

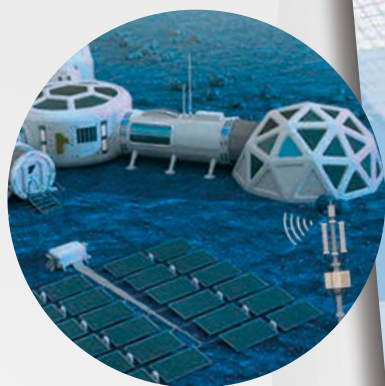
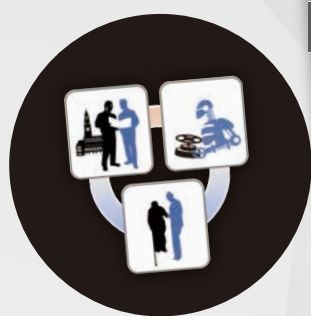
FEATURE

B5G/6Gホワイトペーパー特集

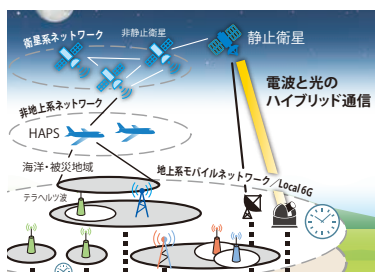
Interview

「Beyond 5Gの社会」を見据え布石を打つ

Beyond 5G / 6G White Paper



FEATURE

Beyond 5G / 6G
ホワイトペーパー特集

表紙写真：本特集で紹介するBeyond 5G / 6G ホワイトペーパー

NICTが2021年3月に公開したBeyond 5G / 6Gのホワイトペーパーです。これは、NICTの有志が研究分野や職種を超えて議論し、取りまとめたものです。このホワイトペーパーでは、2035年ごろの未来社会をイメージして物語形式で示しつつ、そこからバックキャストさせることにより今後研究開発が必要な技術課題を洗い出しています。左に示した3つのイラストは、未来社会のシナリオである「Cybernetic Avatar Society」「月面都市」「時空を超えて」を示したものです。

左上写真：Beyond 5G / 6Gにおけるフィジカル空間

Beyond 5G / 6Gはフィジカル空間とサイバー空間が有機的に融合して、それらを的確に制御・利用することにより、様々な制約から解放して社会課題を解決できる新たなアプリケーションの創造を可能にします。フィジカル空間では、テラヘルツ波通信、非地上系／衛星モバイルシステム、光ネットワーク、高精度な時空間同期、インフラシェアリング制御を始めとする高度な技術が組み合わせられ、モバイル通信の性能だけでなく、その範囲、柔軟性、機動性などが大きく向上します。

Interview

1 「Beyond 5G の社会」を見据え布石を打つ
竇迫 巖／石津 健太郎4 Beyond 5G の考え方とそれを実現するオープンなシステム構成
フィジカル空間とサイバー空間が一体となる世界観とは？
石津 健太郎6 Beyond 5G / 6G 時代のサイバネティック・アバター社会の実現に向けて
空間・時間・身体の制約を超えたコミュニケーションへの挑戦
安藤 広志8 超高速ネットワークとエッジデバイスの時空間管理
時間と空間の壁に挑む
原 基揚10 Beyond 5G における超拡張性を目指すワイヤレスネットワーク技術の将来展望
豊嶋 守生

TOPICS

12 Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー作成の裏話
石津 健太郎13 NICTのチャレンジャー File 18 松園 和久
情報指向ネットワーク技術を応用して未来のネットワークを実現

INFORMATION

14 けいはんな R&D フェア2021 オンライン開催のお知らせ
14 Quantum Innovation 2021 オンライン開催のお知らせ

FEATURE

Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー特集
White Paper on Beyond 5G and 6G

Interview

「Beyond 5G の社会」を見据え布石を打つ

竇迫 巖 (ほうさこ いわお)

Beyond5G 研究開発推進ユニット長／
テラヘルツ研究センター長

1996年郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。
テラヘルツ技術の研究開発としてデバイス、カメラ、無線通信、標準化に従事。博士(理学)。

石津 健太郎 (いしづけんたろう)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
Beyond5G デザインイニシアティブ イニシアティブ長

大学院博士後期課程修了後、2005年に情報通信研究機構入所。コグニティブ無線、ホワイトスペース通信、ローカル5G等の自営無線システム等の研究開発に従事。国際規格の標準化活動や国際的な実証試験に取り組む。現在は、Beyond 5G 研究開発の戦略立案や情報発信を主導。電子情報通信学会スマート無線研究専門委員会 副委員長。博士(情報科学)。

■ Beyond5G 研究開発推進ユニットの組織と役割

——この4月、第5期中長期計画のスタートとともに発足した、Beyond5G 研究開発推進ユニットについて、その役割や設立の経緯について教えてください。

竇迫 NICTの第5期中長期計画では、戦略的に進めるべき研究4領域(戦略4領域)として「AI」「Beyond 5G」「量子情報通信」「サイバーセキュリティ」を掲げています。このうちのひとつである

Beyond 5Gについて、NICT全体が行う研究の司令塔として新設された組織が、Beyond 5G 研究開発推進ユニットです。

他の戦略4領域は、AIにしろ量子情報通信にしろ、個別の組織がおおよそ一対一で対応できるのですが、Beyond 5Gは関わる技術領域が非常に広く、NICT全体で対応していく必要があります。そこで、いわば領域ごとの各組織に横串を通す形で、全体をうまく取りまとめているというのが、我々に期待されている役割と言えます。

設立に至る具体的な動きとしては、も

ともとはNICTとして、Beyond 5Gの研究開発の推進を図ることを目的として、それによって実現する社会の姿やユースケース、そこで必要な要素技術や研究開発のロードマップについて、有志が集まり議論が行われてきました。この議論は、結果的にはホワイトペーパーとしてまとめられ、2021年3月に「Beyond 5G / 6G White Paper (1.0版)」として公開されています。

そしてこの議論と同じ時期、NICTの第5期中長期計画の策定も進められており、組織としての設立もそこで並行して

Interview 「Beyond 5Gの社会」を見据え布石を打つ

構想されたという形になるかと思います。

——Beyond5G研究開発推進ユニットの組織としての構成は、どのようになっているのでしょうか。

竇迫 Beyond5G研究開発推進ユニットの下には総合企画室と、大きな組織としてテラヘルツ研究センターがあります。テラヘルツ研究センターがBeyond5G研究開発推進ユニット下に置かれている意味は、将来的な移動体通信の世界においては、非常に高い周波数帯を使う可能性が高いからです。

その一方で、研究センターの外にユニット直下の組織として、先ほど述べた「Beyond 5Gに向けての司令塔」的役割を専門に担うBeyond5Gデザインイニシアティブが置かれています。

これらとは別にプロジェクトというものもあり、現在はそのひとつとして、総務省「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」事業の委託を受け、電波エミュレータの研究開発を行っています。電波エミュレータとは、大規模複雑化する電波システムを仮想空間においてリアルタイムに模擬するものです。特にBeyond 5Gの世界では電波を縦横無尽に使う必要があり、そのためにも、大規模な電波システムの検証は非常に重要で、それが、このプロジェクトが我々のユニット下に置かれている理由です。また、NICTの中の様々な研究所の人が関わる横串的なものであることも、もう一つの理由と言えるかもしれません。

石津 Beyond 5Gを進めていく核としてユニットは設立されましたが、そのなかで、Beyond 5Gに欠かせない要素技術の

研究開発を実際に進めていく部隊としてテラヘルツ研究センターがあり、一方で、機構の中を俯瞰して横軸でつなぎながら、機構が一体として外部とも連携していくための戦略を立案し実行するのがBeyond5Gデザインイニシアティブという位置付けと考えてもらえばと思います。

■多くの人とビジョンを共有するホワイトペーパー

——そうしたなかで、この春に公開された「Beyond 5G / 6G White Paper (1.0版)」が持つ意味について、教えていただけますか。

竇迫 Beyond 5Gには様々なステークホルダーが関わってきますが、そうした方々と様々なディスカッションを進めていくためのマテリアルとして、ホワイトペーパーをうまく活用していくことが重要だと考えています。

