

三菱電機技報

6

2017

Vol.91 No.6

快適・安心な社会を実現する通信技術



目次

特集「快適・安心な社会を実現する通信技術」

IoTプラットフォームのビジネスチャンス…… **巻頭言** 1
北山研一

快適・安心な社会を実現する通信技術の展望…… **巻頭論文** 2
下笠 清・清水克宏

第5世代移動通信システムの標準化…………… 7
岩根 靖・長谷川史樹・福井範行・長谷川文大・小崎成治

5G無線基地局向け28GHz帯アンテナ・RFモジュール ……11
友江直仁・中澤正幸・山口 聡・中溝英之・堤 恒次

IoTシステム対応三菱通信ゲートウェイ……………15
大野聖信・横里純一・富澤俊明・山口晃由

MELOOK3同軸タイプレコーダ“NR-8200”……………19
笠原裕志・豊田晋二郎・国分陽一・岸下整明

画像処理を活用した水位観測システムの実現……………23
服部亮史・新房健一・池上俊之・上田英滋・平 謙二

北海道新幹線デジタル列車無線システム……………27
平松昭彦・深野歳司

XG-PON光トランシーバ……………31
石飛聡志・三田大介

CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ…35
斧原聖史・飯島 理・大浦崇靖・石井健二・備海正嗣

一般論文

液晶ディスプレイの各種材料の散乱が
コントラスト視野角に与える影響……………39
結城昭正・奥本和範

アモルファスシリコンTFT-LCDの高解像度化……………43
野尻 勲・安田尚平

産業用タッチパネルの高性能化……………47
森 成一郎・島崎祐輔・中村達也・上里将史

深層学習での演算量削減技術……………51
松本 渉

Advanced Communication Technologies for Comfortable and Reassuring Society

Business Opportunities for IoT Platformers
Ken-ichi Kitayama

Perspective of Advanced Communication Technologies for Comfortable and Reassuring Society
Kiyoshi Shimokasa, Katsuhiro Shimizu

Standardization Trends and Activities on 5th Generation Mobile Communication System
Yasushi Iwane, Fumiki Hasegawa, Noriyuki Fukui, Fumihiro Hasegawa, Seiji Kozaki

28GHz band Antenna and RF Module for 5th Generation Radio Base Stations
Naohito Tomoe, Masayuki Nakazawa, Satoshi Yamaguchi, Hideyuki Nakamizo, Koji Tsutsumi

Mitsubishi Communication Gateway for IoT System
Toshinobu Ono, Junichi Yokosato, Toshiaki Tomisawa, Teruyoshi Yamaguchi

Network Video Recorder MELOOK3 Coaxial Type “NR-8200”
Hiroshi Kasahara, Shinjiro Toyota, Yoichi Kokubun, Nariaki Kishishita

Water Level Observation System Based on Image Processing Technique
Ryoji Hattori, Kenichi Shinbo, Toshiyuki Ikeue, Eiji Ueda, Kenji Taira

Digital Train Radio System for Hokkaido Shinkansen
Akihiko Hiramatsu, Toshiji Fukano

Optical Transceiver for XG-PON System
Satoshi Ishitobi, Daisuke Mita

100Gbps Digital Coherent Transceiver Compliant with CFP Multi-Source Agreement
Kiyoshi Onohara, Osamu Iijima, Takayasu Oura, Kenji Ishii, Masashi Binkai

Influences of Scattering on Contrast Viewing Angle of Liquid Crystal Displays
Akimasa Yuuki, Kazunori Okumoto

High Resolution Amorphous Silicon TFT-LCD
Isao Nojiri, Shohei Yasuda

High-performance Touch Screen for Industrial Use
Seiichi Mori, Yusuke Shimasaki, Tatsuya Nakamura, Masafumi Agari

Computational Complexity Reduction Technology for Deep Learning
Wataru Matsumoto

特許と新案

「無線通信システム」……………55

「撮像装置」……………56



①



②



③

表紙：快適・安心な社会を実現する通信技術

三菱電機では、古くからブロードバンドを支える光通信システム、移动通信システム、列車無線システム、映像監視システムに取り組んでおり、各分野の技術トレンドをリードする製品開発を進めている。IoT(Internet of Things)は、いつでも、どこでも安価に多数の端末、高速移動する端末、高速通信を要求するユーザーをサポートする強力な通信インフラを前提としている。これらの各分野の技術・知識・経験を掛け合わせることで、快適・安心な社会の実現に貢献していく。

製品紹介

- ① 5G無線基地局向け28GHz帯アンテナ・RFモジュール 試作機
- ② IoTGWエッジデバイス
- ③ 同軸レコーダ・同軸アダプタ

巻/頭/言

IoTプラットフォームのビジネスチャンス

Business Opportunities for IoT Platformers



北山研一

Ken-ichi Kitayama

ある総合コンサルティング企業の白書によれば、産業用IoT(Internet of Things)がもたらすGDPの増分は2030年までに主要20か国G20だけで累積10.6兆ドルと見積もられている。ちなみに米国のGDP約18.6兆ドルと比較して、そのインパクトの大きさが推し量れる。では、IoTによって産み出された富を手にするセクタはどこだろう。インターネットでは、通信事業者ではなくいわゆるOver-The-Topと呼ばれるメッセージや音声、動画コンテンツのプロバイダーがあり余るほどの利益を享受している。これをそのままIoTに置き換えてみれば、サービスプラットフォームが利益を享受し、通信やセンサのプラットフォームは相変わらず潤わないというシナリオになってしまう。

この特集では、100Gシステム、光アクセスや5Gモバイルの新技术に加えて国土インフラやビルの監視システム、センサデバイスのゲートウェイなどが取り上げられている。IoTはレガシーなインフラなくしては実現し得ないが、更にその上に近い将来1兆個に迫るセンサ群のIoTトラフィックを低コストで収容するための技術革新が求められている。このようなIoTインフラを提供するセクタが技術革新を進めつつ利益を享受する仕組みを一考してみたい。

本題に入る前に、10数年前に一世を風靡(ふうび)したユビキタスコンピューティングやユビキタスネットワークとIoTとの根本的な違いは何であろう。あらゆる場所であらゆるモノがネットワークにつながるという点では似ているが、ユビキタスコンピューティングでは、integralでinvisibleなセンシング・コンピューティングパワーが身近に偏在することを前提としていた。一方、IoTではインターネットを介したクラウドがコンピューティングを実行する点と、クラウドに集約された膨大なデータから新たな価値を創造するということに明確な違いがあると思う。

さて、本題の通信・センサプラットフォームのIoTビジネスの話に戻りたい。ビッグデータから価値のある情報を創り出し、それを共有することで価値を高めるというサービスプラットフォームのビジネスについては多くが語られているのでここでは触れない。結論を急ぐと、通信・

センサプラットフォームと次に述べる“データプロバイダー”との協業に勝機があるのではないか。ここでデータプロバイダーとは、顧客が欲するデータを収集し、提供するものと定義する。顧客は所望の実データを手に入れさえすれば、独自のビッグデータアナリティクスによって好きなようにデータを加工できる。むしろ膨大なデータを収集することに多大なコストとエフォートが必要になるので、実データそのものに価値があるといえる。身近なところでは、街角ごとに設置した花粉センサで収集した空間的に精度の高いリアルタイムの情報(スギかヒノキかPM2.5か、花粉量等)は、ローカルな気象データとセットにするヘルスケアにとって貴重な情報になるであろう。仮に都内23区に100mごとにセンサを設置し、毎分1kバイトのデータを収集すると約100Gビット/日になる。よりローカルで即時性のあるデータを、顧客のニーズに合わせてパッケージ化することが1つの肝である。データを買う顧客はデータをAI(Artificial Intelligence)的な分析によって警戒レベルが設定でき、これを武器にバリューチェーンが築ける。“風が吹けば桶(おけ)屋が儲(もう)かる”ではないが、薬局はマスクの品ぞろえを変え、医者はクスリの処方箋を見直すことができるので、データを持つ薬局や医院は持たざる競合相手に対して差別化できる。このようにしてデータ分析、予測、判断、制御(処方)というアクションが回るのである。AIのような帰納的な推論では間違えた分だけ賢くなるので、データ量は“多々益々(ますます)弁ず”である。

最後になるが、リアルタイムのデータ配信の肝は、エッジコンピューティングである。実データよりもむしろ有意な統計データを希望する顧客には、センサ近傍のネットワークのエッジに分散的に配備されたサーバで経験的な価値密度に従って簡単な一次処理、例えば集計とフィルタリングを実行し、平均や偏差などの統計量、注目すべき外れ値だけを配信する。これによって往復遅延時間を削減しつつリアルタイム性を保証し、トラフィック量も抑制できるのである。

巻頭論文

快適・安心な社会を実現する 通信技術の展望



下笠 清*



清水克宏**

Perspective of Advanced Communication Technologies for Comfortable and Reassuring Society

Kiyoshi Shimokasa, Katsuhiro Shimizu

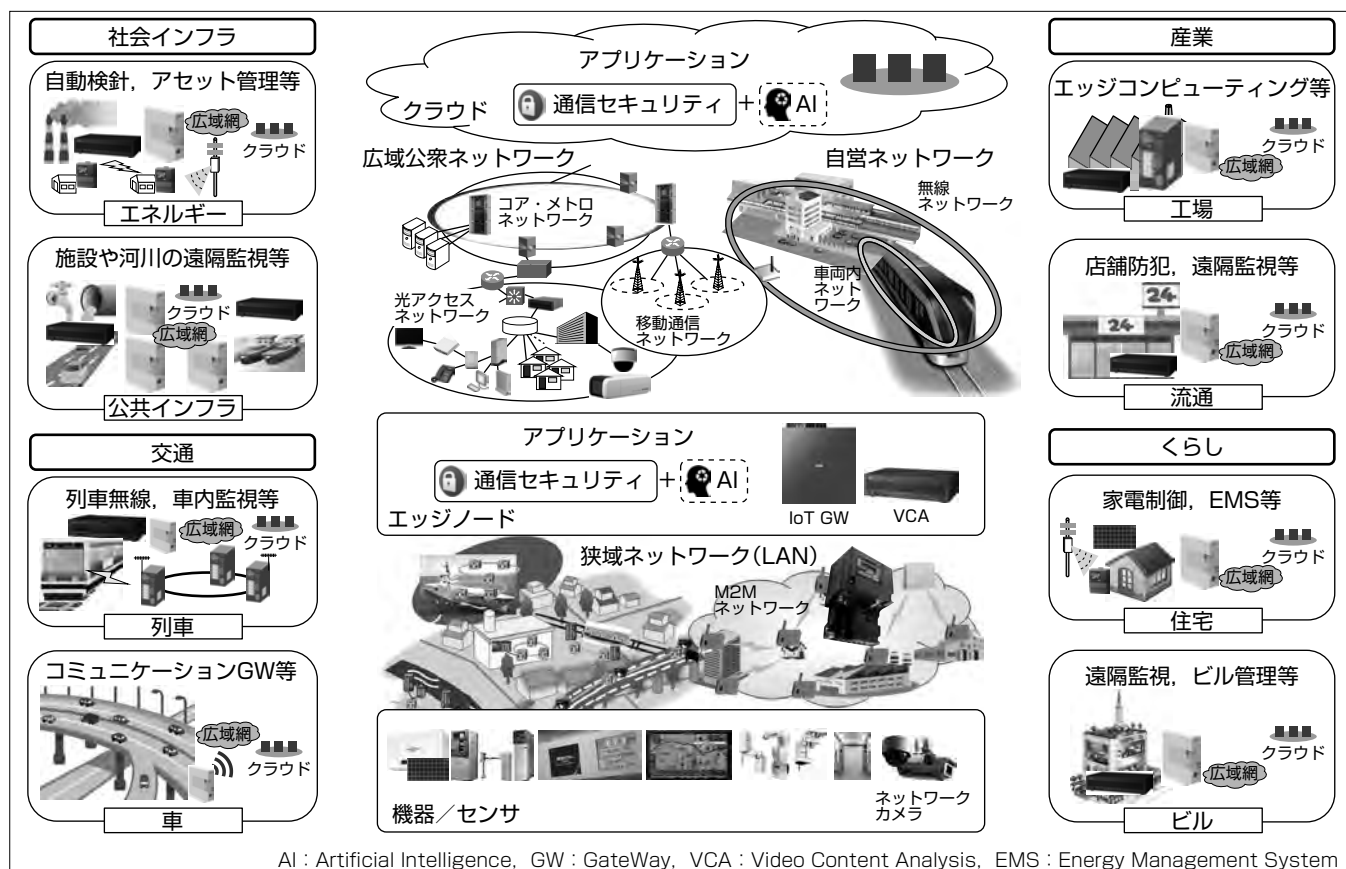
要 旨

情報通信技術の進展によって、通信ネットワーク環境は重要なライフラインとなった。さらに、IoT(Internet of Things)の概念の基、多くの機器、センサをネットワークに接続し、その情報をビッグデータとして人工知能で処理・判断することで、社会システムを効率化する試みが始まっている。IoTは、人口減少、社会保障費増、自然災害の増加などの課題に対しても有効であり、快適・安心な社会を実現する切り札として期待されている。

一方で、IoTは高速、広域、低遅延、高セキュリティなネットワークやセンサが安価に提供されることを前提にしており、多くの分野の技術革新を要求している。三菱電機では、古くからブロードバンドを支える光通信システム、移动通信システム、M2M(Machine to Machine)システ

ム、列車無線システム、映像監視システムに取り組んでおり、各分野の技術トレンドをリードする研究開発を進めてきた。光通信技術では数年で倍になる通信トラフィックを支えるためのデバイス開発、方式開発が進行しており、今後の大容量化を実現する技術も生まれている。無線通信技術でも、第5世代移动通信システム(5G)に代表される大きな革新を迎えようとしている。映像技術では、深層学習(ディープラーニング)等を活用した画像解析による高度な判断を実現しつつある。

当社は、IoT技術と、社会インフラ、交通、産業、くらし(住宅、ビル)の各分野の技術・知識・経験を掛け合わせることで、快適・安心な社会の実現に貢献していく。



快適・安心な社会を実現するIoTとそれを支える通信・映像技術

IoTシステムでは、機器・センサ群を狭域ネットワークによって接続し、エッジノードに情報を集約する。エッジノードではデータを一次処理・判断し、広域公衆ネットワークや自営ネットワークを介してクラウドに必要なデータを送信する。クラウド上のサーバで、それぞれのシステムに応じたアプリケーションがデータの集約・処理・判断を行う。ここで、広域・狭域ネットワークは光通信・無線通信技術による高速・低遅延・多接続性・高セキュリティが不可欠であり、また狭域・自営ネットワークでは列車無線やM2Mネットワークなどの独自のプロトコルが求められている。多くの技術とノウハウによって、IoTが実現され、快適・安心な社会の実現に貢献できる。

1. ま え が き

500億個を超える機器・センサがネットワークに接続されるIoTは、快適・安心な社会を実現するとともに、第四次産業革命とも呼ぶべき大きな変革を引き起こす可能性を秘めている。一方、IoTは、いつでも、どこでも安価に多数の端末、高速移動する端末、高速通信を要求するユーザーをサポートする強力な通信インフラを前提としている。

本稿では、光通信技術、無線通信技術、映像技術などを俯瞰(ふかん)し、IoT時代の伝送技術を中心として、快適・安心な社会に向けた当社の取組みについて述べる。

2. 快適な社会を実現する通信技術

2.1 IoTと通信技術

当社は「IoT技術」と多様な分野で培った「技術・知識・経験」を掛け合わせることで、社会に貢献することを目指し、次のようなIoTの活用を進めている。

社会インフラ分野では、安定稼働は元より、遠隔監視によるコスト抑制に加えて、インフラの効率向上によって信頼・利便性の向上を目指す。交通分野では、列車の正確な位置情報を無線で伝送することで、高密度輸送を実現し、システムの更なる効率化に貢献する。

産業分野では、生産関連データをリアルタイムに現場で分析するエッジコンピューティングを強化し、ものづくり革新を進める。くらしの分野でも、住宅では、省エネルギーを実現するZEH(Net Zero Energy House)の取組みを進めている。ビルでは、エレベーターの長年にわたる遠隔監視・点検を通じて蓄積しているビッグデータを分析し、故障予知、予知保全を目指すことで更なる安全を追求している。

様々な分野でIoT活用を進めるため、当社ではクラウドサービス「DIAPLANET(ダイヤプラネット)」の提供やIoT向けゲートウェイ装置の開発などを行っている。2.2節で大容量な光通信技術、2.3節で多くの端末を収容する無線通信技術などIoTを支える通信技術の進展を述べる。

2.2 光通信技術の進展

2.2.1 光アクセス技術

各家庭と通信キャリアをつなぐ光アクセス網(FTTH: Fiber To The Home)では、図1のとおり着実に高速化が進み、2004年からは1.25GbpsのGE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)システムが本格導入されている。FTTHは日本のブロードバンド化の基盤を支えており、当社は累計1千万台以上の宅内向けFTTH機器を出荷してきた。

現在は10Gbpsによる大容量化が始まっている。10G-EPON(Ethernet PON)システムでは、光トランシーバ技術や冗長化技術によって、高速化だけでなく、局内装置当たりの加入者数の増加、加入者当たりの機器消費電力の低

減、機器故障からの復帰時間の短縮を実現している。当社では、10Gbpsクラスのシステムで適用しているトランシーバを単体としてリリースし、海外市場でも活用されている。当社製の発光素子、受光素子、独自開発のアナログチップセット、新規放熱技術によって、従来比で体積1/2、電力2/3への低減を実現した。

今後、5G用の基地局の収容で、光アクセス技術は重要な役割を果たすと考えられる。これまで以上に、低遅延化、高信頼化、高速化等が求められる。当社でも高速化に向けてWDM(Wavelength Division Multiplexing)-PON方式の研究開発を進めている⁽¹⁾。また、40Gbpsクラスを実現するNG(Next Generation)-PON2(10G×4λ)に加え、100Gbpsクラスを目指すNG-EPON(25G×4λ)も標準化されつつあり、今後10~15年のIoT普及を見据えた技術開発はますます活発となっている。

2.2.2 コア・メトロ伝送技術

1980年代に光伝送技術が本格導入された基幹系のコア・メトロネットワークは、時分割多重技術、波長多重技術、誤り訂正技術、コヒーレント技術等によって大容量化と小型省電力化を同時に遂げてきた。当社も1997年に2.5Gbps DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)伝送システム向け波長多重伝送装置、1999年に10Gbpsの光海底ケーブルシステム向け陸上端局装置、2002年にはリングネットワークに対応した10Gbps×40ch波長多重伝送装置を製品化している(図2)。それ以降、40Gbps光伝送シ

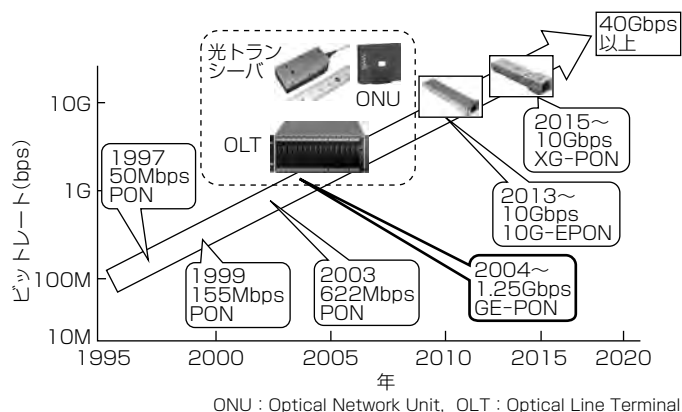


図1. 光アクセス網の進展

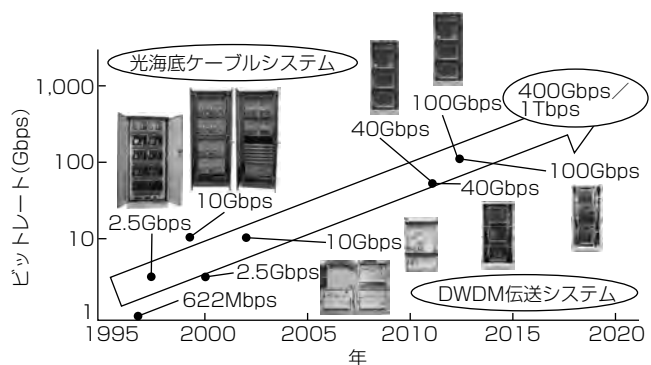


図2. 光コア・メトロネットワーク装置の進展

テム、今日の100Gbps光伝送システム装置群を開発するに至っている⁽²⁾。

近年の研究報告では1本の光ファイバで100Tbps以上の大容量化が実現されており⁽³⁾、国際標準化団体では1つのトランスポンダーで400Gbps、1Tbpsを実現するための規格が議論されている。当社でも高速・長距離化と小型省電力の両立のニーズに応えるために、デジタル信号処理技術を始めとしたトランシーバの開発を進めている。

2.3 無線通信技術の進展

2.3.1 移动通信技術

移动通信システムは、1980年頃にアナログ音声通信サービス(第1世代)が開始され、それ以降、およそ10年ごとに図3に示すとおり高速大容量化が進んでいる。当社は世代ごとに電気通信事業者向けにPDC(Personal Digital Cellular)、W-CDMA(Wideband Code Division Multiple Access)、LTE(Long Term Evolution)の基地局装置を製品化してきた⁽⁴⁾。

スマートフォン、タブレット端末の普及に伴い、国内の移动通信のデータトラフィックは年率約1.4倍で増加しており、従来のモバイルサービス的高速大容量化(ピークデータレート：20Gbps以上)を満足する5Gの検討が、2020年の実現を目指して国内外で進められている。また、5Gの実用化に向け、より広い帯域幅を確保するため、従来の移动通信で使われてきた周波数帯より高い周波数(3.6～86GHz)が候補として検討されている⁽⁵⁾。

当社では、20Gbps以上の大容量化を達成する5G基地局実現に向けて、超多素子APAA(Active Phased Array Antenna)を用いた空間多重技術を提案している。図4に示すように超多素子APAAでは、平面アレーアンテナの背面に増幅器、移相器などのRF(Radio Frequency)チップを実装し、従来のセクタビームと比べ目標端末に向け電力を集中させた高精度ビームを送信することで、高い周波数で問題になる伝搬損を補償できる。このため、より低い送信電力でより遠方の端末との通信が可能となり、基地局の低消費電力化が図れる。また、複数ビームの形成によって、同一の周波数を用いて同時に多数の端末と通信する空間多重技術によって大容量通信が可能となる⁽⁶⁾。

この超多素子APAAの実用化に向けて、これまで44GHz帯の伝搬実験結果を基に伝送シミュレーションを行い、100m以内に配置した16端末と同時に通信し、20Gbps伝送が実現可能であることを確認した⁽⁷⁾。また、3.5GHz帯向けに水平・垂直方向に同時に4つのビームを空間多重可能な超多素子APAAを試作した。

現在、総務省研究開発プロジェクト“第5世代移动通信システム実現に向けた研究開発”に参画し、28GHz帯向けに超多素子APAA基地局及び端末の試作を進めている。また、商用化に向けて、小型・省電力・低コスト化が求められる

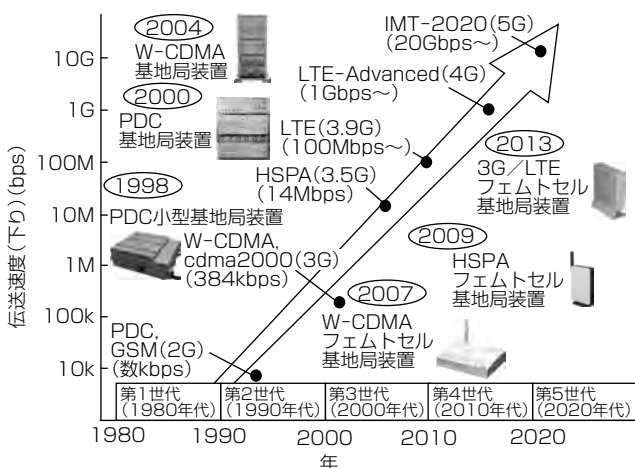


図3. 移动通信システムの進展

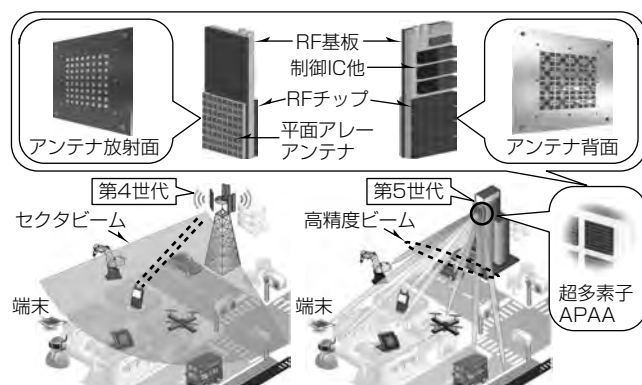


図4. 超多素子APAA

ため、増幅器の効率化、移相器の高精度化、高周波回路の集積化(MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit)などの要素技術を開発してきた。これらの要素技術を基に、超多素子APAA基地局を構成するキーパーツである、高効率増幅器、低雑音増幅器、RFスイッチを集積化したGaAs(ガリウムヒ素)チップ、複数の移相器、可変利得増幅器を集積化したSi(シリコン)チップの自社開発を進めている。今後、本格的なIoTの普及に向けて自動車、産業機器、スマートメータ向けなど、新たなモバイルサービスの利活用に貢献していく。

2.3.2 M2M無線通信技術

IoT社会を支える重要な技術の1つとして、機械同士が通信するM2M通信が挙げられる。M2M通信では、ネットワーク構築の簡易化、周波数利用効率の向上、システム構築コスト抑制などの観点から、端末間通信、低消費電力、長距離通信、狭帯域伝送、多端末接続、簡素なハードウェア構成が求められる。

当社では、M2M無線通信技術を活用したスマートメータ用通信機器を開発した。このシステムによって、電力量の見える化や顧客の電力使用傾向に合わせた料金プランの提供が可能となっている。

スマートメータ通信システムでは、図5のとおり多数の

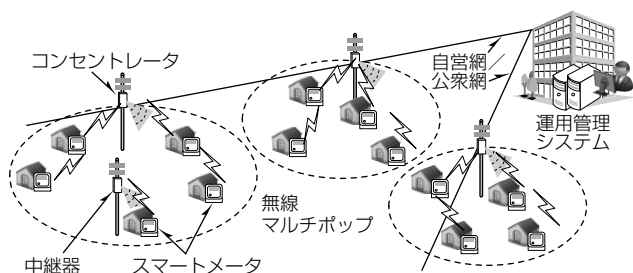


図5. スマートメータ通信システム

装置が互いに無線で通信し、運用管理システムまでデータを伝送する無線マルチホップ方式を採用している。この方式では、直接電波の届かない拠点間での通信が可能となり、広範囲なネットワークを構築できる。通信経路を網目状とし、電波障害時には迂回（うかい）路を自動探索することで、安定した通信が可能となった。また、送信電力の低い特定小電力無線によって低消費電力・低コストを実現している。

スマートメータではマルチパスフェージングによる無線通信品質低下が課題となる。対策としては、複数のアンテナを備えて通信するダイバシティ方式が有効である。当社装置では、スマートメータの限られたスペースで良好な特性を持つダイバシティアンテナを導入し、スマートメータの接続率を向上させている。

今後もスマートメータで培った無線マルチホップ通信技術を多様なシステムに適用し、環境配慮型社会の実現に貢献していく。

2.3.3 列車無線技術

列車無線は、走行する列車と地上設備（指令所、運行管理システム等）を無線通信でつなぐことによって、安全・安心な鉄道運行を支えるシステムである。

当社は1960年に東京～新大阪間でのアナログ空間波方式の実用化を皮切りに、1964年に東海道新幹線、1982年に東北・上越新幹線へアナログLCX（漏洩（ろうえい）同軸ケーブル）方式を導入し、2002年には東北・上越新幹線に当時初の全線デジタルLCX方式の列車無線システムを実現した（図6）。さらに、2007年以降にはJR各社在来線、公営・民営鉄道向けにデジタル空間波方式による列車無線システムを提供しており、列車無線の発展に長く貢献してきている⁽⁴⁾。

新幹線列車無線のデジタル化では、高速走行する列車と地上設備との間で、全線にわたり安定した回線品質を提供することが課題であった。当社は独自の送信ダイバシティ技術の採用によって、アナログLCXの既存設備を活用しつつ、デジタルLCX方式への移行を実現した。JR各社首都圏在来線のデジタル化では、首都圏の過密な周波数利用状況の中、独自の送信時間ダイバシティ技術や適応等化ダイバシティ受信技術を駆使し、“同一ゾーン1無線チャンネル”の周波数有効利用を実現している。

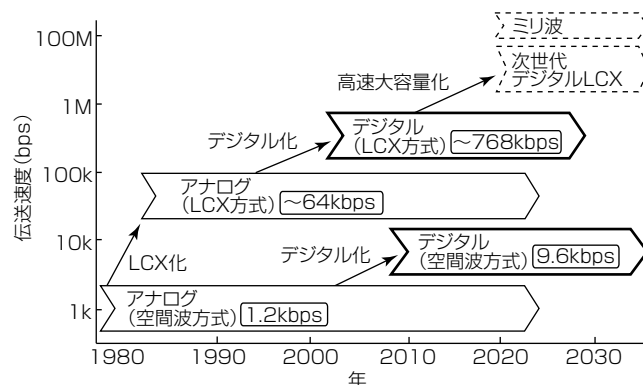


図6. 列車無線の動向

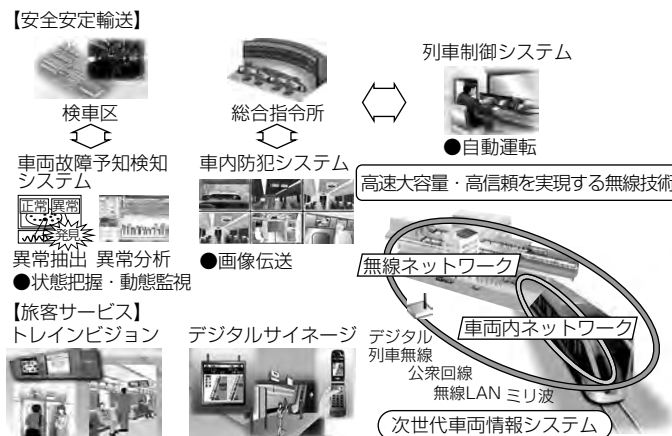


図7. 次世代車両情報システム

ICT（Information and Communication Technology）の進展に伴い、様々なシステムの連携が進み、提供されるサービスの範囲が広がってきている。列車と地上をつなぐ無線通信でも、単純な高速化だけでなく、“無線を使った列車制御システム”の需要が高まり、システムの高信頼化が求められている。当社は、高速大容量と高信頼を両立させるために、ミリ波伝送技術、適応等化技術等を活用し、列車制御システム（自動運転）、車内防犯システム（画像伝送）、車両故障予知検知システム（状態把握によるメンテナンス効率化）等の実現を進めている。これらの鉄道運行にかかわる業務支援や、デジタルサイネージ、トレインビジョン等の乗客に情報を届ける旅客サービス支援を通じて、“快適・安心な社会の実現”に貢献していく（図7）。

3. 安心な社会を実現する映像技術

安全・安心に対する意識の高まりに応じて、行政レベルでの安全で安心な街づくりや、各種施設での防犯・安全対策が進められている。このため、映像監視システムは、コンビニエンスストアを始めとする流通店舗や、オフィスビル、マンションに広く設置されるようになった。監視用途では、暗がりや逆光等の悪条件下でも、映像の尾引き（動く部分のぼけ）や黒つぶれ、白飛びを抑制する映像処理技術が求められる。当社では、このような要求に対して、三菱ネットワーク・カメラシステム“MELOOK3シリーズ”を提供している。

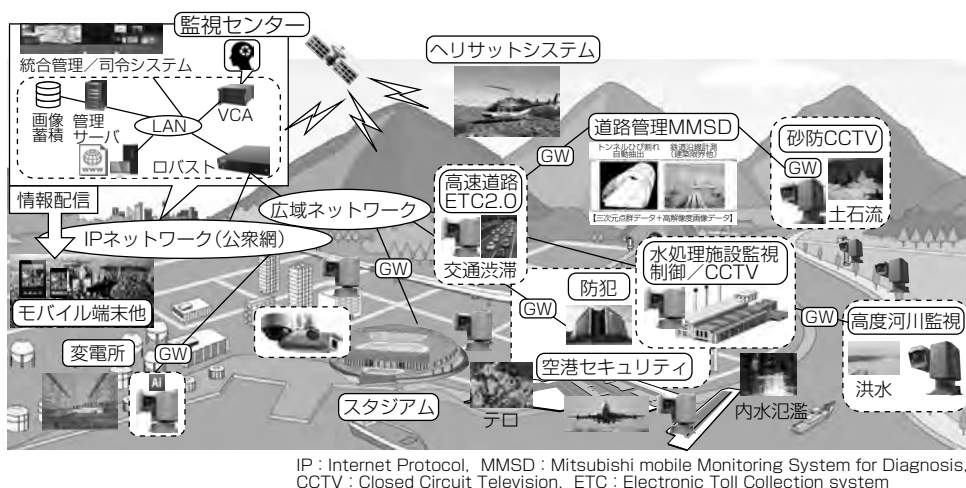


図8. 監視カメラの使用例

また、図8に示すように、多発する自然災害や、事故への防災・減災の観点から、空港や発電所・変電所等の重要施設や、河川・道路の監視が強化されている。河川・道路監視用途に既に2万台を超えるカメラが配備されている。これらのカメラをより有効に活用するために、ローカルな監視場所だけでなく、光伝送をバックボーンとした広域ネットワークを整備し、統合管理している監視センターに映像を集約し、地域住民の安全確保のための情報として配信する取組みが進んでいる⁽⁸⁾。近年では、老朽化対策と地上デジタル普及による高精細デジタル化への対応に合わせて、SD(Standard Definition)(720×480)からHD(High Definition)(1920×1080)への置き換えが進んでおり、当社でも屋外複合一体型カメラ“HM-3000”やネットワークカメラ“デジタルRoboty(ロボティ) HM-7000”(図9)を投入した。より高精細な映像で監視することで、情報収集、判断、迅速な初動対応が可能になっている。

ネットワークを使用した監視システムでは、既に顔認識や侵入検知等の多くの画像解析技術(VCA)が実用化されている。VCAの技術進化によって、監視員の補助から自動監視へと役割が拡大しており、不審者、危険行動(テロ)の早期発見、不審物、放置物の検知が実現されつつある。また、スタジアム等で人の流れを予測し、他のシステムと連携することで混雑を回避する試みも始まっている。

このように今後の映像監視システムでは、適切なハードウェアと画像解析技術を複合的に組み合わせていくことが望まれる。特に、ディープラーニングなどの画像認識技術、通信技術と融合した処理技術の進展は大きな期待を持たせるものである。しかし、その一方で画像解析も人工知能も決して完全ではありえない。エッジとしての映像機器や分析装置、連携する通信ネットワークに分析誤りや改竄(かいざん)が混入すれば、社会に大きな障害をもたらす。分析ミス、情報セキュリティホールに対して十分な耐性を持ったシステム設計は、IoTシステムに共通する課題である。



図9. デジタルRoboty HM-7000

4. む す び

当社では光通信技術、無線通信技術、映像技術を開発しており、これまでも通信インフラ、社会システム等に活用されてきた。IoT時代の到来によって、これらの技術の適用範囲は大きく広がりつつある。個々の技術を磨くとともに、クラウド、AI技術と連携することで機能を高め、更なる快適・安心な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Yoshima, S., et al.: Experimental Investigation of an Optically-superimposed AMCC in 100Gb/s Coherent WDM-PON for 5G Mobile Fronthaul, ECOC 2016, Th.1.D.1 (2016)
- (2) 三菱電機の100Gソリューション
http://www.mitsubishielectric.co.jp/service/carrier_network/index.html
- (3) Sano, A., et al.: 102.3-Tb/s(224×548-Gb/s) C-and extended L-band all-Raman transmission over 240 km using PDM-64QAM single carrier FDM with digital pilot tone, OFC/NFOEC2012, PDP5C.3 (2012)
- (4) 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)
- (5) 総務省: 電波政策2020懇談会報告書 (2016)
- (6) 5G基地局向け超多素子アンテナシステム技術
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/a31/index.html>
- (7) 友江直仁, ほか: 第5世代移動通信システム向け無線アクセス基地局技術, 三菱電機技報, 90, No.6, 342~346 (2016)
- (8) 山中秀昭, ほか: 通信技術を活用した映像監視システム, 三菱電機技報, 89, No.6, 318~322 (2015)

