

Beyond 5G/6G ホワイトペーパー ver.1.0.1

KDDI株式会社

株式会社KDDI総合研究所

Mar. 2021

「Society 5.0」を加速するKDDIの次世代社会構想。

KDDI Accelerate 5.0

Tomorrow, Together



目次

1. はじめに	4
2. 2030 年のライフスタイルと B5G/6G のユースケース	6
2.1. 物質的欲求の充足の実現について	7
2.1.1. 食の変化	7
2.1.2. 購買の変化	8
2.1.3. 健康の変化	9
2.1.4. 住み方・暮らし方の変化	9
2.2. 精神的な欲求の充足の実現について	10
2.2.1. 働き方の変化	10
2.2.2. 学びの変化	11
2.2.3. 趣味・遊びの変化	12
2.2.4. 休養の変化	13
2.2.5. 交流の変化	13
3. B5G/6G に向けた構想	16
3.1. Society5.0 と Beyond 5G 推進戦略	16
3.2. KDDI の次世代社会構想「KDDI Accelerate 5.0」	18
3.2.1. 3 つのレイヤの環境整備	18
3.2.2. 7 つのテクノロジーとオーケストレーション	19
4. 「7 つのテクノロジー」について	20
4.1. 「7 つのテクノロジー」の概要	20
4.2. 2030 年のライフスタイルの実現に必要な B5G/6G を支える技術	21
5. 「1. Network」	27
5.1. B5G/6G における Network 技術の役割	27
5.2. B5G/6G において Network 技術が目指す姿	27
5.3. 世の中の状況	30
5.4. 2030 年に向けて必要な技術	32
5.4.1. ユーザセントリックアーキテクチャ	33
5.4.2. 3 つの「つなぐ」を具現化する超大容量光ファイバネットワーク	39
5.4.3. モバイルコア	42
5.4.4. 運用	46
5.4.5. システムのホワイトボックス化とハード・ソフト分離技術	49
6. 「2. Security」	50
6.1. B5G/6G における Security 技術の役割	50
6.2. B5G/6G において Security 技術が目指す姿	50
6.2.1. 次世代の通信ネットワークに組み込まれるセキュリティ技術	50

6.2.2. 次世代の通信ネットワークを守る攻撃検知・防御技術	51
6.2.3. 次世代通信を支える暗号技術	51
6.3. 世の中の状況	51
6.4. 2030年に向けて必要な技術	52
6.4.1. 通信ネットワーク向けセキュリティ機能	52
6.4.2. 堅牢な AI を用いたセキュリティ対策	53
6.4.3. 新世代の暗号技術	54
7. 「3. IoT」	55
7.1. B5G/6G における IoT 技術の役割	55
7.2. B5G/6G において IoT 技術が目指す姿	55
7.3. 世の中の状況	57
7.4. 2030 年に向けて必要な技術	58
7.4.1. フィジカル空間の情報のセンシングに関わる技術	58
7.4.2. センシングされた情報をサイバー空間に転送するための通信に関わる技術 ...	59
7.4.3. サイバー空間において情報を処理するためのデータ処理に関わる技術	59
7.4.4. メンテナンス性を考慮した IoT デバイスの設計・運用技術	59
8. 「4. Platform」	61
8.1. B5G/6G における Platform 技術の役割	61
8.2. B5G/6G において Platform 技術が目指す姿	61
8.3. 世の中の状況	62
8.4. 2030 年に向けて必要な技術	63
8.4.1. 都市 OS を運用するためポイントとなる技術	63
8.4.2. 自動運転が切り開く MaaS (Mobility as a Service)	64
8.4.3. MaaS によりもたらされる行動変容	65
8.4.4. 自動運転	66
9. 「5. AI」	68
9.1. B5G/6G における AI 技術の役割	68
9.2. B5G/6G において AI 技術が目指す姿	68
9.3. 世の中の状況	68
9.4. 2030 年に向けて必要な技術	69
9.4.1. フィジカル空間指向 AI	71
9.4.2. 行動変容のための AI	74
9.4.3. 信頼できる AI	76
9.4.4. 複数の AI 技術を組み合わせた活用	77
10. 「6. XR」	79
10.1. B5G/6G における XR の役割	79

10.2. B5G/6G において XR が目指す姿	79
10.3. 世の中の状況	79
10.4. 2030 年に向けて必要な技術	82
10.4.1. フィジカル空間再現・拡張	82
10.4.2. マルチモーダル連携	83
10.4.3. 高効率・超低遅延空間伝送	84
11. 「7. Robotics」	86
11.1. B5G/6G における Robotics の役割	86
11.2. B5G/6G において Robotics が目指す姿	86
11.3. 世の中の状況	87
11.4. 2030 年に向けて必要な技術	89
11.4.1. RaaS (Robotics as a Service)	89
11.4.2. コミュニティ支援	90
11.4.3. 自動運転・スマートドローン	92
12. 今後の展開	93
13. おわりに	96
参考文献	97
改版履歴	105

1. はじめに

日本では、5G が商用化された 2020 年 3 月とほぼ同じ時期に COVID-19 の感染者が増え始め、瞬く間に人々の生活や経済活動、社会の在り方が一変した。COVID-19 の感染拡大前からデジタルトランスフォーメーション(以下“DX”と略記)の必要性が人々に認知されていたが、New Normal と呼ばれる With コロナや Post コロナの時代では、人々の生活や経済活動を支えるために DX の加速が急務となっている。一方で、経済活動の進展による地球温暖化から我々が住む地球を守るためにも、温室効果ガスを削減し、「脱炭素社会・カーボンニュートラル」の早期実現を目指す必要がある。つまり、「人々の生活を豊かにし、経済を活性化しながら、環境を守る社会システムの実現」というバランスの取れた新たな社会基盤を実現する必要があり、そのために、情報通信技術(以下“ICT”と略記)が担う役割は大きくなるだろう。

DX についてはさまざまな定義が存在するが、経済産業省の資料[1-1]に記載されている内容を元に、前述の課題を加味して一言でいうと、「ICT で得られるデータを活用し、新たなビジネスの創出や、組織と社会基盤の変革をもたらすこと」と言える。ICT で得られるデータは、我々が存在するフィジカル空間において、さまざまなデバイスを通じて安全性が担保された状態で取得され、有線や無線のネットワークを介して、データを処理するサイバー空間に送られる。このサイバー空間に集まったさまざまなデータを用いて、サイバー空間でフィジカル空間に有用な情報やデータを作成し、ネットワークを介してフィジカル空間にいる我々やモノに対して伝えられる。そして、フィジカル空間で受け取った情報やデータを元に、生活や経済活動、社会活動が進められ、その中で新たに収集されるデータをサイバー空間に送る、という、循環が行われる中で、新たなビジネスの創出や、組織と社会基盤の変革が行われる。

これはまさしく我が国が掲げる Society 5.0 であり、Society 5.0 を早期に実現することが DX の推進につながると考える。このことを踏まえ、KDDI と KDDI 総合研究所(以下、総称として“KDDI”と表記)は、2020 年 8 月に“次世代の社会構想”として、「KDDI Accelerate 5.0」を発表し、Society 5.0 の世界を早期に実現する必要性を述べている[1-2]。

Society 5.0 の実現には 4G や 5G が必要不可欠であるが、上述のとおり、新たなビジネスを創出し、組織と社会基盤の変革を進めていくうえで、5G を更に高度化した Beyond 5G や 6G(以下“B5G/6G”と略記)が求められるだろう。それは冒頭に記載した COVID-19 に起因する DX の推進やカーボンニュートラルの実現に必要な ICT である。また、新たなビジネスモデルの創出から新しい技術の研究開発、システムの構築・運用など、さまざまな観点で国内外のパートナー企業や大学、研究機関との連携が必要不可欠である。

移動通信システムに関しては 1G から始まり 5G に至るまで、無線通信技術の進歩に注目が集まっていた。それは無線通信技術の進歩が人々の生活や経済活動に与える影響が大きかったからである。今後、人々の生活レベルの向上や経済の活性化と併せて、環境も意識した新たな社会基盤を支えるためには、無線通信技術のみならず、ほかの様々な技術との融合がま

すまず必要になるだろう。むしろ、ほかの技術によって無線通信技術が活きてくるような時代になるかもしれない。

このような想定を踏まえ、KDDI では、5G の次を担う「B5G/6G」は、無線通信技術とほかの技術を含めたシステムと捉えている。KDDI Accelerate 5.0 では、Society 5.0 の実現を加速するために、無線通信技術などの「Network」テクノロジーを含む「7 つのテクノロジー」を掲げているのはこのためである。

上述のとおり、B5G/6G が実現される 2030 年頃の世界は、これまでの世界とは大きく異なる方向になると考えている。そこで、本ホワイトペーパーでは、2030 年頃のライフスタイルやユースケースを示したうえで、これらのライフスタイルやユースケースを実現するために必要な「7 つのテクノロジー」を構成する要素技術について紹介する。

2. 2030 年のライフスタイルと B5G/6G のユースケース

Society 5.0 が実現すると、IoT や AI の発展により、全ての人とモノがつながり、様々な知識が共有され、今までにない新たな価値が生み出されることにより、私たちを取り巻く様々な課題が克服されると期待されている。国際連合においても、2015 年 9 月、課題克服に向けた具体的な行動指針として、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」を総会で採択している。こうした流れを受けて、KDDI は、これまで長年に亘って ICT の進展に沿って人々の生活や環境、意識がどのように変化をするかを様々な角度から調査研究してきた知見やノウハウに加えて、未来を先取りするような生活様式を持った人々を先進的生活者として組織化し、それらの人々へのインタビューや議論を通じて、人々に安心、安全、快適を実現する 2030 年の新たなライフスタイルを描いた。本章では、その概要を私たちの生活の基盤を成す物質的な欲求を伴うものと、他者との関係に基づく精神的な欲求を充足するものの二つに区分した上で、それぞれの欲求の充足に該当する生活の場面を複数のテーマに分けて紹介する。

2030 年には、社会全般にわたってモノ・コトの ID 化・データ化が加速し、私たちはリアルなフィジカル空間とデジタルなサイバー空間の多層的な環境の中で生きることになると想定される。その前提の下で ICT の進化によって私たちの生活に大きな変化をもたらすと思われるものとして、物質的な欲求の面から「食」「購買」「健康」「住み方・暮らし方」を抽出、精神的な欲求の面から「学び」「趣味・遊び」「交流」「働き方」「休養」を抽出し、それぞれのライフスタイルや生活シーンを記載する[2-1]。

また、B5G/6G の事業化に向けてはユースケースの策定も非常に重要である。KDDI では、B5G/6G のユースケースを策定し、2030 年代のソーシャルグッドの暮らしを生み出すプロジェクトを立ち上げた。プロジェクトでは、KDDI 以外の関係者の協力も得ながら、B5G/6G が普及した時代のユースケースを共創した。それぞれのライフスタイルや生活シーンの変化の兆しを集めて問いを深めることで、物質的な欲求の面から「食事」「店舗」「決済」「身体」「住まい」「暮らし」のユースケースを描き、精神的な欲求の面から「工事」「サイバー空間」「移動」「一次産業」「観戦」「散歩」のユースケースを描いた。KDDI は事業を通じて様々な社会課題の解決に取り組む続けるという決意を込めて、「KDDI Sustainable Action～私たちの『つなぐチカラ』は、未来のためにある～」を策定しているが、ここで描く各ライフスタイル、ユースケースについても、前述の Action の根底にある国連の定めた持続可能な開発目標(SDGs)の 17 の目標(図 2-1)の中でそれぞれ該当するものに係る目標を達成することを主たる目的とする。



図 2-1 SDGs の 17 の目標（出典:[2-2]）

今後、国内外の情勢変化や生活者の動向なども見ながら、上記以外のライフスタイルについても検討を進めていく予定である。

2.1. 物質的欲求の充足の実現について

私たちの生活の基盤を成す物質的な欲求を充足する場面として、「食の変化」「購買の変化」「健康の変化」「住み方・暮らし方の変化」を以下に示す。20 世紀型の文明において、私たちの快適で豊かな生活を実現するための経済成長は、地球環境への負荷に直結し、環境や生態系を破壊することとなった。しかし、今後、私たちが目指すべき 2030 年の新たな社会システムは、環境破壊や資源の枯渇を招くことなく、地球環境と経済成長が両立する持続可能な世界を実現するものとしなければならない。ここで述べる物質的欲求の充足をもたらす「食」「購買」「健康」「住み方・暮らし方」を可能にする様々なテクノロジーは、単に物理的な満足を実現するのではなく、こうした環境と経済の両立を前提として開発するものである。

2.1.1. 食の変化

現在は、家族で同じメニューの食事をすることが多いが、2030 年には、AI や IoT の発展により、同じ家族でも一人ひとりの好みや健康状態に合わせた食事ができるようになると考えられる。例えば、自分や家族のその日の体調や昼食の内容、食事をする時点での空腹などに合わせた、食事の提供が可能になり、食品ロスも減少すると予想される。

食事、家族の健康状態に加えて、常時モニタリングされている冷蔵庫内の在庫情報や過去のメニューなどを参考にしながら、AI が自動的に最適なメニューを提案するようになる。また、

家族全員が同じメニューでも、個々人の健康に応じて、塩分・糖質カットなどを考慮したレシピで作られるので、最適な食事が楽しめるようになることが期待されている。

B5G/6G が浸透した時代では、食事の概念が大きく変わるだろう。例えば、調理データをネットワークで共有することで、祖父母など離れた家族も同じメニューの食事を楽しめるようになる。

また、フードプリンタを使ったバーチャルレストランが開業され、サイバー空間で遠隔にいる人とも話題の三ツ星レストランを同じ空間で予約なしで楽しめるようになる。メニューを見るとその料理の匂いを嗅ぐことができ、過去の食歴をもとに未体験の食事を AI が提案してくれる。今では絶滅して食べることができなくなってしまった食材をフードプリンタで再現することもできる。アレルギーで食べられない食材がある人も、フードプリンタで食材の味を再現して同じサイバー空間で食事を楽しむことができるようになる。

このような新しい食の実現には、食事の画像データを遅延なく送受信できるネットワークの高速化・低遅延化、スムーズなデータ通信を可能とするための画像圧縮技術や個々に最適なレコメンドを可能とする AI が必要となる。

2.1.2. 購買の変化

現在、人は在庫を確認して、商品を購入しているが、2030 年には、AI や IoT、ロボティクスの発展により、比較的こだわりのない商品や生活必需品に関する宅内での在庫管理は自動で行われ、ユーザの消費ペースと在庫から自動で商品が発注されるようになると予想される。

例えば、宅内の冷蔵庫や収納庫に設置されたセンサにより、こだわりのない商品や生活必需品の食品・日用品などはストックの状況やこれまでの消費ペース、お店の価格などに応じて自動で発注されるようになる。

更に、自動で発注された商品は、配達ロボットにより自宅まで自動で届けられるようになる。ロボットなので、配達時間は 24 時間可能で、自分の都合に合わせた時間と受け取り方法が選択可能となることが期待される。

B5G/6G が普及した時代では、店舗の概念が大きく変わるだろう。例えば、未来の衣料品店ではその場でカスタマイズ試着を含めたバーチャルな店舗体験ができるようになる。例えば、手触りや素材感を確認しながらバーチャルで試着を行い、友人をホログラム通信で呼び出して相談できるようになる。睡眠や運動などその服の機能性が数値化され、個々人にあった服が AI により提案され、3D プリンタで作成された試着サンプルをその場で試着し、服の機能性を試してその場で金額を見ながら変更できる。服の寿命を AI が診断し、保有しているほかの服を用いてその場でリメイクしてくれる。購入した服は運送ロボットが自宅まで届けてくれる。いつでもどこでも自分にあった製品が手に入るようになる。

また、B5G/6G が普及した時代では、決済の概念も大きく変わるだろう。生体情報を直接伝送し、AI がパーソナライズドレコメンドした商品を自動で購入することができるようになる。例えば、カーシェアリングを行う際は、生体情報から免許証情報が認証確認され、自動で個々

人にあった座席の高さに調整してくれる。

また、過去の膨大な購買データとそのときの気分や感情を AI が読み取り、欲しい商品を最適なタイミングでレコメンドする。購入したいと思ったときには既に決済が完了しており、買い忘れや決済の手間から解放される。

このような新しい購買スタイルの実現には、在庫をリアルタイムで監視するモニタリングシステム、適切な発注タイミングを計算する AI、ロボットのスムーズな移動を実現するための高速かつ低遅延のネットワークなどが必要となる。KDDI ではこのような新しい購買スタイルを「ライフデリバリー」と呼び、現在実証実験に取り組んでいる(11.3 節にて詳説)。

2.1.3. 健康の変化

ウェアラブルデバイスの進化により、現在でも心拍数などを日常生活において把握することが可能になっている。2030 年には、IoT や AI の発展により、様々なデータがリアルタイムで把握できるようになり、その結果、一人ひとりに最適な健康づくりが可能となり、無理なく安心して健康維持ができ、いつまでも自立した生活を送ることができるようになると考えられる。

例えば、これまで面倒だったバイタルデータの測定や食事の栄養素の測定が、ウェアラブルデバイスや家庭に設置されたセンサにより自動で行われるようになり、24 時間いつでも、個人の最新の健康状態がリアルタイムでわかるようになる。その結果、データに基づいた個人の健康や体の状態に合わせた運動や食生活の提案が可能になると予想される。

ネットワークの高度化と Cross Reality (以下“XR”と略記)技術の発展により、自宅にしながら医師への相談もできるようになり、重症になる前に、必要な対応が可能になることから、いつまでも自立した生活を続けられるようになると考えられている。

B5G/6G が普及した時代では、身体の不自由に対する概念が大きく変わるだろう。身体を強化するパワードスーツを着ることで、自身の可能性を拡げることができるようになる。例えば、別の人のバイタル情報から身体機能をコピーして、スポーツやアクティビティを楽しむことができるようになる。料理や運転、書道、絵画、写真、ダンスなどを自由にできるようになる。身体機能の不自由さを減らし、生きる活力が生まれることで「人生 100 年時代」を楽しめるようになる。

このような新しい健康生活の実現には、バイタルデータをリアルタイムで取得できるモニタリングシステム、蓄積したデータをベースにアドバイスを行う AI、オンライン診療をスムーズに行うための高速かつ低遅延のネットワークなどが必要となる。

2.1.4. 住み方・暮らし方の変化

近年、ワーケーションや地方への移住の関心が高まっているが、2030 年には、場所にしばられることなく、自分のパーソナリティや価値観、健康状態、その時々シチュエーションにあった最適な場所で暮らすことが可能になると予想される。初めて訪れた街でも、AI によってセレンディピティが得られる楽しみ方やトラブルのない快適な生活行動がサポートされ、仕事が

らプライベートまで、全てを充実させることができるようになることが期待される。

どこにいても不満や不全感を抱えることなく常に満足のいく状態で働いたり、学んだりすることができるようになり、自宅や職場、学校という場所の区別がなくなる。自動車で移動するときには、自動運転によって車内は自由な個室となり、アイデアを膨らませたり、休養を取ったりする空間となる。移動の間に目的地でスムーズに行動に移ることができるような情報も提供されるようになる。

こうした住み方や働き方の実現によって、自然を楽しんだり、自己実現や趣味などプライベートを重視したりする傾向が強まり、非日常的な時間を過ごすことが常態化すると予想される。B5G/6G が普及した時代では、住まいの概念も大きく変わるだろう。例えば、感触、香り、食感、味も伝わり、サイバー空間で遠く離れた家族といつでもつながることができるようになる。また、単身で外国に赴任中の父親が五感を送受信するスーツを着て、遠くにいる家族とサイバー空間でランチを楽しめるようになる。フィジカル空間では指一本動かしていないが、サイバー空間の自身を動かして家族と同じ部屋で過ごすかのように、遠く離れた家族と五感でつながることで、離れていても家族のつながりを深めることができる。

また、B5G/6G が普及した時代では、暮らしの概念が大きく変わるだろう。住む場所を固定せず、好きな場所で好きな香りに囲まれ仕事ができるようになる。例えば、五感体験を直接脳波で伝送することで、認識齟齬が発生しない世界になる。例えば、フィジカル空間を臨場感あるデータで自身の理想の空間に変更し、遠隔地の同僚ともホログラム伝送で遠隔打ち合わせを行い、想像したものが脳波でそのまま同僚に伝達される脳波通信によって最高のパフォーマンスを出せるようになる。

こうした新しい住み方・暮らし方の実現に向けて、初めて訪れる街でも迷うことなく暮らすことを可能にするレコメンド AI やその街での最適な対応を可能とする行動変容 AI が必要となる。

2.2. 精神的な欲求の充足の実現について

様々な人びととの関係性に基づく精神的な欲求を充足する場面として、「働き方の変化」「学びの変化」「趣味・遊びの変化」「休養の変化」「交流の変化」を以下に示す。20 世紀後半のグローバル経済の進展は、豊かな富を生み出す一方で、経済格差の拡大や社会階層の固定化による社会の分断をもたらした。私たちが目指すべき 2030 年の世界は、個々人の多様性を認め、誰もが自律的に尊厳をもって自由に生きることのできる包摂型の社会としなければならない。ここで述べる精神的欲求の充足をもたらす「働き方」「学び」「趣味・遊び」「休養」「交流」を可能にする様々なテクノロジーは、人々の多様性と自由の実現を前提として開発するものである。

2.2.1. 働き方の変化

近年、日本でもジョブ型雇用が広がりつつあるが、2030 年には、個人のスキル・能力や経験を活かして、自分の価値観や夢にマッチする仕事の機会を自ら創出することが期待される。

そのために、AI によるマッチングを通じて最適なプロジェクトや共創を促すビジネスパートナーとの出会いの場が提供されるようになる。また、自動翻訳の普及によって言語の壁はなくなり、個人でグローバルに活躍する働き方が一般化すると考えられる。

その一方で労働集約型の生産性が低いとされる業務や仕事は AI やロボットに代替され、多くの人々が自己価値の実現につながる働きがいのある仕事に従事可能になると期待される。併せて、データの収集や資料作成、スケジュール管理や情報面でのサポートなど、事務的な作業は、AI によって自動化され、空いた時間はアイデアを膨らませるなどの創造的な活動に費やすことが可能となる。そうした創造的な活動をサポートするための技術や専門的スキルを補う方法も AI から提案されるようになる。また、適切なアドバイスを行う専門家や仲間とつながる機会も提供されるようになる。

B5G/6G が普及した時代では、工事の概念が大きく変わるだろう。除雪のような重労働は工事の自動化が進み、月面開拓のような高度な技術が求められる工事は遠隔から安全な場所で行えるようになる。工事ロボットのセンシング情報がデジタルツインで分析され、工事計画変更の行政申請も自動で実施される。ロボット遠隔操縦の熟練者の技術を専用のスーツを通して直接身体で学ぶことができる。直接身体で覚えた技能は、リアルタイムでロボットに学習し同期される。一台のロボットの学習データは数百台のロボットに自動で連携され、極地における過酷な労働や人手不足が解消される。

このような新しい働き方の実現には、個々人に最適な仕事をマッチングすることが可能となる AI、どこにいてもスムーズなデータの送受信を可能となる高速かつ低遅延のネットワークに加えて、リアルなオンライン会議を可能とするフィジカル空間再現技術(10 章を参照)などが必要となる。

2.2.2. 学びの変化

COVID-19 の感染拡大により、オンライン授業が急速に普及した。2030 年には、XR 技術、ネットワーク、AI の発展により、一人ひとりの学びを最適化することで、学校における学力の向上だけでなく、社会人になっても、夢や目標の実現に必要なスキル習得のための効率的な学習が実現できるように、新たな学びのための時間が創出されるようになると考えられる。

また、オンラインコミュニティの拡張により、適切なアドバイスが得られる信頼できる教師や互いを高め合える仲間とつながることができるようになり、仲間と一緒に学びを深めていくようになる。その中では、他者から学ぶだけでなく、自身のスキル・知見を活かし、誰もが教え・教わる、学びの選択肢が広がっていくと予想される。

学ぶ内容も、ICT の知識や語学など、夢や目標の実現に必要なスキルと、それに応じた一人ひとりに最適な学習方法が用意され、個々人の進捗に合わせて、最適なプログラムが適用される。

B5G/6G が普及した時代では、暮らしにおける時間の概念が大きく変わるだろう。生前から脳内にチップが埋め込まれ、常にサイバー空間に脳内データがアップロードされる時代にな

るかもしれない。サイバー空間では昼夜は関係なく、第二の別の人生を歩むことができ、2 倍以上の人生経験を積むことができる。例えば、ミュージシャンの夢と寿司職人の仕事を掛け持ちすることができ、サイバー空間での経験をフィジカル空間へ同期することで、1 日が 48 時間に増えたような感覚で暮らすことができるようになる。

このようにオンライン学習の更なる普及には、大量のデータのやりとりを可能とする高速かつ低遅延のネットワークに加えて、画像圧縮技術や受講者の理解度・満足度をリアルタイムで把握することが可能となるモニタリングシステムが必要となる。

2.2.3. 趣味・遊びの変化

ワークライフバランスという概念が広がり、日本でも趣味や遊びに時間を割くが増えている。2030 年には、AI やロボットの普及によって仕事を短時間で効率的に行えるようになり、人々が、より自分の趣味や遊びを充実する傾向が強まるようになると予想される。

そこでは、ICT の進化によって言語や距離の壁はなくなり、趣味の上達に必要なスキルを学ぶための指導者を手軽に見つけて、双方向のコミュニケーションによる最適な指導が受けられるようになる。また、AI によって練習メニューから健康管理やボディケアまでトータルにプロ並みのサポートを受けることができ、自身が望むレベルまでスキルを上達させることも可能となる。サイバー空間でリアルと同じような体験ができるようになり、天候や場所による制約がなく自宅にいながら充実した練習ができるようになることが期待されている。

AI によるマッチングによってスキルレベルや趣味嗜好が合う仲間とのつながりができ、楽しみながら互いに競い、高め合うことができる。また、日頃の趣味や遊びに対して AI から新しい楽しみ方が提示され、気づいていなかった魅力を発見し、より豊かな時間を過ごすことができるようになると考えられる。この結果、趣味に打ち込むことで自己実現を果たす人や、プロ並みのスキルを身につける人も数多く生まれてくると予想される。

B5G/6G が普及した時代では、移動の概念が大きく変わるだろう。目的に寄り添った移動が、旅行の道中に新しい学びをもたらす移動へと変わる。AI が旅行プランに合わせて VR¹体験を提案してくれる。例えば、京都への旅行であれば金閣寺の建立の様子をリアルに再現してくれる。また、空飛ぶ車の車内では鳥と一緒に空を飛び空間が再現され、フードプリンタで美味しい食事を楽しむことができるようになる。乗降者の生体測定情報から快適な空間が演出され、移動時間は退屈知らずの満喫できる時間になる。

また、B5G/6G が普及した時代では、一次産業の概念が大きく変わるだろう。作物の最適環境を選択して、あらゆるデータで農作物の育成を管理できるようになる。例えば、移動式の農園は太陽、温度、雨、風の天気予報を鑑みて農作物を美味しく育てられるエリアへ自動的に移動する。管理 AI は様々なデータ収集だけでなく、農業機械の自動運転制御、土壌の細菌管理、雨水を濾過して散水管理を行い、将来の市場価格や天候予想から次に栽培すべき作物を教えてくれる。これにより、誰もがゲーム感覚で一次産業の担い手となることができるように

¹ Virtual Reality: 仮想現実

なる。

このような趣味・遊びのプロ化・高度化を実現するためには、AI によるマッチング技術、サイバー空間での五感体験を実現するための XR 技術やボディセンサ技術、大量のデータの送受信を可能とする高速かつ低遅延のネットワークが必要となる。

2.2.4. 休養の変化

近年、ワークライフバランスへの関心の高まりなどから、休日の過ごし方をより充実したものにしたいと考える人が増えており、2030 年には、テクノロジーを活用して、休日の時間を最大限に活用できるようになることが期待される。家事や好きなコトの中にある単純作業を AI やロボットに代替させることで、自分が本当にやりたいことに没頭できる理想の休日を過ごすことが実現できるようになる。

新たなことにチャレンジしたいと思えば、そのイメージを仮想空間で確認したり、現実の空間に重ね合わせたりすることで、事前にシミュレーションすることができる。こうして、自分の可能性を拡げながら、休日を過ごすたびに理想の自分に近づくことが可能になると予想される。

B5G/6G が普及した時代では、スポーツ観戦の概念が大きく変わる。離れた友人ともサイバー空間を通して、実際に現地の同じスタジアムにいるかのように、臨場感のある五感への刺激で空間を共有することができる。また、360 度自由な視点から観戦が可能で、選手の情報をリアルタイムで確認することもできるようになる。更にサイバー空間でその選手から直接スポーツを教えてもらうなど、スポーツ観戦が受動的なコンテンツからスポーツ自体を参加体験できる能動的なコンテンツになる。

こうしたロボットなどを活用した新しい休養の実現には、ロボティクスの発展に加えて、サイバー空間でさまざまなシミュレーションを可能とする大容量画像解析技術や高速かつ低遅延のネットワークが必要となる。

2.2.5. 交流の変化

スマートフォンの普及に伴う SNS の利用者増により、人々の交流スタイルは大きく変わった。2030 年には、人種や性別の違いはもちろんのこと、様々な能力の差や身体的な特徴、物理的な距離、言語などが原因で参加できなかったコミュニティへのハードルがテクノロジーによって解消されることが期待される。全ての人が楽しめる進化したバーチャルコミュニティが誕生すると予想される。そのような場では、時間や場所に囚われずに誰とでも自分が望む形でコミュニケーションを取ることができるようになる。更に、個人の嗜好や価値観、身体能力などを見極め、一人ひとりにあった新たな出会いをアシストしながら、悪意あるプレイヤをコミュニティから排除し、ありのままの自分を表現できると考えられる。

こうして一人ひとりの交流を最適化することで、スケールと安全性を確立したコミュニケーションが可能となり、理想の仲間やビジネスパートナーづくりが期待される。

B5G/6G が普及した時代では、散歩の概念が大きく変わるだろう。実際の街の膨大なセン

サのデータから、超高精細な三次元(以下”3D”と略記)空間を再現し、過去の街並みを散歩することができるようになる。例えば、寝たきりの祖父ともサイバー空間で一緒に歴史探索ができるようになる。フィジカル空間の情報がサイバー空間にも反映され、令和の街並みを歩く孫娘と、明治の街並みを歩く祖父が別の時間軸を共有して一緒に散歩を楽しむといったことができる。世代を超えた新しいコミュニケーションが生まれる。

このような新しい交流のスタイルを実現するには、バーチャルコミュニティでの交流を実現するための XR 技術や個々に最適な人を紹介することが可能となるマッチング機能を有する AI が必要となる。

2030 年に想定されるいくつかのライフスタイルを紹介したが、これらに限らずほかの生活シーンにおいても、多くの新しいライフスタイルが生起してくる可能性がある。特に、エコロジー、ロスレス、カーボンニュートラルなど、地球環境や地球生態系に対して良質な貢献ができるライフスタイルが多くの生活者から期待される。KDDI では、これらに関する生活シーンに高度な ICT を導入し、誰もが気軽に参加し、世界のために貢献できる文化や社会の構築を目指している。KDDI は2030年を見据えた新たなライフスタイルを提案する調査・応用研究拠点として2020 年 12 月「KDDI research atelier」を東京・虎ノ門に開設した。生活者の様々な意見をもとに、ここで述べたような新たなライフスタイルを提案し、それに関連する応用研究(技術検証・受容性検証)を行い、成果について実フィールドで生活者と共有・議論するためのコミュニティを形成、取り組みを発信していくこととしている。現段階で KDDI research atelier で構想している 2030 年のライフスタイルと 2030 年に向けた新しい社会基盤のイメージは図 2-2 のとおりである。

2030年に向けた新しい社会基盤



図 2-2 2030 年のライフスタイルに関するイメージ図 (KDDI 作成)

このような社会の実現には、きめ細やかな ICT によるリアルタイムの制御が必要になるため、B5G/6G の普及が前提となる。また、大量の個人データを取り扱うため、より高度なセキュリティが求められるようになる。そこで、次章では、B5G/6G に関する国の考え方、更に、KDDI の次世代社会構想である「KDDI Accelerate 5.0」について述べる。

3. B5G/6G に向けた構想

本章では B5G/6G に向けた国の動きと、B5G/6G の実現時期と目される 2030 年を見据えて KDDI が策定した次世代社会構想「KDDI Accelerate 5.0」について述べる。

3.1. Society5.0 と Beyond 5G 推進戦略

Society5.0 は、第 5 期科学技術基本計画において、我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱されたものである。これまでの狩猟社会(Society 1.0)、農耕社会(Society2.0)、工業社会(Society3.0)、情報社会(Society4.0)に続く、「サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会(Society)」とされる[3-1]。

Society5.0 で実現する社会は、IoT で全ての人とモノがつながり、様々な知識や情報が共有され、今までにない新たな価値を生み出すことで、これらの課題や困難を克服する。また、AI により、必要な情報が必要なときに提供されるようになり、ロボットや自動走行車などの技術で、消費高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などの課題が克服される。社会の変革(イノベーション)を通じて、これまでの閉塞感を打破し、希望の持てる社会、世代を超えて互いに尊重しあえる社会及び一人ひとりが快適で活躍できる社会となる。

2021 年度から 2025 年度までの 5 年間を対象とする第 6 期科学技術・イノベーション基本計画[3-2]は、Society5.0 の構想を引継いでいる。この基本計画は COVID-19 の拡大など国内外の急速な情勢変化を乗り越える具体的な戦略となるように作られており、2021 年 3 月までに閣議決定される見込みである。同基本計画では、我が国が目指すべき社会である Society5.0 を「直面する脅威や先の見えない不確実な状況に対し、持続可能性と強靭性を備え、国民の安全と安心を確保するとともに、一人ひとりが多様な幸せ(well-being)を実現できる社会」とまとめており、これは、2015 年の国連サミットで採択された SDGs と軌を一にするものである。Beyond 5G²は、国民の安全と安心を確保する持続可能で強靭な社会への変革に向けて、サイバー空間とフィジカル空間の融合による新たな価値の創出のために必要な次世代インフラ・技術として第 6 期科学技術・イノベーション基本計画において位置付けられており、その整備や研究開発は総務省が中心となって推進していくことが明記されている。

これを受けて、総務省は、2020 年 1 月から「Beyond 5G 推進戦略懇談会」を開催し、Beyond 5G の導入が見込まれる 2030 年代の社会において通信インフラに期待される事項やそれを実現するための政策の方向性などについて検討を行ってきた。同懇談会において取りまとめられた「Beyond 5G 推進戦略懇談会 提言」[3-3]を受け、2020 年 6 月に「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-」が公表された[3-4]。

「Beyond 5G 推進戦略」では、2030 年代に期待される社会像として「誰もが活躍できる社会(Inclusive)」、「持続的に成長する社会(Sustainable)」、「安心して活動できる社会(Dependable)」を挙げており、フィジカル空間とサイバー空間の一体化(サイバー・フィジカ

² 本節のみ1章で記載した表現「B5G/6G」を用いず、「Beyond 5G」と表記する。

ル・システム, 以下「CPS」と略記)が進展した「Society5.0」の社会で実現されるものとして
いる。

これらを実現するため, Beyond 5G では 5G の特徴的機能「超高速・大容量」「超低遅延」
「超多数同時接続」の更なる高度化に加え, 新たに 4 つの機能「自律性」「拡張性」「超安全・信頼
性」「超低消費電力」を具備することが必要とされている(図 3-1)。