NICTの中でも更に議論を進め、内容を随時更新していくことはもちろん、ディスカッションを行う相手は国内に限ったことではありませんから、日本語版に加え、英語版の制作も行っています。

英語版に関しては、日本語版をリリースして約1か月後、4月30日に0.9版を公開しています。「0.9版」となっている意味は、通常、こうした英文のドキュメントは英文校閲を経て出すのですが、これについては、「できるだけ早く出したい」ということもあり、NICTの技術をPRする意味も兼ねて、先進的音声翻訳研究開発推進センターが開発した「TexTra (テキストラ)」という自動翻訳システムを使って制作しているためです。世界各地、様々な機関からホワイトペーパーは

次々に出てきますから、時間を掛けて完璧な英語版を出すよりも、まずは早く出して読んでもらおう、ということですね。

——実際に、ホワイトペーパーの反響はいかがでしょうか。

石津 ダウンロード件数も数千件単位まで伸びていますが、直接多くのご意見もいただいています。

このホワイトペーパーでは、第3章で「Beyond 5G / 6G時代はどんな世界に？」と題して、2035年あたりを想定した未来社会のイメージを描いていますが、特にこの部分は一般の方が読んでも理解しやすいよう、あえて研究要素は除いたストーリー仕立てになっています。これについて、「何を目指しているのかわかりやすい」と褒めていただくことが多いですね。

一般の方はもちろん、研究者であっても、こうした物語のほうイメージしやすいかもしれません。Beyond 5Gというのはモバイル通信に限った話ではなく、新しい世界の基盤になる考え方であって、どんどん新しい分野の人を呼び込まなくてはけません。そういう意味では「通信技術の世界の言葉がわかる人」だけが読めるものでは意味がなく、むしろ全然違う分野の人が読んで興味を覚え、自分たちもそこに加わることで面白いことが起きそうだと思ってもらえるものでなくてはけません。

実際には、当初からそこまで計算したわけではないのですが、結果的には、こうした構成にしたことは成功だったと思っています。

竇迫 実はこれまで、NICTにおいては

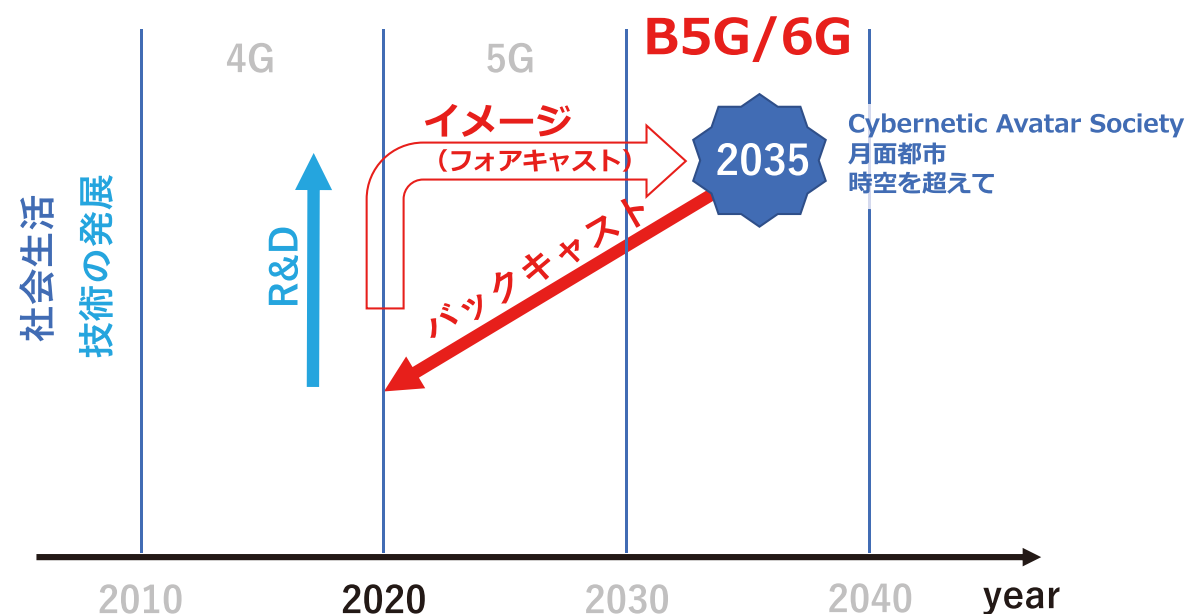


図1 2035年頃の未来像をイメージし、バックキャストしてB5Gの技術課題を洗い出す

個々の研究所がホワイトペーパーを出した例はあるのですが、NICT全体として出したものとしては、このBeyond 5G / 6Gと、同時に出された量子ネットワークに関するものの二つが、おそらく初めてのものです。

そんな最初のチャレンジではありましたが、時期的にもそこそこ早く、内容的にも先述のように特徴があり、ほかにも多々ホワイトペーパーが出てくるなかで、埋没しない形で出せたのはよかったと思っています。広く興味を持ってもらい、国際的な講演などに呼んでいただく機会もあり、スタートとしては上々でした。今後はこれをよりよく活かし、更に議論を進めていくきっかけになればと思っています。

■Beyond 5Gに存在感を示していくために

——今後の活動、展望などについてお聞かせいただければと思います。

竇迫 2030年代後半にはBeyond 5G、なかでも6Gの社会実装が始まっていくのだと思いますが、その中に日本の技術がどう入っていくか、そしてそこに



図2 Beyond5G研究開発推進ユニットのロゴ。異分野のテクノロジーやビジネスなど『様々な側面』からアイデアを出し合い、皆で創り上げた箱の中にはフクワクする未来が詰まっているという、Beyond 5G研究開発の特徴を示している。NICTロゴの青を基調とし、NICTの英知を最大限活用していくという情熱を込めた。

NICTがどれだけ貢献できているか。そこが、我々の活動の成果を測る尺度になると思っています。

もちろん、ホワイトペーパーばかり一所懸命繰り返し出しても仕方なくて(笑)、どうやって現実の動きに関わっていくか考える必要があります。

民間企業の場合は、ちゃんとビジネスとして行っていて、研究成果を自分たちのネットワークに反映していくことができます。一方、我々は国の研究機関なので、アウトプットとしてプロダクトもサービスも作りませんから、その点で成果の反映には難しさがあります。そこで我々の成果を実際の社会に活かしていくことを考えると、やはり標準化というのが大きなポイントとなってきます。

これは今後のタイムスケジュールとしてもわかりやすい例ですが、標準化のス

テップとしては、国際電気通信連合の無線通信部門（ITU-R）のなかで、どういう周波数帯が使えるかといったディスカッションは始まっていて、これには我々も参加しています。2023年にはITU-Rがビジョン勧告というものを出すのですが、ここにどれだけ意見を反映させることができるかが、ひとつの勝負どころになります。

さらにはそのビジョン勧告を受け、世界共通の移动通信システムの標準化団体である3GPPにおいて、実際の携帯電話のシステムとして成立させるために必要な事項が、各組織の合意をとって進められていきます。そうしたなかで、NICTとして考えた概念が実装されていくとよいなと思っています。

——本日はどうもありがとうございました。

Beyond 5G の考え方とそれを実現するオープンなシステム構成

フィジカル空間とサイバー空間が一体となる世界観とは？



石津 健太郎

(いしづけんたろう)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
Beyond5G デザインイニシアティブ
イニシアティブ長

大学院博士後期課程修了後、2005年に情報通信研究機構 入所。コグニティブ無線、ホワイトスペース通信、ローカル5G等の自営無線システム等の研究開発に従事。国際規格の標準化活動や国際的な実証試験に取り組む。現在は、Beyond 5G 研究開発の戦略立案や情報発信を主導。電子情報通信学会スマート無線研究専門委員会 副委員長。博士（情報科学）。