第5世代移動通信システムの標準化

岩根 靖* 長谷川文大***
長谷川史樹* 小崎成治**
福井範行**

Standardization Trends and Activities on 5th Generation Mobile Communication System

Yasushi Iwane, Fumiki Hasegawa, Noriyuki Fukui, Fumihiro Hasegawa, Seiji Kozaki

要 旨

移動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世代移動通信システム(5G)の国際標準化が進められている。

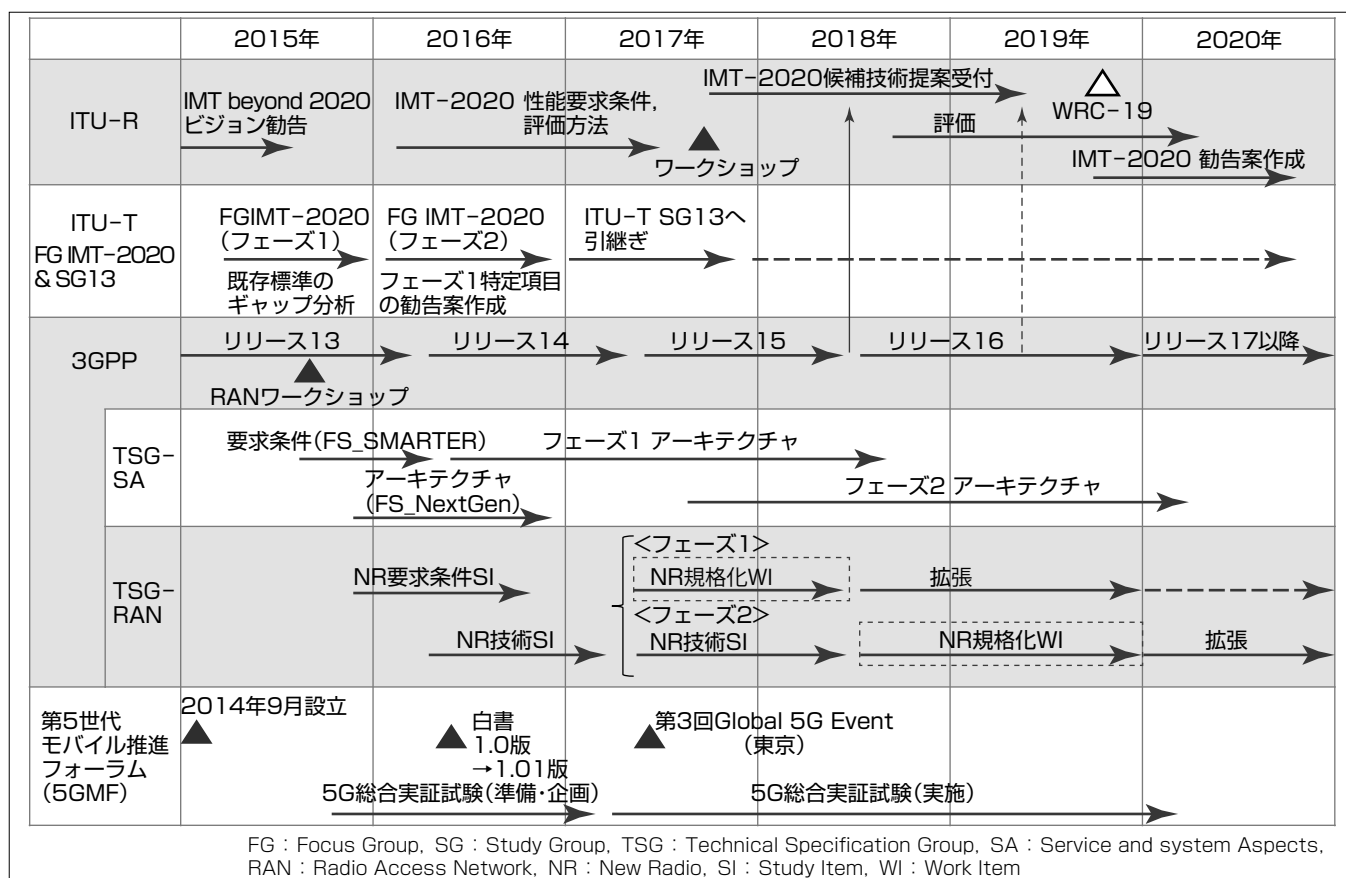
ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication sector: 国際電気通信連合無線通信部門)は、5Gに相当するIMT-2020(International Mobile Telecommunications-2020)の無線インタフェース技術勧告案を2020年秋に完成させる予定である。また、2019年の世界無線通信会議(WRC-19: World Radiocommunication Conference 2019)で24.25~86.00GHzの中の11の周波数帯を候補として携帯電話システムへの周波数追加特定が行われる。

これに合わせて、携帯電話方式標準化の国際プロジェクト

ト3GPP(3rd Generation Partnership Project)は、2020年に実現する5Gの基本仕様規格を2018年6月完成目標に策定しており、三菱電機はアンテナビームフォーミングに関連する技術等の提案を行っている。

ITU-T(ITU Telecommunication standardization sector: 国際電気通信連合電気通信標準化部門)は、5Gネットワーク要件と既存標準の間のギャップ分析を終え、今後順次必要な勧告化を行う。当社はモバイルフロントホール/バックホール分野を中心に貢献している。

これらに並行して、日本の第5世代モバイル推進フォーラム(5GMF)など、各国の5G推進団体が実証試験の計画を進めている。



2020年商用開始に向けた5G標準化のスケジュール

ITU-Rは、IMT-2020無線インタフェースについて、2017年10月~2019年6月に候補技術提案を受け付け、2020年秋に勧告案を完成させる予定である。これに合わせて3GPPは5G無線方式の規格を策定中である。5Gネットワークに必要な技術は、ITU-Tで既存標準のギャップ分析等が終わり、2017年から具体的な標準化作業に移った。標準化と並行して5GMF等の5G推進団体が各国・各地域で実証試験を行う予定である。

1. ま え が き

第5世代移動通信システム(5G)の2020年商用化を目指して、5Gに関する技術の国際標準化が現在進められている。

IoT時代の通信として多種多様な要件を満たすために、5G標準化の範囲は、無線技術の高度化、ミリ波帯に至る周波数利用、柔軟かつ高度なネットワークの実現技術と、多岐にわたる。また、標準化に並行して、各国・各地域で5G推進団体が組織されて活動を行っており、世界各地で5G実証試験が計画されている。

本稿では、ITU及び3GPPでの5G標準化動向と当社の取組み、5G推進団体の動向について述べる。

2. 5G無線標準化

2.1 ITU-R

ITU-Rは、世界共通の携帯電話・移動通信システム無線インタフェースに関して、IMT-2000(第3世代)、IMT-Advanced(第4世代)に続く次世代(第5世代)のシステムをIMT-2020と命名し、そのITU-R勧告化に向けた作業を進めている。

IMT地上系を所掌する作業班WP 5D(Working Party 5D)でのIMT-2020無線インタフェース勧告案開発工程は次のとおりである⁽¹⁾。まず、5Gが目指すべき姿(ビジョン)がまとめられ、2015年に勧告ITU-R M.2083として発行された⁽²⁾。このビジョンの実現に必要な性能要求条件及び評価方法に関する各ITU-R報告案が2017年6月までに完成し、2017年10月～2019年6月に候補技術の提案を受け付け、評価・選定等を経て、2020年秋にIMT-2020無線インタフェース技術のITU-R勧告案が完成する予定である。

ビジョン勧告ITU-R M.2083で、5Gは更なる高速大容量化(eMBB: enhanced Mobile BroadBand)に加え、センサ等の多数同時接続(mMTC: massive Machine Type Communication)、超高信頼・低遅延通信(URLLC: Ultra Reliable and Low Latency Communication)をカバーすることとされた。そして性能要求条件のITU-R報告案では、13の要件を規定している⁽³⁾。表1にその主なものを示す。

5G用周波数に関しては、24.25～86.00GHzの中の11帯域を候補としてIMTへの周波数追加特定がWRC-19の議題1.13として決まっている。日本では、このWRC-19議

表1. IMT-2020の主な技術性能要求条件

項目	要求値
最大伝送速度	下り20Gbit/s, 上り10Gbit/s
最大周波数利用効率	下り30bit/s/Hz, 上り15bit/s/Hz
ユーザー体感伝送速度	下り100Mbit/s, 上り50Mbit/s
単位面積当たりの伝送容量	10Mbit/s/m ²
伝送遅延(ユーザーデータ)	URLLC: 1 ms, eMBB: 4 ms
単位面積当たりの同時接続数	1,000,000デバイス/km ²
伝送の信頼性	パケット到達率1-10 ⁻⁵
想定する端末移動速度	最大500km/h

題1.13の候補帯域、及び3.6～4.2GHz, 4.4～4.9GHz, 27.5～29.5GHzが5G用周波数として想定されており⁽⁴⁾、国際協調を図りつつ、利用に向けた検討が行われている。

2.2 3GPP

携帯電話方式の国際標準規格作成を行っている3GPPでは、2015年12月の技術検討承認を皮切りに5G規格策定への活動を開始した⁽⁵⁾。この3GPPが策定する5Gの規格は、IMT-2020無線インタフェースの候補技術として、各国等を通じてITU-Rへ提案される見込みである。

2.2.1 5G規格の策定方針

3GPPにおける5G規格の主な策定方針は次のとおりである。

①2017年3月まで技術検討を行った後、2020年に実現する5Gの基本仕様規格を2018年6月までに策定し(フェーズ1)、5G要件の全てを網羅した規格を2019年12月までに策定する(フェーズ2)。

②ITU-RのeMBB, mMTC, URLLCに対し、3GPPとして5Gサービスシナリオと要求条件を定義し⁽⁶⁾、それらを満足する。

③NRという、LTE(Long Term Evolution)とは異なる新しい技術の単独システムと、LTEを発展させた技術とNRを組み合わせたシステムの両方をスコープとする。

④周波数として最高100GHzまで適用可能な技術とする。

なお、②のサービスシナリオのうち、当社はRAN 1(Radio Access Network working group 1)での“High speed train”シナリオの評価パラメータ議論で取りまとめを担った⁽⁷⁾。“High speed train”は後に述べる参照信号の特性評価向けシナリオの1つとして用いられている。

2.2.2 NR物理レイヤ技術

NR物理レイヤ技術の検討状況⁽⁸⁾について述べる。

(1) 物理レイヤの主要諸元

表2に、これまでに決定したNR物理レイヤの主要諸元を示す。NRでは、100GHzまでの広い周波数帯をサポートするため、サブキャリア間隔やOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)シンボル長は2ⁿ(nは正及び負の整数)を用いたスケラブルな構成としている。

(2) ウェーブフォーム(変調方式)

表2に示すとおり、下りリンクではOFDMがサポートされ、上りリンクでは複数アンテナ送信に適したOFDM

表2. NR物理レイヤの主要諸元(2017年3月時点)

サブキャリア間隔(SCS)	15kHz×2 ⁿ
RB当たりのサブキャリア数	12
サブフレーム長	1 ms
スロット長	7又は14OFDMシンボル
OFDMシンボル長	SCS15kHz時シンボル長/2 ⁿ
サイクリックプレフィックス	標準と拡張をサポート
アクセス方式	下り: OFDM 上り: OFDM, DFT-s-OFDM
誤り訂正符号	LDPC(eMBBデータチャネル) Polar(eMBB制御チャネル)

RB: Resource Block

及び電力効率が良いDFT-s-OFDM(Discrete Fourier Transform spread OFDM)がサポートされる。なお、表2の諸元は52.6GHzまで適用され、DFT-s-OFDMの使用は1ストリーム限定である。当社は52.6GHz以上向けウェーブフォームとしてUW-DFT-s-OFDM(Unique Word DFT-s-OFDM)を提案している⁽⁹⁾。

(3) マルチアンテナ技術

5Gでは、複数アンテナ素子によるビームフォーミングの適用を想定している。これは、高い周波数利用で生じる大きな伝搬損失をアンテナ利得で補償でき、また、干渉方向を制限できるため複数端末の同時接続に有利である。基地局と端末の双方がビームフォーミングを行うケースも検討範囲とし、お互いが適切なビーム方向を特定・維持するビームマネジメント技術を検討している。

さらに、上り及び下りリンクの伝送路推定に必要な参照信号であるDMRS(DeModulation Reference Signal)等の設計が議論されている。また、MU-MIMO(Multi-User Multiple Input Multiple Output)向けレイヤ多重数もDMRS設計とともに検討している⁽¹⁰⁾。当社が提案した非線形プリコーディング方式(図1)は送信側における干渉除去対策として検討されている⁽¹¹⁾。

(4) ビーム確立技術

信号の送受信方向が絞られるビームフォーミング適用時でも、基地局は位置を特定できていない端末と初期接続やハンドオーバー動作を実施する必要がある。そのため、基地局が異なる時間に異なる方向へ送受信ビームを向けるビームスイーピングを取り入れ、先に述べた動作を保証する技術を検討している(図2)。なお、送信ビームと受信ビームの間に可逆性が成立している場合と成立していない場合の両方を検討範囲としている。また、1つの広いビームでサービスエリアをカバーするシングルビームケースも

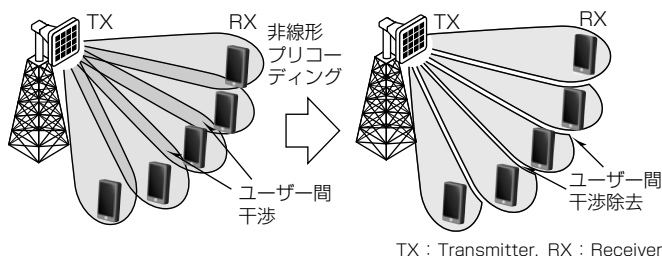


図1. 非線形プリコーディングの効果

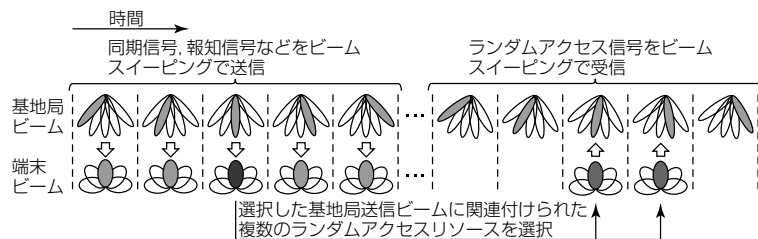


図2. ビームスイーピングを用いたランダムアクセス動作(可逆性が成立していない場合)

検討対象であり、可能な限り動作の共通化を図っている。

当社は、この技術分野に対し、同期信号や報知信号の配置、ランダムアクセス動作等を提案している⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

3. 5Gネットワークの標準化

5G時代のモバイルネットワークを支える技術の標準化について、検討を進めていくべきとの議論が活発化し、2015年4月にITU-T SG13の会合でFG IMT-2020⁽¹⁴⁾の設置が合意された。このFGの当初の目的は、非無線区間のネットワークに関連する既存標準と5G要件の間のギャップ分析実施であり、FGのフェーズ1として2015年に4回の会合が開催され、成果文書が同年12月のSG13の会合で報告された。当社は国内通信事業者等と連携して、日本の強みであるモバイルフロントホール/バックホール(MFH/MBH)に関する要求条件の定義やユースケースの検討を行った⁽¹⁵⁾。この成果文書では、MFH/MBHに関しては日本が主要な貢献をして21件のギャップ項目が抽出された。

ギャップ分析結果を受け、SG13は引き続き標準化に向けた検討が必要と判断し、このFGの設置期限を延長してフェーズ2をスタートした。フェーズ2におけるFGの目的は、フェーズ1で特定された項目の勧告案の作成、具現化(試作、デモ/ショーケースなど)、オープンソースとの連携、3GPPとの連携などである。フェーズ2でのFGの課題は5つの検討グループ(Working Group: WG)に分かれて議論され、MFH/MBHの仮想化・スライス化に関しては、そのうちの1つである“Network Softwarization”のWGで扱われることとなった。

フェーズ1で抽出したギャップの多くはネットワーク仮想化技術によって解決が可能と考えられることから、当社はMFH/MBHの仮想化・スライス化の管理・制御に必要なインタフェースの検討を新たに行った⁽¹⁶⁾。図3は、仮想化・スライス化のためのリソースを抽象化し、その割当て制御を実現するための論理的な参照点を示したものである。その他、機能要件及び参照点で交換されるメッセージについての検討も行った。これらの検討結果は、国内通信事業者等と連携してフェーズ2の成果文書の1つに盛り込んだ⁽¹⁷⁾。

このFGは2016年12月の会合をもって終了し、その成果を基に現在SG13で技術項目ごとに勧告化作業が進められている。なお、フェーズ1で抽出したギャップの一部は、アクセス系の伝送技術課題を扱うSG15でも取り上げられている。

4. 5G推進団体の活動

ここまでに述べた標準化機関の動向と並行して、2020年の5G商用開始に向けて、各国・各地域で5Gの推進団体が組織され、技術検討と対外的なプロモーション活動が行われている。欧

州では、Horizon2020の研究開発プロジェクトの1つとして5G PPP(5G infrastructure Public Private Partnership)が2013年から5G実用化に向けた研究開発・実証実験等を推進しており、中国ではIMT-2020(5G) Promotion Group、韓国では5G Forum、米国では5G Americasといった団体で5G実用化に向けた活動を推進している。日本では、産官学による第5世代モバイル推進フォー

ラム(5GMF)が2014年9月に設立され、5Gの早期実現に向け、精力的に活動を行っている⁽¹⁸⁾。

5GMFは、無線技術、ネットワーク技術といった5G実現に必要な要素技術だけでなく、5Gの利用シナリオやアプリケーションも検討し、その成果をまとめた5GMF白書第1版を2016年5月に公開した。さらに、2017年度から予定されている5G総合実証試験の推進に向けて、5G活用プロジェクト(5G総合実証試験の具体的なアイデア)を検討し、報告書にまとめている。

2017年5月には、これら日欧米中韓の5G推進団体によるGlobal 5G Eventが東京で開催され(これまで中国、イタリアで開催され、東京は第3回)、2020年に向けて各推進団体の活動が活発化している。

5. む す び

5G標準化に関して、ITU-RにおけるIMT-2020無線インタフェース勧告化及び周波数、3GPPにおけるNR物理レイヤの主要技術、ITU-TにおけるMFH/MBHの仮想化・スライス化を中心に、その動向と当社の提案について述べた。また、5GMF等の5G推進団体の動向にも触れた。

当社は、今後もITU、3GPP、5GMFへの継続的な参画と技術提案を行い、2020年の5G実現に向けた国際標準化に積極的に貢献していく予定である。

参 考 文 献

- (1) ITU towards "IMT for 2020 and beyond"
<http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020>
- (2) ITU-R : Recommendation ITU-R M.2083-0, IMT VISION-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (2015)
- (3) WP5D : Draft New Report ITU-R M. [IMT-2020, TECH PERF REQ] (2017)
- (4) 総務省：電波政策2020懇談会報告書 (2016)

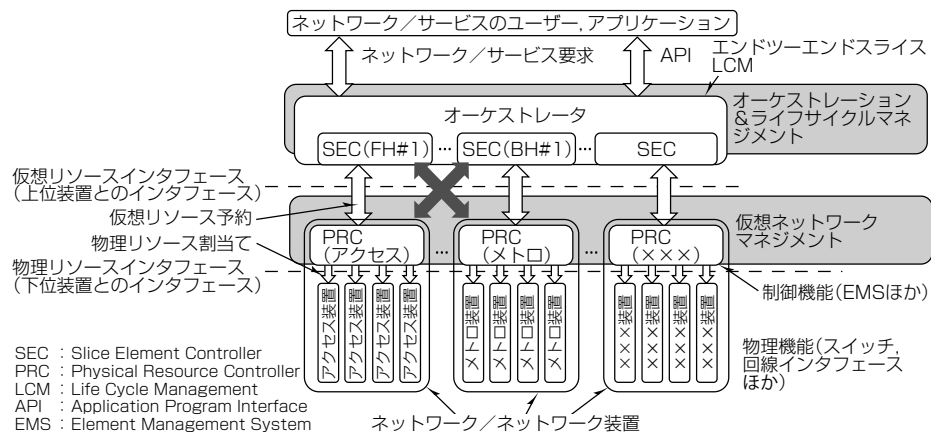


図3. ネットワークソフト化及びスライスネットワークサービスのためのコンセプトモデル図

- (5) 3GPP : New SID Proposal : Study on New Radio Access Technology, RP-161596 (2016)
- (6) 3GPP : Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies, TR38.913 V14.1.0 (2016)
- (7) Mitsubishi Electric : Evaluation assumptions for the high speed train scenario for around 30GHz (RRH + relay) for NR, R1-165979 (2016)
- (8) 3GPP : Study on New Radio(NR) Access Technology Physical Layer Aspects, TR38.802 V1.1.0 (2017)
- (9) Nokia, et al. : Way forward waveform for carrier frequencies beyond 40GHz, R1-1609599 (2016)
- (10) Mitsubishi Electric, et al. : Wayforward on the maximum number of orthogonal DL DMR ports, R1-1704057 (2017)
- (11) Mitsubishi Electric, et al. : WF on analysis of nonlinear precoding, R1-1704009 (2017)
- (12) Mitsubishi Electric : Common signal/information allocation for initial access and mobility, R1-1608711 (2016)
- (13) Mitsubishi Electric : RACH preamble transmission, R1-1608712 (2016)
- (14) Focus Group on IMT-2020
<http://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/imt-2020/Pages/default.aspx>
- (15) Mitsubishi Electric, et al. : Discussion point about MFH/MBH Gap items in FG phase1 results, IMT-I-128 (2016)
- (16) Mitsubishi Electric, et al. : Vertical Extensions for the Network Slicing, IMT-I-186 (2016)
- (17) FG IMT-2020 : Draft Technical Report, Application of network softwarization to IMT-2020, IMT-O-041 (2016)
- (18) 第5世代モバイル推進フォーラム
<http://5gmf.jp/>

5G無線基地局向け28GHz帯 アンテナ・RFモジュール

友江直仁* 中溝英之***
中澤正幸* 堤 恒次***
山口 聡**

28GHz band Antenna and RF Module for 5th Generation Radio Base Stations

Naohito Tomoe, Masayuki Nakazawa, Satoshi Yamaguchi, Hideyuki Nakamizo, Koji Tsutsumi

要 旨

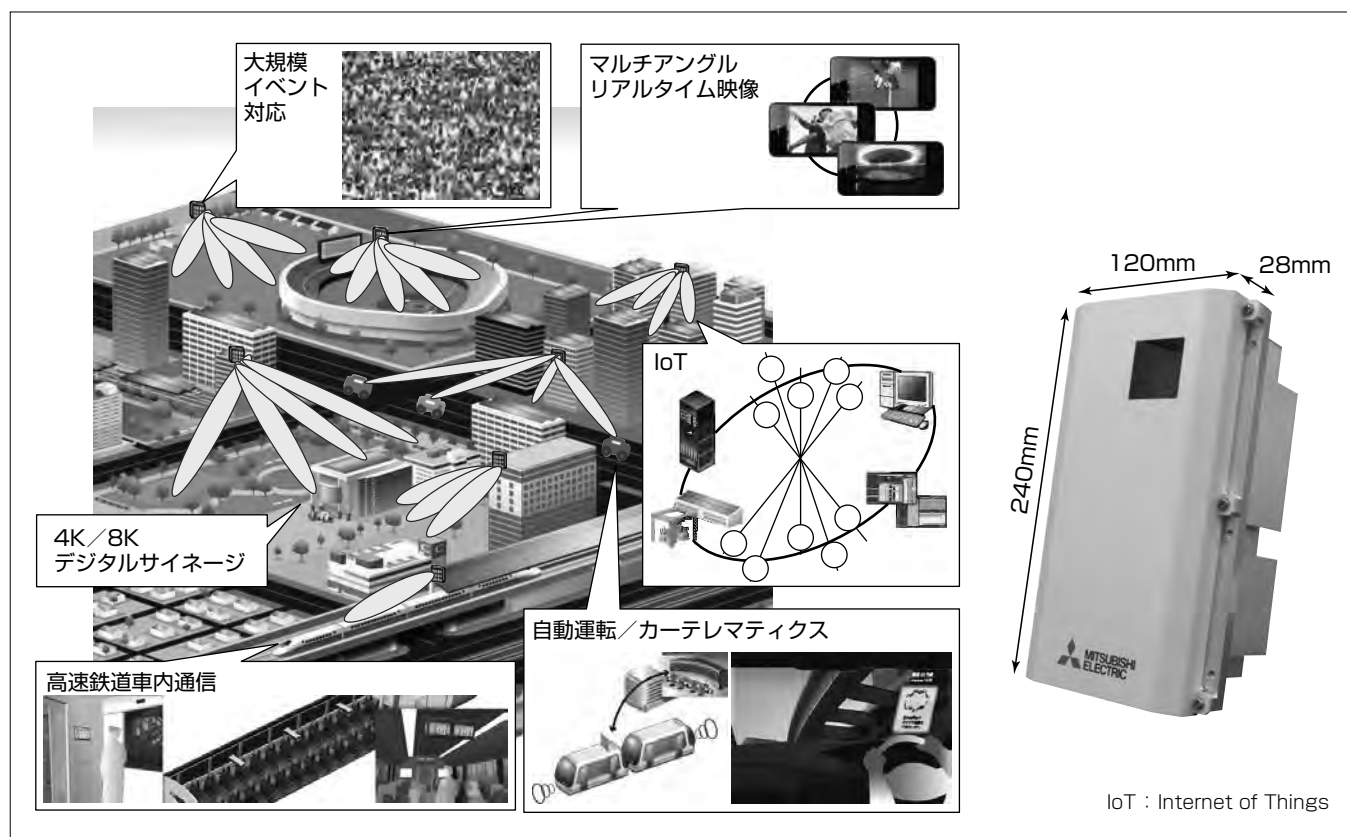
急増する移動通信のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に向け、2020年以降の実用化が期待される第5世代移動通信システム(5G)の研究開発が急務となっている。

このような背景の中、三菱電機は、多素子アンテナとMIMO(Multiple Input Multiple Output)を組み合わせる空間多重数を増やすことで飛躍的に周波数利用効率を向上させ、超高速伝送を実現することが期待されるMassive

MIMOの実用化を目指した研究開発を行っている。

(株)NTTドコモと当社が、総務省の採択を受けて研究開発を行っている、28GHz帯Massive MIMOに適用するアンテナ・RF(Radio Frequency)モジュールでは、次の2つを実現した。

- (1) 28GHz帯アンテナ・RFモジュールのサイズ120×240×28(mm)
- (2) 28GHz帯で広角まで高精度なビームを形成



5Gで期待されるサービスイメージと5G無線基地局向け28GHz帯アンテナ・RFモジュール試作機

2020年以降の実用化が期待される5Gに向けて、Massive MIMO基地局に適用する28GHz帯アンテナ・RFモジュールを開発した。サイズ120×240×28(mm)の小型化を実現するとともに、28GHz帯で広角まで高精度なビーム形成が実現できることを実測で確認した。

1. ま え が き

第5世代移动通信システム(5G)では、第4世代移动通信システム(4G)の規格上の最大伝送速度3Gbpsを大きく超える、20Gbpsの超高速伝送が要求されている⁽¹⁾。

この実現には、多素子アンテナとMIMOを組み合わせて空間多重数を増やすことで飛躍的に周波数利用効率を向上できるMassive MIMOが有効となる⁽²⁾。

Massive MIMOを実現する回路方式として、当社では、アナログビームフォーミングとデジタル信号処理とを融合させることで空間多重数の増加と演算量の削減を実現できるハイブリッドビームフォーミング方式を提案し、開発を進めている⁽³⁾⁽⁴⁾。

本稿では、このハイブリッドビームフォーミング方式に対応したアナログビームフォーミングを担う、5G無線基地局向け28GHz帯アンテナ・RFモジュールの仕様、及び試作結果について述べる。

2. モジュール仕様

アンテナ・RFモジュールの主要諸元を表1に示す。送受信周波数は28GHz帯、変調信号帯域幅を800MHzとし、高周波数帯における伝搬損失を補償するために、256素子を搭載し、28dBi以上の高アンテナ利得を確保する。

アンテナ・RFモジュールの構成を図1に示す。アンテナ・RFモジュールは、主に、多素子アンテナ部、RF回路部、周波数変換IC、電源・制御IC、外部装置との各種インタフェース用コネクタから構成される。多素子アンテナ部は256の素子アンテナから構成されたアレーアンテナであり、各素子アンテナからの放射電力を端末方向に向けて空間合成することによって、指向性の鋭い高利得なビームを形成する。基板上には、RF回路部、周波数変換IC、電源・制御IC、RF・電源・制御コネクタを実装しつつ、基板内層で、アンテナ給電回路、フィルタ、及び分配・合成器などの受動回路が形成され、アナログビームフォーミングに必要なRFの各機能が高密度に集積化される。

ここで、RF回路部は、多素子アンテナ部の背面、かつ多素子アンテナ部の専有面積内に収まるように実装される。また、多素子アンテナ部とRF回路部の各素子は基板内層に形成された給電線路で互いに接続される。この構成によってアンテナ・RFモジュール全体の薄型化と低損失化、一体形成による低コスト化を可能にする。

アンテナ・RFモジュールでのRF回路部の構成を図2に示す。RF回路部は、主にRF信号を増幅する電力増幅器IC、及び低雑音増幅器IC、RF信号の位相や振幅を制御する移相器と利得可変回路を内蔵するRF-ICで構成される。

RF回路部では、アンテナの多素子化に伴い、低消費電力化、小型化が課題となる。特に電力増幅器ICの消費電

表1. アンテナ・RFモジュールの主要諸元

項目	諸元
送受信周波数	28GHz帯(27.5~29.5GHz)
変調信号帯域幅	800MHz
アンテナ方式	プリントドパッチアレー
アンテナ素子数	256素子
アレー配列	垂直: 16, 水平: 16
アンテナ利得	28dBi以上
偏波方向	+45degree又は-45degree
ビーム走査角度	垂直: $\pm 12\text{degree}$, 水平: $\pm 45\text{degree}$
サイズ	120×240×28(mm)(放熱フィン除く)

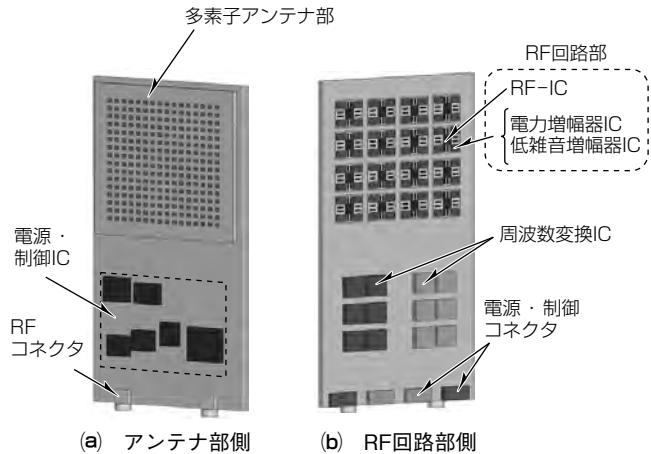


図1. アンテナ・RFモジュールの構成

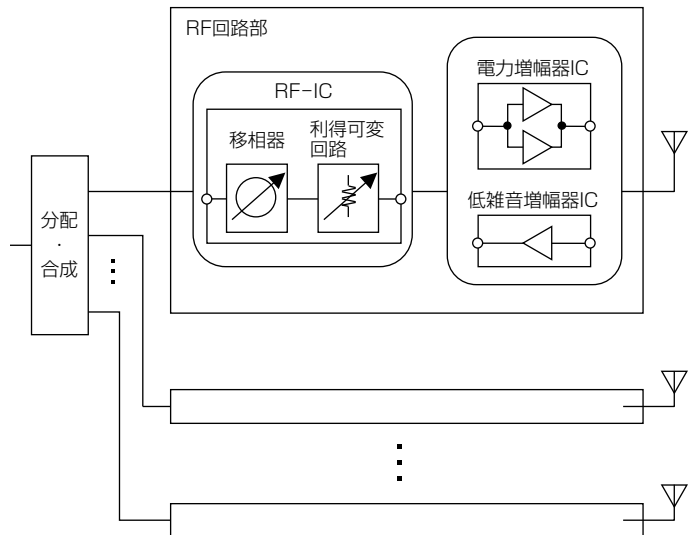


図2. RF回路部の構成

力は、アンテナシステム全体の消費電力への寄与が大きいことから、電力増幅器ICにはGaAs(ガリウムヒ素)プロセスを用いることで高効率化を図る。また、RF-ICはRF回路部全体のサイズに大きく寄与するため、高集積化による小型化に適したCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)プロセスを用いるとともに、高精度にビーム形成を行う上でキーデバイスとなる移相器はアクティブ方式によって移相精度向上を図っている。

3. 試作結果

2章で述べたモジュール仕様の実現に向け、28GHz帯で小型かつ高精度ビーム形成を検証するためのアンテナ・RFモジュールを試作した。当社では2015年度、高SHF (Super High Frequency) 帯向け要素回路技術開発⁽⁵⁾を15GHz帯で実施しており、今回試作したモジュールには、15GHz帯での開発で培った回路技術を発展させて適用した。ここでは、このモジュールによるビーム形成に関する技術の開発結果について述べる。

28GHz帯の高周波数帯では自由空間伝搬損失が大きいいため、それを補償するためにアンテナには高い利得が求められる。そこで、素子アンテナ数を15GHz帯の64素子から256素子の4倍に拡大して利得を向上させた多素子アンテナ部を開発した。多素子アンテナ部の専有面積は約9×9 (cm)、アンテナ素子間隔は0.54波長である。多素子アンテナ部の正面方向利得を試作評価した結果を図3に示す。28GHz帯での多素子アンテナ部の動作利得は28.8dBi以上であることを確認した。

高精度なビーム形成を行う上では、各素子の信号の位相を制御する移相器がキーデバイスとなる。このモジュール開発で、15GHz帯要素回路開発で培った回路技術を基に、28GHz帯の信号の位相を制御する6ビットのベクトル合成型移相器を開発した⁽⁶⁾。図4にベクトル合成型移相

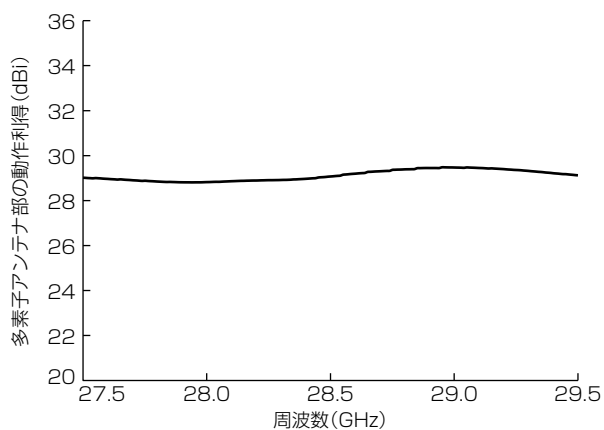


図3. 多素子アンテナ部の利得周波数特性

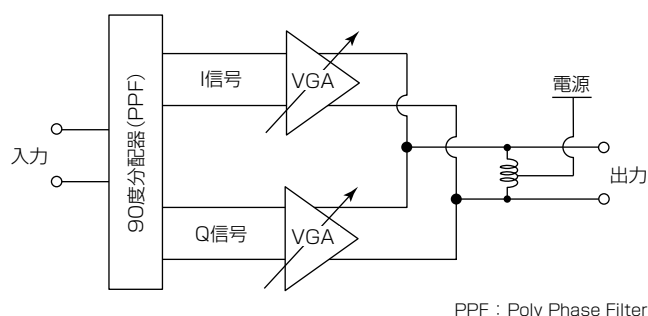


図4. 移相器の構成

器の構成を示す。入力信号を位相が90degree異なるI信号とQ信号に分配し、それぞれの極性と利得を可変利得増幅器(VGA: Variable Gain Amplifier)で制御した後に合成することで所望の移相量を得ることができる。この移相器開発では、15GHz帯で開発した移相器と比較し、移相量誤差を低減できる回路方式を新たに開発した。図5に、今回開発した移相器におけるVGAの構成を示す。複数の差動対を並列した構成であり、差動対Pの数に応じて利得を制御する。利得制御に応じて、差動対Pの逆相で動作する差動対Nの数も併せて制御することで、位相制御に伴う入力インピーダンス変動を抑えることができ、移相量誤差の低減が可能となる。この移相器を、65nmCMOSプロセスを用いて試作した。評価の結果、28GHz帯での位相誤差は1.2degree rmsであり、15GHz帯で開発した回路方式(1.7degree rms)に比べて位相制御誤差を低減できることを確認した。

