

Beyond 5G ホワイトペーパー 技術編



NEC Beyond 5Gビジョンホワイトペーパー¹では、2030年の社会像や、これに対してBeyond 5Gが提供すべき価値を示しました。本稿では、このような社会像や価値を実現するために必要な技術の進化について考察します。

1. Beyond 5G技術ビジョン	3
1.1 テレコミュニケーションと通信技術の進化	3
1.2 Beyond 5Gによる新しいテレコミュニケーション	3
2. 技術進化の方向性	6
2.1 Beyond 5Gの技術スコープ	6
2.2 ネットワークとAIの共進化	6
2.3 技術進化の方向性	7
3. Beyond 5Gの重点技術領域	8
3.1 無線/光通信	8
3.1.1 高速大容量化/小型低消費電力化	8
3.1.2 カバレッジ拡大	9
3.1.3 無線/光センシング	10
3.2 運用自動化/最適化	10
3.2.1 サービスやアプリケーションに即したEnd-to-endネットワークの最適化	10
3.2.2 運用管理自動化レベルの向上	11
3.2.3 AI技術の活用と進化	11
3.3 分散データ処理	11
3.3.1 通信とAIアルゴリズムの共進化	11
3.3.2 デジタルツインの構築	12
3.3.3 確率的ロボティクス	13
3.4 セキュリティ	13
3.4.1 通信インフラのセキュリティ	13
3.4.2 データ処理基盤のセキュリティ	15

¹ NEC、Beyond 5Gに向けたホワイトペーパーを公開、2020年11月26日 日本電気株式会社
https://jpn.nec.com/press/202011/20201126_03.html

1. Beyond 5G技術ビジョン

1.1 テレコミュニケーションと通信技術の進化

2030年以降の将来社会を想定した新しいテレコミュニケーションの実現が求められています。新しいテレコミュニケーションの進化と、それを支える技術の進化とはどのようなものか、以下の図1を用いて述べていきます。

4G/LTE時代は人によるテレコミュニケーションを中心として、スマートフォンなどを用いた高速データ通信が利用されていました。電話による1対1の音声通話から複数者による同時映像通信が可能となり、また、SNSで全世界の人と日々の出来事を共有したり、共感を伝えられるようになり、人々のコミュニケーション範囲は拡大しました。

5G時代になると、人だけではなく、いままで通信できな

かったモノ(IoT端末)にまで通信が広がります。超高速大容量・超低遅延・同時多接続な通信インフラが整備されると、新たな価値が創造され、暮らしやビジネスをより良く変えるDXが拡大します。

Beyond 5Gは、NEC Beyond 5Gビジョンホワイトペーパーで述べた新しいテレコミュニケーションを実現します。人間・空間・時間を越えるため、人の外面や内面だけではなく、身の回りから地球全体まで、あらゆる空間に存在するモノをAIで分析・理解して瞬時にデジタルデータ化し、過去のデータ、リアルタイムのデータ、そして未来の予測データを自由に活用できるようになります。これによりBeyond 5Gは、人々の生活と社会をより豊かにするエッセンシャルインフラとしての役割を担うようになります。

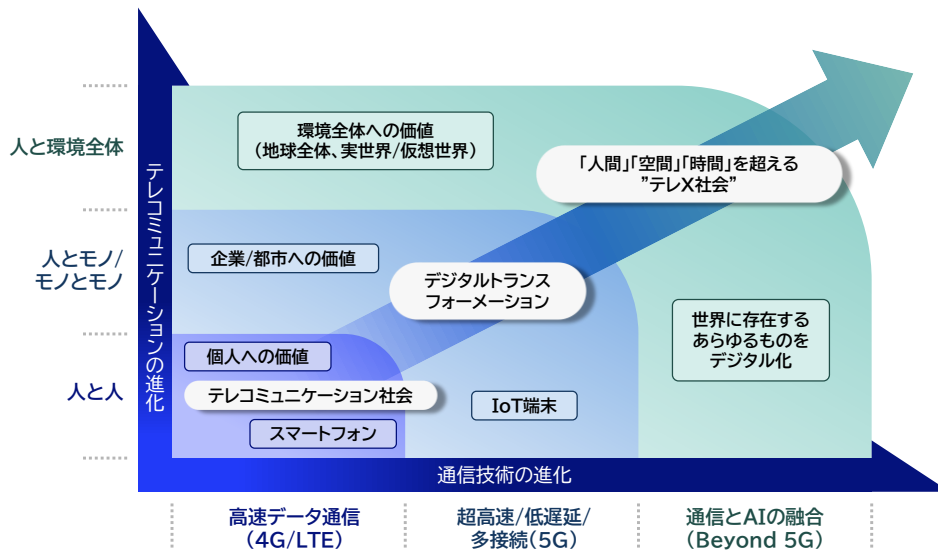


図1 テレコミュニケーションと通信技術の進化

1.2 Beyond 5Gによる新しいテレコミュニケーション

図1の右上に“テレX社会”と書きましたが、これは以下のような新しい形のテレコミュニケーションが実現された社会を意味しています。“テレ”という接頭語は“遠くの”という意味を示しますが、その通り、ICTによるコミュニケーションは電話(テレフォン)から始まり、テレグラム/テレックスやテレビジョンのように、遠くの音や画像を近くで聞い

たり見たりできるという形で発展してきました(図2)。そして、将来は、テレキネシス、テレパシー、テレイグジステンス、テレポーテーションなど、力や感情、存在感までコミュニケーションの対象として拡張し、進化を遂げていくものと考えます。これが、NEC Beyond 5Gビジョンホワイトペーパーで述べた人間・空間・時間といった制約を超えられる社会の実現につながります。こうした新しいコミュニケーションを実現するICTについて、以下では3つの視点から説明します。

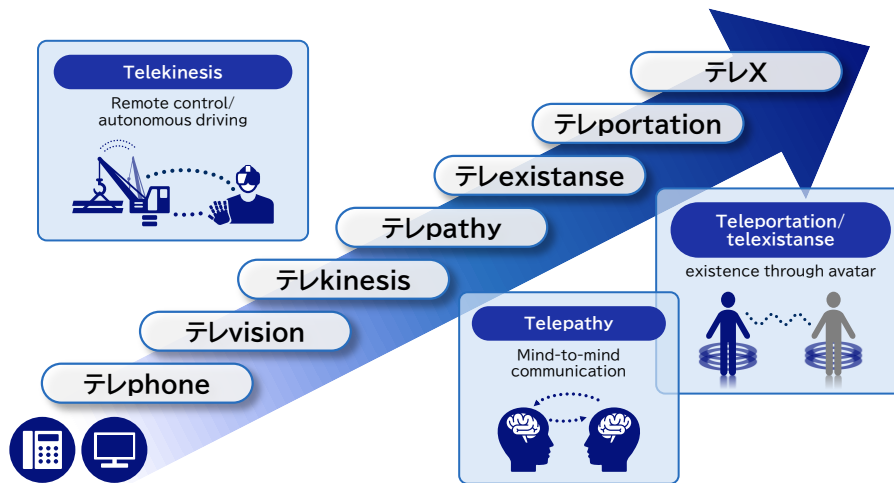


図2 “テレ”コミュニケーションの進化

A) 時空間を超えた人と人、人とモノとの超現実感 コミュニケーション

あらゆる世界のあらゆる情報をリアルタイムにデジタルデータ化し、ネットワークを介して瞬時に共有することで、人と人、人とモノとが時空間を超えたコミュニケーションを行います。ここでは、音声や映像など従来のメディア情報を圧倒的な精度で共有するだけでなく、例えば、以下のような情報を共有することで、現実感を超越するコミュニケーションができるようになります。