Beyond 5G は、現実世界（フィジカル空間）において情報通信システムの高度化や多様化を行うことに加えて、仮想世界（サイバー空間）における情報の学習や分析が組み合わさることによって、従来の技術では限界と考えられていたことを実現する社会の根幹的なインフラとなるでしょう。それはどのような世界なのか、そしてそれを実現するシステムはどういう構成なのか、一緒に考えてみましょう。

■社会インフラ形態の変化と通信システムの在り方

社会活動を支える様々なインフラやリソースは、集中から分散へ、独占から共用・共有（シェアリング）へと、その利用形態が大きく変化しつつあります。いわゆる共有経済（シェアリングエコノミー）と言われるもので、交通機関におけるカーシェアリング、労働環境におけるコワーキング、金融におけるクラウドファンディングなどがその具体例でしょう。

この流れは通信環境についても例外ではありません。ハードウェアのホワイトボックス化やソフトウェアのオープンソース化、拡張性の高い仮想マシン構築技術の出現により、いわゆるSDN（Software-Defined Networking）やNFV（Network Function Virtualization）の利用が促進され、ネットワーク資源をより細かい単位で共有できることが期待できます。モバイル無線システムについても、3GPPで策定されたアーキテクチャでは機能構成が見直され、複数の運用者による基地局やその制御装置（無線アクセスネットワーク）の共用が容易になりつつ

あります。人工衛星を活用した非地上系ネットワーク（NTN: Non Terrestrial Network）や成層圏を飛行する高高度基盤ステーション（HAPS: High Altitude Platform Station）のように新たな特徴を持つシステムも、物理的には限られたリソースですが、多くの利用者に共用されてEnd-to-Endの通信の一部を担っていくでしょう。周波数についても、場所や時間帯に応じて優先度をつけて他のシステムと融通できるダイナミック周波数共用の制度検討も進んでおり、高度なリソース共用といえます。

このようにインフラやリソースが適切な単位で共用・共有できれば、適材適所で組み合わせることにより、革新的なサービスや異分野技術と連携したサービスの創成が加速します。これを可能にするためには、オープンなアーキテクチャによりシステムが定義されていること、サービス要求に応じて一貫したポリシーで機能組み立てを指示する機能（オーケストレータ）が提供されていること、それを運用できる制度が確立していること、が必要になります。

■サイバー／フィジカル空間の融合とは

Beyond 5G時代には、大量で多様な情報を収集・学習・分析して、社会活動を最適化することが求められます。この情報には、自動車やドローンの位置や速度、街中の人流、気象など、通信環境以外のあらゆる情報が含まれます。そして、これまでモバイル通信では積極的なリソース管理の対象とされてこなかった時間や空間までも一体として扱い、サービスの最適化を行います。一例としてドローンによる配送を挙げますと、上空の混雑状

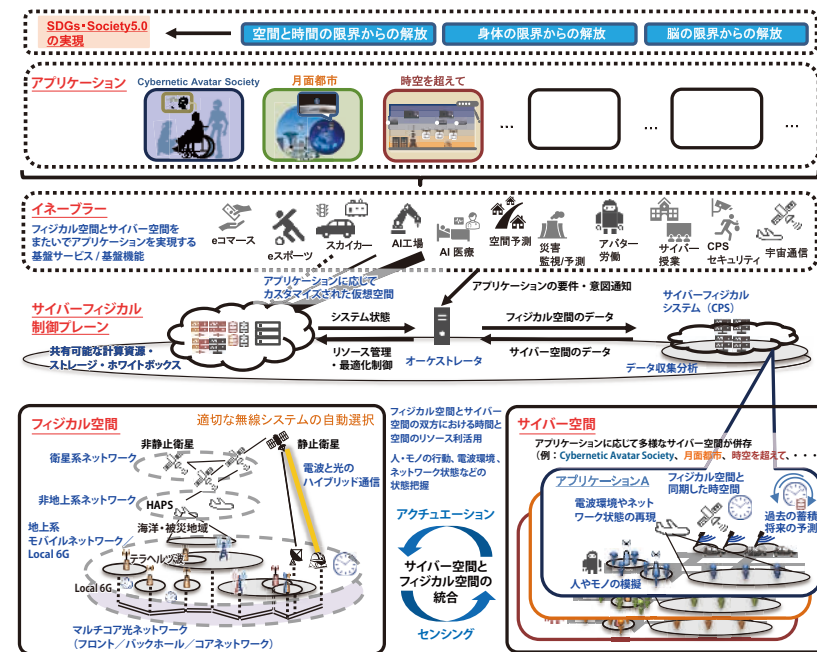


図1 サイバーフィジカルシステム（CPS）を実現するBeyond 5Gのシステム構成

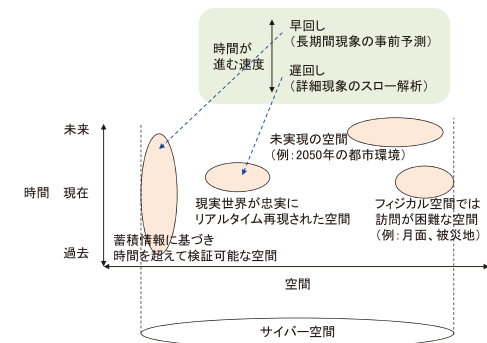


図2 時空を超えて多様な空間を模擬するサイバー空間

況と予測される気象に基づき、飛行の最適なスケジュールと経路を決定してドローンに指示を与える一方で、経路上の通信を安定的に確保するために地上系と衛星系の通信システムをシームレスに切り替える、という一連の制御が考えられます。そのためには、単に簡略化したモデルによるシミュレーションだけではなく、現実世界（フィジカル空間）をコンピュータ上に忠実に模擬した仮想世界（サイバー空間）において、起こり得る事象の分析と検証を行った上で、サイバー空間の情報に基づきフィジカル空間を駆動することが求められます。このようなサイバー空間とフィジカル空間が融合されたシステムをCyber Physical System（CPS）と呼び、Beyond 5Gのシステム構成において重要な概念となっています。

■Beyond 5Gのシステム構成

CPSを実現するBeyond 5Gのシステム構成を図1に示します。フィジカル空間では、従来の携帯電話用基地局だけでなく、ローカル5G、次世代無線LAN、専用通信システムなどの自営無線システムに加え、人工衛星やHAPSのような非地上系無線システムが統合して扱われます。先述のように、次世代光ネットワークやデータセンターがそれらのシステムを支え、お互いのリソースを柔軟に組み合わせることにより、アプリケーションに対してその要求や意図に応じた最適な

通信環境を提供します。周波数は、5Gで現在使用されている28 GHzまでの周波数に加えて、100 GHz以上のテラヘルツ帯の利用技術が開拓され、多様な特徴を持つシステムを使い分けができるようになります。

サイバー空間では、図2に示すように、フィジカル空間から得たセンシング情報に基づき現実世界をリアルタイムかつ忠実に再現した空間や、過去から未来に時間を超えて高速に長期間の予測を行う空間、宇宙のように実際に訪問が困難な空間など、様々なサブ空間をコンピュータ上に模擬的に実現します。サイバー空間では、アバターや仮想現実（VR: Virtual Reality）技術を活用することにより、現実では実現不可能なシナリオの体験や困難な協調作業、コストが高く実証が困難な検証の反復実施などを行い、その結果に基づきフィジカル空間を駆動（アクチュエーション）します。

サイバー空間とフィジカル空間の間のセンシングとアクチュエーションのループを機能させるために、サイバーフィジカル制御プレーンを定義します。これは、両空間にまたがるリソースや情報の制御を一体的に行う機能群です。イネーブラーは、サイバー空間とフィジカル空間をまたいでアプリケーションを実現する機能群であり、ミドルウェアとしてアプリケーションにAPI（Application Programming Interface）を提供する一

