(HPA(High Power Amplifier)/LNA(Low Noise Amplifier)) IC(送受信切替スイッチ含む)を周囲に配置。また、各増幅器ICには4合成/分配回路によって四つのアンテナ素子を接続して、高密度実装を実現している。なお、4合成/分配回路や給電回路などの受動回路は基板内蔵にしている。これによって、薄型化(モジュールの厚さ28mm(放熱フィン除く))を実現した⁽⁵⁾。

2.2 可逆性プリコーディング技術

5Gで採用されている時分割複信(Time Division Duplex: TDD)システムでは、同一周波数をダウンリンクと

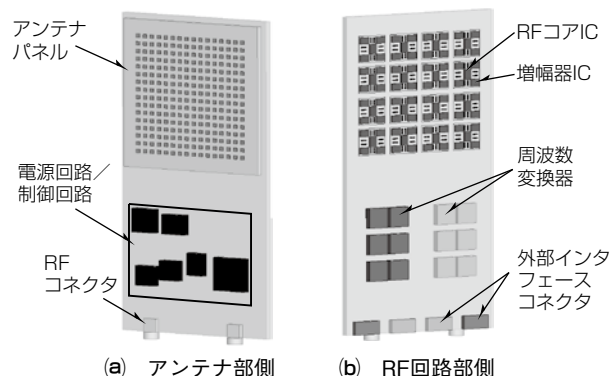


図2. パネル型APAAの構成

アップリンクの時分割で利用している。そのため、送受可逆性によってダウンリンクの伝送路とアップリンクの伝送路が同一となる。この送受可逆性を利用すればアップリンクで端末からフィードバックする伝送路情報が全く必要なく、リアルタイムにダウンリンクの伝送路を推定できる。しかし、上記送受の伝送路可逆性を実現するには、伝送路だけではなく基地局のアナログ回路とデジタル回路を含むシステム全体で、送信と受信で特性を合わせる必要がある。当社は、独自の送受信回路校正技術によって送受の可逆性を確保することで、刻々と変化する伝搬環境を基地局側で測定することを可能にした。

これによって、基地局側で測定した伝送路情報を基に、端末が受信する他端末向けのビームによる干渉をあらかじめキャンセルするように基地局送信信号に重み付けを加えるデジタルプリコーディング⁶⁾を行うことで、ビーム間の干渉除去を可能にした。図3にビーム間干渉除去の効果を示す。

2.3 ビーム制御技術

多素子アンテナを用いた場合、形成される指向性ビームのビーム幅は狭くなるため、信号が届くエリアが狭くなり、基地局が端末を初期捕捉・追従することが難しくなる。そのため、ビームステアリングが重要な技術課題となる。当社は、開発した256素子アンテナのビーム幅(半値角)約6°

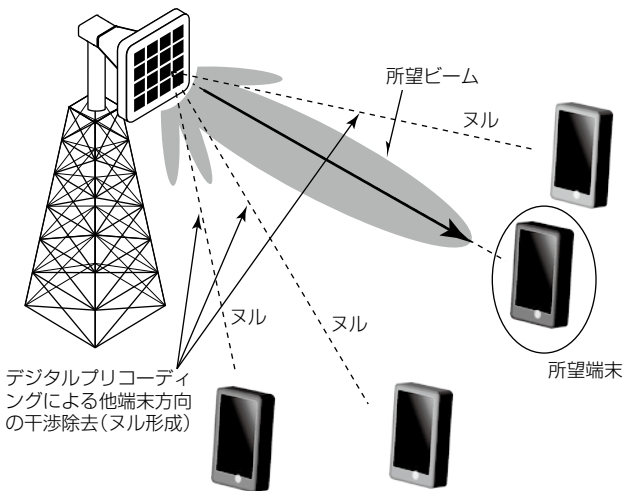


図3. ビーム間干渉除去の効果

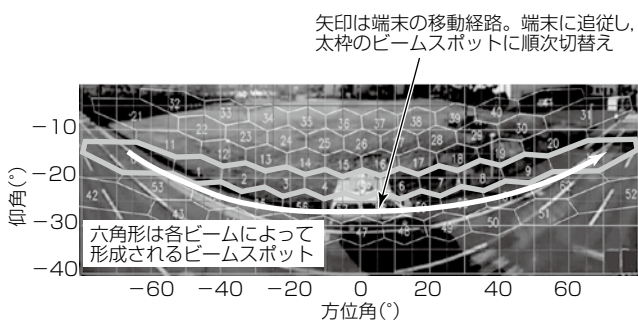


図4. ビーム制御による移動端末への追従(基地局視点)

