

4-4 自律型モビリティ活躍社会におけるソーシャル ICT データ流通テストベッド “Piggy-back Network” の研究開発

4-4 *Research & Development of Social-ICT Data Distribution Testbed “Piggy-back Network” in the Autonomous Mobility Active Society*

4-4-1 Piggy-back Network の概念とモビリティ間近接機会利活用技術の研究開発

4-4-1 *The Concept of Piggy-back Network and the Research & Development of the Technique to Exploit Proximity Chances between Mobilities*

荘司洋三 中内清秀 渡辺良人

SHOJI Yozo, NAKAUCHI Kiyohide, and WATANABE Yoshito

本稿では、2030年代における社会を自律移動型のロボット自律型モビリティ活躍社会と位置づけ、自らが置かれた環境や状況等をリアルタイムかつ詳細に把握し、自らの判断できめの細かい移動制御を行うことが可能なモビリティ自身の移動力によってデータを運び流通させると同時に、超高周波 IoT 無線を使い近接した他のモビリティとの間でデータの交換を行うことで、発生したデータを宛て先まで転送するデータ流通テストベッド、「Piggy-back Network」の構想について述べる。Piggy-back Network 実現の鍵となる3つの課題①近接機会を活かす技術、②近接機会を創出する技術、③近接機会を管理する技術のうち、特に①近接機会を活かす技術について、すれ違い通信における通信容量についての理論的な考察も踏まえて議論したうえで、自律移動型ロボットを用いた実証システムによって得られた検証結果について述べる。

This paper describes the concept of the Piggyback Network, which is a testbed network to enable data transfer and switching utilizing autonomous mobilities with millimeter-wave IoT devices, based on a forecast that a lot of distributed autonomous mobilities will support 2030's society. It is discussed that three technical challenges, i.e., the techniques to exploit a proximity chance and time, to intelligently create proximity chances, and to manage proximity chances, should be pursued in order to make the concept into reality. In particular, the technique to exploit a proximity chance is detailed and the potential channel capacity obtained via passing communication between two mobilities is theoretically analyzed. The concept is prototyped using autonomous service robots and the demonstrative proof of concept is performed.

1 まえがき

SDGs (Sustainable Development Goals) は、2015年9月に国際連合で採択された、国連加盟193か国が2016年から2030年の15年間で達成すべき目標である。SDGsが掲げる目標には“インクルーシブな社会”と密接に関係する目標やターゲットが多く、SDGsを公表した「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」の本文で“インクルーシブ”は40回出てくるキーワードとされる[1]。

“インクルーシブな社会”については、差別の問題や

障害者の権利と併せて議論されることが多いが、これらの課題に限定されることなく、社会を構成するすべての人は多様な属性やニーズを持っていることを前提とし、性別や人種、民族や国籍、出身地や社会的地位、障害の有無など、その持っている属性によって排除されることなく、誰もが構成員の一員として分け隔てられることなく、地域であたりまえに存在し、生活することができる社会を指す。このようなインクルーシブ社会の実現には、Beyond 5G ないしは 6G としての情報通信技術の発展と寄与が欠かせない。既に情報ネットワークは我々の暮らしにおいて、水道・電気・ガス

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発

と同程度の無くてはならないライフラインと化しており、地理的・社会的な事情によって必要な情報にアクセスできない、ないしは必要な情報が行き届かないことは、医療・福祉・教育から防災・防犯等のほか、ほぼ全ての少子高齢化や過疎に関わる課題とも関連して、極めて多岐にわたる領域において不都合をもたらすことが容易に想像できる。

日本国内の情報通信ネットワークの動向や性能に目を向ければ、2020年に商用サービスが開始された5G無線ネットワークで、初めてミリ波帯*を使った携帯ネットワークの利用が可能となり、2021年10月1日現在、受信時最大4.2 Gbps、送信時最大480 Mbpsの通信速度が実用となった。一方で短距離無線である無線LAN (Local Area Network) や無線PAN (Personal Area Network) におけるミリ波帯の利用では、10 Gbpsを超える通信速度を達成可能な無線通信デバイスも既に実用化されているが、いまだ十分な普及には至っていない。

さらにはオールジャパン体制で5Gの次の世代のネットワークであるBeyond 5Gのコア技術に関わる研究開発の推進と関連市場での競争力増強を促進するため、Beyond 5G推進コンソーシアムも結成されている[2]。総務省国際戦略局出版の「Beyond 5G 研究開発促進事業 研究開発方針(令和3年9月22日)」における項目「1. 目的・概要」には、「2030年頃に導入が見込まれる5Gの次の世代のBeyond 5G(いわゆる6G)は、サイバー空間を現実空間(フィジカル空間)と一体化させ、Society5.0のバックボーンとして中核的な機能を担うことが期待されている。Beyond 5Gは、従来の5G以上に国民生活や経済活動を支える社会基盤として、あらゆる組織や産業において活用されることが想定されるため、我が国はBeyond 5Gの早期かつ円滑な導入を目指す必要がある。」とあり、主要な研究開発課題が別添「『Beyond 5G機能実現型プログラム』の研究開発課題候補リスト(第2版)」として記されている。

ここに掲げられたBeyond 5Gの方向性を特徴づける研究開発課題には、超高速・大容量化を実現する技術や、超低遅延を実現する技術、超多数同時接続を実現する技術など、5Gの特徴的機能を更に高度化・発展させる方向性も含まれるが、より注目すべき点として、超低消費電力、自律性、拡張性、超安全・信頼性を実現する技術の研究開発の重要性が掲げられている点がある。関連して、NTTドコモによるホワイトペーパー「5Gの高度化と6G」(2020年7月第2版)に記載の「図6-6Gが目指す無線技術への要求条件」(出典元は文献[3])に依れば、Extreme coverage(超カバレッジ)が掲げられており、地上以外(海中、空、宇宙空間など)をサービスエリアとするための無線技術(空や海、宇宙