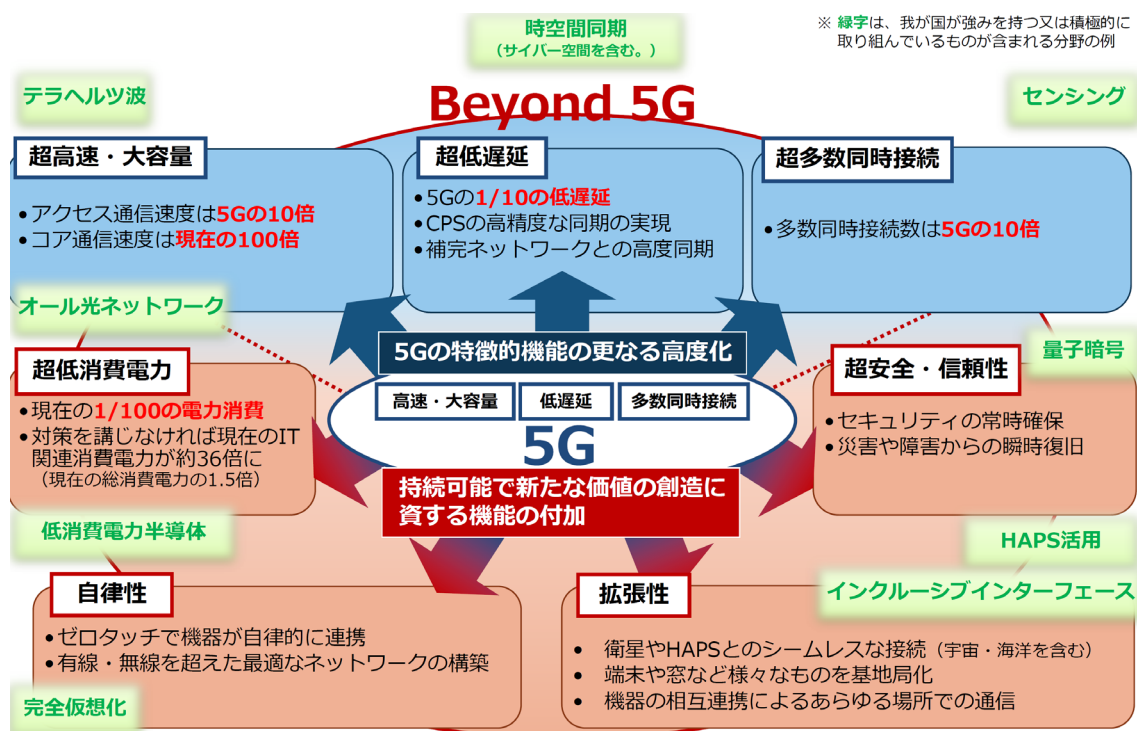


図 3-1 Beyond 5G に求められる機能など (出典:[3-4])

また、「Beyond 5G 推進戦略」では, ①グローバル・ファースト, ②イノベーションを生むエコシステムの構築, ③リソースの集中的投入を基本方針とし, 研究開発戦略, 知財・標準化戦略, 展開戦略についても述べている。研究開発戦略としては, 先端技術への集中投資と大胆な電波開放などによる世界最高レベルの研究開発環境を実現し, 2025 年ごろから順次要素技術の確立を目指している。また, 知財・標準化戦略としては, 戦略的オープン化・デファクト化の促進と, 海外の戦略的パートナーとの連携などによるゲームチェンジの実現により, Beyond 5G 必須特許シェア 10%以上を目指している。展開戦略としては, 5G・光ファイバ網の社会全体への展開と, 5G ソリューションの実証を通じた産業・公的利用の促進などによる Beyond 5G ready な環境の実現を目指している。

「Beyond 5G 推進戦略」を強力かつ積極的に推進するため, 産学官による「Beyond 5G 推進コンソーシアム」が 2020 年 12 月に設立された。また, 同月に, Beyond 5G の知財・標

準化戦略を推進するため、「Beyond 5G 新経営戦略センター」が設立された[3-5]。2021年より会合が開催され、「Beyond 5G 戦略推進 -6G へのロードマップ-」へ向けた活動が進められている。

3.2. KDDI の次世代社会構想「KDDI Accelerate 5.0」

1 章でも述べたとおり、KDDI は日本の DX 推進のために Society 5.0 の早期実現が必要と考え、これを 5G で加速すべく、2030 年を見据えた次世代社会構想「KDDI Accelerate 5.0」を策定し、2020 年 8 月に公表した[3-6]。

「KDDI Accelerate 5.0」において、KDDI は、国内外問わず大企業からスタートアップまで幅広いパートナーとともに、新たな社会基盤となるネットワーク、プラットフォーム、ビジネスの 3 つのレイヤの環境整備を進めることを宣言している。また、この環境整備の実現を支える 7 つの分野のテクノロジーの研究開発とそれらが密接に連携するオーケストレーションを推進し、生活者の誰もが意識することなく安心してテクノロジーの恩恵を享受できるフィジカル空間とサイバー空間の高度な融合を実現する。これにより、生活者の新たなライフスタイルの確立と日本の経済発展・社会的課題の解決を両立するレジリエントな未来社会の創造を目指す。

3.2.1. 3 つのレイヤの環境整備

(1) ネットワークレイヤ

国際水準の最新テクノロジーを用いた 5G ネットワークの早期整備により、高度で強靱な国内 ICT インフラの構築と継続的な発展を目指す。

具体的には、2022 年 3 月に、約 5 万局の 5G 基地局の建設を予定している。また地方の早期展開にはインフラシェアリングを適用することにより、5G の早期全国展開を加速する。

(2) プラットフォームレイヤ

国内外の企業の最先端技術を導入するオープンなプラットフォームの環境を整備することで、新たな提供価値・経済メカニズム・社会システムの創出を目指す。

具体的には、生活者の最適な行動や選択肢を提案する「パーソナルエージェント」、最適な経済メカニズムを実現する「産業データプラットフォーム」及び安心・安全を実現する社会システムを稼働させる「都市 OS」を様々なパートナーとともに立ち上げていく[3-7]。

(3) ビジネスレイヤ

大企業からスタートアップまで幅広いパートナーシップのオープンイノベーションによる DX を推進し、新たなビジネスモデルの創出を目指す。

具体的には、新規ビジネスの創出拠点「KDDI DIGITAL GATE」、自らの多様な働き方の実践による企業の働き方 DX の推進拠点「KDDI 法人部門 虎ノ門拠点」及び第 2 章

に述べた 2030 年頃のライフスタイルの実証に関する研究拠点「KDDI research atelier」がお互いに連携しながら、協創を促進していく。

このフィジカル空間とサイバー空間をつなぐ新たな社会基盤は、生活者、経済メカニズム、社会システムのリアルタイムかつダイナミックな調和をもたらし、生活者一人ひとりに最適化されたライフスタイルを実現する、活力に満ちた社会の構築を加速する役割を担っている。

3.2.2. 7 つのテクノロジーとオーケストレーション

KDDI では、前述した 3 つのレイヤの活動を支えるため、先端技術となる 7 つの分野のテクノロジーの研究開発を推進する。また、オーケストレーションと題し、研究開発やビジネスの連動性を高めていくことに注力する。結果として、フィジカル空間とサイバー空間の間で、生活者・経済・社会から得られるデータの循環を活性化し、生活者一人ひとりが快適で生活できる持続可能な社会の実現に貢献する。

5G の普及によりフィジカル空間とサイバー空間の融合は進み、フィジカル空間のデータはサイバー空間に集められ、さまざまな分析やシミュレーションが行われるようになる。KDDI は今後、通信を核とするさまざまなライフデザインビジネスのプラットフォームとして、サイバー空間上で安心かつ便利にデータ利活用する技術とともに、行動変容を促す AI や XR、ロボティクスなど、フィジカル空間へフィードバックする技術の研究開発を強化し、両空間の融合を加速する。

7 つのテクノロジーについては、4 章以降で詳述する。

「KDDI Accelerate 5.0」の目指す Society5.0 がもたらす経済発展と社会的課題解決を両立する持続可能で生活者中心の社会は、総務省の「Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-」で目指す 2030 年に期待される社会像と同じ方向性を示している。KDDI は、Beyond 5G 推進コンソーシアム、Beyond 5G 新経営戦略センターなどでの活動を通じ、国の活動に寄与しながら Society5.0 の実現を推進していく。

4. 「7 つのテクノロジー」について

KDDI は「7 つのテクノロジー」を用いて Society 5.0 の実現を加速することを 3 章に記載した。本章ではまず、7 つのテクノロジーの概要を説明する。その後、2 章に記載した 2030 年のライフスタイルを具現化するために、7 つのテクノロジーのどのような要素技術が寄与するかについて、ユースケースの例を用いて紹介する。

4.1. 「7 つのテクノロジー」の概要

Society 5.0 の構想である CPS と、両空間を結ぶ矢印の上に、関与する 7 つのテクノロジーを記載した図を図 4-1 に示す。

KDDI は、フィジカル空間からサイバー空間に送られる「データ収集(図中の左側の矢印)」については、5G までのネットワークの進化やセンサーデバイスの発展と普及により、実現しつつあると考えている。一方で、サイバー空間からフィジカル空間に送られる「フィードバック(図中の右側の矢印)」については、まだ十分に実現できていないのではないかと考えている。右側の矢印で示すフィジカル空間へのフィードバックが十分に行われ、フィジカル空間に存在する人々がフィードバックの内容の有効性を実感すれば、左側の矢印で示されるデータ収集の量が多くなり、データ収集の頻度も上がり、結果的に正のスパイラルが出来上がる。この正のスパイラルができないと、Society 5.0 を真に実現することは困難だと考えている。図 4-1 において、左側のデータ(収集)の矢印に比べて、右側のフィードバック(最適化)の矢印を太く明るく描画しているのは、右側の矢印の重要性を表すためである。

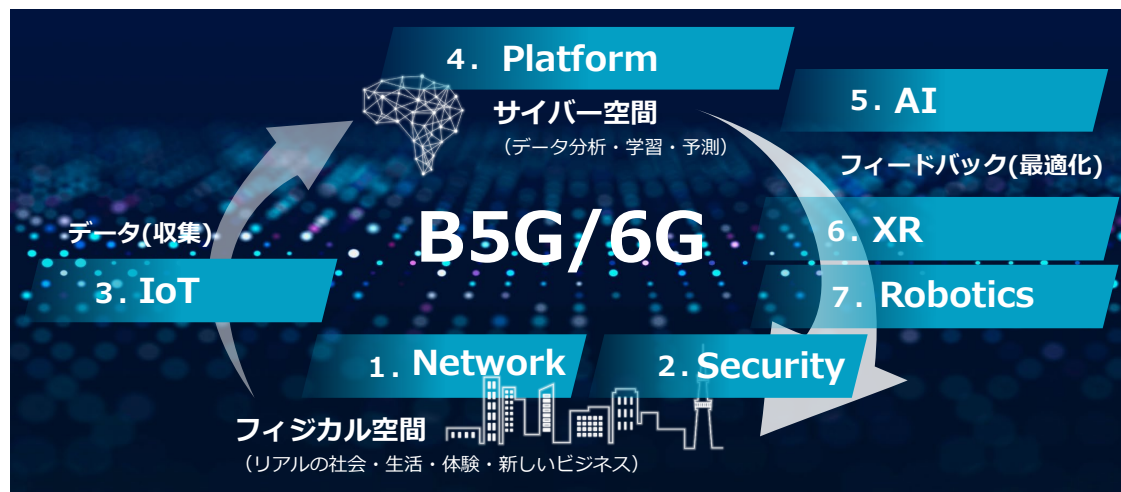


図 4-1 Society 5.0 の実現に寄与する「7 つのテクノロジー」

右側の矢印においてフィジカル空間に存在する人々に直接的な影響をもたらす技術が「6. XR」や「7. Robotics」であるが、これらの技術に対してどのような情報やデータを送るべきかを判断するのが「5. AI」であり、判断するためにデータを安全に管理し、運用する機能とし

て、「4. Platform」が必要である。

センサからさまざまなデータをサイバー空間に上げるためには、「3. IoT」の技術が必要である。サイバー空間のみならず、フィジカル空間に存在するさまざまなデータを安全に管理するために、「2. Security」の技術が必要である。そして、大量のデータを低遅延かつ信頼性も担保された状態で送受信させるためには「1. Network」が必要不可欠であり、ネットワークを構成する技術分野の一つが無線通信である。

4.2. 2030 年のライフスタイルの実現に必要な B5G/6G を支える技術

2 章にはライフスタイルを 9 つに分類し、それぞれの観点で 2030 年に予想されるライフスタイルの変化をまとめている。いずれのライフスタイルの実現にもさまざまな技術が必要となる。本節では、具体的なユースケース例を挙げ、このユースケースを実現するために必要な B5G/6G として求められる要素技術を紹介する。ユースケースの例として、現在の With コロナの環境によって、身近に利用されているためにイメージしやすい“デリバリーサービス”について取り上げたい。そして、2 章に記載した 2030 年のライフスタイルに照らし合わせた未来のデリバリーサービスである「ライフデリバリー」(2.1.2 節及び 11.3 節を参照)を実現するために、どのような要素技術が必要になるかを以降にまとめる。

まず、想定するユースケースとして、「家族の誕生日パーティを開催するため、さまざまな食べ物を取り寄せること」を挙げる。また、さまざまな理由によってリアルなパーティの場に出席できるのは家族をはじめとする限られた人だと想定する。このケースにおいて、まず 2.1.1 節の「食の変化」によって、パーティの参加者ごとの健康状態に合わせて適切なメニューが選ばれる。このためには、2.1.3 節の「健康の変化」に記載しているように、ウェアラブルデバイスや健康管理のためのセンサを通じて個人の健康状態を把握しておく必要がある。また、2.1.2 節の「購買の変化」に記載しているように、必要な飲料品や食料品の不足分は図 4-2(a)に示すようなセンサによって検知され、自動購入することができるようになっている。なお、自動購入に当たっては、家族の健康状態を個別に把握した上で、図 4-2(b)のようなバーチャルヒューマン(10.4.1 節を参照)がカウンセリングを行いながら、健康と嗜好を加味した飲食料品を選ぶことができる。更に、誕生日パーティのような非日常的なイベントが開催される場合も、センサを通じて事前にかつ自動的に配達ロボット(11.3 節を参照)によって必要な飲食物が届けられる(図 4-2(c))。このほか、事前に注文した料理やバースデーケーキなども配達ロボットによって運ばれる。なお、誕生日パーティのリアルな場に参加できない人にも希望に応じてパーティ会場と同様の食材がロボットを通じて届けられる。また、図 4-2(d)に示すような点群データによる 3D 画像(10.4.3 節を参照)に加え、触覚情報が伝達されることによって、リモート参加者がリアルな場にいる感覚を得ることができる(10.4.2 節を参照)。



(a) センサによる飲食物の自動購入 (b) バーチャルヒューマンによるカウンセリング



(c) ロボットによる自動配達

(d) 点群データによる 3D 動画

図 4-2 2030 年でのユースケース例:誕生日パーティ

これまでに紹介した技術は、直接、ユーザが五感を通じて感じるすることができる技術であるが、これ以外にも、以下に示す技術が必要になる。

まず、センサによる情報収集を行うためには、様々な場所にセンサを配置しておく必要がある。蓄電池で動作するセンサは充電や電池交換の課題がある。また、センサからサイバー空間へ送る情報として、位置情報が必要な場合もあるが、センサに位置情報を取得するための GPS 信号を受信する機能を具備していないことや、具備していてもセンサが置かれている場所では衛星からの GPS 信号を受信できない、ということもある。これらのような場合を想定し、メンテナンスフリーなセンサを実現するために、エネルギーハーベスト技術(7.4.4 節を参照)や位置情報を取得するための Virtual Positioning System(以下“VPS”と略記, 10.3 節を参照)が必要となる。

いうまでもなく、センサで送られる情報のセキュリティの確保には万全を期す必要がある。しかし、今後、量子コンピュータの普及を想定し、量子コンピュータでも情報が解読されないような次世代の暗号方式が必要となる(6.4.3 節を参照)。また、センサを用いてあらゆるデータがサイバー空間に送られることに対して懸念を有する人も少なくない。KDDI は Privacy Policy/Preference Manager (以下“PPM”と略記)と呼ばれるユーザがサイバー空間に送る情報を管理・制御する技術を開発した(6.4.1 節を参照)。今後、B5G/6G 時代では、扱う情報の種類の増加やユーザの嗜好の変化に対応するため、PPM を改良していく必要がある。

上述のユースケースでは配達ロボットが使われるが、今後さまざまな種類のロボットを管理し制御する必要がある。このためには Platform 上に Robotics as a Service (以下“RaaS”と略記)と呼ばれる新たな機能が必要となる(11.4.1 節を参照)。ロボットが自走により公道を移動する場合も、自動車を用いて運搬される場合も、Mobility as a Service (以下“MaaS”と略記)が必要となる(8.4.2 節を参照)。これらのほかにも、Platform には IoT デバイスの制御を行う機能や、異なる種別のデータを連携させる機能が必要となる(8.4.1 節を参照)。そして、Platform では、ユーザの生活レベルの向上や経済活動の活性化、エネルギーや地球温暖化などの環境を意識した社会システムとしての活動という 3 つの要素のバランスを考慮して制御を行う必要がある。

さまざまなデータを用いながら、Platform 上で決定されるこの 3 要素のバランスを考慮し、フィジカル空間での次のアクションを決定するのが AI である。既存の AI は、画像認識やゲームに象徴されるように、過去に大量のデータをサイバー空間内に蓄積し、深層学習を用いて認識結果の表示やゲーム上での情報提供を行っている(以降、このような AI を「ネット型 AI」と呼ぶ)。一方で、フィジカル空間では、身の回りの環境が時々刻々変化するため、同じ環境を再現することはほぼ不可能である。したがって、同じ環境で得られる情報には限りがあり、類似する環境であっても同様である。この環境変化は一人ひとりによって異なり、また、個人の嗜好やその時々感情によっても求める情報やデータは異なる。このように、従来のネット型 AI とは異なり、対象となる過去のデータが限られるなど、フィジカル空間特有の課題を解決する「フィジカル空間指向 AI」が必要となる(9.4.1 節を参照)。上述の誕生日パーティの例に当てはめると、誕生日という限られたイベントにおいて、年々、誕生日を祝ってもらう本人や祝福するメンバを取り巻く外部環境が変化しているため、限られたデータをもとに対象とする事象を予測する必要がある。また、フィジカル空間指向 AI によって得られた結果をもとに、フィジカル空間にいるユーザに対して、食習慣や運動習慣、移動手段といったさまざまな変化を促す働きかけを行うためには、対象のユーザの個性や趣味嗜好に合わせた情報を送る必要がある。このような働きかけを実現する技術が「説得 AI」である(9.4.2.2 節を参照)。併せて、ユーザが自ら健康促進のための食事管理や運動のような行動をするか否かは、ユーザが AI を信頼できるか否かに依存する。そこで、このような予測や結論を AI が導いた理由を提示するなどの技術である「信頼できる AI」も必要になるだろう(9.4.3 節を参照)。

これらの新たな AI によって、図 4-1 に示す右側の矢印を通じて、サイバー空間からフィジ

カル空間のユーザに対してどのような情報を伝えればよいかが決まる。ここで、伝えるべき情報を、画像や映像による視覚を含む五感の情報として表現する技術が XR である。まず、画像に関しては、現在使われている 2D 画像を用いた遠隔通信では臨場感と迫力に欠けるため、3D による画像伝送が求められる。3D 画像を実現する手段の一つとして、点群データという点の集まりによって 3D 画像を表現する技術が存在するが、2D に比べて多くの通信容量が必要となる。そこで、3D 画像の品質を落とさずに、点群データを圧縮する技術が求められる(10.4.3 節を参照)。このほかにも遠隔地にいながらあたかも同じ空間を共有しているかのように感じるためには、触覚や嗅覚を伝達するマルチモーダル連携も必要となる(10.4.2 節を参照)。

XR によるフィジカル空間への電子的情報の伝達のほかに、2030 年に向けて物理的なフィジカル空間へのフィードバック手段として期待されるのがロボットである。KDDI は、これまでも Telexistence 社が開発した遠隔操作ロボットの実用化に向けて、共同で研究開発を進めてきた。その一つが、国際標準の映像符号化方式 H.265/HEVC を用いた End-to-End の遅延を 100 ミリ秒から 50 ミリ秒に短縮した符号化技術である(10.4.3 節を参照)。上述した配達ロボットの例のように、これまでは一つのロボットが単体で動作することを目標に研究開発が進められてきたが、今後は複数のロボットが協調して動作することが求められる。この場合、ロボット間の映像伝送の遅延のみならず、ロボット間の意思疎通に必要なロボット間の五感通信の技術に加え、伝達された情報を元にどのような動作をすべきかをロボットが判断する技術も必要になると思われる。複数のロボットを連携して動作させるためには、ロボット間の情報伝達を行うためのインタフェースを標準化するとともに、Platform 内に実装される RaaS でのロボットの制御や管理を行う仕掛けが必要である。更に、ロボットが移動する場所では位置情報が得られる場所でない可能性もあるため、VPS のような位置情報を獲得する技術も必要となる。

配達ロボットのみならず、家庭内のお手伝いロボットや人の行動を支えるロボットが普及すると、人とロボットが共存できなければならない。これまでは、人からロボットへの指示が中心だったが、今後は、ロボットから人への提案や、人の安全が危ぶまれる場合はロボットから人への指示もあるだろう。このような場合、上述の様々な AI 技術に加えて、人とロボットとの相互作用(Human Robot Interaction, 以下“HRI”と略記)に関する技術が必要となる。更に、HRI を推進するために、人がロボットを受け入れられるかを測定し、改善につなげるための受容性評価に関する研究も必要になる(11.4.2 節を参照)。

これまで述べてきたように、3D 画像のような大容量のデータのみならず、センサをはじめとするさまざまなデバイスからのデータまで、通信サービスのコンテンツはますます多様化するだろう。これに伴って、サービスごとのトラヒック特性やネットワークに求める要件も千差万別になると思われる。遅延時間に関してもネットワークでの遅延のみならず、アプリケーション(以下“アプリ”と略記)レイヤまでを考慮した遅延時間の短縮が求められる。更に、自動車の自動運転のみならず、ロボットの自動配達のようにモノの行き来に伴う安全性が必要不可欠であ

るため、これを支える通信ネットワークも必要になる。

5G までの通信ネットワークでは主に人が存在する場所を意識してカバレッジエリアが作られてきた。通信事業者は、カバレッジエリアを面的に効率よく配置するために、セルラー型のアーキテクチャ(以下「セルラーアーキテクチャ」と略記)を採用してきた。しかしながら、セルラーアーキテクチャの場合、基地局から離れたセルエッジと呼ばれる場所では、スループットが低くなる。このような場所では、5G で導入される予定の End-to-End スライス技術と呼ばれる、サービスやアプリが求めるスループットや遅延時間、回線品質などの通信要件を満足するための仕組みを用いようとしても、通信要件を満足することができない事態に陥る可能性がある。上述のユースケースで紹介したように、今後は人だけではなく、ロボットの位置や移動場所にもカバレッジエリアを提供する必要がある。そこで、人やロボットが存在する場所にスポットライトを当てるかのように、カバレッジエリアを動的に構築する新たなアーキテクチャ「ユーザセントリックアーキテクチャ」が必要だと KDDI は考えている(5.4.1 節を参照)。ユーザセントリックアーキテクチャでは、分散配置された多数のアンテナ同士が協調してカバレッジエリアを構築する。この実現のために、Cell-Free Massive MIMO という技術の利用が考えられる(5.4.1.1 節を参照)。

今後は、人やセンサに加え、ロボットなどの新たなデバイスから大容量のデータ伝送が行われる。5G までは主に基地局から端末への回線であるダウンリンクでのスループット性能の向上に重点が置かれていたが、ロボットが自律的に移動するために時々刻々と変化する周辺環境を動画で撮影し、サイバー空間に存在する RaaS に対して動画データを送信するような場合、アップリンクでのトラフィック量は非常に多くなる。しかしながら、5G までの単一の端末に頼った通信では、端末に課せられている送信電力の上限によって得られるアップリンクのスループットには限界が生じる。そこで、ウェアラブル端末のような身の回りの端末との協調送信を実現し、アップリンクのスループットを向上させる「仮想化端末」という発想も必要になるだろう(5.4.1.3 節を参照)。

3D 画像の送受信や、送受信の対象としてロボットのような新たなデバイスも加わることを想定すると、B5G/6G の無線アクセス回線に求められるスループットは、5G に比べて更に高くなることが予想されている。したがって、アンテナが設置される場所と無線装置が配置されるセンター局を結ぶ、モバイルフロントホールと呼ばれる光ファイバ回線に求められる容量は、増大化する。これまで、モバイルフロントホールでは Common Public Radio Interface (以下「CPRI」と略記)や Enhanced CPRI (以下「eCPRI」と略記)と呼ばれるデジタル伝送のインタフェースを用いてきた。しかし、B5G/6G でのピークスループットを毎秒 100 ギガビットと仮定すると、毎秒テラビット級の光ファイバ回線が必要になり、現実的ではなくなる。そこで、無線装置の無線信号をアナログ伝送によってアンテナサイトまで伝送する新たな仕組みが必要になる。KDDI では、光無線融合(Radio over Fiber, 以下「RoF」と略記)技術を改良した、Intermediate Frequency over Fiber (以下「IFoF」と略記)を提案している(5.4.2.2 節を参照)。これによって、フロントホールにおける光ファイバ回線の容量

の課題を解消するだけでなく、アナログ伝送によって、アンテナサイトでのデジタル・アナログの変換が不要になるため、アンテナサイトの装置の小型軽量化と低消費電力化が図れるメリットも得られる。

ネットワークに関する技術に関しては、無線通信や光通信の技術以外にも、多様化するアプリやサービスを効率よく収容するためのフロー制御技術や多数のデバイスを収容する技術など、モバイルコアと呼ばれる端末の移動管理機能やパケット転送のゲートウェイの機能からなるシステムでも新たな技術が求められると考えている(5.4.3 節参照)。

このように、2030 年ごろの誕生日パーティを例にとっても、ネットワークのみならず、7 つのテクノロジーを構成するさまざまな要素技術を駆使して初めて実現できることがわかる。これらの技術については、5 章以降に紹介しているため、参照されたい。

なお、更に詳細を検討していくと、本ホワイトペーパーで紹介していない要素技術も必要となるだろう。このような未開拓・未着手の要素技術については、今後、国内外の企業や大学、研究機関の協力をいただきたい。そして、Society 5.0 の早期実現を通じて、「人々の生活レベルの向上、経済の活性化、環境面を意識した社会システム」を実現する次世代の社会基盤を共に構築したいと考えている。

5. 「1. Network」

5.1. B5G/6G における Network 技術の役割

インターネットの普及により、現実世界の「フィジカル空間」だけでなく、オンライン上にある「サイバー空間」が登場し、現在の生活様式や経済活動、社会システムはそれらの上で成り立つことも多くなってきている。2030 年になると、7つのテクノロジーの連携により CPS はより一層進展すると予測される。この連携を KDDI ではオーケストレーションと呼んでいるが、そのなかでフィジカル空間とサイバー空間をつなぐ重要な役割を担っているのが「ネットワーク」である。

例えば 2021 年現在でも、音楽は CD など媒体を購入して聴くのではなく、ストリーミングサービスなどオンラインサービスを活用しているユーザが増加しているが、これは音楽を聴くというフィジカル空間での行為を、ネットワークでサイバー空間とつなぐことで実現している。

2030 年はこの流れが更に加速し、フィジカル空間での様々なできごと、モノ、情報が全てサイバー空間にアップロードされることが想定される。サイバー空間では、AI やビッグデータを活用した様々なプロセッシングがなされ、再びフィジカル空間の XR やロボティクスなどの分野へとフィードバックされる。

このフィードバックの流れが、ネットワークの品質や機能の向上によって加速されることで、サイバー空間とフィジカル空間との垣根がなくなっていくことが期待される。全てのモノやコトがデジタル情報として、サイバー空間とフィジカル空間を行き来しながら、時間や空間、或いは物理的な制約を超えた社会を形成し、CPS が進展していくことが期待される。

5.2. B5G/6G において Network 技術が目指す姿

ネットワークの中でも特に重要なのが、無線通信ネットワークである。我が国でも 5G を用いたサービスが 2020 年 3 月に始まった。これまでの無線通信ネットワークにおいては「高速化」に重点を置いて技術が開発されてきたが、5G では高速化に加えて「低遅延」と「同時多数接続」も高性能化している。

B5G/6G では、更にこの「高速」、「低遅延」、「同時多数接続」の 3 つが進化していくことを目指している。CPS を形成するためには、フィジカル空間をそのままサイバー空間に再現できるデータを転送し、更にそれらのデータを元にサイバー空間で生成・加工した情報を 3D などの高精細映像やホログラムなどの技術でフィジカル空間に再現することが求められる。そのため、現在よりも膨大なデータを転送する必要がある。加えて、フィジカル空間からサイバー空間、サイバー空間からフィジカル空間の転送を低遅延で行うことでリアルタイム性が増し、それらの転送を同時に多人数が行うことでそれぞれの一体感も生まれ、サイバー空間で生成・加工した情報によりフィジカル空間に存在する人々はリアリティを感じることができるようになる。

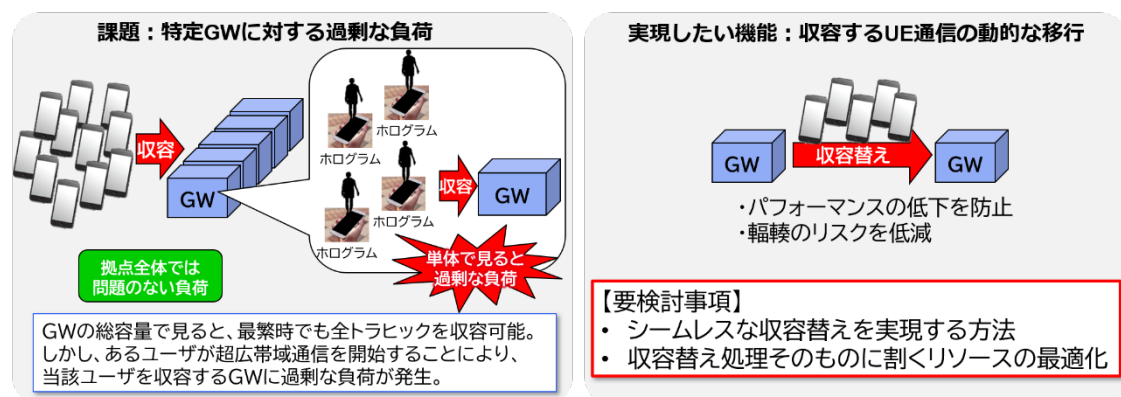
2030 年ごろには、サイバー空間とフィジカル空間のリアルな連携により、実物と見分けが付かないような 3D ホログラフィや五感通信が実現され、あらゆる場所にワクワク感を届けることができる。しかし、3D ホログラフィの実現には 1 テラビットのデータ[5-1]を瞬時に転送

できることが求められる。それはサイバー空間とフィジカル空間の間で膨大なデータのやり取りが発生するためであり、両空間を大容量かつ高速(低遅延)にデータ転送することが可能な超大容量光ファイバ通信が必須となる。ペタビット級の超大容量光ネットワークを構築可能な「マルチコア光ファイバ伝送技術」や、無数の基地局アンテナと無線集約局を超大容量かつ高効率に接続する「Radio over Fiber (RoF) 伝送技術」などにより、これまで以上に大容量で省電力性に優れた、レジリエントな光ファイバ通信網が実現でき、実家の家族、海外の同僚、地球の裏側の友人とのサイバー空間を介した“リアルなつながり”が実現される。

B5G/6G 時代のモバイルコアにおいては、5G システムが実現する大容量・低遅延・同時多接続の要件を更に飛躍させるのに加え、省電力、自律性、安全・信頼性、拡張性を達成することが求められている[5-2]。それぞれを実現する上で、大容量・低遅延に関してモバイルコアが備えるべき能力を以下に述べる。

大容量(広帯域)通信に関しては、それを収容するモバイルコアの能力と、端末が一定の通信速度に到達するまでの時間を短縮するための通信フロー制御がそれぞれ求められる。通信フロー制御が円滑に動作して端末の通信速度が一定レベルまで素早く到達すると、ほかの端末が輻輳を引き起こしやすくなる。したがって、通信収容とフロー制御を両立する必要がある(図 5-1)。

ユーザから求められる(超)広帯域通信を確実にトランスポートできるユーザプレーンの実現
(モバイルコアは通信内容の変化によるトラフィックの急激な高まりに対応が必要)
→ ユーザ通信(UE通信)のGW動的収容を実現



GW: ゲートウェイ

図 5-1 大容量(広帯域)通信の課題の例:ユーザ通信の収容

低遅延通信に関しては、データ伝送に必要な時間の低遅延化に加えて、データ伝送に必要な通信開始までの時間の短縮も鍵となる。移动通信システムは端末の通信開始の段階で、多くの場合無線リソースを開放しており、その復帰には複数回の信号の往復に相当する一定の時間を要す。これを縮小することで、通信の開始から低遅延の通信を実現することが可能になる(図 5-2)。

End-to-Endで15ミリ秒（単方向、アプリ処理含む）
デジタルツインとして、遠隔デバイスへ、遅延を意識せず操作

デバイス(要件)に応じた最善方法を選択

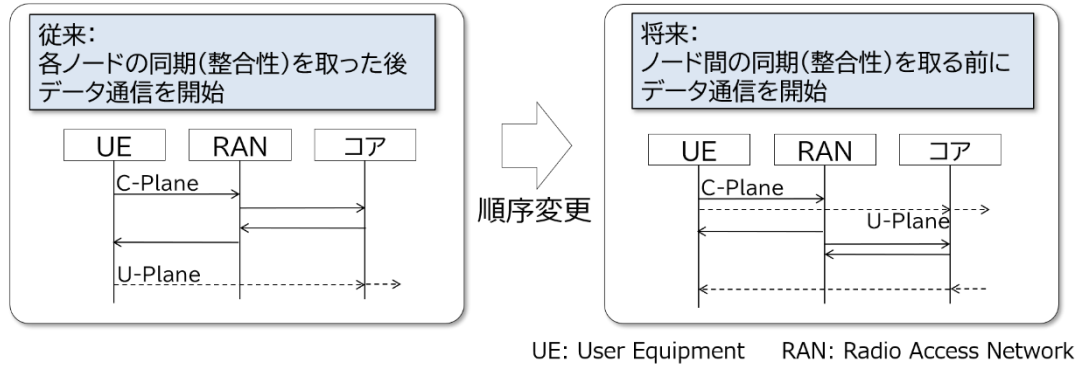


図 5-2 低遅延通信の課題の例:通信開始時間の短縮

また、ネットワーク運用の自動化は、B5G/6G に向けて更に高度化が期待される技術であり、表 5-1 で示すとおり、段階を踏まえた高度化を目指している。

表 5-1 ネットワークにおける運用自動化の定義

	概要	判断の主体
Level 0	人による運用業務 運用者が全ての運用タスクを実施	運用者
Level 1	運用タスクの一部自動化 スクリプトによるコマンド実行操作を自動化	
Level 2	運用プロセスのフロー自動化 ルール(しきい値など)ベースによる判断の一部自動化	運用者(主) システム(副)
Level 3	運用プロセスの判断自動化 システムによる判断の一部自動化	システム(主) 運用者(副)
Level 4	特定環境における完全自動化 システムによる特定の業務や NW に特化し完全自動化	システム
Level 5	完全自動化 システムにより全ての業務・NW が自動化	

運用者が全てのタスクを実施する Level 0 から、システムにより全ての業務・ネットワークが自動化される Level 5 までの各段階で定義され、B5G/6G 時代には Level 4 から Level 5 の運用自動化を実現することを目指している。B5G/6G 時代にはダイナミックに設定変更されるスライスが期待されており、サービス提供中の柔軟な設計変更や、状況に応じたネットワークリソースの割当変更などの動的な制御が求められる。ネットワーク要件の複雑化も想定され、Multi-access Edge Computing（以下”MEC”と略記）などの新しい技術がサービスに取り込まれ、更に IoT 向けのネットワークが拡張されるなど、設計時に考慮すべき項目が増える。また、その取りうる選択肢が増えることによって、既存の設計パターンと組み合わせると膨大な設計パターンとなる。