に合わせて、通信エリアを63個のビームスポットに分割してビーム制御を行う方式を開発した。各ビームスポットに対して基地局からビーム選択用参照信号を周期的に送信し、端末がビームスポットごとに測定した受信電力レベルを基地局に通知。基地局がその受信電力レベル情報を基に端末へのビーム制御を行うことによって、高速かつ安定的な初期捕捉・追従を可能にした(図4)。

3. システム構成

2章の高速・低遅延通信技術を実装したMIMO伝送実験のシステムを構築した。MIMO伝送実験システムの主要諸元を表1に示す。送受信周波数は28GHz帯、システム帯域幅は500MHzであり、五つの100MHzコンポーネントキャリアで構成される。伝送方式は、サブキャリア間隔75kHzの直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM)を利用した下りリンク／上りリンク比率が4:1のTDDシステムである。

MCS(Modulation and Coding Scheme)は、符号化率 $R=3/4$ のQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)から $R=11/12$ の256QAM(Quadrature Amplitude Modulation)まで対応している。最大16ストリームの空間多重伝送が可能であり、最大伝送速度は33.6Gbpsである。

実験は、基地局と端末を1台ずつ設置して端末に全16ビームを向けて16ビーム空間多重通信を行うSU-MIMO伝送実験、及び基地局1台に対して8台の端末を設置し、各端末に向けて2ビームずつを向けて合計16ビーム空間多重通信を行うMU-MIMO(Multi User-MIMO)伝送実験を行った。

SU-MIMO伝送実験システム構成を図5に示す。基地局、端末共にアンテナRFユニット、送受信装置、モデム装置、データ生成／受信装置から構成されている。基地局のアンテナRFユニットは、偏波の異なる二つのパネル

表1. MIMO伝送実験システムの主要諸元

項目	諸元
送受信周波数	28GHz帯
システム帯域幅	500MHz
多重方式	TDD, 下りリンク時間占有率0.8
伝送方式	OFDM
サブキャリア間隔	75kHz
無線フレーム長	0.25ms
空間多重ストリーム数	16ストリーム
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
誤り訂正方式	LDPC符号
符号化率	3/4, 5/6, 11/12
基地局アンテナ	256素子×16サブアレー
端末数	SU-MIMO 1台 MU-MIMO 8台
端末アンテナ	SU-MIMO 16アンテナ/台 MU-MIMO 4アンテナ/台

LDPC: Low Density Parity Check

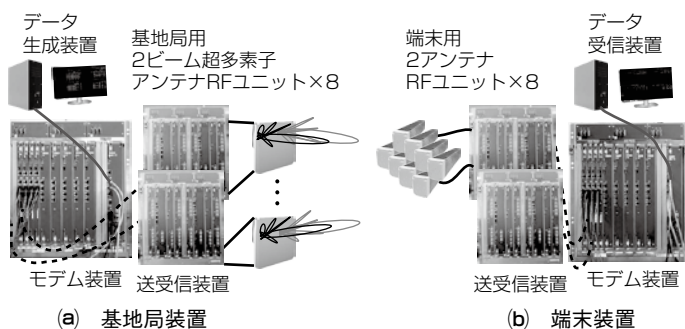


図5. SU-MIMO伝送実験のシステム構成

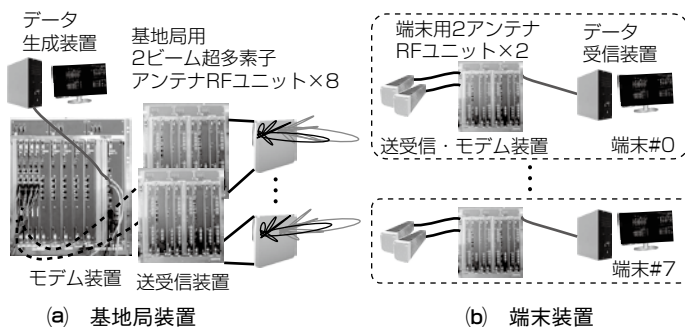


図6. MU-MIMO伝送実験のシステム構成

型APAAを搭載した2ビーム超多素子アンテナRFユニットを8台用いている。端末のアンテナRFユニットは、偏波の異なる二つの平面パッチアンテナを搭載した2アンテナRFユニットを8台用いて、合計16アンテナを構成している。送受信装置は、TRX(Transmitter and Receiver)機能が搭載されており、デジタル信号を中間周波数6GHz帯のアナログ信号に変換する機能を持っている。また、モデム装置は、OFDM変復調処理、256QAM等の変復調処理、誤り訂正符号化・復号化処理、デジタルプリコーディングの機能を持っている。