空間など)の研究開発が重要とされている。

後の章で詳述するが、これまでソーシャルICTシステム研究室では、人の暮らしが存在する限り、電気・ガス・水道のようなライフラインネットワーク(のいずれか)、衣食住に必要なモノの往来ネットワーク(物流)、公的ないしは私的な交流や様々なサービスの提供を目的とした人の往来ネットワーク(人流)の3つが必ず存在することに着眼した、地域IoTネットワーク基盤の構築を目指した実証的な研究開発をNICTが保有するテストベッド設備を自ら活用して推進してきた。これら活動によって得られた知見は、今後NICTが保有・運用するBeyond 5Gテストベッド設備の仕様等へフィードバックすることが重要と考えている。特に、“データの地産地消”と“人流・物流にデータの流通も託す”を、地域の情報ネットワーク設計の基本コンセプトとして掲げ、伝えるべきデータが有ろうが無かろうが、必然として存在する上記物流や人流を積極的に活用して必要な物資と併せて情報の収集・配信を行うネットワーク(これをPiggy-back Networkと命名している)の有用性と有効性を示すための実証的研究開発を推進している[4]。

ところで2030年代は、少子高齢化や過疎、人手不足といった社会課題への対策として、人やモノを運ぶための移動手段(車両等)の操縦手法が、人自身によるマニュアル運転中心から、目的に則した適切な移動制御を自律的な判断に基づいて行う自律型モビリティへと急速に置き換わっていく過渡期と考えられる。自律型モビリティ技術の発達に伴い、徐々に人の判断を介する領域は減少し、時々刻々と変化する天候や交通状況などの状況に加え、到着時間の最短化や消費エネルギーの最小化といった運ばれる人・モノのニーズに応えた最適な移動制御をモビリティが自動で行うことが一般的になると考えられる。また、マニュアル運転では困難であった、きめの細かい周辺モビリティとも協調した発進・停止の制御や速度調整、自動的な迂回経路の選択、僅かな走行位置の調整なども自在となるであろう。さらには陸路の自律型モビリティのみならず、既にドローンの利活用や空飛ぶタクシーなどの話題が盛んであるが、一般消費者が容易に近距離であっても移動やモノの運搬を目的として空路を利用する自律型モビリティを活用する社会となるであろう。これら多様化した自律型モビリティに頼った人流・物流のための移動手段によって、これまで特に少子高齢化や過疎の問題によって人・モノを往来させることが困難で

* ミリ波帯 = 30 GHz ~ 300 GHz の波長がミリメートルオーダーの周波数帯。5G無線では28 GHz帯が用いられており、正確には準ミリ波帯であるが便宜上ミリ波帯と呼ばれている

あったり、高コストであったエリアまでモビリティを往来させることが容易になると考えられる。このような、人・モノの往来が困難なエリアは往々にして、採算がとれないとして情報インフラ（ブロードバンドアクセス環境など）の整備が行き渡るまでに長い時間を要してきたが、上述した当研究室の地域の情報ネットワーク設計のコンセプト、“人流・物流にデータの流通を託す”ための手段や技術が確立され、簡単にアドオンで自律型モビリティに搭載できる社会が到来すれば、上記課題の解決の糸口となろう。なお、インクルーシブ社会の実現に向けた課題からはやや逸れるが、本来人や物資を運ぶために必要であるモビリティにデータも運ばせることは、ネットワーク敷設のコスト削減に留まらずネットワークに必須な通信そのものやデータ交換に必要なエネルギーでさえ削減できる潜在的可能性も秘めている。

当研究室が推進する Piggy-back Network の設計原則として冒頭記載した設計概念“データの地産地消”については、多くの情報が、その発生源近郊ほど、また発生時刻からの経過時間が短いほど利用価値が高いという事実ののっとり、特に地域で発生した情報を多量なエネルギーを消費するクラウド（データセンター）に預けるのではなく、まずはデータ発生源の周辺に位置するデバイス等で共有し消費することを推進する試みである。ここで用いるデータの流通原理については、設計指針“人流・物流にデータの流通も託す”に基づき、移動体が自らの移動能力によってデータを物理的に運ぶことを最大限活用し、データの交換については、データを運搬中の移動体が行き先の異なる他の移動体と近接した機会を活用して、いわゆる“すれ違い通信”によってデータを転送するないしは共有することを動作原理としている。よってデータを運搬中の移動体は、データを遠方まで時間をかければ運ぶことができる（なお、時間の経過とともにデータの価値も低下するとされるので、最後にはデータは廃棄される）また、移動範囲が広がるに従い、一般的に他の移動体との近接機会も増加するため、データの発生源近郊を中心にデータの配信や拡散も可能となり、“データの地産地消”とも相性の良いデータ流通方式と言える。

さらに、次節以降で詳説するように、移動体間のすれ違い通信で用いることのできる無線通信能力は、今後 10 Gbps を更に大幅に超える 100 Gbps や、1 Tbps といった非常に高速になり、すれ違い通信におけるデータ転送時間を極めて短縮することに成功すれば、データの転送・拡散時間は実質移動体が物理的に移動する時間のみによって支配されることになる。歴史を遡れば、江戸時代以前の飛脚に始まり人・物の移動手段と通信手段は密接な関係にあることは自明である一

方で、近年の携帯電話ネットワークやインターネット社会に慣れてしまった我々は、一見移動体にデータの転送を託す方式が、リアルタイム性に欠けた非常に低速なデータ転送手段だと考えがちである。しかしながら、十分に（転送しようとするデータサイズによっては極めて）大容量の通信ネットワークインフラが整備されていない拠点やエリアにおける情報収集や情報配信手段としては、物理的な移動体の移動にデータの移動も託したほうが、データの伝達速度はむしろ高速になることは容易に証明可能であり、特に前述したインクルーシブ社会や、Beyond 5G の要素として掲げられている超カバレッジの実現という目標も考慮すると、この有効性はより顕著であろう。

次節以降の構成について述べる。2 では Piggy-back Network の概念と課題について概説する。3 では、ミリ波 IoT を用いたすれ違い通信容量に関わる理論とモビリティ制御の有効性に関わる議論を行う。4 にてミリ波 IoT 搭載自律型移動ロボットを使ったデータ転送実証システムのプロトタイプについて紹介し、モビリティ制御の位置方針である「ストップ&ゴー」効果の検証結果を示す。

