

B5G/6G におけるエッジコンピューティングの役割と超スマート社会への展開

Evolution of B5G/6G Empowered by Edge Computing towards Super Smart Society

阪口 啓 中里 仁 久保田啓一 福田英輔
朽津光広 益子 宗

Abstract

B5G/6G 時代に創出される超スマート社会サービスプラットフォームは社会に革新的発展をもたらすであろう。また、そのプラットフォームを実現する主要技術がエッジコンピューティングである。そこで本稿では、B5G/6G におけるエッジコンピューティングの役割と超スマート社会への展開について概観し、更に東京工業大学大岡山キャンパスに構築している B5G/6G の実証フィールドとエッジコンピューティングを活用したアプリケーションの実装例を紹介する。

キーワード：B5G/6G, 超スマート社会, エッジコンピューティング, 実証フィールド

1. 5G の更なる発展と超スマート社会

2020 年に商用化された 5G（第 5 世代移動通信システム）の特徴は、超高速、超高信頼低遅延、同時多数接続の三つである。しかし実際に市販の 5G 端末を用いてスピードテストなどを行うと、1Gbit/s 以上の超高速通信や 1ms の超低遅延通信は達成されない場合がほとんどである。これはスピードテストなどのサーバがクラウドに設置されており、たとえ 5G のエアインタフェースが超高速低遅延を達成したとしても、その上位のネット

ワークであるインターネット回線が性能を律速するためである。

ではどのような場合に 5G の特徴である超高速低遅延が達成できて、またその性能が達成できたときに 5G を特徴付けるサービスは何なのか考えてみる。その一つの例が図 1 に示す 5G を用いた V2X（Vehicle-to-Everything）によって実現される協調認知である^{(1),(2)}。ここ

阪口 啓 正員：フェロー 東京工業大学
E-mail sakaguchi@mobile.ee.titech.ac.jp
中里 仁 正員 東京工業大学
E-mail nakazato@mobile.ee.titech.ac.jp
久保田啓一 東京工業大学
E-mail Kubota.k.aj@m.titech.ac.jp
福田英輔 正員：フェロー 東京工業大学
E-mail fukuda.e.ad@m.titech.ac.jp
朽津光広 楽天モバイル株式会社
E-mail mitsuhiro.kuchitsu@rakuten.com
益子 宗 正員 楽天モバイル株式会社 5G ビジネス本部
E-mail so.masuko@rakuten.com

Kei SAKAGUCHI, Fellow (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8552 Japan), Jin NAKAZATO, Member, Keiichi KUBOTA, Nonmember, Eisuke FUKUDA, Fellow (Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 152-8550 Japan), Mitsuhiro KUCHITSU, Nonmember (Rakuten Mobile, Inc., Tokyo, 135-0043 Japan), and Soh MASUKO, Member (5G Business Department, Rakuten Mobile, Inc., Tokyo, 158-0094 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.106 No.2 pp.129-135 2023 年 2 月
©電子情報通信学会 2023