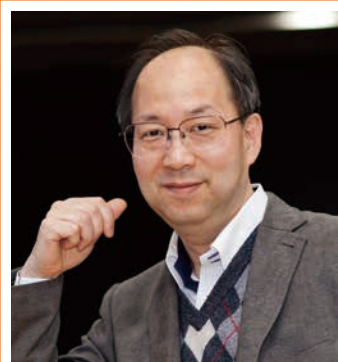
方で、CPSには制御インターフェイスを提供します。イネーブラーの例として、アバターによる国際協調作業のアプリケーションでは、「アバター労働」イネーブラーを利用して、複数の利用者が臨場感のある作業空間を共有するため、AIによる動作予測や音声翻訳の機能をカスタマイズして提供しながら、サイバー空間には作業スペースを構築する、などの制御を行うことになるでしょう。このようにして実現されるBeyond 5Gのアプリケーションは、様々な物理的な制約から解放され、ますます増加する社会課題を解決していくことが期待されます。

■今後の展望

本稿は、2021年3月に公開したBeyond 5G / 6G ホワイトペーパー第1版に記載した内容に基づいて、社会インフラの変化やCPSの意義を紹介しながら、検討を続けているBeyond 5Gのシステム構成について説明しました。Beyond 5Gの実現に向けては、あらゆる分野のアプリケーションの実現につながることを念頭に置きながら、通信サービスを手掛けている企業や研究機関にとどまらず、分野が異なるステークホルダーも含めて共に議論をし、システム構成や利用される要素技術の具体化を図ることが重要です。NICTでは議論を更に本格的に進めていきますので、皆様との今後の議論を楽しみにしています。

Beyond 5G / 6G時代のサイバネティック・アバター社会の実現に向けて

空間・時間・身体の制約を超えたコミュニケーションへの挑戦



安藤 広志

(あんど ひろし)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
先進的リアリティ技術総合研究室
上席研究員

Ph.D. (計算神経科学) を取得後、ATR (国際電気通信基礎技術研究所) に入所、主任研究員・研究室長を経て、2006年よりNICTの超臨場感プロジェクトに参画。多感覚・評価研究室室長、脳機能解析研究室副室長を経て現職。認知脳科学、計算神経科学、多感覚情報処理、超臨場感技術の研究に従事。

次 世代の情報通信技術Beyond 5G / 6Gの活用によりサイバネティック・アバター社会の実現が期待されています。このような社会では、人々は自分自身のアバターを高度に利用して、空間・時間・身体の制約を超えた多様な活動が可能になると考えられます。本稿では、サイバネティック・アバター社会が生み出す新たな生活スタイルや社会的価値とともに、その実現に必要な技術の研究開発や今後の取組について紹介します。

■サイバネティック・アバター社会とは何か

サイバネティック・アバターは、自在に制御できる自分自身のリアルな3D映像や分身ロボットを意味しています。次世代のBeyond 5G / 6Gネットワークが普及すれば、このようなアバターを高度に活用することで、自分自身をまさにど

こにでも「瞬間移動」させて、遠隔からでも実空間と同等の活動が可能になると期待されています。すなわち、サイバネティック・アバター社会とは、人々が空間・時間・身体の制約を超えて多様なつながりを作り出し、一人ひとりの活動領域が飛躍的に広がる未来の社会と断言してよいでしょう。

NICTが発表したBeyond 5G / 6Gホワイトペーパーでは、このような技術の普及が想定される2035年の人々の生活スタイルを具体的にイメージするために、とある企業の技術開発課長の一日を日記風に描いています(図1)。彼はアバターを活用して、一日のなかで、感触を含む五感の遠隔会議、海外のロボットの遠隔作業、高齢の親の遠隔介助、複数アバターの同時活用、XRの遠隔登山、海外とのビジネス交渉などを次々と行っていきます。このシナリオでは、アバターを駆使することで、誰もが一人で何役も楽々とこなせるマルチ人間になれる可能性が示されています。

■新たな社会的価値の創出

このようなアバター技術はどのような社会的価値を新たに生み出すのでしょうか。その一つは、レジリエントな社会の実現です。コロナ禍のような感染症拡大が生じると非接触の活動が求められます。また震災などの自然災害が生じると人々の移動に制約が生じます。このような予期できない事態が生じて、平時的な活動と同等の活動がCyber空間を通じて維持できれば、経済的・社会的ダメージを最小限に食い止められる頑健な社会が構築できると考えられます。

もう一つは、労働生産性の飛躍的向上

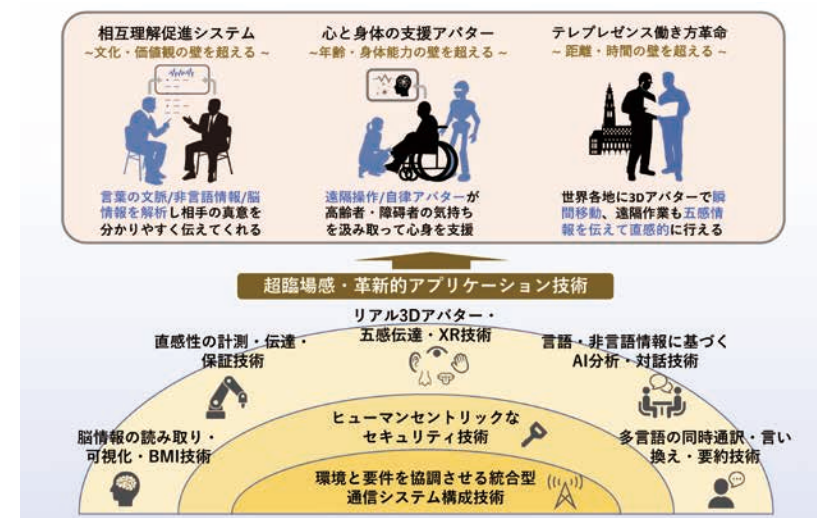


図2 サイバネティック・アバターのユースケースとその実現に必要な要素技術

です。我が国をはじめ多くの先進国では、少子高齢化が急速に進み、労働人口の減少による経済・社会の弱体化という危機に直面しています。しかし、アバターの活用で一人ひとりの労働生産性が向上すれば、たとえ労働人口が減少しても社会全体の維持・発展が見込めます。さらに、親の遠隔介護、子育てや地域活動を行いながらの遠隔就労等、人々のライフワークバランスの充実も期待できます。

■サイバネティック・アバター社会実現のための研究開発

それでは、サイバネティック・アバター社会を実現するためには、どのような技術の研究開発が必要になるのでしょうか。図2は、ユースケースとなるシステムとそれらを実現するための言語・非言語・脳情報などを活用した要素技術を示しています。その中でも特に以下の研究開発が重要と考え、NICTにおいてもその取組を進めています(図3)。

(1)リアル3Dアバターの構築・制御技術

現在、3D仮想空間内でCGキャラクターに乗り移ってゲーム感覚で交流を楽しむサービスが既に商用化されています。しかし、CGキャラクターでは、刻々と変化する視線、表情、ジェスチャー等が十分に

伝わらないため、初対面での会話、人柄を見極めたい面談、駆け引きのあるビジネス交渉等、相手の心の機微を非言語情報から読み取る必要がある状況では、このようなサービスの利用は難しいと言わざるを得ません。

それに対し、当研究グループでは、CGキャラクターではなく、相手のリアルな3D映像を奥行センサのデータから実時間で再構築して伝送し、対面対話に近いコミュニケーションを実空間で行えるMR(複合現実)テレプレゼンス技術を開発し、その効果を行動実験で実証しています。さらに現在、当研究グループでは、特殊なセンサを用いずにカメラ画像の情報だけからリアルな3Dアバターを構築し、微妙な表情や動作も的確に伝達し姿勢の制御も可能な新しい技術の開発を進めています。

(2)多感覚情報のXRインタフェース技術

私たちは、視覚だけでなく聴覚・触覚・嗅覚等の多感覚の情報をを用いて、人や環境の実在を感じ取っています。よって、実空間と同等のクオリティで遠隔からの活動を行いたいのであれば、視覚以外の情報も効果的に伝える必要があります。例えば、ロボット等を用いた遠隔作業を円滑に行うためには、触覚情報のフィー