2 Piggy-back Network の概念と課題

2.1 Piggy-back Network の基本概念

1 で述べたとおり、当研究室が提唱している Piggy-back Network は、“データの地産地消”をその設計原則としており、人の暮らしが存在する限り、電気・ガス・水道のようなライフラインネットワーク（のいずれか）、衣食住に必要なモノの往来ネットワーク（物流）、公的ないしは私的な交流や様々なサービスの提供を目的とした人の往来ネットワーク（人流）の 3 つが必ず存在することに着眼し、これら情報流通網に暮らしに必要な情報を更に重畳して届けようとするものである。

図 1 に Piggy-back Network のシステム概念を示す。データが転送される基本原理としては、携帯電話ネットワークを介することを前提としないことを特徴とし、図 1 の中心部に位置するライフラインネットワークを活用したデータの収集・配信・共有に基づくものがまずあり、次に暮らしと密着したサービスに関連する固定施設と、さらにこれと関連するモビリティ間が近接時に直接ワイヤレス通信を行いつつ、データの物理的な移動、特に中距離から長距離の移動についてはモビリティの移動能力（データ搬送）に任すことを大きな特徴としている。なお、モビリティによるデータ搬送については、一台のモビリティのみに任せることなく、異種サービスのモビリティ間が互いに近接した場合に、データをワイヤレス通信で共有することで、より多方

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発

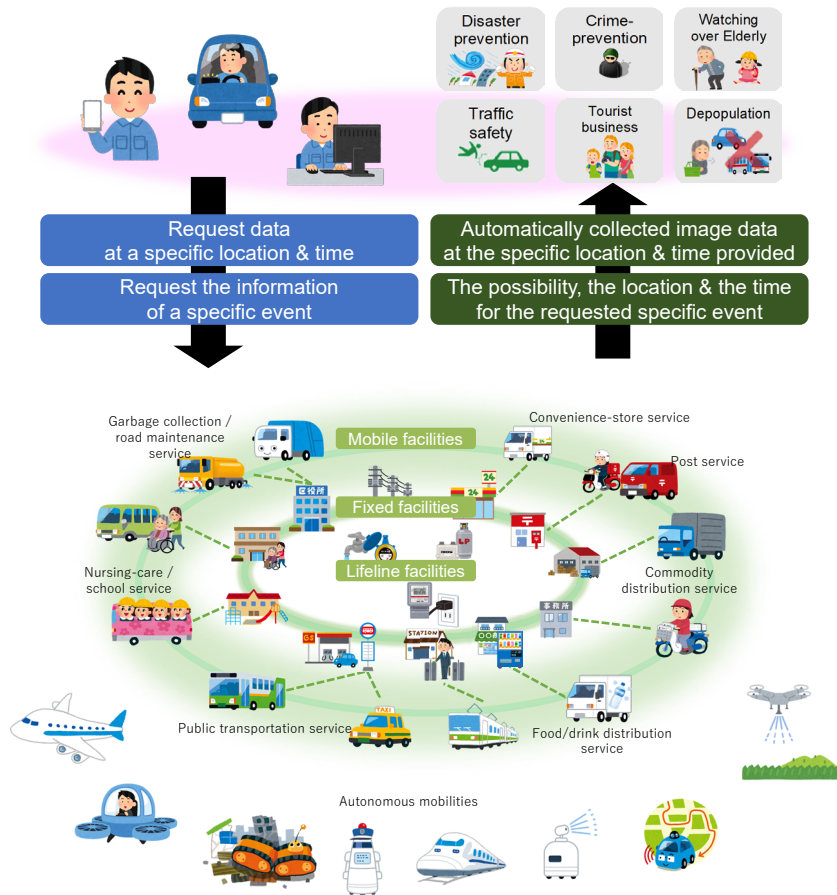


図1 Piggy-back Networkとデータ流通・利活用の概念

向へのデータ搬送が可能となる。

データの搬送に貢献するモビリティについては、データ転送サービスに専用化した形態も考え得るが、基本は既存の我々の暮らしに必須のサービス（教育、医療、福祉、飲食、公共、運搬等）を提供するうえで必要な固定設備と、それに付随するモビリティの活用が重要と考える。特にデータの物理的な移動に貢献するモビリティについては、通常、何某かの本来サービスを提供するために、ある拠点からある拠点へと目的を持って移動するわけであるが、このモビリティの移動と、転送したいデータの移動ニーズ（転送ニーズ）が合致した場合に、上記モビリティに該当データの“ついで搬送”を依頼することは、様々なエネルギー消費の側面から見ても効率的と考える。

また、冒頭でも述べたように、2030年代は、少子高齢化や過疎、人手不足といった社会課題への対策として、人やモノを運ぶための移動手段（車両等）の駆動手法が、人自身によるマニュアル運転中心から、目的に則した適切な移動制御を自律的な判断に基づいて行う自律型モビリティへと急速に置き換わっていく過渡期と考えられる。クラウドリソースとも連携したエッジコンピューティング技術の進展にも支えられ、各種サービスの提供を目的とした自律型モビリティが、

オーナーが事前に設定したポリシーに従い、様々なきめの細かい条件をリアルタイムに考慮したうえで、可能な範囲の余剰リソース（エネルギーや時間）をほかの目的と共有する形態のシェアリングエコノミーが台頭すると考えている。Piggy-back Networkについても、このような方法で、極めて多様な事業者が、自らが本来サービスの提供を目的として保持する施設やモビリティの余剰リソースを提供することで地域のデータ流通を効率的に行うことが可能になると考えられる。一方で、目下のUber社によるサービスのように、サービス提供者を個人レベルまで行き渡らせるプラットフォーム運用者も現れるであろう。

2.2 Piggy-back Networkが目指す最終動作ゴール

データの地産地消をベースに、人流・物流にデータの流通も託すことをネットワーク原理とするPiggy-back Networkであるが、目指している最終動作ゴールとしては「最寄りに尋ねれば何でも知っている（Neighbor Knows Everything）」状態を目指している。言うまでもなく、本来必要な情報は分散しており、特定の場所にしか存在しないものも多いことから、これは情報の利用者視点で見るときにあたかもそのように見える振る舞いをするということである。データの地