- 視覚、聴覚、触覚などの人間が感じる五感
- 自分や他人の意図、その場のコンテキスト
- 実世界の3次元イメージや3次元構成・配置などの空間情報
- 機械の制御や人への意思伝達など

B) デジタルツインとサイバーフィジカルシステムの 拡張

5G時代のIoTでは、IoT端末を通して取り出した情報によって現実世界を仮想世界に写し取る“デジタルツイン”が実現されようとしています。しかし、これは工場内の製造工程やスタジアム内の選手など興味の範囲内に対象が限定されたデジタルツインです。

一方、Beyond 5Gでは、センシングの多様化や、その分析・理解技術の進歩に伴い、建物や風景を含む3次元の空間から、人の内面・思考など、いままでデータ化されていなかったあらゆるものをデータの対象として取り出して活用できます。これにより、実世界のあらゆるものに加えて、実世界で顕在化していなかったもの、さらには実世界の存在を改変したもの、実世界には存在せず仮想世界のみが存在するものまで、デジタルツインとして仮想世界に表現します(図3)。実世界・仮想世界のあらゆるものをデータとして扱えるようになると、例えば、図4のように、いままで触覚に頼って手探りで世界の一部を認識していた生物が、目という感覚器官を獲得して爆発的な進化を遂げたような(カンブリア爆発の光スイッチ説)、大きな変化がテレコミュニケーションの世界に訪れると期待されています。

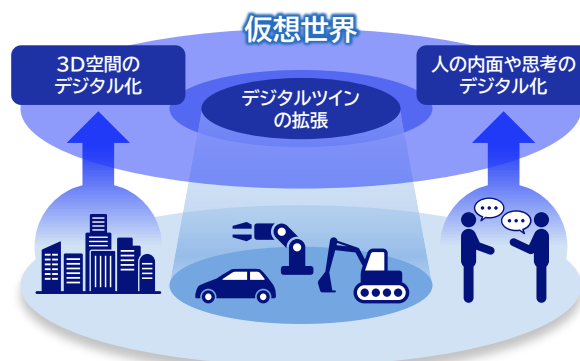


図3 デジタルツインの拡張と仮想世界の構築



図4 デジタルツインによるテレコミュニケーションの爆発的進化

Beyond 5Gでは、このように拡張したデジタルツインを仮想世界に写し取り、それらを世界中で共有し、実世界/仮想世界を最適化し、その結果を再び現実世界に反映させるループ(サイバーフィジカルシステム)を実現します(図5)。仮想空間では、宇宙や空、海、大陸を自由に飛び回れるだけでなく、世界中の想像性やアイデアにより創られた架空の施設・空間、例えば、空に浮かぶショッピングモー

ルで買い物をしたり、音楽や映像作品を世界中の人と一緒に楽しんだり、創り出したりする新しい世界が広がります。ここでは、AIが創り出した仮想的な都市の上でアバターとインタラクトするなど、現在我々が見ている世界とは大きく異なる世界が登場するはずで



図5 仮想世界を介したサイバーフィジカルシステム

C) 全地球上あらゆる場所でシームレスにつながるカバレッジ

人間やロボットが活動するありとあらゆる空間では、片時も絶えることなく、テレコミュニケーションが利用できるようになります(図6)。そのためには、都市内に存在するミリ波やTHz波の不感地帯を解消すると共に、LEO(低軌道衛星)/GEO(静止軌道衛星)やHAPS(High Altitude Platform Station)などを用いて過疎地や海上などの

環境で通信手段を確保し、さらには、モバイルネットワークとプライベートネットワークを組み合わせることでカバレッジをカスタマイズするなど、多様な手段の提供が求められます。将来、LEO/GEO/HAPSのコストが劇的に下がれば、人口密度の低い国や郊外エリアでも、これらの通信手段がモバイルネットワークの有力な代替になってくるでしょう。

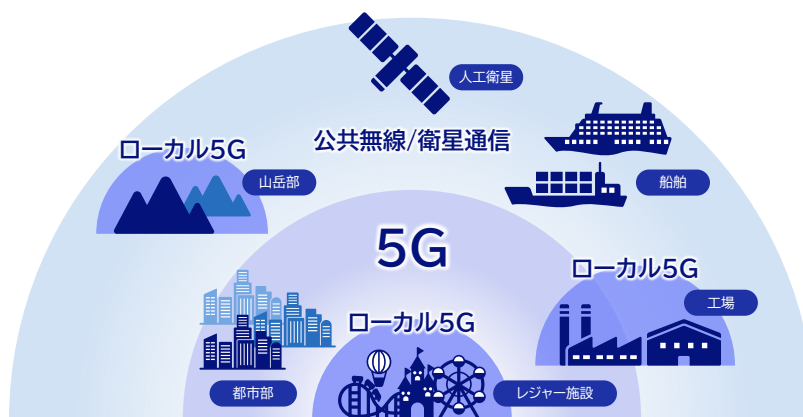


図6 あらゆる場所でシームレスにつながるカバレッジの確保

2. 技術進化の方向性

2.1 Beyond 5Gの技術スコープ

1章で述べた新しいコミュニケーションを実現する基盤として、Beyond 5Gは単なる無線通信ではなく、デジタルとリアルを融合し、人間・空間・時間を超えて価値を提供する基盤だと考えます。このような基盤は、人間の内面や思考、3次元空間情報など実世界のあらゆる情報をリアルタイムに分析してデジタルデータ化し、それらをAIで理解・処理し、リアルタイムに実世界へフィードバックするものです。そのためには、地球上のどこでも、大量のデータを収集して、運び、処理することが求められます。しかし、間断なくかつ膨大に発生する生のセンシングデータをAIで分析・理解するには、膨大な帯域と電力が必要になるだけでなく、データの発生源やデータの処理結果に触れる人の地理的分散を解消し、リアルタイムに処理しなければならないという問題があります。また、発生するデータをデータセンターなどに集めて処理すると、データ転送に多くのエネルギーが必要となり、通信遅延が起きてリアルタイムな処理が困難になるという問題もあります。こうした問題には、必要な場所でデータを分散処理し、統合されたネットワー