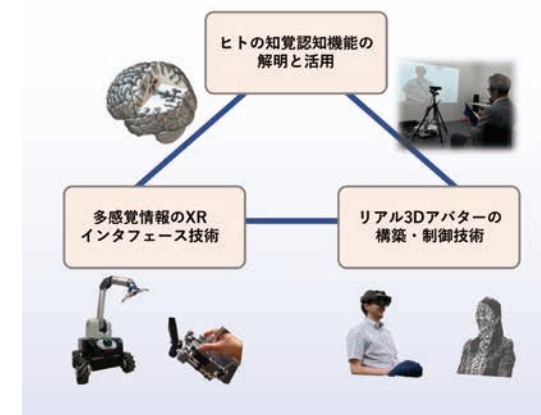


図3 アバター技術のコアとなる研究開発とNICTにおける取組

ドバックは不可欠になります。当研究グループにおいても、視覚とともに触覚や聴覚の情報を効果的に統合して自然なインタラクションが行える技術の開発を進めています。

(3)ヒトの知覚認知機能の解明と活用

遠隔地の人や環境の情報を効率的かつ効果的に伝達するためには、ヒトの知覚認知機能を心理・行動・生体情報・脳情報等の解析により定量的に明らかにし、その知見を最大限に活用することも重要になります。例えば、情報の遅延やその変動に対するヒトの許容範囲を明らかにして効率的な情報伝送に役立てていくことや、遠隔コミュニケーションにおける人々の相互理解や一体感を促進する情報を特定しそれらを優先的に伝達する手法の開発等が期待されます。

■今後の展望

今後は、アバター技術のハード・ソフト開発や新たなサービス開拓に向けた産学官連携の推進とともに、アバターの利用による心身への負荷(違和感・疲労等)を避けるためのガイドライン策定や他人によるアバターの「なりすまし」を起こさせないための本人認証の仕組み作り等も進めていく必要があると考えます。

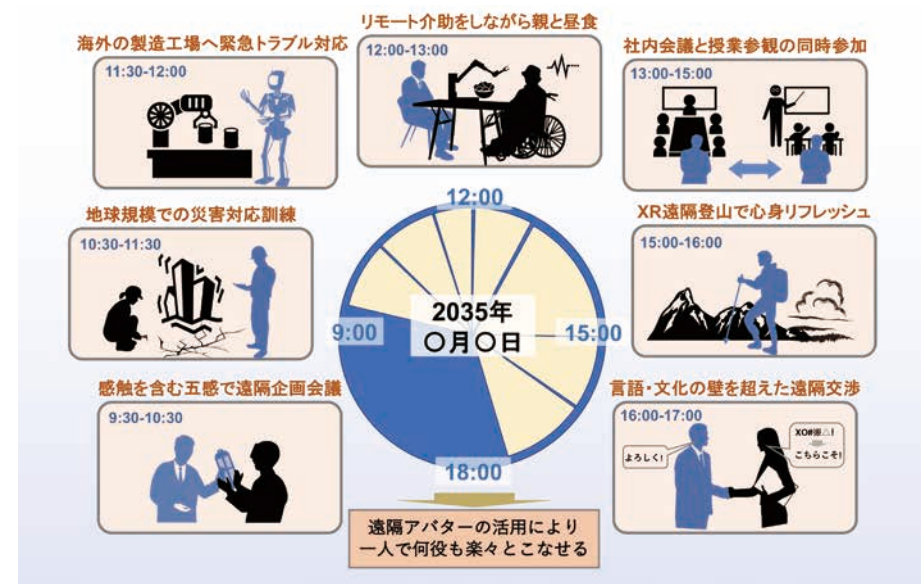


図1 サイバネティック・アバター社会の生活スタイル(2035年:とある企業の技術開発課長の日記から)

超高速ネットワークとエッジデバイスの時空間管理

時間と空間の壁に挑む



原 基揚

(はら もとあき)

主任研究員

大学院博士課程修了後、株式会社富士通研究所に入社、東北大学大学院工学研究科准教授を経て、2016年にNICTに入所。半導体微細加工技術を応用したマイクロデバイスの開発に従事。博士(工学)。

自 動車やドローン、インフラ設備まで、あらゆる機器が協調し、我々の生活をアシストしながらスマート化してくれる社会^{*1} (図1)。テクノロジーが追及する一つの理想像がここにあります。「原理は単純を極め、構造は複雑を極め、人は最も人らしく。」これは1985年に発行されたアップルシードというSFコミックに出てくる未来都市を表現するフレーズです^{*2}。このフレーズは我々が望むテクノロジーの方向性と符合します。スマートフォンやスマートスピーカの登場で、インターフェースはより感覚的な方向へ向かい、多くの機器類は、5Gにおいて、IoTの概念の下、高度に連携できるようになってきました。東京2020オリンピック開会式にて、多数のドローンが協調して夜空に描いた光のアートワークは、多くの人に鮮烈な印象を残しました^{*3}。このようなドローンサイネージはGNSS衛星からの信号を援用して膨大な数の飛行ドローンを無線制御したものです。この技術は今後の進展が期待される無人工場や大規模な港湾管理、スカイカーシステムなど、高度な自律制御システムへとつながっていくことが予想されます。では、その過程はどのようなものとなるでしょうか? 「人が人らしく」あるために、「構造(システム)の複雑化」と「原理の単純化」をいかに推進すべきでしょうか?

■ネットワークの高速化・低遅延化 —リアルタイムという時間の壁—

ドローンサイネージからの展開を図2にまとめます。図2(b)では、監督者たちがネットワークを介して遠方にいること

を想定しています。また、各機器にはカメラが搭載され、得られた画像は、トレーサビリティの確保のためにクラウドに保存されるとともに、ネットワークエッジにてAI処理(障害物や人影の推定)され、リアルタイムの自律的な安全確保に活用されます。このような応用では、クラウドネットワークに更なる高速化・低遅延化が求められ、これに対し、回線の光多重化とクラウド処理系の超高速化が原理的に最も単純な解(方向性)を与えます。回線の光化は、IOWN構想などが好例として挙げられ^{*4}、また、クラウド処理系の超高速化に関しては、現在、最もダイナミックな研究分野の一つとなっています。クラウドネットワークにおいて処理される情報は膨大です。一方で、半導体チップの微細化による高速化は鈍化しており、熱管理の観点からも限界が見えつつあります。そのため、高速、かつ、エネルギー効率の良い新たな演算方式の登場が切望され、フォトニックコンピューティング^{*5}や、量子コンピューティング^{*6}は有望な候補の一つとなっています。半導体チップの高速化の恩恵を最も享受するのは、クラウドサービスを提供するプラットフォームでしょう。実際、高性能半導体チップの開発主体は、Intelなどのファブを擁するチップメーカーから、GoogleやAmazonなどプラットフォームに移行する傾向が見られます。

■ユーザデバイスの同定と把握 —位置空間情報の完全把握という壁—

プラットフォームによる高度なSoC(System on Chip)の開発は、かつてのメインフレームビジネスに類似します。それでは、クラウドネットワークの性能

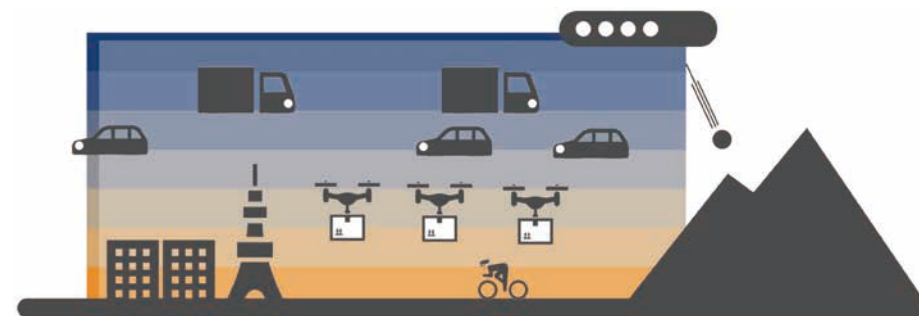


図1 B5G/6G ホワイトペーパーに登場するアプリケーションイメージの一例^{*1}: 空を舞台に物通と交通、人の往来がスマートに管制されている。そこでは、インシデントや事故を避けるため、多重の安全システムを必須とする。