産地消の視点に立ち戻れば、ほとんどの必要かつ有効な情報を物理的な近隣拠点に複製保存しておく、もしくは複製保存されていない場合には、その場所から即座に保存先拠点を見つけ出して取得することが可能であれば良い。一例として、一地方自治体レベルであれば、全ての人が例えば100メートル以内の物理的拠点に“立ち寄れば”、あらゆる情報が得られるという状況であり、その程度の稠密度で考えるなら、大容量ネットワーク回線を付帯させた大容量ストレージを配備する事自体は、技術的にはさほどチャレンジングな課題ではなくなっている。また100メートル以内と言わず、数メートル以内や手を伸ばせばあらゆる情報が得られるという究極の形が目下の携帯電話やスマートフォンの状況だと考えれば、あとは超カバレッジやインクルーシブ社会にも通じる、どこでも・誰でもそのような環境を提供できるのか？という到達レベルの問題になる。

あらゆる全ての国民が分け隔て無く、すぐ最寄りに情報拠点を有する手段として、ライフラインネットワークを活用することは極めて有効と考えられる。ライフラインネットワークを用いる場合、例えば電力線通信方式（いわゆる、PLC：Power Line Communication）を用いた情報ネットワークの検討や普及活動は長らくあったが、十分に普及したとは言い難い。一方で、過去10年程度で電気・ガス・水道の使用量を、人手を介さずリモート検出可能とするほか、HEMS（Home Energy Management System）を構成して、家庭内等のより詳細な消費電力の内訳等が見える化し、積極的な省電力制御を行うことを可能とした、スマートメーター技術の発展・普及が十分に促進され、特に電力各社の総導入状況としては2019年3月末時点で5,182万戸世帯（全世帯のおよそ63%相当）、2023年末に全世帯ほぼ100%への導入が完了する状況である。これら各世帯のスマートメーターと電力会社の間をつなぐネットワークを、例えば家屋内の状態センシングや住人の積極的な発信情報の収集と、同家屋内の生活者向け情報の配信ネットワークとして活用できれば、あらゆる暮らしのある場所に対するユニバーサルで、極めて低コストかつ効率的な情報ネットワーク構築手法となる。また、さらにはその家屋周辺の状況までを含めた地域情報の収集・配信にまで活用できれば、地域の情報収集・配信ネットワークとしても極めて有効であろう。そのような発展に向けた活動がより活発化することは、今後見込める一方で、無線通信ネットワークを使った情報配信範囲の広がり及び伝達即時性と、伝えることが可能な情報量の関係はトレードオフの関係にあることから、近年の超ブロードバンドのニーズに応える手段としてライフラインネットワークを直接利

用することは難しい。

前述した超ブロードバンド環境のニーズにも応えることが可能であり、一方で新たな専用のインフラ整備も必要としない地域ネットワークの構築手法として掲げるのが、“人流・物流にデータの流通を託す”原理の下、冒頭で記載した今後過渡期にはいる自律型モビリティを活用したPiggy-back Networkの構築構想がある。あらゆる情報消費者に対して、大容量データであっても低コストかつ低レイテンシで届けるために、事前に既存の自律型モビリティの移動を活用して効率的に情報を配備しておく。そのためにはアクセス頻度の高い情報についての推定技術の確立も必要であろう。またユーザに対しては原則超ブロードバンドでの無線アクセス環境を提供することと同等のユーザ体験を提供する必要性があると考えられる。

2.3 Piggy-back Networkを支える3つの研究開発課題

前述したPiggy-back Networkの構築においては、次の3つの技術的課題、すなわち①近接機会を活かす技術、②近接機会を創出する技術、そして③近接機会を管理する技術、が必要と考えている。以下その概要について説明する。

①近接機会を活かす技術

“人流・物流にデータの流通も託す”をネットワークの原理として、データの中長距離移動は物理的なモビリティによる移動力（搬送力）に頼りつつ、交換はモビリティ間でのすれ違い通信によって実現すると述べた。異なるモビリティ間で大容量のすれ違い通信を実現するためには、ミリ波帯等の超高周波を使った超広帯域な周波数資源を使ったデータ伝送が有効と考えられるが、長距離・広範囲に渡ったデータ伝送は難しい。よって、極めて短時間のうちに効率的にデータ転送を行う必要がある。

このような目的に対して極めて相性の良い技術規格としてIEEE802.15.3 e[5]準拠の無線規格を用いる次世代TransferJet通信規格（以下、TransferJet-Xと記載する）がある。TransferJet-Xの最たる特徴は60 GHz帯等のミリ波帯を使った10 Gbps超のデータ伝送速度のみならず、リンク確立の時間を僅か2ミリ秒以下として短縮していることにある。図2は、上記15.3 e標準規格に関わるドキュメント[6]に記載されている、リンク確立時間は2ミリ秒以下にする必要があることの根拠されているリンク確立時間と伝送可能ファイルサイズの関係を示したものである。TransferJet-Xを使った応用例として期待されているサービスに、駅等の通過ゲートにおける課金を非接触（無線）で行うタッチレ

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発

スゲートの構想がある。利用者は、ゲート通過と同時に大容量コンテンツをダウンロード可能とする。人が改札ゲート付近に構築可能なミリ波通信可能エリアを通過してしまう時間がおよそ 250 ミリ秒であることから、この時間内でコンテンツをダウンロードさせる必要がある。図 2 は、通信可能時間が 250 ミリ秒であった場合におけるリンク確立に要する時間とダウンロード可能なファイルサイズ(伝送データ量)の関係について、異なる複数のデータ伝送速度別で示されているが、同図より通信速度が 28 Gbps を達した場合に、250 ミリ秒内で H.265 圧縮の HD 動画コンテンツ 2 時間分 (859 MB) のコンテンツをダウンロードさせるためには、リンク確立時間を 2 ミリ秒以下に短縮する必要があることが分かる。