クを使ってダイナミックに最適化し、通信遅延やエネルギー消費の解消に取り組む対策が有効です。

以上のような考えのもと、NECはBeyond 5Gを無線通信技術の進化としてのみ捉えるのではなく、ネットワークに分散コンピューティングやAIなどのデータ処理基盤を融合した「社会インフラ基盤の進化」と捉えています。NECは、Beyond 5Gの技術的なスコープを、図7の下側に示された超高速広帯域通信や超カバレッジなどの無線通信技術と、上側に示されたAIによるリアルタイム認識/制御などのサービス/アプリケーションの基盤技術の両面から捉えています。さらに、無線通信技術においては、ミリ波/THz波を活用した使いやすい超高速通信を実現したり、地球規模にカバレッジを拡大するなどして、どこでも人とロボットが共存できる環境を実現します。こうした無線通信の進化は、サービス/アプリケーション基盤技術の進化を助けます。来るべきBeyond 5Gの社会では、世界をまるごとリアルタイムにデジタルツイン化する技術や、ロボット行動計画、瞬時の未来予測などインフラと協調するAI技術がネットワークと共に進化しているはずで



図7 Beyond 5Gの技術スコープ

2.2 ネットワークとAIの共進化

無線通信技術とサービス/アプリケーション基盤技術は、それぞれ独立して進化するのではなく、お互いに高め合いながら進化していく、いわば“共進化”の関係になっていくと考えられます(図8)。実世界におけるデジタル化などのサービス/アプリケーション基盤技術は、高速大容量や低遅延など高い通信性能を必要とし、それが無線通信技術の進化を促し、それと共に自らのAIアルゴリズムを進化させていきます。同様に、無線通信技術も、高速大容量化など、

求められる要件に従って進化していくと共に、その進化によって新たなデジタル化技術やサービス/アプリケーションの利用を可能にします。ここでは、前者を、ネットワークと共に進化する(サービス/アプリケーションを実現する)AIとして“NW for AI”、後者を、ネットワーク技術を進化させるAI(アルゴリズム)として“AI for NW”と記載しています。NECではその両方の強みを活かした研究開発に今後も注力していきます。

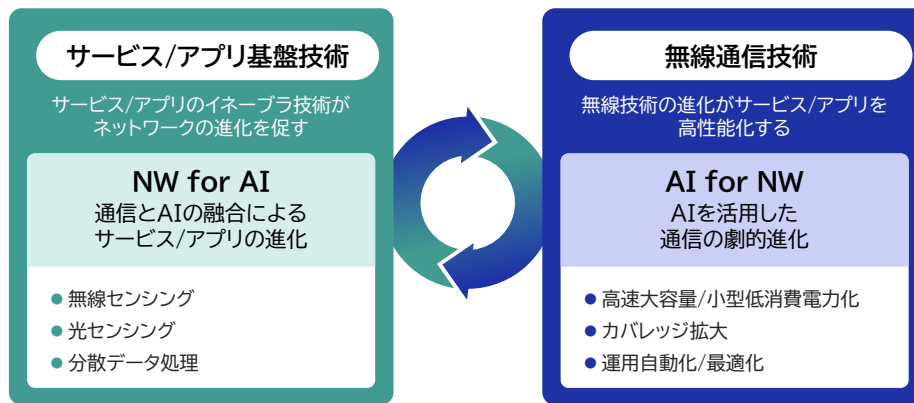


図8 ネットワークとAIの共進化

2.3 技術進化の方向性

以上で述べた技術進化の方向性を図9に示します。ここでは、横軸をテレコミュニケーションの進化、縦軸を無線通信技術からサービス/アプリケーション基盤技術への広がり

とし、個々の技術要素を1)無線/光通信、2)運用自動化/最適化、3)分散データ処理、4)セキュリティの4領域で整理して示しています。これらの技術については、次章で具体的に説明します。

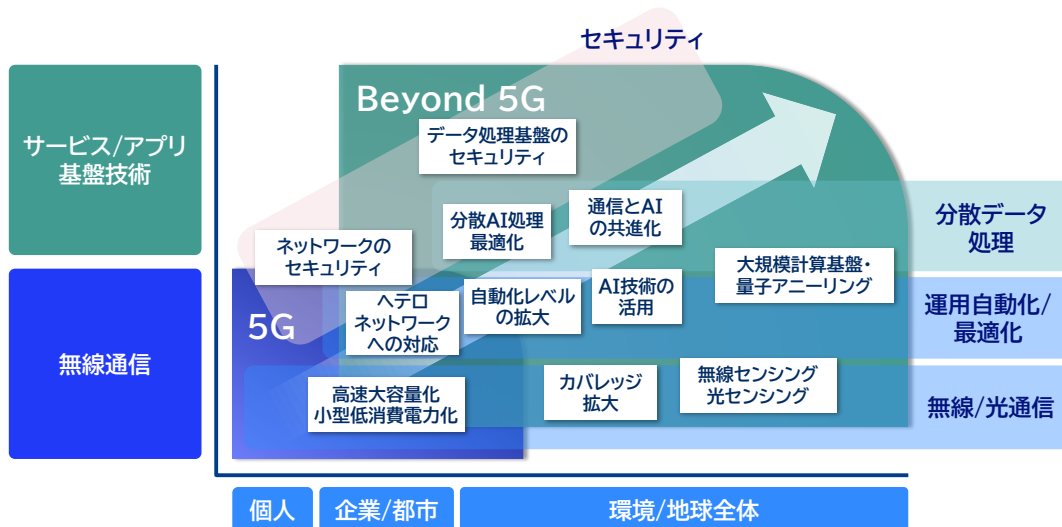


図9 技術進化の方向性

3. Beyond 5Gの重点技術領域

3.1 無線/光通信

3.1.1 高速大容量化/小型低消費電力化

拡大し続ける通信需要に対応するため、5G以降も高速大容量化が継続して求められます。総務省Beyond 5G推進戦略では、5Gの10倍から100倍の超高速・大容量、1/100の超低消費電力が求められています。

高速大容量化には、ミリ波帯やSub THz波帯といった高周波数帯の活用が必要であり、新しいアンテナ技術、パワーアンプ技術、ビームフォーミング技術、高周波数帯に適した伝送方式や伝搬モデルの構築などが必要になります。分散MIMOのような新しいネットワークポロジの採用も有効です。デバイス技術としては、高速大容量化だけでなく、小型低消費電力化も大きな要件です。その一方で、大容量通信が可能なエリアを経済的に拡大していくには、5Gと同様にミリ波より低い周波数帯も重要であり、これまで以上に高効率な周波数利用が求められます。