5.3. 世の中の状況

B5G/6G を実現するために、既に多くの国でさまざまな取り組みが始まっている。国際的な電気通信に関わる標準化機関：国際電気通信連合（International Telecommunication Union, 以下”ITU”と略記）の電気通信部門である ITU-T では、既存のネットワーク技術、プラットフォーム及び標準化を調査して、2030 年のネットワークに必要な要件とのギャップと課題を特定するために、”ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030”（以下”FG NET-2030”と略記）を立ち上げた[5-3]。FG NET-2030 では、ビジョン、要件、アーキテクチャ、新しいユースケース、評価方法など、2030 年のネットワークに向けてあらゆる側面から課題を整理し、これらをホワイトペーパーとして発行している[5-4]。これに応える形で、ITU の無線通信部門である ITU-R は、B5G/6G 時代に求められる主要テクノロジーをリスト化した技術報告書の作成を開始している。この技術報告書は 2023 年頃に発行され、その後 3GPP やほかの組織で技術規格策定に活用される予定である。ITU-T Study Group 13 では、ネットワーク運用自動化に向けて Autonomous Networks に関する Focus Group を立ち上げ[5-5]、将来のネットワークにおける進化への考慮を含めた、Autonomous Networks の技術レポートと仕様を今後策定していく予定となっている。また、ネットワーク運用技術に関する代表的な標準化組織である TM Forum では Autonomous Networks プロジェクト[5-5]を立ち上げており、ネットワークが自律的に運用業務を実行できる AI ベースのアーキテクチャを提唱している。具体的には、ネットワーク機器、ネットワーク、オーケストレーター、カスタマーポータルの 4 レイヤに分かれたアーキテクチャにおいて、それぞれのレイヤ間での 3 つの Closed Loop(自動化される一連の業務サイクル)と、最上位と最下位間の Closed Loop の計 4 つの Loop でネットワークドメイン間を跨る俯瞰的な自動化を目指している。

ヨーロッパでは、フィンランドのオウル大学が支援している 6Genesis プロジェクトが、2018 年 6 月にフィンランドアカデミーのフラッグシッププログラムプロジェクトに指定され、早い段階から研究を開始している。プロジェクトでは、5G の進化をサポートするとともに、B5G/6G を実現するために必要な基本技術を開発し、社会のデジタル化を加速することによ

り、将来の業界をサポートすることを主な目標としている。これらの成果については、2019年9月に”Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence “として公開されている。

北米では、ニューヨーク大学と米国国防高等研究計画局 (Defense Advanced Research Project Agency, 以下”DARPA”と略記)が、B5G/6G への取り組みの一環として、主にテラヘルツ帯域(概ね 100~1,000 ギガヘルツ)で無線通信の研究開発を行うために、無線及びセンサ技術の研究センターComSenTer を立ち上げた。カリフォルニア大学サンタバーバラ校、バークレー校、サンディエゴ校、コーネル大学、マサチューセッツ工科大学もこのプロジェクトに参加しており、システム、集積回路、デバイス、デモンストレーションの4つのチームで研究開発が進められている。更に、Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS)は、NEXT G Alliance を設立し、B5G/6G のロードマップの策定に取り組んでいる。

我が国では、B5G/6G によって、5G が推進する CPS の進展を更に加速し、Society5.0 のバックボーンとしてのコア機能を果たすことが期待されている[5-6]。2020年6月に発表された”Beyond 5G 推進戦略 - 6G へのロードマップ”[5-7]では、B5G/6G の7つの主要な要件として、超高速及び大容量、超低遅延、超多数の接続、超低消費電力、超セキュリティと復元力、自律性とスケーラビリティがそれぞれ定義されている。

バックボーンやバックホールのネットワークを支える光ファイバ通信網は、これまで、時分割多重、波長多重、デジタルコヒーレント光通信と、光信号を多重化する技術の進歩により、約30年で30,000倍の飛躍的な容量拡大を実現してきた(例えば光海底ケーブルは1989年の毎秒560メガビットから2010年代後半には毎秒15テラビット/fiberに容量を拡大)。しかし、これらの多重化には限界が見えてきている[5-8]。これまでの既設のシングルモード光ファイバでは、光ファイバ中で発生する非線形劣化やファイバフューズ³の現象により光ファイバに入力できる光パワーには限界があり、これまでの多重化技術だけでは現行の約10倍(毎秒100テラビット)以上の容量拡大は困難な状況である。したがって、持続的な容量拡大を実現できる技術が不可欠となる。

KDDI は、これまで上述の限界を打破する新たな光ファイバ通信技術として「空間多重光ファイバ伝送(Space Division Multiplexing, 以下”SDM”と略記)」に取り組んできた。空間多重技術は、2008年より電子情報通信学会 EXAT 研究会[5-9]にて議論が開始され、KDDI は、設立当初より、主要メンバとして積極的に同研究会に参画し、多くの研究成果を挙げてきた。表5-2に主要成果を示す。特に、2017年には現光通信システムの伝送容量の1000倍に相当する毎秒10ペタビットのマルチコア・マルチモードファイバ(19コア6モードファイバ)伝送に世界で初めて成功し、「京」ビット時代の光通信の扉を開けた[5-10]。この成果は世界最大級の国際学会でも高く評価を受け、学会の公式プレスでは”In a heroic effort, researchers from Japan have managed to break the current record

³ 光ファイバが光により破壊される現象。

by a factor of 5”と称賛された。これは SDM 技術の高い拡張性とポテンシャルを実証するものである。しかし、伝送距離はまだ 10 キロメートルと短く、延伸化に向けて更なる研究開発が必要となっている。更に最近では、光ファイバの製造性や機械的耐性などを考慮し、標準外径 125 マイクロメートルのマルチコア光ファイバ(MCF)が実用化に向けて注目されており、一般社団法人情報通信技術委員会(TTC)[5-11]並びに ITU-T SG15 における SDM に関する技術レポートの策定開始や、NICT 委託研究「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」の開始(2018～2022 年度)[5-12]により実用化に向けた検討が加速している。

表 5-2 マルチコアファイバ光伝送技術における KDDI の世界初(当時)のこれまでの成果

	世界初(当時)の成果	参照
2012 年	マルチコア大洋横断級光伝送実験に成功	[5-13]
2013 年	1 エкса・ビット×キロメートル超長距離 MCF 伝送実験に成功	[5-14]
2015 年	毎秒 2 ペタビット MCF 伝送実験に成功	[5-15]
2017 年	毎秒 10 ペタビット MCF 伝送実験に成功	[5-10]

モバイルコアに関する技術開発では、プロセッシングを削減する、若しくは新たに確保する実装アーキテクチャの検討が進められている。例えば、モバイルコアで規定される機能(3GPP 標準 TS23.501[5-16], TS23.502[5-17], TS23.503[5-18])を一つの機能に統合実装することで信号の往来と信号往来に必要なプロセッシングを削減するアプローチや、端末のプロセッシングを活用する Peer-2-Peer 基盤上へモバイルコア機能を展開するアプローチが提案されている[5-19]。また、低遅延通信を実現する手段では、MEC を活用するユーザデータ(端末上で動作するアプリの通信データ)の配送遅延を縮小する検討に加え、信号処理の遅延を低減する検討が増えてきている。これまでの主なアプローチは機能統合による信号数の削減[5-20][5-21]であったが、信号メッセージの変換処理(シリアライゼーション)を高速に行うアプローチ[5-22]なども提案されてきた。なお、これらの提案はいずれも、B5G/6G に向けたモバイルコアそのものの能力要件には踏み込んでいない。また、端末の増加に伴う同時多接続への対応も不可欠であることから、モバイルコアの能力要件を精査することから検討を開始する必要がある。

5.4. 2030 年に向けて必要な技術

本節では、B5G/6G 時代、すなわち 2030 年以降のネットワークを支える技術について、無線、光、ネットワーキング及び運用の観点から整理する。また、ネットワーク装置全般に対して今後浸透すると予想される、ホワイトボックス(汎用機器)化やハード・ソフト分離に関しても最後に触れる。

5.4.1. ユーザセントリックアーキテクチャ

B5G/6G を実現するためには、ユーザごとに、通信環境と個別の通信要件に応じて通信エリアを構築する、ユーザセントリックなネットワークを実現することが重要である。無線通信では、スマートフォンなどモバイル通信機能を搭載した通信機器と基地局が、ワイヤレスで接続し通信が行われる。

従来の無線通信では、基地局を面的に配置することで、できるだけ広いエリアに高い性能要件の通信サービスを提供するという考え方で構築される。図 5-3 の左の図に示すように、一つ一つの基地局が通信サービスを提供するエリアを細胞(セル)になぞらえ、このようなネットワーク構成を「セルラーアーキテクチャ」と呼んでいる。

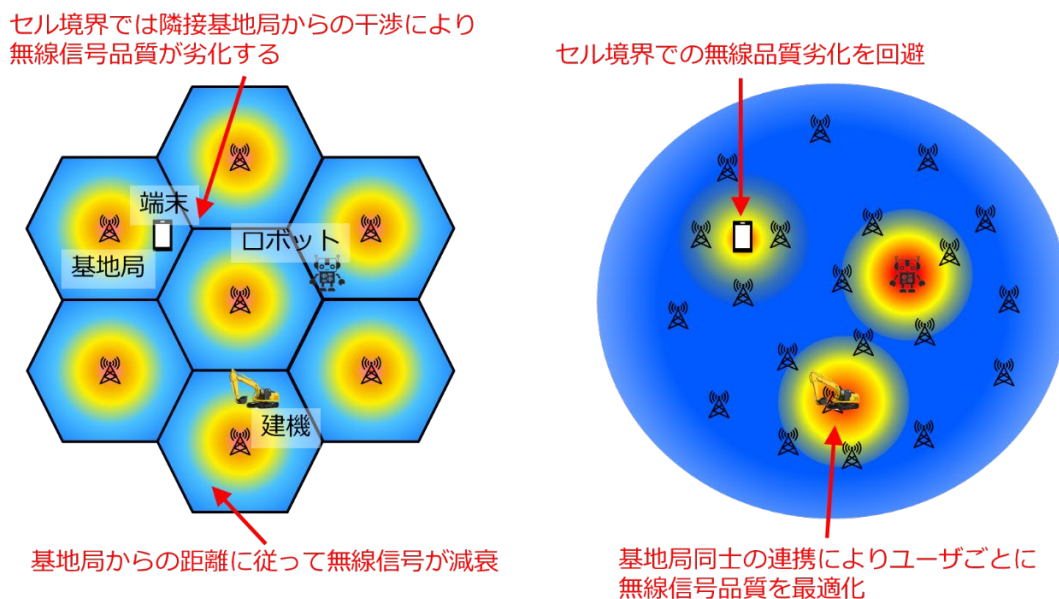


図 5-3 セルラーアーキテクチャ(左)とユーザセントリックアーキテクチャ(右)

「セルラーアーキテクチャ」では、ユーザやトラヒックの分布に応じて基地局が展開されているが、基地局のサービスエリア、セルの境界付近では、基地局からの無線信号が距離によって減衰する。またセル境界では、隣接する基地局からの電波が干渉となり、これによっても無線信号の品質が大きく劣化する。

5G では超高速・大容量の通信を実現するため、ミリ波帯などの高い周波数帯が利用されるようになった。このような流れは、B5G/6G において更に顕著になることが予想されるが、利用する周波数が高くなるにつれて、遮蔽による通信の切断が発生するなど、通信の不安定性を招くということも課題として発生する。

このような課題を解決する技術として、KDDI は図 5-3 の右の図に示すような「ユーザセントリックアーキテクチャ」の導入が有効であると考えている。ユーザセントリックアーキテクチャでは、それぞれのユーザに対して特定の基地局がサービスを提供するのではなく、複数の基

地局が連携してサービスを提供する。これにより、B5G/6G 時代に多様化する通信に対する要求に対して、最適な通信環境を提供する。例えば、高画質な 3D 動画などの大容量データを送信したいユーザにおいては、通信品質としてデータの転送速度が重要になる。このようなユーザに対して、近隣の基地局が連携して無線信号を送受信することで、基地局同士が干渉することなく、大容量の通信サービスを提供することが可能となる。一方、移動の軌跡をリアルタイムで正確にモニタリングしたいというニーズの場合、GPS の位置情報は 3D 動画などと比べるとデータサイズも小さいため高速な通信は必要ではないが、通信が切断されず低遅延でデータが送受信される必要がある。このようなユーザに対しては、複数の基地局が同時に端末に通信サービスを提供し冗長性のある接続を実現することで、ユーザの移動や周辺環境の変化に対して安定した通信を途切れることなく提供することが可能となる。これにより、移動無線環境においても、固定通信と同等の接続性を確保する。

このように、ユーザセントリックアーキテクチャでは、各ユーザが最良の通信サービスを、様々な環境で安定して享受できるようになり、サイバー空間とフィジカル空間が、その境界を意識することなくつながることが期待される。

以下の節で、同アーキテクチャを実現していくための要素技術を示す(図 5-4)。

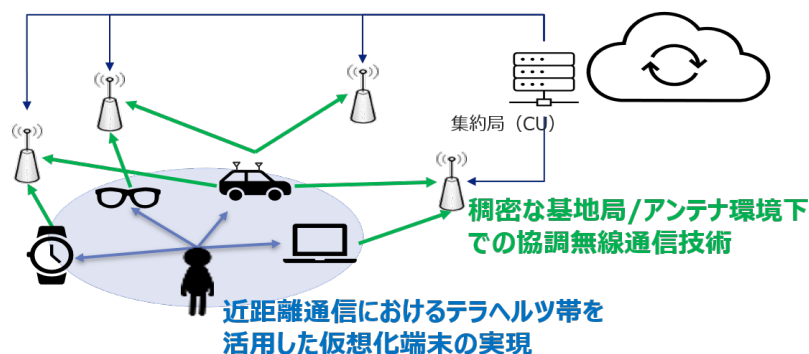


図 5-4 ユーザセントリックアーキテクチャと要素技術

5.4.1.1. Cell-Free massive MIMO

KDDI は、ユーザセントリックアーキテクチャを実現するための要素技術として、Cell-Free massive MIMO が有効であると考えている。Cell-Free massive MIMO は、2010 年代後半から研究されている技術であり、分散 MIMO 技術と massive MIMO 技術を組み合わせたものと位置づけられる[5-23]。図 5-5 に示すとおり、多数の基地局アンテナを稠密に分散配置し、個々のユーザに対して複数の基地局アンテナを連携させ、集約局において massive MIMO 技術を適用することにより、ユーザ間の干渉が抑圧され、従来のセルラーアーキテクチャで課題となっていたセル境界での無線品質劣化を軽減することが可能となる。これにより、同時接続の数を増やし、ユーザあたりのスループット、信頼性及びエネルギー効率を向上させることが可能となる。

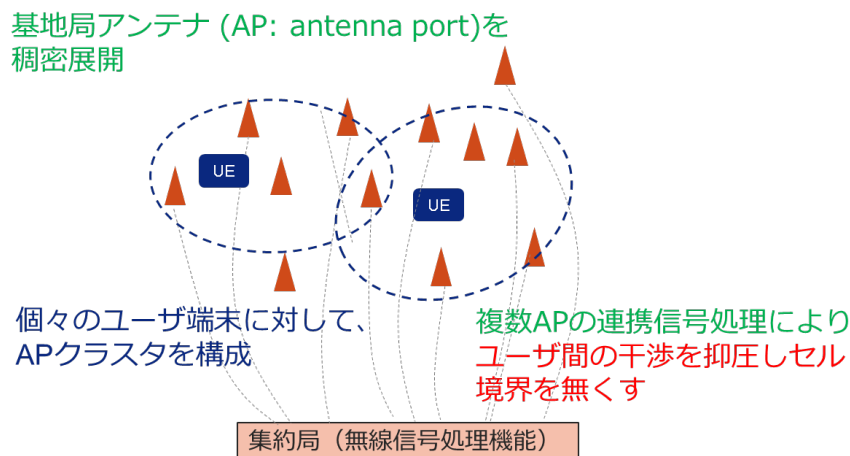


図 5-5 Cell-Free massive MIMO

Cell-Free massive MIMO の効果は、連携信号処理する基地局アンテナをどの程度分散させて配置するか大きく依存する[5-24][5-25]. そこで、基地局アンテナの配置形態の違いによる Cell-Free massive MIMO の効果についてシミュレーション評価を行った. その結果、一つのサイトに全てのアンテナを配置する従来からの集中型 massive MIMO に対して、アンテナを分散配置して連携させることにより、周波数利用効率が改善するとともに、ユーザごとの周波数利用効率の分散が小さくなることが示された. 更に、基地局アンテナを一つずつ分散させる完全分散(Full-distributed) Cell-Free massive MIMO と比較して、複数の基地局アンテナを1カ所のサイトに設置する準分散(Semi-distributed) Cell-Free massive MIMO であっても、基地局間連携の効果が十分に得られていることが明らかになった[5-26].

Cell-Free massive MIMO を実現するにあたっては、従来にない柔軟な Radio Access Network (以下”RAN”と略記)アーキテクチャが必要になると考えている. 図 5-6 に、これまでの RAN アーキテクチャの変遷を示している. 同図(a)は従来からある基地局装置構成であり、基地局サイトごとに基地局機能が定義されている. 基地局機能については長くハードウェアでの実装であったが、近年では基地局機能のソフトウェア化、仮想化が進められている.

同図(b)は今後の 5G 高度化の一形態として検討されているアーキテクチャであり[5-27], 基地局の信号処理機能(Distributed Unit, 以下”DU”と略記)とパケット処理機能(Central Unit, 以下”CU”と略記)がそれぞれ仮想化されている想定の下で、ユーザのサービス品質要件に応じて、DU と CU の配置や、無線や計算機リソースを動的に制御可能なアーキテクチャとなっている.

同図(c)のユーザセントリックアーキテクチャでは、Cell-Free massive MIMO による基地局間での分散信号処理をユーザごとに提供するため、仮想化技術を活用して、更に柔軟な

制御ができるアーキテクチャが必要となる。Cell-Free massive MIMO では、チャンネル推定やマルチユーザ識別などの多様な無線信号処理機能(Signal Processing, SP), 無線 MAC 処理機能(Radio MAC Processing, RMP), パケット集約機能(Gateway, GW)を, ユーザごとの通信環境に適応して最適配置, 制御することが可能な RAN アーキテクチャに進化していく。

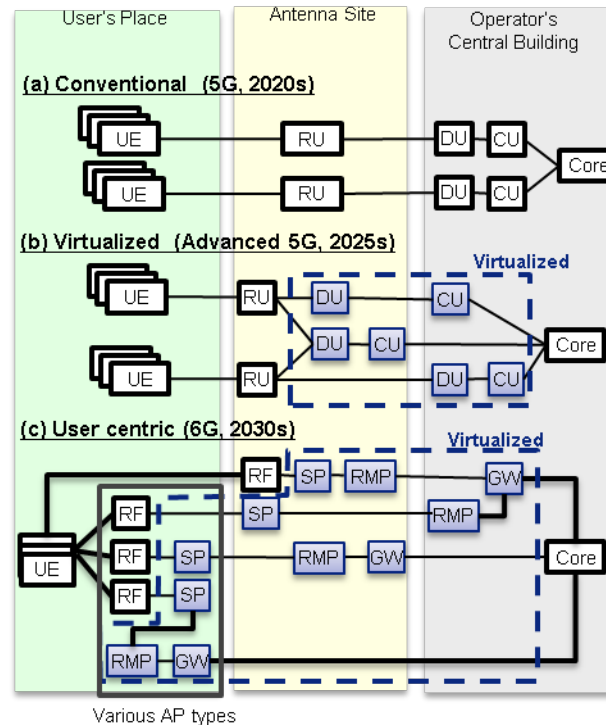


図 5-6 RAN アーキテクチャの変遷

5.4.1.2. Intelligent Reflecting Surface

ユーザセントリックアーキテクチャの実現, すなわち, 個々のユーザに対して必要なサービス品質を満足させるためには, 基地局を稠密に配置し, それぞれのユーザに対して複数の基地局がくまなくカバレッジを提供できていることが必要となる。5G から, ミリ波帯の活用が本格化しているが, 波長が短く広いサービスエリアの提供が困難であること及び電波の直進性が強く, 建物や樹木だけでなく車両やヒトによる遮蔽でもカバレッジホールと呼ばれる不感地域が発生しやすい, などの課題がある。B5G/6G に向け, より高い周波数帯の利活用が進むにしたいが, この問題がユーザセントリックアーキテクチャを実現する上での一つの課題になると考えられる。この課題を解決する手段として, 反射板の活用が注目されている。特に, 図 5-7 に示すような, 微細な人工表面構造により自然界にない電波や光などの電磁的な特性を生成できるメタサーフェス技術を適用することにより, 正規反射方向でない方向に電波を反射するメタサーフェス反射板の検討が進んでいる。

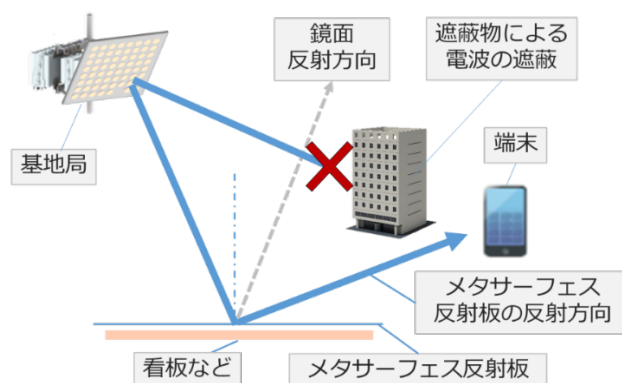


図 5-7 メタサーフェス反射板

例えば, [5-28]では, 複数の周波数帯に対応したメタサーフェス反射素子を導電性フィルムによって構成し, これを透明樹脂板で支持する, 透明メタサーフェス反射板を発表している. 図 5-8 と図 5-9 に透明メタサーフェス反射板の外観と反射素子の構造をそれぞれ示す. 透明で目立たない素材で反射板を構成することにより, 建物の壁面や街中の構造物に, 景観を損ねることとなる設置することが可能となり, ユーザを取り巻く様々な場所から無線による接続を提供することができる.

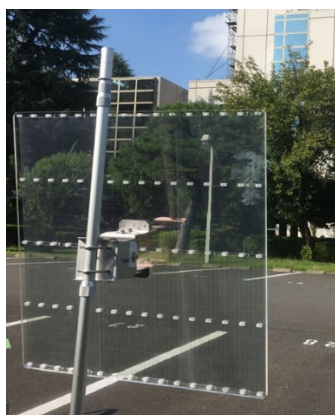


図 5-8 透明メタサーフェス反射板の外観



図 5-9 反射素子の構造

ここで、透明メタサーフェス反射板による反射波の指向特性は、それぞれの周波数帯に対応した反射素子の形状によって一意に決定される。そのため、ユーザの場所や、その移動に応じて、反射方向を変化させることができない。一方、ユーザはフィジカル空間内の様々な場所で通信サービスを利用し、また、その場所や環境は、時々刻々変化していく。そのため、B5G/6Gの時代には、設置により景観を損ねないように、透明性、透過性を維持しつつ、ユーザの場所や移動に適応して反射方向特性を自在に変化させることが可能な反射板の技術である IRS (Intelligent Reflecting Surface) 技術を確立することが必要となる[5-29]。

5.4.1.3. 仮想化端末と Radio over THz 技術

2030 年代の無線通信ネットワークにおいて、ユーザ個別の高い通信性能要求に応えるには、ユーザが利用する端末自体の進化も必要となる。例えば、現在最もポピュラーなユーザ端末であるスマートフォンや携帯電話は、重量や形状などの進化はあるものの、無線機としての無線の能力自体は、携帯電話ができた 40 年前から大きく変化してはいない。

しかし、サイバー空間とフィジカル空間との間で、ユーザ個別の多様な要件に応える質と量の情報のやり取りを実現するためには、ユーザ端末には筐体サイズから決まる搭載アンテナ数や最大の送信電力など大きな制約がある。アンテナ数などの制約を緩和するために、スマートフォンのサイズを巨大にするのは現実的ではなく、ユーザ端末から基地局への上りリンクにおける通信性能は、基地局からの下りリンクと比較して大きく劣っている。

このような、ユーザ端末の制約を解決するために、ユーザを取り巻く環境に、ユーザセントリックアーキテクチャの考え方を導入することを考える。具体的には、ユーザ端末の周辺にある様々なデバイスが協調することによって、1台のデバイスでは制約となっていた送信電力や搭載アンテナ数などの課題を解決することが可能になる。

図 5-10 に、このような仮想化端末のコンセプトを示す。例えば、ユーザ端末周辺にある PC や時計、メガネ(スマートグラス)、或いは自動車などのデバイスが無線機となり、それらが連携することで、送信電力の制約を克服する、或いは仮想的にアンテナ数の制約を克服することが可能となる。スマートフォンを持って自動車に乗った際には、自動車に搭載されているアンテナも、スマートフォンのアンテナとして仮想的に利用することで、通信性能を向上できる。

ここで、ユーザが所持するスマートフォンなどの端末と、時計やメガネなどの周辺デバイスとの間の通信は、短距離であるが非常に広帯域の信号送受信が必要となる。時計やメガネなどの小型デバイスにおいては無線信号処理に必要な能力が限られることから、これらのデバイスでは複雑な無線信号処理を実施することは回避すべきである。そこで、仮想化端末のコンセプトでは、ユーザが所持するスマートフォンが端末としての無線信号処理を担い、スマートフォンと周辺デバイスとの間は広帯域のテラヘルツ無線で接続し、周辺デバイスではテラヘルツ無線を基地局と接続するための周波数(例えば、ミリ波帯や Sub-6 ギガヘルツ帯など)に変換する「Radio over THz 技術」の活用が今後の検討課題である。テラヘルツ無線については、これまで無線バックホールなどの固定・長距離無線での活用について検討が進んでいるが[5-

30], 今後はこのような短距離での活用事例を通じて幅広く普及していくことが期待される。

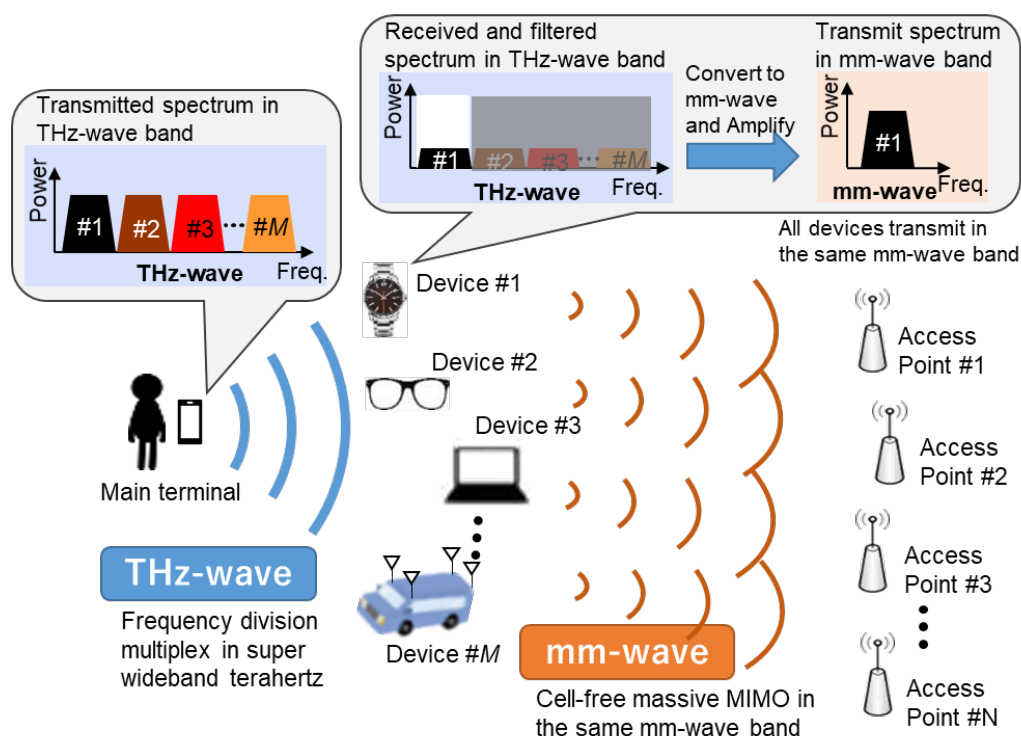


図 5-10 仮想化端末のコンセプト

5.4.2. 3つの「つなぐ」を具現化する超大容量光ファイバネットワーク

2030年代のネットワークに求められる容量は、現在の100倍以上、つまりアクセス網はテラビット級、コア網はペタビット級の大容量化が必要である。しかし、KDDI Sustainable Action[5-31]に基づく、3つの「つなぐ」を具現化するためには、単なる設備増設による大容量化だけでは不十分であり、省電力・省スペース性を十分満足する将来に渡って持続可能な超大容量光ファイバネットワークが求められる。本節では、B5G/6G時代のネットワーク構築に必要となる「マルチコア光ファイバ伝送技術」と「光無線融合(Radio over Fiber(RoF))技術」について紹介する。

5.4.2.1. マルチコア光ファイバ伝送技術

マルチコア光ファイバ(以下“MCF”と略記)伝送の研究開発が進むことで、従来技術では難しいペタビット級の光ファイバネットワークの構築が可能となり、サイバー空間とフィジカル空間においてストレスのないデータ転送が可能となる。これは、ホログラム通信や五感通信などのリアルな空間再現が実現できる。

2030年には、GoogleやFacebookなどのOver the top(以下“OTT”と略記)プレイヤーの需要が更に高まり、飛躍的なトラフィック増に耐えうる光海底ケーブルやデータセンター間

インターコネクションの実現が求められる。マルチコア光ファイバは、空間効率が 4 コアなら 4 倍の伝送容量の向上が可能である。このように MCF は、光ケーブルの収容効率をあげ、ケーブル容量をコア数分拡大することが可能である。例えば最近の成果では、標準外径 125 マイクロメートルの 4 コアの MCF において、超長距離伝送で必須となる、超低損失かつ超低クロストークな特性を持つ MCF の実現はこれまで困難であったが、KDDI はファイバメーカと協業し、ファイバ構造と製法を最適化することにより、通常の光海底ケーブル用光ファイバと同等の超低損失でかつ超低クロストークな MCF の開発に成功し、太平洋横断に必要な 9,000 キロメートルを超える 12,000 キロメートルの伝送距離において、毎秒約 100 ギガビットの波長多重光信号を用いて伝送可能性を世界で初めて実証している（光海底ケーブルとケーブル構造のイメージはそれぞれ図 5-11, 図 5-12 参照）[5-32]。

更なるコア密度向上には、同じ周波数の光信号間で生じる空間チャンネル間干渉を除去することが必須である。この実現には、コア数に比例した高速な MIMO 信号処理が必要であり、空間チャンネルの高速変動や雑音などに対する耐性が高い信号処理アルゴリズムの創出などが今後非常に重要である。KDDI では、FPGA ベースではあるが、MIMO 信号処理のリアルタイム受信検証などを進めている[5-33]。更に、MCF を用いることにより小型で省電力な光中継器（光増幅器）の実現が期待される。マルチコアを一つのレーザで一括励起することが可能なクラッド励起方式の光中継器の検討や、Fan-in Fan-out なしでコア励起やコア毎の光信号パワーモニタが可能な新規デバイスなどの検討[5-34]も進めている。

このように B5G/6G 時代に向けて、MCF は更なるコア数の拡大と高密度化が実現され、サイバー空間とフィジカル空間の間でストレスのないデータ転送が実現される。

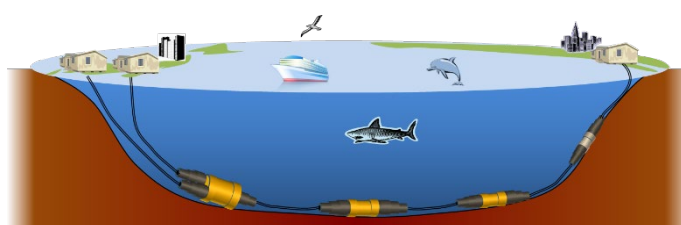


図 5-11 光海底ケーブルのイメージ

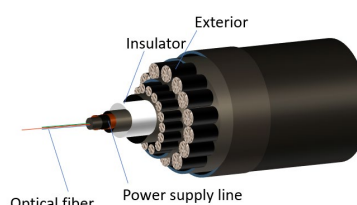


図 5-12 ケーブル構造のイメージ

5.4.2.2. 光無線融合(Radio over Fiber (RoF))技術

B5G/6G 時代には、無線信号の通信速度は 5G の 10 倍以上、サブテラビット級の通信速度に達することが予想されている。また、このような高速通信の実現においてはミリ波以上の高い周波数帯の活用が想定されるが、5G 以前の無線通信で使用していた周波数帯に比べると伝搬時の減衰が大きく、無数の基地局・アンテナの設置が必要になる。そのため、これらの無線システムを収容するネットワークには、大容量のデータ転送が可能であることに加え、省電力・省スペース性・経済性を併せ持つ伝送方式が不可欠である。

5.4.1 節のユーザセントリックアーキテクチャのコンセプトにあるように、分散化された多数のアンテナポート間の緻密な協調動作が、無線通信の大容量化・高品質化の条件となっており、基地局とアンテナの間で無線信号波形情報を伝送する必要がある。これまで、Centralized Radio Access Network（以下“C-RAN”と略記）型の無線システム構成において、集約局～基地局アンテナ間のインタフェース（モバイルフロントホール）は、CPRI [5-35]やeCPRI [5-36]などのデジタル伝送方式が広く用いられてきた。これらの方式では、無線信号を生成・復調するための時間波形情報または物理レイヤ情報をデジタル信号で転送しており、この場合ユーザデータレートの約 5～16 倍の通信速度がモバイルフロントホールに必要である[5-37]。しかし、B5G/6G 時代にユーザデータレートが毎秒 100 ギガビット以上になることを想定すると、モバイルフロントホールにテラビット級の通信速度が必要な試算となり、このような通信速度を実現することは極めて困難な状況となる。そこで、従来の技術に囚われない新たなモバイルフロントホール伝送技術が必要となる。

以上を踏まえ、KDDI では、大容量無線通信システムの収容と、C-RAN 型構成を両立するモバイルフロントホール伝送方式として、無線信号の生成・復調処理を集約局で行い、モバイルフロントホール区間では無線信号波形をそのままの形で光ファイバ伝送する、RoF 技術の研究開発に取り組んでいる。RoF は、基地局アンテナで送受信される無線信号の波形をそのままモバイルフロントホール区間で伝送するため、基地局アンテナにおける無線信号の変復調処理が不要となり、スペース効率とエネルギー効率を大幅に改善した無線システムの構築が可能になると期待されている。更に、KDDI では、RoF 技術の 1 手段として、図 5-13 に示すとおり、無線信号を 1 チャンネルずつ伝送するのではなく、無数の基地局アンテナ向けの無線信号を周波数軸上で多重し、少ない光ファイバ芯線数・波長数で高効率に大容量無線信号を伝送することが可能な、Intermediate Frequency-over-Fiber（以下“IFoF”と略記）方式の検討を進めている。2017 年には、5G 時代を想定し、世界最高の容量を有する無線信号伝送実験に成功[5-38]しており、大容量性や品質面でのフィジビリティの検討を終えている。また、最近では、ほかの機関との共同検討において、ミリ波無線信号を屋内などの閉空間へ引き込むユースケースについて、大容量性とエリア構築性に優れた RoF の伝送実験にも世界に先駆けて成功した[5-39]。

このように、B5G/6G の実現には、それを支える新しいモバイルフロントホール伝送技術の確立が必須であり、今後コストや運用保守性を考慮した RoF 型モバイルフロントホール開発の更なる発展が期待される。更に、本方式は基地局アンテナ構成が「光電(O/E)変換」+「アンテナ」とシンプルに構成可能であり、ミリ波以上の周波数の活用が期待されている B5G/6G の無線システムにおいては、基地局アンテナを稠密配備する際に省電力・省スペースに大きく寄与できると考えられる。

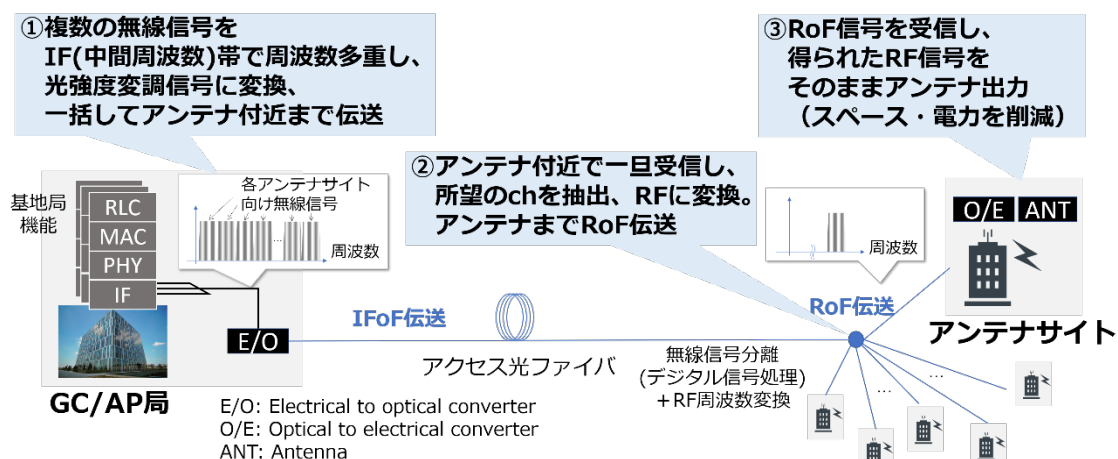


図 5-13 IFoF 伝送システム例

5.4.3. モバイルコア

5.2 節の要件をはじめ、モバイルコアに求められる各種要件を実現するために活用が期待される技術について考察する。

5.4.3.1. 大容量通信を実現する技術

大容量通信に関しては、無線区間の高速化の対応に加え、複数の通信コネクションを同時に利用するマルチセッション通信や、各セッションの高速化のためのフロー制御における明示的輻輳通知(Explicit Congestion Notification)の活用が期待される(図 5-14)。