同様の議論は、リンク確立時間だけに必要なものではない。仮にリンク確立以外に必要なプロトコルオーバーヘッドが想定される場合も注意が必要であることは想像に難くない。例えば、デバイス間認証に関わる処理に要する時間や、データ転送を行う具体的ファイル部分の抽出処理に要する時間なども考慮したうえで、

最終的にはアプリケーションデータの伝送(ダウンロード)を完了させるように設計する必要がある。

我々は上記のようなデバイス間認証に必要な情報や、データ転送を行う具体的ファイル部分の抽出処理に要する情報を TransferJet-X によって達成される超大容量ではあるが極めて狭域な通信可能エリアにモビリティが達する前、おおよそ数十メートルないしは数百メートル手前の時点で、920 MHz 帯(サブギガ帯)を使った中距離伝送が期待できるマイクロ波 IoT 無線技術を併用して事前交渉・認証を行うことで、ミリ波帯を使ったデータ通信可能時間を制御系の情報交換のための消費しない方式を検討中である。

図 3 に、デバイス A とデバイス B がマイクロ波 IoT を用いて互いの状態や状況を把握しつつ、近接した後にミリ波 IoT によって大容量データ伝送を行うことを想定した、事前交渉・認証方式のおおまかなフローチャートを示す。まずデバイス A はマイクロ波 IoT によって近接可能な近隣デバイスを検索することでデバイス B の存在を認識する。次にデバイス A はデバイス B に対して、ミリ波 IoT 通信リンクが確立された後にアプリケーションレベルで必要となる認証要求を事前に行う。このような事前の認証作業によって、デバイス A はデバイス B とミリ波 IoT によって通信可能な範囲まで移動してリンクが確立された直後に、必要な大容量データの転送を行うことができる。実装上は、マイクロ波 IoT を用いた事前交渉のタイムアウトに関わる設計方針や、複数モビリティが対象となった場合の処理順序の問題などが考えられる。また、状況によっては物理的に近接してミリ波 IoT を用いたデータ転送を行うよりも、低速であってもマイクロ波 IoT 等を活用してデータ転送を行った方が結果的に早くに情報の転送が完了することも考えられるため、検討が必要である。

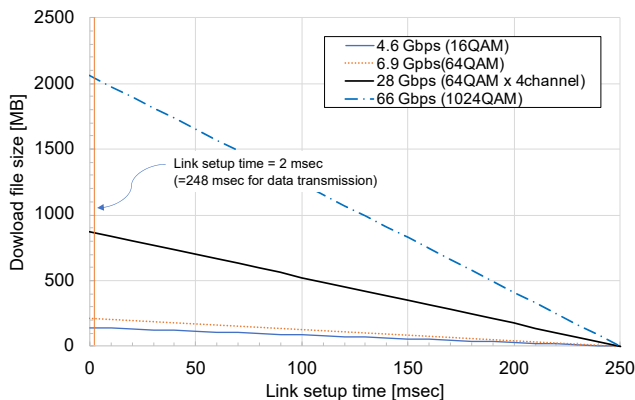


図 2 リンク確立時間と転送可能ファイルサイズの関係[4]

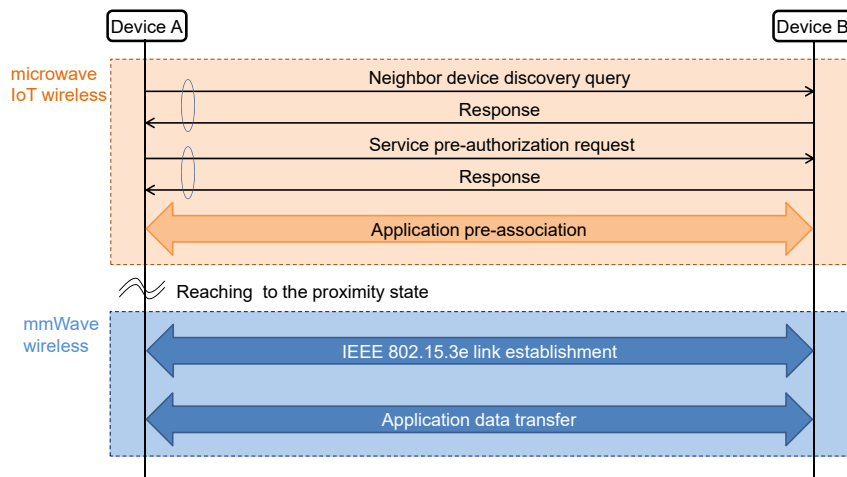


図 3 マイクロ波 IoT を併用した事前交渉・認証方式のフロー

なお、我々はこのようなミリ波 IoT を活用したモビリティ間のすれ違い通信を実現する際の、モビリティの制御方針として「ストップ or スローダウン & ゴー」と「キャッチアップ&ランデブー」というユニークな方針を打ち出している。1 で記載したとおり、自律型モビリティについてはマニュアル運転とは異なる、環境性検出とも連携した、きめの細かい移動制御がより容易になるであろうと推察される。が、「ストップ or スローダウン & ゴー」については、収集・配信しようとするデータの容量や、ミリ波 IoT によって通信可能な範囲に関わる情報等に基づき、モビリティ間ですれ違い通信が可能となる時間を調整する(長時間化する)ために、必要に応じて速度を落としてすれ違う、もしくは最適な位置関係で一時停止することは有効と考えられる。

さらに「ストップ or スローダウン & ゴー」の考え方を発展させたモビリティ制御方針が「キャッチアップ&ランデブー」である。これはミリ波 IoT を用いてすれ違い通信を行おうとするモビリティ間の立場関係が同等ではなく、例えば片側が目下何かの業務で稼働中のモビリティ(働くモビリティ)であり、他方がこれに対して情報の収集や提供といったサービスを提供しようとするモビリティ(支援モビリティ)である場合に特に有効と思われる制御方針である。このような場合、明確な業務目的を持って稼働中である働くモビリティに停止や速度低下といった制御を強いることは受け入れられない可能性が高く、このようなモビリティに対して、支援モビリティはサービスの提供相手となる働くモビリティの稼働を止めたり妨害することなく、大容量の情報を収集してあげたり、配信してあげる必要がある。そこで、まずはサービスを提供する相手をまず発見し、捕捉(キャッチアップ)した上で、追尾しながら近接を維持したまま移動(ランデブー)することで、実質的に双方が停止して通信する場合と同等の効果を得ることができる。