また、大容量化には、デジタル信号処理技術の高速化/広帯域化も重要です。従来型の回路設計による高速化対応だけでなく、AIを活用した最適化や信号処理技術など新しい基本技術も求められます。さらには、無線通信の高速化や光通信へのMIMO採用など、無線技術と光技術が接近しているため、デジタル信号処理は共通のコア技術としての活用も期待されます。

これらのデジタル信号処理技術は、モバイル無線通信だけでなく、固定無線通信、自由空間光通信、モバイルFH/BH (Front-haul/Back-haul)、光海底通信など、さまざまな領域に適用され、通信網全体を高速化していくキー技術となります。

通信機器にコモディティ化したハードウェアが活用されたことで、さまざまな処理が汎用CPUで行われるようになる一方、アンテナの多素子化によるビームフォーミングの高度化など、大規模演算もますます増えてくるため、スーパーコンピューターに用いられてきたベクトルプロセッサやGPUの活用も有望です。

重点技術: 広域分散MIMO/Radio over Fiber (RoF)

ミリ波/THz波は、その高い直進性により、電波が障害物に遮蔽されると通信が途切れてしまうリスクがあります。その対策として、多数のアクセスポイント(AP)を分散配置してAPからユーザ端末への見通し通信を確保する分散MIMO²が有効です。Beyond 5Gでは、集約基地局に接続されたAPを、屋外では電柱、信号機、街路灯などに、屋内では壁や天井などに多数設置し、複数のAPが連携する広域分散MIMOの導入が期待されます。広域分散MIMOにより、ユーザ端末は複数のAPとの間で見通しパスを冗長に確保できるので、ミリ波/THz波の通信安定性を高められます。その際、多数のAPを設置する場所を確保するため、APの小型化が重要になります。APの小型化には、従来の5GでRadio Unit(RU)が担っていたデジタル信号処理機能を集約基地局に移した、低レイヤ機能分割が適しています。このAPと集約基地局との間の通信には、無線信号を光ファイバ上で伝送するRadio over Fiber (RoF)伝送が必要です。また、汎用的な光通信デバイスを活用したRoF伝送³を用いれば、RoF伝送に関わるコストを低減でき、システムが導入しやすくなります。

重点技術: Sub THzデバイス

5Gの10倍に相当する100Gbps級の超高速・大容量通信の実現には、10GHz以上の広帯域を確保できるSub THz帯(100-300GHz)を用いた無線通信が有望です。Sub THz通信の活用領域を拡大するには、アクティブフェーズドアレイアンテナ (APAA: Active Phased Array Antenna)⁴によるビームフォーミングが有効です。これにより、大きな減衰や高い直進性などSub THz波の欠点を補い、通信距離の延伸や、移動体への追従が可能となります。Sub THz帯APAAを実現するには、波長と同程度のミリメートル級の間隔で100を超える多数のアンテナ素子を配置することや、移相器やアンプ、アンテナをいかに低損失に接続するか、などが課題になります。そのため、ビームフォーミング機能を高密度に集積する半導体デ

2 「NEC、ミリ波周波数帯に分散MIMOを適用し、実際のオフィス環境下で3倍の同時接続数・伝送容量を実現」、URL: https://jpn.nec.com/press/202101/20210125_01.html

3 S. Hori, Y. Kase, N. Oshima and K. Kunihiro, "Radio-over-Fiber Systems with 1-bit Digital Modulation for 5G/6G Indoor Wireless Communication," 2021 IEEE VTS 17th Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS), 2021, pp. 1-5.

4 鈴木他, "100GHz以上の高周波数帯通信デバイスに関する研究開発の取り組み", 2022年電子情報通信学会総合大会 BP-1-1 (2022年3月)

バイス集積回路技術と、アンテナと半導体ICを一体に形成する高周波モジュール実装技術がキーとなります。また、実用化には低消費電力や放熱も重要です。さらに、Sub THzの広帯域を活かすには、高周波アナログデバイスの性能向上だけでなく、ADC/DACやデジタル信号処理技術の進化も不可欠です。これらの先端技術を組み合わせることにより、100Gbps級の超高速・大容量通信が実現します。

3.1.2 カバレッジ拡大

地球上のさまざまな場所で高速通信を実現するには、人口密集地域を中心に活用されている比較的low周波数帯(Sub6)の無線技術だけではなく、カバレッジを拡大するさまざまな技術が必要です。

都市内では、直進性が強く減衰が大きいミリ波/THz波のカバレッジ不足と、通信の不安定性に対処することと、アンテナ数の増加による投資コスト・リスクの増大に対処するため、前節で述べた分散MIMO技術やRoF技術に加えて、高度な基地局の置局設計や無線通信制御が必要です。

また、郊外から過疎地、海上、空中まで幅広く、かつ経済的にカバレッジを広げるには、LEO/GEOやHAPSなどの非地上系ネットワーク(NTN)を、プライベートに敷設されたネットワークと連携して通信手段を確保する必要があります。

2010年代末に、複数の比較的小型な衛星を組み合わせるグローバルカバレッジを提供する衛星コンステレーション構想が、StarlinkやOneWebなど複数のプロジェクトで実証されました。その結果、ファイバが敷設されていない地域でモバイルバックホールを提供するには、衛星だけではなく、衛星と通信する数多くの地上局(ユーザ側のエントランス端末やインフラ側のゲートウェイ)が必要だということがわかりました。そのため、事業採算性の確保には、衛星の打ち上げ、製造コストの低減のみならず、より少ない地上局数で地上系ネットワークを補完してカバレッジを拡大する、さらなる技術開発が必要であることがわかってきました。例えば、地上局数を減らすために有効な衛星間通信技術やモバイルダイレクトアクセス技術、さらに地上系のD2XやV2Xといった端末間のネットワークとの組み合わせなどです。

また、5G以降の移動通信システムより高い周波数の利用や、周波数の拡大はさらに進むと予想されるため、これまでのように衛星通信と移動通信システムで利用周波数帯を分離することが困難になると予想されます。これを解決するには、周波数の利用効率をさらに高めたり、周波数を共用したりする技術も不可欠です。それに加えて、無線周

波数は限りがあるので、高速化するために光の利用も進むと考えられます。

さらには、プライベートネットワーク(ローカル5Gのような)が増え、土地利用者や地域の独特なニーズに合わせた通信インフラの構築など、モバイルネットワークとプライベートネットワークを組み合わせたカバレッジのカスタマイズなども必要になると考えられます。

重点技術:衛星間光通信

地上局数を減らす有効な手段の1つは、衛星の見通し内にはない地上系ネットワークのゲートウェイ地上局との間で無線中継を実現することです。このためには衛星間通信技術が必要です。衛星間の回線容量がサービスの快適さを左右するため、大容量化が不可欠です。宇宙空間では光を遮るものがないため、無線よりも小型・大容量を実現し、地上と宇宙の間の行き来を減らすことができれば、地上のファイバでは困難な数千~数万キロに及ぶ超長距離の低遅延伝送も可能となります。