また、RF回路部の小型化のため4素子の移相器を集積したRF-ICを開発した(図6)。チップサイズは、7.2×5.3(mm)となっている。

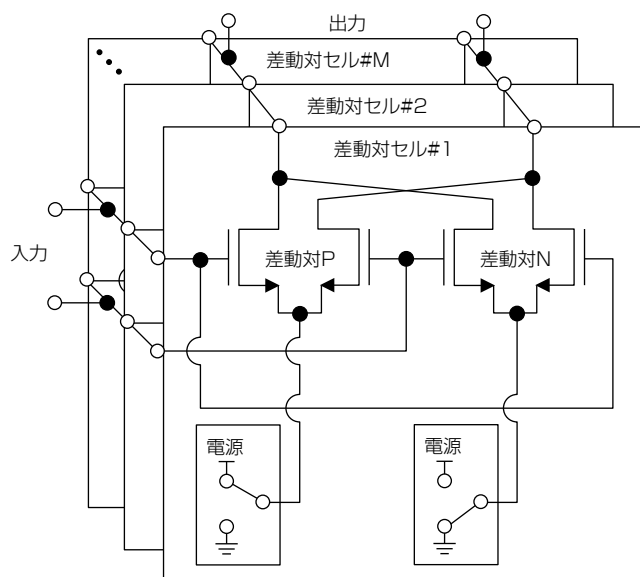


図5. 移相器に用いるVGAの構成

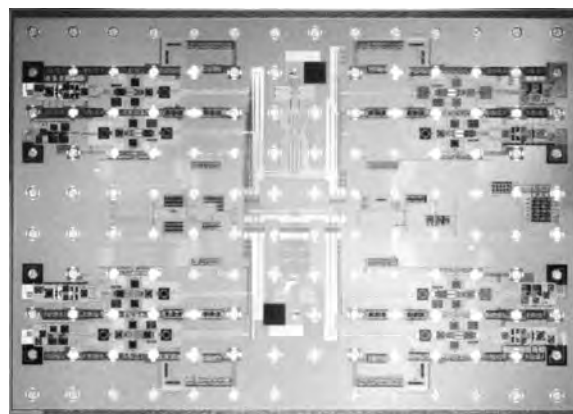


図6. 4素子の移相器を集積したRF-ICのチップ

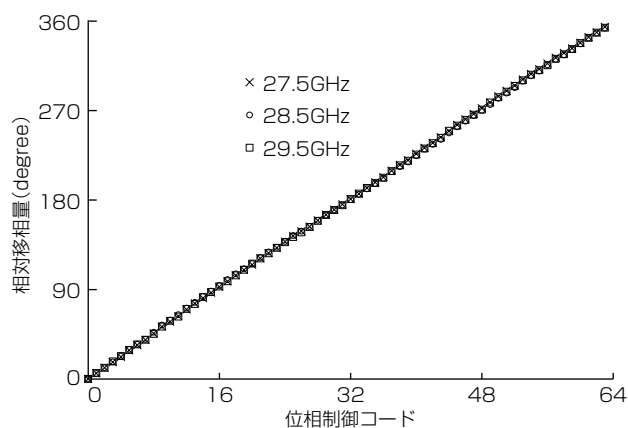


図7. RF回路部での位相制御特性

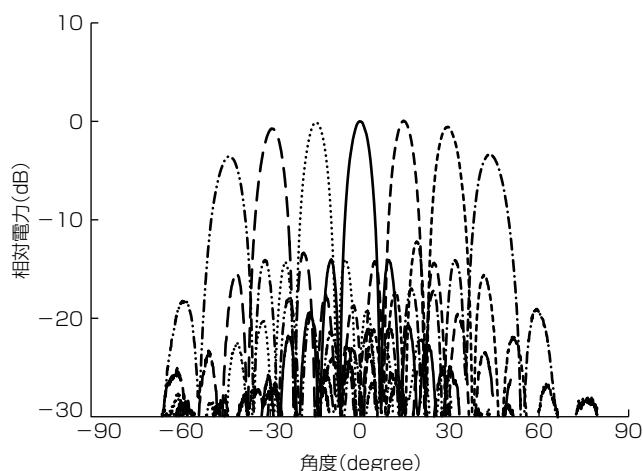


図8. アンテナ・RFモジュールの放射パターン測定結果

アンテナ・RFモジュールでは、先に述べた4つの移相器を集積したRF-ICを16個搭載した。256素子のアンテナに対し、4素子ごとに束ねて1つの移相器に接続することで、RF回路部の小型化を実現している。RF回路部の各素子の位相制御特性を評価し、ビーム形成に十分な特性を得ることを確認した。図7に、試作したモジュールのRF回路部での位相制御特性の評価結果を示す。64(6ビット)の位相設定状態にて広帯域で高線形な位相制御が実現できることを確認した。

試作したアンテナ・RFモジュールの放射パターン特性を電波暗室内で評価した。水平面で主ビーム方向を -45° から $+45^{\circ}$ まで 15° 刻みで変化させた7状態の測定結果を図8に示す。グラフの縦軸は 0° ビームの値で規格化している。このモジュールの校正には素子電界ベクトル回転法⁷⁾を用いた。広角まで

指示角どおりにビーム走査が可能であることが確認できる。指示角に対する主ビーム方向の誤差は、 0.6° rms 以下である。これらから、28GHz帯で広角まで高精度なビームを形成できるアンテナ・RFモジュールを実現した。

4. む す び

超高速伝送の実現に向けて開発中のMassive MIMO基地局に適用するアンテナ・RFモジュールの仕様と試作結果について述べた。今後は、Massive MIMOの基地局開発・フィールド試験で、周波数利用効率の高いMassive MIMO技術を確立し、2020年以降のトラフィック対策、多種多様なサービス、アプリケーションの実現に貢献する。

この論文には、総務省からの委託を受けて実施した“第5世代移動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: 将来無線アクセス・モバイル光ネットワークの構想, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2013-231/232 (2013)
- (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, RCS2014-81 (2014)
- (4) 友江直仁, ほか: 第5世代移動通信システム向け無線アクセス基地局技術, 三菱電機技報, 90, No.6, 342~346 (2016)
- (5) 中溝英之, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向け超多素子アンテナシステムの要素技術, 2016年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, BCS-1-8 (2016)
- (6) 山本 航, ほか: 5Gにおける高SHF帯・広帯域Massive MIMO向け28GHz帯高精度6ビットベクトル合成型移相器, 2017年電子情報通信学会総合大会, C-2-20 (2017)
- (7) 真野清司, ほか: フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—, 電子情報通信学会論文誌(B), J65-B, No.5, 555~560 (1982)

大野聖信* 山口晃由**
横里純一*
富澤俊明*

IoTシステム対応三菱通信ゲートウェイ

Mitsubishi Communication Gateway for IoT System

Toshinobu Ono, Junichi Yokosato, Toshiaki Tomisawa, Teruyoshi Yamaguchi

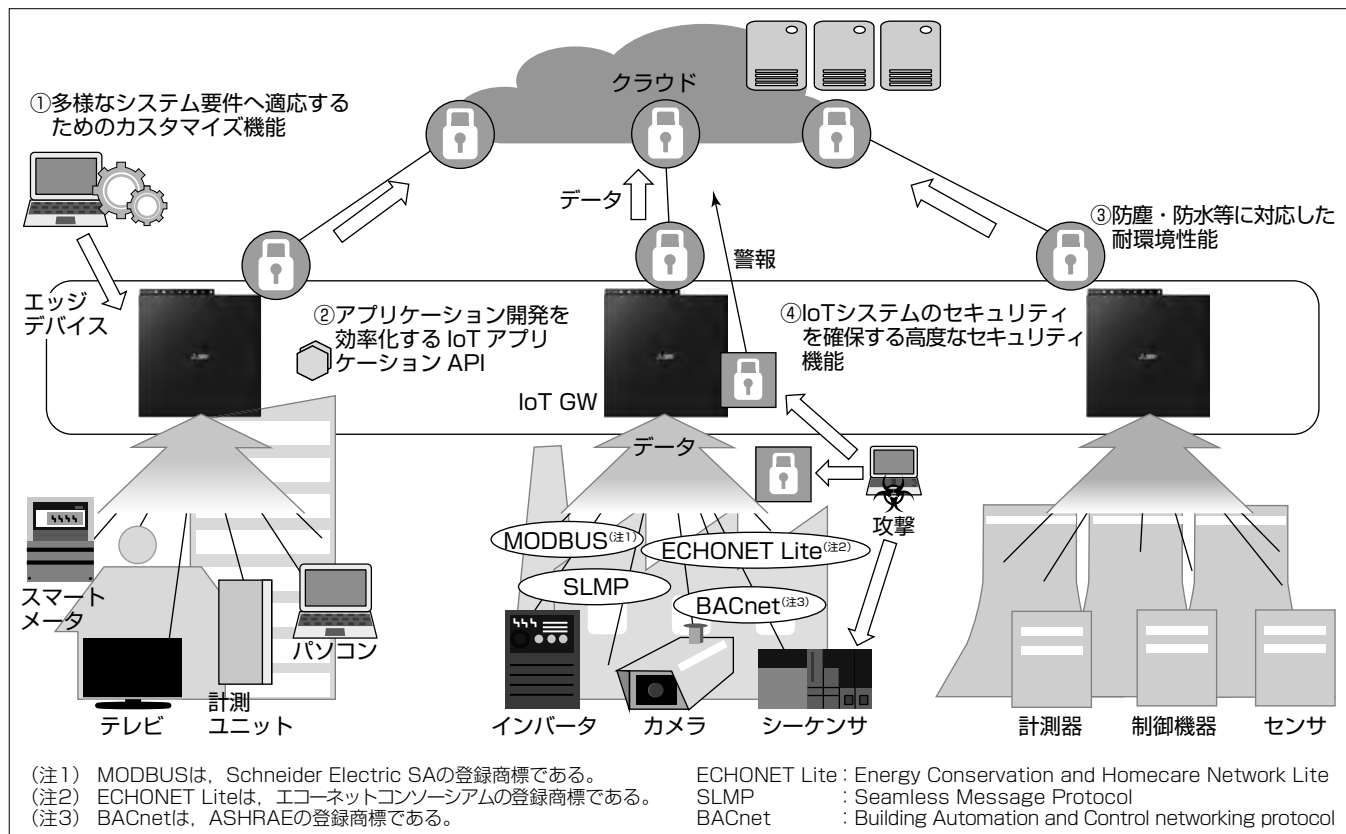
要 旨

近年、カメラやセンサ等から収集したデータを、故障解析や作業の効率化、災害予測などに活用するIoT (Internet of Things) システムの適用事例が増えている。IoTシステムでは、大量のデータを処理するクラウドの負荷を軽減するため、機器とクラウドの間で、クラウドへ送信するデータの選別・集約・加工等の一次処理を行うエッジデバイスが重要な役割を果たす。

一次処理の内容や、一次処理で使われる機能、エッジデバイスの設置環境は、いずれもシステム要件によって多様である。このため、エッジデバイスには利用するクラウド、センサ、通信プロトコルなどに応じて必要な機能を柔軟に選択できること、選択した機能を利用するアプリケーションを容易に開発できること、設置環境を選ばないことが要求される。また、サイバー攻撃によって、製鉄所の溶鉱炉

が制御不能になるなどの被害が報告されており、IoTシステムのセキュリティ確保も重要な課題である。

これら市場の要求に対応するため、三菱電機ではエッジデバイスとしてIoTシステム対応三菱通信ゲートウェイ (IoT GW) を開発した。この装置は、多様なシステム要件に適応するためのカスタマイズ機能、アプリケーション開発を効率化するIoTアプリケーション対応API (Application Programming Interface)、防塵(ぼうじん)・防水等に対応した耐環境性能、IoTシステムのセキュリティを確保する高度なセキュリティ機能を備えている。今後、これらの特長を活用して社会インフラ、交通、産業、くらしの様々な分野で新たな付加価値を創出し、快適・安心な社会を実現していく。



IoT GWを用いたシステム構成

IoT GWは、有線/無線LANやRS485、USB、LTE(Long Term Evolution)等の多様なインタフェースを介してデバイスと接続することが可能である。さらに、カスタマイズ機能、IoTアプリケーション対応API、防塵・防水等の耐環境性能、高度なセキュリティ機能を備える。

1. ま え が き

近年、カメラやセンサ等から収集したデータを、故障解析や作業の効率化、災害予測などに活用するIoTシステムの適用事例が増えている。IoTシステムでは、大量のデータを処理するクラウドの負荷を軽減するため、機器とクラウドの間で、クラウドへ送信するデータの選別・集約・加工等の一次処理を行うエッジデバイスが重要な役割を果たす。

一次処理の内容や、一次処理で使われる機能、エッジデバイスの設置環境は、いずれもシステム要件によって多様である。このため、エッジデバイスには利用するクラウド、センサ、通信プロトコルなどに応じて必要な機能を柔軟に選択できること、選択した機能を利用するアプリケーションを容易に開発できること、設置環境を選ばないことが要求される。また、サイバー攻撃によって、製鉄所の溶鉱炉が制御不能になるなどの被害が報告されており、IoTシステムのセキュリティ確保も重要な課題である。

これら市場の要求に対応するため、当社はエッジデバイスとしてIoTシステム対応三菱通信ゲートウェイ (IoT GW)を開発した。

本稿では、最初にエッジデバイスの役割と要求条件を述べ、次にカスタマイズ機能、IoTアプリケーション対応API、耐環境性能、高度なセキュリティ機能について述べる。

2. IoTシステムでのエッジデバイス

2.1 エッジデバイスの役割

IoTシステムでは、カメラやセンサ等の機器からデータを収集し、クラウドに設置されたサーバでデータを処理し、必要な制御や判断を行う。しかし、機器から直接クラウドへ全てのデータを送ると、サーバの処理負荷が高くなる。また、リアルタイム性が要求されるシステムでは、機器とクラウド間の通信遅延が問題となる。さらに、データの盗聴・改竄(かいざん)のリスクも高まる。そこで、機器とクラウドの間で、データの選別・集約・加工等の一次処理を行い、暗号化してクラウドへ送信する中継装置が使用される。この中継装置をエッジデバイスという。エッジデバイスの設置場所と役割を図1に示す。

エッジデバイスの役割は次の3つである。

- ①配下機器から収集したデータを一次処理してクラウドへ送信する。
- ②配下機器の通信プロトコルからクラウドの通信プロトコルへ変換する。
- ③クラウドへ送信するデータを暗号化してエッジデバイスとサーバ間のセキュアな通信を実現する。

2.2 エッジデバイスへの要求条件

(1) 柔軟なカスタマイズ機能

多様なシステム要件に対応するためには、エッジデバイ

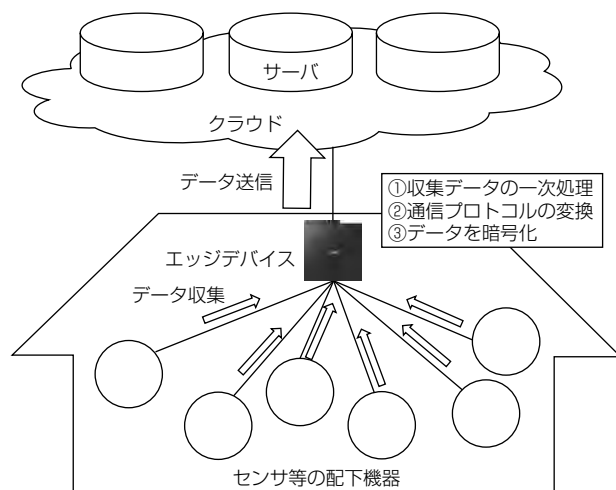


図1. エッジデバイスの設置場所と役割

スでは使用する機能の構成や各種設定の初期値、項目別のカスタマイズ権限等を細かく設定できる必要がある。一方で、過剰なカスタマイズ項目は設定を複雑化させてミスを誘発してしまうため、カスタマイズ項目を必要最小限に限定できることが望ましい。これらのニーズに合致した柔軟なカスタマイズ機能が求められる。

(2) アプリケーションを容易に開発できる仕組み

エッジデバイスで一次処理を実行するためには、IoTシステムごとに、配下機器のハードウェア、通信プロトコル、システム要件に合わせてアプリケーションソフトウェアを開発する必要がある。このため、多岐にわたるハードウェア、通信プロトコルへの対応を容易とし、短期間・低コストでアプリケーションを開発できる仕組みの提供が重要である。

(3) 耐環境性能

エッジデバイスは、一般家庭や企業のオフィスなど空調管理された環境だけではなく、工場や機械室などの高・低温環境、塵(ちり)や埃(ほこり)が発生しやすい環境、工場水を扱うような環境での利用も想定される。このため、エッジデバイスには広い動作温度範囲と防塵・防水構造が求められる。

電源はAC100Vだけでなく、DC電源、PoE(Power over Ethernet)給電が使われるケースも多く、多様な電源タイプへの対応が求められる。

(4) セキュリティ確保

工場やプラントでの産業システムでは、IoTシステム導入によって外部ネットワークと接続されるケースが増えるため、ITシステムと同様にサイバー攻撃の脅威に晒(さら)されるリスクが高くなる。しかし、一方で従来のITシステム用のセキュリティ技術では、大量の不審パターンのモニタ及び解析が必要であり、高速な応答が困難である。このため、一定のリアルタイム性が必要なIoTシステムでは、高速応答を実現する新たなセキュリティ技術が求められている。

3. IoT GW

開発したIoT GWは、カスタマイズ機能、アプリケーション開発を効率化するIoTアプリケーション対応API、防塵・防水等に対応した耐環境性能、高度なセキュリティ機能を備え、2.2節で述べた要求条件に応える。

3.1 カスタマイズ機能

エッジデバイスでは、多様なシステム要件に対応するために機能の構成や初期値、カスタマイズ権限等を細かく設定できる必要がある。IoT GWでは、カスタマイズ機能を実装し、次のようなカスタマイズを可能とした。

(1) 機能構成定義

図2に示すように、システム構築に必要な機能のみを有効化し、機能構成を定義することができる。有効化しなかった機能は、管理画面には表示されないため、エンドユーザーによる不要な変更を防ぐことができる。

(2) 初期値変更

システム要件に対応して各種設定の初期値を変更可能とした。また、工場出荷時の状態だけでなく、カスタマイズ後の状態に戻すことも可能な二段階の初期化機能を持っている。

(3) カスタマイズ権限設定

エンドユーザーごとに項目別のカスタマイズ権限を設定可能とした。また、HTTP等を使用したリモートからのカスタマイズ機能によって、システム構築後の設定変更にも柔軟に対応できる。

3.2 IoTアプリケーション対応API

IoTアプリケーションの開発を容易にするため、IoT GWでは、Java仮想マシン(Java VM^(注4))を搭載した。アプリケーションはJavaVM上で動作するため、異なるハードウェアやOS上で実行できる。これによって、IoT GWのハードウェア構成を意識することなく、Java標準開発ツールを利用することが可能となる。

IOTシステムで使われる各種の通信プロトコルはクラウド

ドや配下機器によって異なるため、システムに合わせたプロトコルの実装が必要となる。そこで、各種の通信プロトコル、ゲートウェイ制御機能をあらかじめモジュール化し、APIとして提供する。これらを使用することで、容易にIoTアプリケーションを開発することができる。図3にIoTアプリケーション対応APIの例を示す。

(1) ゲートウェイ制御API

ゲートウェイ装置内の機能(LED制御、USB制御、ネットワークインタフェース制御等)を使用するためのAPIを提供する。

(2) 通信プロトコルAPI

クラウドとの通信プロトコルであるHTTP(S)、MQTT、OPC UA⁽¹⁾等と、配下機器の通信プロトコルであるMODBUS、ECHONET Lite⁽²⁾、SLMP、BACnet等に対応したAPIを提供する。

(注4) Javaは、Oracle Corp.の登録商標である。

3.3 耐環境性能

IOT GWの概略仕様を表1に示す。多様な設置環境に対応するための耐環境性能を備えている。

(1) AC/DC/PoEの各電源入力への対応

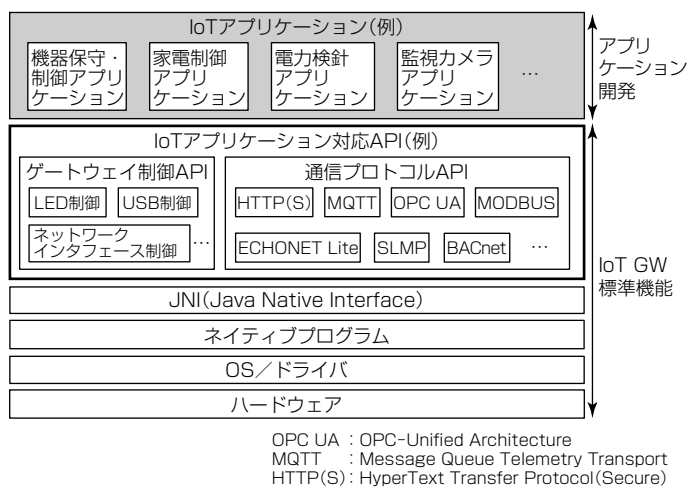


図3. IoTアプリケーション対応APIの例

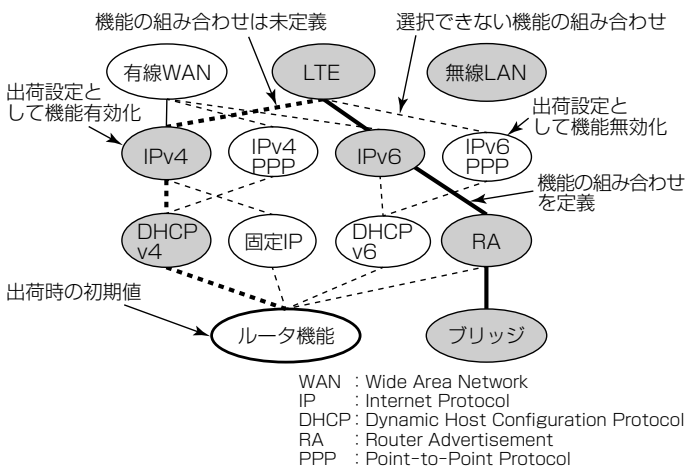


図2. カスタマイズ機能の例

表1. IoT GWの概略仕様

項目		諸元
外部インタフェース	WAN	1000BASE-T, 1ポート
	LAN	1000BASE-T, 4ポート
	USB	USB2.0, 2ポート
	無線	LTE/無線LAN
	シリアル通信	RS-485, 1ポート
構造諸元	SDカード	microSDスロット, 1ポート
	外形寸法	67.5(W)×230(D)×230(H)(mm)
環境諸元	動作周囲温度	-10~55℃
	動作周囲湿度	10~90%, 結露なし
	防塵・防水	IP53
電源諸元	電圧(ACアダプタ)	AC100~240V, 50/60Hz
	電圧(DC端子台)	DC24V
	PoE(受電)	IEEE802.3af クラス0対応
	消費電力	22W以下

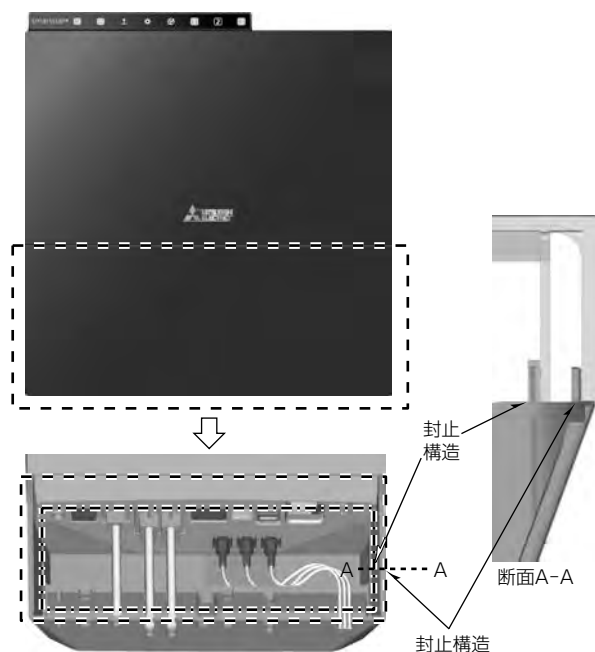


図4. IoT GWと封止構造

(2) 空調非設置環境での使用を想定した広範な動作温度範囲の実現(動作周囲温度-10~55℃)

(3) 保護等級IP53^(注5)の防塵・防水性能の実現

筐体のインタフェース部の封止構造を二重にすることで、多様なインタフェースをサポートしつつ、小型筐体(きょうたい)に最小限の防護構造で防塵・防水性能を実現した(図4)。

(注5) 防塵等級IP5X, 防水等級IPX3

3.4 セキュリティ機能

(1) 攻撃検知機能

産業システムに代表される多くのIoTシステムでは、従来のIT系システムに比べて、装置やアプリケーションを変更する機会が少なく、送受信先や送信データなどの通信パターンが固定的である場合が多い。この特徴を利用して、IoT GWにホワイトリストを用いた攻撃検知機能⁽³⁾⁽⁴⁾を搭載した。

攻撃検知機能の動作を図5に示す。ホワイトリストは、従来のルータでも照合しているIPアドレス、ポート番号等に加えて、正常な通信属性(通信周期、コマンド種別、データの受信順序等)がリスト化されたものである。攻撃検知機能は、制御ネットワークを流れる通信データをキャプチャしてホワイトリストと照合する(図5①)。監視制御装置がマルウェアに感染し、機器制御コントローラやサーバが正常時とは異なるパターンの通信を行った場合(図5②)、攻撃検知機能がこれを検知し、外部ネットワークを通じてSOC (Security Operation Center)等のセキュリティ監視システムに報知する(図5③)。

このように、攻撃検知機能は、システムが不安定になる前にサイバー攻撃を検知し、報知することができる。

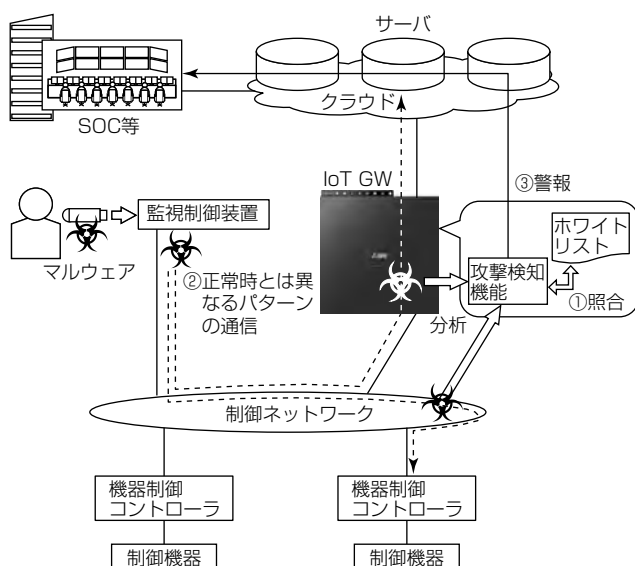


図5. IoT GWに搭載する攻撃検知機能

(2) EDSA認証FSAレベル1相当機能

IoT GWでは、産業用制御機器のセキュリティ認証制度であるEDSA(Embedded Device Security Assurance)認証の機能要件として定義されるFSA(Functional Security Assessment)レベル1相当の機能を実装した。また、SDSA(Software Development Security Assessment)レベル1相当のセキュアなソフトウェア開発プロセスに従って開発し、通信ロバストネス試験を実施している。これによって、IoT GW自身のセキュリティを確保した。

4. む す び

様々なIoTシステムに適用可能なIoT GWについて述べた。IoT GWでは、多様なシステム要件へ適応するためのカスタマイズ機能、アプリケーション開発を効率化するIoTアプリケーション対応API、防塵・防水等に対応した耐環境性能、IoTシステムのセキュリティを確保する高度なセキュリティ機能を備えている。

今後もIoT GWの機能充実化を図り、多くのシステム事業分野でIoTによる新たな付加価値を創出し、快適・安心な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) OPC Foundation : OPC Unified Architecture(IEC 62541)
- (2) エコネットコンソーシアム
http://www.echonet.gr.jp/
- (3) 山口晃由, ほか: 産業制御システムにおける侵入検知手法の調査と検討, SCIS2015, 2A4-3 (2015)
- (4) 中井綱人, ほか: プラント制御システム向けホワイトリスト型攻撃検知機能の設計, SCIS2016, 2B2-4 (2016)

MELOOK3同軸タイプレコーダ “NR-8200”

笠原裕志* 岸下整明*
豊田晋二郎*
国分陽一*

Network Video Recorder MELOOK3 Coaxial Type “NR-8200”

Hiroshi Kasahara, Shinjiro Toyota, Yoichi Kokubun, Nariaki Kishishita

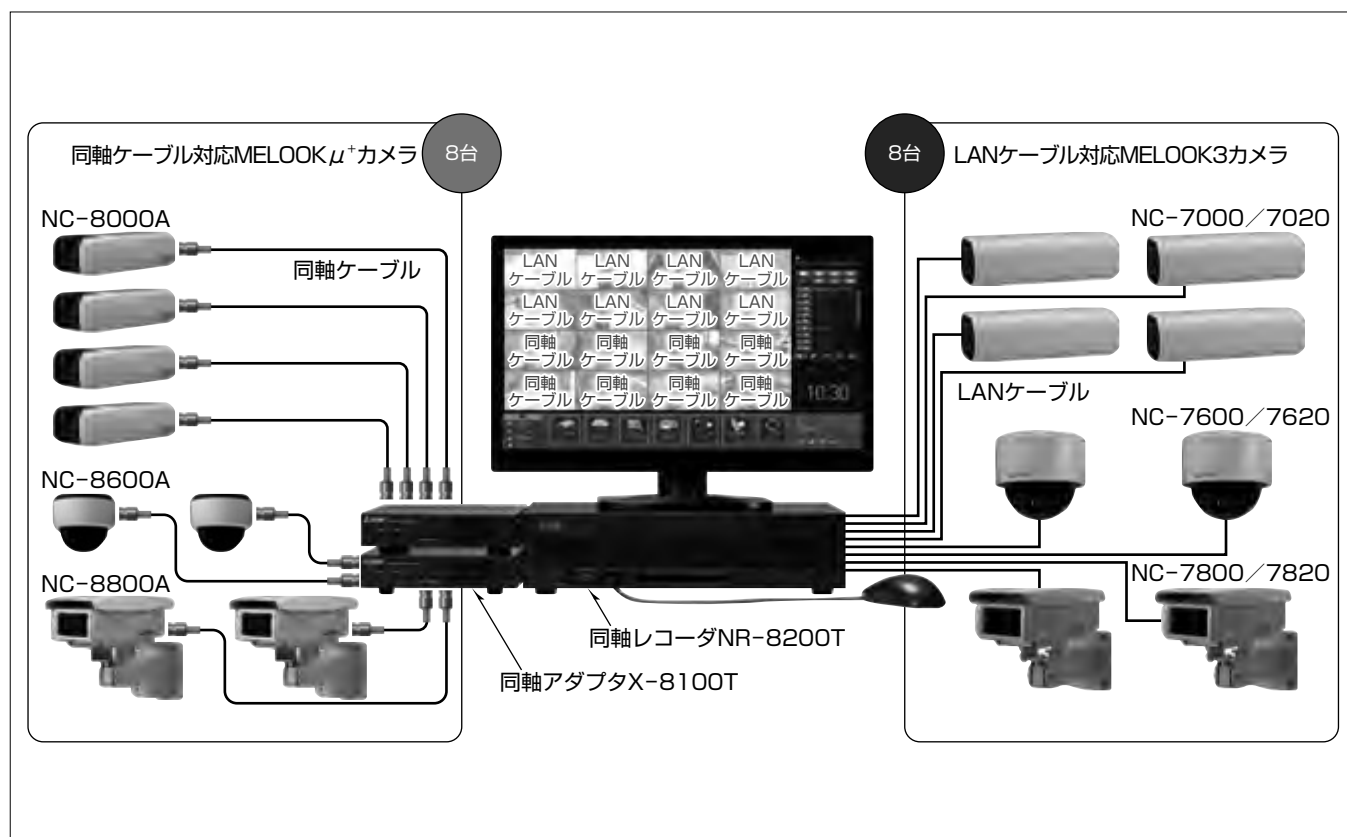
要 旨

近年の社会情勢の変化によって、安全・安心に対する意識は高まっている。監視カメラシステムに対して機能・性能の向上の要求と同時に、低コストで設置・使用したいという市場ニーズが強くなっている。

三菱電機ではコンビニエンスストアに代表される中小規模監視システム向けに“MELOOKシリーズ”を展開している。初代の“MELOOK μ ”から“MELOOK μ II”，“MELOOK μ +”を経て⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾，最新ラインアップである“MELOOK3”の製品化過程では⁽⁵⁾⁽⁶⁾，電子増感機能（夜間でも明るい映像が得られる）や逆光補正機能の強化，“くっきり”見える高解像度化，“なめらか”な映像が得られる高フレームレート化等，機能・性能を大幅に向上させて多くの顧客から好評を

得ている。

今回開発したMELOOK3同軸タイプレコーダ“NR-8200”は，MELOOK3の機能・性能を引き継いだ派生機種⁽⁷⁾の位置付けだが，MELOOK μ +の特長である旧来のアナログカメラシステムで使用されている同軸ケーブルを活用できる製品である。アナログカメラシステムを使用している顧客からは同軸ケーブルをそのまま活用したいというニーズが強く，それに応えるために開発した機種であり，MELOOK3の特長である直観的な操作が可能な使いやすいユーザーインターフェースと，“くっきり”“なめらか”な映像表示が可能となっている。



MELOOK3同軸タイプレコーダ“NR-8200”システムの構成例

MELOOK3同軸タイプレコーダ(NR-8200)システムでは，同軸アダプタ(X-8100)を介して同軸ケーブル対応MELOOK μ +カメラを最大8台まで接続可能であり，またLANケーブル対応MELOOK3カメラを最大8台まで接続可能である。

1. ま え が き

近年の社会情勢の変化によって、安全・安心に対する意識は高まる一方で、監視カメラに対しても機能・性能の向上の要求と、高機能・高性能なシステムを低コストで設置・使用したいという市場ニーズが強くなっている。これに対して、当社ではデジタルカメラシステムであるMELOOKシリーズを展開してきた。2015年に市場投入したMELOOK3は、従来のMELOOK μ IIより大幅に機能・性能が向上し、高画質で滑らかな映像の記録・表示や、使いやすいユーザーインターフェースによって、コンビニエンスストアや流通店舗、金融機関等多くの顧客から好評を得ている。

しかし、デジタルカメラシステムを導入するにはカメラとレコーダの間にLANケーブルを敷設する必要がある。アナログカメラシステムを既に使用している顧客がデジタルカメラシステムを導入する際、ケーブル敷設のコストは大きな割合を占めることから、アナログカメラシステムで使用している同軸ケーブルをそのまま活用したいというニーズも多い。当社はそれに応えるため、同軸ケーブルに対応したデジタルカメラシステムであるMELOOK μ +を展開していたが、今回、この後継でありMELOOK3の機能・性能を引き継いだMELOOK3同軸タイプレコーダを開発した。

2. MELOOK3同軸タイプレコーダ

2.1 特 長

MELOOK3同軸タイプレコーダの主な特長を次に示す。

- (1) 高画質／高フレームレート (Full-HD(High Definition)／30fps(frames per second)対応)
- (2) 記録容量の増加
- (3) 低消費電力
- (4) LANケーブル対応カメラ／同軸ケーブル対応カメラをかんたん設置
- (5) かんたん操作(直観的なユーザーインターフェース)
- (6) モバイル端末対応の遠隔監視

また、MELOOK3同軸タイプレコーダの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。

2.1.1 MELOOK μ +からの改善

MELOOK3同軸タイプレコーダは、MELOOK μ +から様々な改善を図っている。表2に主要項目の比較一覧を示す。MELOOK3同軸タイプは、Full-HDの解像度、30fpsのフレームレートに対応しており、画像表示性能が向上している。フレームレートについては、複数のカメラを同時に表示する分割画面でMELOOK μ +カメラを用いた場合、MELOOK μ +レコーダは1fpsとなる制約があるが、MELOOK3同軸タイプレコーダは同条件で制約なく15fps