述べるまでもなく、キャッチアップ&ランデブーに

基づいたモビリティ制御には、発見～捕捉～追尾しながらのミリ波 IoT 通信の継続といった高度で挑戦的な技術課題を総合的な視点で解決するための研究開発を必要とする。

②近接機会を創出する技術

既に述べたように Piggy-back Network においてデータキャリアとして活躍するモビリティとしては、既に何がしかの業務やサービスに従事しているモビリティをまず主役と考えており、これら異業種かつ多様なモビリティが本来業務や本来サービスを行ううえで、“ついで”や“ながら”で提供できる空きリソースを上手く活用することを本質とする提案である。このような、いわばシェアリングエコノミーと同様のリソース共有の仕組みを上手く促進するためには、共有・提供可能なリソースの発見・抽出技術と、そのリソースを有効活用できるニーズ(Piggy-back Network の場合はデータ転送ニーズ)とのマッチング技術が欠かせない。

我々は過去に、タクシー会社の協力を得て営業中タクシー 65 台の移動データを使い、深層学習に基づくモビリティ予測技術の開発と有効性も検証してきた。例えばクラウド側で運ぶべきデータの発生拠点の検出と同時に、そのデータが転送されるべき先(宛て先拠点)、ないしは転送に有効な中継先を検出したうえで、この2つの拠点間の経路を今後移動するモビリティを予測することができれば、該当するモビリティにデータ転送を促すことが可能となる。図4はクラウド・エッジとの連携処理で、モビリティに迂回や特定拠点への立寄りを依頼する様子の模式図であるが、実際にモビリティが該当データの転送に貢献するためには、データを収集ないしは配信するために、僅かながらの遠回りや迂回、そして一時停止を強いられることもあり得るであろう。しかし、目下のUberに見られるシェアリングエコノミービジネスのように、データ転送に貢献することで報酬(インセンティブ)を与える仕組みをプラットフォーム化して運用できれば、より効果的な

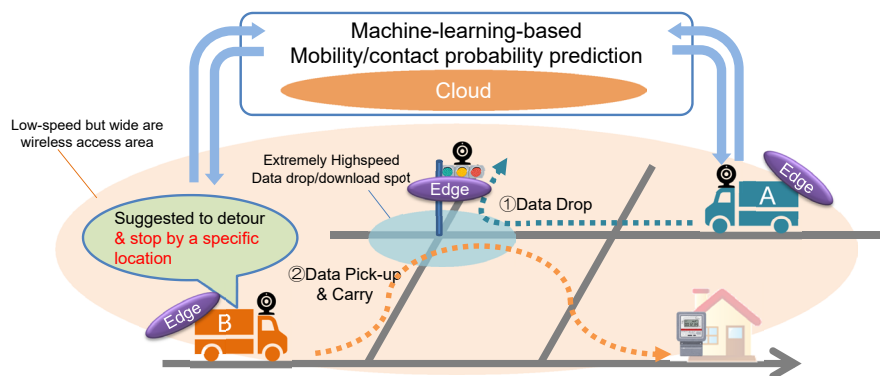


図4 モビリティ予測を用いたモビリティ制御の概念

データ転送ネットワークを構築することができると思われる。

③近接機会を管理する技術

Piggy-back Network の構築に必要なしは有効な、上述したような①近接機会を活用する技術、②近接機会を創出する技術を確立し、モビリティによるデータの物理的移動とモビリティ間でのすれ違い通信に基づいたデータ交換によるデータ転送ネットワークの基本動作が可能となったとしても、多数のモビリティが介在しつつ、それらモビリティ間で通信が自律的に発生することを鑑みれば、いつ、どこで、どのようなデータが発生し、どの移動体によってどこからどこまで運ばれ、そしてまた新たな移動体に交換されたのか等のイベント履歴を管理することは極めて難しい課題である。特にデータの転送に貢献することで報酬(インセンティブ)を与える仕組みをプラットフォーム化して運用する上では、このようなイベント履歴を厳格に管理する必要があるが、これを現実的な管理計算処理リソースの範囲で実践すると同時に、場合によってはセキュリティやプライバシーの問題も解決できる方法で運用する必要があり、より一層課題の解決を困難にするものと考えられる。このような課題を解決する一つのアプローチとして当研究室では各モビリティに台帳を搭載することで、上述したようなイベントの履歴を分散型台帳技術によって共有・管理することで、効率的かつ改ざんの難しいイベントの発生履歴の管理手法を検討中である。

また、①近接機会を活かす技術とも密接に関連するデータ管理技術として、散在するモビリティが保持するデータのうち、どのデータが他者と共有されるべきデータか、もしくはどのデータが他者によってアップデートされるべきデータを各々が自律的に把握すると同時に、モビリティ間のすれ違い通信機会を得た場合には、即時にこれら把握できている情報を基にデータ

通信を行う必要がある。しかしながら、モビリティが広域セルラー型の携帯ネットワークに常時接続されている状況を考慮しない場合には、モビリティ間の直接データ交換に利用できる通信時間は、やや長時間の通信時間を確保できるマイクロ波を用いたデバイス間通信であれ、ミリ波帯等の超高周波を用いたデバイス間通信であれ有限である。よって、いかに効率的に特に超高速・短時間で行われる超高周波を用いたすれ違い通信に備えて、交換されるべきデータの検索・抽出を正確に行うかは重要な技術的課題と考えられる。

当研究室では上記課題においても、モビリティが保持するデータの交換履歴を台帳管理しつつ他モビリティや場合によっては携帯ネットワークを活用したクラウドとの通信機械を使った分散型台帳技術を利用することで、すれ違い通信が行われる前のごく僅かな時間で、交換されるべきデータの抽出や、そもそもすれ違い通信が可能と予想されるモビリティ間で実際にデータ交換を行うべきなのかを判断できると考え検討している。