また、空気のない宇宙では光の増幅により生まれた熱を逃がすことが難しいため、これを解決する技術や、数千km離れた衛星が発する光をファイバに結合可能な精度で捕捉追尾する技術が必要となります。

重点技術:モバイルダイレクトアクセス

地上局数を減らす有効な手段の1つは、衛星で直接ユーザ装置(UE)の無線通信信号を送受信するモバイルダイレクトアクセスです。この通信方法は、距離による減衰量が非常に大きいため、送信のハイパワー化やアンテナ利得の向上が必要です。また、LEO衛星は地表面に対して高速(対地速度約7km毎秒)で移動しているため、遅延時間やドップラーシフトによる周波数偏移を補正しなければなりません。見通し内にある複数のUEと衛星局が直接通信するには、小型衛星に搭載可能な軽量かつ高利得なマルチビームアンテナ技術も不可欠です。

大容量化が進むと、衛星とゲートウェイ地上局とのリンクはこれまで以上に広帯域化が求められることから、高可用性・高性能無線リンクも重要な技術の1つとなります。広帯域化には高周波化が不可欠ですが、超長距離の衛星通信では降雨などによる減衰への対策が求められます。

3.1.3 無線/光センシング

実世界をくまなくデジタル化するには、高精度かつ膨大なセンシングが必要です。大量のカメラで我々の行動範囲をくまなくカバーして必要なデジタルデータ化を行ったり、大量の無線デバイスをばらまいてあらゆるものをセンシングしたりする必要があるため、無線通信の高速大容量化と多接続化は引き続き拡大すると予想されます。加えて、無線や光の通信技術を活用したセンシングにも、大きな期待が集まっています。

ミリ波/THz波など直進性の非常に強い通信用電波の活用は、アンテナ数の増大やビームの細分化・精緻制御と合わせて、追加の設備導入が不要なセンシング手段としても有望です。このような技術を活用して、GPSの届かない屋内で測位を行ったり、空間内の物体の位置や動きを把握したりすることで、デジタルツインを構築する際のさまざまな情報を得られます。

光通信の技術においても、通信用の光ファイバに加わる微小な振動を検出して、その周りの状況をセンシングすることができます。さらに、光通信の送受信デバイスを活用したコヒーレント光センサによる空間のセンシングでは、物体までの距離を測定するだけでなく、ドップラー効果を用いた速度の測定も可能です。

3.2 運用自動化/最適化

3.2.1 サービスやアプリケーションに即したEnd-to-endネットワークの最適化

Beyond 5Gは、現在の延長上にあるモバイルネットワークの進化系ではなく、さまざまなネットワークを組み合わせた極めて複合的で複雑なネットワークとなります。例えば、

- ミリ波/THz波や分散MIMOなどによる超高密度小型基地局群
- O-RANなどオープンシステムにおける複雑なマルチベンダシステム
- ローカル5Gなどのプライベートなネットワーク
- 低軌道衛星/HAPSやアドホック通信などの超広域向けのシステム

など、ますます複雑化・ヘテロジニアス化していきます。その

ようなシステムにおいては、各サービスやアプリケーションの要求に応じたEnd-to-endで高度な統合運用管理及び性能最適化が求められます。さまざまな種類やさまざまな管理者のネットワークを、統合されたネットワークとして最適化し、さらに、スライシング技術により多種の異なるネットワークを切り出して、それぞれ別の目標で最適化する、といった操作が簡単に行なわなければなりません。

そして、このような最適化により達成される価値は、ネットワークそのものの性能や、それを利用するユーザに関するもの、それを提供する運用者に関するものなど、さまざまなものが想定されます。例えば、

- スループットや遅延、接続性などEnd-to-end性能指標の達成
- ミッションクリティカルなアプリケーションに特化した最適化
- 資源利用の効率化や低消費電力化
- 障害停止時間や障害影響範囲の最少化
- 未知の攻撃に対する被害の最少化
- 需要変動の不確定性に対応可能なシステム設計最適化/投資リスク最少化
- 受付制御や動的プライシングによる収益最大化

などです。これらの最適化の目標は、膨大な数のミリ波/THz波の高密度小型基地局の無線制御に対応し、それぞれの部分で異なる特性を持つヘテロネットワーク全体でEnd-to-endに保証することにあります。そのため、このような複雑で大規模な運用管理には、下記に述べるAI技術の活用を含め、さまざまな研究開発が今後必要です。

重点技術: アプリウェア無線通信制御技術

高周波数帯(ミリ波/Sub THz波など)を含む無線通信を、個々のユーザのニーズに応じて最適な形で使いこなし、ユーザ体感品質(Quality of Experience: QoE)やアプリケーション性能(作業速度や生産性など)を最大化するネットワーク制御技術です。高周波数帯の電波の直進性や減衰に起因する激しい無線品質変動^{5,6}に対して、変動を把握・予測⁷し、その変動に合わせて最適なネットワークの制御手段と制御量をリアルタイムに自動決定^{8,9}することで安定して高いQoEやアプリケーション性能を実現します。

5 A. Narayanan, et al., "Lumos5G: Mapping and Predicting Commercial mmWave 5G Throughput," ACM IMC 2020.

6 A. Narayanan, et al., "A First Look at Commercial 5G Performance on Smartphones," WWW 2020.

7 Anan Sawabe, Shinya Yasuda, Yusuke Shinohara, Takanori Iwai, Akihiro Nakao, "DCM: Delay as Component Model based on Hidden Striping Structure in Mobile Networks," IEEE CLOBECOM 2021.

8 Dheeraj Kotagiri, Anan Sawabe, Eiji Takahashi, Takanori Iwai, Takeo Onishi, Yoshiaki Nishikawa, "Context-based Mixed-Numerology Profile Selection for 5G and Beyond," IEEE CCNC 2022.