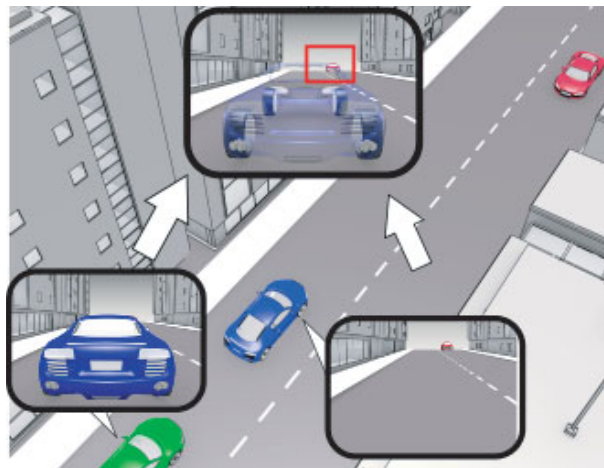


図1 ミリ波 V2X によって実現される協調認知

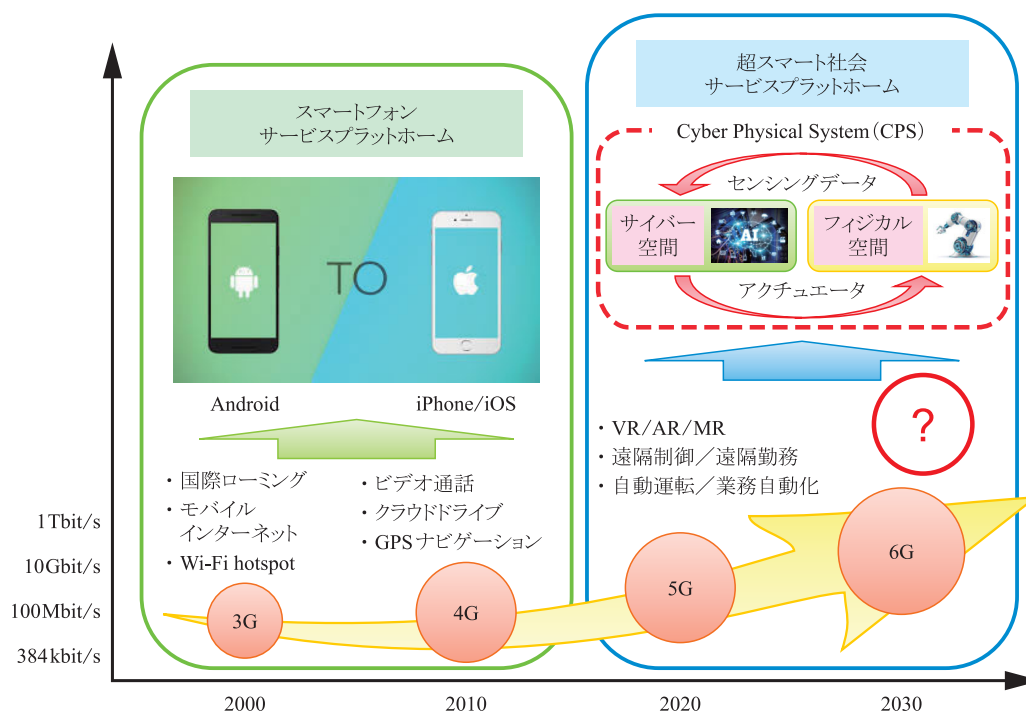


図2 2 Generations=1 Revolution

では5Gの特徴であるミリ波帯⁽³⁾を用い、また車々間を直接接続することで超高速低遅延通信を実現している。ここで自車（緑色）の視界は前方車（青色）によって完全にブロックされているが、前方車の視界は開けており対向車（赤色）を認知できる。そこで前方車のカメラやライダー（LiDAR: Light Detection And Ranging）などのセンサデータを超高速低遅延に自車に伝送し、自車のセンサデータと合成することで前方車を透視することが可能になり対向車を認知することができる。これを一般に協調認知と言い、超高速低遅延な5Gでしか実現できない技術である。すなわち5Gの高速低遅延性は、インターネットを介さないエッジ処理によりその力を発揮できるのである。

さて5Gの次の6G（第6世代移動通信システム）は2030年頃に商用化されると言われており、それに向けて現在様々な研究開発が行われている。LEO（Low Earth Orbit）やHAPS（High Altitude Platform System）を活用した非地上系ネットワークや、ミリ波帯より更に高い周波数であるテラヘルツ波帯などの技術が注目されているが、筆者らは図2に示す2 Generations=1 Revolutionという考えの下3Gと4Gや5Gと6Gをセットで考えて研究開発を進めている。では3Gと4Gで創出された革命的技術とは何であっただろうか？ それはAndroidやiOSなどのスマートフォンサービスプラットフォームである。このプラットフォームにより、任意の端末に任意のアプリをダウンロードして利用することが可能になり、現在のスマートフォンを日常的に用いる利便