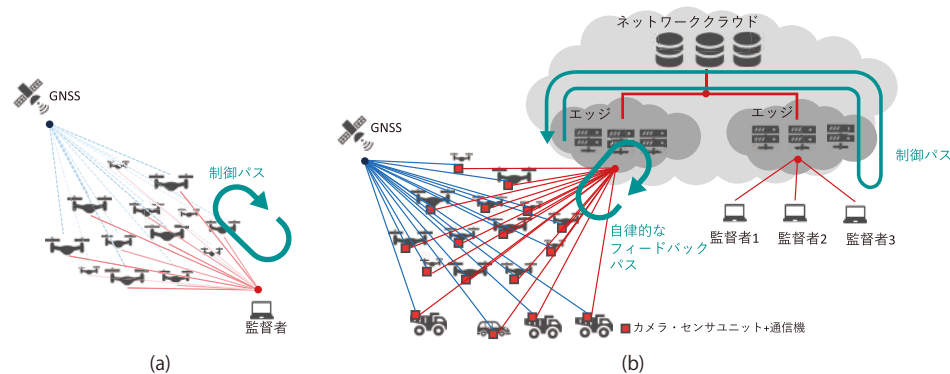


図2 ドローンサイネージからネットワークを活用した無人工場、大規模港湾管理への展開

が十分に向上したなら、自動車やドローンなどの機器類は、IPアドレスが割り振られた一種の端末として機能させればよいのでしょうか?

ノイマンボトルネックという言葉があります。これは、コンピュータにおいて記憶装置と演算装置との間の情報伝達が、チップの演算速度を制限してしまうというものです。原典によれば^{*7}、より広義に、システム設計において記憶系と実効系との間の情報交換の効率化に十分な配慮とコストが必要とされることを示唆するものです。クラウドネットワークを記憶系、制御される機器類を実効系と分類すると、これらの間の情報伝達の効率化が開発のポイント(ボトルネック)となります。そして、実効系である機器類は人間よりはるかにダイナミックに動作し、郊外や僻地、海や空へと広範に配備されることになります。そのため、機器類にはIPアドレスに加え、正確な位置情報と時刻情報とをリアルタイムに付与し、接続機器をより正確に同定・把握ができるようにする必要があります。もち

ろんGNSSより正確に、電波環境に影響を受けない安定性を確保してです。

NICTでは最も安定したクロック装置の一つである原子時計をチップ化する技術開発を進めており(図3)、これを機器類に搭載することができれば、センサと組み合わせて、スタンドアローンでの位置同定・時刻同定が可能となります。さらに、近接するデバイス間での無線通信による時刻合わせやポジショニング、複数のデバイス間での絶対時刻推定のアルゴリズムの開発など、多くの研究が進捗しており、上記の位置・時刻情報による機器類へのID強化に大きな貢献が期待されます。これらの開発領域は、高い技術集約を必要とし、プラットフォームのクラウド技術と相互補完して、我が国が競争力を発揮すべき領域と考えます。

■おわりに

最初に触れたSFコミックでは、理想的な社会システムのなかで、理想的でない人間が葛藤する様が描かれます。しかし、今日、理想的な人間像は画一的なも

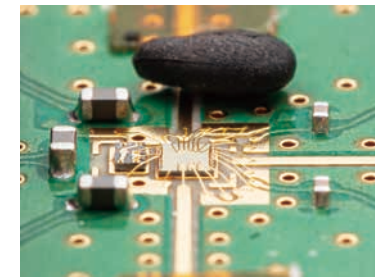


図3 開発中の原子時計用発振回路(写真上部は、比較対照用の黒ゴマ)

のではなく、「多様な個性を許容する」ゆらぎを持ったものへと変化し、我々のホワイトペーパー^{*1}でも、人間の生活の多様性を、通信技術をベースとした社会システムがフォローし、スマート化していく様子が描かれます。未来はかつてのSFよりも穏やかに、しかし確実に進展していきます。

【参考文献】

- *1 情報通信研究機構編, "Beyond 5G/6G White paper," 2021.
- *2 士郎正宗, "Appleseed," 青心社, 1985.
- *3 https://www.youtube.com/watch?v=Gr0BF27_Vu4
- *4 NTT技術ジャーナル, vol.32, no.1, 2020.
- *5 Carl Ramey, "Silicon Photonics for Artificial Intelligence Acceleration," IEEE Hot chips 32, 2020.
- *6 Frank Arute et. al. "Quantum Supremacy using a Programmable Superconducting Processor," Nature, vol.574, pp.505-515, 2019.
- *7 John Backs, "Can Programming be Liberated from the von Neumann Style? A Functional Style and Its Algebra of Programs," Communication of the ACM, vol.21, no.8, pp.613-641, 1978.

Beyond 5Gにおける超拡張性を目指す ワイヤレスネットワーク技術の将来展望



豊嶋 守生

(とよしま もりお)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
研究センター長

1994年郵政省通信総合研究所（現 NICT）入所。ETS-IV による光衛星通信実験に従事し、その後 NASDA（現 JAXA）出向、ウイーン工科大学在外研究を経て、OICETS、SOTA、ETS-9等の衛星搭載通信機器の研究開発に従事。博士（工学）。

Beyond 5Gや6Gにおける情報通信技術の議論が加速しており、通信ネットワークをグローバルに拡張し、地上と宇宙をシームレスにつなぐ高度な情報通信ネットワークの実現が期待されている。5Gでは、高速大容量、超高信頼低遅延、超大量端末という3つの特徴があるが、Beyond 5Gや6Gの時代には、超拡張性を目指して非地上系ネットワークと呼ばれる移動体とのワイヤレス通信を高度化することが重要になる。

■背景

近年、世界的に通信衛星のデジタル化、衛星コンステレーションにおける多数の小型衛星の打上げ等、衛星通信が高度化・活発化してきている。地上においては2020年に第5世代移動通信システム（5G）が本格的に導入され、いわゆる Beyond 5Gや第6世代移動通信システム（6G）に向けた研究開発も世界各国で開始されている。地上系の5Gにおける高速大容量のeMBB（enhanced Mobile BroadBand）の要求条件を達成するため、従来の6 GHz以上の高い周波

数帯の拡張が検討され、28 GHz帯等のKa帯やミリ波帯の周波数割当てが新たに行われている。移動体向けの非地上系ネットワーク（NTN: Non-Terrestrial Networks）への高速・大容

量化では、高高度プラットフォーム局（HAPS）や移動体向けブロードバンド衛星通信システム（ESIM）に、ミリ波やKa帯の周波数が割り当てられている。近い将来、何万機も上空に衛星や無人航空機が飛び交い、10~100 Gbps級の通信速度が移動体でも当たり前になると、無線周波数と広い通信帯域の確保が課題となる。光空間・光衛星通信技術を用いると搬送波周波数が高く帯域幅にほぼ制限がなく、干渉に強く、小型・軽量化に適した特徴を有し、NTNにおける通信へ革新的な飛躍をもたらす手段であると期待されている。

■光空間・光衛星通信技術の非地上系ネットワークへの展開

近年、キューブサット級の超小型衛星で世界初の光通信の軌道上実証が成功し、このクラスの衛星で光通信の実現可能性が示され、衛星通信分野において革新的な変化が起きつつある。衛星コンステレーションでは、米国Space-XのStarlink計画で、既に低軌道（LEO）に千機以上の衛星を打ち上げており、将来的には1万機以上の衛星を軌道投入し、地球規模で最大1 Gbpsのインターネット接続を提供する予定である。図1に、光空間・光衛星通信技術を用いた主な利用アプリケーション例を示す。Beyond 5G / 6G時代におけるNTNへの光通信技術の応用については様々な形態が考えられるが、ドローンやHAPSを用いた地上における光空間通信や、キューブサットなどの超小型衛星を用いた光通信の利用、衛星コンステレーションにおける光通信の基幹通信網への応用、そして深宇宙通信への基幹網の構築などが挙げられる。