同軸レコーダと同軸アダプタのセットで1製品。

図1. MELOOK3同軸タイプレコーダ

表1. MELOOK3同軸タイプレコーダの主要諸元

型名	NR-8200	
同軸レコーダ	型名	NR-8200T
	電源電圧	AC100~240V
	定格電流 ^(注1)	1.5A以下(150W以下)
	LANカメラ端子	8
	アダプタ端子	2
	外形寸法(W×D×H)	420×270×100(mm)
同軸アダプタ	型名	X-8100T
	電源電圧	DC48V
	定格電流	1 A以下(48W以下)
	レコーダ端子	1
	MELOOK μ +カメラ端子	4
	外形寸法(W×D×H)	200×230×43.5(mm)
最大伝送距離		レコーダ：100m MELOOK μ +カメラ：500m

(注1) 同軸アダプタ及び同軸カメラの消費電力を含む。

表2. MELOOKレコーダシリーズ比較一覧

シリーズ	MELOOK μ +	MELOOK3同軸タイプ	【参考】MELOOK3
型名	NR-8100A	NR-8200	NR-5000他
発売年月	2012年8月	2016年12月	2015年11月
LANカメラ ^(注2)	2	8	16(32)
同軸カメラ ^(注3)	8	4(8)	0(16)
解像度 ^(注4)	SXVGA	Full-HD(SXVGA)	Full-HD
フレームレート ^(注5) (fps)	15	30(15)	30
記録容量(TB)	1	2	2~8
消費電力(W)	200	150	150

(注2) LANケーブル対応カメラの最大接続台数。

()内は外部機器を使用して拡張した場合を示す。

(注3) 同軸ケーブル対応カメラの最大接続台数。

()内は外部機器を使用して拡張した場合を示す。

(注4) 記録／表示できる最大解像度。Full-HD：1920×1080画素、SXVGA(Super eXtended Video Graphics Array)：1280×960画素。ただし、MELOOK μ +カメラ接続時は最大SXVGA。

(注5) 記録／表示できる最大フレームレート。ただし、MELOOK μ +カメラ接続時は最大15fps。

で表示できる。その他にもLANカメラの収容数増加、記録容量増加、消費電力の低減などの機能・性能を改善させている。

また、MELOOK μ +では“よく使う機能”と“あまり使わない機能”が混在し、複雑な操作が必要な印象を顧客に与えていた。MELOOK3同軸タイプレコーダでは、図2に



図2. MELOOK3同軸タイプレコーダのユーザーインターフェース

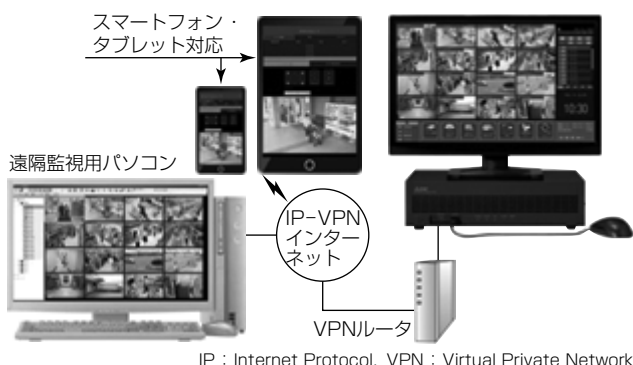


図3. モバイル端末による遠隔監視

示すようにMELOOK3と同様の直観的な操作で映像表示／再生等が可能なユーザーインターフェースを採用し、簡単に目的の操作ができるようになっている。

さらには、MELOOK μ +では遠隔監視機能はパソコンだけの対応であったが⁽⁷⁾、MELOOK3同軸タイプレコーダでは図3に示すようにモバイル端末(スマートフォン、タブレット)にも対応している。専用のアプリケーションをモバイル端末にインストールすることで、レコーダ本体と同様の直観的な操作ができる。

2. 1. 2 かんたん設置の踏襲

同軸アダプタは同軸レコーダにLANケーブル1本で接続可能であり、詳細設定、外部給電は一切不要である。また、同軸アダプタ1台当たり4台のMELOOK μ +カメラが接続可能であるが、MELOOK μ +カメラに対しては同軸ケーブルを通じてDC48Vを給電しており、LANカメラと同様に同軸ケーブル以外の配線が不要となっている。図4に、同軸レコーダ、同軸アダプタと、MELOOK μ +カメラの接続形態を示す。MELOOK3同軸タイプレコーダはケーブルを接続するだけの“かんたん”設置が可能であり、MELOOK μ +、MELOOK3とMELOOKシリーズに引き継がれているその簡便性を踏襲している。

なお、MELOOKシリーズでは、カメラへの給電を簡素化するためにPoE(Power over Ethernet)を採用している。PoEによってカメラはLANケーブルでレコーダから給電できるため、給電のための他の配線が不要となるメリット

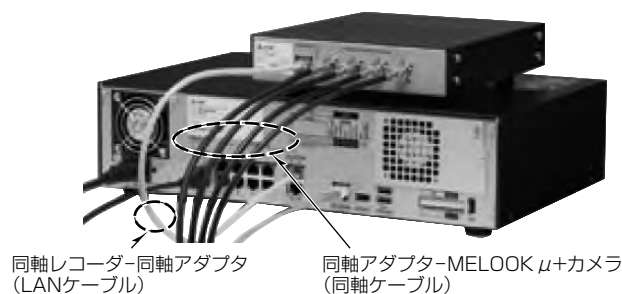


図4. MELOOK3同軸タイプレコーダのかんたん設置

表3. アナログカメラシステムとMELOOK3の画質比較

	アナログカメラシステム	MELOOK 3
解像度		
暗闇環境		
逆光下		

がある。MELOOK3同軸タイプレコーダでも、同軸アダプタへの給電は同軸レコーダから距離があって電源のない場所に設置される可能性があるためPoEによる給電が求められる。しかし、同軸アダプタはそれ自身とMELOOK μ +カメラ4台分の電力が加わり消費電力が大きくなるため、従来PoE(最大受電25.5W)では電力が不足するという問題があった。そこで、MELOOK3同軸タイプレコーダは、従来PoEの電力を向上させた拡張PoE(最大受電90Wまで対応)を採用した。同軸アダプタの消費電力は、MELOOK μ +カメラへの給電分が加算されて最大38Wであるが、拡張PoEの採用によって、同軸レコーダと同軸アダプタはLANケーブル1本で通信と給電ができるシンプルな構成が可能となっている。

2. 1. 3 アナログカメラからの画質向上

旧来のアナログカメラシステムは、画像は低解像度である。また、夜間など暗闇環境では画像は不鮮明であり、出入口等の逆光下でも人物が判別しづらい。一方、デジタルカメラシステムであるMELOOK3(同軸タイプを含む)では、高解像度、暗闇画像の鮮明化(電子増感)、逆光画像の補正によって画質を大幅に向上させている。表3にアナログカメラシステムとMELOOK3の画質比較を示す。

2. 2 適用事例

アナログカメラシステムに使用される同軸ケーブルは、外来ノイズに対して、LANケーブルより安定した通信が

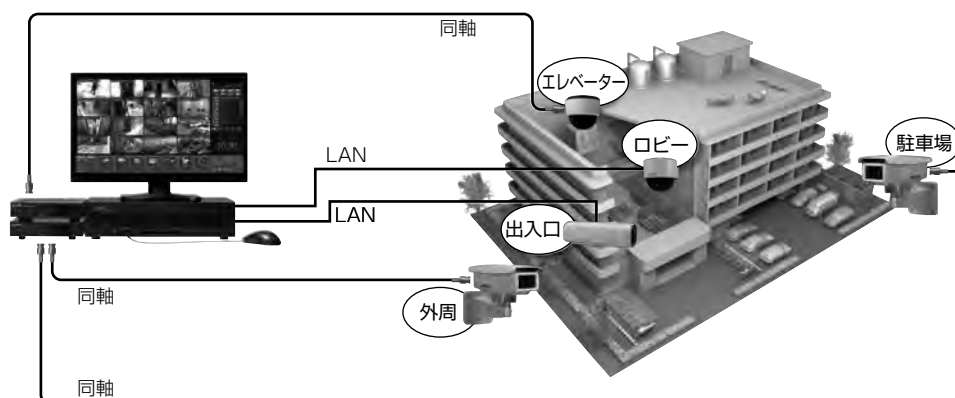


図5. MELOOK3同軸タイプレコーダによるデジタルカメラシステム化

可能であるため、ノイズが印加される環境下での監視カメラシステム構築に適している。さらに、MELOOK3同軸タイプレコーダは、同軸ケーブルによって中継機器不要で最大500mまで伝送・給電が可能である(LANケーブルは最大100m)。アナログカメラシステムの既設同軸ケーブルを活用してデジタルカメラシステム化すると同時に、LANカメラの収容も可能とするMELOOK3同軸タイプレコーダの適用先としてマンションの事例を図5に示す。

図5はレコーダ設置場所(管理人室)からは既設の同軸ケーブルがエレベーター、駐車場、外周(マンション周囲)に対して敷設されており、旧来のアナログカメラが接続されていたが、これをMELOOK μ カメラとしてデジタルカメラシステム化した例である。機器ノイズが発生するエレベーター、マンション外部に長い距離を配線しなければならない駐車場と外周は、LANケーブルより同軸ケーブルが適している。また、この事例では屋内の出入口、ロビーにはセキュリティ強化のためLANケーブルを新規に敷設してMELOOK3カメラを設置している。MELOOK3同軸タイプレコーダによって、顧客にこのようなLANケーブル、同軸ケーブル混在のシステムを簡便に構築する提案ができるとともに、顧客もアナログカメラシステムから大幅に向上した画質で監視業務を実施できる。

なお、先に述べたアナログカメラシステムに対する新規導入事例に限らず、既にMELOOK μ システムを使用している顧客に対し、MELOOK3同軸タイプレコーダは画質、表示性能等の機能向上を訴求できるので、その置き換え需要の喚起も可能である。

3. む す び

MELOOK3同軸タイプレコーダは、MELOOK3レコー

ダの機能・性能と、高画質で滑らかな映像の記録・表示や、使いやすいユーザーインターフェースを引き継ぎ、かつ従来のMELOOK μ システムの特長である既設同軸ケーブルを活用してのデジタルカメラシステムを実現した。

現在は、MELOOK μ カメラによる映像記録・表示がSXVGA、15fpsが最大となっているが、今後はMELOOK3カメラと同等のFull-HD、30fpsの製品投入も予定している。少しでも多く顧客の声を製品に反映させるとともに、性能・機能、小型化、消費電力といった製品の価値を向上させる要素のバランスを取り、監視カメラシステムの開発を進める予定である。

参 考 文 献

- (1) 上田智弘, ほか: “メルック μ II”システム, 三菱電機技報, **86**, No. 6, 331~334 (2012)
- (2) MELOOK μ II システム
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/melookmu/mu2/>
- (3) 寺内弘典, ほか: “メルック μ ”システム, 三菱電機技報, **87**, No. 5, 285~288 (2013)
- (4) メルック μ システム
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/melookmu/muplus/>
- (5) 辻 亮宏: “MELOOK3”レコーダ, 三菱電機技報, **89**, No. 6, 348~352 (2015)
- (6) MELOOK3システム
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/nwcamera/melook3/>
- (7) 野田忠義, ほか: 監視映像の遠隔配信技術, 三菱電機技報, **83**, No. 6, 380~383 (2009)

画像処理を活用した 水位観測システムの実現

服部亮史* 上田英滋***
 新房健一** 平 謙二†
 池上俊之**

Water Level Observation System Based on Image Processing Technique

Ryoji Hattori, Kenichi Shinbo, Toshiyuki Ikeue, Eiji Ueda, Kenji Taira

要 旨

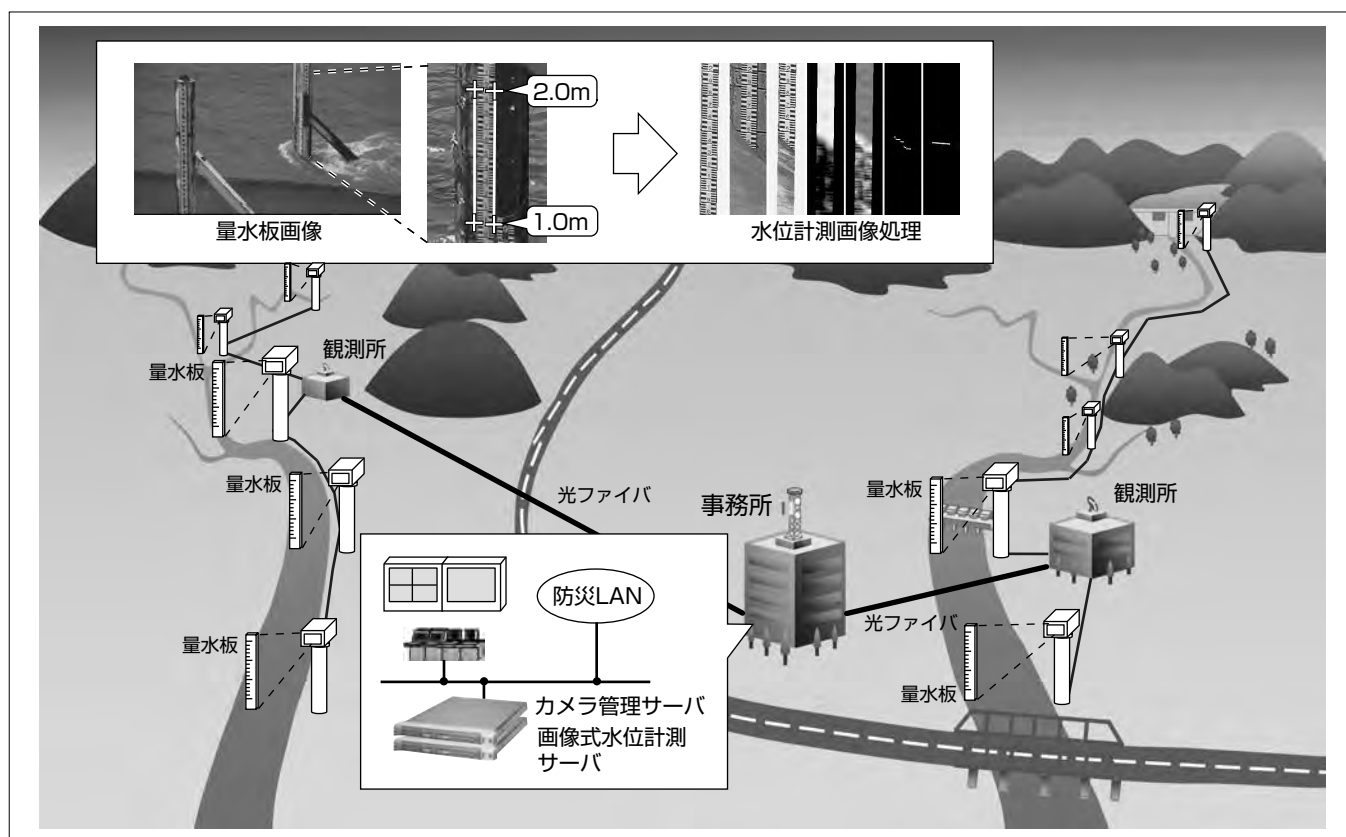
近年、集中豪雨による水災害の頻発化によって、河川管理での水位把握の強化が重要となっている。国土交通省（以下“国交省”という。）では、直轄河川に量水板や水位観測所を設置して水位計測を実施し、水位テレメータ設置箇所では遠隔からの常時監視を行っているが、さらに、洪水時等でもより確実に観測を継続できる手段と、よりきめ細かな地点間隔での観測が求められている。

従来、水位センサとして、フロート式や水圧式等が用いられているが、水と接触する方式は特に洪水時で計測への影響が懸念される。そこで、非接触方式となるカメラ映像を用いた画像式水位計測が注目されている。また、国交省では、河川沿いに河川監視CCTV(Closed Circuit TeleVision)カメラ局を整備しており、その活用で水位計

測の多地点化が期待できる。

三菱電機は、このニーズに対応するため、新たな画像式水位計測アルゴリズムを開発し、今回、河川監視CCTVシステムの複数カメラ映像に対応可能なサーバ装置に実装した。この製品は、河川管理の現場に適した次の特長を持つ。

- (1) 量水板を被写体とし昼夜間に強い静止画を対象とした画像相関法による水位計測画像処理
- (2) 画像式水位計測アルゴリズムにはカメラの画角ずれに頑健な対策を具備
- (3) 河川監視CCTVシステムとの高い親和性(H.264/MPEG-2映像符号ストリーム直接取り込み、最大100地点対応(計測周期10分間の場合))



河川監視CCTVシステムと画像式水位計測サーバ

画像式水位計測サーバは、カメラ管理サーバと連携してカメラをプリセットポジション制御し、画像処理の対象とする画角の映像を受信して画像を取得する。その後、カメラを元の画角に自動で戻す。取得した20秒程度分の画像について水位計測画像処理を行い、水位計測結果を出力する。この間、60秒/カメラで1プロセスを完了する。量水板が複数段の場合、水位に追従して適切な段のポジションにカメラを制御して計測を継続する。

1. ま え が き

近年、記録的な大雨や集中豪雨による水災害の頻発化によって、河川管理での治水計画及び防災・減災に向けた水位把握の強化が重要となっている。国交省では、直轄河川に量水板や水位観測所を設置して水位計測を実施し、水位テレメータ設置箇所では遠隔からの常時監視を行っている。しかしながら、水位観測所局舎の倒壊や水位計が流出する等の被害や、水位計の計測範囲を超過した状況での水位把握の必要性も出ており、洪水時等でより確実に観測を継続できる更なる手段と、よりきめ細かな地点間隔での観測が求められている。

従来、水位センサとしては、フロート式や水圧式等が用いられているが、水と接触する方式は特に洪水時等で計測への影響が懸念される。そこで、非接触方式のカメラ映像を用いた画像式水位計測が注目されている。非接触方式であれば高水による直接的な流出のおそれがなく、画像式水位計測では用いるカメラを河道から比較的離れた場所に設置でき、洪水等による影響の軽減が期待できる。

また、国交省では、河川監視CCTVカメラ(以下“河川カメラ”という。)を整備しており、河川カメラの多目的利用や河川カメラ局に水位計測用の画像センサを設置して、画像式水位計測を行うことで、水位把握の多地点化が図られる。

本稿では、このニーズに対応するため新たに開発した画像式水位計測アルゴリズムである“量水板画像を用いた水位計測技術”⁽¹⁾⁽²⁾、及びこのアルゴリズムによる水位計測画像処理モジュールを搭載した“画像式水位計測サーバ”について述べる。

2. 画像式水位計測サーバ

画像式水位計測サーバは、河川監視CCTVシステムで、複数カメラ映像に対応可能なサーバ装置に実装され、河川管理の現場に適した次の特長を持つ。

- (1) 量水板を被写体とし昼夜間に強い静止画を対象とした画像相関法による水位計測画像処理(夜間の低フレームレート電子蓄積映像に対応)
- (2) 画像式水位計測アルゴリズムにはカメラの画角ずれに頑健な対策を具備
- (3) 河川監視CCTVシステムとの高い親和性(国交省適用H.264/MPEG-2映像符号ストリーム(直接取り込み)及びCCTVカメラ制御コマンド準拠、最大100地点対応(計測周期10分間の場合))

さらに、この画像式水位計測アルゴリズムは、蓄光量水板を被写体とした画像処理にも対応している。これによって、夜間で照明光や環境光が全く得られない状況でも、カメラ設定・制御と量水板の自発光によって、水位計測の継

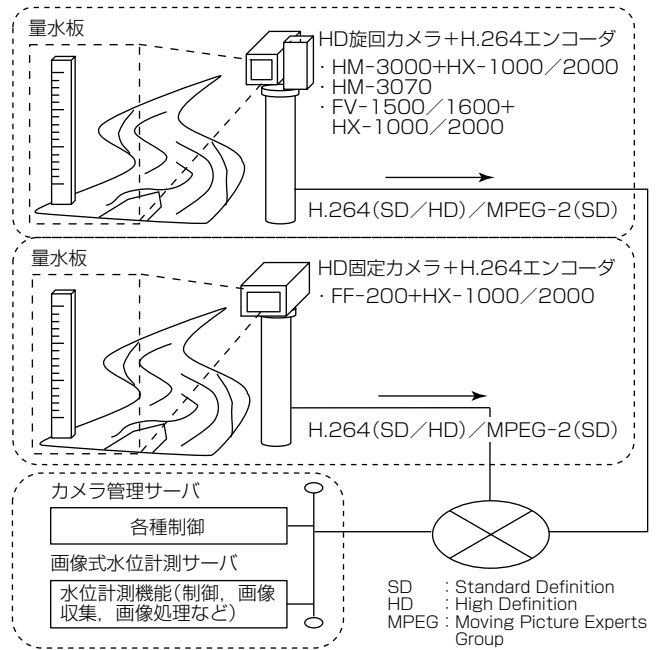


図1. 画像式水位計測サーバの構成

表1. 画像式水位計測サーバの仕様

項目	仕様
基準画像設定	1画角に1量水板を基準画像として設定
水位計測機能	10分ごとに、各画角の水位計測処理を並列実行
カメラ制御	プリセット制御し設定画角へ移動 プリセット制御によるカメラ位置ずれに対応可能
画像収集種別	H.264(SD/HD)/MPEG-2(SD)
画像収集最大数	最大100ストリーム
画像蓄積	JPEG画像を画角ごとに時刻情報と関連付けて蓄積
計測結果分析	各画角の計測時刻と計測結果(平均)を専用データベースへ記録
計測結果管理	画角ごとに属性情報、計測時刻、計測結果を専用データベースに最長5年間保存
計測結果出力	CSVファイル出力可能
計測データ閲覧機能	画像式水位計測サーバで閲覧可 遠隔パソコンからブラウザで閲覧可
蓄積静止画像再生	計測結果にひも付された計測時のJPEG画像を表示

JPEG: Joint Photographic Experts Group
 CSV: Comma Separated Values

続が可能である。

図1に画像式水位計測サーバの構成を、表1に画像式水位計測サーバの仕様を示す。

このサーバは、国交省の既設河川監視CCTVシステムと親和性の高いシステムであり、既設システムに追加設置することによって、従来実施していた映像確認による監視業務と並行して水位計測を行うことが可能となる。

3. 量水板画像を用いた水位計測技術

河川を撮影したCCTVカメラ映像から水位を計測することを目的として、従来水面が構造物に対して生ずる境界線(エッジ)等を検出する方法が提案されている。

今回、CCTVカメラ映像を用いて従来手法である動画による差分検出に対し、より安定した計測を可能とするため、静止画を用いて、最低水位時に撮影した量水板画像(基準画像)と水位計測対象画像との画像相関によって水面

の位置を検出し、水位を算定する画像式水位計測アルゴリズムを開発した。

この章では、開発したアルゴリズムの内容、及び実際の河川映像を用いて性能を評価した結果を示す。

3.1 方式

従来の河川水位の画像計測では、水面で生じる画像の揺らぎ、水面の動きや水上部分と水面との濃度の違い、水面によって形成されるエッジを特徴量として検出することで水面の位置を特定していた。しかし、日照変化・降雨等の外乱が発生する自然環境下では、このような特徴は水面以外の領域にも発生する可能性があり、河川管理の現場で連続的な常時計測の実用に耐える安定的な計測は困難であった。また、特に照度が十分に確保できない夜間等では、継続した計測が困難であった。画像の揺らぎ等を利用する場合にはフレームレートの高い動画が必要であり、更に制約が大きかった。

そこで、河川や下水道等には、水位の目視計測を目的とした量水板が設置されている点、かつ量水板には目視読み取りを容易にするため明瞭なテクスチャとしての目盛りが記されている点に着目した。この量水板を被写体として、あらかじめ取得する量水板全体が水面上に露出した画像(基準画像)と各時刻に取得された計測対象画像とを、テクスチャの類似度の評価尺度である画像相関によって比較することで、量水板上の水面の位置を検出して水位を算定する静止画を対象にした画像式水位計測アルゴリズムを開発した。画像相関法による画像の比較は、明度やコントラストの違い、局所的な不一致などに対して頑健であるため、環境の変化に頑健な水位計測が実現可能となる。

3.2 画像式水位計測アルゴリズム

図2の処理フローに基づき、3.1節の方式を用いて水位を算定するアルゴリズムを述べる。

3.2.1 基準画像定義処理フロー

水位計測処理の前処理として、あらかじめ基準画像の定義を行う(図2(a))。

(1) 基準画像での量水板領域の定義

最低水位時の水面上に露出している量水板のCCTV映像を取得し、量水板領域(量水板テンプレート)を示す画像座標4点を入力する。

(2) 基準画像での水位高の定義

量水板領域の上端／下端に対応する水位高を入力する(図2(b))。

定義した基準画像の例を図2(b)に示す。

3.2.2 水位計測処理フロー

定義された基準画像を用いて、各時刻の計測対象画像に対して水位計測を行う(図2(c))。図3に処理結果例を示す。

(1) 計測対象画像の取得

CCTV映像信号を、秒1コマ程度の静止画として取り

込み、水位計測処理への入力とする(図3(b))。

(2) 画像位置合わせ

基準画像と計測対象画像の間には、PTZ(Pan-Tilt-Zoom)方式のCCTVカメラでのプリセットポイント時の画角ずれや、カメラ設置ボールの揺れや変形等の影響で、最大で数十ピクセル程度の位置ずれが生じる。そこでテンプレートマッチングに基づき変換係数を算定し、計測対象画像中の量水板と量水板テンプレートをサブピクセルレベルで一致するように、計測対象画像の位置合わせを行う(図3(c))。

(3) 画像相関計算

位置合わせ後の計測対象画像中の量水板と量水板テンプレートの間で小領域ごとの相関係数を求め、マップ化する(図3(d))。相関係数は基準画像と計測対象画像のテクスチャ類似度を意味する。量水板が水面上に露出している領域は高い相関係数(白色表示)が得られ、量水板が水面下となる領域は低い相関係数(黒色表示)が得られることとなる。

(4) 水面位置検出・水位算定

相関係数マップを列ごとに縦方向にスキャンして勾配を求め(図3(e))、勾配が最大となる位置を、水面上領域と水面下領域の境界、すなわち水面の座標として検出する(図3(f))。次に、検出した水面の座標から量水板目盛りに対する平均

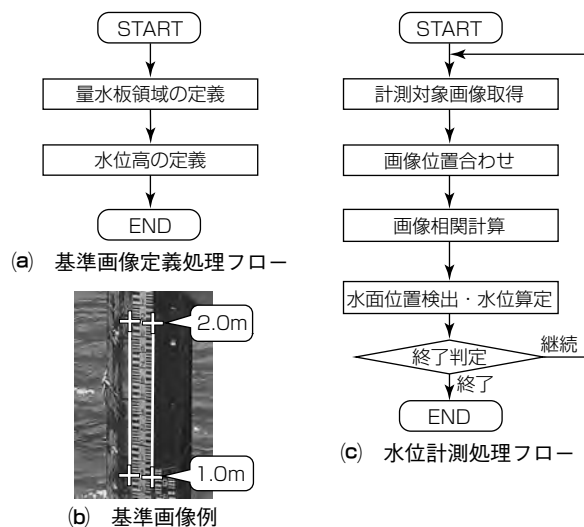


図2. 処理フロー

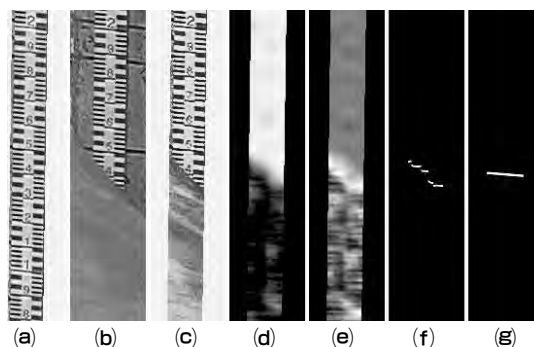
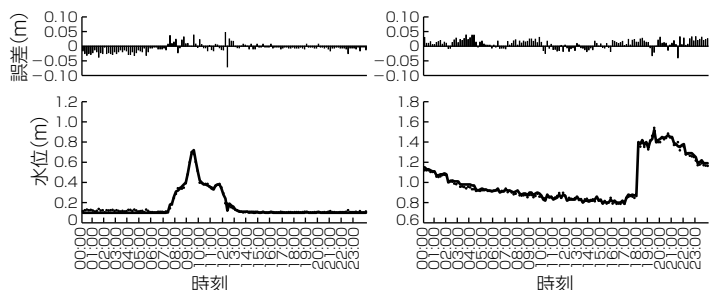


図3. アルゴリズムの処理結果の例



(a) 地点A (b) 地点B

図4. 計測地点の撮影映像例



(a) 地点A (b) 地点B

図5. 計測結果

位置を決定し(図3(g)), 量水板テンプレート定義時に入力した画像座標と水位高値を用いて水位に換算する。

3.3 評価実験

CCTVカメラによって記録された河川撮影映像を入力とした評価実験によってアルゴリズムの有効性の確認を行った。計測対象映像はフルHD(縦1920×横1080ピクセル)であり、量水板の3m分の長さが画像の縦方向に収まるようにカメラの向き及び画角を設定した。2地点の量水板によって、設置条件や天候の異なる24時間の映像を実験対象とした。2地点の撮影画像例を図4に示す。

画像ごとの水位計測結果と目視による水位読み取り値とを比較したグラフを図5に示す。目視読み取り値を真値とした場合の処理結果のRMSE(二乗平均平方根誤差)は地点Aでは1.6cm, 地点Bでは1.7cmであった。

どちらの地点でも夜間は畜光式量水板の自発光によって欠測(水位の記録が存在しない時間帯が生じること)は発生せず、24時間の計測が可能であった。また、夜間を除いた時間帯のRMSEはおおよそ1cmに収まっている。このことから、このアルゴリズムは多様な天候・照明条件でも安定的に水位計測が可能であることが確認できた。

4. む す び

今回、水位計測強化のニーズに対応するため、新たな画像式水位計測アルゴリズムを開発し、河川監視CCTVシステムへの適用を踏まえた画像式水位計測サーバ(SD/HD映像, 最大100地点対応)を開発した。これに先立ち、このアルゴリズム搭載の河川カメラ局や画像センサ機側盤等

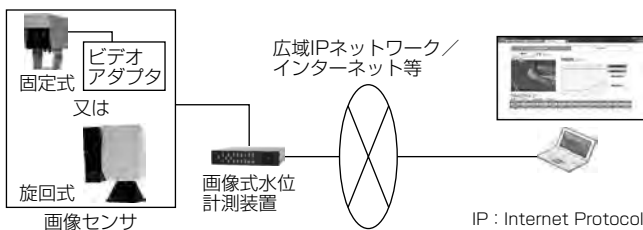


図6. 機側盤等に設置可能な画像式水位計測装置

に設置可能な小型の画像式水位計測装置(HD映像, 基本1地点対応)も製品化済みである。

画像式水位計測サーバは、主に、河川カメラ映像が常時集約される事務所等に設置し、カメラ管理サーバと連携して複数カメラ映像を対象に水位計測画像処理を行うことを想定している。これによって、河川監視CCTVシステムに対する水位計測機能の効率的な整備が可能となる。また、既存設備の多目的利用が図れるものである。

一方、画像式水位計測装置は、小規模からの水位計測機能の整備への適用や、水位観測所で従来センサとは別に画像式による計測でバックアップする現地設備としての設置が想定される。また、自治体の管轄する河川等、通信回線の細い環境で、現地で水位計測画像処理を行い、水位データを上位伝送するのに適している。図6に画像式水位計測装置のシステム構成イメージを示す。

これまで、三菱電機は河川管理の現場向けに河川監視CCTVシステムの製品群を提供してきた⁽³⁾。さらに、今回の画像式水位計測技術を適用した製品を加えることで、従来の水位計測設備の被災による計測不具合の補完や、よりきめ細かな河川縦断間隔での水位計測(計測地点の増強)に対するソリューションを提供し、頻発化している水災害への防災・減災や更なる河川管理の高度化に貢献する。

今後、水位計測画像処理の対象とする被写体の範囲を拡張することで、より柔軟な現場適用が可能な画像式水位計測の実現も検討していく。

参 考 文 献

- (1) 前原秀明, ほか: 濁水位時の量水板画像を利用したCCTVカメラ映像からの水位計測方法, 写真測量とリモートセンシング, 55, No. 1, 66~68 (2016)
- (2) 前原秀明, ほか: 濁水位時の量水板画像を利用したカメラ映像からの水位計測方法の検証, 日本写真測量学会平成28年度年次学術講演会 (2016)
- (3) 田村 聡, ほか: HD対応広域CCTV監視システム, 三菱電機技報, 89, No. 6, 353~357 (2015)

北海道新幹線デジタル列車無線システム

平松昭彦*
深野歳司*

Digital Train Radio System for Hokkaido Shinkansen

Akihiko Hiramatsu, Toshiji Fukano

要 旨

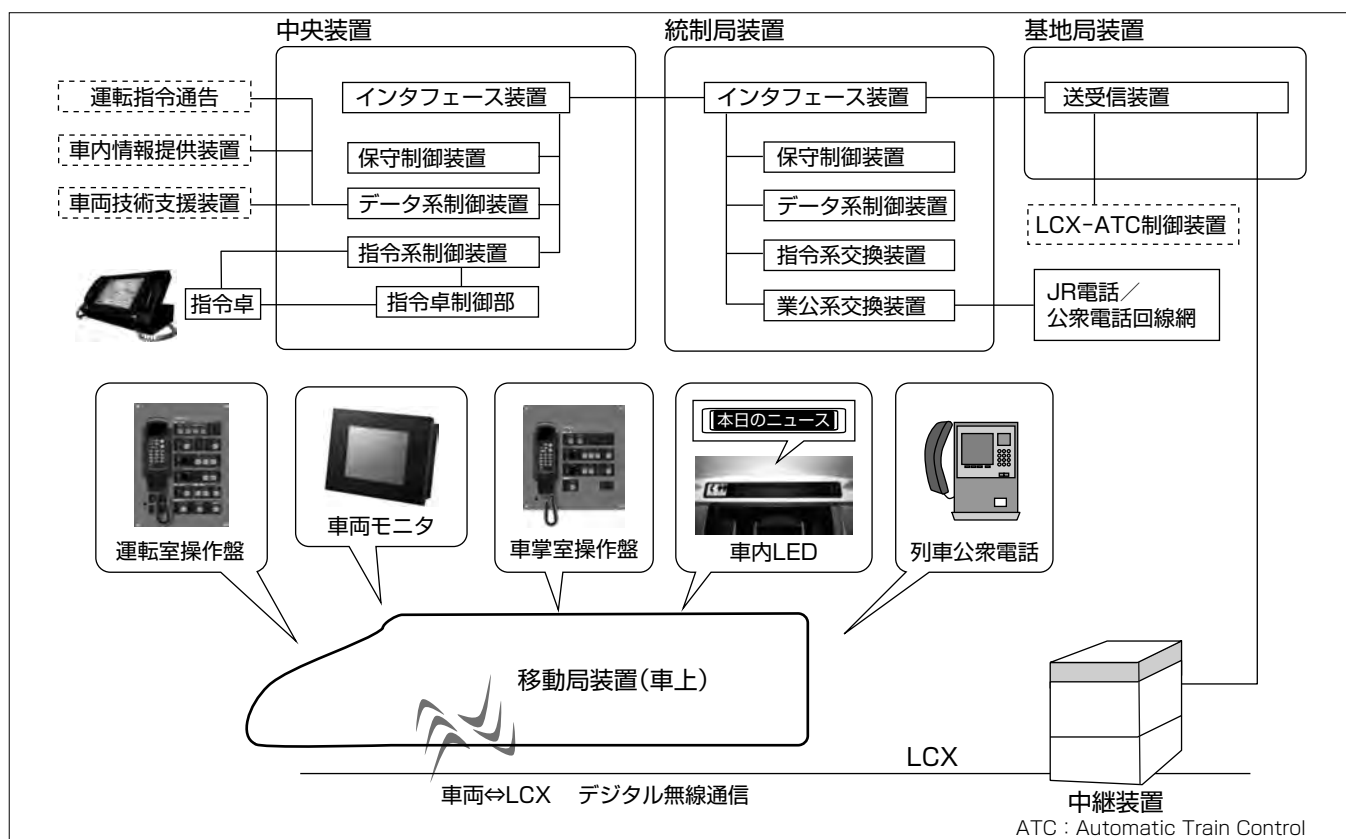
2016年3月に北海道新幹線の新青森～新函館北斗区間が開業した。延伸区間である新青森～新函館北斗区間は北海道旅客鉄道(株)の管轄であり、既存区間である東日本旅客鉄道(株)で管轄する東北新幹線(東京～新青森区間)と北海道新幹線が会社間をまたがり運行される。