性の高い社会が出来上がった。では5Gと6Gで創出される革命的技術は何であろうか？ それは名前はまだ決まっていなかったが、筆者らは超スマート社会サービスプラットフォームと呼んでいる。サイバー空間とフィジカル空間を5Gと6Gを介して融合し、超スマート社会サービスプラットフォームを用いることで、誰でも容易にスマート農業やスマートモビリティなどの新たな社会やビジネスを創出することができる全く新しい仕組みである。さて次章ではこの超スマート社会の仕組みを詳しく概説する。

2. MEC+5G/6Gで超スマート社会を実現

3G/4G時代のスマートフォンは、人間がサイバー空間をのぞく窓であったのに対して、5G/6G時代の超スマート社会では、図3に示すようにサイバー空間とフィジカル空間がサイバーフィジカルシステム（CPS）として直結する。スマートモビリティを例に説明すると、サイバー空間には、ビッグデータや人工知能（AI）が存在するのに対し、フィジカル空間にはカメラやライダーなどのセンサ、ダイナミックマップなどのデータベース、判断を行うエッジコンピューティング（Multi-access Edge Computing, MEC）、そして自動車などのアクチュエータが存在する。5G/6Gはこれらを接続する役割を果たす。センサとデータベースは必ず高精細化するため前章に示した超高速低遅延通信が必要である。一方、MECとアクチュエータ間には慣性があるため高速性よ

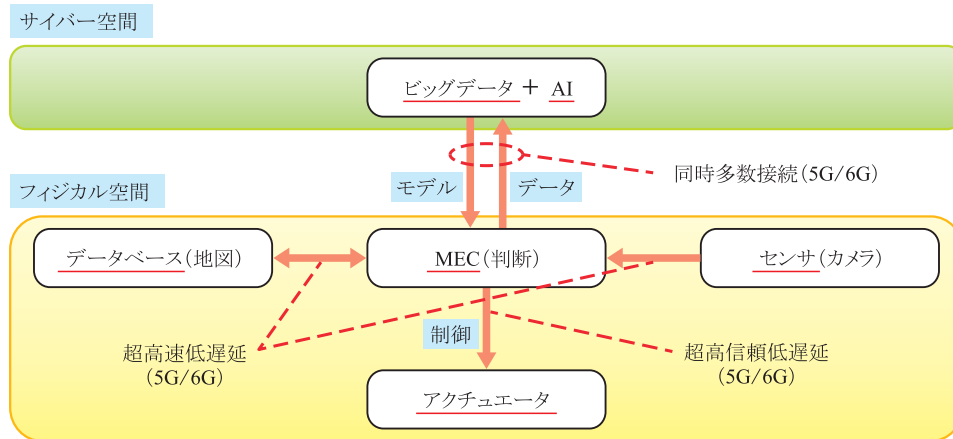


図3 超スマート社会を実現する 5G/6G+MEC



図4 超スマート社会サービスプラットフォーム

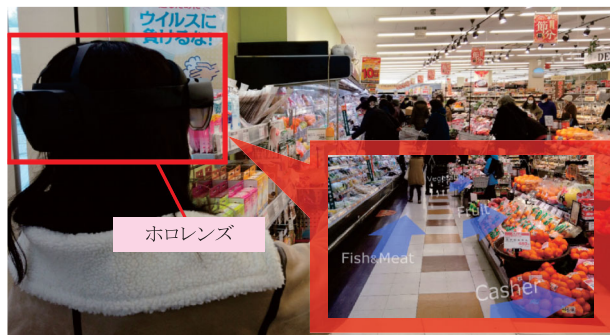
りも超高信頼低遅延性が重要になる。このようなフィジカル空間のデバイスは多数存在するため、サイバー空間とフィジカル空間は同時多数接続が必要になる。つまり 5G/6G の三つの特徴を生かして CPS の五つの構成要素を接続することで超スマート社会が実現されるのである。