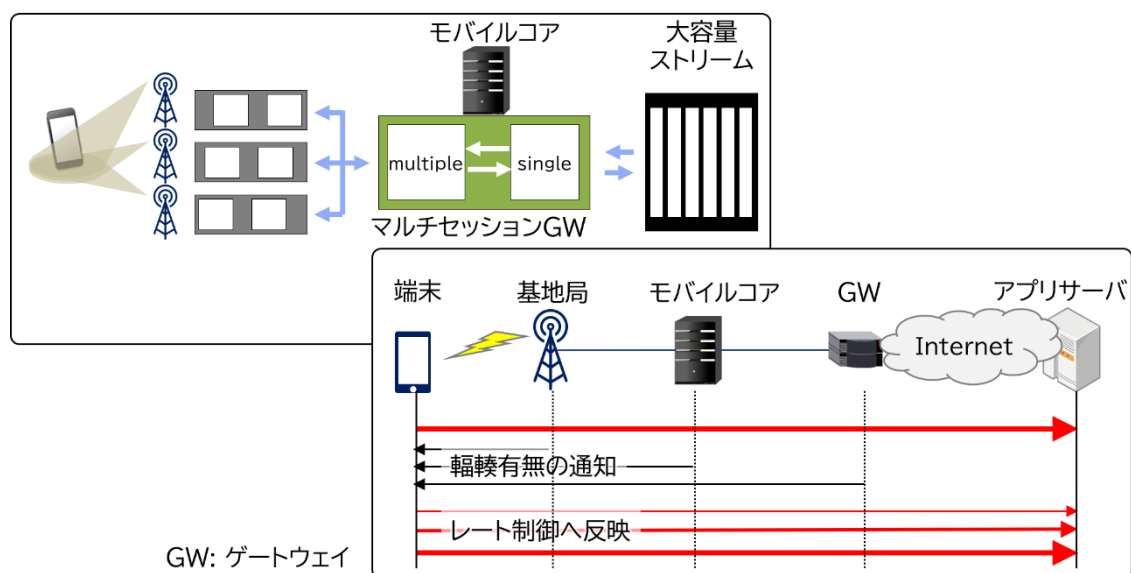


図 5-14 マルチセッション通信(左上)と明示的輻輳通知(右下)

5.4.3.2. 低遅延通信を実現する技術

低遅延通信に関しては、通信開始時間を短縮することが鍵となる。図 5-2 に示したように、通信路を確立する信号処理を待たずに、ユーザデータの配送を実施できる端末登録・ベアラ管理手段を確立する必要がある。

5.4.3.3. 同時多接続を実現する技術

同時多接続に関しては、端末の位置登録を実施せず、端末管理を簡素化する方向が考えられる(図 5-15)。従来の移动通信システムにおいて、端末は通電されるとすぐに、モバイルコアがこの端末を登録する。端末が通信しないときは無線区間の接続を解放するが、モバイルコアは全ての端末位置⁴を把握している。B5G/6G 時代には IoT デバイスの接続が飛躍的に増加することが予想され、現在の端末位置登録の管理では設備の肥大化は避けられない。

端末位置登録を省略する際の課題は、ネットワーク契機の通信の開始を未登録でも可能とすること、及び、登録処理を新たに開始する際に従来よりも速やかに行う手段が必要となることである。なお、従来のモバイル通信システムでは信号の往復が多く、登録処理に時間を要している。この二つの課題を解決しつつ、かつ、位置登録を行わずに端末接続を行う手段を実現することができれば、移动通信システムの処理負荷を軽減して設備の肥大化を回避し、更に省電力化することが可能になると考えられる。

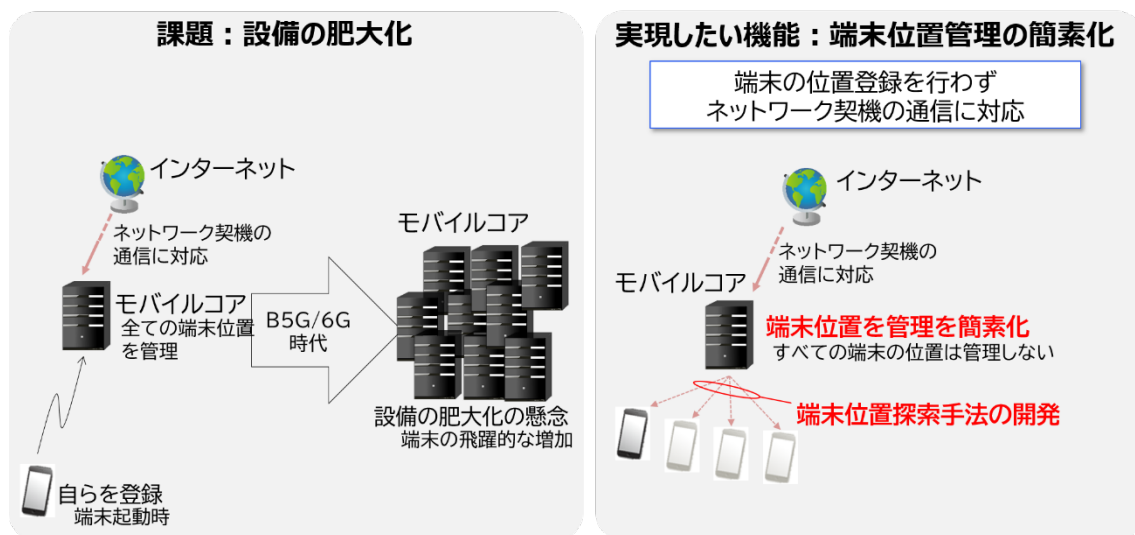


図 5-15 端末の飛躍的な増加への対応: 端末位置管理の簡素化

5.4.3.4. 移动通信システムの自律性を実現する技術

自律性に関しては、5.4.4 節の AI による運用自動化が鍵となる。移动通信システムの自律

⁴ 正確には、通信事業者が定義するトラッキングエリアの情報

性の実現により、ネットワーク障害を事前に予測して回避することができるようになる。また、端末収容及びネットワーク構成の調整を行うことで高速通信・低遅延・同時多接続の効果最大化が期待できる。

ネットワーク障害の予測では、多様なネットワーク状態から些細な変化を把握することが重要になる。B5G/6G 時代には、多様なスライスを提供することから、それに応じて多様な通信特性を達成する必要がある。そのため、ネットワーク障害の予測につながるネットワーク状態の情報についても、スライスに応じて適切に抽出できることが重要になる。

5.4.3.5. 通信の安全性・信頼性を実現する技術

通信の安全・信頼性向上に向けて、End-to-End での確実な通信の秘匿や、接続性の継続が求められる(図 5-16)。通信の秘匿については、IoT デバイスの中で省電力を必要とするデバイスに対しても常時 End-to-End の秘匿を実現することが求められる。接続性の継続については、従来の「無線だから通信が途絶えることがある」ことを完全に解消する手段が求められる。そこで、複数基地局を同時に使うマルチセッション制御を活用することと、それにより接続を継続できるエリアとそうでないエリアを把握するネットワーク状態監視の手段を開発することが必要になる。



図 5-16 通信の秘匿処理の代行と、通信セッションの冗長化

5.4.3.6. 移动通信システムの拡張性を実現する技術

拡張性に関しては、端末連携によるマルチホップ通信をモバイルコアが扱うことや、膨大な数の基地局を用いる環境においても効率的に端末管理を行うことが必要となる。マルチホップ通信は接続性の継続を補完する手段となるため、信頼性担保の手段と併せて検討することが考えられる(5.4.3.3 節を参照)。このマルチホップ技術では、ある端末が別の端末の通信を運ぶことになるため、普及のためには省電力の通信方式が重要となる。それを達成する技術と

して、時刻同期型のフラッディング通信方式が開発されている[5-40]。高速な通信への適用には更なる技術革新が必要だが、マルチホップ通信を省電力に実現する手段として期待される。一方、膨大な数の基地局を用いる場合、従来の移動通信システムを踏襲すると、位置登録の更新頻度が増加し移動通信システム全体の処理負荷を高めることになる。結果として、電力消費量の増加につながるため、5.4.3.3 節で述べたように、端末の位置登録に対する考えを刷新する必要がある。

5.4.3.7. モバイルコアアーキテクチャの方向性

本節 5.4.3 節及び 5.2 節の要件から、モバイルコアは多様な通信に対して、B5G/6G 時代以後も継続して固有の対処を盛り込んでいくことが予想される。従来の画一的な通信要件を実現するモバイルコアでは、その管理情報の拡大により、モバイルコアそのものが肥大化して、稼働効率が悪化することが想定される。例えば、4G システムから 5G システムへの変革において、モバイルコアの構成機能は6, 7機能から 12~14 機能への約 2 倍に増えている。B5G/6G 移動通信システムにおいて、この倍率で機能が拡大すれば、接続端末の増加と相まって、大幅な消費電力の拡大が必要となる。そのため、省電力化の手段として位置登録の更新を行わないアプローチ(5.4.3.3 節を参照)など、モバイルコアアーキテクチャの刷新が不可欠である。

従来のモバイルコアシステムは、情報管理の効率化を主眼にアーキテクチャが考案されており、端末通信の状態変化に対して、ほぼ全ての機能を使う(情報にアクセス若しくは更新する)。アーキテクチャを刷新する上では、信号処理を減らすこと、すなわち端末の通信状態の変更に際して、必要最低限の処理に留める方法が望ましい。

モバイルコアのアーキテクチャの検討では、ソフトウェア実装技術の導入も併せて行われる。ソフトウェアの実装手段では再利用性を高める手段や、改変を速やかに行う手段など様々な検討がなされてきた。その中で、多様性に対応する手段としてマイクロサービスアーキテクチャのコンセプトが提唱されている[5-41]。このマイクロサービスアーキテクチャでは多様なバリエーションのマイクロサービス(コンポーネント)が用意され、コンポーネント間が疎な関係を保って連携する(図 5-17)。

モバイルコアにマイクロサービスアーキテクチャを導入する際には、コンポーネントの定義方法を熟慮する必要がある。重要な点は、コンポーネントが疎な関係を維持できる処理の分担を、モバイルコアの動作・その発展から見通すことができるかである。適切な定義が可能になれば、モバイルコア全体の処理負荷を削減することができ、また情報交換が疎になるため、それにかかる処理負荷を一定の変動に保ち、端末数やその通信要件を基にした処理容量の見積もりが可能になる。

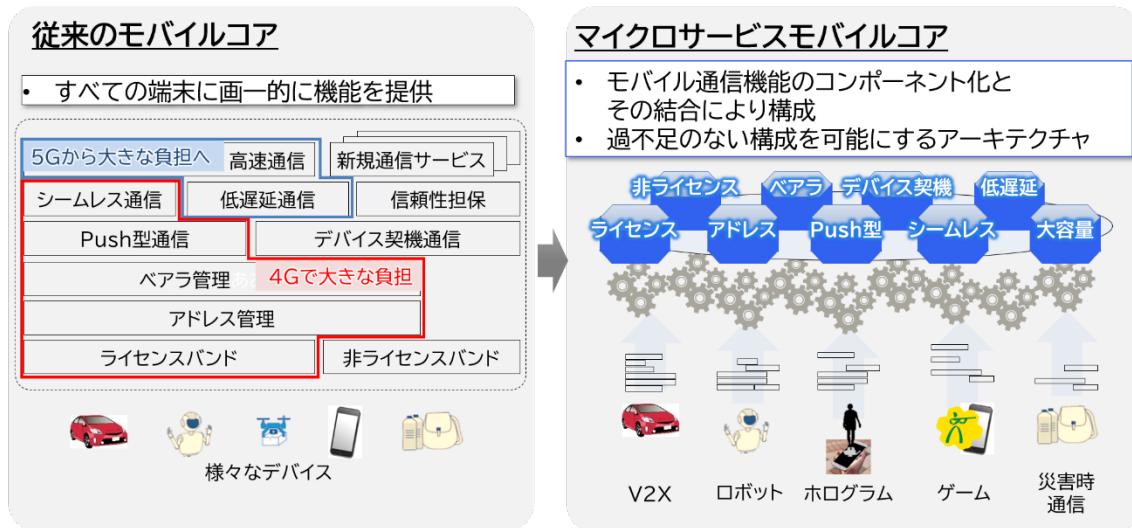


図 5-17 マイクロサービスアーキテクチャにより必要な通信要件を提供する
モバイルコアアーキテクチャの一例

5.4.4. 運用

KDDI では運用自動化の実現に向けて様々な研究開発を行っている。

5.4.4.1. AI による運用自動化

KDDI Accelerate 5.0 の 7 つのテクノロジーのうちの一つである「5. AI」の活用が様々な分野で進められているが、ネットワーク運用の分野でも活用の検討が進んでいる。B5G/6G 時代にはネットワークの更なる仮想化の進展や、スライスと呼ばれるネットワーク分割化のダイナミックな変化に伴い、ネットワークを構築して運用する業務が従来に比べて複雑になる。したがって、稼働も増えていくことから、効率化が求められている。

ネットワーク運用監視における障害の検知、原因特定、復旧措置の各業務において、ネットワークから得られる情報を分析して必要な判断を実施する際に AI が活用される。前述したように、仮想化されたハードウェアと、マイクロサービス化されたアプリから構成されるネットワークは、監視対象が膨大な数にのぼることから、得られる情報も膨大なものになる。また、ネットワーク構成がダイナミックに変化する B5G/6G 時代においては、膨大かつ変化する情報をルールベースで判定するのには限界がある。限界を超えたところに障害の見逃しや誤った復旧措置の実施があると、フィジカル空間とサイバー空間の疎通を阻害しかねない。このことから、KDDI では、AI を用いて障害発生時に生成されるログやアラームなどの情報を繰り返し学習し、ネットワーク運用監視業務を自動化する技術の研究開発を進めている。

更に、今後ネットワークの仮想化に使われる技術が、バーチャルマシンベースの技術からコンテナを中心としたクラウドネイティブ技術に移行していくことが見込まれている。これまで ICT 分野を中心に活用されてきたクラウドネイティブ技術のソフトウェア品質は、DevOps やカナリアリリースなど Web サービスの世界で高められてきた。キャリアネットワークでは、全てのト

ラヒックで Service Level Agreement(以下“SLA”と略記)を満足する必要があるため、KDDI ではクラウドネイティブ基盤がキャリア品質を満たすことを課題とする研究開発を行っている。具体的には 5.4.3.4 節で述べたように、ネットワーク障害の予兆検知が可能となるデータセットを定義し、そのデータをコンテナ基盤からのメトリック情報として取得できる技術を研究開発している。

5.4.4.2. 運用ロボット

KDDI Accelerate 5.0 の 7 つのテクノロジーのうちの一つである「7. Robotics」も、ネットワーク運用の業務での活用が考えられている。ネットワークが仮想化されても、ハードウェアの運用は無くならないため、定期巡回や故障対応などのデータセンターにおける物理的作業は、依然として必要となる。このような物理的作業に対して、人間が行う作業を代替するロボットの活用が有効である。

データセンターの室内は野外に比べて走行路面が平坦なところが多く、砂利道のような凹凸も少ないためロボットが走行しやすい。入退室のセキュリティ機能などと連携して、セキュリティを維持したままロボットが移動しやすい環境が整っている。このような利点を踏まえると、例えば、ロボットが自動的にデータセンター室内をセンシングしながら定期巡回し、センシングの結果に異常があれば自動的に通知することが可能となる。また、遠隔で人間がロボットを操作してラックのドアを開錠し、サーバ内の故障したユニットを交換することも可能となる。こうした物理的な作業をサポートするロボットを活用することで NFV(Network Function Virtualization)に対して安定したハードウェアリソースの提供が可能になる。

5.4.4.3. オープンソースを活用した運用自動化

ネットワーク運用業務向けにもいくつかのオープンソースソフトウェアが存在する。オープンソースを活用するメリットはいくつかある。オープンソースを管理するコミュニティのポリシーにもよるが、ネットワーク運用業務向けのオープンソースの場合は、被制御・監視対象の VNF (Virtual Network Function)やその管理システムとのインタフェースが 3GPP や ETSI など代表的な標準仕様に準拠しているものが多く、マルチベンダー構成に対して有利となることが多い。また、オープンソースでは仕様策定に加えソフトウェア実装もスコープに含んでいることが多いため動作検証を推進しやすく、希望する仕様や機能があれば、コミュニティに参加してソースコードの提供という形で反映することができる。

ネットワーク運用業務向けのオープンソースソフトウェアの中でも参加企業、プレゼンス、リリース頻度から実用確度の高いものに Open Network Automation Platform (以下“ONAP”と略記)がある。ONAP はネットワークを設計する DESIGN-TIME 部と、ネットワークを監視する RUN-TIME 部から構成される、キャリアグレードでの仮想化ネットワークの運用を自動化するプラットフォームである。ONAP では外部システムとのスムーズな連携によるエコシステムの構築を進めている。例えば RAN のオープン仕様である O-RAN とスライス

構築における SLA 保証や柔軟な機能配備に関する非リアルタイムコントローラとの連携インタフェースの策定を進めている。

このように、オープンソースや標準化団体同士の連携や仕様準拠が活発に進められているため、検討された標準及びソフトウェアを戦略的に採用することで、グローバルな形で各ステークホルダのノウハウが適用されたソフトウェアを用いて運用自動化を効率的に進めることが可能となる。

5.4.4.4. Autonomous Networks

Autonomous Networks はネットワーク自身が自律的に運用を行う概念で、必要な設定や、障害の対処を自動的に実施できるものである。この名称のプロジェクトが ITU-T, ETSI, TM Forum でそれぞれ進められており、今後運用自動化の可能性を拡げるうえで関心が高まっている。

KDDI では前述の AI によるネットワーク運用を拡張して、運用自動化の適用範囲に面的な広がりを持たせるため、ドメイン間連携のための協調型 AI として Autonomous Networks の研究開発に取り組んでいる。

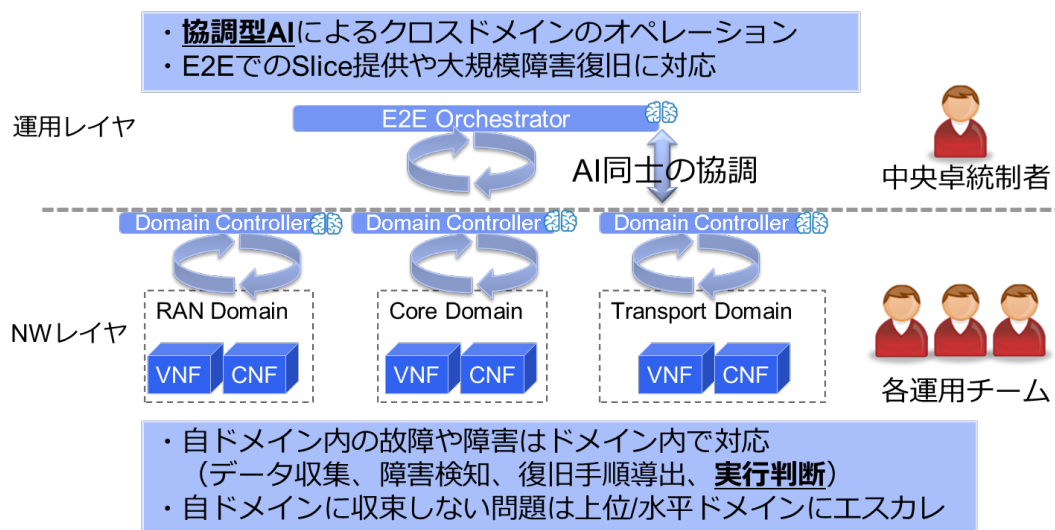


図 5-18 Autonomous Networks による自動化

図 5-18 に Autonomous Networks による自動化の例を示す。5.4.4.1 節の AI による自動化は、RAN やモバイルコアなどの単一ドメインに適用され、ドメイン内の故障や障害に対応する。実際の運用においては、障害や作業の影響がドメイン外に及ぶ場合や、障害発生場所と復旧対処の場所が異なる場合があり、ドメインに跨って調整・対処することが必要となる。この調整をワークフローの実行結果を学習して最適化することによって障害や計画作業などのイベントによる影響を最小限に抑えながら運用業務を継続できる。この協調型 AI を RAN

やモバイルコアなどの複数のドメインを跨ぐイベントの制御に用いることで、End-to-End の自動化に対応できるようになる。

5.4.5. システムのホワイトボックス化とハード・ソフト分離技術

これまで一体化されていたハードウェアとソフトウェアを分離し、それぞれのイノベーションの加速とアップグレード性の向上などを図るホワイトボックス化による開発アプローチは、通信システムにおいて今後更に進展するものと予想される。KDDI では、ホワイトボックス化による開発を促進する上で重要となるエコシステムの拡大に貢献するべく、Telecom Infra Project (以下“TIP”と略記) Community Lab (TIP-CL)を 2020 年に東京に開設し、基地局集約ゲートウェイ装置の基礎検証や相互接続試験の実施、大容量ルータのオープン化に向けたプロジェクト(DoR: Disaggregated Open Router)の設立、O-RAN における RAN スライスなどの検討促進などを通じ、オープン化団体を通じて積極的な活動を続けている。

ホワイトボックス化は、システムのオープン化やハード・ソフト分離において重要なアプローチであるが、B5G/6G を踏まえるとホワイトボックスを支える基盤技術自体におけるイノベーション創出が不可欠である。特に、B5G/6G に向けてはシステムの仮想化や汎用化が進むと想定されるが、これまで仮想化技術のイノベーションを下支えしてきたプロセッシング技術に関する従来型成長則の維持が困難と言われている[5-42]。このため、ASIC や CPU といったプロセッサのみに依存するのではなく、GPU, FPGA, スマート NIC といった汎用性の高いチップを通信アクセラレータとして活用する必要がある(図 5-19)。更には、アクセラレータを含むチップ構成の最適化とクラスタ化・ネットワーク化を進めることで、通信領域に特化したアーキテクチャ(DSA: Domain Specific Architecture)を検討する必要がある。

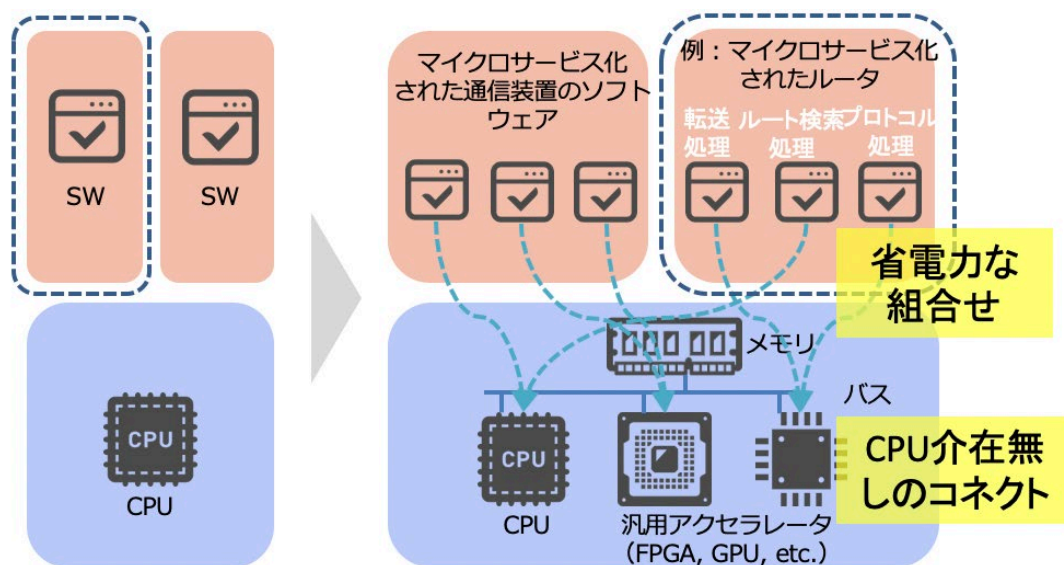


図 5-19 従来型の仮想化基盤と仮想化ソフトウェア構成(左)と
将来の仮想化基盤におけるアクセラレータ活用(右)

6. 「2. Security」

6.1. B5G/6G における Security 技術の役割

DX 社会を支える通信インフラは、基地局やコア網といったフィジカル空間におけるネットワーク設備に留まらない。各種サービスにおける認証システムや産業データプラットフォームにおけるビッグデータ処理など、フィジカル空間から取得されたデータがサイバー空間において蓄積し処理される機能も含まれ、更にはサイバー空間からフィジカル空間にフィードバックする CPS の基盤として発展していく。ネットワークを柔軟に構成できる仮想化技術や、大量の IoT デバイスの同時アクセス、超低遅延通信などを実現する新しい技術が組み込まれた通信ネットワークには、B5G/6G 時代に求められる様々な機能追加が行われると予想される。しかし、新たな機能とネットワークの複雑化は、同時に新たなセキュリティ上の懸念を生み出すことにもなりかねない。また、B5G/6G が求める超高速かつ低遅延の通信の安全性を確保するためには、様々な端末において高速・軽量に動作する暗号技術が必要である。一方で、将来の技術の進歩により汎用量子コンピュータが実現されると、既存の暗号方式は解読される危険性が高まるため、通信の安全性が根底から脅かされかねない。したがって、量子コンピュータに対しても安全な通信を実現することが求められる。B5G/6G の進展で想定される超多接続化やユースケースの多様化などにより、サイバー攻撃の対象も一層拡大していくことが予想され、高信頼な通信ネットワークを維持するためには、セキュリティ技術を適切に導入し運用することが不可欠である。したがって、適切なセキュリティ技術の通信ネットワークへの実装は、高信頼かつ超安全な通信ネットワークを実現する上で鍵を握るものである。更には、使用するハードウェア・ソフトウェアの安全性を検証することで、通信ネットワークで使用されるシステムの信頼性を確保しなければならない。また、現状でも、セキュリティ技術者の不足が叫ばれている状況であり、その育成は喫緊の課題となっているが、B5G/6G 時代においては、多様化し複雑化する技術を理解するセキュリティ人材の育成は、更に時間がかかるものと予想される。そこで、多くの人材を必要としない省力化を前提としたセキュリティ対策を同時に検討していく必要がある。このため、サイバーセキュリティ分野においても、AI 活用による省力化や自動化の重要性はますます高まっていくことが想定される。

6.2. B5G/6G において Security 技術が目指す姿

6.2.1. 次世代の通信ネットワークに組み込まれるセキュリティ技術

通信ネットワークを安定的に運用し、ネットワーク上のサービスをあらゆるサイバー攻撃から守るためには、B5G/6G 時代に適した新しいセキュリティ技術が必要である。セキュアなハードウェア・ソフトウェアでネットワークを構成することに加え、セキュリティ対策やプライバシー保護のための機能がネットワーク上の機能として提供され、サービスを構築する際にこれらを使用することが求められる。また、これまでのセキュリティは、エンドポイント、または、ゲートウェイとなる境界部分での対策が主たるものであったが、B5G/6G 時代はネットワーク上に機能が分散し、更に、仮想化技術によるネットワーク構成により、セキュリティ対策が必要となる範

囲が面的に拡大するため、効率的に適用できるセキュリティ機能を実現しなければならない。また、人々の様々な社会活動に通信ネットワークがより密接に組み込まれていく B5G/6G 時代においては、人々が適切なセキュリティ対策行動を取ることがますます重要となるため、人々の適切なセキュリティ対策行動を支援する取り組みが必要となる。

6.2.2. 次世代の通信ネットワークを守る攻撃検知・防御技術

サイバーセキュリティ分野における AI 活用では、学習に必要な様々なデータを大量に蓄積しつつ正常なイベントに比べて圧倒的に出現頻度が低い攻撃イベントを効果的に学習すること、SOC (Security Operations Center) で活躍するアナリストのようなの高度セキュリティ人材の知見を AI に学習させること、攻撃手法の発展や攻撃対象の変化に対して AI を再学習して追従させていくこと、など AI の学習に関して様々な技術的課題が存在する。特に、効率的に学習データを生成/収集し、学習データの質と量を高めることが性能向上における重要な要件の一つとなるため、複数の組織で連携して取り組むことが有効である。したがって、幅広い協業をサイバーセキュリティ分野においても推進し、様々なデータと、様々な人々や組織の知見を集めて AI 活用によるセキュリティ対策技術の発展を加速していくことが B5G/6G におけるセキュリティ対策の鍵である。これには、暗号化したまま任意の演算(加算及び乗算)を実行できる準同型暗号を適用して、多機関のデータを暗号化したまま収集し、互いに開示することなく統合分析できるようにすることも重要である。

6.2.3. 次世代通信を支える暗号技術

B5G/6G の通信速度は毎秒 100 ギガビット超[6-1]に及び、様々な端末でこの要件に対応できるより高速・軽量の暗号方式を研究開発しなければならない。また、Shor のアルゴリズム[6-2]により、現行の公開鍵暗号である RSA 暗号や楕円曲線暗号は一定の時間で解読できるようになるため、相互認証並びに End-to-End での暗号化通信を実現するためには、鍵交換や電子署名などの公開鍵暗号を耐量子暗号に置き換えていく必要がある。

6.3. 世の中の状況

5G ネットワークにおいては、NEF (Network Exposure Function)により、ネットワーク側の機能を外部ユーザに提供する仕組みが備わる。その応用として、通信事業者がセキュリティ機能を提供する、及び、外部ユーザがセキュリティ機能を組み込んで利用するシナリオが提案されている[6-3]。現時点では、ファイアウォール、IDS/IPS⁵などが想定されているが、高機能化された B5G/6G において必要とされる新たなセキュリティ機能の開発も求められている。また、セキュリティ対策に求められるスキルが高度化していく中、人々の置かれている状況に寄り添うセキュリティ対策支援を実現する技術は十分に検討されているとは言えない。

一方、AI のサイバーセキュリティ対策への活用は、近年急速に進展しているところである。

⁵ Intrusion Detection System/Intrusion Prevention System(不正侵入検知/防御システム)

AI は、不正侵入検知、攻撃リスクの監査、脅威情報の分析、などサイバーセキュリティの様々な製品やサービスでの活用検討が進んでいるが[6-4]、シグネチャベースの検知手法と比較した場合の誤検知の多さや、検知理由に関する説明可能性、AI 自体の信頼性の問題などがあり、従来手法と組み合わせて利用されている状況である。

次世代の標準暗号を制定する取り組みも始まっている。アメリカ国立標準技術研究所(NIST)は、2030 年前後に量子コンピュータにより現行の公開鍵暗号が破られる可能性を想定し、量子コンピュータに対して安全な公開鍵暗号の米国標準を定めるプロジェクト(NIST-PQC)[6-5]を、2017 年に開始した。同プロジェクトにおいては、暗号化・鍵交換と電子署名の二つのカテゴリの暗号方式に対する選定が行われており、2021 年 3 月現在、最終候補の 7 方式が公開されている。米国標準の選定を 2023 年頃に完了し、暗号方式の移行を順次進めていく予定とされている。

6.4. 2030年に向けて必要な技術

6.4.1. 通信ネットワーク向けセキュリティ機能

通信ネットワークにおいて必要となるセキュリティ機能として以下の新たな技術の研究開発を行っている。ネットワークのトラストを高める技術として、サービスの利用する人やデバイスの信頼性を定量化し、信頼関係に基づいてネットワークへの接続を制御する技術により不正利用者の侵入を阻止する機構及び高度なトラフィック解析技術により新しい種類のデバイスに対しても的確に異常・不正通信を検出して遮断などの適切な制御を可能とする機構について、取り組みを進めている。また、ITU-T で標準化された PPM[6-6]のようにデータの利用をユーザが制御できる技術は、プライバシーを保護するための重要な機能であり、プライバシーバイデザインの観点からは、共通的な機能として通信ネットワーク上で利用されることが望まれる。通信ネットワークにおいてデフォルト機能として利用可能となることで、各サービスにおいて、ユーザの同意とプライバシープリファレンスに基づいた適切なプライバシー保護手段を適用することが可能となるため、適切なデータ利用が実現できる。図 6-1 に示すように、これらの技術を、通信ネットワーク上の各サービスに対してシームレスに適用可能とすることで、より広範囲で統一的なセキュリティ・プライバシー対策を提供することを目指している。

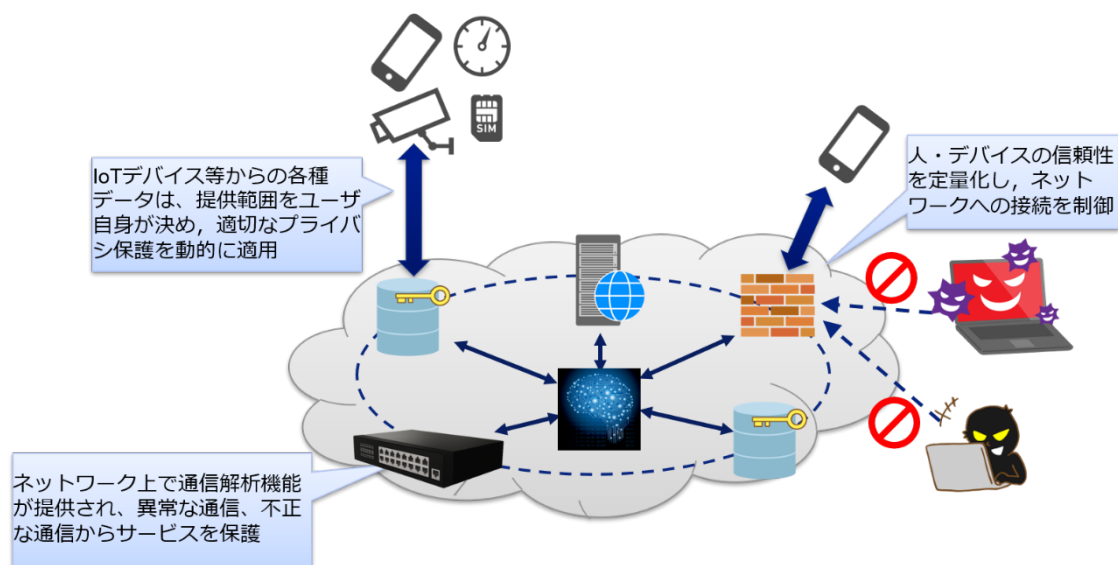


図 6-1 セキュリティ・プライバシー機能を内包したセキュリティ基盤

6.4.2. 堅牢な AI を用いたセキュリティ対策

KDDI は、図 6-2 に示すように AI を活用した攻撃検知ならびに防御技術の研究開発を進めている。Web セキュリティ対策技術の高度化を目指した WarpDrive⁶プロジェクト[6-7]においては、大量の Web アクセス情報を収集・蓄積し、国内のセキュリティ研究機関 7 組織が協力して分析・研究を行う基盤を構築・運用して、数々の有望な成果を創出した。今後も、セキュリティビッグデータの蓄積と協業を両輪で進め、B5G/6G における AI を活用したサイバーセキュリティ対策の研究開発を進める。また、膨大な数のハードウェア・ソフトウェアの安全性を効率的に検証するために、AI を積極的に活用していく。一方、導入した AI が新たな脆弱性を生まないために、AI への攻撃対策も重要な課題として取り組んでいる。AI そのものに対する攻撃は、近年急速な進歩を遂げており、AI の判定を巧妙にすり抜けるようなマルウェアの作成方法なども具体化が進んでいる。AI の利活用が進むにつれて、攻撃による脅威の顕在化が予想されるため、その対策技術についても研究開発を推進していく。更に AI を有効活用するために、統合分析に活用できる高機能で高速な次世代型準同型暗号の改良も進めている。

⁶ Web-based Attack Response with Practical and Deployable Research Initiative

7. 「3. IoT」

7.1. B5G/6G における IoT 技術の役割

近年, スマートフォンを始めとした多種多様なデバイスに通信機能が具備されるようになり, 2021 年現在, 300 億台規模が稼働中と言われている[7-1]. 以下, これらのデバイスを IoT デバイスと呼ぶ. 本ホワイトペーパーが対象とする 2030 年頃の世界では, 現在以上に IoT デバイスがあらゆる場所に浸透し, 自宅, 自動車, ビル, 道路, 工場, 店舗, 田畑など都市全体のあらゆるモノが「コネクティッド」になる, すなわち, フィジカル空間とサイバー空間がより密接につながることが予想されている. 3.1 節に記載の B5G/6G に求められる機能に「超同時多数接続」が含まれていることもその予想の裏付けとなっている. 前述したとおり, KDDI Accelerate 5.0 で目指す一連の流れは, フィジカル空間で取得した情報に対してサイバー空間で価値が付与され, それがフィジカル空間にフィードバックされるというものだが, この流れを加速させるためにも, あらゆるもののコネクティッド化を円滑に進めるための技術である IoT 技術が重要となる.