9 C. Zhang, et al., "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019.

3.2.2 運用管理自動化レベルの向上

ネットワークの運用管理では、複雑化する通信キャリアのシステムを少人数で安定運用する高度なインテリジェンスを提供したり、企業や自治体などローカルユーザが求めるシステムをターンキーで設計/構築/提供したり、クラウドセンターからの高度な運用を無人化したりなど、ニーズに応じて最適な形態で運用管理を提供する必要があります。そして、自動化レベルを向上させ、できる限り無人、あるいは専門家の関与を減らした運用が望まれます。

TM-Forumでは、以下に挙げた6段階の自動化を議論しており、現状でもLevel 2-3ぐらいの自動化は達成できていると考えています。

- Level 0 - manual management
- Level 1 - assisted management
- Level 2 - partial autonomous network
- Level 3 - conditional autonomous network
- Level 4 - high autonomous network
- Level 5 - full autonomous network

しかしながら、Beyond 5Gでは上記のようにネットワークが極めて複合的かつ複雑になっていくため、人間による運用では手に負えなくなる可能性があります。そうなれば、段階的かつ着実に自動化レベルを上げるだけでなく、人間の経験と勘から学ぶ必要のない、人間の関与を排除した完全な自動化が求められるでしょう。完全な自動化を目指すには、今後5～10年の中長期的なネットワークの進化を考慮すると共に、例えば、COVID-19や大規模災害などにより想定外の規模で人々の行動変容が起きたり、ネットワーク障害が発生したりする不確実な事態も想定した幅広い対応が必要になります。

3.2.3 AI技術の活用と進化

以上のような運用自動化/最適化の進化に向けて、AI技術の活用が大きく期待されています。ただし、自動化/最適化の対象範囲や目標が拡大し、より高いレベルの自動化が求められる状況では、ただ1つの「万能AI」がすべての問題を解けると期待してはいけません。目的の特性に応じて、ニューラルネットワーク(DNN/CNN/RNN/など)や強化学習/深層強化学習、ベイジ理論、遺伝的アルゴリズム/進化適応、グラフィカルモデル/マルコフモデルなど、さまざま

な数学的ツールを組み合わせた研究開発の柔軟性が求められます。長期的には、組み合わせ最適化問題への量子アニーリングの活用など、非連続なイノベーションも期待できるかもしれません。

また、完全自動化とはすなわち、人の想定を超えた未知事象への対応まで自動化することを意味するため、既存データを学習させたAIや、特定の状況で強化したAIでは対応が困難です。将来は生物の進化になぞらえた環境変化に進化適応するAIが必要になる可能性があります。

重点技術:インテントに基づく自律的なネットワークの設計・運用

ネットワークの利用者や提供者が、それぞれの要求や制約を必要十分な詳細さで記述したインテント(意図)を元に、これを満たすネットワークをAIが自律的に設計して構築・維持する技術です^{10,11}。AIは性能・可用性・コストなどの条件を満たす設計案を多数生成しつつ、できる限り最適な解を高速に探索します。ネットワークを構成する部品のモデルを追加して、AIに学習させることで、さまざまなネットワークを統合的に設計できるようになります。また、AIが設計を具体化する過程を参照することで、結果の妥当性を確認・微修正することもできます。

3.3 分散データ処理

分散データ処理基盤、あるいは、そこで実行されるさまざまな認識AIやロボティクスなどは、一見Beyond 5Gの無線ネットワークとは独立した技術領域とも捉えられますが、Beyond 5G時代においては、無線ネットワークあるいはEnd-to-endのネットワークと融合させて進化させていく必要があります。以下では、Beyond 5Gを実現する技術として、ネットワークと融合した分散データ処理基盤を実現するための通信とAIアルゴリズムの共進化について、また、その上で実現されるデジタルツインやロボティクスについて紹介します。

3.3.1 通信とAIアルゴリズムの共進化

分散データ処理基盤においては、アプリケーションやサービスのニーズ、あるいはネットワークや計算資源の状況に応じて、処理内容及び処理レベル、処理される場所、割り

10 黒田貴之, 桑原拓也, 丸山貴志, 八鍬豊, 田辺和輝, 福田達也, 里田浩三, 大崎隆夫, “ICTシステムの設計に関する知識の機械学習による獲得”, 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J104-B No.3 pp.140-151, 2021.

11 Takuya KUWAHARA, Takayuki KURODA, Takao OSAKI, Kozo SATODA, “An Intent-based System Configuration Design for IT/NW Services with Functional and Quantitative Constraints”, IEICE Transactions on Communications, Vol.E104-B, No.7, July 2021.

当てる計算リソースなどのネットワークリソースを都度最適に制御する必要があります。そのためには、計算リソースとネットワークリソースを空き状況に応じて最適な場所で処理したり、要求する遅延条件をネットワーク遅延と計算処理遅延に最適な形で賦課したり、変動する電波環境や空きリソースの先読みを行い確率的にリスクに備えるなど、あらゆる要件や可能性を考慮した最適化が必要です。

さらには、上記のような処理リソースの最適化だけでなく、アルゴリズムレベルでの最適化も重要です。通信環境の分散性やダイナミックな状況に合わせて性能を最大化できるようにAIアルゴリズムが進化し、さらにAIアルゴリズムの性能を最大化するべくネットワークのさまざまな制御が進化する、といった相互の進化が求められます。

例えば、画像処理を含む認識では、その計算量の大きさから、認識精度やフレームレート、通信帯域や処理遅延などに大きなトレードオフの関係があります。そのため、AIアルゴリズムの処理とネットワークでの分散処理の両方を適切に設計する、すなわち、ネットワークの状況に応じてAIアルゴリズムをダイナミックに最適化したり、AIアルゴリズムの性能を最大化するためにネットワークの制御を最適化したり、これらを同時に実現する必要があります。また、AIアルゴリズムには一般に学習フェーズと推論フェーズがあります。それぞれデータの発生や処理のパターンが大きく異なるため、どのように学習と推論のメカニズムを広域分散処理するのか、どのようにそれを収容する通信インフラを最適化するのか、という両者の間に大きな相関があります。AIアルゴリズムの性能(精度や処理時間)が通信インフラの能力や構成と密接に関わるため、処理リソースの最適化だけを考えるのではなく、通信インフラの最適化とAIアルゴリズムの共進化が重要な研究開発の方向性となります。

重点技術:エッジ学習・推論プラットフォーム

エッジTPU¹²など小型・低消費電力なAIアクセラレータの登場により、IoTやロボットシステムのエッジデバイス上でさまざまなAI処理が可能になってきました。エッジデバイス上のAI処理には、前述したリアルタイム最適化の観点に加えて、こうした環境特有のアルゴリズムに対する考慮も必要です。例えば、エッジデバイス上の推論結果を基にクラウドへ送信する学習データを選別する学習データ収集技

術¹³や、エッジデバイス上で学習した結果をクラウド上で集約して1つのAIモデルを改善していくFederated Learning¹⁴などの開発が進められています。こうしたアルゴリズムを含んだシステムでは、計算処理/ネットワークリソースの消費パターンは推論処理とデータ送信を中心とする基本的な分散AI処理システムとは異なってきます。

3.3.2 デジタルツインの構築

Beyond 5G時代のデジタルツインは、とあるセンサをネットワークにつないでセンシングするだけではなく、空間全体をくまなく、高精細・高精度かつリアルタイムにデジタル化して表現するようになります。このようなデジタルツインは、ビジョンとして述べた人間・空間・時間といった制約を超えられる社会の実現にとって、非常に基本的な要素です。例えば、人とロボットの共存を考えたとき、現時点では工場のように管理された環境でも人間の安全を確保するため、動線分離やエリア限定の措置を取るか、極めて遅い速度でロボットを動かす必要があります。しかし、前述したデジタルツインを活用すれば、一般的な生活環境の中で人とロボットが安全かつ効率的に共存させることが可能になります。