さて超スマート社会の原理は説明したが、このままでは誰でも使える状態にない。そこで登場させるべきものが図4に示す超スマート社会サービスプラットフォームである。そしてこれは、サイバー空間の任意のアプリケーションとフィジカル空間の任意のサービスを利用性高く融合するためのミドルウェアであり、スマートフォンサービスプラットフォームのように端末とクラウドだけでなく、MEC を含むネットワーク内にも

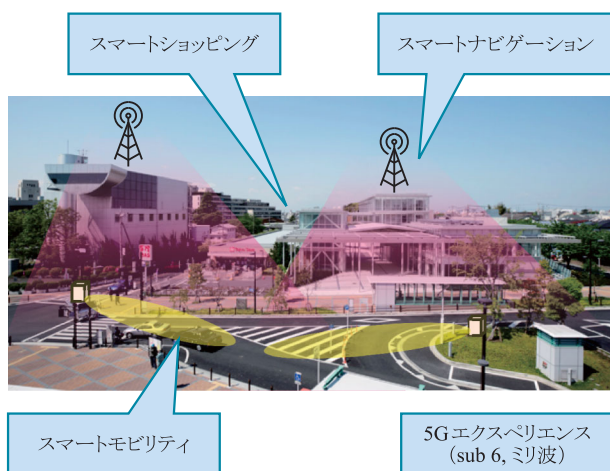
存在することが特徴である。このプラットフォームには、少なくとも ROS (Robot OS)⁽⁴⁾ のようなセンサとデータベースを活用してアクチュエータであるロボットを制御する機能と、SDN (Software Defined Network)/NFV (Network Function Virtualization) のように 5G/6G を含む通信ネットワーク及び MEC/クラウドをオーケストレートとする機能の両方を具備する必要がある。これらの機能により誰でも図3に示す CPS を容易に構築することが可能になり、そのプラットフォーム上にスマート農業やスマートモビリティなどのアプリケーション(デジタルツイン)を導入することで新たな社会やビジネスの創出が可能になる。

筆者らは、上記超スマート社会のモデルケースを構築するために、超スマート社会推進コンソーシアム⁽⁵⁾の取

組みの一環として、現在、図5に示すスーパースマートタウン大岡山事業に取り組んでいる。これは5G/6G及びMECを東京工業大学がある大岡山に構築し、それら



(a) スマートショッピング



(b) 全体

図5 スーパースマートタウン大岡山事業

を活用して成熟した街である大岡山をスマート化する事業である。現在はミリ波を含む5Gのエリア構築及びMECなどのネットワークの構築が一通り完了した段階であり、MECを活用したARナビゲーションや物体認識などのアプリケーションが動作している。これらの詳細は次章以降で述べるが、今後はこれらの最先端の技術を活用して大岡山を活性化させていく予定である。

3. B5G/6G 実証フィールドの構築

本章では、エンドツーエンドの定義を説明したのち、B5G/6G 実証実験フィールドについて説明する。従来では、サービス品質について、各ネットワーク区間ごとに定義されてきたが、B5G/6Gにおいては、端末内のアプリケーションからクラウドまでのエンドツーエンドにおいてKPI（例：遅延）を定義すべきである。これまで、筆者らは、RAN（Radio Access Network）/Core等のソフトウェアを汎用サーバ上で完全仮想化させ商用展開を行ってきた実績を有している⁽⁶⁾。これまで培ってきたノウハウを活用し、B5G/6Gにおける超スマート社会に向けたエッジクラウドのアーキテクチャを図6に示す。本図において、提案するエッジクラウドでは、複数の基地局が、モバイル端末近傍のエッジクラウドに接続され、またエッジクラウド間同士も接続される。そして各エッジクラウドとセントラルデータセンターが接続される。

本エッジクラウドでは、様々なアプリケーションが展開可能なため、各アプリケーションは物理的な場所を意識せずに、他アプリケーションとの接続がNFVを用いることで実現可能となる。また、エッジクラウド側で一次処理を行い、大規模なリソースを保持しているクラウド側と連携することで、トラフィックオフローディング等