7.2. B5G/6G において IoT 技術が目指す姿

本章では IoT 技術を以下の 4 つに分類して議論を進める:

- ①フィジカル空間の情報のセンシングに関わる技術,
- ②センシングされた情報をサイバー空間に転送するための通信に関わる技術,
- ③サイバー空間において情報を処理するためのデータ処理に関わる技術,
- ④メンテナンス性を考慮した IoT デバイスの設計・運用技術.

KDDI では, これまで IoT を種々のユースケースで利活用してきているが[7-2], これら多岐に渡るユースケースのうち, B5G/6G に向けて益々強化される大容量, 低遅延の恩恵を最大限に享受可能であり, 2027 年までに全世界で 1663 億ドル規模の巨大市場になるとの予測[7-3]もある自動車分野を例として取り上げ, IoT 技術, 特に上述の①から③が目指す姿について考察する.

近未来の自動車には, カメラや LiDAR⁸といった道路や交通状況を理解するためのセンサが標準的に装備され, サイバー空間上で自車周辺の交通状況を再現できる程度のデータが当該車両のセンサにより取得される. デバイス技術の進化にともない, 非常に速いペースで各種センサの高性能化, 低コスト化が進展しているが, センサ種別毎に得意とするセンシング分野は異なる. そのため, 複数センサの連携やセンシングした情報の統合が重要となる. 更には, センサ連携や情報統合を高速, 低消費電力で実現するための技術が求められる. これらのセンサにより取得された多種多様かつ大容量のデータは各車両に具備されるコンピュータで一次処理された後, モバイル網経由でサイバー空間に転送される. 映像や点群といった膨大なフィジカル空間の情報を, 膨大な数の車両が一斉にサイバー空間へ転送するためには, 大容量かつ同時多接続が可能な B5G/6G 時代の新たなネットワークが必要不可欠である. また, 大容量化

⁸ Light Detection and Ranging 若しくは Laser Imaging Detection and Ranging

の進展に合わせて、扱うフィジカル空間の情報量も増加することが想定されるため、転送ビット量を削減するためのメディア圧縮技術もこれまでと変わらず重要となる。また、上述のサイバー空間は、一か所のサーバ内に構築されるものではなく、クラウドや分散配置される多数のエッジサーバ上で構築される。そのため、ユーザの要求、データ種別、車両の位置や加入サービスなどに応じて、動的に適切なサーバを選択してデータを転送する技術が必要となる。このデータ転送には、計算資源の都合で各車両内のコンピュータでは扱いきれない処理を、ネットワーク上のサーバへオフロードするケースも含む。このようにして多数の車両により生成された膨大なビッグデータはサイバー空間に到達するが、それらのデータは超高速処理が要求される場合がある。例えば、交通安全に関わるアプリが該当する。フィジカル空間からサイバー空間を経由して再度フィジカル空間にフィードバックされるまでの遅延時間の内訳をみると、処理すべき内容と量に依存するものの、計算に要する時間の方が通信に要する時間よりも長い傾向にある。つまり、End-to-End の遅延時間短縮の観点からは、高速データ処理技術は極めて重要である。これらの技術が確立されると、例えば、交通状況がサイバー空間上にリアルタイムに完全に再現され、それに基づき交通事故リスクの計算が瞬時に実行、高リスクと判定された自動車を遠隔から制御して交通事故を防ぐ、といったシナリオの実現が近づく。

次に、自動車分野とは対極の要件、すなわち大容量、低遅延のどちらも求められない、一次産業分野へ IoT 技術を適用するケースを例にとり同技術の目指すべき姿を考える。一次産業分野では、田畑や森林、海上などに多数の IoT デバイスが設置されることが想定されるため、電源とメンテナンス性が非常に重要な要件となる。自動車はEV化が進展することもあり、IoT 技術を実装するための電源確保は比較的容易であるが、一次産業ではそれが困難な場合が大半である。物理的なアクセスが困難な場所に大量のデバイスが設置されることから、バッテリー交換を始めとする保守運用性を高める技術の進展が一次産業における IoT 活用の鍵となる。

一次産業の分野において、IoT は生産性を向上させ、産業を活性化するための起爆剤となることが期待されている。農業であれば、温度、湿度、照度、作物の生育状況、土壌の状況、といったフィジカル空間の情報をセンシングし、それらの情報から農薬の散布量、植え付け時期、収穫時期、収穫量、出荷時期などに関する予測値をサイバー空間で計算した後、生産者に情報をフィードバックする。漁業であれば、水温、潮流の速さや方向、塩分濃度などのフィジカルな環境情報をセンシングし、適切な漁場、餌の量などをサイバー空間で計算した後、漁師にフィードバックする。この際、IoT デバイスはバッテリーで駆動することになるため、超低消費電力でフィジカル空間のセンシングを行う技術が求められる。また、センシングしたデータをサイバー空間に送るための通信に関わる電力消費も、最小限に抑える必要がある。更には、太陽光や振動など身近に遍在するエネルギーを IoT デバイスの電源として利用するエナジーハーベスト技術も重要である。これらの技術が無い場合は、山奥や沖合に設置されている IoT デバイスの電池交換に多大なコストが発生する。電池交換に加えて、日々のメンテナンスやチューニングについても困難が伴うことが多い。センシングの感度低下、データが転送されないなどのトラブルが発生した場合、対応に要する労力も非常に大きい。そのため、メンテナンスコストを限りなく低

減させるための IoT デバイスの設計・運用技術が求められる。これらの技術によりメンテナンスフリーが実現されると、上述のとおり、一次産業の生産性が劇的に向上し、非常に魅力的な産業になる可能性がある。

以上、自動車と一次産業の分野を例として取り上げて IoT 技術の目指すべき姿について述べた。前述のとおり IoT 技術の適用領域は極めて広く、汎用的にあらゆるユースケースで利用できる技術が少ないことも IoT の特徴である。汎用性を高めるための共通プラットフォームの構築を進めるとともに、実フィールドでの検証を通じた、各ユースケース、アプリへの最適化が今後も重要となる。

7.3. 世の中の状況

前節で取り上げた自動車及び一次産業を例にとり、前節に①-④として分類した IoT 技術について俯瞰する。

IoT 対応の自動車は「コネクティッドカー」の名称で広く知られている。自動運転車は、現時点ではフィジカル空間のセンシング情報に頼って自律的に走行するものが大半であるが、レベル 3 以降⁹の車両には、遠隔からの監視や制御の機能が搭載され、かつ、高精細地図のダウンロードやセンサ情報のアップロードが必要となるため[7-4]、コネクティッドカーの一種として捉えることができる。コネクティッドカーの分野は、米国や中国の IT 企業をはじめとする異業種からの参入も相次いでおり、ビジネスとして大きな広がりが見込まれている。既存の自動車メーカー、車載機メーカー、半導体メーカーに加えて、IT 企業、通信事業者、通信機器メーカー、保険会社、地図プロバイダ、といった多種多様なプレイヤーから構成されるエコシステムが築かれる。

自動車用センサに関しては、LiDAR が注目されている[7-5]。国内外で実証実験が進められている自動運転車の大半は、車両に設置される LiDAR によりセンシングした周辺交通の点群データをもとに自律走行するタイプである。今後数年で低価格化がより一層進むと考えられている。自動車向けの通信については、通信業界、自動車業界のプレイヤーを中心としたグローバルなコンソーシアムで活発に議論が行われている。KDDI も AECC¹⁰[7-6]や 5GAA¹¹[7-7]に加入して、議論に参加している。通信規格については、セルラーを活用する Cellular V2X（以下“C-V2X”と略記）[7-8]と 802.11 系の技術をベースとする Dedicated Short Range Communication（以下“DSRC”と略記）の二つの方式が提案されている。日本では、ETC2.0 が DSRC を採用している。

一方、中国では ITS 用周波数帯(5.9 ギガヘルツ帯)における C-V2X の採用が決定しており、対応車が近日販売開始になる見込みである。自動車向けのデータ処理基盤については、2004 年に MapReduce を提唱した Google 社を始めとする米国 IT 企業に一日の長が

⁹ 自動運転レベルは米国 SAE(自動車技術者協会)が定めたもので、レベル3は「条件付き自動運転」(JSAE 訳)とされる。また、レベル3以降の運転主体は人ではなくシステムとされている。

¹⁰ Automotive Edge Computing Consortium

¹¹ 5G Automotive Association

あるが、オープンソースコミュニティの活動が非常に活発な分野であり、日々技術が進化している。研究開発の分野でもビジネスの分野においても、オープンソースの利活用、コミュニティとの関わり方が非常に重要となっている。

一次産業向けの IoT 技術については、「スマート漁業」、「スマート農業」などの名称で知られており、既に利活用が進められている技術もある。これらの導入を積極的に支援する自治体もある。例えば、KDDI は東松島市と連携してスマート漁業の研究開発を推進しており、スマートブイと呼ばれるセンサ及び通信モジュールを具備するブイを開発した。実証実験では、それらを沖合に浮かべ、気温、気圧、水温、水圧、塩分濃度、加速度などをセンシングし、セルラー網経由で情報を分析用サーバに送り、過去の漁獲量実績や気象データと組み合わせて分析することで、漁獲量を定量的に予測した。これまでの勘と経験に基づいた予測と比べ、精度の高い予測を実現した。課題としては、上述のとおり、電源及びメンテナンス性があげられる。初期開発時のブイは電池寿命が 1 か月であったため、毎月電池交換作業が必要であった。更にブイの重量が 20 キログラム以上あり作業負担が大きく、構造的な複雑さや頻繁な清掃の必要性など、メンテナンスに関する課題が明確化した。このようなフィールド実証が各地で進められているが、ユースケースや課題が産業や従事者によって異なるため、各ユースケースに最適な課題解決が進められている。

7.4. 2030 年に向けて必要な技術

前述のとおり、IoT 分野はユースケースや課題が多岐に渡るため、求められる技術領域も幅広い。KDDI では、通信分野を核としつつ、周辺領域についてはパートナー(大学、企業)やコミュニティ(標準化団体、オープンソース団体)との協業を積極的に推進することで、社会課題を解決するための技術確立を目指す。以下、7.2 節で定義した分類に従い、IoT 技術を紹介する。

7.4.1. フィジカル空間の情報のセンシングに関わる技術

例えば、フィジカル空間の位置情報をセンシングする場合、各種条件により適するセンサが異なる。GNSS¹²は屋外利用に適するが屋内には不適、映像は日中の晴天時には適するが悪天候や夜間時には不適、カメラやミリ波などの固定的に設置されるセンサは、見通し可能なエリアはセンシング可能だがそれ以外は不可、などである。そこで、各種センサでセンシングした情報を統合的に分析するセンサフュージョン技術により、精度を向上させるアプローチが考えられる。KDDI では、フィールド実験を通じて、センサフュージョン技術、位置情報センシングの高度化に関する実証を進めている。また、上述したとおり、センシングしたデータの圧縮技術も重要である。KDDI では、映像圧縮技術や点群データ圧縮技術に関する研究開発を積極的に進めており、これらの標準化活動を推進している。映像圧縮技術や点群データ圧縮技術については 10 章にて詳述する。

¹² Global Navigation Satellite System(衛星測位システム)

7.4.2. センシングされた情報をサイバー空間に転送するための通信に関わる技術

多様化する要求条件を満たすためには、ネットワーク上のパケット処理ノードが IoT デバイスからの要求条件を非常に細かい粒度で把握して最適に処理するためのデータ転送技術、及び、クラウドや多数の MEC ホストの活用が重要となる。KDDI では、これらの研究開発を積極的に推進している。

現在の IP をベースとするネットワークはベストエフォートでのパケット転送が基本であるため、パケット処理ノードがアプリやユーザの要求を詳細に把握するには、新たなアーキテクチャが求められる。そこで KDDI では、アプリの品質要求を明示的にネットワークに対して通知することにより、ネットワーク側で適切な制御やリソース配分を可能とするフレームワークである Application-aware Networking に関する研究開発を進めている[7-9]。

また、KDDI は、自動運転を可能とする車両や XR テクノロジーを実現する専用デバイスなど、種々の IoT デバイスがネットワークに接続されることを想定しており、アプリ間の要件差やデバイス間の機能差・性能差に対して、MEC が汎用性を担保し、アプリの受容性を最大化することを検討している。モビリティやリソースの使用状況など常に状況が変化する環境において、全てのデバイスが任意のタイミングで MEC を効果的に活用してアプリの品質を最大化するためには、それぞれのアプリが適切な接続先の MEC ホストを選択することが必要となる。加えて、デバイスによって接続するキャリアが異なる場合、各ネットワークオペレータのドメイン内に設置されたそれぞれの MEC システム間での連携が必須となるため、オペレータ間の相互接続にむけた規格化や要素技術の開発が必要である。KDDI ではそれらの技術について標準化提案を進めている[7-10]。

更に、特に一次産業向けには、超低消費電力な通信方式が望まれる。現状の LPWA (Low Power Wide Area)と比較してバッテリー駆動時間を数倍に伸ばすことができる通信方式についても検討を進める。また、通信品質とデバイス消費電力の削減量は、一般的にはトレードオフの関係にあるため、適用先やユースケースに応じて設計や運用を柔軟に変更するための方法についても並行して検討していく。

7.4.3. サイバー空間において情報を処理するためのデータ処理に関わる技術

高速・高効率にビッグデータを処理する基盤は、これまで以上に重要となる。KDDI は、オープンソースコミュニティの英知を活用しつつ、得られた成果をコミュニティに還元するエコシステムに積極的に加わっていく。これまで、Apache Spark をベースとするリソース利用効率を高めるスケジューリング方式[7-11]や、アプリをロードする際の遅延を低減させる方式[7-12]について提案しており、今後も検討を推進する。

7.4.4. メンテナンス性を考慮した IoT デバイスの設計・運用技術

メンテナンス性を高め、最終的にはメンテナンスフリーを目指す。その実現のために、消費電力を可能な限り削減しつつ、空間に遍在するエネルギーを電源に変換するエナジーハーベスト

技術が必要となる。前述のスマートブイの事例では、当初は1か月程度しか稼働しなかったが、通信方式の工夫や太陽光発電の活用により1年程度の連続稼働が可能となった。今後も、各ユースケースに対して最適な消費電力削減手法及びエネルギーハーベスト手法の検討を進める。また、ハードウェアであるセンサは、保守、点検、交換が必要であり、メンテナンス性の向上に限界がある。そこで、ソフトウェアで定義できる機能を増やすことによりメンテナンス性を向上させる技術について、今後研究を進める。

8.「4. Platform」

8.1. B5G/6G における Platform 技術の役割

インターネットの普及により現在の生活様式や経済活動、社会システムは、現実世界の「フィジカル空間」だけでなく、オンライン上にある「サイバー空間」が登場し重要な役割を担っている。例えば、音楽は CD など媒体を購入して聴くかわりに、ストリーミングサービスなどオンラインサービスを活用するユーザが増加しているが、これは音楽を聴くというフィジカル空間での行為を、ネットワークの先にあるサイバー空間にあるサービスが提供しているものである。

KDDI は、2030 年になると、前述の 7 つのテクノロジーが連携することで CPS が進展すると予測している。この連携を KDDI はオーケストレーションと呼んでおり、その中心的な分野が「プラットフォーム」である。

現在でもプラットフォームは重要な役割を担っている。例えば音楽のストリーミングサービスの場合、音楽データを用意するだけではサービスを提供することができない。音楽データを保存しておくデジタルスペース、ユーザからのアクセスを処理するサーバ、そして利用料金を決済するサービスなど、多くの機能が必要になる。そのため、そのサービスを提供する企業だけで全てを開発し、全ての機能を提供するには、莫大なコストと研究が必要となり、サービス提供まで時間を要する。

そこで活用されるのがプラットフォームである。データを保存するサービスや電子決済といったサービスをプラットフォーム上で利用することで、音楽ストリーミングを提供する企業は、ユーザへの楽曲推薦などの開発に力を入れることができ、サービスインまでの時間も短縮できるようになる。

8.2. B5G/6G において Platform 技術が目指す姿

KDDI が研究に取り組んでいるプラットフォームは多岐に渡る(図 8-1)。インターネットへの接続や決済サービス以外に、電気などの社会インフラも対象となる。こういった多くのプラットフォームを組み合わせることで、更に大きな社会インフラにも利用できるようになる。そのひとつが日本版スマートシティの「都市 OS」である。都市 OS で行われる様々な制御には、ユーザの生活レベルの向上、経済活動の活性化、エネルギーや地球温暖化などの環境を意識した社会システムとしての活動という、3 つの要素に対する考慮が求められる。

現在、各自治体で公共サービスを受けるためには、多くの場合、各市町村の役所に出向く必要がある。すなわち、フィジカル空間に軸足を置いたシステムとなっていることが多い。オンライン化を進めている組織や分野もあるが、特化したシステムを採用しているケースが多く、ほかの地域への再利用や横展開での連携は難しい。

こういった状況を解決するために研究されているのが、都市 OS である。都市 OS には、教育やヘルスケア、エネルギー、モビリティ、都市計画防災といったサービス API(アプリケーション・プログラミング・インターフェース)が用意されている。これらを利用することで、ほかの地域での再利用を簡易にし、開発や導入も安価に進めることができる。

更に都市 OS では、スマートフォンや IoT デバイス、各種センサから収集されるデータを管理、解析する機能、サービスを利用者に提供するための本人認証や決済、パーソナライゼーションといった機能も用意されている。これにより、都市 OS が提供するサービスをサイバー空間に作り上げ、フィジカル空間の住人が、サイバー空間上で各種サービスを利用できるシステムを構築できる。

都市 OS では、サービス共通となる ID や決済機能も導入される。サービスごとにログイン ID などを用意する必要がないため、スムーズにサービスが受けられる。更に、モバイル決済機能やそれに付随する生体認証などを活用することで、サービス利用と同時に自動で決済が完了し、料金を支払う行為自体をなくすこともできる。フィジカル空間でサービスを受けたとき、サイバー空間では支払いが自動で完了している。2030 年にはこのような CPS の実現を目指している。

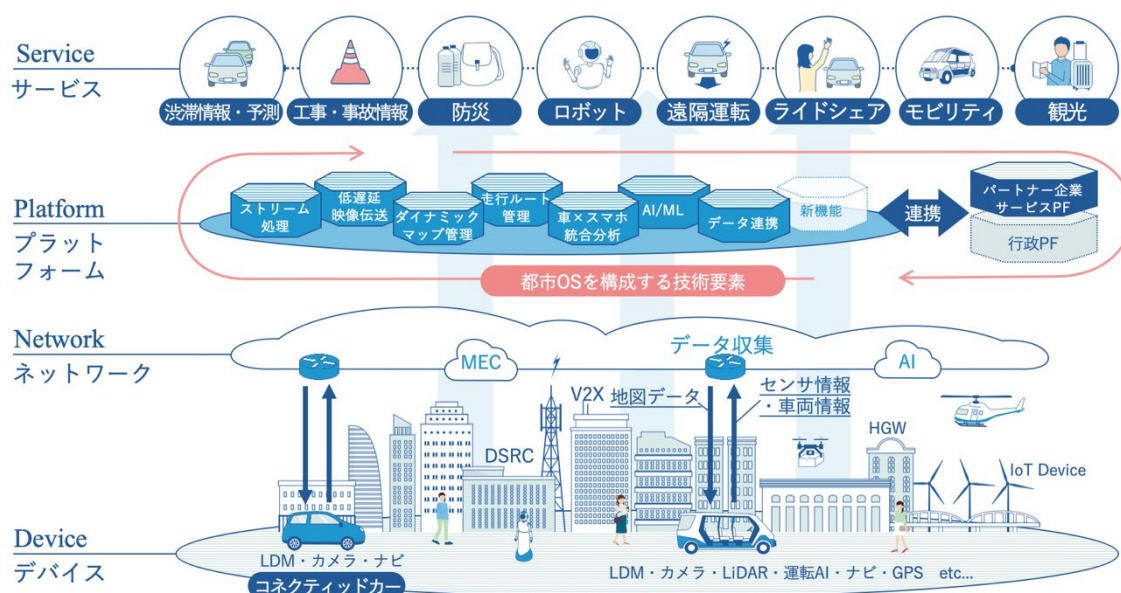


図 8-1 2030 年に向けたプラットフォーム構想

8.3. 世の中の状況

サイバー空間において AI やビッグデータを活用して社会課題解決や都市設計を行う動きは、世界中で活発化している。例えばシンガポールでは、スマートシティ政策として、2014 年から Smart Nation Singapore が進められており、デジタル技術とデータ活用による社会課題の解決、イノベーション創出及び国民生活の向上が図られている[8-1]。また、UAE(アラブ首長国連邦)のドバイでは、スマートシティ化のために 2021 年までのロードマップを示した「Smart Dubai 2021」が 2014 年に発表されている。ブロックチェーンを活用した仮想通貨戦略、電子政府の実現による行政サービスの効率化、エネルギーの最適活用など、多くの検討が進められているが、Smart Dubai 2021 のテーマの一つである「スマートモビリティ」で

は、渋滞回避と安全な移動環境の実現に向けて、自動運転の開発に重点を置いている[8-2]。日本においても、国家戦略特区制度を活用し、世界最先端の日本型スーパーシティを実現するべく「スーパーシティ構想」が提唱されている[8-3]。MaaS に関しては、地域毎の特色を踏まえ、オンデマンドやライドシェアを前提とした次世代モビリティ、複数交通を統合した定額サービスなどを含む期間限定の実証実験が進められている。これら実証実験の一部は、次世代モビリティが将来自動運転に変わることを見据えて、運転操作無し、遠隔管制でのオペレーションが行われている。2020 年 4 月に、公道でレベル 3 運転が解禁となったように、自動運転技術の進化に伴い、法令面での規制緩和も進んでいる。

8.4. 2030 年に向けて必要な技術

8.4.1. 都市 OS を運用するためポイントとなる技術

都市 OS では、住民の利便性に加えて、都市を効率良く運用できるというメリットがある。例えば、各都市に配置されたセンサなどの情報から人の動きなどを予測し、加えて電力供給量などを適切に調整することで、無駄な電力消費を抑えることが可能になる。このように、ユーザデータを収集し活用することで、利便性や経済性を向上させることができる。ただし、その際に収集するユーザデータをどのように扱うかが課題となる。また、現在では、サービスごとに利用規約が異なり、収集するデータごとに同意が必要となる。以上の課題に適用できる技術として PPM(6.4.1 節を参照)が挙げられる。

PPM は前述のような個人情報管理を代行する機能を具備したものである。具体的には、(1)ユーザは PPM に対し、メールアドレスや住所、電話番号などサービス提供者などに譲渡しても問題のない個人情報を指定する。(2)ユーザがあるサービスを利用する際に、PPM はユーザに対しそのサービスを利用するために必要な個人情報を開示し同意を得る。(3)そのうえで、PPM はサービス提供者に対し必要な個人情報を渡す。PPM を活用することにより、ユーザはサービス提供者に渡したくないデータを預ける必要がなくなり、安全性を保った形でサービスが利用できるようになる。

都市 OS を運用するにあたっては、膨大な量のデータを管理、解析する必要がある。またそのデータの送受信には、高速かつ低遅延なデータ転送技術も不可欠となる。膨大な量のデータや管理や解析には AI や量子コンピュータが、高速かつ低遅延なデータ転送には、5G、更に B5G/6G などが活用される。つまりプラットフォームだけで都市 OS を運用することはできず、7 つのテクノロジーが連携することが重要となる。

その際、様々な形で集められた大量のデータの活用と管理が重要になる。そこで考案されたのが、多種多様なデータモデルを統合管理できるデータ利活用プラットフォーム FIWARE である。従来の都市が提供するサービスでは、データの活用を横断的にできないケースが多くあった。スマートシティ分野の標準規格として FIWARE を採用することで、各種サービスのデータを相互に利用でき、サービス横断のより柔軟なシステムが構築できるようになる(図 8-2)。

また、効率良くデータを転送するためのプロトコルとして、Message Queue

Telemetry Transport（以下”MQTT”と略記）も開発されている。これはTCP/IPをベースに開発されており、ネットワークが不安定な場合やデバイスの性能が低い場合でも動作するように、処理が軽量化されている。スマートフォンやパソコンなどは高性能化が進んでいるが、IoT デバイスは性能が限られていることが多いため、MQTT を使うことで安定かつ確実にデータを送受信できるようになる。

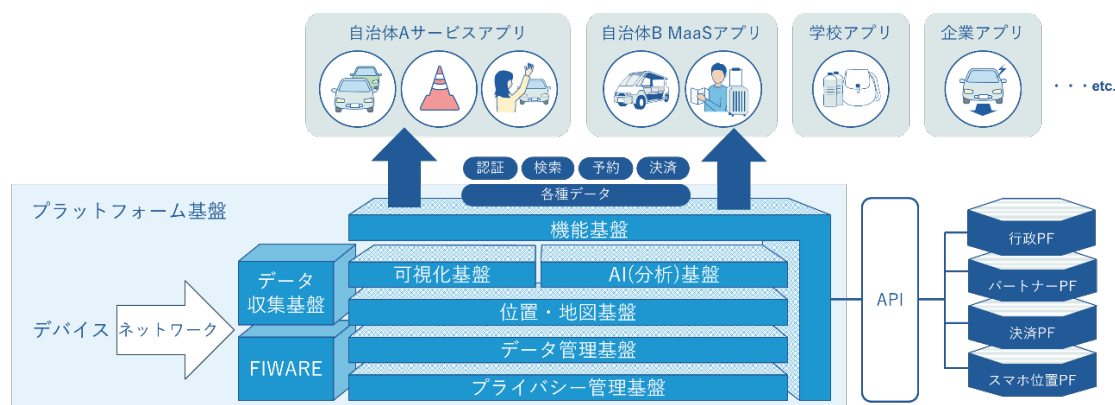


図 8-2 都市 OS のアーキテクチャと構成技術

8.4.2. 自動運転が切り開く MaaS (Mobility as a Service)

都市 OS 以外にも、プラットフォームの活用が期待される分野がある。そのひとつとして MaaS が挙げられる。MaaS は公共交通機関などの様々な移動手段をシームレスに連結することで、移動などの効率を向上させるサービスである(図 8-3)。

現在はある場所まで移動する際、交通手段を個別に手配する必要がある。例えば、自宅から最寄り駅までシェアサイクルで移動し、目的地の最寄り駅まで鉄道を利用、更にそこからタクシーで目的地まで行く場合、シェアサイクル、鉄道、タクシーとそれぞれ個別にサービスを手配する必要がある。MaaS は、このような手間を省き、各交通機関のサービスを横断して利用できるようにするものである。サービスを横断して利用する際、プラットフォームが重要となる。例えば、シェアサイクル、鉄道、タクシーの決済を自動的にワンストップで行う、などを実現する必要がある。この課題を解決するために、現在でも公共交通機関の時刻表と地理情報に関するデータは、General Transit Feed Specification (GTFS)フォーマットが利用されており、経路検索などのアプリや機能を搭載する際に活用されている。また決済サービスのプラットフォーム化は進んでおり、一つのモバイル決済で複数サービスの決済が可能となってきている。更に各サービスの支払いが連携することで、割引料金を適用するなどのサービスも提供が可能になる。

また MaaS で連携するサービスは、公共交通機関に限っているわけではない。いわゆるサイバー空間でのサービスとも連携する。例えば、スマートフォンで目的地を検索したり、その移動ルートを予定表に登録したりするだけで、タクシーを自動で予約しておくことも可能となる。

更にユーザの位置情報を把握できれば、タクシー会社は、ユーザが目的位置に到着したタイミングで、自動で配車を行うなどのサービスも可能となる。

MaaS も都市 OS と同じく、プラットフォーム基盤とアプリ基盤で構成される。アプリ基盤は、認証、検索、予約、決済などのプラットフォーム基盤へのアクセス機能を有し、地域毎のニーズに合わせたアプリを短期間で開発可能とする基盤である。プラットフォーム基盤は、位置・地図、データ管理、データガバナンスなどの都市 OS が持つ機能に加えて、経路検索、配車計算など MaaS 特有の機能をマイクロサービス化し、各地域のニーズに応じて、サービス API として自由に組み合わせて利用することが可能である。例えば、タクシーやシェアサイクルの配車量を調整するために、都市 OS において、人の動きを扱うことを目的として構築された都市計画防災用のサービス API を使うことなどが考えられる。MaaS は、自動運転技術の発展とともに急速に普及すると考えられる。自動運転で運行する車両は、車両の発着場所、お客様の乗降車、走行ルート、予約状態、ほかのモビリティとの接続などが全てシステム上で管理され、より効率的な運行が可能となる。

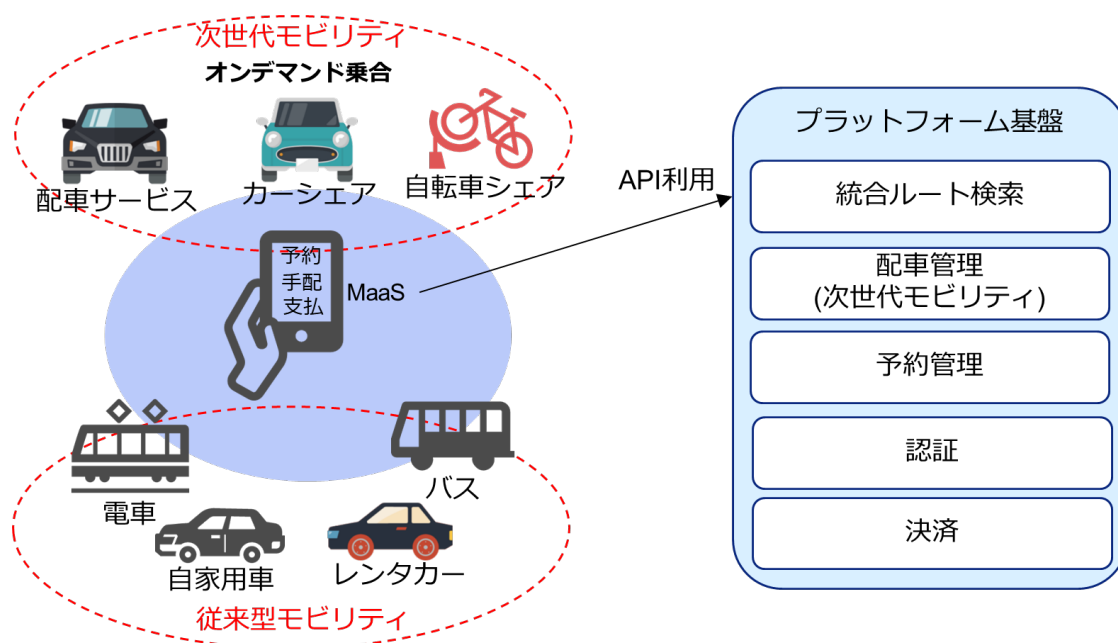


図 8-3 MaaS とプラットフォーム

8.4.3. MaaS によりもたらされる行動変容

MaaS は移動の効率化のための新しいサービスであるが、MaaS が導入されることによってそれ以外の新しい需要も期待できる。ユーザの行動変容もそのひとつである。

例えば、ユーザが MaaS を利用して自動運転サービスで移動していたとする。渋滞が発生すると MaaS(の自動運転サービス)は回り道を提案する。その際に、時間帯に応じて、自動運転サービスとは別のサービスが回り道で立ち寄ることができるレストランのリストを案内するな

どである。

このように、MaaSを導入することでユーザは合理的に活動・移動し、更に付加価値を享受できるようになるが、そのために解決しないといけない問題の一つが組み合わせ最適化問題である。例えば複数の都市を回るセールスマンの巡回では、様々なルートが選択できるが、効率よく回ることができるルートは限られている。しかし現状では、最適なルートを検索するにあたり、非常に多くの条件とパターンを考慮する必要があり、スーパーコンピュータでも解析に時間を要する。KDDIは、これらの処理を高速に行い提供する技術にも取り組んでいる(図 8-4)。

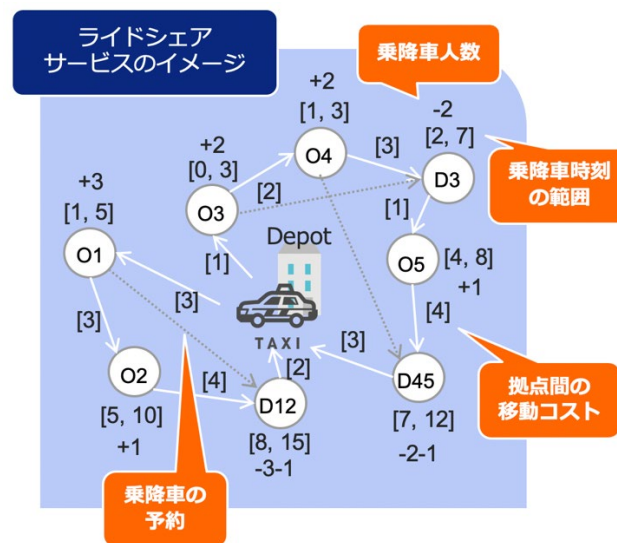


図 8-4 組み合わせ最適化問題

8.4.4. 自動運転

自動運転の実現には、リアルタイムの情報を地図上に反映させるダイナミックマップも重要となる(図 8-5)。自動運転車には、カメラ映像だけでなく LiDAR や音波レーダーなど、各種センサが装備されている。これらセンサがリアルタイムに集めたデータを活用することで、スムーズな自動運転を行うことができる。更にそれらデータを実際の地図に反映させ、ダイナミックマップとして、ほかの自動運転車も活用できれば、よりスムーズな自動運転が可能となる。

自動運転については、2030 年にむけて技術研究・開発が進められている。自動運転開発を促進するオープンソースソフトウェア「Autoware」も進化し続けており、自動運転の開発や実験の際に、既製の車両やセンサを組み合わせるだけでシステムを構築できるようになっている。

また、自動運転には AI が不可欠であるが、教師なし学習の自動運転 AI の開発も進められている。教師なし学習のため、膨大なデータを用いずに AI エンジンを作成でき、コストや時間の大幅な削減が期待できる。

自動運転は自動車自体が通信機能を持ち、自動車とあらゆるモノが通信を行う V2X が形成される。ただし、自動車だけではなく、運転に必要なインフラ側にも通信機能が必要である。

例えば、信号や標識、監視カメラといった道路を構成するあらゆるモノが通信機能を具備することで、より快適な自動運転が提供できるようになる。



図 8-5 自動運転車への地図配信

9. 「5. AI」

9.1. B5G/6G における AI 技術の役割

インターネットの普及により、生活や経済活動、社会システムは現実世界の「フィジカル空間」とオンライン上にある「サイバー空間」の双方が、それぞれに重要な役割を担うようになった。2030 年には前述の 7 つのテクノロジーの連携により、CPS が進展すると予測している。この連携において、サイバー空間の「プラットフォーム」に蓄積されたフィジカル空間からのデータや情報を解析し、フィジカル空間にフィードバックする方策を導き出すのが「AI」である。

9.2. B5G/6G において AI 技術が目指す姿

現在の AI はサイバー空間で発展してきた「ネット型 AI」が主流である。ネット型 AI は Google や Amazon, Microsoft, 百度, 阿里巴巴など、ネットサービスのグローバル OTT プレイヤが牽引し、同社らが有する大量の画像やテキストなどのデータを用いた深層学習による画像分類やテキスト分類などのタスクに特化され、発展してきた。