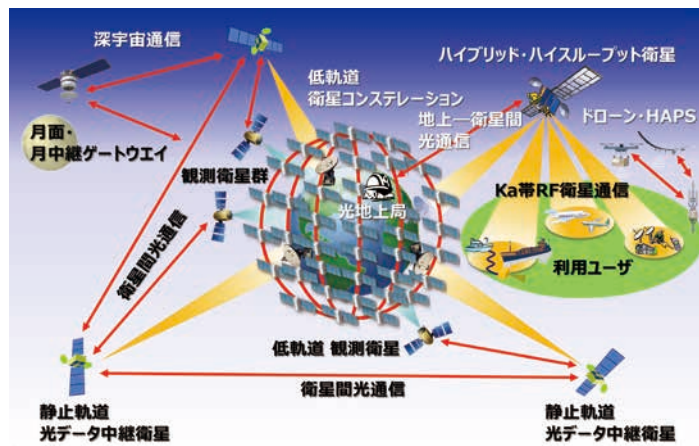
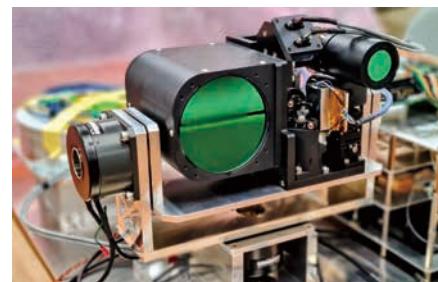
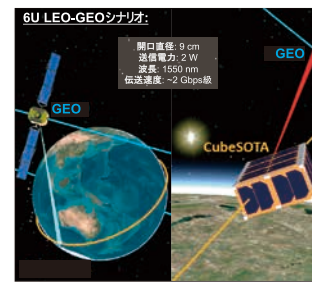


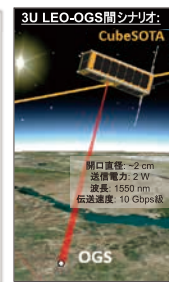
図1 光空間・光衛星通信技術を用いた主な利用アプリケーション例



(a)



(b)



(c)

図2 HAPS搭載用の光通信機器の試作モデル (a) とキューブサット光通信シナリオの概要 (b、c)

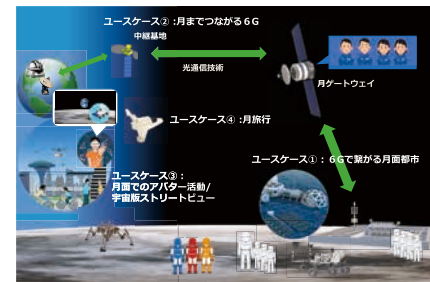


図3 NICTのホワイトペーパーにおける月面都市のユースケース

情報通信研究機構（NICT）では、様々なNTNへの適用を目指し、超小型光通信機器の研究開発を実施している。図2にHAPS用光通信機器の試作モデルの外観と、LEOキューブサット搭載用光通信機器（CubeSOTA）のシナリオの概要を示す。HAPSの搭載環境としては、パイロードの搭載リソースが制限される上、高度約20 kmでのサービスが想定されるため、動作環境も厳しく通信機器の設計に配慮が必要である。また、CubeSOTAの研究開発では、6U（1Uは10 cm角の大きさ）のLEO-静止軌道（GEO）間で2 Gbps級、3UのLEO-光地上局（OGS）間で10 Gbps級の光通信の宇宙実証を目指している。NICTのBeyond 5G研究開発促進事業においては、小型衛星コンステレーションに向けた衛星搭載光通信技術の研究開発が推進されており、日本における研究開発の加速が期待される。

■月までつながる2030年代のBeyond 5G技術

深宇宙への開発では、アメリカ航空宇宙局（NASA）が中心となり、月への有人宇宙探査を長期目標として産業界連携及び国際協力等により月周回有人拠点（Gateway）の構築を本格化するアルテミス計画が推進されている。月近傍における通信において、1 Gbpsクラスの光通信インフラを構築することが検討されている。NICTでは、Beyond 5G / 6G技術の進展により、実現が想定される社会像・ユースケースや、そのために必要な要素技術・研究開発ロードマップ等をまとめたホワイトペーパーを作成し、2021年4月1日に公表した。その中で、月面都市を想定し、その利用シーンから



図4 Beyond 5G / 6G時代における超スマート社会の将来像

必要なユースケースを考え、そのために必要な要素技術を検討している（図3）。2035年頃には月面都市の開発が開始され、日本の強みであるロボット技術を活かし多くのアバターが月面で活躍し、それらをGatewayや地球から人がコントロールしていると考えられる。その時代には、地球と月の間を結ぶ高速・大容量な光通信技術が必須であり、将来に向けての通信技術の研究開発が不可欠である。

■Beyond 5G / 6G時代の3次元のシームレスなネットワークの社会

2030年代の社会においては、静止衛星、非静止衛星、HAPS、航空機、ドローン、船舶、そして地上系端末など、様々な種類の要素がシームレスに、多層的に接続される3次元のネットワークが構築されると考えられる。無数に飛翔する移動体間では周波数逼迫の課題があり、通信リンクは、電波回線はもちろんのこと、光通信やテラヘルツ通信が用いられると

考えられる。この様な多層ネットワークを実現するためには、これらの要素を統合的に管理するネットワーク制御基盤を構築する必要がある。図4にBeyond 5G / 6G時代に想定される超スマート社会の将来像を示す。NTN技術が主流になり、3次元ネットワークのアプリケーションとして従来のブロードバンド通信だけではなく、宇宙利用の特徴を活かした月面基地への展開や、世界規模の衛星IoTによる災害監視、自律航行船や自動物流等が実用化されていくと考えられる。2030年代には、超高速ワイヤレス通信で達成されるXR（X-Reality）技術を用いて、コロナ禍での未来のテレワークや遠隔医療が実現され、超臨場感のオンラインゲーム、アバターによるショッピング、遠隔教育、自動運転でのスカイカー等が本格的に導入され、安心・安全に人と人がシームレスにつながるセキュアな超スマート社会の実現が期待される。

Beyond 5G / 6G ホワイトペーパー作成の裏話

Beyond5G 研究開発推進ユニット Beyond5G デザインイニシアティブ イニシアティブ長 石津 健太郎

Beyond 5G / 6G ホワイトペーパーの作成は、NICT 職員の総力を挙げての活動でした。ここでは、その裏側を少しご紹介したいと思います。

Beyond 5G / 6G に向けた議論の始まり

NICT が一体として Beyond 5G / 6G の議論を本格化したのは、2019年7月でした。NICT には、トピックを決めて、組織を横断した職員が集まり、幹部も交えて議論を行うサロンというイベントがあります。サロンでは、「思い」を持つ方がプレゼンテーションして質疑応答をし、その後にテーブル単位でより率直な意見を披露するというのが主流の進め方でした。プレゼンテーションを入念に準備される場合や、簡易な資料だけで考えを説明される場合もあり、形態は様々です。新型コロナウイルスの影響が出る以前には、夕方から夜にかけて直接会議室に集まり、普段は出会えない方と会い話ができたのも楽しみでした。

2019年7月のサロンでは、初めて6Gをトピックとして扱いました。Beyond 5Gや6Gに利用可能な要素技術の研究開発は、NICTのそれぞれの研究者が着実に進めていますが、同じビジョンを共有して相乗効果が得られる活動を意識し始めたのは、このサロンがトリガになったのではないのでしょうか。それから2020年秋までに合計6回の6Gサロン（ワーキング議論を含む）を開催し、200人近い参加者による熱い議論が繰り広げられました。その雰囲気を引き継ぎ、2021年3月を目標にホワイトペーパーを作成することになりました。