しなしながら、現実世界の環境は、刻一刻と変化しており、AIの認識誤差やネットワークの遅延といったさまざまな不確定性/不確実性が存在します。例えば、AIアルゴリズムには処理時間と認識精度の間にトレードオフの関係がありますし、無線区間の遅延や信頼性には予測不可能な変動があります。これらは、デジタルツインを活用したさまざまな実世界におけるアプリケーションの安全性や確実性、作業効率などに対する大きなリスクとなります。そのため、システムの性能やアルゴリズムの精度が常に一定に保たれているという強い仮定を置くことなく、前述した不確定性/不確実性をきちんと考慮に入れてデジタルツインを構築する必要があります。

12 "Coral," <https://coral.ai/>

13 Sandeep Chinchali, Evgenya Pergament, Manabu Nakanoya, Eyal Cidon, Edward Zhang, Dinesh Bharadia, Marco Pavone, Sachin Katti, "Sampling Training Data for Continual Learning Between Robots and the Cloud." arXiv preprint arXiv:2012.06739 (2020).

14 Bonawitz, Keith, et al. "Towards federated learning at scale: System design." arXiv preprint arXiv:1902.01046 (2019).

重点技術:確率的デジタルツイン

不確実性を許容する新しい手法として「確率的デジタルツイン」の取り組みを進めています¹⁵。これは、どこに何があって誰が何をしています的な実世界の情報をデジタルツインとして表現する手法ですが、その際にどこか何とかが誰とかを確定的な情報として扱うのではなく、確率分布として扱います。つまり、誤差は絶対に存在するという前提に立ち、ベイズ的に空間の真の姿を推定する手法を開発し、これを基にデジタルツインを確率分布として表現します。そのための基盤技術として、深層学習を用いた認識技術だけではなく、不確かな情報からベイズ的に推定する認識手法¹⁶や人間の認知機構に基づくマルチモーダルな認識手法¹⁷など、学際的な技術の活用も重要になります。

3.3.3 確率的ロボティクス

生産性向上や作業支援を目的にさまざまな分野でロボットが活躍していますが、その一方で、まだまだロボットの導入が難しく、人手での大変な作業が継続している分野も数多く残っているのが実情です。今後、さらにロボットを実社会へ浸透させるには、人とロボットが安心して共存・協働できる安全性と、既存ロボットを凌駕する高い作業効率の両立が重要課題であると考えています。

そうした安全性と作業効率を実現するには、ロボットとその動作環境の不確実性が大きな技術的ハードルとなります。実際に、ロボットが制御命令どおり寸分変わらずに動作し、かつ環境に全く外乱が伴わない理想的な系を仮定すると、ロボットをいかに高速に駆動させても、人やモノに衝突することなく目的の作業を確実にこなせるはずですが、しかし、現実問題として、安全な速度でロボットを駆動させないと想定経路を逸脱したり、所定の位置で停止できず人やモノに衝突したりするリスクが生じてしまいます。すなわち、避けられない確率的な不確実性の中で、ロボット制御を確率的に捉えて、いかに安全を確保しつつ高効率に制御する

かという技術観点が重要になるのです。このような考えは「確率ロボティクス」¹⁸として、以前よりロボティクスにおける主要テーマに位置づけられています。

重点技術:リスクセンシティブ確率制御

前述の「確率的デジタルツイン」は、ロボット制御における確率的な不確実性を定量的に予測することができます。その予測結果に基づき、安全性と効率に対するリスクに敏感に反応できる「リスクセンシティブ確率制御」¹⁹がキーテクノロジーになると考えています。リスクセンシティブ確率制御とは、元々は数理ファイナンスの分野で開発された技術で、価格変動という不確実性を含む金融市場における最大のリスクである破産を回避しつつ、利益を上げることを目的とする手法です。このリスクセンシティブ確率制御の考え方は、ロボットのAIにも適用が検討されており²⁰、今後ロボティクスの発展を下支えする技術になると予想されています。

3.4 セキュリティ

本ホワイトペーパーではBeyond 5Gのスコープを通信インフラと分散データ処理基盤に分けて述べており、セキュリティについてもそれぞれ考える必要があります。

3.4.1 通信インフラのセキュリティ

通信インフラにおけるセキュリティとしては、外からの攻撃に対して通信インフラの安定性を保ったり(DDoSなど攻撃の対処)、データの改ざんや漏洩を防いだり、なりすましや不正利用を防いだり、多様な観点での考慮が必要です。ここでは、今後のネットワークシステムのオープン化、さまざまなシステムとの相互接続、ヘテロジニアスなネットワーク構成、さらには地政学的要因の影響拡大などの環境変化に着目して、通信インフラの信頼性をどのように管理するかが、1つの大きな課題と考えます。通信インフラは、

15 下西英之, 大下裕一, 小南大智, 関良我, 村田正幸, 吉田裕志, 野上耕介, 藤若雅也, 中野谷学, 金友大, “確率的デジタルツイン”, 信学技報 IEICE-2021-57, Sep. 2021.

16 S. Bitzer, J. Bruineberg, and S. J. Kiebel, “A Bayesian attractor model for perceptual decision making,” PLoS Computational Biology, vol. 11, no. 8, p. e1004442, 2015.

17 M. Aller and U. Noppeney, “To integrate or not to integrate: Temporal dynamics of hierarchical bayesian causal inference,” PLoS biology, vol. 17, no. 4, p. e3000210, 2019.

18 S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, “Probabilistic Robotics,” The MIT Press, Aug. 2005.

19 S. Yasuda, T. Kumagai and H. Yoshida, “Cooperative Transportation Robot System Using Risk-Sensitive Stochastic Control,” 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5981-5988, Sept. 2021.

20 G. Deletang, J.G.-Moya, M. Kunesch, T. Genewein, R. Brekelmans, S. Legg, P.A. Ortega, “Model-Free Risk-Sensitive Reinforcement Learning,” Computing Research Repository, vol.abs/2111.02907, Nov. 2021.