図5はモビリティが保有しているデータについて台帳管理されない場合(左)と、されている場合(右)の対比を表現したものであるが、台帳管理されていない場合にはモビリティが保持するデータやデータが細分割されたセグメント化データを個別にバージョン管理すると同時に、すれ違い通信の機会を得たモビリティ間では、全てのデータないしはセグメント化データについてバージョン比較を行うことになる。保持するデータ数が少ない場合には大きな問題にならないが、データ数が膨大になった場合、データの検索と抽出に時間を要することとなり、このデータ検索・抽出処理の時間、モビリティの活動を止めない限りにおいては近接通信の機会を逸することとなる。一方データについては台帳管理されている場合は、データの部分的な更新履歴がブロックで管理されており、僅かな制御メッセージの交換のみでこれからすれ違い通信の機会を得

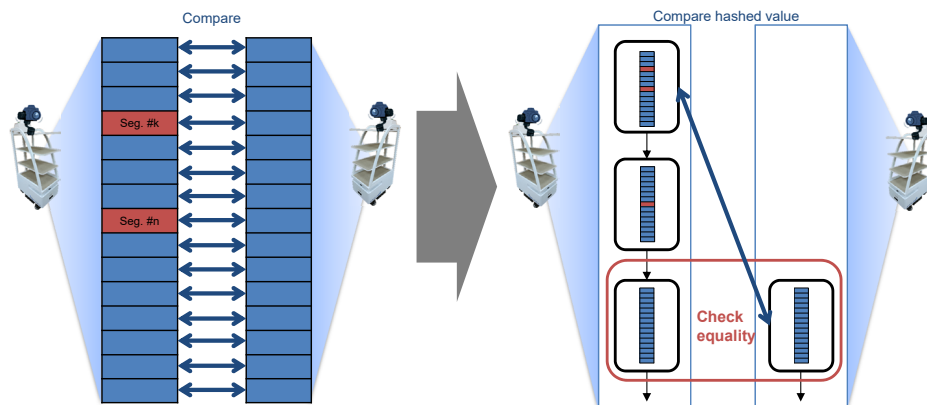


図5 台帳技術を用いたモビリティ間データ同期の原理

るモビリティ間での、差分を短時間で検出することが可能となる。実際の超高周波を用いたすれ違い通信可能時間内に、検出された全ての差分データの転送が可能かどうかはより具体的な条件に依るが、データ数が膨大になった場合は、台帳管理しない場合よりも本方式に依ることが優位であることは自明と考えられる。詳細については、4-4-2「分散型台帳技術を用いた自律型モビリティ利活用データ集配信技術の研究開発」を参考にして欲しい。

なお、上記分散型台帳技術を用いる場合と異なり、交換されるべきデータを事前に強化学習等の手法で推定したうえで、限られた時間のすれ違い通信に臨む手法についても検討中である。これは、他デバイスに交換されるべき新たな更新データが発生する場所や時間について傾向があり、上述したように全てのデータについてバージョン比較を行う時間的猶予がない場合に有効と考えている手法である。こちらの詳細については、4-4-3「強化学習を用いた自律型モビリティ利活用データ集配信技術の研究開発」を参考にして欲しい。

3 ミリ波 IoT を用いたすれ違い通信容量に関わる一検討とモビリティ制御

3.1 ミリ波 IoT を用いたすれ違い通信容量

通信における最大チャンネル容量限界はシャノンによる理論[5]で示されており、以下となる。

$$C = B \log(1 + SNR), \quad (1)$$

ここで、 C は単位 bps のチャンネル容量であり、 B は単位 Hz の帯域、 SNR は信号対雑音電力比である。ここで SNR は変調指数 1 を想定すれば CNR すなわちキャリア対雑音電力比で置き換えても差し支え無い。ミリ波 IoT における無線通信路の CNR は下記で示される。

$$CNR = \frac{P_r}{kTBF}, \quad (2)$$

ここで、 P_r はキャリア受信電力、 k はボルツマン常数、 T は等価雑音温度、 F は雑音指数である。受信電力 P_r は、送信電力 P_t 、送受アンテナ利得積 G_a 、通信距離 d 、波長 λ_c を用いて

$$P_r = P_t \cdot G_a \left(\frac{\lambda_c}{4\pi d} \right)^2$$

と表現できることから、これを式(2)に代入することで、

$$CNR = \frac{P_t \cdot G_a}{kTBF} \left(\frac{\lambda_c}{4\pi d} \right)^2, \quad (3)$$

が得られる。

すれ違い通信を行おうとする 2 台のモビリティ間の相対速度が一定だと仮定した場合、両者間の距離 d_{21} は次のような時間関数で表現できる。

$$d_{21} = |D_{021} + v_{21}t|, \quad (4)$$

ここで、 D_{021} は移動を開始する直前の初期状態における距離であり、 v_{21} は相対速度ベクトルである。

式(1)～(4)によって、以下のとおりチャンネル容量は時間関数として表現可能である。

$$C(t) = B \log \left(1 + \frac{P_t \cdot G_a}{kTBF} \cdot \left(\frac{\lambda_c}{4\pi |D_{021} + v_{21}t|} \right)^2 \right). \quad (5)$$

モビリティがミリ波 IoT によってすれ違い通信を行う場合のチャンネル容量の時間変動の様子の一例を図 6 に示した。2 台のモビリティが有するアンテナの半値幅としては、比較的低利得 (5 dBi) である一方で広ビーム幅 (半値幅 60 度) の場合と、比較的高利得 (24 dBi) であるがビーム幅が狭い (半値幅 5 度) の場合を示した。モビリティ間の移動モデルとしては図 7 に示すように、最接近した場合の距離を 2 m とし、各々が時速 20 km/h で移動すると仮定した。