MU-MIMO伝送実験システム構成を図6に示す。基地局の装置はSU-MIMO伝送実験システムと同一である。一方、端末は1台当たり、2ストリーム空間多重伝送に対応した装置を8台使用した。各端末のアンテナRFユニットは、送受信性能を向上させるための冗長度を持たせ、偏波の異なる二つの平面パッチアンテナを搭載した2アンテナRFユニットを2台用いて、合計4アンテナを構成している。また、送受信装置とモデム装置を一体化し、1端末当たり最大伝送速度4.2Gbpsに対応した装置になっている。

4. 実験結果

3章で述べたシステムによるSU-MIMO伝送実験、及びMU-MIMO伝送実験の実験結果を示す。どちらのMIMO伝送実験も屋外で、基地局・端末間を遮蔽するような障害物が存在しない見通し環境で実施した。

4.1 SU-MIMO伝送実験結果

SU-MIMO伝送実験は、基地局から約10mと100m離れ

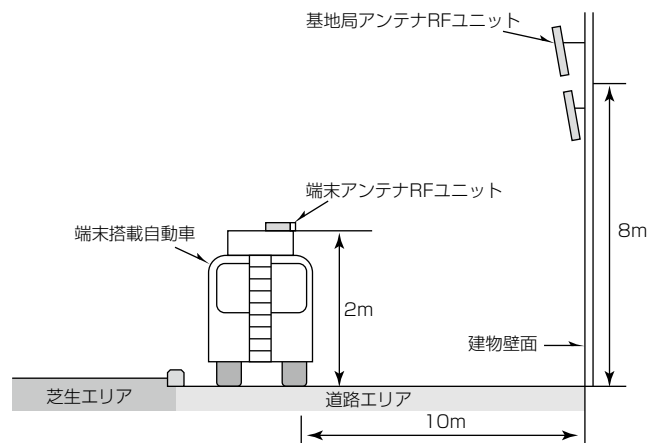


図7. SU-MIMO基地局・端末の配置(10m地点走行時)

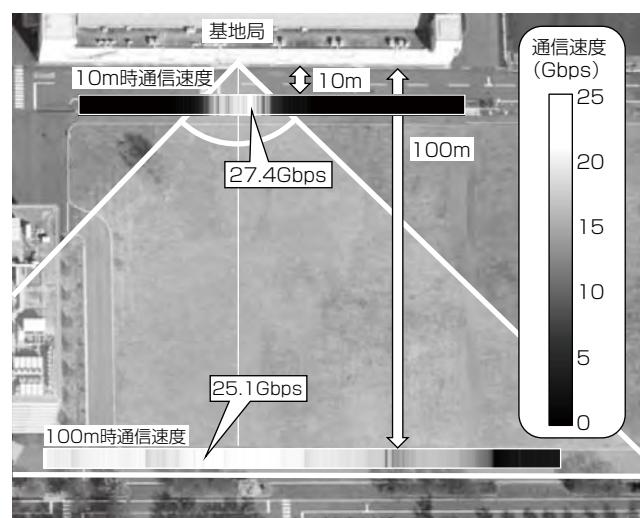


図8. SU-MIMO伝送実験環境と各端末位置での通信速度

た道路上で、端末を搭載した自動車を走行させることで実施した。基地局アンテナRFユニットは、道路に面する建物の壁面に地上から約8mの高さに設置した。また、端末のアンテナRFユニットは自動車のルーフ上の約2mの高さに設置した(図7)。

図8に各端末位置での通信速度の結果を示す。基地局正面位置で、基地局・端末間距離10mで通信速度27Gbps、100mで25GbpsのMIMO伝送実験に世界で初めて成功した⁽⁷⁾。これは28GHz帯での移動通信方式で世界最高の周波数利用効率となる1Hz当たり67bpsに相当する。

この実験結果によって、例えばバスなどの大勢の人が乗車して移動する乗り物で、20Gbpsを超える高速・低遅延通信の実現が期待できる。

4.2 MU-MIMO伝送実験結果

MU-MIMO伝送実験は、基地局・端末間距離が50m以内となるエリアに8台の端末を配置して実施した。基地局はSU-MIMO伝送実験と同じ配置である。端末は台車に搭載し、アンテナRFユニットは台車上の約1.3mの高さに