新幹線デジタル列車無線システムは、中央装置、統制局装置、基地局装置、中継装置で構成された地上装置と列車に搭載する移動局装置間で、列車の位置在線管理を行い、音声通話、データ伝送によって地上装置と列車間の通信を行う。

2015年の北陸新幹線開業時に実現した東日本区間と西日本区間の2つのデジタル列車無線システムを相互に接続

した技術を拡張し、更に既設の東日本区間と今回新設した北海道区間のデジタル列車無線システムを接続する構成とし、システム全体の構成規模を“中央装置×3局、統制局装置×9局、基地局装置×74局、中継装置×1,223局”に拡大した。

会社間の中央装置、統制局装置を接続したことによって、お互いのシステム区間を走行又は会社間境界をまたがり走行する列車との指令系通話、業務公衆系通話、また会社間での列車位置情報の共有、サービスデータ伝送を可能としており、会社間をまたがる円滑な運行に貢献し、旅客サービスの向上につながった。



新幹線デジタル列車無線システムの構成

新幹線デジタル列車無線システムは沿線に敷設されるLCX(Leaky Coaxial cable: 漏洩(ろうえい)同軸ケーブル)を介して、中央装置、統制局装置、基地局装置、中継装置を始めとする地上装置と移動局装置間の無線伝送を行う。デジタル無線方式によって、高品質な音声回線を提供するとともに、データ回線を活用した運転指令通話ほか、あらゆるデータ伝送を行い、安全安定輸送に貢献し、旅客サービスの向上を担っている。

1. ま え が き

新幹線列車無線システムは、2002年のデジタル更新⁽¹⁾以降、東北新幹線では新青森へ延伸、2015年には北陸新幹線で金沢までの延伸を実現⁽²⁾するため、システム構成を順次拡大してきた。今回、新青森から新函館北斗まで延伸となり、JR東日本とJR西日本にまたがるシステムに、更にJR北海道を加えたシステム構成へ拡大した(表1)。

北陸新幹線でJR東日本とJR西日本が相互乗り入れしていることと同様に、北海道新幹線ではJR東日本とJR北海道が相互乗り入れする。

本稿では2016年3月に開業した北海道新幹線(函館延伸区間)のデジタル列車無線システム(以下“列車無線システム”という。)と会社間接続にかかわる機能仕様の特長について述べる。

2. 列車無線システム構成

2.1 列車無線システム全体構成

列車無線システムは、車両の運転士・車掌と総合指令所の指令員間で情報提供や状況報告の連絡をするために用いられ、中央装置、統制局装置、基地局装置、中継装置がツリー型で構成された地上装置と車両に搭載する移動局装置が、沿線に敷設したLCXを介して無線通信するシステムである。このシステムの装置構成を図1に示す。

北海道新幹線(新青森～新函館北斗間)列車無線システム

表1. 列車無線システムの変遷(デジタル更新以降)

	内容
2002年	東北上越新幹線(東京-盛岡, 東京-新潟)デジタル更新
2002年	東北新幹線(盛岡-八戸)延伸
2010年	東北新幹線(八戸-新青森)延伸
2012年	北陸新幹線(高崎-長野)デジタル更新
2015年	北陸新幹線(長野-金沢)延伸
2016年	北海道新幹線(新青森-新函館北斗)延伸

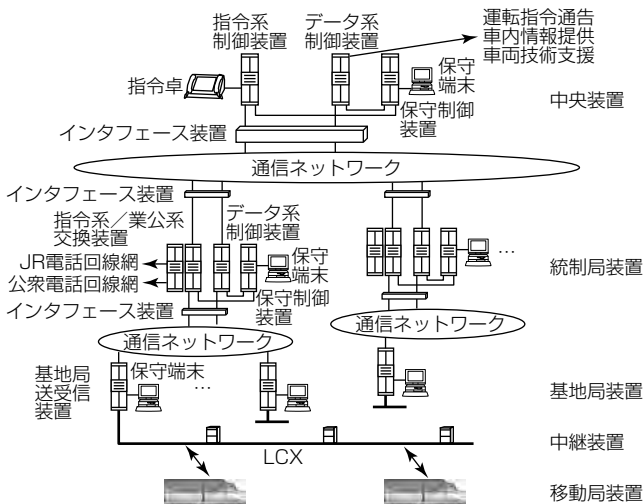


図1. 列車無線システムの装置構成

では、JR東日本区間の既設列車無線システムと中央装置・統制局装置など地上装置を新設したJR北海道区間の列車無線システムを相互に接続しており、システム全体はJR西日本区間を併せて3つの列車無線システムで構成されている。システムの全体構成を図2に示す。

2.2 JR北海道列車無線システムでの新設内容

列車無線システムの仕様を表2に示す。JR北海道列車無線システムでの新設内容は、次のとおりである。

- (1) 中央装置、統制局装置を札幌総合指令所内に構築
- (2) 新中小国U基地局から新函館基地局までの7基地局を札幌統制局装置に収容
- (3) 7基地局の配下に137中継装置(130中継架, 7終端架)を構築
- (4) 札幌総合指令所に構築したシステムの方式は既存の東北上越新幹線列車無線システムの方式に準拠

2.3 JR東日本列車無線システムでの変更箇所

JR北海道列車無線システムの新設追加に伴い、JR東日

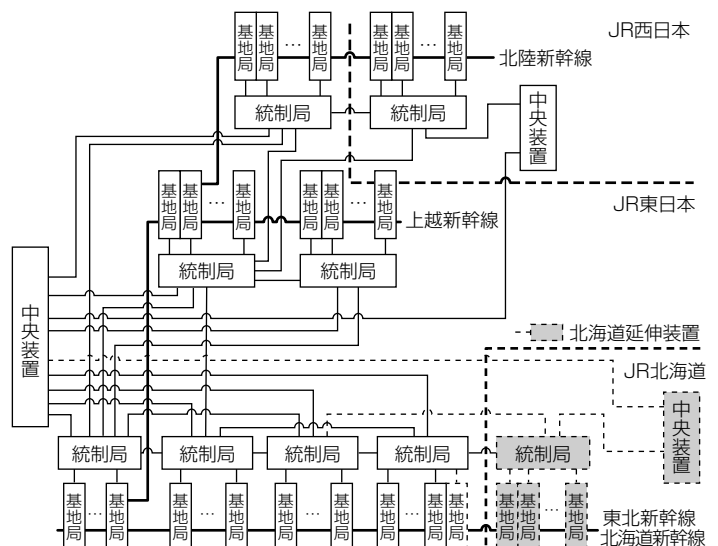


図2. システムの全体構成

表2. 列車無線システムの仕様

項目	仕様
無線方式	LCX方式
アクセス方式	基地局送信 時分割多重方式 移動局送信 時分割多重アクセス方式 (TDM-TDMA)
変調方式	基地局送信 $\pi/4$ シフトQPSK 移動局送信 $\pi/4$ シフトQPSK
周波数	基地局送信 400MHz帯 2波 移動局送信 400MHz帯 2波
送信出力	基地局送信 2W 移動局送信 4W
回線品質	サービスエリア 全線の99.99%以上の区間で使用 ビット誤り率 1×10^{-4} 以下
回線性能	音声 伝送方式 音声符号化方式(符号化方式 RL-CELP, 伝送速度 5.6kbps) データ 伝送速度 高速データ回線 64kbps 低速データ回線 9.6kbps

TDM-TDMA: Time Division Multiplexing-Time Division Multiple Access

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RL-CELP: Rail System-Code Excited Linear Prediction

表3. 列車無線システムの機能

項目	機能
音声系	運転指令電話 輸送指令と運転士間の指令電話機能
	旅客指令電話 旅客指令と車掌の指令電話機能
	業務公衆電話 列車乗務員(運転士、車掌等)と現業区とのJR電話機能 列車公衆電話機能
	車掌一斉情報 旅客指令から車掌への一斉連絡機能(指令→車掌のみ)
	運転一斉情報 輸送指令から運転士への一斉連絡機能 (指令→運転士のみ)
データ系	運転指令通告 輸送指令から乗務員への指令情報、運転情報を、車上のモニタ装置にデータ伝送する機能
	運転制御 無線代用保安システム(LCX-ATC)用のデータ伝送機能
	車内情報提供 旅客指令から列車内の乗客へ列車遅れ情報、在来線乗り継ぎ情報等を、車内LEDにデータ伝送する機能
	通信機器監視 列車無線車上装置の障害及び動作状況を指令に伝達する機能
	車両技術支援 車両モニタで監視している列車運転状態、車両機器状態等を輸送指令等にデータ伝送する機能

本列車無線システムでの変更箇所は次のとおりである。

- (1) 札幌中央装置向けの回線を中央装置に追加し、JR北海道列車無線システム中央装置と接続
- (2) 札幌統制局装置向けの回線を盛岡統制局、仙台統制局に追加し、JR北海道列車無線システム統制局装置と接続
- (3) 新青森D基地局を追加(新青森基地局を新青森U基地局と新青森D基地局に分離・延伸)
- (4) 中央装置と統制局装置に北海道延伸区間の7基地局情報を追加

3. サービス概要

函館延伸区間で、新青森駅～新函館北斗駅間を走行する列車と札幌総合指令所間で通話及びデータの送受を行い、列車運行にかかわる業務手段として使用する。

また、列車公衆電話及び車内情報設備は列車無線システムを介して通信事業者等と接続し、旅客サービスの提供も併せて行う。JR北海道の列車無線設備とJR東日本の列車無線設備とは会社間境界で切り分けを行うが、運用上必要な回線については相互に接続を行い、通話継続と追跡を行う。

新幹線列車無線システムの機能は、大きく音声系とデータ系に分けることができる。音声系では、運転士、車掌と地上間の音声通話になっており、車上と地上間の相互の連絡を行う。データ系では、列車無線はデータ伝送を行う伝送路として位置付けられており、ほかの機器と接続し、様々なアプリケーションシステムを提供する仕組みとなっている。表3に列車無線システムの機能を示す。

4. 会社間接続にかかわる機能仕様

4.1 指令系通話

各社指令では会社境界を越えて他社区間に在線する列車との通話接続、また列車が通話中に会社境界を通過する場合でも通話を切断することなく継続することが求められる。

会社間をまたがる接続機能は、北陸新幹線金沢延伸時に

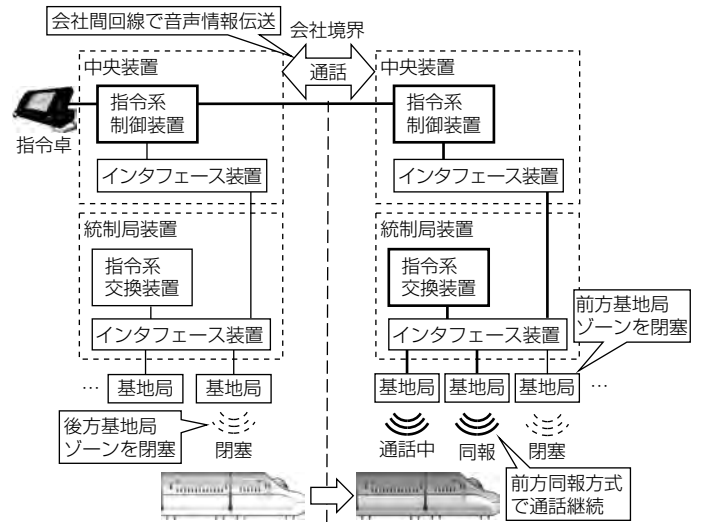


図3. 他社区間への通話継続後の指令系通話

JR西日本区間の列車無線システムとの接続で実現している。今回は他社区間の列車無線システムとの接続可能数を増加させることで、JR西日本区間の列車無線システムとの接続に加え、JR東日本区間とJR北海道区間の列車無線システムとの接続を可能とした。

会社境界での通話継続方式は、既存区間と同様に前方同報方式である。前方同報方式では同じ通話チャネルを使用する他の列車からの妨害を受けず、かつ、通話継続を保証するために、通話中ゾーンを基準に前方基地局への音声の同報、及び前方基地局ゾーンと後方基地局ゾーンの閉塞を行う。中央装置間で前方同報に必要な情報を通信することで実現しており、この方式によって、列車が高速移動しながら会社境界を通過しても、音声が届切れることなく通話継続できるハンドオーバーを可能としている(図3)。

また、次の機能によって、JR東日本とJR北海道との指令間で円滑な運用を可能としている。

- (1) 指令卓種類に応じて発着信できる範囲を基地局ゾーン単位で設定
- (2) 会社間境界ゾーンに在線する列車から着信があった場合にJR東日本及びJR北海道の両指令を呼出し
- (3) 他社指令への割り込み操作による、JR東日本指令、JR北海道指令、列車乗務員との3者通話機能
- (4) 指令卓で自社指令及び他社指令による列車通話状態表示

4.2 業務公衆系通話

指令系通話と同様に、業務通話を行う列車乗務員、公衆電話を使用する乗客が会社境界を意識することなく通話サービスを継続して使用できるよう、会社境界を越えて他社区間に在線する列車との通話接続、また列車が通話中に会社境界を通過した場合でも通話の継続が必要である。JR東日本とJR北海道の統制局装置間を接続し、業務公衆系の音声情報を伝送することで、会社間の相互接続、及び通話継続を実現した。

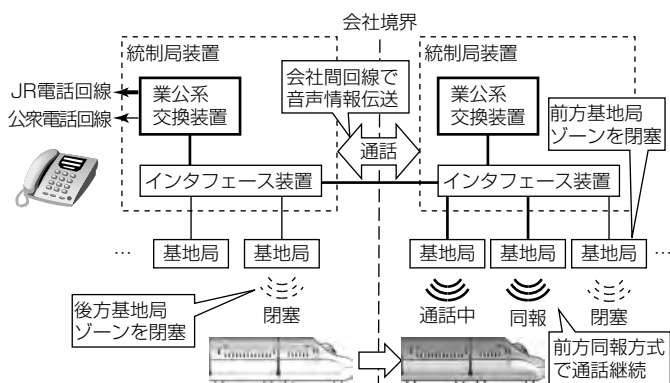


図4. 他社区間へ通話継続後の業務通話

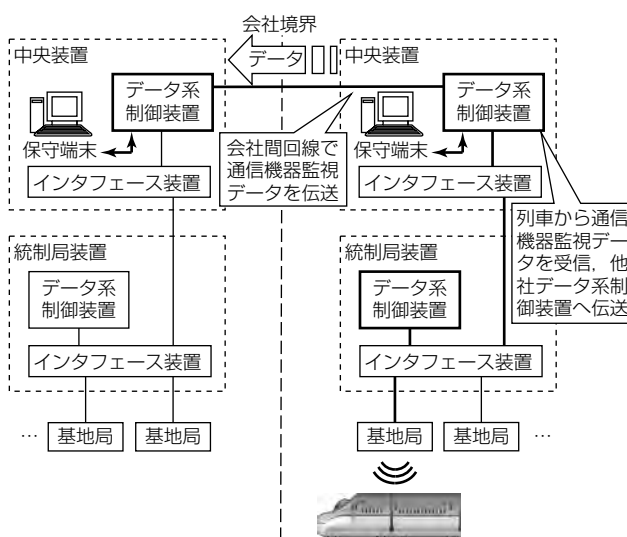


図6. 他社区間に在線する列車とのデータ伝送

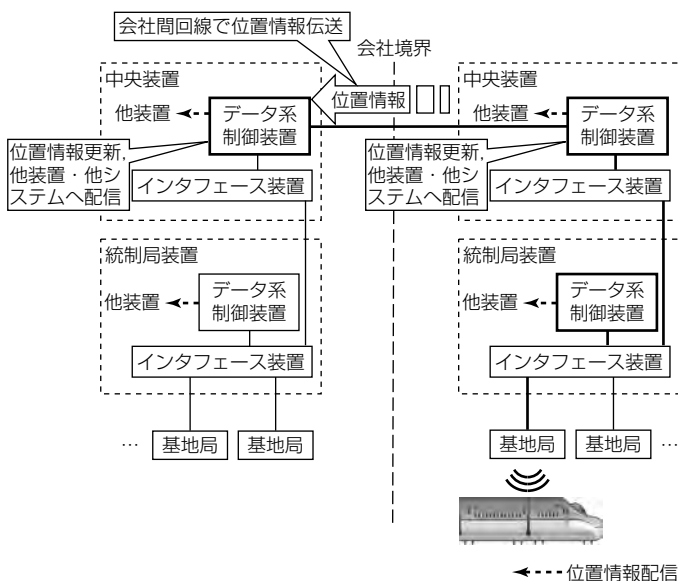


図5. 位置情報の流れ

会社境界での通話継続方式は指令系と同じく前方同報方式で、業務公衆系通話でも音声が続くことなく通話継続できるハンドオーバーを可能としている(図4)。

4.3 位置情報管理

他社区間に在線する列車との通話接続、データ伝送を可能とするためには、他社区間での列車の位置情報が必要である。北陸新幹線金沢延伸時に追加したJR東日本とJR西日本の列車無線システム間における位置情報の共有機能を拡張し、JR東日本とJR北海道の列車無線システム間でも位置情報の共有を可能とした。

各社システムの中央装置は自社区間に在線する列車の位置情報を相互に通知し、自社区間だけでなく他社区間に在線する列車の位置情報を管理する。位置情報の流れを図5に示す。列車走行によって在線基地局が変化する都度、在線基地局情報と列車状態情報を更新し、位置情報は運行

管理システムほか列車無線装置に接続する周辺装置へ配信する。自社区間だけでなく他社区間の在線情報をリアルタイムに指令員へ提供している。

4.4 データ系通信

列車運行の安全性を確保するため、車両の異常が発生した場合に、各社の指令員がその車両の状態を正しく把握し、乗務員に対する迅速かつ適切な指令を行うことが必要である。

データ系サービスで、車両に関する情報を伝送する通信機器監視と車両技術支援については、自社区間だけでなく会社境界を越える他社区間に在線する列車に対しても伝送可能とした。他社区間に在線する列車とのデータ伝送を図6に示す。会社間で通信機器監視、及び車両技術支援データを伝送する回線は、位置情報を共有するために接続した中央装置間の回線と共用とし、回線を効率的に使用している。

5. む す び

北海道新幹線函館延伸における列車無線システムと会社間接続に関する機能仕様の特長について述べた。三菱電機では、列車無線を通じて安心・安全・快適な社会の実現に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 藤岡 滋, ほか: 東北・上越新幹線デジタル列車無線システム, 三菱電機技報, 78, No. 2, 148~151 (2004)
- (2) 千田晴康: 北陸新幹線デジタル列車無線システム, 三菱電機技報, 89, No. 6, 333~337 (2015)

XG-PON光トランシーバ

石飛聡志*
三田大介**

Optical Transceiver for XG-PON System

Satoshi Ishitobi, Daisuke Mita

要 旨

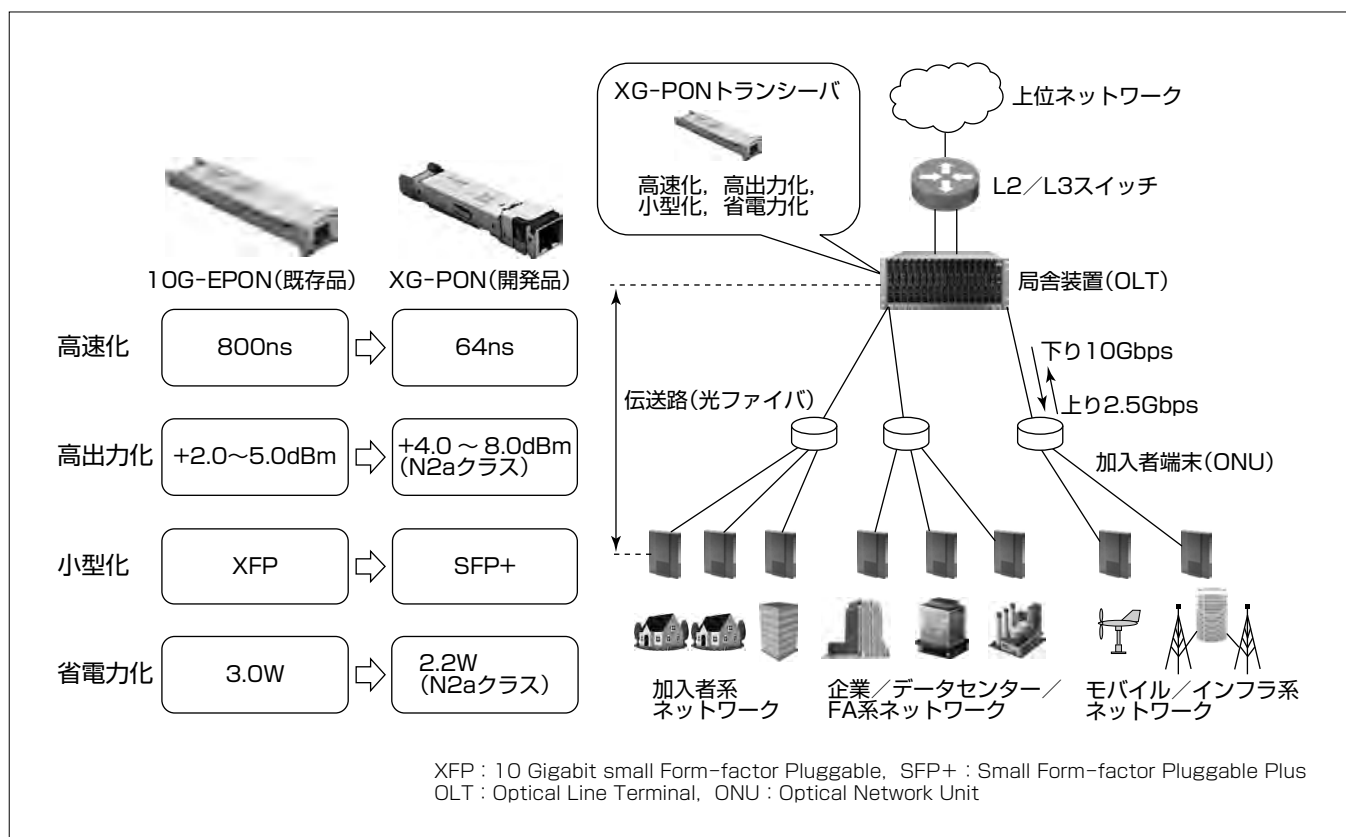
快適な社会の実現に向けて、光通信ネットワークには、フルハイビジョンの約4倍の解像度を持つ4Kの超高精細映像配信などを可能とする広帯域化が期待されている。既に国内のFTTH(Fiber To The Home)システムでは伝送速度を従来の10倍とする10Gbpsクラスの10G-EPON(10Gigabit-Ethernet Passive Optical Network)⁽¹⁾の導入が始まっている。また、海外では中国・北米を中心にXG-PON(10Gigabit capable PON)⁽²⁾が普及しつつある。広帯域なネットワークサービスを効率的に提供するため、システムに用いる光トランシーバには、高速化、高出力化、小型化、省電力化が求められている。

三菱電機では、高速化要求に対応するため、同期引き込み時間(ブリアンブル)64ns、同符号連続耐力72bitを満足するICを

開発⁽³⁾し、国際規格ITU-T(International Telecommunication Union-Telecommunication standardization sector) G987.2⁽⁴⁾に準拠する性能を得た。高出力化については、国際規格ITU-T G987.2 N2aクラスをターゲットとし、高光出力時にも伝送ペナルティを抑制するために光送信素子の制御方法を最適化した。

小型化については、基板構成、回路方式を見直し、SFP+サイズ(64.7×13.4×8.5(mm))に必要な機能を実装した。また、楕形(くしがた)放熱構造の採用によって温度上昇を抑制し、消費電力2.2W(N2a仕様)を達成した。

これらの取組みによって、高速、高出力、小型、省電力を特長とするXG-PON光トランシーバを実現した。



XG-PON光トランシーバ

中国・北米を中心に採用されている伝送速度10GbpsクラスのXG-PONシステム用光トランシーバを開発した。この製品は、高速な同期引き込み性能、ITU-T G987.2 N2aクラスの高い光出力、SFP+サイズ、2.2Wの省電力を特長とし、広帯域ネットワークの効率化に貢献する。

1. ま え が き

フルハイビジョンの約4倍の解像度を持つ4Kの超高精細映像配信などに対応するため、光通信ネットワークの広帯域化の要求が高まっている。既に国内のFTTHシステムでは伝送速度を従来の10倍とする10Gbpsクラスの10G-EPON⁽¹⁾の導入が始まっている。また、海外のFTTHシステムでは、中国・北米を中心にXG-PON⁽²⁾が普及しつつある。

FTTHシステムの局内装置(OLT)では、複数の加入者端末(ONU)からバースト的に入力されるパケットを高速に再生するための応答速度と、同符号が連続する入力信号に対して受信特性を満足する必要がある。また、ファイバの伝送損失、OLTの冗長化に用いる光スイッチ等の損失を補うため、光トランシーバにはより一層の高出力化が求められている。ネットワークサービスを効率的に提供するためには、OLT当たりの収容ユーザー数を増やすことが望ましく、光トランシーバには小型化、省電力化も要求されている。

これらの高速化、高出力化、小型化、省電力化の要求に対応する光トランシーバを開発した。

2. 光トランシーバの主要諸元

今回開発したSFP+サイズのXG-PON光トランシーバの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。標準的な光出力性能を持つ国際規格ITU-T G987.2 N1クラスと、高出力性能を実現したN2aクラス⁽⁴⁾の2品種を開発した。

本稿ではN2aクラス的光トランシーバを中心に述べる。



図1. SFP+サイズのXG-PON光トランシーバ

表1. 主要諸元

項目	仕様(N1)	仕様(N2a)
動作温度	0~70℃	
電源電圧	3.13~3.47V	
消費電力	2.0W以下	2.2W以下
光送信特性	光強度	2.0~6.0dBm
	中心波長	1,575~1,580nm
	消光比	8.2dB以上
	伝送ベナリティ	1.0dB以下
光受信特性	受信感度	-27.5~-7.0dBm
	プリアンプ	64ns
外形	SFP+	
寸法(W×L×H)	64.7×13.4×8.5(mm)	
光コネクタ	SC	

3. 光トランシーバの性能

3.1 高速化(受信部)

3.1.1 バースト光受信器構成

OLTに用いるXG-PON光トランシーバは、バースト光受信器と光送信器から構成される。図2に、バースト光受信器のブロック図を示す。バースト光受信器は、光-電流変換素子であるAPD(Avalanche Photo-Diode)、主要な受信特性を決定するバーストプリアンプIC、波形整形を行うバースト2R(Reshaping, Regenerating)-ICで構成する。

3.1.2 課 題

FTTHシステムでは、複数の加入者端末から光強度が異なるパケット信号がバースト的にOLTに送信される。バースト光受信器では、プリアンプとして規定された時間内に、信号の振幅を一定にして、同期引込みを完了する必要がある。プリアンプは、従来の10G-EPONでは800ns以下であったが、XG-PONでは64ns以下と規定されている。バースト光受信器では、高速にパケット信号に同期すること、すなわち応答速度を高速化することが求められている。一方で、パケット内のペイロードには一定の確率で0又は1が連続するため、安定な通信のためには同符号連続耐力を確保しなければならない。XG-PONでは、同符号連続耐力は72bit以上と規定されている。

応答速度の高速化を優先して設計した場合、72bitの0連続をパケットの間の無信号区間と誤判断し、信号を適切に再生できなくなる。したがって、トレードオフの関係がある高速応答と同符号連続耐力を考慮した設計が必要となる。

3.1.3 自己検出利得固定機能

高速応答と同符号連続耐力を両立させるため、パケット開始時はTIA(Trans-Impedance Amplifier)の利得を高速に制御し、収束完了後に利得を固定させる自己検出利得固定機能を開発することにした。この機能はバーストプリアンプIC⁽³⁾に実装した。

図3に、自己検出利得固定機能タイミングチャートを示す。初めに光信号①の入力を契機に外部からリセット信号②を入力し、各回路を初期化する。その後、TIAの出力強

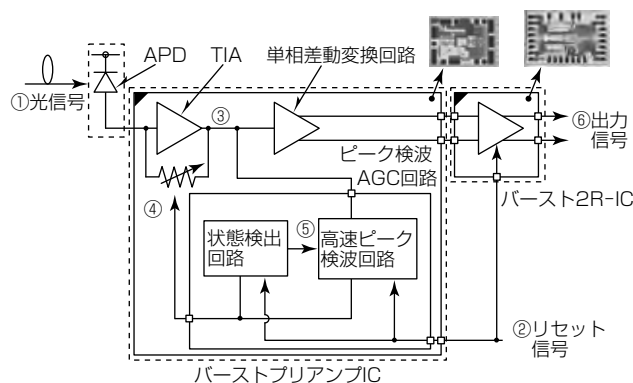


図2. バースト光受信器のブロック図

度を高速ピーク検波回路で検出する。高速ピーク検波回路の出力であるAGC(Auto Gain Control)信号④を用いてTIA内部の可変帰還抵抗を制御し、TIAの出力振幅が所定値となるようにTIAの利得を高速にフィードバックする。このため、プリアンプの開始から短時間で一定値に収束し、光信号①を適切に受信ができるようになる。

次に、状態検出回路では、AGC信号④の変化を監視し、フィードバック動作の収束を自己検知後に、利得を固定する。利得固定以降は、同符号が連続する信号が入力されても利得が一定に保持されるため、0符号連続をプリアンプと誤って利得を急変してしまうことがなくなり、光信号①を適切に再生する。

3.1.4 受信特性

図4に、光トランシーバのバースト信号に対する応答波形とBER(Bit Error Rate)特性を示す。信号パッケージは、64nsの10交番信号によるプリアンプとPRBS(Pseudo Random Bit Sequence) 2²³-1及び72bitの同符号連続データを組み合わせたペイロードで構成した。また、直前パッケージは、システム規格上の最大光強度である-9dBmとし、パッケージの先頭で外部からリセット信号を入力した。

応答速度(同期に要する時間)の実測値は20nsであり、プリアンプ規格64nsを満足した。また、同符号連続72bitを持つペイロードに対して、最小受信感度-32.5dBm

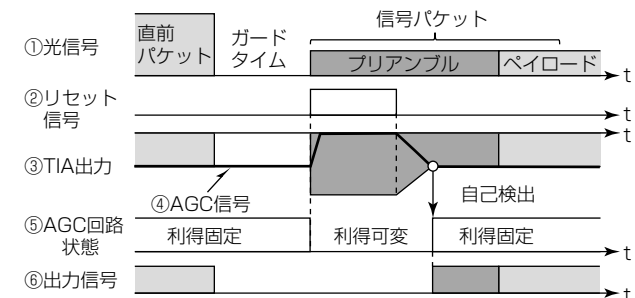


図3. 自己検出利得固定機能タイミングチャート

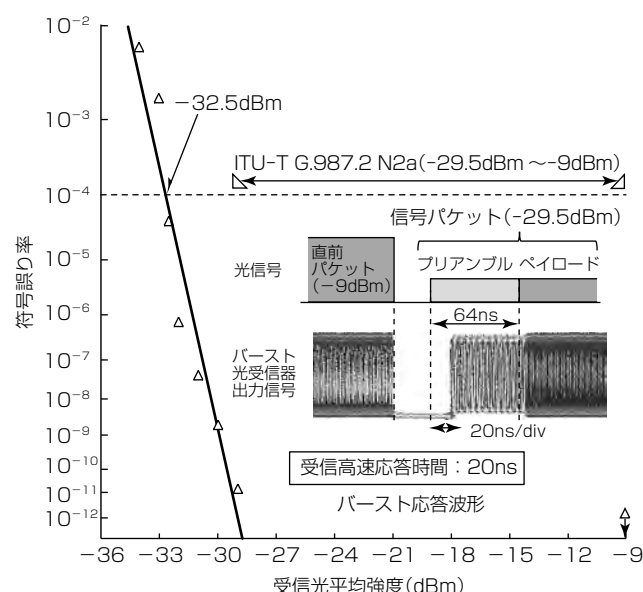


図4. バースト応答波形とBER特性

(BER = 10⁻⁴), 最大受信感度-9dBm(BER < 10⁻¹²)が得られ、ITU-T G.987.2 N2aクラスに要求される受信感度の規格(-29.5~-9dBm)を満足した。

3.2 高出力化(送信部)

サービス提供範囲を広げるための長尺の光ファイバ、装置冗長を実現するための光スイッチやカプラの挿入損失を許容するため、光トランシーバには一層の高出力化が求められている。光送信素子には、光トランシーバの光強度を高めると、スペクトル幅が広がるという特徴があり、光ファイバ伝送後の波形が劣化する。波形の劣化量を受信性能の劣化量として表現したものを伝送ペナルティという。光強度と伝送ペナルティはトレードオフの関係にあり、両者の値を決定する光送信素子の駆動電圧を最適化することで、高い光強度時の伝送ペナルティを抑制した。

図5に伝送ペナルティの試験系、図6に伝送ペナルティの特性を示す。光強度6.0dBmで、伝送ペナルティは0.4dB以下になり、国際規格ITU-T G.987.2 N2aクラスに要求される送信性能を満足する結果が得られた。

3.3 小型化

システムの高密度化のために光トランシーバのサイズをSFP+サイズ(64.7×13.4×8.5(mm))とすることが求められている。SFP+サイズは、従来のXFPサイズ(87.0×18.4×8.5(mm))の約50%の容積に相当する。限られた容

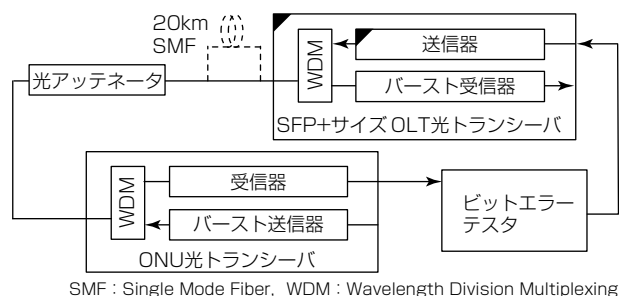


図5. 伝送ペナルティの試験系

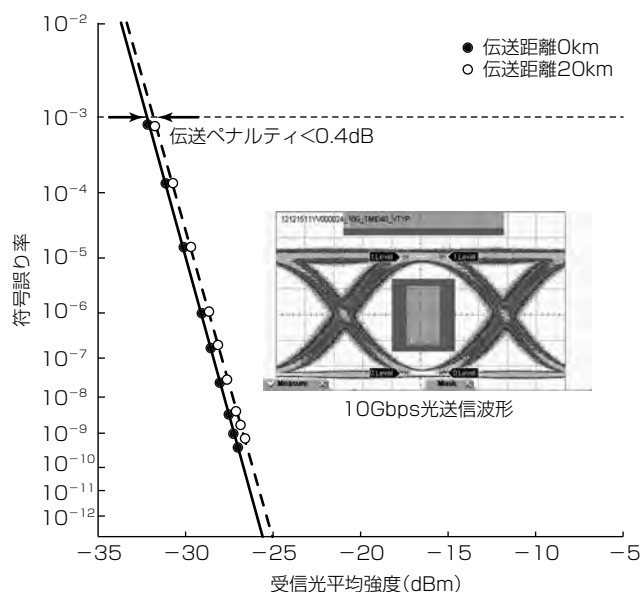


図6. 伝送ペナルティの特性

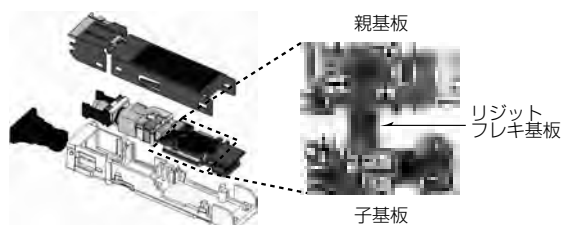


図7. リジットフレキシ基板を適用した光トランシーバ

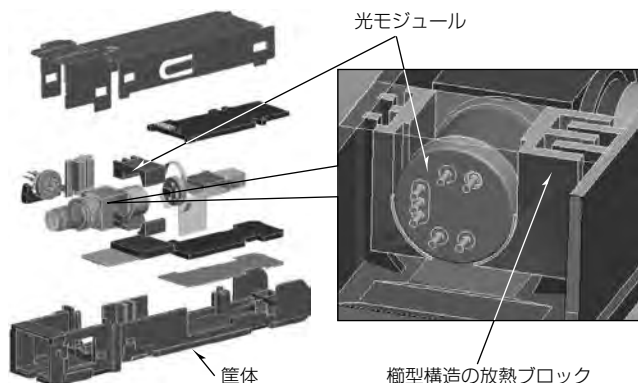


図8. 櫛型構造の放熱ブロック

積に必要な回路を実装するため、部品実装面積の確保と回路の小型化の両面から検討した。

部品実装面積を確保するため、図7に示すようにXFPでは1枚であった基板を、親基板と子基板の2枚構成とし、基板間をリジットフレキシ基板で接続した。低背部品の採用、親・子基板の実装部品が干渉しない部品配置によって、2枚の基板を狭い間隔で重ねることができた。