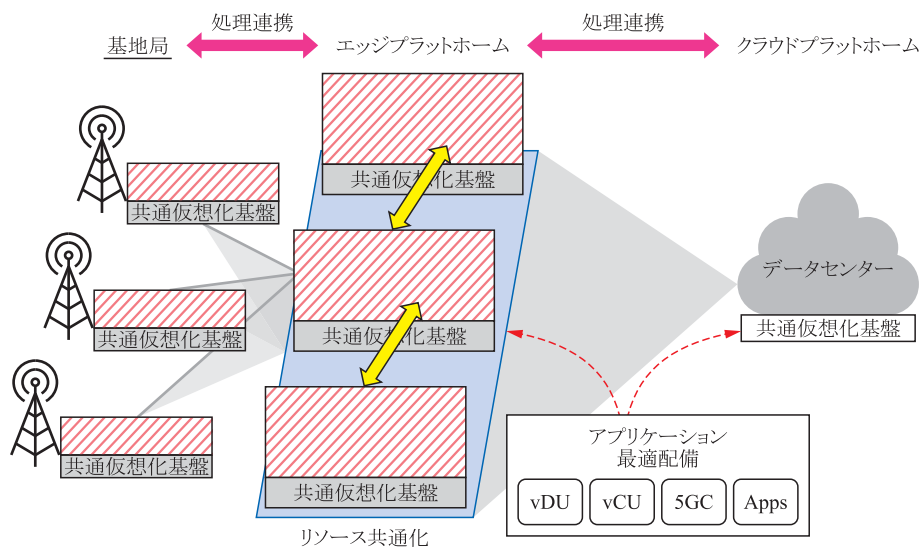
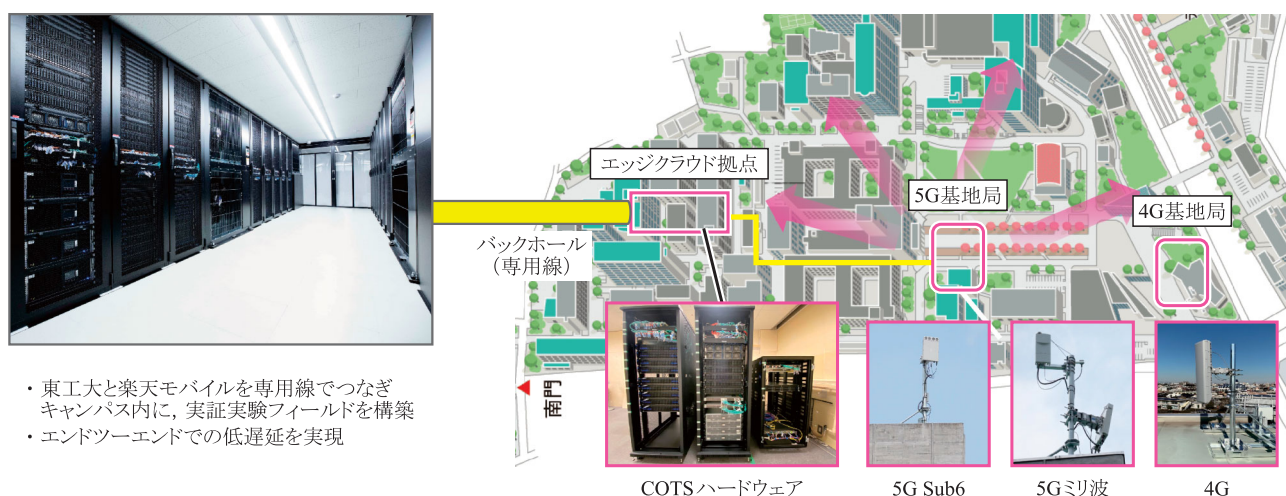