キャリアネットワークやローカルネットワーク、衛星、アドホックネットワーク、ヘテロジニアスな通信インフラなど、多種多様な機器で構成されています。これらの機器は通常のサーバ機器のようにセキュリティ対策をきちんと施せる機器もあれば、小型の基地局やゲートウェイのように処理能力的に完全なセキュリティ対策を施すのが容易ではない機器もあります。さらに、これらのネットワークは、管理ドメインごとに異なるポリシーで管理されていたり、セキュリティレベルもさまざまだったりします。一方、通信自体はEnd-to-endで行われ、一般的にユーザはどのような機器を通ったのか、どのような管理ドメインを通ったのか、知ることも制御することもできないことが多く、ネットワークのどこかに1つでも脆弱な箇所があれば通信のセキュリティは損なわれてしまいます。

そこで、ユーザはEnd-to-endの通信経路全体において、各管理ドメインの管理者は管理するネットワーク全体において、ネットワークを構成するすべての機器や搭載されたさまざまなソフトウェアが真正なものであるか、日々のアップデートでセキュリティリスクの高いものが紛れ込んでいないか、を管理する必要があります。そのため、ハードウェアやソフトウェアの改ざん検知はサーバだけでなく、小型の機器まで含めスケーラブルに対応できる技術や、その検知結果を異なる管理ドメイン間でスケーラブルかつ安全に登録・参照できる技術などが、今後重要になってくるでしょう。

重点技術:バックドア検査

バックドア検査技術は、通信機器などで動作するソフトウェアにおいて認証回避や隠し機能などの不正機能を検出するものです²¹。ソースコードがなくても機器のバイナリコードをフロー分析し、セキュリティ上問題のある実行パスを検出することにより、バックドアである可能性をスコアとして提示します。本技術により、従来困難だったバックドアの混入リスクを客観的に把握でき、用いているソフトウェアが安全であることを担保できます。

重点技術:セキュアシステム自動設計

利用者の要求を元に、これを満たすシステムやネットワークをAIで自動設計する技術を拡張し、特にセキュリティを考慮した自動設計を実現する技術です²²。AIは生成した設計案をセキュリティの観点で評価し、セキュアではない案を棄却すると共に、よりセキュアな案を優先して探索します。これにより、新規の脆弱性が発見された際にも、AIが自動的に再設計することで、システムを常にセキュアな状態に維持されます。

重点技術:サイバー攻撃リスク自動診断技術

システムへのサイバー攻撃リスクは、新たな脆弱性の発見などにより日々変化しています。セキュアなシステム運用には、継続的なリスク管理が不可欠です。サイバー攻撃リスク自動診断技術は、ルール化されたセキュリティエキスパートの分析ロジックにより、最新の脆弱性情報を用いてシステムの潜在リスクを自動的に洗い出します^{23,24,25,26}。資産ベース・事業被害ベースのリスク分析結果が、IPAによる制御システムのセキュリティリスク分析ガイドのシート形式及びトポロジー上の攻撃経路図として出力されます。攻撃に使われる手法や脆弱性の種類に応じて、攻撃経路のリスク指標が自動算出され、優先的に対処すべき攻撃経路を判断することができます。また、攻撃経路の構造に基づいて効果的な対策箇所や対策種類を絞り込み、対策前と対策後の分析結果差分比較機能により、対策効果を簡単に事前評価できます。従来、人手で行っていたリスク診断に比べ、1/4以下の時間で作業者のスキルに依存しない網羅的な分析を実現します。

21 https://jpn.nec.com/press/202110/20211027_01.html

22 Takayuki Kuroda, "Intent-based Network Service Operations with Models and AI/ML", 2021 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC' 21), DEC. 2, 2021.

23 <https://jpn.nec.com/cybersecurity/professionalservice/vulnerability diagnosis/attack route.html>

24 "サイバー攻撃リスク分析と分析シート生成を自動化する技術を開発", 電子情報通信学会誌 vol.104, No.10, 2021年10月

25 "セキュリティデジタルツインによるサイバー攻撃リスク診断自動化", 計算工学 vol.26, No.2, 2021年4月

26 Masaki Inokuchi et al, "Design Procedure of Knowledge Base for Practical Attack Graph Generation," ACM AsiaCCS, 2019

重点技術:軽量プログラム改ざん検知

サイバー攻撃の対象は、通信インフラを構成するさまざまな通信機器や、IoT機器などネットワークに接続される多種多様な機器に及びます。これらの機器がマルウェアに感染したり、機器の制御プログラムが改ざんされると、攻撃の踏み台にされたり、本来機能に影響を与え、最終的にはサービスやネットワークの停止を招く恐れがあります。NECの軽量プログラム改ざん検知技術は、許可されたプログラムが正常な状態で動作しているかを、プログラムの起動時に加え、動作中にも検査し、未許可プログラムの起動やプログラムの改ざんを即座に検知することができます²⁷。本技術は、メモリリソースが少ない、CPU性能が低いといったハードウェア制約を持つ機器にも導入可能な軽量性を持ち、検査処理の優先度制御を行うことでリアルタイム性の確保が必要となる通信処理などを阻害せず機器本来の動作に影響を与えません。

3.4.2 データ処理基盤のセキュリティ

データ処理基盤は、デジタルツインを直接扱う基盤です。デジタルツインが実世界のソフトコピーとしてフィードバックされて実世界に影響を与えるため、セキュリティやトラスト、プライバシーの担保が強く求められます。このようなDXに伴う懸念に対し、プラットフォームには信頼性を担保する技術や、リスクの可視化、リスクへの自動対処をする技術が重要になってくると考えられます。また、セキュリティやプライバシーを確保したまま、データの利活用を促進するために、データを暗号化したまま検索したり特徴を計算したりできる秘密計算や機械学習の技術なども重要になってくると考えられます。

重点技術:秘密計算

秘密計算は、データを暗号化したまま処理できる技術です^{28,29}。マルウェアによる攻撃や、組織の内部犯行に対して情報漏洩を強力に防止し、さらに複数組織がそれぞれ保有する秘密情報を隠したままでも利活用することができます。従来の秘密計算は性能に課題がありましたが、複数サーバにデータを秘密分散したまま処理する方式をNECが改良して、2016年に最高性能を達成しました。また、秘密計算を使った開発を容易にする技術を開発し、2019年にはゲ

ノム研究者が開発した独自の解析アルゴリズムに、数日で秘密計算が適用できることを実証しました。

重点技術:高秘匿連合学習

連合学習は、組織間でデータを統合して分析を行う際に各組織で生成されたAIモデルを統合し、各組織が有するデータの開示を不要にする手法として注目されています。しかしながら、各組織とモデル統合者それぞれでAIモデルのパラメータを分析するため、各組織の学習データを推測する攻撃による脅威が知られています。NECの高秘匿連合学習³⁰では、モデル統合者への攻撃に対し、秘密計算によりAIモデルのパラメータを秘匿化することで学習データの推測を防ぎつつ、各組織が攻撃されてもAIの精度劣化を抑え、学習データの推測を防ぐ手法を提供します。

27 <https://jpn.nec.com/iot/platform/security/lwtd/index.html>

28 <https://jpn.nec.com/rd/technologies/201805/index.html>

29 <https://jpn.nec.com/secure-computation/index.html>

30 <https://jpn.nec.com/rd/special/202103/index.html>

※本書に掲載されている会社名、商品名、サービス等の名称は、各社の商標または登録商標です。

※本書に掲載されている内容は、変更される可能性があります。

発行:NEC ネットワークサービスビジネスユニット

<https://jpn.nec.com/nsp/5g/beyond5g/>



2022年3月

© NEC Corporation 2022