また、次に代表される方策によって部品点数を20%削減することで回路の小型化を実現した。

(1) ソフトウェア化

従来はトランジスタ、OPアンプ、チップ抵抗等計10点のハードウェアで構成していた定電流源回路を抵抗2点とソフトウェア制御で簡素化

(2) 部品共用化

電源デカップリングコンデンサの共通化

3.4 省電力化

3.4.1 自社製バースト受信IC

従来機種ではバーストプリアンプICとバースト2R-ICの消費電力は、0.75Wを占めていた。今回開発した2種類のICに次の施策を適用することによって、IC合計の消費電力を0.75Wから0.40Wに低減した。

(1) バーストプリアンプIC

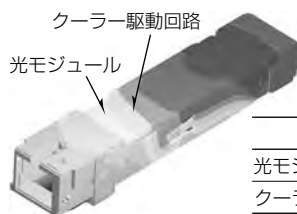
出力部に消費電力が小さくなる回路方式の採用

(2) バースト2R-IC

消費電力を抑制するよう利得を最適化

3.4.2 放熱構造

光トランシーバの小型化、省電力化で、放熱構造が重要である。小型化に伴い筐体(きょうたい)の表面積が小さくなるため、放熱効果が低下し、内部の温度が筐体表面温度



	シミュレーション	実測
光モジュール	3.26℃	3.00℃
クーラー駆動回路	9.06℃	8.20℃

図9. 櫛型構造の放熱ブロックを用いた温度上昇のシミュレーション及び実測結果

より上昇する。このとき光モジュール内部の光送信素子の温度を下げるようにクーラー素子が働くため、消費電力が増加するという悪循環が生じる。一方、放熱構造を改善し、光モジュールの温度上昇を従来の10℃から5℃以下に改善できれば、0.06Wの省電力化が見込める。

光モジュールの寸法にはばらつきがあるため、光モジュールの放熱ブロックを直接光トランシーバ筐体に接触させて放熱効率を高めることは難しい。このため、図8に示すように放熱ブロックを筐体と互い違いに噛み合う突起形状(櫛形状)にすることで、放熱面積を増やし、同時に光モジュールの寸法公差を吸収できるよう設計した。

櫛型構造の放熱ブロックを用いた光トランシーバの温度上昇のシミュレーションと実測の比較を図9に示す。実測はシミュレーションとよく一致しており、高温度時の光送信素子の温度上昇は3.00℃に抑制された。このように櫛型構造の適用によって、消費電力を0.07W削減できた。

4. む す び

高速、高出力、小型、省電力を特長とするSFP+サイズXG-PON光トランシーバを開発した。高速化は独自の自己検出利得固定機能を実装した専用ICによって、高出力化は光送信素子の制御方法の最適化によって実現した。また、基板構成、回路方式の見直し、櫛形放熱構造の採用によって、SFP+サイズで消費電力2.2Wの小型・省電力化を達成した。このトランシーバは広帯域ネットワークサービスの提供に寄与する。

参 考 文 献

- (1) Yoshima, S., et al.: Latest progress of burst-mode transceiver for 10G-EPON, ECOC2012, Tu.1.B.3 (2012)
- (2) Kim, J., et al.: XG-PON1 OLT transceiver with a single-chip burst-mode receiver, CLEO/IQEC/PACIFIC RIM 2011, 1323~1324 (2011)
- (3) Mita, D., et al.: 2.5Gbit/s burst-mode receiver with rapid response and high tolerance to CIDs for PON systems, Electron. Lett., **51**, No.15, 1180~1182 (2015)
- (4) XG-PON1, ITU-T Recommendation G.987 Series (2010)

CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ

斧原聖史* 石井健二***
 飯島 理** 備海正嗣***
 大浦崇靖**

100Gbps Digital Coherent Transceiver Compliant with CFP Multi-Source Agreement

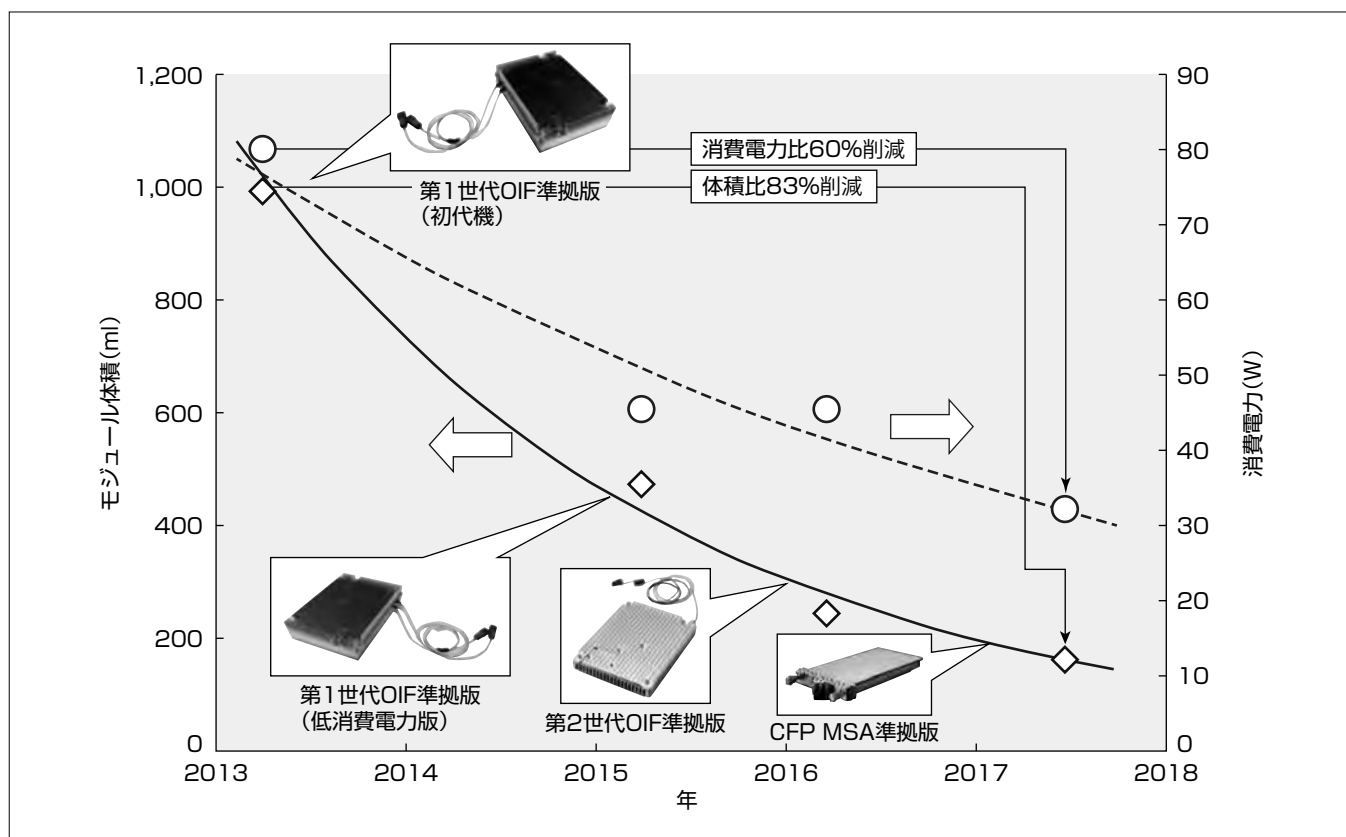
Kiyoshi Onohara, Osamu Iijima, Takayasu Oura, Kenji Ishii, Masashi Binkai

要 旨

基幹系光通信システムでは、長距離大容量・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、CFP MSA(Centum gigabit Form-factor Pluggable Multi-Source Agreement)準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバを開発した。最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIを新規採用し、光部品配置及び高速信号配線の最適化、高効率放熱技術によって、CFPパッケージ(145×82×14(mm))に実装した。従来製品である第1世代OIF(Optical Internetworking

Forum)準拠版(初代機)と比較して体積比で83%削減を実現した。また、光・電気デバイスの高集積化と適応型電圧制御(Adaptive Voltage Scaling)技術によって、消費電力32W以下(初代機比で60%削減)を達成した。

高性能の誤り訂正機能として低密度パリティ検査符号を採用し、光信号の雑音耐力を初代機比で1.5dB改善した。伝送距離換算で1.4倍延伸化し、最大3,000km伝送が可能である。また、高密度波長多重システムの周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能とし、周波数利用効率改善への貢献が期待できる。



基幹系ネットワークを支える100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの変遷

三菱電機は2013年にデジタルコヒーレント方式を採用した100Gbps光トランシーバの第1世代OIF準拠版(初代機)を開発した。その後、小型・低消費電力化の市場要求によって第1世代OIF準拠版(低消費電力版)、第2世代OIF準拠版を市場投入してきた。今回開発したCFP MSA準拠版は、初代機と比較して消費電力比60%削減、体積比83%削減を実現した。環境に配慮しつつ、今後の通信トラフィック需要増に貢献する。

1. ま え が き

基幹系光通信システムでは、長距離大容量・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、データ信号を光位相変調し、光ファイバを介して伝送するデジタルコヒーレントトランシーバの小型・低消費電力化が進んでいる。光ネットワーク技術に関するフォーラム標準化団体であるOIFが100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの標準化⁽¹⁾を推進しており、これまで、第1世代光トランシーバ(5×7(in))、第2世代光トランシーバ(4×5(in))が標準化されている。一方、CFP MSA⁽²⁾⁽³⁾は光トランシーバベンダーが市場への安定供給を目的にパッケージサイズやピン配置等の仕様を取り決めたプラグブル型の光トランシーバ規格であり、クライアント側インタフェースのデファクト標準として広く普及している。近年、LSIの微細化技術の進展によって、ライン側インタフェースとしてデジタルコヒーレントLSIを搭載したCFPトランシーバの開発が進められており、クライアント側インタフェースのCFPトランシーバと区別するためコヒーレントCFP又はCFP-DCO(CFP-Digital Coherent Optics)トランシーバと呼ばれている。

2. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの主要諸元と機能

2.1 主要諸元

開発したCFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIによって、高性能の誤り訂正機能(低密度パリティ検査符号)⁽⁴⁾を実現し、光信号雑音耐力を1.5dB改善するとともに、最大伝送距離を従来比1.4倍に延伸した。また、光出力波長は1,529～1,567nmの範囲に対応し、周波数利用効率を高めるため周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能とした。最小受光感度は、-30dBmを確保し、光ファイバ伝送路中に光ファイバ増幅器が不要となる無再生中継伝送が最大100kmまで可能である。

消費電力は、光・電気デバイスの高集積化とデジタルコヒーレントLSIに対する適応型電圧制御技術⁽⁵⁾によってCFP MSAの規格である32W以下を達成した。

2.2 機能

機能ブロック図を図2に示す。デジタルコヒーレントトランシーバは、デジタルコヒーレントLSI、波長可変光源、光変調器、コヒーレント受信器、監視制御IC、電源ICから構成される。クライアント側の送信データ信号(OTL4.10準拠)は、デジタルコヒーレントLSIで、誤り訂正符号が付与され、マッハツェンダー型光変調器で、水平

偏波と垂直偏波にそれぞれ変調した偏波多重四位相変調信号を生成し、光信号として出力される。受信側は、コヒーレント受信器で光信号を偏波ダイバシティ受信し、デジタルコヒーレントLSIに入力する。デジタルコヒーレントLSIでは、高速A/D(Analog/Digital)変換部でデジタル信号に変換した後、デジタル信号処理によって、搬送波位相推定、偏波分離、波長分散補償、及び誤り訂正復号を行う。リファレンスクロックは、デジタルコヒーレントトランシーバの位相同期回路に用いられ、デジタルコヒーレントトランシーバが搭載されるホストボードから供給される。このリファレンスクロックはOTL4.10信号のレーン速度の1/16又は1/64を選択可能である。

監視制御ICでは、各コンポーネントの初期設定や状態監視を行う。送受信データ信号の符号誤り訂正数、受信Q



図1. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ

表1. 主要諸元

項目		仕様	備考
動作ケース温度(℃)		0～70	
電源電圧(V)		3.3	
消費電力(W)		32	
光送信特性	光出力パワー(dBm)	0	
	光出力波長(nm)	1,529～1,567	C帯
	周波数グリッド(GHz)	12.5	
	波長安定度(GHz)	±1.5	
	EVM(%rms)	12	
光受信特性	最小受光感度(dBm)	-30	
	DGD耐力(ps)	150	0.1dBペナルティ
	最大伝送距離(km)	3,000	
電気主信号入出力特性	主信号インタフェース	OTL4.10	
外形	寸法(W×L×H)(mm)	145×82×14	
	光コネクタ	LC型	

EVM : Error Vector Magnitude, DGD : Differential Group Delay

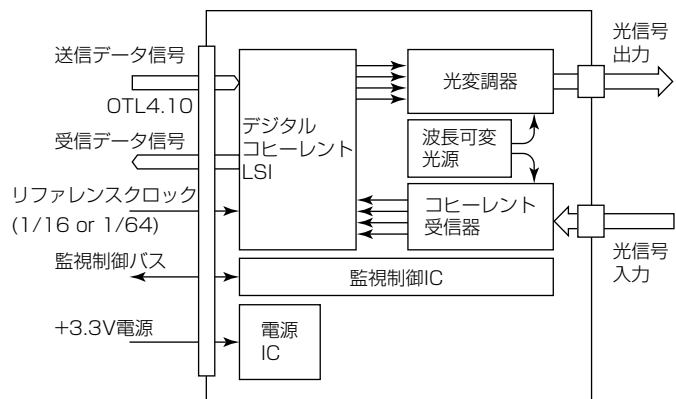


図2. 機能ブロック図

値等の統計データ、及び警報信号を処理し、監視制御パスを通じて、ホストボード内の監視制御ICと通信することができる。

3. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの性能

3.1 プリント基板の熱設計

デジタルコヒーレントトランシーバの小型化で、プリント基板の熱設計は重要である。特に、100Gbpsを超える超高速信号に対するデジタルコヒーレント処理は、最新プロセスルールを用いたLSIでもトランシーバ全体の消費電力の約半分を占めるため、精密な熱解析によって周辺回路への影響を最小限にとどめる部品配置を行う必要がある。今回、熱流体解析ツールによってプリント基板上の発熱部品をモデル化し、プリント基板の熱解析を実施した。図3に筐体(きょうたい)温度70℃におけるプリント基板の部品面、はんだ面の温度分布を示す。発熱部品の実装が多い部品面の温度が高いため筐体への熱伝導経路を設け、部品配置を適切に行うことで、プリント基板の表面温度が最大で90℃以下となることを確認した。

3.2 消費電力特性

CFP MSAで規定されている消費電力の最大値は32Wであり、従来のOIF準拠版と比較して10W以上の削減が必要となる。そのため、デジタルコヒーレントトランシーバの各構成部品での低消費電力化が重要なポイントとなる。ここでは、低消費電力化技術の1つとして、デジタルコヒーレントLSIでの適応型電圧制御技術について述べる。



(a) 部品面



(b) はんだ面

図3. プリント基板の温度分布

適応型電圧制御とは、LSIの駆動電圧及びジャンクション温度をモニタし、動作条件に応じて最適な電圧を供給する技術である。図4に適応型電圧制御技術の構成を示す。LSI内の電圧及び温度モニタ結果から電圧制御部で電圧条件を算出する。デジタルコヒーレントLSIと電源ICとは電源管理バス(PMBus)で接続されており、電圧制御部で算出した設定電圧結果を電源ICに通知し、電源ICは通知された電圧をデジタルコヒーレントLSIに供給する。デジタルコヒーレントLSIは、起動時に各機能ブロックを初期設定する際に、急激な消費電力上昇に伴う電圧降下が生じるため、運用時よりも高い電圧を供給する必要がある。このため、適応型電圧制御による消費電力抑圧効果は非常に高い。

図5に適応型電圧制御技術によるデジタルコヒーレントLSIへの供給電圧に対するデジタルコヒーレントトランシーバの消費電力の測定結果を示す。筐体温度70℃の条件で測定した。適応型電圧制御技術によってLSIへの供給電圧を600mV以下とした場合、CFP MSAの規定値である32W以下となることを確認した。

3.3 光信号送信部

100Gbpsを超える超高速な光位相変調信号を扱うデジタルコヒーレントトランシーバで、プリント基板上の高速電気信号配線間の相互干渉や、マッハツェンダー型光変調器での光変調歪(ひず)みによって信号劣化が生じる。高速電気信号配線間の相互干渉による信号劣化を抑圧するため、4チャンネルの高速電気信号の配線幅、及び配線パターンの最適化を行った。図6にプリント基板の超高速電気信号配線の遠端クロストーク解析の結果(チャンネル1)を示す。

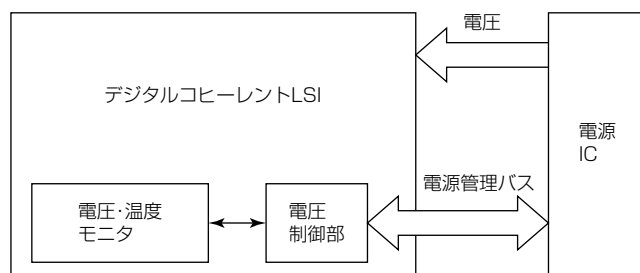


図4. 適応型電圧制御技術の構成

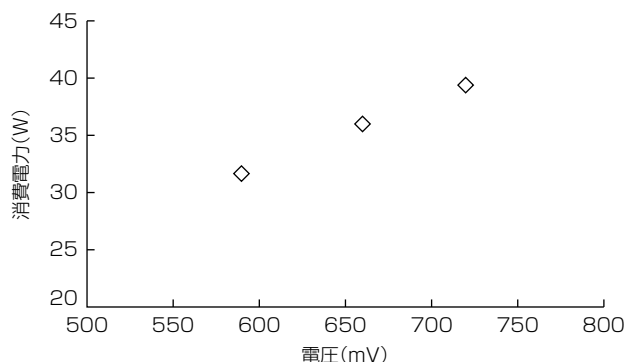


図5. デジタルコヒーレントLSIへの供給電圧と消費電力

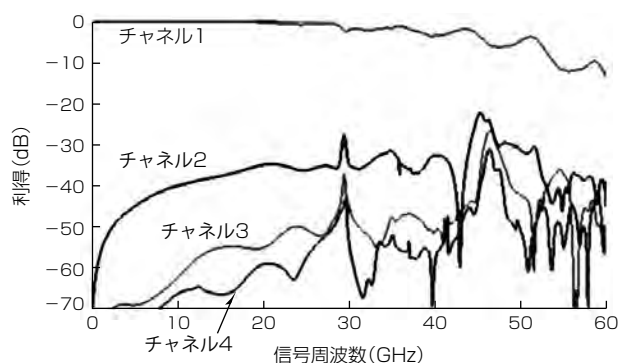


図6. 超高速電気信号配線クロストーク解析結果

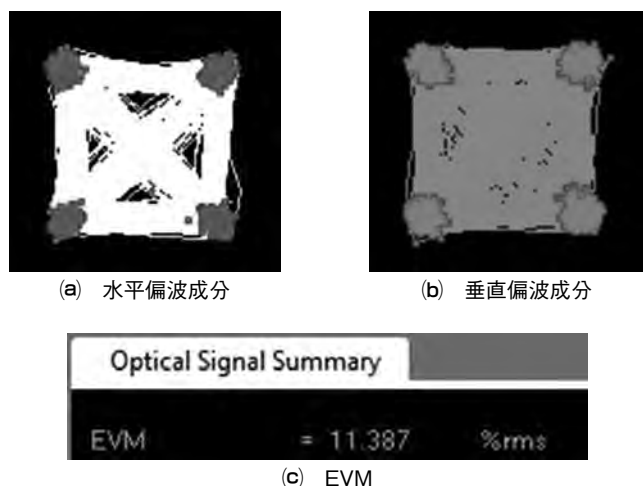


図7. コンステレーションマップ及びEVM

チャンネル1の信号成分に対するチャンネル2～4からのクロストークが、15GHzで-35dB以下となることを確認した。

また、光変調歪みについては、エラーベクトル振幅(EVM)の評価を行った。EVMは、復調信号が複素平面上にプロットされるコンステレーションマップの基準点からのベクトル差のスカラ量と基準ベクトルのスカラ量との比で定義される。この評価手法はコヒーレント受信によるデジタル信号処理が必要なため、厳密には送信側だけの信号品質を評価できない。このため、リファレンス受信器(Keysight N4391A)を用いて評価を行った。図7に光信号のコンステレーションマップ及びEVMを示す。EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値11.387% rmsが得られ、良好な光信号品質が得られた。

3.4 光信号受信部

光受信側では、符号誤り訂正限界における受信光平均強度が重要な性能指標となる。これを最小受光感度と定義する。今回開発したデジタルコヒーレントトランシーバでの符号誤り訂正限界の受信Q値は、6.2dB(誤り訂正後ビット誤り率： 10^{-15})であり、符号誤り率は 2×10^{-2} に相当する。図8に波長1,529nm、環境温度25℃での受信光平均強度に対する符号誤り率特性を示す。受信信号の符号誤り訂正

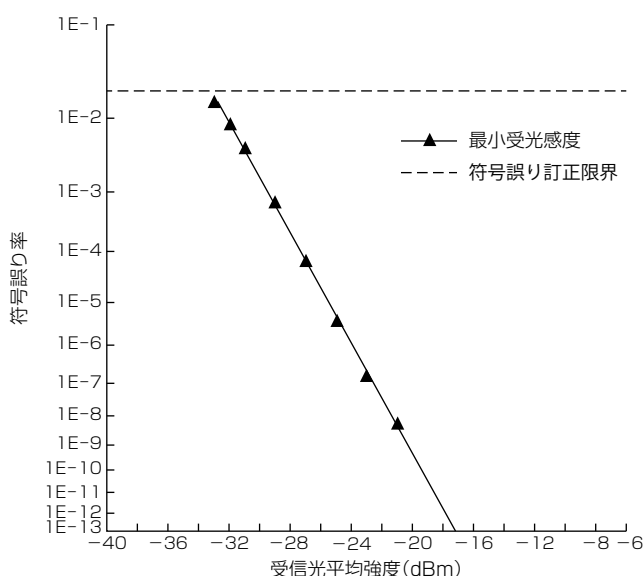


図8. 受光感度特性

限界での受信光平均強度が、-30dBm以下であることを確認した。これは、光出力信号平均強度を0dBmとした場合、光ファイバ伝送路中に光ファイバ増幅器が不要となる無再生中継伝送が最大100kmまで可能であることを示す。

4. む す び

CFP MSA仕様に準拠した100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバを開発した。光信号送信部、光信号受信部ともに設計仕様を満足する良好な特性を示し、筐体温度70℃での環境下で32W以下の低消費電力化も実現した。この開発成果が、将来の光通信ネットワークの大容量・高密度化に寄与することを期待する。

この開発の一部は、総務省委託研究“巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発”の成果である。

参 考 文 献

- (1) OIF MSA : Implementation agreement for 100G long-haul DWDM transmission module-Electromechanical(MSA-100GLH) (2011)
- (2) CFP MSA : CFP hardware specification Rev.1.4 (2010)
- (3) CFP MSA : Management interface specification Ver.2.4(R06b) (2015)
- (4) Miyata, Y., et al. : Performance Improvement of a Triple-Concatenated FEC by a UEP-BCH Product Code for 100Gb/s Optical Transport Networks, Proc. OECC/PS2013, ThR2-2 (2013)
- (5) Chandrakasan, A. P., et al. : Low-power CMOS digital design, IEEE J. Solid-State Circ., 27, No.4, 473~483 (1992)

液晶ディスプレイの各種材料の散乱が コントラスト視野角に与える影響

結城昭正*
奥本和範**

Influences of Scattering on Contrast Viewing Angle of Liquid Crystal Displays

Akimasa Yuuki, Kazunori Okumoto

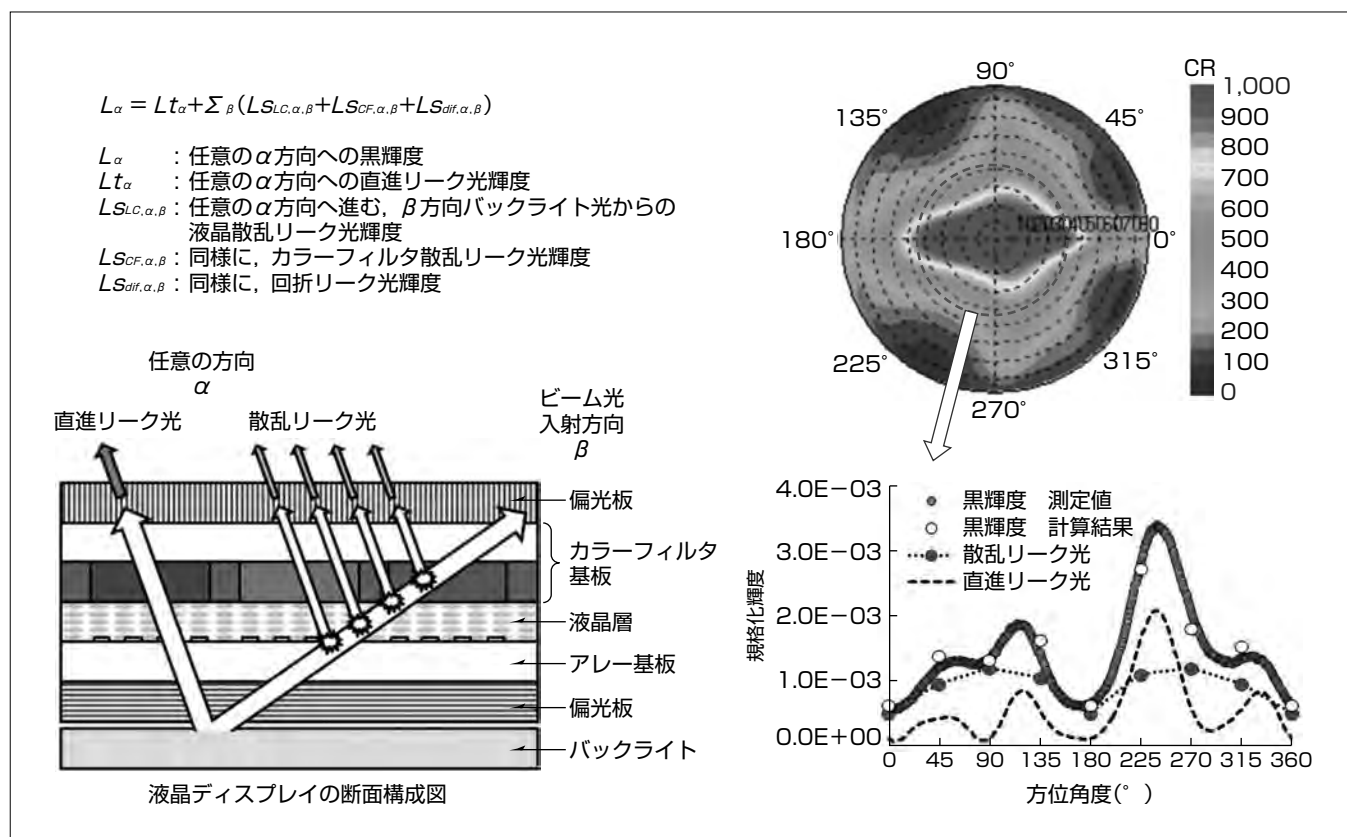
要 旨

三菱電機は、液晶ディスプレイの任意の斜め方向のコントラスト比(CR=白表示時の輝度/黒表示時の輝度(以下“黒輝度”という。))に影響を及ぼす各種散乱光とその偏光板透過率の特性を明らかにし、散乱リーク光輝度を定量的に予測する計算モデルを開発した⁽¹⁾。

このモデルは、バックライト光を様々な方向に進むビーム光線の束と考え、各ビーム光線が液晶パネルを通過する際に発生する任意の方向への散乱リーク光輝度を積算することによって、その任意の方向の黒輝度を計算する。この計算モデルによって、液晶パネルのカラーフィルタや液

晶層などの構成材料の光散乱特性、画素形状による回折光、位相差板を備えた偏光板での光リーク特性、バックライト配光による直進リーク光と散乱リーク光の輝度比の変化を考慮して、黒輝度を予測できる。

この計算モデルを用いれば、任意の方向のCRを定量的に推定できるため、客先の要求に対応した視野角特性の迅速な開発が可能になる。さらに、部材の特性ばらつきや組立て精度を考慮して量産時の歩留りを設計段階で予測することも可能になる。



液晶ディスプレイの黒輝度計算モデル

任意の α 方向の黒輝度を計算する基礎式とモデル図を示している。バックライト光をビーム光線の束と考え、 β 方向へのビーム光から発生する α 方向への散乱リーク光輝度を全ての β 方向にわたり積算し、これと α 方向への直進リーク光輝度を足し合わせることで、 α 方向の黒輝度を計算する。グラフに示すのは広視野角in-plane-switchingモード液晶ディスプレイの黒輝度分布(極角42°)であり、計算結果は測定値をよく再現できている。ここで、グラフの縦軸は、入射ビーム光輝度分布で規格化した値であり、同様に規格した白輝度との比からCRを計算できる。

1. ま え が き

安全性と快適性の向上のため、自動車室内への液晶ディスプレイの搭載が増えている。車載用液晶ディスプレイでは、運転席方向に高いコントラスト比(CR)が求められ、製品差別化のポイントの1つになっている。液晶ディスプレイでは、CRを決める黒輝度に散乱リーク光が大きく影響していることが知られている⁽²⁾。特に、2軸位相差板を用いた広視野角in-plane-switchingモードの液晶ディスプレイでは、その割合は大きい。しかし、この散乱リーク光輝度を定量的に予測する方法はなかった。

当社は、液晶ディスプレイの任意の斜め方向のCRに影響を及ぼす各種散乱光とその偏光板透過率の特性を明らかにし、散乱リーク光輝度を定量的に予測する計算モデルを開発した。

本稿では、黒輝度の計算モデルとその妥当性、及び計算の一例としてパネル構成による黒輝度の変化について述べる。

2. 散乱リーク光のモデル化

2.1 ビーム光からの散乱リーク光輝度分布

液晶パネルに入射したビーム光によって発生する散乱リーク光について調べた。図1に示すように、テストサンプルとして、通常の液晶パネルであるパネルサンプル、カラーフィルタ(CF)基板に偏光板を貼り付けたCFサンプル、色材層を除いたCF基板(ブラックマトリックス(BM)開口パターンだけ)に偏光板を貼り付けたBMサンプルの3種を準備し、右30°方向と上30°方向のビーム光を入射した場合に発生する散乱リーク光の配光輝度を計測した。

図2、図3、図4に測定結果を等高線図で示す。これらの結果から、入射ビーム光から筋状に分布する回折散乱リーク光、扇状に広がるCF散乱リーク光、入射ビーム光を中心に軸対称に広がる液晶(LC)散乱リーク光の存在が分かる。さらに、ビーム光の入射方向への依存性から、回折散乱リーク光とCF散乱リーク光は偏光しており、LC散乱リーク光は無偏光と推察される。

2.2 回折散乱リーク光のモデル

単位入射光量当たりの回折リーク光の光度分布は、ホイヘンス・フレネルの原理に従いキルヒホッフの公式を用いた波動光学で計算できる。さらに、光源側偏光板を通過して入射したビーム状の直線偏光に誘起されるダイポールを光源として二次球面波が広がると仮定すると、ジョーンズマトリックス法によって伝搬方向ごとの回折リーク光の偏光板透過率が計算できる。したがって、これらに入射ビーム光光量を掛け合わせることで、回折リーク光の輝度分布が得られる。

図5に、回折リーク光の輝度分布と偏光板透過率の計算結果を示す。ここで、入射ビーム光光量は前面偏光板がない

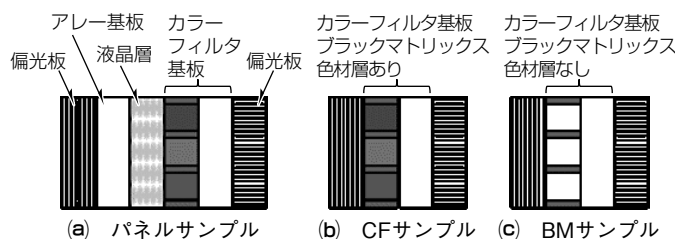


図1. テストサンプルの断面構成図

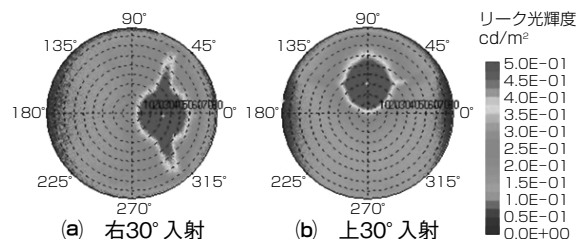


図2. パネルサンプルの散乱リーク光配光輝度分布

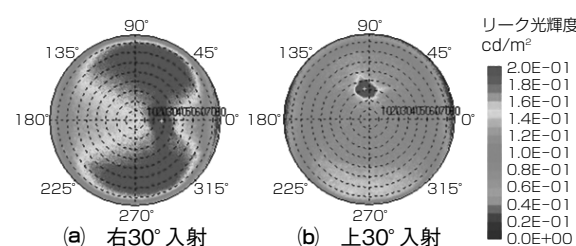


図3. CFサンプルの散乱リーク光配光輝度分布

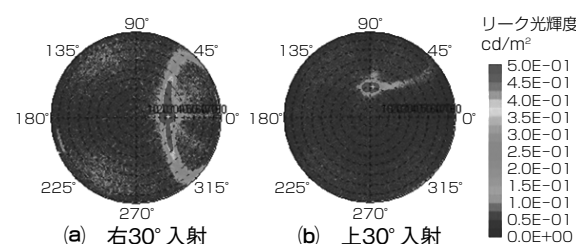


図4. BMサンプルの散乱リーク光配光輝度分布

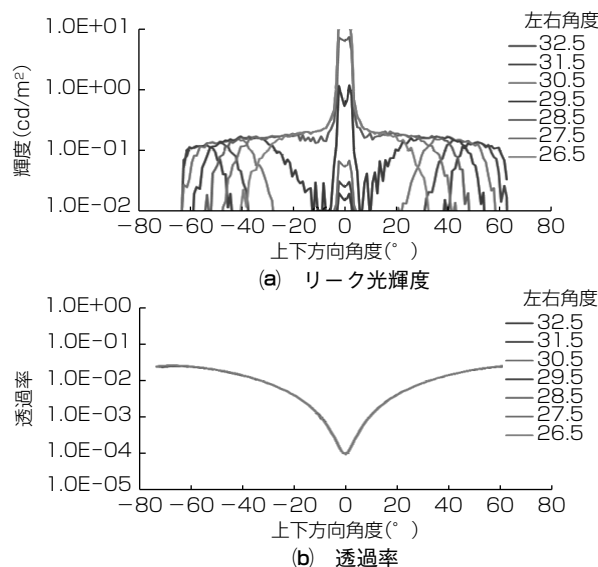


図5. 回折リーク光輝度と偏光板透過率の計算結果(右30°入射)