深層学習による AI モデル作成には、大量のデータが必要であり、データを如何に集めるかが重要な課題である。例えば音声認識用には、さまざまな人の発声データが必要だが、利用ユーザの多い OTT は、ほかの企業よりもデータを集めやすい状況にあった。そのため、ターゲティング広告や購買予測などの Web マーケティング分野、機械翻訳、画像認識活用サービスなど、サイバー空間上のサービスの多くで AI が活用されている。一方、スマートスピーカで音声認識が使われるなど、AI の今後の適用領域は、サイバー空間からフィジカル空間へシフトしていくと予想される。

フィジカル空間での AI モデル作成では、多様な環境で得られる少量のデータから AI モデルを生成する技術の確立が課題となる。例えば、交通や災害対応に AI を活用する場合、地域・現場の特性や利用できるデータが大きく異なるため、そこで得られるデータを最大限利用して、それぞれの地域・現場に即した混雑度や交通需要の予測、災害発生・内容・規模の予測などのタスクを遂行することが求められる。

また今後は、AI が導き出す結果から社会が変化し、ユーザ自身も行動の変容を起こすようになる想定している。そのためには、これまでのような画一的な情報提供や、心理学の定性的な知見を意識的に活用することに留まらず、定性的な心理学の知見をベースに、データに基づいて定量的に人間心理を理解し、効率的に説得する AI 技術が求められる。例えば、レストランのレコメンドでは、AI が選定したユーザが気に入りそうな店舗を、シンプルなリスト表示などで提案する画一的なケースが多い。一方、ユーザが行きたくなるようなタイミングや提示方法（例えばビジュアルなど）で結果を提案することで、そのレストランに行ってみようという気持ちを増幅させ、ユーザに行動変容を起こすことができると考えている。

9.3. 世の中の状況

様々な環境で様々なタスクを解決する AI モデルを、少量データで生成する「フィジカル空間

指向 AI」の必要性は、2018 年 5 月に産業技術総合研究所の人工知能研究戦略部が発表した「日本が取り組むべき今後の AI 基盤技術の方向」[9-1]や、2019 年 6 月に日本政府が発表した「AI 戦略 2019」[9-2]でも述べられている。産業技術総合研究所の当該文献では、サイバー空間で完結するのではなく、我が国が強みを持っているフィジカルな現場を含むサービスから生まれるデータに適用できる AI として、「人間と協調できる AI」「実世界で信頼できる AI」「容易に構築できる AI」という 3 つの軸で課題が整理されている。また、政府の「AI 戦略 2019」では、サイバー空間内で完結することなく、人、自然、ハードウェアなどとの相互作用を通じて初めて価値が生み出される「実世界産業」領域には、未だに系統的に取得されていない膨大な情報が含まれており、積極的に取り組む必要性が述べられている。近年投稿数が大幅に増加している AI の国際会議でも、「Workshop on Continual Learning」[9-3]や IJCAI 2020 におけるセッション「Transfer, Adaptation, Multi-task Learning」[9-4]など、フィジカル空間指向 AI に関連するワークショップやセッションが増加しつつある。

行動変容技術は、社会心理学の分野で説得に関する研究[9-5]として古くから扱われていたが、近年では ICT を利活用した取り組みが始まっている。Fogg は、CAPTOLOGY (Computer As Persuasive Technologies)という、コンピュータを利用した説得を行う概念を提唱した[9-6]。Oinas-Kukkonen は、Persuasive System Design (PSD) モデルを提唱し、ユーザの説得に向けたシステム設計を行う上で考慮すべき項目と、その設計手順を体系化し[9-7]、このモデルのインタフェース設計[9-8]などへの適用事例が報告されている。これらの知見に基づいた説得のパーソナライズは現在の課題であるが、AI を行動変容に活用する取り組みは学会でも注目され始めており、2021 年には、AI 分野の主要な国際会議である AAAI で「AI for Behavior Change」というワークショップが新設され[9-9]、説得技術を中心に扱う Persuasive Technology (PT)[9-10]で「AI for persuasive technology」というトピックが新たにスコープに追加されている。

KDDI では、以前より位置情報ビッグデータを用いた AI をフィジカル空間において活用している。ユーザから利活用の同意を得た位置情報ビッグデータを用いて移動手段及び経路の推定などを行う行動分析技術をベースに、日本国内の任意エリアにおける人口動態の推定や予測を準リアルタイムに行う「人口動態分析/予測」技術を開発している[9-11]。任意エリアの人口分布だけでなく、移動者数や滞在者数、鉄道路線や走行道路ごとの移動者数などの詳細情報をリアルタイムに推定・予測することができ、災害時の道路状況や避難場所、大規模イベント時における当該エリアや交通機関の混雑情報提供など、安心・安全な社会に向けた支援などに活用できる。一方、フィジカル空間である「街」は刻々と状況が変わるため、推定精度を常に高く保つには最新状況下での学習データが大量に必要となり、そのコストなどが課題となる。

9.4. 2030 年に向けて必要な技術

KDDI では、フィジカル空間特有の課題を解決する「フィジカル空間指向 AI」、人間心理を理解し一人ひとりに最適な手段で働きかける「行動変容のための AI」、安心して使える「信頼

できる AI」により社会課題の解決を目指している。

フィジカル空間指向 AI は次の 4 種類に分類できる：

- 生成済みの AI モデルを利用し多種類のタスクに少量データで適応する「再利用可能 AI」
- 多種多様なデータを組み合わせ高精度な AI モデルを生成する「マルチモーダル AI」
- 人間の明示的・暗黙的な知識を活用する「人間知識活用 AI」
- 頻繁に環境が変化するフィジカル空間に自ら適用する「成長可能 AI」

KDDI では図 9-1 に示すように 2020 年 10 月に新たな海外トップレベルの大学との共同研究プロジェクトを開始し、研究を推進している[9-12]。

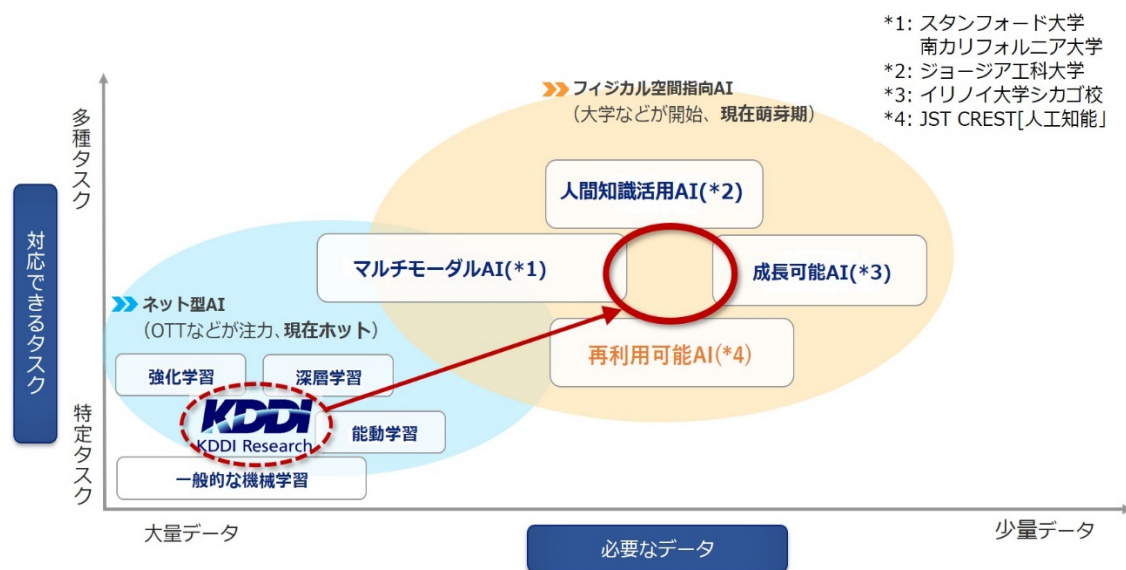


図 9-1 フィジカル空間指向 AI と連携先

また、行動変容のための AI として、

- 心理学研究の知見を元に心理特性をモデル化し、日常行動や生体データからユーザの心理特性を理解する「人間心理理解 AI」
- 社会心理学や認知心理学の研究結果を元に、ユーザー一人ひとりに対して最も効果的かつ心地良い説得手段や説得効果を予測する「説得 AI」

の2種類を定義している。

これらのほかに、AI がどのような根拠に基づいて判断を行っているのかをわかりやすい形でユーザに提示する「信頼できる AI」を定義し、研究開発に取り組んでいる。

9.4.1. フィジカル空間指向 AI

9.4.1.1. 再利用可能 AI

多種類のタスクを解決する AI モデルを少量データで生成する技術の一つが、再利用可能 AI である。

交通、災害対応、健康・医療の現場など、フィジカル空間での AI 活用には、「A 路線の鉄道需要予測」や「B 地域の災害発生予測」など、環境やタスク毎に個別に AI モデルを生成する必要があり、そのモデル生成には、分析対象となる環境やタスクに即した一定量の学習用正解データが必要となる。学習用正解データとは正解ラベルがついた特徴量データで、鉄道需要予測での正解ラベルは乗降者数、特徴量データは過去の日時毎の乗降者数や駅周辺のカメラ映像、天気予報、周辺の人口動態などとなる。

大都市圏や IT 化が進んだ地域では正解データを大量に集めることは容易だが、過疎地域では、センサが設置されていない、利用人数が少ないなどの問題で絶対的なデータ量が足りないなど、特徴量付きデータを収集できる環境が限られる。また、人手で実施する正解ラベルの付与コストが膨大であったり、事故や災害、障害を予測するタスクでは当該事象の発生頻度が稀であったりするなど、質・量・コスト面の課題が多数ある。

上述のように分析対象の学習用正解データが少量しか確保できないケースでは、ほかの環境やほかのタスク向けの学習用正解データで生成した AI モデルを利用し、分析対象の環境・タスクに関する高精度な AI モデルを生成する「再利用可能 AI」が有効となる。

再利用可能 AI は、学習済みのモデルに追加学習させることで、分析対象に調整されたモデルを生成する。上述の鉄道需要予測では、大都市圏の駅で作成した学習済みモデルに、過疎地域の駅で集めたデータを追加学習させる。マーケティング活用では、自社ユーザのデータのみでは商品推薦 AI モデルの構築が困難な場合、他社ユーザのデータや商品レコメンド AI モデルを活用することで、会社をまたがった商品を扱うマーケティング(クロスドメインマーケティングと呼ばれる)が実現できる。ケースごとに大量のデータを集めるのではなく、AI モデルを再利用することで、データを集めるコストや時間を大幅に縮小できるようになる。

近年、再利用可能 AI の主要技術として転移学習の研究が活発であるため、少し触れておく。転移学習は、他分野のデータを利用して対象分野の AI モデルの精度を改善する技術であり、利用データの種類が分野間で同じか否かにより、同種転移学習と異種転移学習に大別される。

同種転移学習としては、画像やテキストなどの分野の汎用表現モデル(画像ならば ResNet50[9-13]、テキストならば BERT[9-14])を自分分野の同種データでファインチューニング¹³する方法がよく用いられる。また、データの種類を限定しない、より一般的な方法として、学習用正解データでモデルを学習させる際に分野間でのデータの分布の違いを考慮させる密度比推定を用いた手法[9-15]や、画像生成で脚光を浴びた敵対的生成ネットワーク

¹³ 学習済ネットワークの重みを初期値とし、モデル全体の重みを再学習する方法

の考え方を応用し、データの潜在表現を見分けにくくするように学習するドメイン敵対的学習[9-16]がある。

前述のクロスドメインのマーケティング応用を考えた場合、ユーザの行動種類(Web サイトの閲覧、実店舗の訪問など)や商品情報(書籍のあらすじ、食品の説明文など)が異なることから、異種転移学習が必須となる。異種転移学習の方法は 2010 年代に多数提案されている[9-17][9-18]が、分野間でユーザ ID を紐づけたり、生データを共有したりすることが前提となっている。一方、近年では、プライバシー保護に対する関心の高まりから法規制が強化されるほか、ビジネスにおいてデータが資産として重視され、生データをそのまま共有することが難しい状況も多い。このため、過去に提案されてきた方法をそのまま適用することは難しく、ユーザ ID 連携やデータ共有を必要としない異種転移学習の方法を構築することが技術課題となっている。

KDDI では、ユーザID交換やデータ共有をしない、または、ユーザID交換やデータ共有を必要最小限に抑えるという条件下での異種転移学習に取り組んでいる。本研究はJST CREST「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」[9-19]に、2018 年に「異種ドメインユーザの行動予測を可能にするペルソナモデルの転移技術」という題目で採択され、大阪大学、名古屋大学と共同で研究に取り組んできた。この中で、同種転移学習のドメイン敵対的学習を異種転移学習に拡張した方法[9-20]、テキストデータの潜在表現を学習する Word2Vec[9-21]をユーザ行動系列データに応用した方法[9-22]を提案し、実データにおいて転移学習を用いない方法や既存の転移学習に比べて高い精度を確認している。これらの方法はまだ一部のユーザID交換を必要とするが、今後は、ユーザID交換やデータ共有を全く行わない条件でも実行可能な異種転移学習技術の確立を目指していく。

9.4.1.2. マルチモーダル AI

フィジカル空間やサイバー空間から得られる映像や画像、音声、テキスト、位置情報、気象情報、各種センサからのデータなど、様々なデータを統合的に利用し、総合判断を行う AI が「マルチモーダル AI」である。単一種類のデータを利用するより、高精度な AI モデルを生成することが可能となる。

一つの入力情報で単一の判断を行うのがシングルモーダル AI であり、画像から顔を検出したり、音声を認識してテキストを抽出したり、テーブルデータを使った需要予測などがある。

これらにマルチモーダル AI を使うと、オススメ商品を提示する場合には、顔や音声、そのときの気温やテーブルデータなど、様々な入力情報をもとに、総合判断して結果を提示することができ、その人がより興味を持ちそうなレコメンドが可能となる。

また、マルチモーダル AI はデータ欠損などへの対応に優位性がある。センサデータなどのフィジカル空間のデータは、一部が欠損していたり、あるデータ系列(気温など)全てが突然得られなくなったり、データ種別ごとにデータの取得頻度が異なるなど、必ずしも理想的な形で揃っているわけではなく、そのままでは高精度な AI モデルを生成することが困難な場合が多い。

マルチモーダル AI は、複数種類のデータ群が不完全であっても、それぞれのデータ種別間の関係性を抽出して適切なデータ補完・生成などを行うことで、高精度に AI モデルを生成できる。

近年のマルチモーダル AI の技術課題は、モーダル間の表現獲得(Representation)、モーダル間の翻訳(Translation)、モーダル間の関連付け(Alignment)、モーダル情報を統合した予測(Fusion)、モーダル間の知識転移(Co-Learning)の 5 つである[9-23]。

KDDI では、フィジカル空間特有な課題との親和性から、これら技術課題の中でモーダル情報を統合した予測(Fusion)を中心に取り組んでいる。モーダル情報を統合した予測は、音声と画像による音声認識[9-24]や複数モーダル情報からの感情認識[9-25]など、以前から様々な研究として取り組まれてきたが、多くは時間的な変化を伴う時系列データを対象としており、人流や気象情報などの空間的に変化のある情報を組み合わせた時空間マルチモーダルデータを対象とした取り組みは少ない。KDDI は、これまでの位置情報解析の知見を活かし、従来は時系列データでの予測に留まっていた領域に対し、人口動態などの時空間情報の導入に取り組んでいる。例えば、電力消費量の予測では、異常気象やイベント開催時などの通常とは異なる人の移動、リモートワークや巣ごもり需要増などを踏まえ、どこに人が滞在しているかに着目した[9-26][9-27]。フィジカル空間における実課題を解決するには、今後もあらゆる時空間マルチモーダルデータを統合した予測技術が必要になると考える。

9.4.1.3. 人間知識活用 AI

これまでに述べたように、多様なタスク・環境に耐えうる AI モデルの構築には、一般的に対応する大量の正解データが必要となるが、多様な環境で起こりうる全ての事象を網羅した正解データを事前に、かつ整形化された形で確保することは非常に困難である。この課題を解決する一つの方法として、人間の明示的・暗黙的知識を活用するのが「人間知識活用 AI」である。

近年、AI が人間と協調しながら効率的に学習する Human-in-the-Loop (以下「HITL」と略記)のコンセプトが提唱されている[9-28]。HITL Learning は、高精度な AI モデルを作成するために、AI が性能向上に寄与する可能性が高いデータを自動で抽出し、「誰に何をどのように聞くか」を AI 自身が判断する能動学習(Active Learning)[9-29]、AI が人間の機器操作などの振る舞いを観察して真似しながら学習する模倣学習(Imitation Learning)[9-30]、人間の行動から最適な報酬を学習する逆強化学習(Inverse Reinforcement Learning)などを主要な構成要素としている。このほか、人間と AI との協調にあたり、AI の判断根拠を明示する説明可能 AI(XAI: Explainable Artificial Intelligence)[9-31]も関連技術に含まれる。

KDDI はフィジカル空間における、スマートシティやスマートホームにおけるタスクや環境を対象として研究開発している。

9.4.1.4. 成長可能 AI

フィジカル空間で頻繁に起こる環境やタスクへの変化・追加に自ら対応し、進化した AI モデルを生成するのが「成長可能 AI」である。

例えば、鉄道需要予測における駅や競合路線の新設、周辺道路の開通などの環境変化に対し、AI モデルの精度を高く維持するためには、環境変化の度に AI モデルを生成し直すことが望まれる。一方で、新しい環境で収集できるデータは少なく、新環境のデータだけでは新環境に適したモデルを生成することは困難である。

そこで、環境やタスクに変化・追加があった際、過去の様々な環境やタスクで学習したモデルを用いることで、新しい環境やタスクに適用可能な AI モデルを生成する「成長可能 AI」を研究開発している。次々に起こる様々な環境やタスクの変化・追加に対応するため、参考になり得る既存の環境やタスクから得た知識も忘れず、AI モデルを成長させることがポイントとなる。

近年、成長可能 AI の主要技術として Lifelong 学習¹⁴が取り組まれている。深層学習では新しいタスクを学習すると直近のタスクに AI モデルが最適化され、過去に学習した知識を急激に忘れてしまうこと（破滅的忘却）がよく起こることが知られており[9-32]、Lifelong 学習はこれを克服することが中心的な課題となっている。

破滅的忘却を克服するアプローチは現在までに 3 つが知られており、①過去のデータの一部を保存し、新しいタスクの学習時にそれを再生（リプレイ）して学習に利用するリプレイベース[9-33]のもの、②新しいタスクの学習時に過去の AI モデルの情報を忘れないように制約（正則化）をかける正則化ベース[9-34]のもの、③AI モデル内でタスクごとに固有のパラメータを用意してタスクごとの知識を確保するパラメータ分離ベース[9-35]のものがある。画像分野では、一般的な手書き文字認識のデータを用いて新しい認識対象が増えるように加工して評価するなどのベンチマーク評価手段が確立しつつあり、上述の①～③のアプローチに基づく方法の提案と評価が世界的に進んでいる。一方、画像以外の分野に対応可能な一般的な方法論への発展や、その際の知識表現方法や知識活用方法が課題であることが指摘されている[9-36]。

KDDI では、フィジカル空間での成長可能 AI 活用を見据え、新しいタスクの追加だけでなく環境変化も同時並行で起こる状況を想定し、この研究に取り組んでいる。①～③のアプローチのいずれがこの状況に適合するか見極め、いずれかのアプローチを発展させ、更に環境変化を捉えた知識表現、知識活用の方法を検討している。

9.4.2. 行動変容のための AI

9.4.2.1. 人間心理理解 AI

フィジカル空間指向 AI が導き出した結果を人や社会にフィードバックする際、一人ひとりの心理特性を理解するための AI モデルを作成するのが「人間心理理解 AI」である。人はほかの人とは異なる性格や価値観などの心理的な特性を生まれながらにして持っており、それぞれ

¹⁴ 「Continual 学習」とも呼ばれる。

の人が何にどれだけ惹かれ、また何をどれだけ避けようとするかを左右し、日常的な行動の動機付けや選択、判断、実行に大きな影響を与える。

例えば、現在の心理学では人の性格が 5 つの軸(Big Five)[9-37]で構成される考え方が定説で、Big Five の一つである「外向性」が高い人は興奮や達成、賛美などポジティブな情動を求める傾向が強く、「神経症傾向」が高い人は不安・心配や苦労などネガティブな情動を避ける傾向が強いことが分かっている。

広告の訴求力と Big Five の関係を調べた研究では、(A)スマートフォンによりもたらされるエキサイティングな日常を訴求する広告と(B)スマートフォンのセキュリティの高さを訴求した広告では、外向性が高い人は(B)よりも(A)の方が購買意欲を強め、神経症傾向の高い人は全く逆の結果となった。

こうした例が示すように、人に行動変容を促すには、一人ひとりの心理特性を理解しておくことが非常に重要である。特に禁煙やエクササイズ、時差通勤などフィジカル空間で行動変容を促すには、オンラインショッピングやコンテンツ購読などのサイバー空間での行動に比べ、より強い動機付けが必要となるため、人それぞれの心理特性をより深く・広く理解する必要がある。

これまで心理学の領域では、主に質問紙調査や専門家による面談などで人の心理特性を理解するアプローチが採られてきたが、こうしたアプローチには i)質問数・面談時間の制約から調査可能な心理特性の範囲が限定される、ii)質問内容や面談結果の解釈が人それぞれ異なるため調査結果に属人的な歪みが生じる、iii)コストの面から調査可能な対象者が限られる、といった課題がある。

KDDI では、これまでに蓄積された心理学領域の研究知見を活用しつつ、CPS で観測される日常行動のデータや生体データから、一人ひとりの心理特性を理解する人間心理理解 AI を研究開発している。

具体的には、日常の Web 閲覧パターンや自動車の運転ログから性格(Big Five)や価値観(Schwartz's Basic Value[9-38])を推定する技術の研究開発[9-39][9-40]や、これらの心理特性と広告デザイン選好の関係性のモデル化[9-41][9-42]、広告反応予測に取り組んでいる[9-43]。こうした研究を通じて、推定可能な心理特性や対象とする分野を拡げるとともに、日常行動から推定した心理特性がサービス上でどのような行動に現れるかといった行動予測力の検証を進めている。

9.4.2.2. 説得 AI

人の気持ちや行動を変えようとして行われるコミュニケーションに「説得」がある。説得によって行動を変えるには、対象行動に対する動機付けに加え、心理学の分野で「認知バイアス」と呼ばれる人の行動特性をうまく利用することが有効とされているが、対象とする行動や人、そのときの環境によって説得の難しさや方法は異なる。

例えば、スマートフォンを操作しながら歩行する「歩きスマホ」に起因する事故が社会問題に

なっている。歩きスマホを検知して強制的にスマートフォンの利用を中断させるのではなく、歩行者に自発的に歩きスマホをしないようにさせるため、歩きスマホによる事故で相手に怪我をさせた場合に懲役刑が科される可能性があるという情報とともに、ネガティブな感情を想起させる写真を見せる「感情的アプローチ」が説得の一例として挙げられる[9-44]。

KDDI は、心理学の知見と、人間心理理解 AI で得られるフィジカル空間やサイバー空間での行動データから推定した人間心理を用い、一人ひとり個別に、効果的かつ無理のない、心地よい説得手段とその説得効果を高精度に予測することが可能な「説得 AI」を研究開発している。例えば、高速道路事業者との渋滞緩和のための「迂回行動促進」実験では、図 9-2(左)に示すように、スマートフォンアプリのトップ画面上で複数の異なる心理効果を有する迂回促進コンテンツを表示し、迂回意向や迂回行動を検証した。この結果、普段運転せず運転に不慣れた人には視覚情報を用いて迂回先が空いていることを想起させるコンテンツが、子供がいる人には感情に訴えて共感性を喚起させる効果を有するコンテンツが効果的であるなど、ユーザによって有効な心理効果が異なることを確認した[9-45]。そのほか、観光、健康・ヘルスケアなど、複数分野での手法検討と実証をパートナーとともに進めている[9-46]。

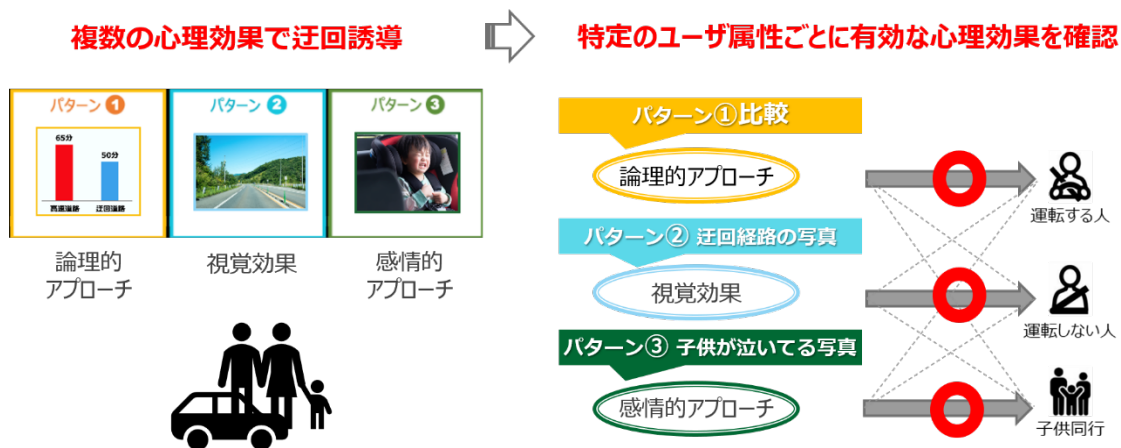


図 9-2 高速道路事業者との実験

9.4.3. 信頼できる AI

AI が導く結果の利活用には、ある種の不信感や不安をもたれるケースがある。それは AI による判断がブラックボックス化されていて判断根拠が分からないことや、フィジカル空間において人間の嗜好に関するバイアスが潜在的に反映されてしまう恐れがあるなどの理由による。せっかく信頼性の高い AI エンジンが開発されても、AI 自体に対する信頼性が低下しては、ユーザは安心して活用できない。

近年、機械学習・深層学習技術を用いた判断のブラックボックス化に対応する技術的な解決手段として説明可能 AI (XAI: Explainable AI)に関する研究が増えている[9-47]。例えば、画像認識や音声認識などのモデル構築における AI・機械学習技術者向けの研究開発など

が活発である[9-48]。

KDDI では、フィジカル空間サービスにおける、あらゆる立場のユーザ(AI 開発者や利用者など)向けの説明可能性を実現する技術に取り組んでいる。

また、AI の進化・深化に伴い、本人の承諾なしにデータが収集されるなど、これまで想定できなかったケース・規模での人権侵害が生じてしまう可能性が出てきている。AI の技術進化に法整備が追いつかない中で、国際的な調和を図りながら、規制を先読みする形で、あるべき AI の開発を行う必要が生じている。そこで、世界各国で並行して議論されている(特に倫理面・プライバシー保護観点からの)AI 規制に対して広く調査分析し、自社で開発する AI に最新の情勢を反映させることに加え、日本の政策へも提言していく活動を実施する。KDDI は便利で使い勝手の良い面だけでなく、安心・安全に活用できる AI の開発を進めていく。

9.4.4. 複数の AI 技術を組み合わせた活用

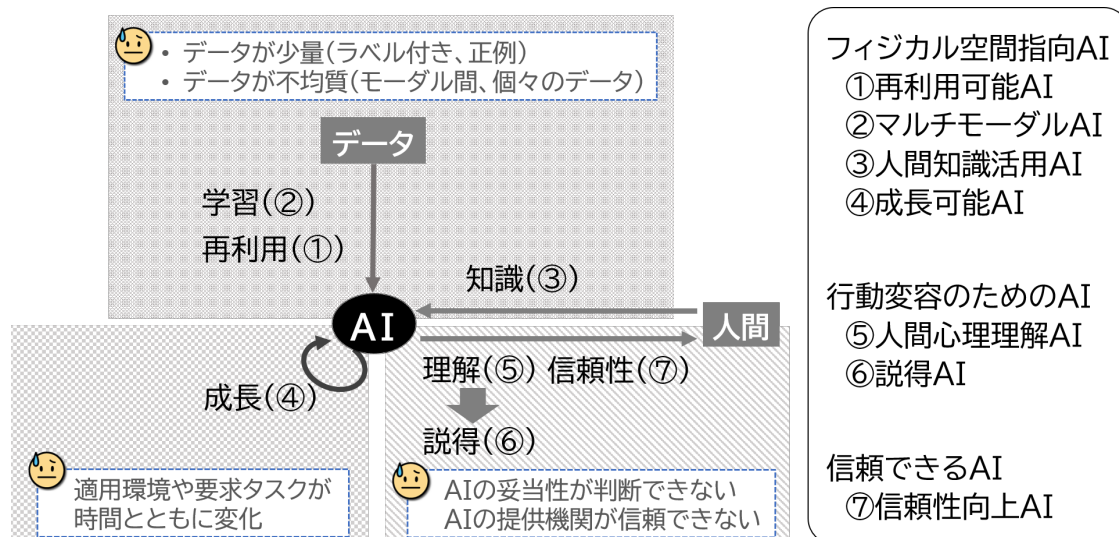


図 9-3 フィジカル空間特有の課題と解決する 7 つの AI の関係性

KDDI が研究・開発する新しい 7 つの AI は、図 9-3 に示すように、フィジカル空間の課題の解決を実現しつつ、それぞれが独立して利用されるのではなく、相互補完的な役割を持ち、従来の機械学習や深層学習によって作られた AI と合わせて、目的やケースごとに組み合わせで利用していく。

例えば、新駅を建設して街の賑わいを創出するケースでは、特徴が似た別の街の様々なデータから「②マルチモーダル AI」で生成した新駅開業前後の人口変化モデルと、自分の街固有のデータを組み合わせ、「①再利用可能 AI」によりその街の人口変化予測モデルを生成する。データが不足する場合は「③人間知識活用 AI」でフィジカル空間の人の行動や知見から補うことでモデルの高精度化を実現する。また、生成した新駅開業後の人口変化予測モデルをベースとして、この街の住民の特徴を考慮した「⑤人間心理理解 AI」と「⑥説得 AI」を用いて行動変容

を促す告知プラン～街の賑わい創出と混雑緩和, 住民個人の満足と都市の全体最適を両立・調和させるプラン～を自動生成する。その際, 「⑦信頼できる AI」で AI の判断根拠を提示することで, 施策を実施する交通事業者や自治体など, 地域のステークホルダの納得感を向上させる。各種データの取得や活用にあたっては, その時々に合わせてデータ収集・利用・AI 規制を遵守する。運用開始後, 時間と共に街や住民は変化するが, 「④成長可能 AI」により人口変化予測モデルを逐次更新することで, 継続的に施策に活用していく。

ホームロボットのいる新しい家で両親との同居生活を始める場合, ホームロボットが家族の嗜好を認識しつつ, 「③人間知識活用 AI」を元に家族に時々質問を投げかけながら, 「①再利用 AI」でサポート機能を新しい家に置き換えて生活をサポートする。更に, 同居前に両親宅のセンサから両親の振る舞いデータを「②マルチモーダル AI」で学習し, 一般的な 60 歳代の行動モデルをベースに両親の振る舞いデータを「①再利用 AI」で加味し, 「④成長 AI」で徐々に状況や場所に合わせて, 家族全員が納得するようなサポートをする。

10.「6. XR」

10.1. B5G/6G における XR の役割

XR は、VR や AR¹⁵、MR¹⁶など、サイバー空間とフィジカル空間を融合させた結果を人間の知覚にフィードバックする技術の総称であり、KDDI Accelerate 5.0 の 7 つのテクノロジーにおいて、AI が導き出した分析結果を実際に人間に伝達し、行動変容を促す役割を担っている。XR 技術を活用したコンテンツは、従来の動画視聴と比較して、大容量かつ低遅延でユーザに送り届けることが必要とされるが、B5G/6G により最適化された通信や、高効率・超低遅延空間伝送技術によってこれが可能となる。B5G/6G と XR 技術の組み合わせによって、五感がミックスされたこれまでにない臨場感を伴う体験を、あらゆる生活シーンの中で創出することができる。

10.2. B5G/6G において XR が目指す姿

2030 年には、あらゆる場所に設置された IoT デバイスやセンサがフィジカル空間の情報をスキャンし、サイバー空間でそのまま再現できるようになる。単に再現するだけでなく、架空の風景やモノまで重ね合わせる「フィジカル空間再現・拡張」が実現される。これらは平面的な映像表示に留まらず、VR/AR グラスでの立体表現はもちろん、実物と見分けが付かない立体映像を表示するホログラフィ、場の広がりまでも感じられる立体音響、モノに触れた感覚を得られるフォースフィードバックなど、さまざまな知覚表現を組み合わせる「マルチモーダル連携」によってユーザに提示される。

こうした XR 技術の進化がコミュニケーションスタイルに多大な変革をもたらす。具体的には、自分の部屋にしながら、過去に訪れた場所を再現し、その思い出を遠隔の家族や友人と共有する。親しい人の肩に触れ、そっと手を重ねる。そんな言葉だけでは伝わらない繊細なニュアンスの表現までも可能とする。

このように豊かな XR 体験を支える仕組みとして、「高効率・超低遅延空間伝送」が重要であり、フィジカル空間のセンシング情報、更にはサイバー空間で拡張された XR コンテンツが、高効率にデータ圧縮された形で、タイムラグを感じさせることなく互いの空間を行き来する。その結果、CPS においてシームレスな XR 体験をもたらす。

10.3. 世の中の状況

COVID-19 の感染拡大に伴うリモートワークやバーチャルイベントの急速な普及に伴い、XR 技術を活用した遠隔でのコミュニケーションやコラボレーションがより一般的となりつつある。例えば、VR の代表的な国際会議である IEEE VR のように、VR グラスを介した視聴体験と、アバターによる自己表現を駆使したバーチャル会議や展示会が増えてきている[10-1]。同様の技術を活用して、バーチャルキャンパスやバーチャルオフィスを本格導入する米国の大

¹⁵ Augmented Reality: 拡張現実

¹⁶ Mixed Reality: 複合現実

学や企業も登場している[10-2][10-3]. VR/ARグラスは, 米国や中国などの大手IT企業を中心に高画質化・広視野角化・小型化・軽量化といった性能向上が着実に進められており, 利用シーンが拡大している.

このように, XR 技術の普及は着実に進んでいるものの, 従来は特定の商品・サービスのみがデジタル化され, サイバー空間のフィードバックを受けられる体験は断片的なものに留まっていた. 一例として, KDDI が発表したバーチャル渋谷を紹介する. このバーチャル渋谷では, サイバー空間内では渋谷の街並みがデジタルツインとして再現され, 24 時間, 世界中どこからでも, 自身がアバターとなって参加することが可能である[10-4]. また, スマートフォンやスマートグラスに搭載されたカメラ越しの映像から空間を認識する VPS 技術を活用して, 実際の渋谷の景色に, お店の宣伝やクーポンなどが重畳されるサービスが実現されている(図 10-1)[10-5].



図 10-1 渋谷スクランブル交差点のフィジカル空間拡張[10-5]

まず視覚について述べると, 従来のサイバー空間からのフィードバック体験は, 主に2D ディスプレイを介する形態に制限されていた. これを疑似的に3D に拡張する試みとして, 透過型ディスプレイやハーフミラーなどによって3D 空間中に2D の高画質 CG を投影するアプローチが検討されている[10-6]. また, 実物と見分けることが原理的に不可能な映像表現を実現すべく, 実物体の表面から反射して得られる光波を記録・再生するホログラフィ(図 10-2)を活用した立体表示ディスプレイ技術[10-7]の研究開発が進められているが, 表示用デバイスなどの制約から, 高画質・広視野角の映像表示は実現されていない状況である.