図6 B5G/6Gに向けた仮想化基盤のあり方



- ・東工大と楽天モバイルを専用線でつなぎ
キャンパス内に、実証実験フィールドを構築
- ・エンドツーエンドでの低遅延を実現

図7 B5G/6G エッジクラウド及び実証実験フィールド

の技術への拡張も可能となる。上述の構成において、エッジクラウド内の機能配置・リソース配分をアプリケーションごとに最適化することにより、それぞれのエンドツーエンドで定義される遅延等のサービス要求を満足する B5G/6G ネットワーク基盤が実現できる。

これらを念頭に、今回構築した B5G/6G エッジクラウド及び実証実験フィールド⁽⁷⁾を図7に示す。同図における B5G/6G エッジクラウドを構築する上で、仮想化基盤上で稼働させる各アプリケーションの要件（物理／論理ネットワーク種類、帯域幅、ハードウェア／ソフトウェア機器等）と今後の利用予測を十分に把握する必要がある。B5G/6G エッジクラウドでは、アプリケーションごとに COTS（Commercial Off-The-Shelf）サーバを管理するグルーピングとしてクラスタ管理している。ここで、四つのアプリケーション（4G vRAN/5G vRAN/vCore/Application）を仮想化⁽⁸⁾させ、構成可能なクラスタを四つ用意して、論理構成を組んでいる。一方で、その他のアプリケーション（認証、管理等）は、データセンター側に設置した機器を利用する。本実証実験フィールドでは、楽天クラウドイノベーションラボをセントラルデータセンターとして利用する（図7）。上記により、仮想化させることで物理的配置構成を意識せずに、必要機能を適材適所に配置させる分散ネットワークを組み合わせた構成を展開することができる。

一方で、実証実験フィールド側には、東京工業大学大岡山キャンパス全体を活用した実証実験が可能となるように LTE 向け RU（Radio Unit）を設置し、5G は Sub6/ミリ波対応の RU をそれぞれ設置している。B5G/6G エッジクラウドは実証実験フィールドへ展開した各 RU 近傍側に構築された汎用サーバ群上に仮想化基盤が構築されている集合体とする。各機器のインタフェース

として、フロントホール、ミッドホール、バックホールに分類される。フロントホールにおいて、vRAN 機能を動作させるために PTP（Precision Time Protocol）のサポートが必要となり、vDU（Virtualized Distributed Unit）側でベースバンド信号処理可能なアクセラレータとして、FPGA 有り無しそれぞれの COTS サーバを用意している。COTS サーバの仮想化内は高速なネットワーク接続を実施するために SR-IOV（Single Root I/O Virtualization）インタフェースを用いている。更に、一部アプリケーションにおいては GPU を使用するため、COTS サーバ内に GPU カードを搭載している。

各エッジクラウドは地域ごとに設置されており、隣接された複数のエッジクラウド及びセントラルデータセンターとの接続性が担保されている。各エッジクラウドでは、仮想化基盤上に必要なソフトウェアが展開され、複数の基地局を収容している。また、エッジクラウドはセントラルデータセンターと比較し、物理的スペースが限定される。そのため、収容セル数やアプリケーション要件等を加味した設計が重要となり、必要機器数／種類の設置についての検討が必要となる。アプリケーションのデプロイ先を最適化する必要があり、例えば、エッジクラウドのリソース不足の場合は他エッジクラウドあるいはセントラルデータセンターの空きリソース領域を必要に応じて利用することができる。ここでのアプリケーションとは、端末からサードパーティによって提供されるアプリケーションまでを範囲としたエンドツーエンドを示しており、複数のネットワーク区間をまたがっている。

アプリケーション機能を分割してデプロイすることで複数のエッジクラウドのリソースを共有化し有効利用することができる。アプリケーションの観点では、例えば

低遅延を求められるアプリケーションはエッジクラウドに提供され、その他アプリケーションはセントラルデータセンターに配置することで、機能の物理的分割を実現することができる。またエッジクラウド間も連携することで持続可能なネットワークが構築され、ミッションクリティカルなサービスにも適用が可能となる。