BMサンプルでの配光輝度分布測定値から算出した。図6に示すのは、図4に示すBMサンプルで測定された回折リーク光輝度等高線図の断面図、及び前面偏光板が有り無し

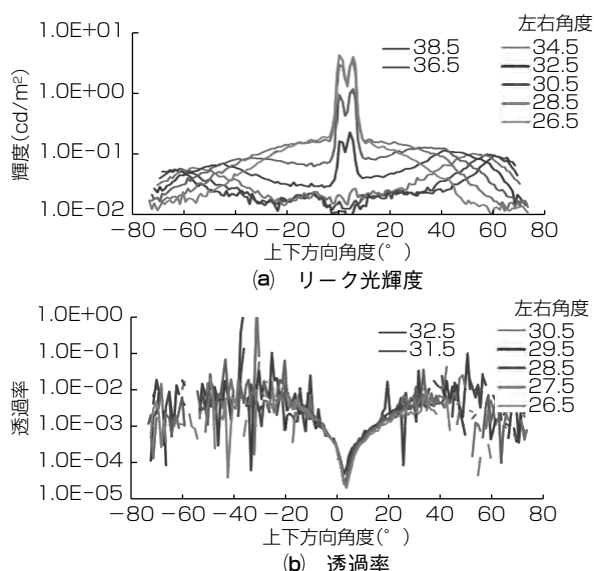


図6. 回折散乱リーク光輝度と偏光板透過率の測定値(右30°入射)

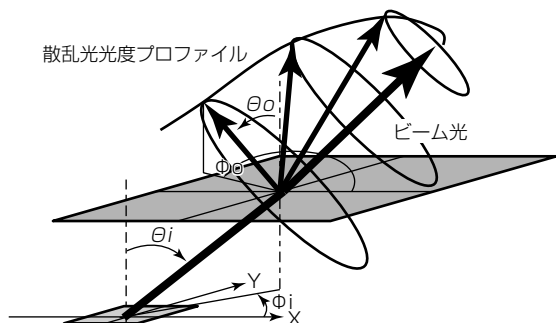


図7. CF散乱リーク光の偏光成分の内部散乱分布モデル

の状態の比から求めた偏光板透過率の測定値である。計算結果は、測定値とおおむね一致しているのが分かる。

2.3 CF散乱リーク光のモデル

CF散乱リーク光モデルでは、次の単純化を行った。

- (1) CF散乱リーク光には、偏光成分と無偏光成分が混在する。
- (2) 無偏光成分は、ビーム光の入射方向によらず入射ビーム光光量に対して等しい散乱効率で、散乱方向に均一なサンプル内部の輝度分布を示す。
- (3) 偏光成分は、図7に示すように、サンプル内部で入射ビーム光を中心とする軸対称な光度プロファイルを持ち、散乱効率と光度プロファイルは、ビーム光入射方向によらない。
- (4) CF偏光散乱リーク光の偏光板透過率は、回折リーク光と同様にジョーンズマトリックス法で求められる。

図8にビーム入射方向が30°の場合のCF散乱リーク光輝度分布の計算結果(CF偏光散乱リーク光輝度と無偏光散乱リーク光輝度の和)と測定値を示す。ビーム光入射方向から広がる筋状の回折リーク光を無視すれば、計算された輝度分布は測定された輝度分布をよく再現できている。

さらに、ビーム光入射角度30°の測定値から求めた散乱効率と光度プロファイルを用いて、ビーム光入射角度60°

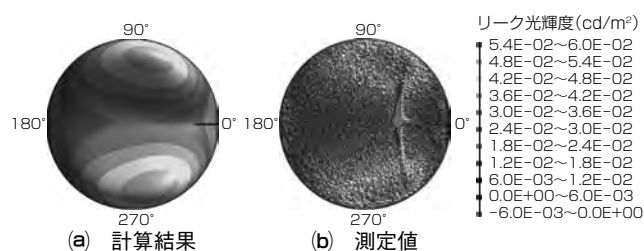


図8. CF散乱リーク光輝度の計算結果と測定値の等高線図

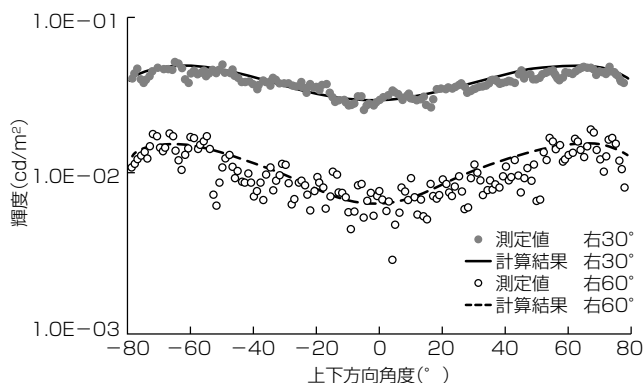


図9. CF散乱リーク光の配光輝度分布の計算結果と測定値の比較

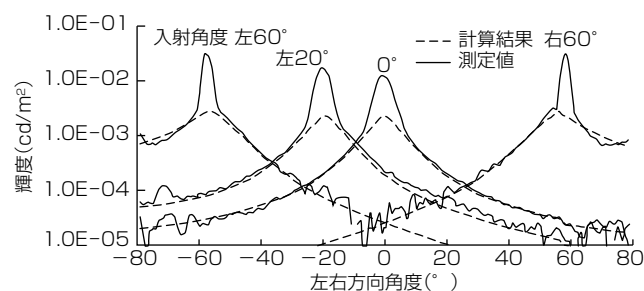


図10. LC散乱リーク光輝度分布の計算結果と測定値

の場合について計算した結果を図9に示す。入射ビーム光の方向が60°の場合の測定値を再現できることが分かる。

2.4 LC散乱リーク光のモデル

LC散乱リーク光は、無偏光であり、単位入射ビーム光光量当たりのサンプル中での散乱リーク光光度プロファイルは、入射ビーム光の方向によらず、入射ビーム光の方向を中心とした軸対称の散乱光光度プロファイルを持つと単純化したモデルを仮定した。

正面方向0°のビーム光での測定値から算出した散乱光光度プロファイルを用いて計算した結果、図10に示すように、異なるビーム光入射方向の場合のLC散乱リーク光輝度分布も、精度良く再現できることが分かる。

3. 斜め方向の黒輝度の計算

3.1 各散乱リーク光の比率

2章で述べた計算モデルによって、ある1つの方向 β に向かう単位光束のビーム光で発生し、任意の α 方向に向かうLC散乱リーク光、CF散乱リーク光、回折散乱リーク光の輝度が算出できる。これらをバックライト配光輝度分布に従う光光量比分布で全ての β 方向のビーム光について積算することによ

◇一般論文◇

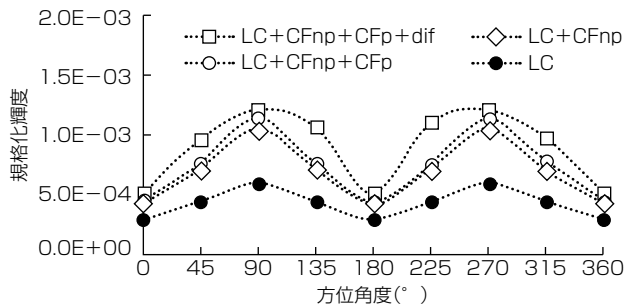


図11. 散乱成分ごとの散乱リーク光輝度の計算結果(極角42°)

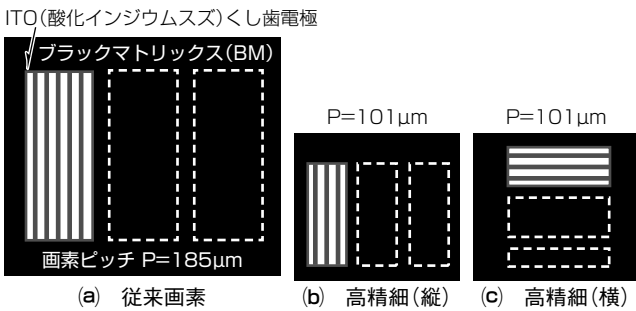


図12. 検討したパネル画素形状のイメージ図

て、任意の α 方向への散乱リーク光輝度が算出できる。これに、ジョーンズマトリックス法で計算できる α 方向への直進リーク光輝度を足し合わせることによって、 α 方向の黒輝度を算出できる。

要旨の図に示すように、最新の2軸位相差板を用いた広視野角in-plane-switchingモード液晶ディスプレイを対象にした計算結果は、測定値とおおむね一致している。

図11に散乱リーク光輝度の中での各種散乱リーク光の構成割合を示す。黒輝度の主たる割合を占める散乱リーク光輝度の中で、LC散乱リーク光(LC)、CF無偏光散乱リーク光(CFnp)の割合が多く、回折リーク光(dif)、CF偏光散乱リーク光(CFp)の割合は比較的少ないことが分かる。

3.2 パネル構成による回折リーク光の増加

LC散乱リーク光、CF散乱リーク光は材料の物性値で決まるが、回折リーク光は、画素のサイズと形状の影響を受ける。さらに、偏光しているため、偏光板構成の影響も受ける。ここで検討した画素は、図12に示す、従来画素、高精細(縦)、さらに、これを90°回転させた高精細(横)の3種である。偏光板構成は、図13に示すように、2軸位相差板が光源側(背面)と前面側の場合について検討した。バックライト配光は、導光板上に拡散シートだけを配置した広い配光を標準とし、さらに、視野角制限板を設けて上下方向の光をカットすることによる散乱リーク光輝度の抑制効果を調べた。

表1に計算結果を示す。計算された各散乱リーク光輝度は、右上方向(運転席方向)への値であり、各パネルサンプルの前面偏光板を除いた場合の輝度を用いて規格化している。表1によれば、画素が高精細化しても回折リーク光の増加は他の散乱リーク光と比べ無視できる程度である。た

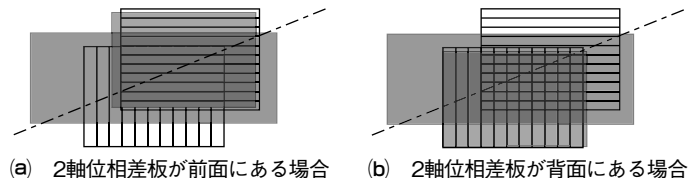


図13. 検討した偏光板の配置図

表1. 各種パネル構成における散乱リーク光輝度の計算結果

画素構造	2軸位相差板偏光板	バックライト	回折リーク光	CF散乱リーク光		LC散乱リーク光	散乱リーク光合計
				偏光	無偏光		
従来画素	前面	視野角制限板なし	0.4E-4	0.1E-4	1.5E-4	4.2E-4	6.2E-4
			0.7E-4	0.1E-4	1.5E-4	4.2E-4	6.5E-4
高精細(縦)	背面	視野角制限板あり	0.6E-4	0.1E-4	1.5E-4	4.2E-4	6.4E-4
			1.7E-4	0.1E-4	1.5E-4	4.2E-4	7.5E-4
高精細(横)	背面	視野角制限板あり	1.1E-4	0.1E-4	0.8E-4	3.1E-4	5.1E-4
			1.1E-4	0.1E-4	0.8E-4	3.1E-4	5.1E-4

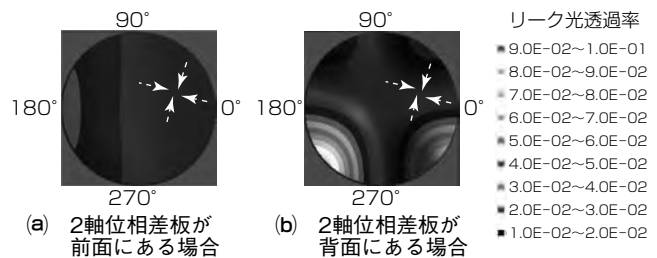


図14. 回折リーク光の偏光板透過率の分布

だし、2軸位相差板が光源側(背面)にある場合は、回折リーク光輝度は 1.7×10^{-4} に増大する。これは散乱リーク光輝度の20%を超える値である。図14に示すように、2軸位相差板が光源側(背面)にある場合は、前面にある場合に比べ、下方に向かうビーム光からの回折リーク光の偏光板透過率が大きくなるためである。

またこのとき、表1の最下段に示すように、バックライトに上下方向の視野角制限板を追加すると効果的に散乱リーク光輝度の増加を抑制することができることが分かる。

4. む す び

今回、液晶ディスプレイの黒輝度を定量的に予測する計算モデルを開発した。この計算モデルを用いれば、任意の方向のCRを定量的に予測できるため、客先要求に適合した視野角特性の液晶ディスプレイを迅速に開発していく。

参 考 文 献

- (1) Okumoto, K., et al.: A Novel Simulation Method in In-Plane Switching Mode Panel with Considering Light Scattering Behavior, SID Symposium DIGEST of Technical papers, **46**, Issue 1, 1555~1558 (2015)
- (2) Utsumi, Y., et al.: Improved contrast ratio in IPS-Pro LCD TV by Using quantitative analysis of Depolarized Light Leakage from Component materials, SID Symposium DIGEST of Technical papers, **39**, Issue 1, 129~132 (2008)

アモルファスシリコンTFT-LCDの高解像度化

野尻 勲*
安田尚平*

High Resolution Amorphous Silicon TFT-LCD

Isao Nojiri, Shohei Yasuda

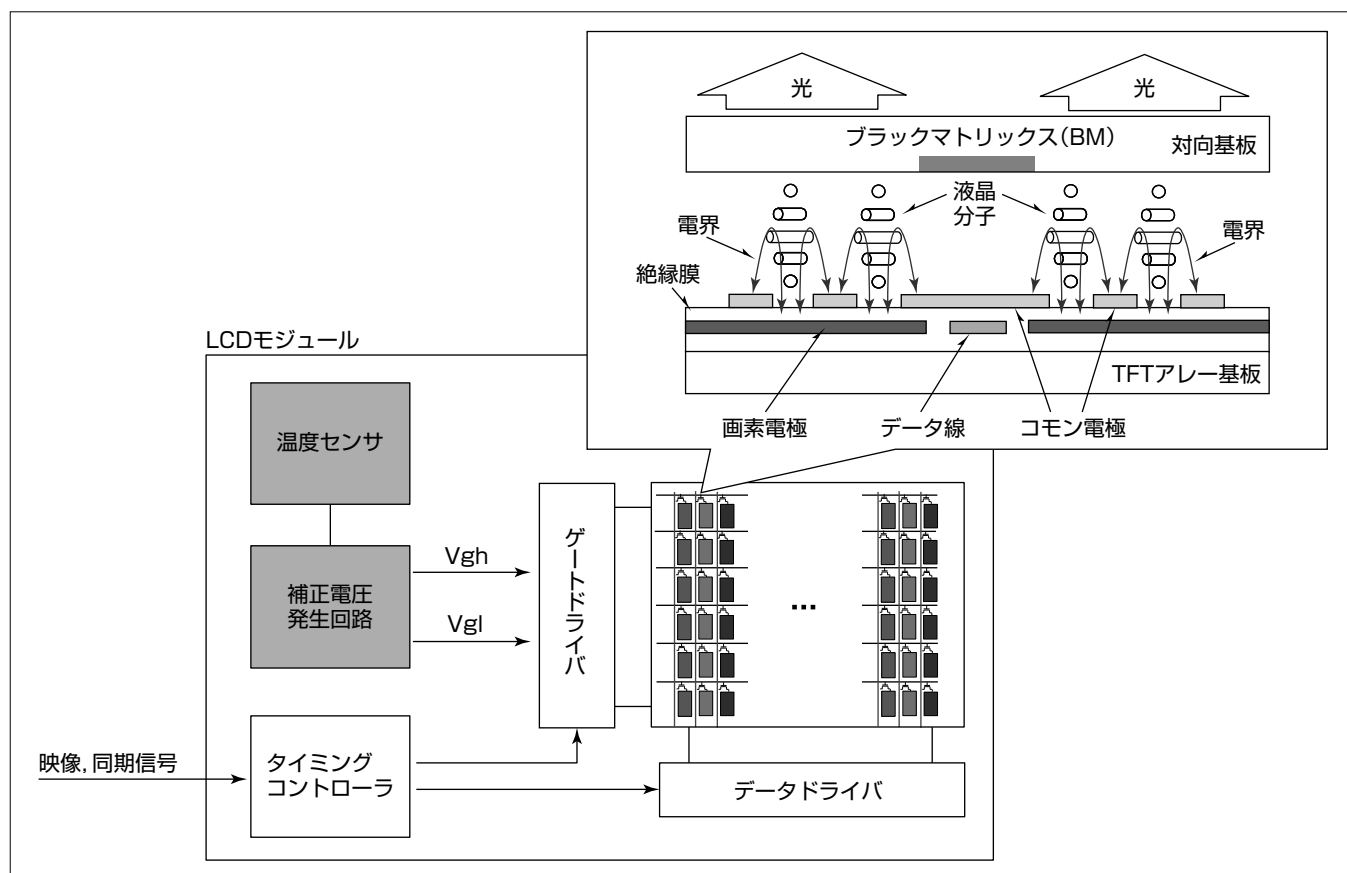
要 旨

TFT(Thin Film Transistor)を用いたアクティブマトリックス駆動LCD(Liquid Crystal Display)は映像機器の表示デバイスとして圧倒的な地位を占めている。TFTの主流はアモルファスシリコンTFTであり、その理由は、製造プロセスがシンプルで生産性が高いためである。

高解像度LCDは、ゲート線(走査線)数が多いためTFT選択時間が短くなる。TFTを介した画素充電時間はTFT選択時間から配線遅延時間を除いた時間となるため、高解像度LCDでは配線遅延時間の割合が相対的に大きくなり、画素充電が厳しくなる。また、産業用及び車載用LCDでは、民生用と異なり-30℃というような低温での表示品位も要求されるが、アモルファスシリコンTFTは低温時

に電荷移動度(電荷の移動のしやすさ)低下が大きいいため画素充電時間をより必要とする。このため従来のアモルファスシリコンTFT-LCDでは、産業用及び車載用途で、低温時での画素充電不足によって表示品位が低下して高解像度化が困難であった。

三菱電機では従来の画素構造を見直すことで配線遅延時間の短縮化を行った。またTFTに印加されるゲートハイ電圧を低温時に高くする等の駆動技術の工夫を行った。これらの効果について、-30℃で表示品位を持つ産業用、及び車載用に対応した高解像度アモルファスシリコンTFT-LCDを実現できることをシミュレーションによって検証した。



高解像度アモルファスシリコンTFT-LCD

従来の画素構造を見直し、高解像度に対応した画素構造を開発した。また、ゲート電圧を温度に応じて制御する駆動技術等を適用した。

1. ま え が き

現在、液晶ディスプレイ(LCD)は映像機器の表示素子として圧倒的な地位を占めている。LCDの発展の原動力はTFTを縦横に配置し、データ線とゲート線で駆動するアクティブマトリックス型の実用化にあり、各画素を独立に制御できるため高画質化が可能となった。TFTとしては、1980年代に開発が開始されたアモルファスシリコン(a-Si) TFTに加え、近年ではa-Siよりも電荷移動度が高い低温ポリシリコンTFT、酸化物半導体TFTが開発・量産化されてきているが、TFTの主流はいまだにa-Si TFTである。その理由は、製造プロセスがシンプルで生産性が高く、かつ画素と同数の多数のTFTを大面積ガラス基板に均一に形成できるためである。

当社では、1990年代前半にノートパソコン用ディスプレイの製品開発を皮切りに、デスクトップモニター用LCDの製品化、そして現在では産業用、及び車載用LCDへと主要製品をシフトさせている。

a-Si TFTはこれらのメリットがあるものの、産業用、及び車載用LCDに適用する場合、民生用と異なり新たな課題が生じる。これらの用途では、 -30°C というような低温での表示品位も要求されるが、a-Si TFTは低温時に電荷移動度が急激に低下するため、画素充電が不十分となりコントラスト等の表示品位が低下する場合が生じる。また、高解像度LCDでは、ゲート線(走査線)数が多くなるため、TFT選択時間(画素充電に割り当てられる最大時間)も短くなる。TFT選択時間 T は、フレームレートを60Hzとし、ゲート線数を n 、垂直ブランキング数を m とすると

$$T(\mu\text{s}) = \frac{10^6}{60 \times (n + m)} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。垂直ブランキング数 m として一般的な値を用いて、TFT選択時間とゲート線数 n の関係を示すと図1のようになる。ゲート線数が768本のXGA(eXtended Graphics Array)に対し、ゲート線数2,000本程度の解像度になると、TFT選択時間は約1/3まで減少する。また、

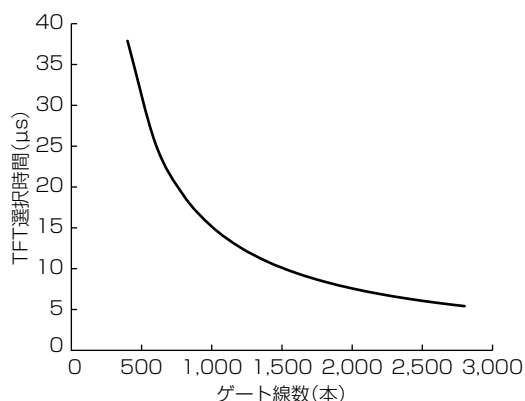


図1. ゲート線数とTFT選択時間の関係

TFT選択時間のうち、配線遅延時間は画素充電へ寄与しない時間となるが、TFT選択時間が短くなることで画素充電に対する配線遅延時間の割合が相対的に大きくなり、画素充電は非常に厳しくなる。

そこで当社では、従来の画素構造を見直し、配線の寄生容量を低下させて配線遅延時間が小さい画素構造の開発を行った。さらに、新しい駆動技術を適用することで、従来困難であった、産業用、及び車載用途での高解像度a-Si TFT-LCDの実現性を検証した。

2. 高解像度a-Si TFT-LCD

2.1 画 素 構 造

当社では従来、高視野角で高透過率のLCDを開発してきた。図2にその断面構造を示す。上部が対向基板、下部がTFTアレー基板である。対向基板にはブラックマトリックス(BM)だけを示している。画素電極を面状に形成し、その上に絶縁膜を介してスリット形状のコモン電極を配置して液晶を駆動するFFS(Fringe Field Switching)構造を用いている。コモン電極と画素電極の距離が非常に近いため、液晶を駆動する電界強度が強く、電極部の液晶が全体的に駆動されて電極部の透過率が向上することが特徴である。

またデータドライバから供給される画素電位は、データ線から画素へ電界を形成し、この電界が液晶分子を望ましい方向へ配列させる。この領域はBMで遮光して非透過領域となる。当社では、このデータ線からの漏れ電界を効率的に遮蔽するため、データ線の上層にデータ線を覆うようにコモン電極を配置し、コモン電極を遮蔽電極として活用するEOS(Electrode Overlapped Structure)と呼ぶ技術を開発してきた。データ線から画素への漏れ電界が遮蔽されることで、データ線上の遮光領域であるBM幅を狭くすることができ、透過率を向上させた⁽¹⁾。

今回、従来の画素構造を見直し、高解像度化に対応するため、配線の寄生容量が小さい画素構造の開発を行った。

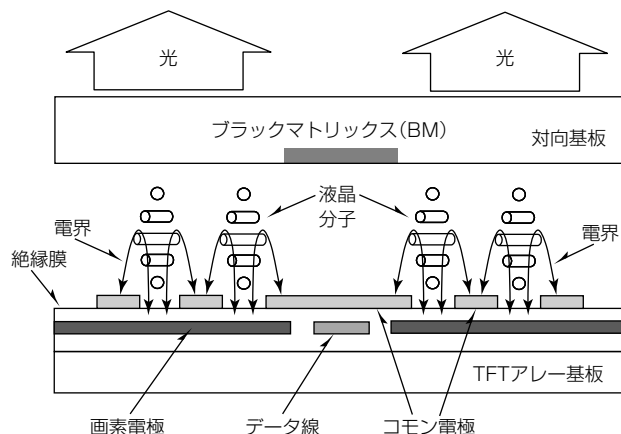


図2. 当社のFFS画素構造(EOS)

図3に、新しい画素構造でのデータ線近傍の拡大図を示す。従来の画素構造では、画素電極はデータ線と同層に配置していたが、図3に示すようにデータ線と画素電極間に新たに絶縁膜を配置し、データ線と画素電極との構造的な分離を行った。こうすることで、データ線とコモン電極間で生じる寄生容量を小さくし、データ線の配線遅延時間の短縮が可能となった。また、高解像度化による画素面積の縮小に伴ってデータ線等の非透過領域に占める割合が増加するが、この画素構造では、データ線と画素電極間の距離を離すことによってデータ線から画素への漏れ電界を従来以上に小さくした。この結果、BM幅を更に縮小させ、従来画素より透過領域を向上させることが可能となった。

2.2 駆動方法

画素を充電するTFTの駆動能力の向上は、TFTのゲート線信号電圧を増加させることで可能となる。TFTサイズ(チャネル幅)を大きくすることもTFT駆動能力を向上させるのに有効ではあるが、TFTは画素内の非透過領域であるため、画素面積の小さい高解像度LCDでTFTサイズを大きくすることは、画素の透過率への影響が大きくなる。また、TFTサイズを大きくすることで、ゲート線とTFT間の寄生容量が増加するため、ゲート線電圧がハイレベルからローレベルに切り替わるタイミングで画素電位が低下する現象(フィードスルー)が大きくなる。このフィードスルーが大きいと、表示面内の画素電位ばらつきが大きくなる傾向にある。その理由はゲート線立ち下がり遅延が小さいゲートドライバ近傍の画素はフィードスルーによって画素電位が低下したままだが、ゲート線立ち下がり遅延の大きいゲートドライバから離れた画素は、ゲート線電位がTFTのしきい値電圧(電流が流れる状態と流れない状態の境界の電圧)以下になるまでの間、画素への電荷の再充電が行われ、その結果、画素電位の低下量が小さくなるためである。この表示面内の画素電位のばらつきは、フリッカ(画面のちらつき)や表示むらの原因となるため、TFTサイズは適切な値に調整する必要がある。

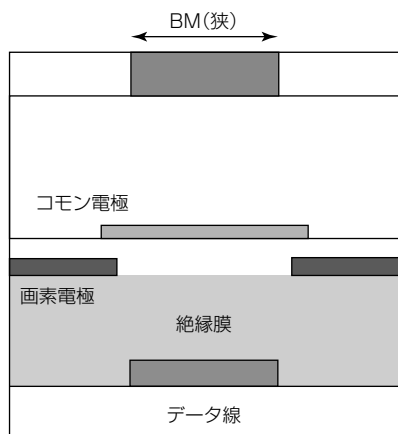


図3. 新画素構造(データ線近傍)

ゲート電圧を増加させることで、TFTの充電能力は増加するが、先に述べたフィードスルー量が増加することで、画素電位の面内ばらつきが生じ、フリッカや表示むらが発生しやすくなる。この現象は特に高温時に発生しやすい。その理由は、高温時にはTFTの電荷移動度が増加するため、ゲート線が十分にローレベルになるまでの期間、画素の再充電量が大きくなるためである。一方、低温時には逆にTFTの再充電量が減少するため、画素電位の面内ばらつきは生じにくい。a-Si TFTは、低温時に電荷移動度が急激に低下するため、周囲温度が低温時にはゲートハイ電圧を増加させ、逆に高温時には画素電位の面内ばらつきを抑えるためにゲートハイ電圧を低下させる駆動技術を適用した。

図4に今回適用した回路ブロック図を示す。ゲート電圧を温度に応じて制御する部分は、温度センサと補正電圧発生回路によって構成される。温度センサによってパネル温度を検出し、補正電圧発生回路で温度センサの出力に対応したゲート線信号の電圧レベルを調整する。ここで、ゲート電圧はハイ電圧(V_{gh})及びロー電圧(V_{gl})の両方を制御させている。 V_{gl} も変化させている理由は、高温時に表示むら等の要因となるTFTのオフリーク(ゲート線信号がローレベル時の漏れ電流)を、 V_{gl} を変化させることで低減させるためである。

図5に、周囲温度に対する V_{gh} と V_{gl} の設定値を示す。従来は周囲温度に対し固定であったゲート電圧値に対し、TFTの充電能力低下が大きい低温時には V_{gh} を大きく上げることで、TFT充電能力を向上させている。逆に電荷移動度が向上する高温時には V_{gh} を従来の電圧値より下げ、フィードスルーによる画素の再充電量を小さくし、フリッカや表示むらの発生を抑制している。また V_{gl} は、高温時に低下させることで、高温時のTFTしきい値電圧低下に伴うオフリーク量を低減させている。

また、ほかにも画素充電に有利な駆動方法の適用を行った。

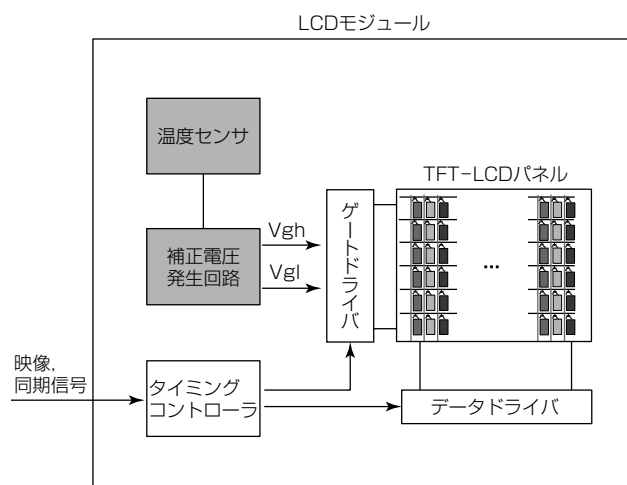


図4. 回路ブロック

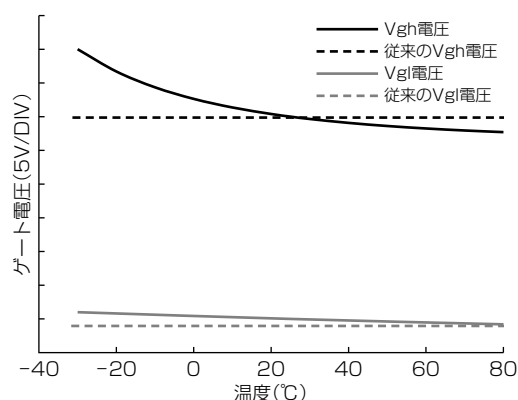


図5. VghとVglの設定値

3. 検証結果

従来での画素構造、駆動技術と、今回適用した新画素構造、駆動技術での充電特性差について、シミュレーションによる比較検証を行った。図6に、画面サイズが対角12インチ、アスペクト比(画素数縦横比率)が4:3のディスプレイでのゲート線数に対する画素最短充電時間を、従来技術と新技術の場合とで比較して示す。また、画素充電への割当時間であるTFT選択時間も併せて示している。ここで画素最短充電時間は、当社内で定めた-30℃及び室温での表示品位基準を満たすことを前提としているため、画素設計の最適化を行っている。

図6に示すとおり、従来技術では、ゲート線数が1,000本未満で画素最短充電時間がTFT選択時間を超えてしまい、画素充電が不十分となる。一方、新技術適用の場合には、ゲート線数が2,000本近くまで、TFT選択時間内に当社表示品位基準を満たす画素充電が行われることが分かる。

これらから、今回開発した画素構造、駆動技術は低温での表示品位が要求される産業用、及び車載用途での高解像度化が可能であることが確認された。

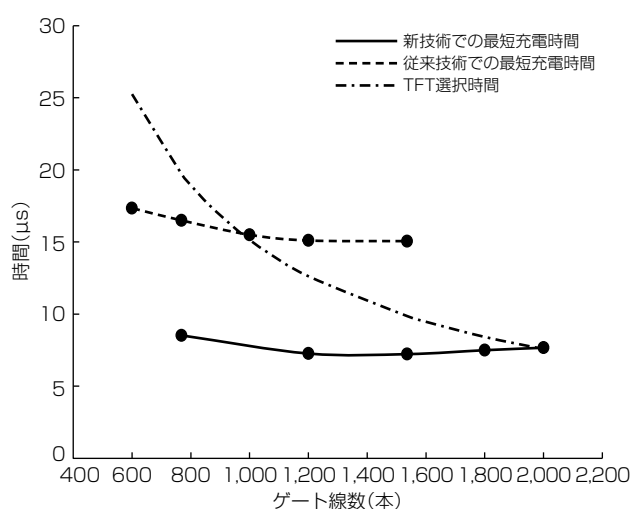


図6. 対角12インチでアスペクト比4:3のディスプレイでの画素最短充電時間

4. むすび

アモルファスシリコンTFT-LCDは低温での画素の充電能力が不足し、低温での表示品位が要求される産業用、及び車載用途では従来、高解像度への対応が困難であった。今回開発した画素構造、及び新しい駆動技術はそれを可能とし、生産性が高く特性の均一性の良いアモルファスシリコンTFT-LCDの適用範囲を更に広げていくものである。今後、この技術を適用し、産業用、及び車載用途に対応した高解像度LCDの製品展開を行っていき、幅広い顧客要求に従来以上に伝えていく。

参考文献

- (1) 永野慎吾,ほか: 最新の広視野角TFT-LCD技術, 三菱電機技報, 85, No. 6, 374~377 (2011)

森 成一郎* 上里将史**
島崎祐輔*
中村達也*

産業用タッチパネルの高性能化

High-performance Touch Screen for Industrial Use

Seiichiro Mori, Yusuke Shimasaki, Tatsuya Nakamura, Masafumi Agari

要 旨

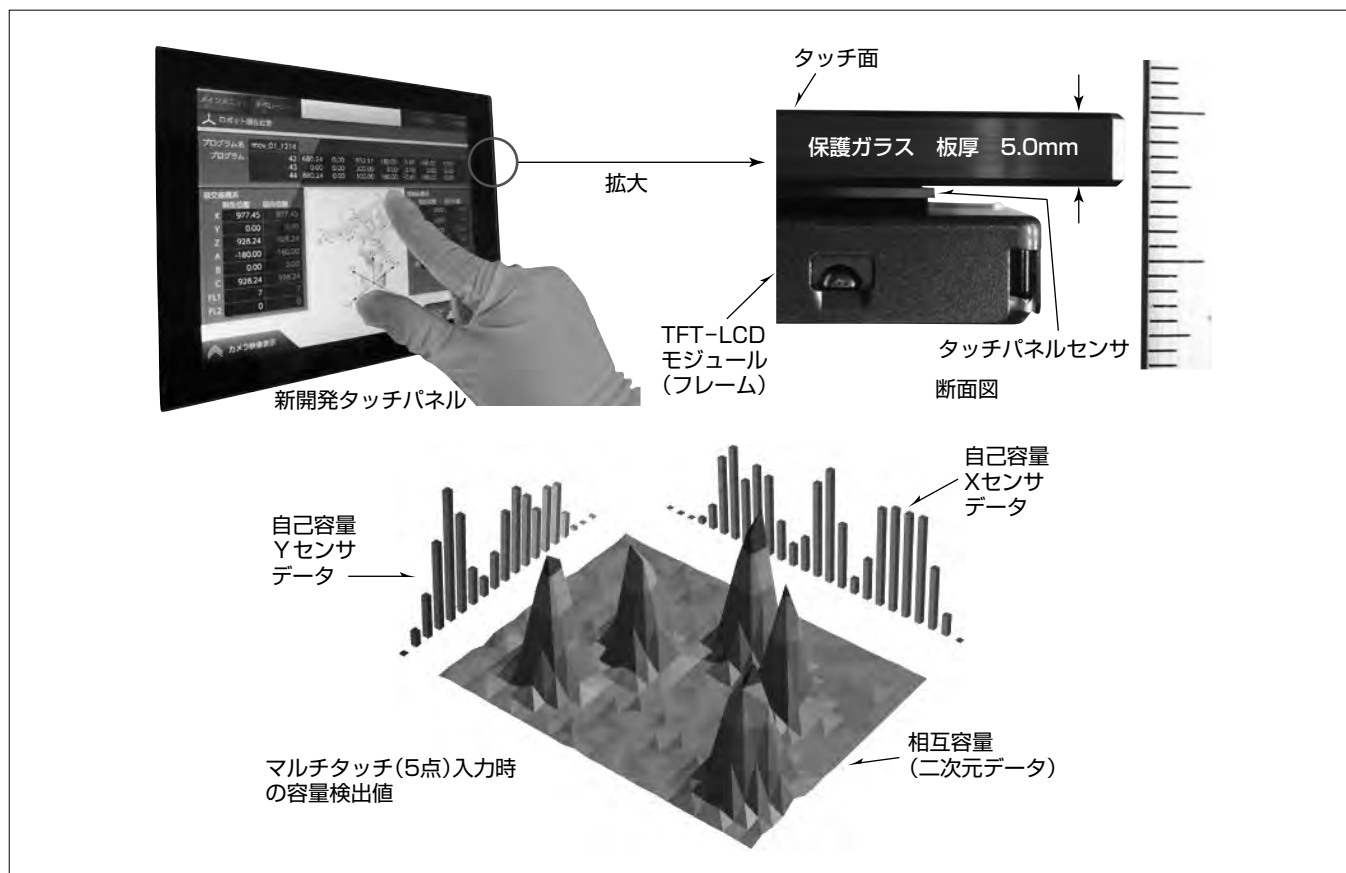
産業機器でのユーザーインターフェース向上のニーズに対応するため、三菱電機では、2012年に2.8mm厚の保護ガラス越しで手袋を使用した操作が可能な、屋外などの明るい環境で高い視認性を持つガラスボンディング構造⁽¹⁾(液晶ディスプレイモジュール、タッチパネルセンサ、及び保護ガラスを透明樹脂で接着した構造)の投影型静電容量(Projected CAPacitive: PCAP)方式タッチパネルを開発した。現在、5～19型サイズのタッチパネル搭載カラーTFT(Thin Film Transistor)液晶ディスプレイ(TFT-LCD)モジュールをラインアップしている。