ホワイトペーパー作成の舞台裏

ホワイトペーパーは、技術的な内容だけではなくビジョンを含む考え方を伝えるものです。そのような内容をNICT全体から集まった有志が執筆して公表することは、おそらく初めての試みではないでしょうか。担当部署があるわけではありませんが、当時私自身が所属していた経営企画部のメンバーが中心となって議論の活性化や文章の取りまとめをお手伝いしました。執筆するには、研究者以外も含めて分野や役職にかかわらず集まっており、幹部自らが内容に手を入れた部分もあります。内容については、いくつかのグループに分かれて熱い議論が行われました。例えば、B5G時代の未来像を物語形式で記載した3章は、今回のホワイトペーパーの大きな特徴の一つですが、3つのシナリオを担当する各チームが何度もウェブ会議を繰り返しています。このように大変に思

いがもった文章をホワイトペーパーとして取りまとめることには難しい点がありました。整合性を取るあまりに「思い」が表れた文章を切り取ることは本意ではなく、濃淡のある文章が残っている可能性はあります。このような状況を鑑みてご容赦いただければと思います。

公開を2021年3月に控えて、2か月前にはBeyond 5G分野で活躍されている有識者を国内外からお呼びしてNICTオープンサミットと呼ぶイベントを2日間にわたり開催しました。そこでは執筆中のホワイトペーパーをご紹介します、最終とりまとめに向けて忌憚のない意見を頂いて、進むべき方向性について議論することができました。

英語版に新たな試みを

公開後のホワイトペーパーの改訂などは、2021年4月からは新設されたBeyond5G研究開発推進ユニットが行うことになり、まずは4月末を目標に英語版の作成に取り掛かりました。翻訳に当たっては、NICT先進的音声翻訳研究開発推進センター（ASTREC）の研究成果を活用した機械翻訳システムTexTraを利用しています。物語的な文章などは直接翻訳が難しい場合もあるため人間が部分的に修正しましたが、この方法により短期間の約1か月で英語版を公開することができました。

<https://beyond5g.nict.go.jp/download/>
(Beyond5G研究開発推進ユニットの資料ダウンロードページ)



図 6Gサロン（ウェブ会議）の運営側の一幕

情報指向ネットワーク技術を活用して未来のネットワークを実現



●経歴
1982年 長崎県にて誕生
2005年 慶應義塾大学環境情報学部卒業
2013年 慶應義塾大学政策・メディア研究科博士課程終了
2013年 フランス国立情報学自動制御研究所（INRIA）博士研究員を経て、NICT入所
2021年 現職

●受賞歴等
平成29年度NICT成績優秀表彰優秀賞（個人）
令和3年度NICT成績優秀表彰優秀賞（団体）

松園 和久

（まつぞのかずひさ）
ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室
研究員
博士（政策・メディア）

Beyond 5G時代には、これまで以上に超高速・超低遅延なアプリケーションや超大容量のコンテンツ配信など、多種多様なネットワークサービスが出現します。そこで私達が着目したのは、現在のインターネット通信の様々な課題を克服する「情報指向ネットワーク技術（ICN）」と呼ばれる新しい通信技術です。現在私は、ICNとネットワーク内符号化を連携させた通信品質向上技術や、ICNとエッジコンピューティングを融合させたネットワーク基盤技術の研究を行っており、ICNを実社会へ展開するため、Ceforeと呼ばれるオープンソースソフトウェアの開発や、国際標準化団体であるIETF/IRTFでの標準化活動も行っています。

今年度より、ICNの新たな応用先として、量子鍵配送ネットワーク（QKDN）への適用を検討しています。今後、様々な重要情報がネットワークを介してやり取りされるため、最も強力な秘匿性を担

保するQKDNはとても重要な技術です。しかし、QKDNが提供可能な限られた暗号鍵を効率良く使用し、ユーザーやアプリケーションからの暗号鍵要求が棄却される事態を回避するための技術が必要となります。そこで、ICN特有の経路制御方式及びネットワーク内キャッシュを利用し、従来の通信よりも暗号鍵の利用効率を向上させることを提案し、その課題解決に貢献することを模擬検証しまし

た。この基本コンセプトとアプローチはIEEE GLOBECOM2021にて発表予定となっており、世界に先駆けて本技術を提唱することになっています。今後は、ICNとQKDNが融合したネットワークの概念実装を進めるとともに、関連するコア技術の標準化活動にも取り組み、未来のネットワークアーキテクチャの実現を目指していきます。

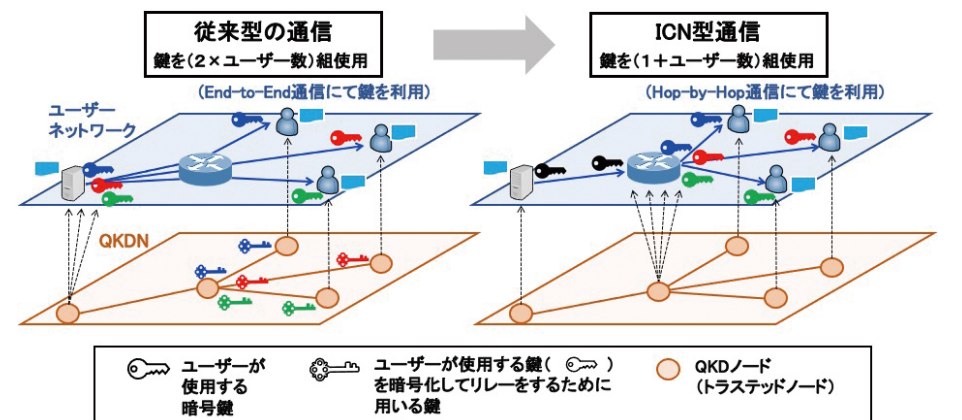


図 従来型通信と比較したICN型通信による鍵の有効利用

けいはんなR&Dフェア 2021

ユニバーサルコミュニケーション研究所

開催日 11月11日(木)～11月13日(土)

入場無料

特設 Web サイトでのオンライン開催

<https://khn-fair.nict.go.jp/>

講演での質疑応答に参加を希望される方は、事前の参加登録が必要です。
右のQRコードを読み込んで、氏名やメールアドレス等をご登録ください。
尚、視聴のみの場合は参加登録不要です。直接、特設Webサイトへお越しください。



▲NICTユニバーサルコミュニケーション分野の研究開発

基調講演

11月11日(木) 13:30～14:30

「アバターと未来社会」

石黒 浩氏

大阪大学 基礎工学研究科 教授（栄誉教授）
ATR 石黒浩特別研究所 客員所長（ATR フェロー）

特別講演

11月11日(木) 13:00～13:30

「ATR 創立 35 年の温故知新」

浅見 徹氏

株式会社国際電気通信基礎技術研究所（ATR）
代表取締役社長

技術講演

11月12日(金) 10:00～12:00

「AI による医用画像からの人体筋骨格の解析」

佐藤 嘉伸氏

奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科情報科学領域 生体医用画像研究室 教授

「表情からの感情センシング技術」

佐藤 弥氏

理化学研究所 情報統合本部
ガーディアンロボットプロジェクト
心理プロセス研究チーム チームリーダー

「誰もが分かり合えるユニバーサル コミュニケーションの実現を目指して」

内元 清貴

NICTユニバーサルコミュニケーション研究所長
ほか、2名の研究センター長も登壇

NICT の主な展示

- SNS上のテキストをうまく翻訳するニューラル機械翻訳
- Web 60億ページの情報を基に様々な質問に回答する「WISDOM X 深層学習版」
- 異分野データ連携によるスマートサービス開発基盤「xDataプラットフォーム」等

けいはんな学研都市内の研究機関や企業、大学、自治体等が協力して、最先端技術の研究開発を基調講演、特別講演、技術講演、研究発表（展示）、サイエンストーク等でわかりやすく紹介します。

開催のお知らせ

言語：英語



Quantum Innovation 2021

2021年12月7日(火)～9日(木)

オンライン開催 [東京から配信] (予定)

<https://quantum-innovation.riken.jp/>

Quantum Innovation 2021 は、量子コンピューティング、量子センシング、量子暗号、量子通信等の量子技術の分野における最新の成果にフォーカスした国際シンポジウムです。

全体会議と分野別セッションで構成され、量子暗号・量子通信セッションでは、日、米、欧ほかの講演者から、最新の技術開発と実用化に向けた動向が紹介されます。

詳細は左記 URL をご覧ください。