4. MEC を活用したアプリケーションの実装例

3. で議論した B5G/6G エッジクラウドを活用した超スマート社会向けアプリケーションの一例として、筆者らが開発した Augmented information on MEC の取組みを紹介する。Augmented information on MEC は、スマートフォンに表示されたカメラ映像に目的地までのルートや関連する 3D オブジェクトを利用者の位置に応じて重畳して可視化できるアプリケーションである（図 8）。

従来の AR アプリケーションでは、大容量の 3D オブジェクトを瞬時に表示するために、利用しないデータも含め、あらかじめスマートフォン内（アプリケーション内）に大容量のデータを保存しておく必要があり、アプ

리케이션の容量が大きくなることやインタラクティブに表示できる情報が限られていた。本アプリケーションではそれらのデータを利用者の近傍の MEC に格納しておくことで、位置情報と VPS 情報をトリガに必要な 3D コンテンツのみを低遅延かつ高速に端末に読み込むことが可能になり、ネットワークリソースと端末のストレージの最適化を実現し、かつ多様なデータをインタラクティブに表示できる特徴がある。

また、本アプリケーションはリアルタイムで送信されたカメラ映像を用いて MEC 上で物体認識を行い、結果を低遅延でスマートフォンへ応答する機能も実装しており、端末の位置情報だけでなくその場の視覚情報に応じて必要な情報を付加することが可能である。例えば、図 9 は走行中の自転車を見た際に AR アプリケーション上に関連する情報が表示された様子である。将来的には、実環境に偏在した各種センサなども活用し、MEC に集約された近隣の走行車両情報や混雑状況などの時々刻々と変化する周囲環境に応じて瞬時にルート変更を提示したり、立入禁止などのアラートを表示することも可能になる。

5. む す び

本稿では、B5G/6G におけるエッジコンピューティングの役割と超スマート社会への展開について説明した。更に東京工業大学大岡山キャンパスに構築している B5G/6G の実証フィールドを紹介し、超スマート社会に向けたアプリケーションの例として AR ナビゲーションと物体認識について紹介をした。本稿で、B5G/6G に向けて加速する研究開発の第一歩を感じて頂けると幸いである。

謝辞 本成果の一部は、情報通信研究機構（NICT）の Beyond 5G 研究開発促進事業（#00101）の一環として行われたものである。ここに記して感謝の意を表したい。

文 献

- (1) K. Sakaguchi, T. Haustein, S. Barbarossa, E.C. Strinati, A. Clemente, G. Destino, A. Pärssinen, I. Kim, H. Chung, J. Kim, W. Keusgen, R.J. Weiler, K. Takinami, E. Ceci, A. Sadri, L. Xian, A. Maltsev, G.K. Tran, H. Ogawa, K. Mahler, and R.W. Heath Jr., "Where, when, and how mmWave is used in 5G and beyond," IEICE Trans. Electron., vol. E100-C, no. 10, pp. 790-808, Oct. 2017.
- (2) K. Sakaguchi, R. Fukatsu, T. Yu, E. Fukuda, K. Mahler, R. Heath, T. Fujii, K. Takahashi, A. Khoryaev, S. Nagata, and T. Shimizu, "Towards mmWave V2X in 5G and beyond to support automated driving," IEICE Trans. Commun., vol. E104-B, no. 6, pp. 587-603, June 2021.
- (3) K. Sakaguchi, G.K. Tran, H. Shimodaira, S. Nanba, T. Sakurai, K. Takinami, I. Siaud, E.C. Strinati, A. Capone, I. Karls, R. Arefi, and T. Haustein, "Millimeter-wave evolution for 5G cellular networks," IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 3, pp. 338-402, March 2015.
- (4) Robot OS.