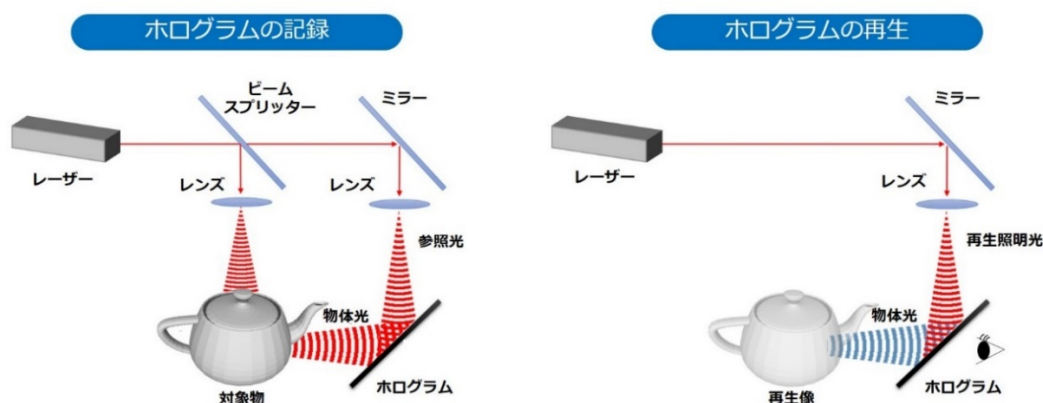


図 10-2 ホログラフィの原理

聴覚については, KDDI の「音の VR」技術により, 空間中の任意の範囲にズームした音場をリアルタイムに合成することで, 360 度映像中の見たい・聴きたい部分に自由自在にフォーカスできるインタラクティブ視聴体験が可能となっている[10-8]. 「音の VR」技術によるバーチャルコンサートの例を図 10-3 に示す.

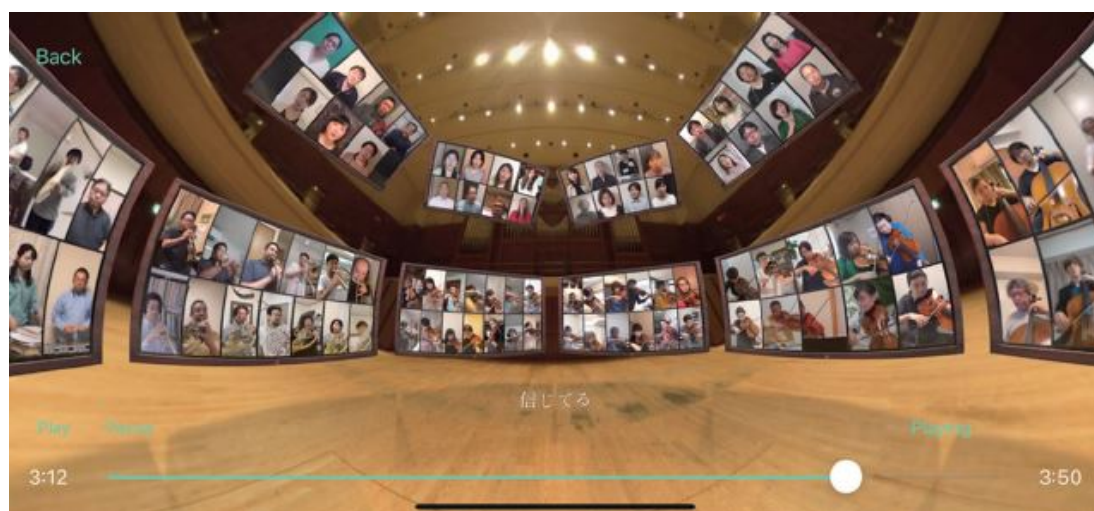


図 10-3 「音の VR」技術によるバーチャルコンサートの例

最後に XR コンテンツのネットワーク伝送に関して述べる. 世界のデータ流通量(IP トラフィック)は急増しており, 2021 年には月間 278EB(エクサバイト:1EB=10⁶TB)に達すると予測されている[10-9]. 中でもモバイルデータトラフィックの伸びが目覚ましく(2016 年の月間 6EB から, 2021 年は約 7 倍の月間 41EB に拡大[10-9]), 今後はその大半のコンテンツが映像データとなり, その比率は2022年には約80%に達する見込みである[10-10]. 映像圧縮技術として, 2021 年現在実用化されている最新の国際標準技術に High Efficiency Video Coding (以下“HEVC”と略記)がある. HEVC によって, 既に数百分

の一のビットレートへの圧縮が実現されているが、360 度映像の登場や、4K/8K といった映像の高精細化、高ダイナミックレンジ化、スマートフォンやタブレット、ヘッドマウントディスプレイなどの再生デバイスの多様化が進む中、映像品質を維持したままデータ量を削減する映像符号化技術の更なる高度化が進められてきた。具体的には、2020 年に国際標準として新たに規格化された映像符号化方式 Versatile Video Coding（以下“VVC”と略記）[10-11]を用いることで、4K 映像のライブ中継がモバイル回線経由で可能になり、今後、スマートフォンやタブレット向けの映像サービス展開が期待される[10-12]。

10.4. 2030 年に向けて必要な技術

本節では、B5G/6G 時代の XR を支える技術について、フィジカル空間再現・拡張、マルチモーダル連携、高効率・超低遅延空間伝送の観点から整理する。

10.4.1. フィジカル空間再現・拡張

フィジカル空間再現・拡張が進むことで、フィジカル空間のあらゆる人やモノが忠実にスキャンされ、サイバー空間に伝送されるようになる。サイバー空間での解析を経て、フィジカル空間全体にサイバー情報が重畳され、あらゆる生活シーンの中で時空を超えたサービスを享受できるようになる。B5G/6G によって、CPS の進展がより一層加速し、あらゆる場所がサイバー空間とつながり、自由に行き来することが可能になる。

フィジカル空間とサイバー空間が融合した世界では、自分の部屋にしながら、今までに訪れた場所を丸ごと再現し、その空間で遠隔の家族や友人と寄り添う、或いは過去の思い出を追体験するといったことが可能である。また、日本のスタジアムにしながら、海外のスポーツの試合を空間として再現し、あたかも試合が目の前で行われているような、かつてないスポーツ観戦体験が可能になる。

また、人間を精巧な 3DCG（フォトリアリスティックアバター[10-13]）として表現するバーチャルヒューマンが、店舗での接客や案内、教育・介護などで日常的に活用され、人に寄り添う存在として社会的に受容されるようになる。バーチャルヒューマンのイメージを図 10-4 に示す[10-14]。また、サイバー空間においては自身のエージェントがデジタルツインとして存在し、容姿や服装はもちろん、仕草や表情さえもシチュエーションに応じて最適に制御され、特にビジネスシーンにおいては対面以上のコミュニケーション手段として日常的に活用されるようになる。



図 10-4 バーチャルヒューマンのイメージ[10-14]

フィジカル空間の再現では、あらゆる物体や空間の情報をセンシングし、サイバー空間上でモデル化する必要がある。今後、その対象を至近距離の人物のみならず、街レベルの広大な空間に拡げていくにあたり、3D センサや高精細カメラなどによる膨大な情報から、精緻なモデルを構築するための、先進的な信号処理技術が極めて重要となる。

10.4.2. マルチモーダル連携

XR 技術によるマルチモーダル連携が進むことで、体験の場は3D 空間に拡張され、立体的な映像・音場による視聴体験、人やモノに触れる感覚、更には嗅覚や味覚までもが時空の制約を超えて提供されるようになり、実体験と遜色のない、自然で豊かな体験が得られるようになる。

2030 年には、フィジカル空間において実物体の表面から反射して得られる光波と全く同一の光波を再現させるホログラフィ技術が実用化される。これにより、小型軽量の透過型HMD(ヘッドマウントディスプレイ)を通じて、3D 酔いや視覚疲労から解放された理想的な立体映像の視聴が可能となり、日常のあらゆるシーンで AI による視覚的かつ直感的な支援を得られるようになる。

また、CPS が進展した世界では、物理的に離れた空間が音場も含めてリアルタイムに接続され、あたかも今その場にいるかのような、ライブ視聴を超越した没入体験が可能になると想定される。

更に、視覚・聴覚に加えて、触覚をモーダルとしてサポートすることで、サイバー空間における遠隔コミュニケーションの際に、相手やモノに触れる感覚を再現できる。これにより、肩をポンとたたく、手にそっと触れる、握手するなど、対面さながらのコミュニケーションが時空を超えて実現される。例えば、遠隔での懇親の場における「乾杯」や「お酌」といった身体的コミュニ

ケーションでは、触感波形のリアルタイム合成技術を通じて、多様な触感体験が実現される。その一例として、遠隔に居ながら「乾杯」や「お酌」の触覚を再現するシステムのイメージを図 10-5 に示す[10-15]。



図 10-5 触覚を伴う遠隔での「乾杯」や「お酌」が可能なシステムのイメージ[10-15]

対人のコミュニケーションにおいては、それぞれの感覚において自然に働きかけることに加えて、複数の感覚を互いに連携させて得られるクロスモダリティ効果の追求がより重要となってくる。コミュニケーションをとる上で、相手の置かれた身体的状況及び環境面の制約は人により様々である。つまり、あらゆる感覚で働きかけることが常に最適とは限らない。このため、例えば光と振動で音を伝えたり、音と振動でポインティング入力したりするなど、状況に応じて有効な感覚を見極め、ほかの感覚を拡張的に重畳するクロスモダリティ技術の確立が急がれる。

10.4.3. 高効率・超低遅延空間伝送

XR の日常への浸透とともに、視覚体験は2D ディスプレイから空間へと広がり、そこで取り扱われる情報の主体も2D の映像情報から3D の空間情報そのものへと変化していく。一方、3D 空間を表現する点群情報は従来の映像情報と比べて膨大であるため、点群データを対象に高効率な圧縮伝送を行うための符号化方式である Point Cloud Compression (以下“PCC”と略記)技術[10-16]や、その後継技術が確立され、モバイル回線においても3D 空間情報を安定的に扱えるようになる(図 10-6)。3D 空間データの圧縮技術に関して、これまで及び今後のロードマップを図 10-7 に示す。関連情報として、2D 映像の圧縮技術及び空間再現技術の進展についても併せて同図に示す。

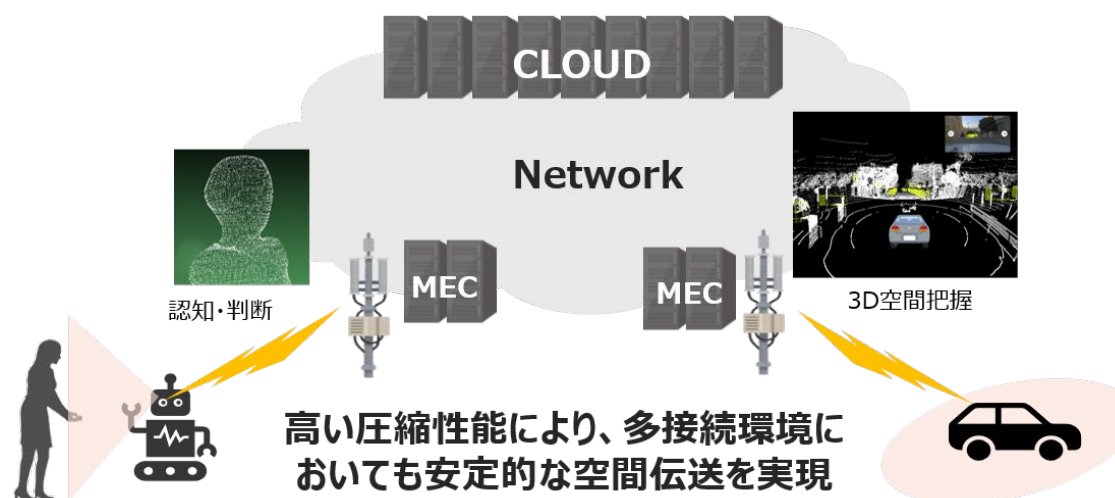


図 10-6 3D 空間情報の伝送

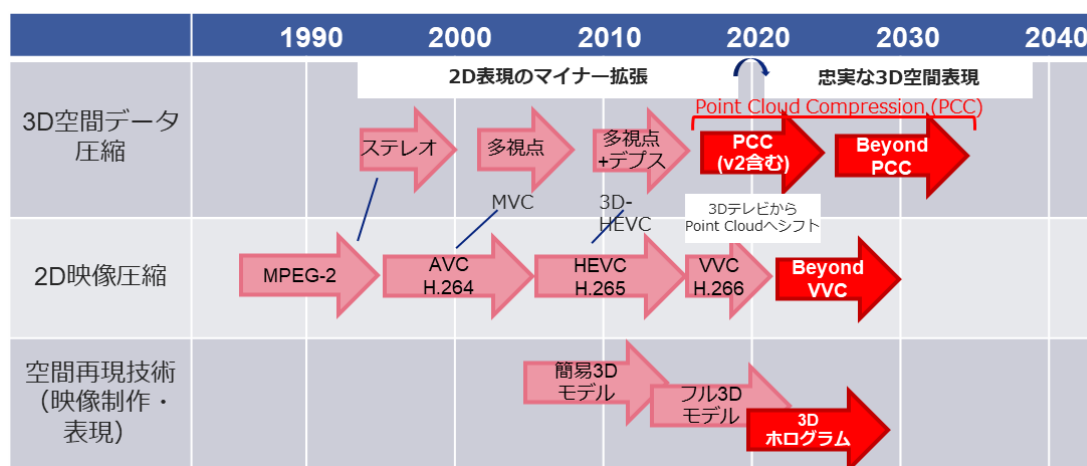


図 10-7 3D 空間データの圧縮技術に関わるロードマップ

また、3D 空間を再現・伝送できるようになると、遠隔からの手術やロボット操縦など、インタラクティブ性の高いアプリへのニーズが高まる。このような用途では、前述の圧縮性能を維持したまま、3D 空間を瞬時に伝送する超低遅延伝送技術が活用される。例えば、遠隔のロボットが存在するフィジカル空間を操縦者の空間と接続する際に、End-to-End で 50 ミリ秒以内の表示遅延(現行の 4K 映像伝送における世界最小クラス)を実現することで、視覚と身体感覚のギャップを感じる事がほぼ無くなり、正確で身体的直感に即した操作が可能になるほか、映像伝送遅延が原因の一つとされる操縦者のサイバーシックネス(VR 酔い)が緩和され、長時間の遠隔操作が可能となる[10-17]。

このように、CPS が進展した世界は、B5G/6G による超高速大容量・超低遅延のモバイルネットワークと、高効率・超低遅延空間伝送技術の両輪により実現されることとなる。

11. 「7. Robotics」

11.1. B5G/6G における Robotics の役割

2030 年にはフィジカル空間とサイバー空間が B5G/6G によって接続され、フィジカル空間で得られた様々な情報はサイバー空間に伝送され解析される。この解析された情報に基づき、再びフィジカル空間に作用するシステムの一つが「Robotics」である。ここで「Robotics」は、フィジカル空間に作用する実体がいわゆる物理的な(アクチュエータを備えた)ロボットに留まらず、エージェントのような仮想的なロボット(またはボット)や、これらのロボットが作用する仕掛けを包含している。

B5G/6G の優れたネットワーク性能は、Robotics の発展において不可欠である。例えば超高速・大容量の通信は、ロボットが搭載したカメラや LiDAR などを用いて得られるセンシング情報をプラットフォームで分析する上で重要である。また超低遅延の通信は、ロボットからサイバー空間へのセンシング情報の伝送、サイバー空間からロボットへの制御情報(分析を通じて得られた動作計画など)の伝送において必要である。更に超多数接続の通信は、例えば、大小多数のロボットが人間社会に入り込んで活動する際に、効果的に活用される。超低消費電力の通信、並びに超安全・信頼性確保の通信も、ロボットが長時間にわたり安心・安全に動作するのに不可欠である。

このように、B5G/6G によって CPS が進展した社会は、Robotics の典型的な利用シーンに位置付けられる。将来的には、Robotics は都市 OS の一要素として実装され、我々の生活に自然な形で入り込み、更なる豊かさを与えることになる。

11.2. B5G/6G において Robotics が目指す姿

2030 年、人間社会に溶け込むロボットは、街中や施設の巡回警備、危険な現場での作業、物品のデリバリーなどでも活躍することになる。ロボットの活用範囲をより一層拡大するために、Robotics プラットフォームを拡充する必要がある。このプラットフォームは、いわゆる RaaS のサービス基盤として位置づけられる。フィジカル空間のロボットが収集した情報は、共通のプラットフォームに送られ、サイバー空間の AI によって解析される。AI の指示により、フィジカル空間のロボットの行動を制御することになるが、このとき、多種多様なロボットがプラットフォームを介して連携することで、より複雑なタスクの実行、並びにタスク実行に必要な情報の共有が可能となる。

ロボットが人と共生する上では、安全性やサービス価格の妥当性の面で、ロボットが社会的、経済的に受け入れられることが重要になる。社会的受容性の観点では、サイバー空間上で高度な推測処理を行うことで、ロボットはフィジカル空間の雰囲気を感じて自律的に行動できるようになる。例えば、ユーザの健康状態や気質を把握して、さりげなく散歩を促すなど、「コミュニティ支援」としての貢献が期待される。ロボットの行動を観察して、人にとっての受容性を評価・分析し、更なる行動改善につなげることで、ロボットは単なる共存を超えて、人にとって欠かすことのできないパートナーになる。

上述の RaaS 基盤の普及を通じ、2030 年に向けてロボットの活動範囲は急速に拡大する。陸や空については、既に人やモノの輸送を担う「自動運転・スマートドローン」の実証実験が進んでいるが、今後は「海」にもロボットが進出していくことになる。今後、水中でも無線通信を可能とする光通信技術や、ドローンの長時間稼働を可能にする水素燃料電池の開発を通じ、ロボットの活動範囲は水域に拡張される。これにより、ドローンによる海中探査や漁場監視、インフラ点検、水中でのライブ映像配信など、幅広い産業での経済効果を創出できる。

11.3. 世の中の状況

これまでロボットが活躍してきた主なフィールドは産業分野である。産業用ロボットは日本が強みを発揮してきた分野であり、日本製のロボットは世界市場で 6 割弱のシェアを持つと言われている。この強みを活かしつつロボットの活用先や世界市場でのシェアを拡大していくため、国として 2015 年に「ロボット新戦略」[11-1]を策定し、更に 2019 年に「ロボットによる社会変革推進計画」[11-2]をまとめている。これは、IoT などのセンシング、センシングしたデータを解析する AI、そして AI を実行するためのコンピューティング環境の進展に伴ってロボットの社会実装を更に推し進めようというものであり、多様なプレイヤーが参画してサービス分野などのロボットの実用化を加速し、ロボットがより人の生活に身近な存在になることを目指している。既に家庭向けにはロボット掃除機が普及し、ビジネス領域でもドローンや配送ロボットによる自動配送の実証実験が進みつつある。今後ロボットが活躍するフィールドは益々拡大していくと考えられ、多種多様なロボットを効率的に運用管理するための Robotics プラットフォームの必要性が高まっているとともに、人との協調においてロボットが備えるべき技術の確立も求められている。

Robotics プラットフォームについて、ロボットメーカーの中には、独自のプラットフォームを構築し、自社ロボットを管理する仕組みを実現している例もある[11-3]。一方、多様なメーカーの様々な機能のロボット群を、プラットフォームにより連携させる取り組みも進んでいる[11-4]。これら既存のプラットフォームの主目的は、ロボットの統合管理、状態監視や異常発生時の遠隔操作などである。これに対し KDDI では、「ライフデリバリー」というコンセプトを提言し、Robotics プラットフォームを利用した実証を行っている。これは、2.1.2 節に記載した「購買の変化」を具現化したものであり、日用品など、購入する品目に対して拘りのない購買行動を無意識化することを目指している。具体的には、オフィス内に小規模のコンビニを設置し、スマートフォンアプリからの注文に従い、遠隔操作によるロボットが商品をピックアップし、自律走行ロボットに積載して注文者に配送する、「オーダー＆デリバリー」(図 11-1)という形態の実証実験を行っている。ロボットの連携だけでなく、決済機能なども導入した、事業展開を意識したプラットフォームを構築している。

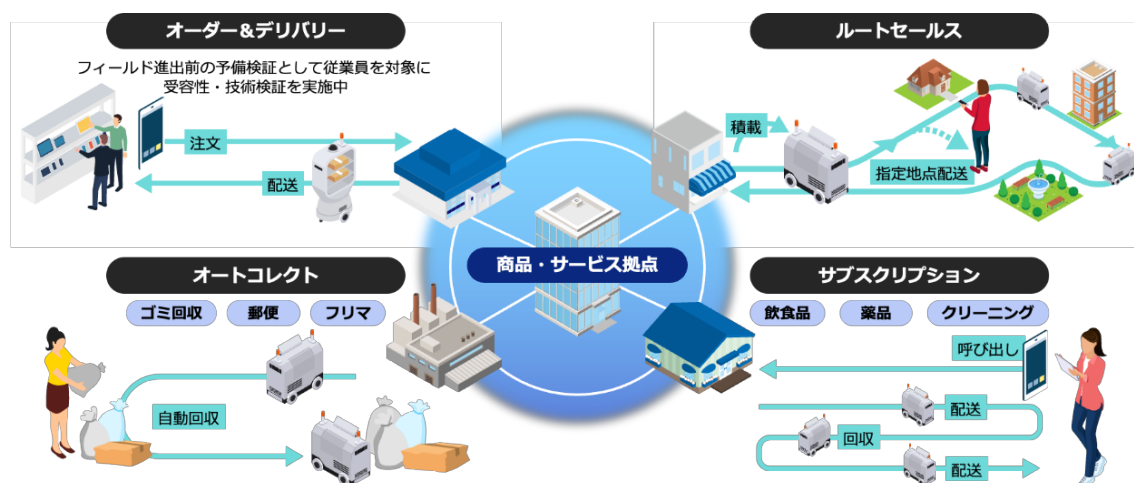
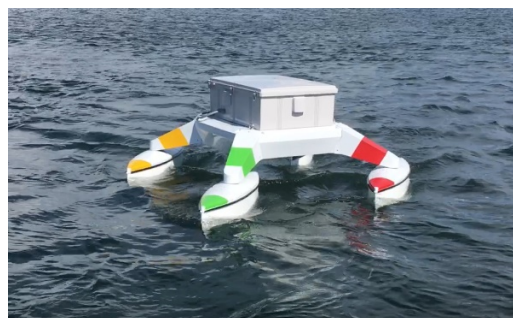


図 11-1 ライフデリバリーのサービス形態

コミュニティ支援について、ロボットが 2030 年代の人間社会に適合するためには、周囲にいる人の状況を把握しながらより複雑なタスクを実行したり、人と協調して動作したりすることが求められ、HRI 技術の更なる進化が求められる。現状の HRI 技術では、例えば、ロボットに装着されたカメラで取得した映像から、プラットフォーム上の行動認識 AI[11-5]により人の姿勢を推定し、推定結果に応じた動作計画の立案が可能である。一例として人に対してモノを渡すタスクでは、視線がロボットを向いているか、体の方向は適切か、ロボットとの距離は適切かなど、ルールベースの定義を行い、条件を満たすように行動する。近年では強化学習などによって、ロボットの最適な行動計画を生成することも進んでいるが、実際の人の反応をシミュレーションに組み込むことは難しい課題である。また、人の行動に加え、人の顔のカメラ映像から表情を把握し、それらを統合して感情を推定したり、更には人との対話内容に反映させたりすることも行われている。感情推定にはカメラ映像以外にも声や心拍、体温など、多様な生体情報が活用されている。

2030 年に向けて目指す社会システムの機能として、陸・海・空といった場所の制約を受けない形で、人の移動やモノの運搬が期待されている。現在は陸と空において、自動運転の実証実験やドローンの導入が進んでいる一方、「海・水」のエリアは十分に検討されていない。最近では水素燃料電池を搭載した水上ドローンの開発と実証実験も進められている(図 11-2) [11-6]が、空・陸に比べると一歩遅れている状況である。これは、通信環境の問題に起因する。電波を利用する通信の場合、水中では電波が減衰してしまうため通信ができない状況になる。そのため、現在でも海中無人艇などの遠隔操作は、光ファイバなどを介した有線での通信、或いは伝送容量の小さい音響信号による無線通信により行われている。これに対し、伝送容量の拡大を目的として水中での減衰率が比較的低い青色 LED 光無線通信技術を用いた海中通信の取り組みも進んでいる[11-7]。一方、ロボットの遠隔操作においては、映像などフィジカル

空間情報を取得し、サイバー空間で再生するまでのEnd-to-End遅延の短縮が極めて重要である。2020年7月、テレグジスタンスロボットを対象に50ミリ秒のEnd-to-End遅延が達成され、これが現在の世界最小記録である(図11-3)[11-8]。それまでは、ドローンによる4K映像伝送を対象とした100ミリ秒のEnd-to-End遅延が最小であった[11-9]。



水素燃料電池を搭載した水上ドローン



スマートフォンの操作画面

図 11-2 水素燃料電池で航行する水上ドローン

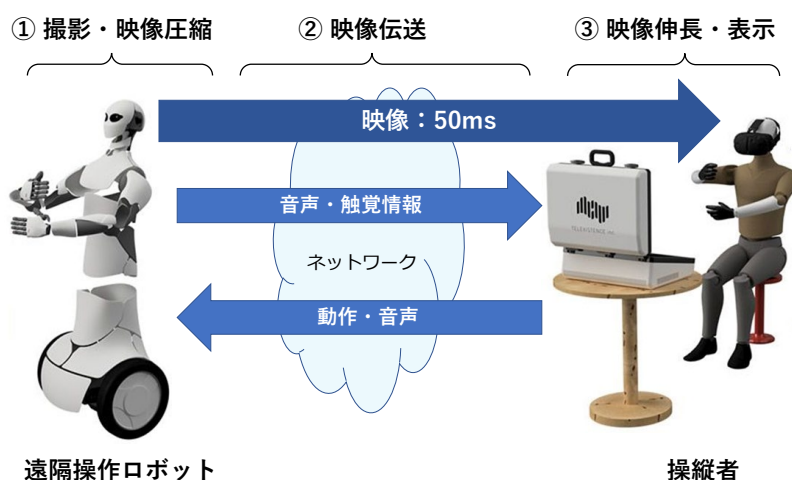


図 11-3 ロボットの遠隔制御

11.4. 2030 年に向けて必要な技術

本節では、B5G/6G 時代の Robotics を支える技術について、RaaS, コミュニティ支援, 自動運転・ドローンの観点から整理する。

11.4.1. RaaS (Robotics as a Service)

B5G/6G を見据えた Robotics プラットフォームのイメージを図 11-4 に示す。一例として、施設内の巡回と清掃を請け負うロボットサービスを提供するとき、巡回ロボットが収集した

施設の情報を通じたプラットフォームで管理することで、清掃ロボットが自力では検知できない警備情報を利用できるようになる。このとき、清掃ロボットには警備のためのセンサや機能を搭載する必要はなく、清掃の観点で必要な最小限の機能だけを実装しておけばよい。つまり、サイバー空間にロボットの頭脳にあたる機能を持たせておくことで、施設に関する情報を複数のロボットで共有するなど、柔軟な運用が可能になる。このような Robotics プラットフォームを構築することにより、ロボットの制御を司る認知や判断の機能を高度化することができ、RaaS の実現が容易になる。究極的には、ロボットのハードウェアは必要なセンサとアクチュエータだけを備えていればよく、センシング情報に基づく認知・判断や、制御に必要な動作計画の生成に関わる機能(より正確にはそれらに必要な AI)は、プラットフォーム上で提供される適切なものを選択すればよい。これにより、安価なハードウェアでも、高度な知能を持たせることが可能となり、そのアップデートによって、環境変化への追従や成長を後押しできる。

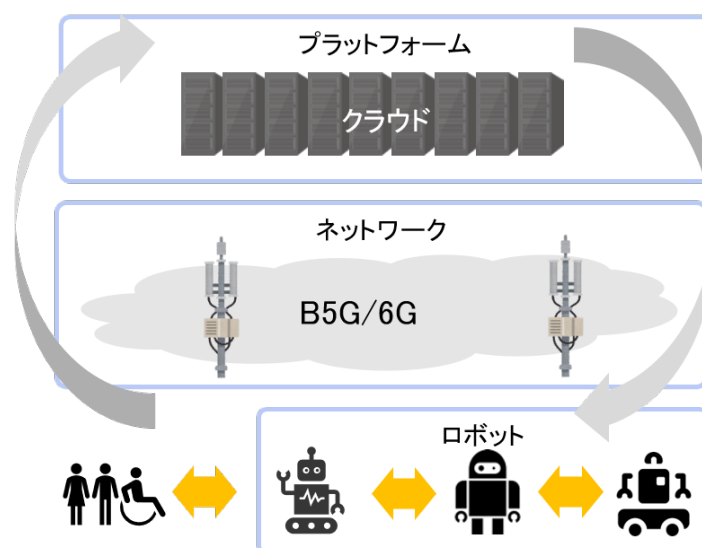


図 11-4 Robotics プラットフォーム

11.4.2. コミュニティ支援

2030 年にはフィジカル空間で人がロボットに具体的な指示を与えることなく、サイバー空間での分析を通じて、フィジカル空間での課題をロボットが自律的に解決する世界となる。これには運搬や保守、家事などの物理的なタスクに加え、人に対する課題解決も含まれる。例えば、フィジカル空間で人に運動を促す場合、ロボットがサイバー空間での分析を通じて、フィジカル空間の状況や雰囲気を感じ取ることで、その人が行動したくなる環境変化や働きかけ(情報提供、励ましなど)により、行動変容を起こすことができる。具体的には、人がロボットに対して「散歩に行きたいのだけどオススメのルートを教えて」と能動的に問いかけるのではなく、サイバー空間に蓄積されている、その人の生活習慣や趣味趣向を起点として、ロボットが人に自然かつ気の利いた働きかけを行う世界である。

このような世界の実現に欠かせないのが HRI 技術の進化であり、そのうち特に重要と思われる要素として、①予兆検出、②説得戦略の構築、③自然かつ気の利いた対話を挙げる。CPS におけるこれら要素の位置づけを図 11-5 に示す。①予兆検出技術は、ロボットが人を観察し、動きや感情の予測により行動の予兆をとらえるものである。これにより、人の主体的な行動に合わせたロボットの動作が可能になるほか、人の転倒など意図しない行動を先んじて防止することが可能になる。仕組みとしては、人の動きやロボット、周囲環境などをモデル化し、複雑な相互作用の中で人の行動に影響を与える重要な相関・因果を学習し、予測するものである。②説得戦略はロボットが人に対して提案する際に必要であり、説得 AI（9.4.2.2 節を参照）によりサイバー空間で得られるデータから推定した人の性格や心理状態、環境に基づいて、一人ひとりに最も有効なタイミングの見極めや働きかけの立案を可能とする。③対話技術については、ロボットから見た相手の表情や身振りの理解により感情を把握するとともに、ロボット自身やバーチャルヒューマンによる仕草の表現など、一連の対話プロセスを円滑に、かつ気の利いた表現で行うことで、共感や信頼に満ちあふれたコミュニケーションをもたらす。

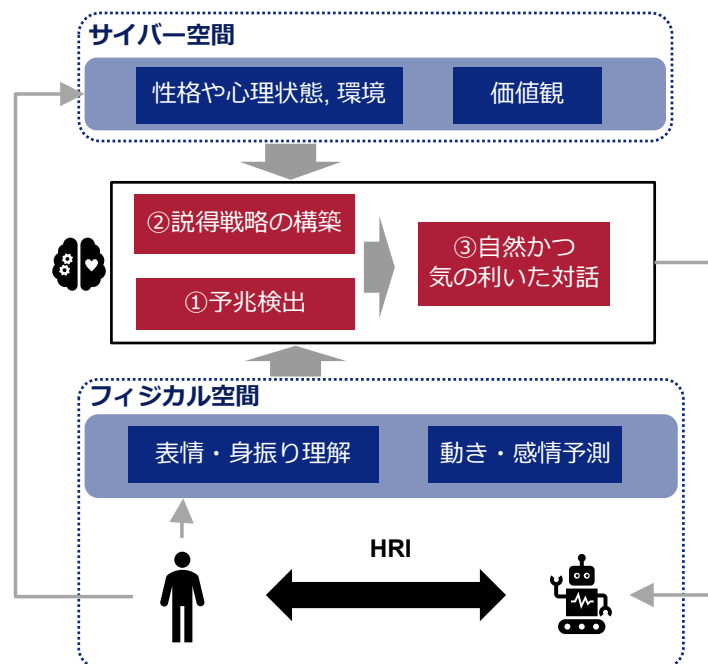


図 11-5 HRI を実現する要素技術

以上で述べた HRI 技術の成功指標として Sense of Agency（以下”SoA”と略記）と社会的受容性が挙げられる。SoA とは、人が主体的に行動判断し、ロボットがサポート役に回っているという意識を意味している。例えば、人にとって良い行動や提案であっても、ロボットからの一方的な主張は、人が AI やロボットに操られている感覚を与えてしまうので、SoA の低下につながる。次に社会的受容性は、ロボットの存在が、自身のユーザ及び直接的に関係を持たない第三者も含めて形成される社会において、いかに受け入れられているかを示す指標で

ある。2030 年の社会では街中や宅内など様々な場所でロボットが活躍し、オープンな環境で人と共生することとなる。このとき、ロボットが活動することによって危害を及ぼされる懸念がないか、ロボットが人の作業を代行するときに信頼できるか、といった心理面での評価を高めることが重要である。ロボット及びユーザの行動観察、並びにサイバー空間での分析を駆使することで、SoA 及び社会的受容性の向上につながり、究極の HRI を確立することができる。

11.4.3. 自動運転・スマートドローン

KDDI は B5G/6G 時代を見据え、海・水域でも無線での通信が行えるよう、光通信技術により海中にまで無線ブロードバンドネットワークを拡張することを目指している。これにより、水空両用ドローンの展開を行い、海中にいるドローンを遠隔から操作するといった運用も可能となる。人が特定の海域まで行って潜水することなく、ドローンを用いた遠隔からの海中探査や漁場監視、インフラ点検が可能になる。海中にいる人や設備にモノを届けることも可能になる。

更に、[11-7]で示すような技術によって海中の無線通信環境が整備されると、海中から伝送されたライブ映像をサイバー空間で再現・加工し、フィジカル空間で臨場感に富んだ XR 体験を提供したり、水陸両用車で海中ドライブをリアルに体験したりと、海中レジャーの楽しみ方も大きく変わる。水中の作業者を遠隔から支援することも可能で、海中が新たな生活圏、経済圏を形成することになる。

一方、既存の空中ドローンや水空両用ドローンは、2030 年にはその活動範囲を更に広げていく。例えば、自然災害が発生した際の被害状況の把握、水難事故や山岳救助などの人命捜索、より身近には高齢者や登下校における学童の見守りに代表される安全監視、更には今後増える限界集落や離島への物品配送などである。2021 年時点で、ドローンの連続航行時間は数十分であるが、2030 年には数時間に拡大され、行動範囲や活動能力が大幅に向上することとなる。これを支えるエネルギー技術として、現在のリチウムイオン電池に代わり、再生可能エネルギーを利用して作られた水素燃料電池の開発・普及が極めて重要である。陸・海・空におけるあらゆる移動や物流を水素燃料電池で賄うことによって、脱炭素社会の実現が加速する。

12. 今後の展開

本章では、前章までに述べた7つのテクノロジーの今後のロードマップに加え、特にグローバルへの展開の方針として、標準化・オープンコミュニティへの参画及び海外最先端の研究者との共同研究プロジェクトについて述べる。

【全体のロードマップ】

5～11 章で述べてきた7つのテクノロジーについて、それぞれの取り組みのロードマップを整理すると表 12-1 のようになる。

表 12-1 7つのテクノロジーに関するロードマップ

		5G		B5G/6G
7つのテクノロジー		～2024 年度	2025～2029 年度	2030年度～
Network	ユーザセントリックネットワーク	要素技術確立	仕様策定, PoC	商用導入
	光伝送	要素技術確立, 仕様策定	PoC, 部分導入	
	オープンコミュニティ	オープンコミュニティへの入力, クラウドネイティブ化	エコシステム形成, PoC	
Security	通信基盤	PPM→都市向け	信頼できる流通 P/F	セキュリティネイブルネットワーク
	暗号	耐量子計算機公開鍵暗号	高機能暗号	
	検知・防御	AIベースサイバーセキュリティ	AIを守るセキュリティ	
IoT	メンテナンスフリー	構成管理自動化	障害検知自動化	障害復旧自動化
	センサ	モジュール API 化	エナジーハーベスティング	環境負荷低減
Platform		特定都市向け OS	汎用都市向け OS	
AI	フィジカル指向	再利用可能/マルチタスク AI	人間知識活用/成長可能 AI	(ヒトとの)共進化 AI
	行動変容	人間心理理解/説得 AI	(継続的)説得 AI	
XR	伝送	PCC	Beyond PCC/VCC	超低遅延空間伝送
	表現	ホログラフィ	裸眼ホログラフィ	大規模ホログラフィ
Robotics	RaaS	異ロボット間連携技術	人との協調操作	汎用化
	HRI	人の価値観の認識	価値観に基づくフィードバック	