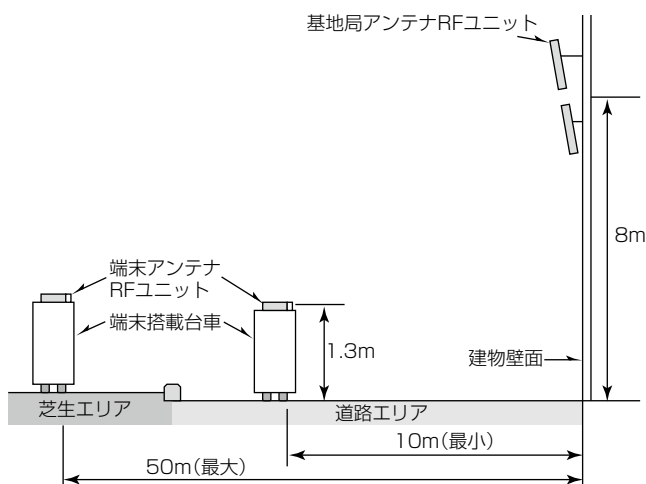


図9. MU-MIMO基地局・端末の配置

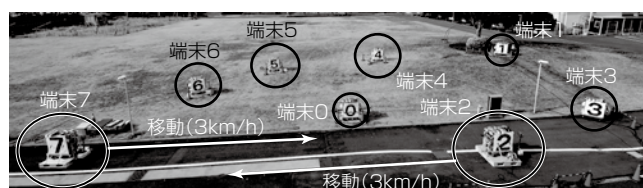


図10. 基地局から見たMU-MIMO端末

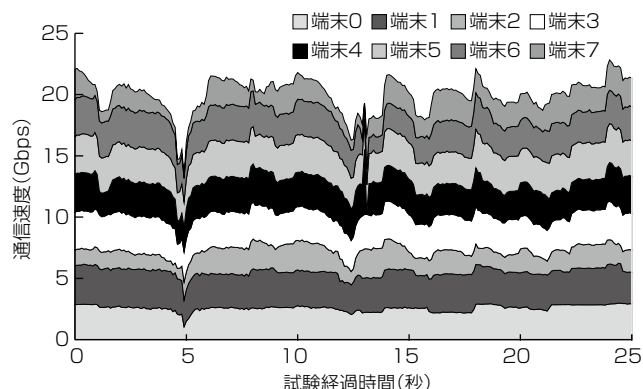


図11. MU-MIMO 8端末合計通信速度の変化

設置した(図9)。8端末のうち、2端末は基地局から約10m離れた道路上を移動させ、6端末はエリア内に静止端末として配置した(図10)。

図11に端末2、及び7が移動した際の8端末合計通信速度の変化の結果を示す。端末の移動に伴い、デジタルブリコーディングによって形成されるビーム形状や端末間干渉状態も変動するため、通信速度が時間変動するものの、8端末合計の通信速度は平均20Gbps超を満足し、ピーク

では24Gbpsを達成することが確認できた⁽⁸⁾。

この実験結果によって、例えば街中などのユーザーが密集するような環境で、ビーム間干渉除去によって、20Gbpsを超える高速・低遅延通信の実現が期待できる。

5. む す び

5Gに向けた高速・低遅延通信技術とその技術を用いた28GHzでの16ビーム空間多重伝送の実験結果を述べた。実験では、SU-MIMO伝送実験で27Gbps、MU-MIMO伝送実験で24Gbpsを達成した。今後は、この開発で培った技術を様々な産業に活用し、社会の発展に貢献していく。

なお本稿には、総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移动通信システム実現に向けた研究開発”の成果の一部が含まれており、関係各位に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) Recommendation ITU-R M.2083 : IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (2015)
- (2) 奥村幸彦, ほか: 第5世代移动通信システム実現に向けた研究開発,「電波資源拡大のための研究開発」第12回成果発表会 (2019)
- (3) 岡崎彰浩, ほか: 次世代無線アクセスに向けた高周波数帯活用の一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, **114**, No.86, RCS2014-81 (2014)
- (4) 鈴木邦之, ほか: 5G無線基地局向け28GHz帯超多素子アンテナシステム, 三菱電機技報, **92**, No.6, 346~350 (2018)
- (5) 渡辺 光, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向けアンテナRFフロントエンドモジュールの開発, 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会, AP2018-180 (2019)
- (6) 西本 浩, ほか: 超多素子アンテナシステムでのマルチビーム空間多重・制御技術, 三菱電機技報, **92**, No.5, 296~299 (2018)
- (7) 酒井 学, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMOシステムを用いたフィールド環境SU-MIMO伝送実験, 電子情報通信学会技術研究報告, **118**, No.435, RCS2018-277 (2019)
- (8) 井浦裕貴, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMOシステムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, **118**, No.474, RCS2018-332 (2019)