図 8 Augmented information on MEC



図 9 物体認識の様子

<https://www.ros.org/>

- (5) 超スマート社会推進コンソーシアム,
<https://www.sss.e.titech.ac.jp/>
- (6) <https://corp.mobile.rakuten.co.jp/innovation/cloud-network/>
- (7) J. Nakazato, Z. Li, K. Maruta, K. Kubota, T. Yu, G.K. Tran, K. Sakaguchi, and S. Masuko, "MEC/Cloud orchestrator to facilitate private/local beyond 5G with MEC and proof-of-concept implementation," *Sensors* 2022, vol. 22, no. 14, 5145, 2022.
<https://doi.org/10.3390/s22145145>
- (8) 中里 仁, 朽津光広, 板垣 毅, 南里将彦, "仮想化ネットワークの現状と今後の展望に関して," 信学誌, vol. 105, no. 8, pp. 757-761, Aug. 2022.

(2022 年 9 月 1 日受付 2022 年 9 月 16 日最終受付)



なかざと けい
阪口 啓 (正員: フェロー)

1998 東工大大学院修士課程了。東工大助教, 准教授, 阪大准教授, Fraunhofer HHI 研究主幹などを経て, 2017 から東工大教授。また 2018 から(株)オロ取締役, 2019 から東工大超スマート社会卓越教育院長を兼務。博士 (学術)。セルラネットワーク (5G/6G), MIMO 通信, 無線電力伝送, 自動運転, 超スマート社会などの研究に従事。IEEE シニア会員。著書「無線分散ネットワーク」「ソフトウェアで作る無線機的设计法」など。



なかざと じん
中里 仁 (正員)

2015 電通大学院修士課程了。同年, 富士通株式会社に入社。SDN・NFV コントローラの研究開発に従事。2020 に楽天モバイル株式会社で 5G 仮想化及びエッジクラウドの研究開発に従事。2022 東工大工学部電気電子系博士課程了。2022 から東大・特任助教, 東工大研究員に着任。博士 (工学)。IEEE 会員。



くぼた けいいち
久保田 啓一

1998 広島大学院システム工学科にて修士 (工学) を取得。同年, 京セラ株式会社に入社し, 携帯無線に関わる業務に就く。2001~2018 Nokia, Renesas Mobile, Broadcom, Qualcomm 社で 3GPP 標準化要員として 3GPP 標準化に貢献。2018~2020 に楽天モバイル株式会社で 5G インフラ開発担当部長を経て, 2020 に独立。現在は 5G/Beyond 5G 技術に関わる(株)Node-A と(株)ISL Networks の代表取締役社長。



ふくだ えいすけ
福田 英輔 (正員: フェロー)

1979 東北大・工卒。同年, (株)富士通研究所に入社。デジタルマイクロ波無線通信方式用要素技術の研究開発に従事。その後, 第 2 世代移動通信方式 (PDC), 第 3 世代移動通信方式 (W-CDMA), 第 4 世代移動通信方式 (LTE) などの移動通信システムの研究に従事。3GPP TSG-RAN 副議長 (2001~2005)。日本 ITU 協会賞功績賞 (2006)。2015 東大大学院工学系研究科博士課程了。2019 から東工大・特任教授。工博。IEEE 会員。



くちつ みつひろ
朽津 光広

モバイル開発・検証業務として 15 年以上の経験を持ち, 大手通信ベンダを経て, 楽天モバイル株式会社入社。同社品質保証プラットフォーム本部 QA マルチアクセス部長。Beyond 5G 推進コンソーシアム Open RAN 推進分科会の副主査。マルチベンダ機器の 4G/5G vRAN 品質保証の実行責任者を担い, O-RAN Alliance に基づき Test & Integration の標準化活動を実施。



ますこ むねたか
益子 宗 (正員)

2008 筑波大学院システム情報工学研究科にて博士 (工学) を取得。同年, 楽天グループ株式会社楽天技術研究所に入社し, コンピュータビジョンや HCI の研究領域のマネージャーを歴任。新しい顧客体験を目指した R & D や領域横断的なオープンコラボレーションを推進。2019 から筑波大芸術系教授, 2020 から楽天モバイル株式会社 5G 本部ビジネスソリューション企画部部長を兼任。