【グローバルな標準化・オープンコミュニティ活動への参画】

KDDI では、前章までに述べてきた7つのテクノロジーについて、前述のロードマップで研究開発を進めていくことを予定しているが、それらの実用化には標準化が必須の取り組みであると考えている。加えて、最近ではオープンコミュニティでの活動も重要な取り組みとなってきた。

ている。また、これらの議論はグローバルに行われることが多く、グローバルへの展開の意味でも重要になると考えている。

B5G/6G 時代を見据えたこれからの標準化活動の在り方としては、KDDI Accelerate 5.0 構想に示すネットワーク、プラットフォーム、ビジネスの 3 つのレイヤ間の連携及び各レイヤ内の連携、すなわち、ネットワーク間・プラットフォーム間の連携を実現するための活動が重要となる。

レイヤ間の連携を実現する Northbound/Southbound API の標準化により、ネットワークが一体となったプラットフォームで XaaS 実現基盤を構築し、新時代のビジネスをドライブする。同時に、これまで様々な標準化団体で議論されてきたネットワーク間の連携、すなわち、相互接続の標準化に加え、プラットフォーム間の連携を実現する Eastbound/Westbound API を標準化することにより、プレイヤー間の競争と協調が促進されていく。

KDDI はレイヤ間並びにレイヤ内の有機的な連携を実現することにより、ビジネス間の連携・融合が加速し、新たな価値の創造に繋げていく。

以上について、一部前章までの議論と重なるが、改めて触れることとする：

- 5.4.1 節で述べたユーザセントリックアーキテクチャに資する各技術について、2025 年以降の 3GPP などでの技術仕様への反映を目指し、技術検討を進める。
- 5.4.2 節で述べた MCF 伝送、RoF などの各技術について、ITU-T での技術仕様への反映を目指し、技術検討を進める。
- End-to-End ネットワークスライスは 5G のキー・イネイブラの一つであり、B5G/6G 時代でも通信事業者が多種多様なユースケースに基づく要望に応え、それぞれに最適化されたネットワークサービスを提供するために不可欠な技術である。ネットワークスライスの構築・運用のためには仮想化技術を適用することが前提となるが、複雑かつ細分化された要求を同時に満足する論理ネットワークを複数同時に運用するためには、運用自動化プラットフォームの利用とドメイン間の連携が必要となる。5.4.4 節で述べたように、今後有望となる運用自動化プラットフォームの一つが ONAP であり、3GPP, IETF (Internet Engineering Task Force), O-RAN ALLIANCE, TM Forum など各種標準化団体・コミュニティで規定された仕様を元にした実装が進んでいる。今後、運用管理プラットフォームに留まらず、IoT アプリマーケットプレイス、エッジアプリ管理プラットフォームなどのプラットフォームとの連携も視野に入れた End-to-End でのサービス提供を検討するにあたり、ONAP をはじめとしたオープンソースコミュニティの活用が重要になる。
- 従来の通信ネットワークは特定のソフトウェア、ハードウェアから構成されていることが多かったが、今後はより柔軟に構築できることが重要となってくる。特にエッジコンピューティングについては、その用途が拡大していくことに加え、広域からローカルに近いところまで広がっていくことが見込まれており、このようなニーズは顕著になることが予想される。これらの取り組みにおいては、多様なニーズに柔軟かつ素早く対応する必要があるため、グローバルを含めた多種のパートナーとのエコシステムを形成し意見を聞きながら進

めることで、様々な用途に適用できる形としていくことが重要となる。そこで、これらを円滑に進めるべく、3GPP や ETSI MEC などの標準化、そして OCP(Open Compute Project), TIP などのオープンコミュニティへの関与を重要視している。特に TIP については、ソフトウェアとハードウェアの Disaggregation を円滑に進めるため、KDDI が設立した TIP Community Lab.を活用していく計画である(5.4.5 節などを参照)。

- B5G/6G 時代の通信インフラを見据えたセキュリティ標準化の取り組みとして、次世代の通信インフラに対応したセキュリティ対策、インフラに使用するソフトウェア・ハードウェア及び新規分野・機能でのセキュリティ確保などが重要と考えられている[12-1]。KDDI では、インフラに対応したセキュリティ対策の一環として、セキュリティ・プライバシーデザインに資するべく、6.4.1 節でも述べたプライバシー管理技術(PPM)の標準化活動を oneM2M, ITU-T, ISO/IEC で進めている。また、新規分野・機能でのセキュリティによる優位性確保の一環として 6.4.3 節でも述べた量子コンピュータの出現を受けた耐量子コンピュータ時代の暗号技術の標準化も併せて検討している。そのほかの分野においても研究開発の成果を標準化などの形でグローバルに展開していく予定である。
- KDDI では、XR コンテンツの伝送技術の標準化に取り組んできており、今後も継続的に取り組んでいく予定である。特に、10.3 節で述べた JVET(Joint Video Experts Team, ISO/IEC JTC1/SC29 及び ITU-T SG16 WP3 による共同作業チーム)で検討が進められている 2D 映像符号化技術(VVC, H.266)及び 10.4.3 節で述べた ISO/IEC JTC1/SC29 WG7 で進められている PCC について、それぞれの技術の検討を進め、B5G/6G で期待されている大容量化、低遅延化、拡張性などをアプリレイヤから支える技術として標準化の形でグローバルに展開していく予定である。

【海外最先端の研究者との共同研究プロジェクト】

KDDI では、KDDI Accelerate 5.0 の実現に向けて、2020 年 10 月から各研究分野で実績のある海外の研究者との共同研究を開始した[12-1]。今後、この取り組みを順次拡大していくことを計画している。各プロジェクトには、KDDI 総合研究所(先端技術研究所)と各大学から複数の研究者が参画し、協働しながら世界トップクラスの研究成果を目指している。そのために、世界トップクラスのコミュニティへの参画や研究者との交流・協働を通じて、先端技術の研究活動の更なるグローバル化や人材の育成、研究員の招へい・獲得による研究開発体制の強化を図ることとしている。

13. おわりに

本ホワイトペーパーでは、2030 年ごろに商用化が見込まれる B5G/6G について KDDI の考えや B5G/6G に関する技術を紹介した。

ライフスタイルの変化については、9 種類の観点で新しいライフスタイルをまとめた。この新たなライフスタイルを実現するためには、さまざまな技術が必要となることも記載している。今後も引き続き、社外のパートナーとともに新しいライフスタイルの検討を進める。

次に、B5G/6G に向けた構想として、内閣府が掲げる Society 5.0 や総務省の Beyond 5G 推進戦略について紹介するとともに、KDDI が 2020 年 8 月に発表した KDDI Accelerate 5.0 の概要を説明した。

そして、新たなライフスタイルに基づいたユースケースの一例として「ライフデリバリー」を挙げ、このユースケースを実現するために、KDDI Accelerate 5.0 に記載している 7 つのテクノロジーに関する要素技術がどのように寄与するのかを述べた。更に、7 つのテクノロジーを構成するそれぞれのテクノロジーごとに、B5G/6G における役割や目指す姿、世の中の状況、更に、2030 年に向けて必要な技術を紹介した。

「ライフデリバリー」の例をとってもわかるとおり、Society 5.0 を実現するためには、この 7 つのテクノロジーを連携して動作させる必要がある。この連携動作を本ホワイトペーパーではオーケストレーションと呼んでおり、Society 5.0 の実現のカギになると思われる。よって、オーケストレーションについても 7 つのテクノロジーの研究開発と並行して検討を進める。

なお、本ホワイトペーパーでは、KDDI が考える B5G/6G に向けた考えや 2030 年ごろのライフスタイル、更に必要となる要素技術についてまとめたが、これらの内容が必要十分な条件を満たしているとは思っていない。よって、本ホワイトペーパーを読んでいただいた方から、ご意見やご指摘、コメントをいただけると幸いである。我々 KDDI は、社外からのご意見をいただきながら、パートナーの考えやアイデア、技術も積極的に取り入れ、Society 5.0 の早期実現に貢献する所存である。そして、パートナーにも協力を仰ぎながら、検討や研究開発を進め、このホワイトペーパーを改版していく予定である。

参考文献

1章

- [1-1] 経済産業省 “デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX 推進ガイドライン) Ver.1.0(平成 30 年 12 月)”,
<https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>,
2018 年 12 月 12 日.
- [1-2] “KDDI Accelerate 5.0”, KDDI 総合研究所,
http://www.kddi-research.jp/kddi_accelerate5_0/

2章

- [2-1] “2030 年を見据えた新たなライフスタイルを提案する研究拠点「KDDI research atelier」を 2020 年 12 月 17 日に開設～国内外のパートナーとともに「KDDI Accelerate 5.0」を推進～”, KDDI/KDDI 総合研究所,
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/121701.html>,
2020 年 12 月 17 日.
- [2-2] 国際連合広報センター,
https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/31737/

3章

- [3-1] 内閣府 “Society5.0”, https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/ .
- [3-2] 内閣府 “第 6 期科学技術・イノベーション基本計画”,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index6.html>.
- [3-3] 総務省 “Beyond 5G 推進戦略懇談会 提言”,
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696612.pdf , 2020 年 6 月 30 日.
- [3-4] 総務省 “Beyond 5G 推進戦略 -6G へのロードマップ-”,
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf , 2020 年 6 月 30 日.
- [3-5] 総務省 “「Beyond 5G 推進コンソーシアム」の設立及び設立総会の開催並びに「Beyond 5G 新経営戦略センター」の設立”,
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000484.html,
2020 年 12 月 11 日.
- [3-6] “KDDI Accelerate 5.0”, KDDI 総合研究所,
http://www.kddi-research.jp/kddi_accelerate5_0/ (再掲)
- [3-7] 例えば, “JR 東日本と KDDI、品川開発プロジェクトをコアとした新たな分散型まちづくりの共同事業化に向けて基本合意”, KDDI,
<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2020/12/15/4865.html>,
2020 年 12 月 15 日 など.

4章

- [4-1] 総務省 “2020 年の 5G 実現に向けた取組”,
https://www.soumu.go.jp/main_content/000593247.pdf, 2018 年 12 月 18 日.

5章

- [5-1] R. Li (Chairman of ITU-T SG15 FG-NET2030), “Towards a New Internet for the Year 2030 and Beyond,” Third Annual ITU IMT-2020/5G Workshop and Demo day, Jul 2018.
- [5-2] 総務省 “Beyond 5G 推進戦略懇談会提言 -6G へのロードマップ-”,
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html ,
2020 年 6 月 30 日 (再掲).
- [5-3] ITU-T Focus Group on Technologies for Network 2030,
<https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx>
- [5-4] ITU-T FG-NET-2030, “Network 2030 A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond”,
<https://www.itu.int/en/ITU->

- T/focusgroups/net2030/Documents/White_Paper.pdf
- [5-5] ITU Focus Group on Autonomous Networks (FG-AN),
<https://www.tmforum.org/resources/standard/autonomous-networks-empowering-digital-transformation-telecoms-industry/#>
 - [5-6] Japan Cabinet, "Society 5.0",
https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html
 - [5-7] 総務省 "Beyond 5G 推進戦略 - 6G へのロードマップ,"
https://www.soumu.go.jp/main_content/000696613.pdf,
2020 年 6 月 30 日 (再掲).
 - [5-8] "ペタビット級光伝送を支える光デバイス技術," O plus E, vol.41, No.5, 2019 年 9 月.
 - [5-9] 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する特別研究専門委員会(EXAT 研究会),
<https://www.ieice.org/~exat/?FrontPage>
 - [5-10] "世界記録を大幅に更新! 光ファイバー1 芯で毎秒 10 ペタビットの伝送実験に成功~伝送速度も「京」の時代に! ポスト 5G 時代のモバイル通信を支える技術に寄与~, " KDDI 総合研究所,
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2017/092201.html>,
2017 年 9 月 22 日.
 - [5-11] "TR-1077-空間分割多重(SDM)技術に関する技術レポート", (一社)情報通信技術委員会 (TTC),
https://www.ttc.or.jp/document_db/information/view_express_entity/1238
 - [5-12] NICT 課題 203「マルチコアファイバの実用化加速に向けた研究開発」,
https://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_20301.html
 - [5-13] "長距離光ファイバ伝送における世界最大容量の達成~世界初となる大洋横断級マルチコア光伝送実験に成功~, " KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2012/092001.html>, 2012 年 9 月 20 日.
 - [5-14] "世界最大容量の大洋横断級光ファイバ伝送実験に成功~毎秒1エクサ(百京、10 の 18 乗)ビット×キロメートルの容量距離積で世界記録達成~, " KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2013/092501.html>, 2013 年 9 月 25 日.
 - [5-15] "光ファイバーで毎秒 2 ペタビット(Pbps)の超大容量データ伝送に成功 ~従来の世界最大容量の約 2 倍を実現! ~," KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2015/100101.html>, 2015 年 10 月 1 日.
 - [5-16] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 16)," 3GPP TS23.501, v16.7.0 (2020-12).
 - [5-17] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Procedures for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 16)," 3GPP TS23.502, v16.7.0 (2020-12).
 - [5-18] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control framework for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 16)," 3GPP TS23.503, v16.7.0 (2020-12).
 - [5-19] A. G. Forte, W. Wang, L. Veltri and G. Ferrari, "A Next-Generation Core Network Architecture for Mobile Networks," Future Internet, Vol. 11, No. 7, Jul 2019.
 - [5-20] R. J. Cho and Z. J. Van., "A Scalable, Programmable and Evolvable Mobile Core Control Plane Platform," Proc. MobiCom, Oct. 2018
 - [5-21] A. Mohammadkhan, KK Ramakrishnan, and V. A. Jain, "CleanG - Improving the Architecture and Protocols for Future Cellular Networks With NFV," IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol.: 28, Issue: 6, Dec. 2020.
 - [5-22] M. Ahmad, S. U. Jafri, A. Ikram, W. N-A Qasmi, M. A. Nawazish, Z. A. Uzmi, Z. A. Qazi, "A Low Latency and Consistent Cellular Control Plane," Proc. SIGCOMM 2020, Aug. 2020.
 - [5-23] H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson, and T.L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.16, no.3, pp.1834-1850, March 2017.
 - [5-24] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.19, no.1, pp.77-90, Jan. 2020.
 - [5-25] T. Choi et al., "Co-located vs distributed vs semi-distributed MIMO:

- measurement-based evaluation,” Proc. of Asilomar Conf. Signals Syst. Comput., Nov. 2020.
- [5-26] M. Ito et al., “On Spectral and Energy Efficiency of Semi-Distributed Cell-Free Massive MIMO,” 2021 IEICE general conference, B-5-19, 2021.
 - [5-27] T. Murakami et al., “Research Project to Realize Various High-reliability Communications in Advanced 5G Network,” 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2020, pp. 1-8.
 - [5-28] “世界初、5G 本格展開時代に向けた 28GHz/39GHz 帯デュアルバンド透明メタサーフェス反射板の開発に成功,” KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/012001.html>, 2021 年 1 月 20 日.
 - [5-29] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You and R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial,” IEEE Trans. on Communications, doi: 10.1109/TCOMM.2021.3051897.
 - [5-30] T. Kawanishi, K. Inaga, A. Kanno, N. Yamamoto, T. Aiba, H. Yasuda, T. Wakabayashi, “Terahertz and Photonics Seamless Short-Distance Links for Future Mobile Networks,” Earth and Space Science Open Archive, doi: 10.1002/essoar.10503612.1.
 - [5-31] KDDI の SDGs: <https://www.kddi.com/corporate/csr/sdgs/>
 - [5-32] “世界最小級に伝送損失を低減した低クロストークマルチコアファイバを開発,” KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/113001.html>, 2020 年 11 月 30 日.
 - [5-33] Shohei Beppu, et al., “Real-Time Strongly-Coupled 4-Core Fiber Transmission,” Proc. Optical Fiber Communication (OFC) 2020, Th3H.2, San Diego, CA, USA, March 2020.
 - [5-34] Yuta Wakayama, et al., “Pure-Silica Single-Core to Multi-Core Fiber Coupler with Side-Polishing Approach,” Proc. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) 2020, T3-3, Taipei, Taiwan, Oct. 2020.
 - [5-35] CPRI Specification V7.0 (2015-10-09), http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf
 - [5-36] eCPRI Specification V2.0 (2019-05-10), http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_2.0_2019_05_10c.pdf
 - [5-37] 3GPP TR 38.801 V14.0.0 (2017-03), https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.801/38801-e00.zip
 - [5-38] “世界最高容量モバイル無線信号の光ファイバー伝送実験に成功,” KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2017/101901.html>, 2017 年 10 月 19 日.
 - [5-39] “世界初 大容量化・エリア構築性に優れたモバイルネットワーク向け光ファイバ無線の伝送実験に成功,” KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/120701.html>, 2020 年 12 月 7 日.
 - [5-40] F. Ferrari, M. Zimmerling, L. Thiele, O. Saukh, “Efficient network flooding and time synchronization with Glossy,” Proc. 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 73-84.
 - [5-41] J. Lewis and M. Fowler, “Microservices,” <http://martinfowler.com/articles/microservices.html>, 2014.
 - [5-42] John L. Hennessy and David Andrew Patterson, “A new golden age for computer architecture,” Vol. 62, No. 2, Communications of the ACM, Jan. 2019.

6章

- [6-1] 6G Flagship, “Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence,” University of Oulu, <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>, Sept. 2019.
- [6-2] P.W. Shor, “Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring,” Proc. 35th Annual IEEE Symp. on Foundations of Computer Science, pp.124-

- 134, Santa Fe, NM, USA, Nov. 1990.
- [6-3] Security Aspects of Network Capabilities Exposure in 5G, NGMN: next generation mobile networks, 2018.
 - [6-4] Deloitte, Smarter Cyber, How AI can help manage cyber risk, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/risk/ca-en-smart-cyber-pov-aoda.pdf>
 - [6-5] National Institute of Standards and Technology, "Post-Quantum Cryptography Standardization," <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>, 2016.
 - [6-6] ITU-T, X.1363: Technical framework of personally identifiable information handling in Internet of things environment, 2020.
 - [6-7] WarpDrive Project, <https://warppdrive-project.jp/>
 - [6-8] N. Aragon, J. Lavauzelle, and M. Lequesne, "decodingchallenge.org: Syndrome Decoding in the Goppa-McEliece Setting," Inria, <https://decodingchallenge.org/goppa>, 2019.

7章

- [7-1] 総務省 “情報通信白書令和二年版”.
- [7-2] “IoT 活用事例,” KDDI, <https://iot.kddi.com/cases>
- [7-3] Report Ocean, "Global Automotive IoT Market 2020-2027 by Offering, Communication Type (In Vehicle, V2V, V2I), Connecting Form (Embedded, Tethered, Integrated), Application, Distribution (OEM, Aftermarket), and Region: Trend Outlook and Growth Opportunity".
- [7-4] Liu, R., Wang, J., and Zhang, B., "High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis," Journal of Navigation, vol.73, no.2, Aug. 2019.
- [7-5] Y. Li and J. Ibanez-Guzman, "Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems," IEEE Signal Processing Magazine, vol.37, no.4, July 2020.
- [7-6] AECC, <https://aecc.org/>
- [7-7] 5GAA, <https://5gaa.org/>
- [7-8] "3GPP, TR21.905 Vocabulary for 3GPP Specifications V15.0.0.", 2018 年 12 月.
- [7-9] Miyasaka, T., Hei, Y., and Kitahara, T., "NetworkAPI: An In-band Signalling Application-aware Traffic Engineering using SRv6 and IP anycast," ACM NAI'20, Aug. 2020.
- [7-10] Suzuki, M. et al., "Enhanced DNS Support towards Distributed MEC Environment," ETSI ISG MEC Whitepaper, Sep. 2020.
- [7-11] Morisawa, Y., Suzuki, M., and Kitahara, T., "Resource Efficient Stream Processing Platform with Latency-Aware Scheduling Algorithms," USENIX HotCloud'20, Jul. 2020.
- [7-12] Morisawa, Y., Suzuki, M., and Kitahara, T., "Flexible Executor Allocation without Latency Increase for Stream Processing in Apache Spark," IEEE Workshop on Real-time & Stream Analytics in Big Data, Dec. 2020.

8章

- [8-1] "Smart Nation Singapore", <https://www.smartnation.gov.sg/>
- [8-2] "Smart Dubai 2021", <https://2021.smartdubai.ae/>
- [8-3] 内閣府 国家戦略特区 HP, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/supercity/openlabo/supercitykaisetsu.html>

9章

- [9-1] 人工知能研究戦略部, "日本が取り組むべき今後の AI 基盤技術の方向", 産業技術総合研究所, 2018 年 5 月.
- [9-2] 統合イノベーション戦略推進会議決定, "AI 戦略 2019", 2019 年 6 月 11 日, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ai_senryaku/pdf/aistrategy2019.pdf

- [9-3] Workshop on Continual Learning at ICML 2020,
<https://icml.cc/virtual/2020/workshop/5743>
- [9-4] IJCAI 2021 Session on Transfer, Adaptation, Multi-task Learning,
https://static.ijcai.org/ijcai-pricai-2020-schedule/technical_sessions/#machine-learning-transfer-adaptation-multi-task-learning
- [9-5] Hovland, C. L., Janis, I. L., and Kelley, H. H., "Communication and persuasion: Psychological studies of opinion change," Yale University Press, 1953.
- [9-6] Fogg, B. J., "Persuasive computers: perspectives and research directions," Proc. CHI 1998, ACM Press, 225-232, 1998.
- [9-7] Oinas-Kukkonen H. & Harjumaa M., "Persuasive Systems Design: Key Issues, Process Model, and System Features," Commun. Association for Information, Systems, Vol. 24, Article 28, pp. 485-500, March 2009.
- [9-8] Paraschivoiu I., Meschtscherjakov A., Gärtner M., Sypniewski J., "Persuading the Driver: A Framework for Persuasive Interface Design in the Automotive Domain," In 14th International Conference on Persuasive Technology (PERSUASIVE 2019), pp. 128-140, Springer, Cham, 2019.
- [9-9] AAAI 2021 workshop AI for Behavior Change,
<https://ai4bc.github.io/ai4bc21/>
- [9-10] Persuasive 2021, <https://persuasive2021.bournemouth.ac.uk/>
- [9-11] “人の流れを予測し可視化する「人口動態分析/予測」技術を開発”, KDDI 総合研究所,
<https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2018/042401.html>,
2018 年 4 月 24 日.
- [9-12] “海外最先端の研究者との共同研究プロジェクトの開始～次世代社会構想 KDDI Accelerate 5.0 の実現に向けて～”, KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/102601.html>, 2020 年10月 26 日.
- [9-13] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, Deep residual learning for image recognition, In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp.770-778, 2016.
- [9-14] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, arXiv preprint arXiv:1810.04805.
- [9-15] M. Yamada, T. Suzuki, T. Kanamori, H. Hachiya, and M. Sugiyama, Relative density-ratio estimation for robust distribution comparison. Neural computation, 25(5), pp.1324-1370, 2013.
- [9-16] Y. Ganin, E. Ustinova, H. Ajakan, P. Germain, H. Larochelle, F. Laviolette, M. Marchand, and V. Lempitsky, Domain-adversarial training of neural networks, The journal of machine learning research, 17(1), pp. 2096-2030, 2016.
- [9-17] O. Day, and T. M. Khoshgoftaar, A survey on heterogeneous transfer learning, Journal of Big Data, 4(1), 2017.
- [9-18] 黒川茂利, 米川慧, “不均質なドメイン間の転移学習に関する研究動向,” 信学誌, 2019 年 3 月
- [9-19] JST CREST「イノベーション創発に資する人工知能基盤技術の創出と統合化」平成 30 年度採択課題,
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/1111094/1111094_2018.html
- [9-20] K. Yonekawa, H. Niu, M. Kurokawa, A. Kobayashi, D. Amagata, T. Maekawa, and T. Hara, Advertiser-Assisted Behavioral Ad-Targeting via Denoised Distribution Induction, In 2019 IEEE International Conference on Big Data (Workshop on Big Data Transfer Learning), pp.5611-5619, 2019.
- [9-21] T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, and J. Dean, Efficient estimation of word representations in vector space, arXiv preprint arXiv:1301.3781.
- [9-22] H. Niu, K. Yonekawa, M. Kurokawa, C. Ono, D. Amagata, T. Maekawa, T. Hara, Exploiting Cross-Domain Sequence Data for Cross-Domain Recommendation, 第 12 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム(DEIM フォーラム 2020), 2020.
- [9-23] T. Baltrušaitis, C. Ahuja, and L. Morency, “Multimodal machine learning: A survey and taxonomy,” IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 41, 2, 423-443, 2019.

- [9-24] B. P. Yuhas, M. H. Goldstein, and T. J. Sejnowski, "Integration of Acoustic and Visual Speech Signals Using Neural Networks," IEEE Communications Magazine, 1989.
- [9-25] M. Soleymani, M. Pantic, and T. Pun, "Multimodal emotion recognition in response to videos," TAC, 2012.
- [9-26] G. Habault, Y. Nishimura, K. Yoshihara, and C. Ono, "Detecting errors in short-term electricity demand forecast using people dynamics," IoTDA, 2019
- [9-27] G. Habault, S. Wada, R. Kimura, and C. Ono, "Elucidating the Extent by Which Population Staying Patterns Help Improve Electricity Load Demand Predictions," IoTDA, 2020.
- [9-28] Xin, Doris, Litian Ma, Jialin Liu, Stephen Macke, Shuchen Song and Aditya G. Parameswaran. "Accelerating Human-in-the-loop Machine Learning: Challenges and Opportunities." ArXiv abs/1804.05892 , 2018.
- [9-29] Settles, Burr. "Active learning literature survey." University of Wisconsin, Madison 52.55-66, 2010.
- [9-30] Ahmed Hussein, Mohamed Medhat Gaber, Eyad Elyan, Chrisina Jayne. "Imitation Learning: A Survey of Learning Methods.," ACM Computing Surveys Article No.: 21 <https://doi.org/10.1145/3054912> , Apr. 2017.
- [9-31] Adadi, A., & Berrada, M. "Peeking inside the black-box: A survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)", IEEE Access, 6, 52138-52160. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8466590>, 2018.
- [9-32] R. M. French, Catastrophic forgetting in connectionist networks, Trends in cognitive sciences, 3(4), pp.128-135, 1999.
- [9-33] D. Lopez-Paz, and M. A. Ranzato, "Gradient episodic memory for continual learning", Proc. 31st International Conf. Neural Information Processing Systems, pp. 6470-6479, 2017.
- [9-34] J. Kirkpatrick, et al., Overcoming catastrophic forgetting in neural networks. Proceedings of the national academy of sciences, 114(13), pp.3521-3526, 2017.
- [9-35] J. Serra, D. Suris, M. Miron, and A. Karatzoglou, Overcoming catastrophic forgetting with hard attention to the task, In International Conference on Machine Learning, pp. 4548-4557, 2018.
- [9-36] Z. Chen and B. Liu, "Lifelong Machine Learning (second edition), Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning," Morgan & Claypool Publishers, 2018.
- [9-37] Goldberg LR, "An Alternative Description of Personality": The Big-Five Factor Structure. Journal of personality and social psychology 59(6):1216, 1990.
- [9-38] Schwartz SH, "A proposal for measuring value orientations across nations," Questionnaire Package of the European Social Survey 259(290):261, 2003.
- [9-39] 小林亮博, 石川雄一, 黒柳茂, 南川敦宣, "Web 閲覧履歴を用いたパーソナリティの推定と広告配信への活用", 信学論 A, 104(2), 27-39, 2021.
- [9-40] Ishikawa, Y., Kobayashi, A., Minamikawa, A., & Ono, C., "Predicting a Driver's Personality from Daily Driving Behavior," Proc International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design (pp. 203-209), June 2019.
- [9-41] Kobayashi, A., Ishikawa, Y., & Minamikawa, A. "A Study on Effect of Big Five Personality Traits on Ad Targeting and Creative Design," In International Conference on Persuasive Technology (pp. 257-269). Springer, Cham, Apr. 2019.
- [9-42] Ishikawa, Y., Kobayashi, A., & Minamikawa, A. "Predicting Advertising Appeal from Receiver's Psychological Traits and Ad Design Features", In Adjunct Publication of the 27th Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization (pp. 45-49), Jun. 2019.
- [9-43] Ishikawa, Y., Kobayashi, A. & Kamisaka, D., "Modelling and predicting an individual's perception of advertising appeal", User Model User-Adapted Interaction, <https://doi.org/10.1007/s11257-020-09287-z>, 2021.

- [9-44] 栗木優一, 徐文臻, 多屋優人, 小林直, 南川敦宣, 歩きスマホ抑制に向けた介入コンテンツの検討, 2021 信学総大, 2021.
- [9-45] Xu W., Kuriki Y., Sato T., Taya M., Ono C., "Does Traffic Information Provided by Smartphones Increase Detour Behavior?" In 15th International Conference on Persuasive Technology (PERSUASIVE 2020), pp.45-57, Springer, Cham, 2020.
- [9-46] 永田雅俊, 小西達也, 本庄勝, 米山暁夫, 黒川雅幸, 三島浩路, "ウォーキングイベントを使った職場における歩行活動の推進," デジタルプラクティス, Vol.10, No.4, pp.803-815, 2019.
- [9-47] Amina Adadi, Mohammed Berrada. "Peeking inside the black-box: A survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)". DOI:10.1109/ACCESS.2018.2870052.
- [9-48] P. W. Koh, and P. Liang, "Understanding black-box predictions via influence functions", In International Conference on Machine Learning, pp.1885-1894, 2017.

10 章

- [10-1] 亀岡嵩幸, 佐瀬一弥, 吉元俊輔, 蜂須拓, 嵯峨智, 黒田嘉宏, 矢内智大, 石丸翔也, 川口碧, 清川清, ヤムヴィボル, 白井暁彦, "学会オンライン化・VR 開催の幕開け," 日本バーチャルリアリティ学会誌, 2020, 25 巻, 2 号, p. 35-43, 2020.
- [10-2] Matt Zalaznick, "How about using a digital avatar on a virtual campus?," University Business, <https://universitybusiness.com/digital-avatar-virtual-college-campus-virbela-edtech/>, 2020 年8月6日.
- [10-3] "仮想空間オフィス、コロナ禍で売上高 7 倍 米 EXP 社", 日本経済新聞, <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO60130810Z00C20A6I00000/>, 2020 年 6 月 9 日.
- [10-4] "渋谷区公認、配信プラットフォーム「バーチャル渋谷」を 5 月 19 日からオープン", KDDI, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2020/05/15/4437.html>, 2020 年 5 月 15 日.
- [10-5] "渋谷が「エンタメ×5G」で進化 KDDI、渋谷区観光協会、渋谷未来デザインが「渋谷エンタメテック推進プロジェクト」始動", KDDI ほか, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2019/08/28/3979.html>, 2019 年 8 月 28 日.
- [10-6] "超高臨場感通信技術「Kirari!」の研究開発が進展～中継先の擬似 3D 表示における奥行き知覚手法を開発～", NTT, <https://www.ntt.co.jp/news2018/1811/181126d.html>, 2018 年 11 月 26 日.
- [10-7] T. Yoneyama, E. Murakami, Y. Oguro, H. Kubo, K. Yamaguchi, and Y. Sakamoto, "Holographic head-mounted display with correct accommodation and vergence stimuli," Opt. Eng. 57(6), 061619, 2018.
- [10-8] 堀内俊治, "視聴者ごとの見たい・聴きたいを実現する音メディア技術", 信学誌, Vo1.104, No.1, pp.22-26, 2021 年 1 月.
- [10-9] Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast for 2016 – 2021
- [10-10] Cisco Mobile VNI Forecast for 2017 to 2022
- [10-11] JVET-S2001, "Versatile Video Coding (Draft 10)".
- [10-12] "世界初 最新の映像符号化方式 H.266|VVC 対応のリアルタイムコーデックを用いた 4K ライブ伝送の実証実験に成功", KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/122301.html>, 2020 年 12 月 23 日.
- [10-13] "フォトリアルな 3D アバターの AR 配信技術を開発～スマートフォン向けバーチャルヒューマンを従来比 1/3 の伝送レートで実現～", KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/021801.html>, 2021 年 2 月 18 日.
- [10-14] "5G や XR で新たな体験を創造、クリエイティブチーム「au VISION STUDIO」を発足", KDDI, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/03/10/5006.html>, 2021 年 3 月 10 日.
- [10-15] "「オンラインでも乾杯の感触を」触覚技術で遠くにいる人との気持ちがつながります コミュニケーションシステム「Sync Glass」を開発", KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2021/031501.html>, 2021 年 3 月 15 日.

- [10-16] MPEG-3DG: "MPEG Point Cloud Compression", <http://www.mpegpcc.org/>
[10-17] “遠隔操作ロボット用映像伝送技術で 50 ミリ秒の超低遅延映像伝送を実現！ ～視覚と操作のずれを感じることなく遠隔操作が可能に～”, KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/070901.html>, 2020 年 7 月 9 日.

11 章

- [11-1] 日本経済再生本部 “ロボット新戦略ービジョン・戦略・アクションプランー”, https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/robot_honbun_150210.pdf, 2015 年 2 月 10 日.
[11-2] “ロボットを取り巻く環境変化と今後の施策の方向性～ロボットによる社会変革推進計画～”, 経済産業省ロボットによる社会変革推進会議, https://www.meti.go.jp/shingikai/mono.info_service/robot_shakaihenkaku/pdf/20190724_report_01.pdf, 2019 年 7 月 24 日.
[11-3] “LG Electronics’ Promise of AI for an Even Better Life Delivered at CES 2019 Keynote”, LG electronics, https://www.lg.com/ca_en/about-lg/press-and-media/LG-Electronics-Promise-of-AI-for-an-Even-Better-Life-Delivered-at-CES-2019-Keynote, 2019.
[11-4] “TIS、ロボットによる人の業務代行・分担を実現する「サービスロボットインテグレーション事業」を提供～ 複数のロボットを統合管理するプラットフォーム「RoboticBase」で、人手不足の解消と業務生産性の向上などの社会課題を解決 ～”, TIS, https://www.tis.co.jp/news/2018/tis_news/20181016_1.html, 2018 年 10 月 16 日.
[11-5] J. Xu, et al., “Fast and Accurate Whole-Body Pose Estimation in the Wild and Its Applications,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, Volume 9, Issue 1, pp. 63-70, 2021.
[11-6] “日本初、モバイル回線に接続したスマートフォンで遠隔制御可能な水上ドローンの開発”, KDDI 総合研究所・大阪府大, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/111901.html>, 2020 年 11 月 19 日.
[11-7] “世界初、青色 LED 光無線通信技術を用いた海中のスマートフォンとの通信実験に成功”, KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2019/100201.html>, 2019 年 10 月 2 日.
[11-8] “遠隔操作ロボット用映像伝送技術で 50 ミリ秒の超低遅延映像伝送を実現！ ～視覚と操作のずれを感じることなく遠隔操作が可能に～”, KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/070901.html>, 2020 年 7 月 9 日 (再掲).
[11-9] “日本初、ドローンレースで高画質な映像配信や 4K リアルタイム中継による 5G プレサービスを提供”, KDDI 株式会社, 株式会社 KDDI 総合研究所, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2019/10/15/4077.html>, 2019 年 10 月 15 日.

12 章

- [12-1] 三宅優, “通信分野におけるセキュリティ標準化”, 総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 技術戦略委員会 標準化戦略 WG(第 6 回)資料 6-2, https://www.soumu.go.jp/main_content/000690766.pdf, 2020 年 3 月 31 日.
[12-2] “海外最先端の研究者との共同研究プロジェクトの開始～次世代社会構想 KDDI Accelerate 5.0 の実現に向けて～”, KDDI 総合研究所, <https://www.kddi-research.jp/newsrelease/2020/102601.html>, 2020 年 10 月 26 日 (再掲).

(注)URL などの引用は本ホワイトペーパー公開時のものである。

改版履歴

日付	Ver.	更新内容
2021/03/24	1.0	初版公開
2021/06/02	1.0.1	誤記修正