一方、昨今、産業機器向けタッチパネルに対して更なる高性能化、高機能化の要求が高まっている。そこで、独自

の金属微細配線構造センサに、高感度で耐水滴性に有利な自己容量方式とマルチタッチ検出に有利な相互容量方式を組み合わせた複合型検出方式を適用し、新たなPCAP方式タッチパネルを開発した。

新開発タッチパネルでは、厚さ5.0mmの保護ガラス上での操作のほか、最大10本の指を使ったマルチタッチの操作や、厚みのある耐熱手袋を装着した状態と表面に水滴が付着した状態での操作など、様々な環境下での使用を可能とした。

現在、このタッチパネルを使用したタッチパネル搭載TFT-LCDモジュールを順次製品化中である。



新開発タッチパネルのモジュール構造と複合型検出方式によるマルチタッチ検出

独自の金属微細配線構造タッチパネルセンサに複合型検出方式を適用した産業用タッチパネルを開発した。タッチパネルセンサ表面に厚さ5.0mmの保護ガラスを接着したガラスボンディング構造や、最大10点までのマルチタッチ操作、厚みのある耐熱手袋を装着した状態と表面に水滴が付着した状態での操作を可能とした。

1. ま え が き

産業機器でのユーザーインターフェース向上といったニーズに対応するため、当社では2012年に2.8mm厚の保護ガラス越しで手袋を使用した操作が可能な、屋外などの明るい環境で高い視認性を持つガラスボンディング構造の投影型静電容量(PCAP)方式タッチパネルを開発した。現在、5～19型サイズのタッチパネル搭載カラーTFT-LCDモジュールをラインアップしている。

一方、昨今、産業機器向けタッチパネルに対して更なる高性能化、高機能化の要求が高まっている。そこで、当社独自の金属微細配線構造センサに、高感度で耐水滴性に有利な自己容量方式とマルチタッチ検出に有利な相互容量方式を組み合わせた複合型検出方式のPCAP方式タッチパネルを新たに開発した。

本稿ではその内容について述べる。

2. 従来製品の特長と課題

2.1 PCAP方式タッチパネルの検出方式と特長

PCAP方式タッチパネルの検出方式は、自己容量(Self-capacitance)方式(図1(a))と相互容量(Mutual-capacitance)方式(図1(b))に大別される。両方式ともに、メリットとデメリットがあり(表1)、要求仕様に合わせて検出方式が選択される。

2.1.1 自己容量方式

自己容量方式は、センサごとにGND(GrouND)に対する静電容量(自己容量Cs)を計測する方式で、人がタッチパネルに触れることで増加した静電容量の変化を捉え、X方向センサ、Y方向センサの検出結果から、タッチした位置座標を計算する。

この方式は、計測数が少ないため応答性が良く、指とセ

ンサ間の静電容量を計測するため、後に述べる相互容量方式と比較して高感度である。また、容量計測時に全センサを同電位で駆動することが可能なため、センサ領域内の電位差が少なく、水などの誘電率が高い物質が付着した場合でも、付着物がGNDに接地されていなければ、誤検出を抑制できる特長がある。

一方、2点入力時にX方向とY方向のそれぞれ2つのピークが交差する4点のうち、指がある位置と、指がない位置(ゴースト位置)を識別できず誤判定してしまう課題があり、マルチタッチの位置検出には不向きである。図2は、2点入力時の自己容量方式と、相互容量方式の静電容量検出値を示す。自己容量方式の検出結果だけでは、指が存在する位置とゴースト位置との組合せが判別できないことが分かる。また、センサ容量の基準となるGND電位変動等の外乱ノイズの影響を受けやすく、耐ノイズ性能は悪くなる。

2.1.2 相互容量方式

相互容量方式は、一方のセンサから励起信号を印加し、他方のセンサから、両センサの交点の静電容量(相互容量Cm)を検出する。

検出したデータは、センサ交点の容量に比例した二次元情報となるため、複数の指位置を判別しやすく、マルチタッチの位置検出では有利となる。また、励起センサと検出センサ間の相対的な電位差によって静電容量を計測するため、自己容量方式に比べてGND電位変動等の外乱ノイズへの耐性は高くなる。

一方、人の指が触れることによって減少する相互容量Cmは僅かであるため、自己容量方式に比べて感度は低くなる。また、計測のため励起信号を印加するセンサと、それ以外の励起信号を印加しないセンサが存在するため、センサ領域内に電位差が生じ、水などの高誘電性物質が付着した場合、検出値が変動して誤検出の原因となりやすい。

2.2 従来製品の特長と課題

従来製品では、高感度、耐水滴性のメリットを活用するため、自己容量方式を採用した。タッチパネルセンサには、一般的な材料であるITO(Indium Tin Oxide：酸化インジウム

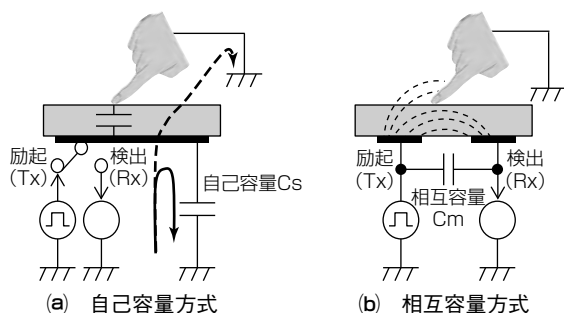


図1. 静電容量の検出方式

表1. 検出方式の比較

	自己容量方式	相互容量方式
マルチタッチ	△	◎
感度	◎	○
耐ノイズ性	△	○
耐水滴性	○	×

◎：非常に有利 ○：有利 △：制約あり ×：不利

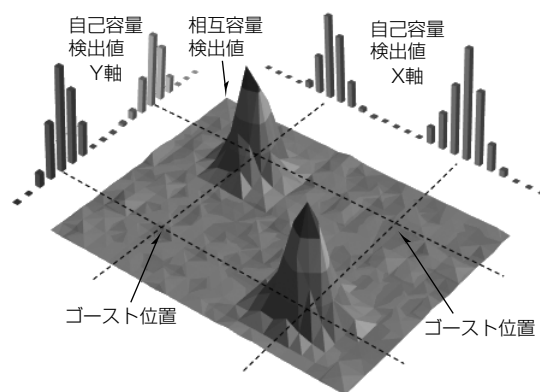


図2. 自己容量方式の2点入力時のゴースト位置

スズ)と比較して高透過で低抵抗な独自の金属微細配線構造センサを用いた。また、コントローラ基板にはノイズを除去する検出回路を搭載し、耐ノイズ性を改善するとともに、自己容量方式の課題であったゴースト位置を識別する独自のアルゴリズムを開発し、産業用タッチパネルとして製品化した。

しかしながら、昨今、産業機器向けタッチパネルの適用範囲の拡大、及び製品の操作性向上に対する要求が高まる中で、5.0mm厚保護ガラス越しでの操作、厚みのある耐熱手袋での操作、特殊なノイズ環境下での使用、3点以上のマルチタッチ操作等、タッチパネルに対する高性能化、高機能化の要求が出てきた。そこで当社では、これらの要求に対応するため、新たな産業機器向けタッチパネルを開発した。

3. 新開発タッチパネル

3.1 開発目標

目標性能は次の3つに設定した。

- (1) 最大10点までの多点検出と耐水滴性への対応
- (2) 高感度化

対応保護ガラス厚の拡大(2.8mm→5.0mm)と厚みのある耐熱手袋への対応

- (3) グラスボンディング(GB)構造製品への適用サイズ拡大(12型→19型)

これらの開発目標を達成するためには、新設計のタッチパネルセンサと新規コントローラ基板による性能向上が必要であった。

次に各開発目標への対応について述べる。

3.2 主な開発内容

3.2.1 マルチタッチ検出と耐水滴性への対応

検出方式には、耐水滴性に有利な自己容量方式と、マルチタッチ検出に有利な相互容量方式の2つを組み合わせた複合型検出方式を適用した。図3に新開発タッチパネルでの両検出方式での容量検出結果の一例を示す。図3(a)は、指で5点入力した場合、図3(b)は、右下に水が付着した状態で、左上を1点でタッチした場合の検出結果を示す。図3(a)の場合では、二次元情報を持つ相互容量方式がマルチタッチ検出に対応するには有利であることが分かる。図3(b)の場合では、水付着周辺の検出結果が両方式で異なる。すなわち、相互容量方式は、指入力、水付着ともに反応が得られているのに対し、自己容量方式は水付着部分には反応が得られていない。このように、相互容量方式と自己容量方式の検出動作を行い、両方式の検出結果を用いることで、マルチタッチ入力可能で、水などの高誘電性物質が付着した場合でも指だけに反応する耐水滴性の高いタッチパネルの実現が可能となった。

3.2.2 高感度化(対応保護ガラス厚の拡大と厚みのある耐熱手袋への対応)

保護ガラス越しでのタッチ感度は、保護ガラスの厚さに

比例して低下する。例えば、厚さ5.0mmの保護ガラス越しでのタッチによる容量変化の大きさは、厚さ1.1mmの保護ガラスでの容量変化の大きさの20%と大幅に小さくなる。この感度低下に対処するため、タッチパネルセンサから指に容量結合させる励起信号の実効的な電圧を、従来比3.7倍(11dB)に拡大して対応した。同時にタッチパネルセンサの相互容量 C_m を従来比50%に減らし、コントローラ基板の検出回路を高感度設定で使用することで、対応する保護ガラス厚が従来の2.8mmから5.0mmに拡大した。また、厚みのある耐熱手袋への対応が可能となった。図4は、試作した保護ガラス5.0mm厚の8.4型タッチパネル搭載製品の断面図である。

3.2.3 GB構造製品への適用サイズ拡大(12型→19型)

液晶表示面から保護ガラスまでの空間を透明樹脂で接合

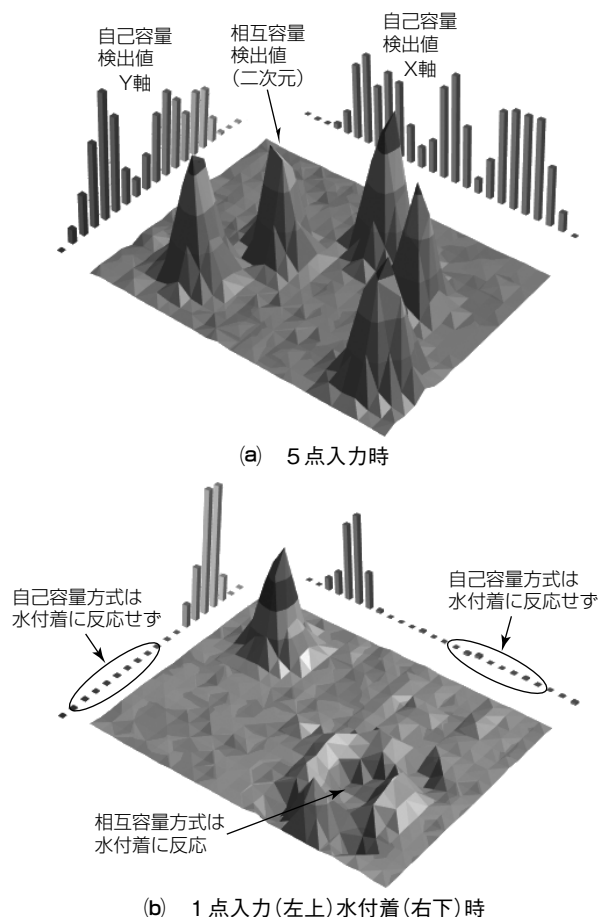


図3. 自己容量方式と相互容量方式の検出結果



図4. 試作した8.4型タッチパネル搭載製品の断面図

◇一般論文◇

し、空気層と屈折率の異なるガラス等との界面反射をなくすことで、画面への映り込みを改善するGB技術は、屋外での表示性能を大幅に改善する。しかしながら、タッチパネルとTFT-LCD間の接合に使われる透明樹脂は比誘電率3～6程度であり、空気(比誘電率1)に比べて大きいいため、TFT-LCDのノイズがタッチパネル動作に影響を与える。タッチパネルが受けるTFT-LCDによるノイズは、タッチパネルとTFT-LCD間の距離に反比例し、透明樹脂の比誘電率、画面サイズに比例して大きくなる⁽²⁾。

従来品ではGB構造に対応するタッチパネルサイズは、12型ワイドまでが限界であった。今回の開発品では、12型に比べてタッチパネルセンサの長辺が1.4倍、表示面積が2.7倍の19型に対応するため、次の2つを実施した。

- (1) タッチパネルセンサの低容量化
- (2) コントローラ基板のノイズ耐性向上

タッチパネルセンサ低容量化については、金属微細配線構造センサの低抵抗特性を活用し、センサパターンレイアウトの工夫によって、センサ抵抗の増加を抑えつつ⁽³⁾タッチパネルセンサの相互容量を従来比50%、タッチパネルセンサとLCD間の容量を従来比の80%まで低減させた。

コントローラ基板のノイズ耐性向上については、タッチパネルセンサの低容量化によって励起信号の印加時間(センサ充電時間)を50%まで短縮するとともに、1センサ当たりの計測時間を従来比で18倍に高速化することと、検出回路の並列化によって、単位時間当たりの検出データ量を増やし、フィルタ演算処理の強化によるノイズ耐性改善を行った。

これらによって、従来と同等の応答性を確保しながら、GB構造で19型まで対応サイズを拡大することが可能となった。

3.3 新開発タッチパネルの仕様

タッチパネルセンサとコントローラ基板の新規開発によって、開発目標を達成できた。図5に試作した保護ガラス5.0mm厚8.4型新開発タッチパネルの外観を示す。また、新開発タッチパネルと従来品の仕様比較を表2に示す。

なお、次に示す従来の産業機器向け製品としての特長は、新開発タッチパネルでも踏襲している。

- (1) タッチパネルセンサとTFT-LCDとの最適化による高透過率や良好な見栄え
- (2) 低反射材料採用による高い反射視認性
- (3) 保護ガラスとタッチパネルセンサ、及びコントローラ基板とTFT-LCDを一体化モジュールとすることによる、高品質で顧客の取り扱いやすい構造



図5. 試作した8.4型タッチパネル

表2. 新開発タッチパネルと従来品の仕様比較

	新開発品	従来品
タッチパネルセンサ構造	金属微細配線構造(低容量センサ)	金属微細配線構造
検出方式	相互容量方式と自己容量方式の複合型	自己容量型
マルチタッチ点数	最大10点	最大2点(ゴーストなし)
保護ガラス厚み	5.0mmまで	2.8mmまで
ガラスボンディング対応サイズ	19型まで	12型ワイドまで
手袋操作	可能 ^(注1)	可能 ^(注1)
S/N比 ^(注1) (10mmφ疑似指)	42dB(1.8mm厚) 30dB(5.0mm厚)	24dB(1.8mm厚) 12dB(5.0mm厚)
座標出力レート(標準条件)	10ms以下 ^(注1)	10ms以下 ^(注1)

(注1) パラメータ設定に依存(標準設定時を記載)

4. む す び

高感度、耐水滴性に有利な自己容量方式と、マルチタッチ検出に有利な相互容量方式の2つの検出方式を組み合わせた耐ノイズ性に優れた新規コントローラ基板と、低反射金属微細配線プロセス技術とタッチパネルセンサ配線技術を用いて新規コントローラ基板に最適化した独自のタッチパネルセンサを開発した。この技術によって、最大10点までのマルチタッチ操作や厚さ5.0mmの保護ガラス、厚みのある耐熱手袋へ対応するとともに、GB構造による屋外環境製品の対応サイズを19型まで拡大した。

参 考 文 献

- (1) 河野誠之，ほか：屋外対応TFT-LCD技術，三菱電機技報，83，No. 5，337～340(2009)
- (2) 森 成一郎，ほか：産業用投影型静電容量方式タッチパネル，三菱電機技報，87，No. 5，305～308(2013)
- (3) 野尻 勲，ほか：金属配線を用いた高感度タッチパネル，三菱電機技報，89，No. 6，358～361(2015)

深層学習での演算量削減技術

松本 渉*

Computational Complexity Reduction Technology for Deep Learning

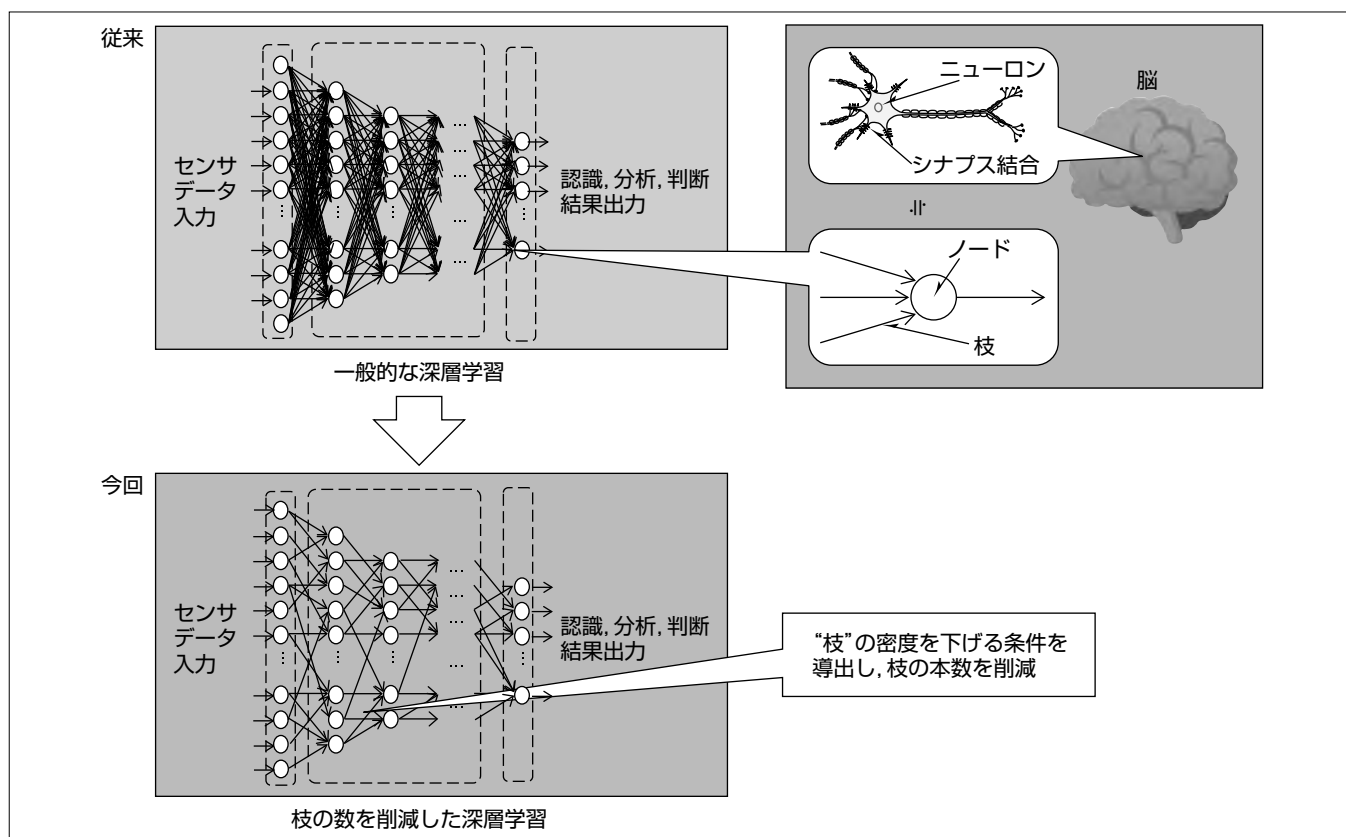
Wataru Matsumoto

要 旨

人工知能の実用化が急速に進んでいる。この人工知能の目覚ましい発展に寄与する技術の1つとして“深層学習(ディープラーニング)”が挙げられる。この深層学習は、認識だけではなく、医療や機器の診断から、ゲーム、機器制御まで応用されているが、演算量が大きく、大量のデータを扱うことから、一般に、サーバに実装され、クラウドサービスとして提供される。しかし、今後のIoT(Internet of Things)の進展によって、データ量が莫大(ばくだい)なものとなると、処理遅延が生じるなど深層学習を用いる人工知能機能をクラウドサービスで実現することには限界がある。すなわち、深層学習を機器、又は、機器に近いネットワークの端(エッジ)のデータ処理装置に実

装する必要がある。そのため、深層学習の演算量を低減することが必須である。

そこで、三菱電機では、深層学習で用いられるニューラルネットワークのノード間の結合(枝)の密度に着目し、この枝を大幅に削減して演算量を低減する方式を開発した。この方法の有効性を確認するため、手書き数字認識を対象とする実験を行ったところ、従来の全接続のニューラルネットワークに対して、接続数を1/25にしても、認識性能の劣化が小さく、性能維持できることを確認した。この方法を、今後カメラ画像解析や機器の診断などに適用し、それぞれ不審者検出や異常検知など安心・安全や保守・保全を支援する機能を実現する。



深層学習の一種であるディープニューラルネットワークでの演算量削減技術

人間の脳を模倣したノードと枝によるネットワーク構造を用いた深層学習は、画像認識等で他の機械学習を抑えて最も高い認識性能を示している。一方で、演算量が大きい問題がある。この問題の克服のため、認識性能をほぼ維持したままノード間を結ぶ枝の本数を削減するアルゴリズムを開発した。この枝の本数削減効果によって枝に係る演算が削除でき、大幅な演算量削減効果を生むことができる。

1. ま え が き

人工知能の目覚ましい発展に寄与する技術の1つとして“深層学習(ディープラーニング)”が挙げられるが、演算量が大きく大量データを扱うことから、一般に、サーバに実装され、クラウドサービスとして提供される。しかし、今後のIoTの進展によって、データ量が莫大なものとなると、処理遅延が生じるなど深層学習を用いる人工知能機能をクラウドサービスで実現することには限界があり、深層学習を機器、又は、機器に近いネットワークの端(エッジ)のデータ処理装置に実装する必要がある。そのため、深層学習の演算量を低減することが必須である。

本稿では、深層学習で用いられるニューラルネットワークのノード間を結ぶ枝の密度に着目し、この枝を大幅に削減して演算量を削減する方式を提案する。

2. 深層学習の課題

2.1 深層学習のネットワーク構造

脳のニューロンとシナプス結合をそれぞれノードと枝による数理モデルで模擬したネットワークをニューラルネットワークと呼ぶ。特に中間層(入力層と出力層を除く層)が2層以上あるニューラルネットワークをディープニューラルネットワークと呼ぶ。

このような深いネットワーク構造を持つニューラルネットワークを用いる機械学習を深層学習(ディープラーニング)と総称している(図1)。入力層にはセンサデータなどが入力され、中間層では特徴を抽出し、出力層では分類や回帰の結果を出力する。ノード間の接続の強さを枝の重みという係数で表現する。ディープニューラルネットワークは各層間のノード同士が全て枝で接続されており密度が高い“密”なネットワーク構造になっている。

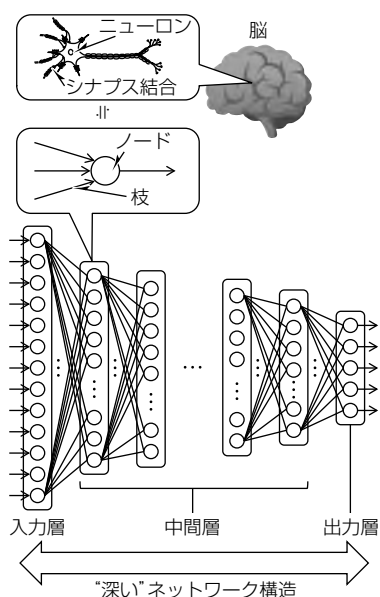


図1. 深層学習のネットワーク構造

2.2 深層学習での自己符号化器

ニューラルネットワークは古くから誤差逆伝播(でんぱ)法という方法で学習を行っていたが、中間層が2層以上ある場合、学習がうまく収束しない問題があった。2006年にジェフリー・ヒントンらがこの問題の解決のために自己符号化器を用いることを提案している⁽¹⁾。学習過程を教師なし学習で重み付けを層ごとに初期化する“プレトレーニング(事前学習)”と、教師あり学習で最後に全体を最適化する“ファインチューニング”の2段階に分ける手法が有効であることを示した。このプレトレーニングの段階で自己符号化器を用いている。この手法によって深層学習が可能になった。自己符号化器は中間層に対する入力層(複数の中間層がある場合は入力側にある1つ前の層)をそのまま出力層に用い、次元圧縮した中間層(入力層のノードの数より中間層のノードの数を少なくする)で入力層のデータを出力層で復元できるように学習する手法である。

図2に示す自己符号化器について述べる。 N 個の入力データ $x \in \mathbb{R}^N$ (\mathbb{R} は実数の集合) に対して $M \times N$ の枝の重み行列 $W \in \mathbb{R}^{M \times N}$ 、 M 個のバイアス $b \in \mathbb{R}^M$ と活性化関数 $f(\cdot)$ を用い、 $y = f(Wx + b)$ として M 個の中間層のデータ y を表現し、復元するデータを x' としたときに $x' = f(Wy + b)$ によって x を復元できるように学習する。なお、図の y^l は l 番目の中間層を示している。この学習後、自己符号化器の復元側のネットワークを除き入力側のネットワークをそのまま l 番目の中間層の初期化したネットワークとして使用する。この操作を $l = 1$ から昇順に全ての中間層に対して行い、プレトレーニングを完了する。この自己符号化器の操作を加えることによって、この後、ファインチューニングとして誤差逆伝播法を用いても学習が収束するようになる。プレトレーニングを行わない場合は、ネットワークのパラメータは乱数で初期化されるため、学習が収束しない場合があったが、プレトレーニングを行うことで、学習対象を表現するのに適したパラメータを用意することができ、学習が収束できるようになった。

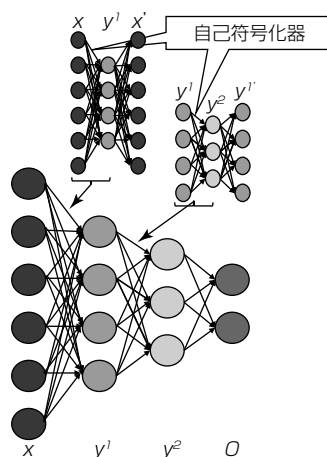


図2. 自己符号化器によるプレトレーニング

2.3 深層学習の課題

図1に示すようにディープ・ニューラルネットワークは各層間のノード同士が全て枝で接続されており、密なネットワーク構造になっている。各枝はこの重みの演算のために積算を行う必要があり、枝の本数が増えるほどこの演算量は増大することになる。また、深層学習は多層の構造を持つため、更に演算量を大きくしている要因となっている。そのため、大規模サーバや組み込みの場合でも演算を高速化するGPU(Graphic Processing Unit)等を用いないとアプリケーションの要求仕様を満たさないケースが多く、エッジのデータ処理装置に搭載する上での課題になっていた。

3. 深層学習の演算量削減技術

深層学習の演算量の課題解決のために2.2節で述べた自己符号化器に着目して自己符号化器が持つ機能を実現するための条件を導出し、演算量に大きく影響を与える枝の本数の削減が可能かどうかを検証した。

3.1 自己符号化器における枝の重み行列Wの条件

各層の計算は入力データ x の i 番目の要素 x_i と中間層のデータ y の j 番目の要素 y_j とし、 x_i と y_j を結ぶ枝の重み w_{ij} を成分に持つ行列として W で表現する。特にバイアス b は正規化によって $b=0$ とすることができ、自己符号化器の場合の活性化関数は多くの場合恒等写像($f(a)=a$ 、つまり何も変化させない)が選ばれることから、簡易的に $y=Wx$ と表現し、図3のように各層のネットワークの計算式を行列演算として考えることができる。全ての入力層のノードと中間層のノードが枝によって接続されている一般的なディープニューラルネットワークの場合、図の上部の行列のように全ての成分が重みを持つ密な行列となる(図中の行列の色の変化は様々な重みの値を表現している)。2.2節で述べたように自己符号化器は次元圧縮した中間層のデータ y から入力データ x を復元する問題であるが、このとき求められる次元圧縮された y の要素数(中間ノードの数)の下界(理論上の最小の数。 N 、 M が無限大などの大き

な次元の場合に成り立つ)を導出してみると、 W が密な行列か疎な行列(行列の多くの成分が零である行列)に依存せず同じ下界になることが分かった⁽²⁾。つまり、先に述べた下界を求めて中間ノードの数を M 個としたとすると、 W が密な行列か疎な行列にかかわらず同様に復元でき、自己符号化器の求める性能を共に満足していることを意味している。行列の成分が零の箇所は計算する必要がないため、零成分の割合が大きいほど演算量は削減できる。

3.2 Wの密度を変化させた場合の評価結果

公開手書き数字($28 \times 28 = 784$ 画素のグレースケールの手書きの0~9の数字、50,000個の学習用データセットと10,000個のテスト用データセットが用意されている)データベースMNIST⁽³⁾を用いて W の密度を変化させた場合の評価実験を行った。

ネットワーク構成は入力ノード数 $N=784$ (28×28 グレースケース画像で $[0, 1]$ の範囲に正規化されている)で、中間ノードは $M=500$ とする。この入力層と中間層で構成されるネットワークを $M \times N$ の行列 W とする。また、出力層は0~9までの10ノードとした。プレトレーニングで、10,000エポック(1エポックは全学習用データセットを1回学習することをいう)学習した。また、ファインチューニングで10,000エポックの誤差逆伝播を行い、10,000個のテストデータで評価実験を行った。

行列 W での全ての成分数に対する非零の成分数の比を密度 γ とする。また、行列の成分は平均0、分散値 $1/\gamma$ の正規分布に従うものとし、密度 γ で非零、密度 $1-\gamma$ で零の値をとるものとする。表1にその結果を示すが、 $\gamma=1$ では全成分が非零となっていることを意味する。 $\gamma=0.04$ の場合は、行列全体における非零成分が $0.04=1/25$ の比率であることを示している。今回、行列 W の密度の違いによるプレトレーニング時とファインチューニング後の性能差を評価した。

まずはプレトレーニング時の自己符号化器で入力した手書き数字と復元した手書き入力画像の二乗誤差(Mean Square Error : MSE)を表1に示す。行列 W の全ての密度でMSEは $5.0e-4$ 近辺であり、ほぼ同等の値で収束していることが分かる。

次に、ファインチューニング後の10,000個のテスト用データセットによる正解率の評価結果を表2に示す。この結果を見ても分かるように全体として98%近辺の平均正

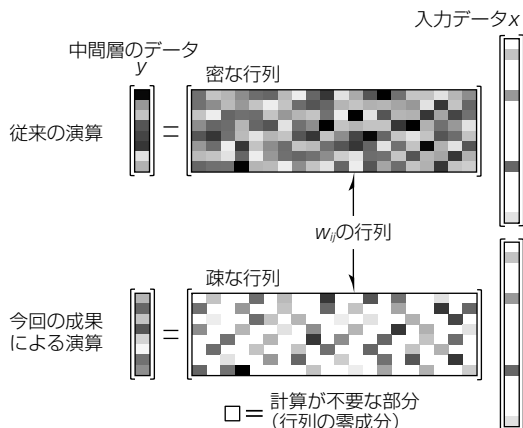


図3. 疎な行列を用いた枝の計算

表1. プレトレーニング時のMSE

行列の密度(γ)	1.00	0.33	0.16	0.08	0.04
MSE	$5.29e-4$	$5.12e-4$	$4.95e-4$	$5.19e-4$	$5.88e-4$

表2. 手書き数字の識別結果

行列の密度(γ)	1.00	0.33	0.16	0.08	0.04
平均正解率(%)	98.38	98.34	98.13	98.17	97.90

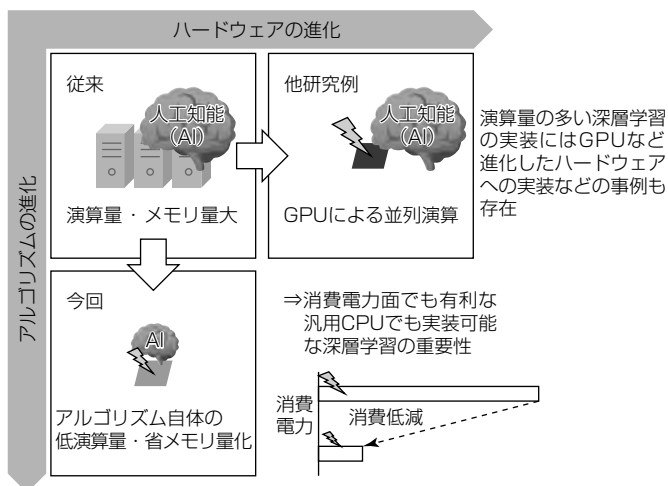


図4. 深層学習の低演算量化による実装面の特長

解率を示しており、 $\gamma = 0.04 = 1/25$ の非零成分の大幅な削減による演算量削減にもかかわらず、平均正解率の劣化が0.48ポイントと僅かであることが確認できた。従来、深層学習に対する枝刈りの手法も提案されていたが⁽⁴⁾、 $\gamma = 0.1$ で10%近い平均正解率の劣化が示されており、従来法よりも大幅に改善されている。

一般に入力データの次元数が大きいほど、性能の大きな劣化を伴わずに γ を小さくできる傾向がある。行列Wの零成分の部分は計算が不要だけでなく、保存しておく必要もないため、メモリ量の削減効果もある。

この演算量削減技術によって図4に示すように、演算量が多い深層学習の実装をGPUに頼らず、汎用CPU等を実装できる演算量に抑えることによって、小型化や低消費電力化に貢献でき、組み込み実装が容易になる。

4. 活用できる分野

一般に、深層学習は分類と回帰が可能となる。分類とは画像の物体識別や音声認識、異常検知等の入力データから特徴のあるものを弁別する機能である。また、回帰は主に連続値をとる関数を近似する機能で、株価予測、市場予測、

電力需要予測等に用いることができる。これらの機能を身の回りの機器に搭載することによってエッジのデータ処理装置で判断できるようになる。

5. むすび

人工知能の中核的技術である深層学習の演算量削減技術を提案した。特にニューラルネットワークの本質的な問題を解決し、深層学習のブレークスルーを生んだきっかけとなった自己符号化器によるプレトレーニング手法の原理を確認し、この機能達成に必要な条件を導き出して、ネットワーク構造の枝が疎か密かによる理論的な性能限界に対する差はほとんどないことを示した。この方法の有効性を確認するため、手書き数字認識を対象とする実験を行い、従来の全接続のニューラルネットワークに対して、接続数を1/25にしても、認識性能の劣化が小さく、性能を維持できることを確認した。この成果によって実装上、演算量とメモリ量が削減でき、様々な機器への実装を容易にすることができると示した。

参考文献

- (1) Hinton, G. E., et al.: Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks, Science, **313**, No.5786, 504~507 (2006)
- (2) Matsumoto, W., et al.: A Deep Neural Network Architecture Using Dimensionality Reduction with Sparse Matrices, ICONIP2016, Part IV, LNCS 9950, 397~404 (2016)
- (3) LeCun, Y., et al.: Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition, Proc. IEEE, **86**, No.11, 2278~2324 (1998)
- (4) Anwar, S., et al.: Structured Pruning of Deep Convolutional Neural Networks, ACM Journal on Emerging Tech. in Computing Systems 13(3) (2015)