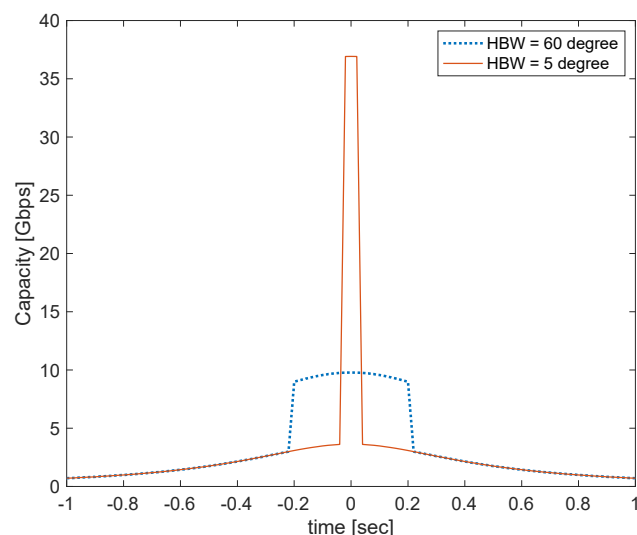


図 6 モビリティ間すれ違い通信における経過時間と通信容量の関係 (一例)

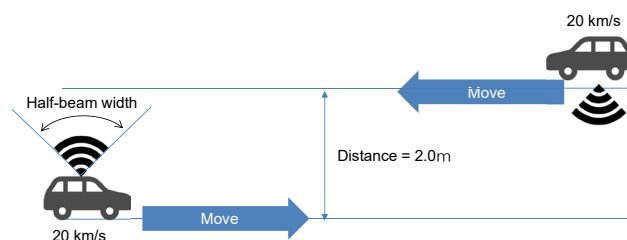


図 7 モビリティ間すれ違い通信における通信容量検討で用いた移動モデル

図6より高利得の狭ビーム幅アンテナを用いた場合には、すれ違い通信時に高いCNRが期待できることから、通信容量としても極めて高い値を示す一方で、その状態が得られる時間はごく僅かあり、逆に低利得ではあるが広ビーム幅のアンテナを用いた場合には、通信容量は下がる、比較的長い時間その状態を維持できることが分かる。転送可能な全データ容量としては、図6における積分値になりこの事例では両ケースにおいてほぼ同等の値を示すが、実環境を考えた場合には、モビリティ間で必ずしも安定的に見通し環境を維持できるとは限らないことから、極力短時間かつ高容量での通信を目指すことが得策と考えられる。

3.2 超高周波IoTすれ違い通信のためのモビリティ制御 ～ストップ&ゴーとキャッチアップ&ランデブー～

上述したとおり、直進性の高いミリ波等の超高周波を用いたIoTによるすれ違い通信では、極めて短い通信可能時間を有効に使うことが重要である一方で、自律型モビリティの普及と同時に、直近のモビリティの移動目的やインセンティブとも照らし合わせ、多少の時間であればモビリティを停止させる、移動速度を落とす、ないしは迂回するといったことが許容されるのであれば、積極的に通信可能時間を拡張できる。

図6に示した時間中において、より高い通信容量を維持できる位置関係で、双方が移動を停止し、目的とするデータの交換終了を確認後に移動を再開するようにすれば(ストップ&ゴー)何もモビリティ制御を行わないすれ違い通信よりも、大容量のデータを確実に交換できることは自明である。また同図において広ビーム幅アンテナを用いた場合に、すれ違い通信可能時間がおよそ400ミリ秒維持できる見通しを示したが、すれ違い通信が可能なエリア付近で各モビリティの移動速度を低下(減速)させたうえで、やはりデータの交換終了を検知した後に本来の速度での移動を再開するようにすれば(スローダウン&ゴー)、すれ違い通信可能時間を拡張することができて、より大容量のデータ交換を成功させられることも明らかである。

上記議論を更に発展させ、データの収集や配信を希望するモビリティが存在する一方で、これに該当するモビリティが上述した停止や減速といったモビリティ制御に対応することが難しい場合の対処方法として、キャッチアップ&ランデブー方式をもっとも有力なモビリティ制御方式として検討中である。本方式では、上記データの収集や配信を希望するモビリティについて一切の移動制御を受け容れる余地のない働くモビリティとして扱いつつ、このモビリティに対して近接し、必要なデータ収集や配信を実施する支援モビリティを

想定する。支援モビリティはまず、データの収集や配信を希望する働くモビリティの存在を検出すると同時に、その近未来での活動位置を推定することで、データ収集・配信に関わる支援に向かう。そして、近接することに成功すればその後は働くモビリティの活動を停止させたり、邪魔をすることなく、その動きに合わせてランデブー走行(併走ないしは追尾走行)することで、実質近距離かつ相対的に停止状態の位置関係を維持しようというものである。

4 ミリ波IoT搭載自律型移動サービスロボットを使ったデータ転送実証と「ストップ&ゴー」効果の検証

4.1 ミリ波IoT搭載自律型移動サービスロボットを使った見廻りデータお届けサービスの実証実験

オフィス・ホテル・病院等のビル内や駅・商業施設等の構内で活躍が期待される様々な業種のサービスロボットの急速な普及展開に着目し、これらサービスロボットが人からの依頼を受け付けて、4Kカメラでの撮影による見廻りを行う自律移動サービスロボット協働型見廻りシステムを、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社と共同で開発した。同一オフィスビル内における実証実験により、見廻り後の撮影データを短時間かつ非接触で見廻り依頼者の再生装置に転送し、自動再生できることを確認した。

図8に、自律移動サービスロボットを用いた見廻りシステムの実証実験の流れ(一例)を示す。

- ① まず、見廻り依頼者は、免許不要920MHz帯を用いるIoT無線デバイスで、周辺の協力可能な自律移動サービスロボットに見廻りを依頼する。
- ② 次に、依頼を受け付けた見廻り場所から近くのロボットは、指定の見廻り場所まで移動し、搭載されている4Kカメラにより撮影を行う。
- ③ 撮影データは、見廻り依頼者の元までロボット自身が運搬し、60GHz帯を用いるTransferJet Xを用いるミリ波IoT無線伝送装置(ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社が開発)によって再生装置に無線伝送されて、自動再生される。

実験では、見廻り依頼者から86.8m離れた見廻り場所における約1分間の撮影データ(約10GB)を、最大移動速度毎秒0.8mのロボットが見廻り場所から依頼者の元まで届け、TransferJet Xによってデータ転送が完了するまで、およそ163秒(移動時間129秒、伝送時間34秒)かかることを確認した。この結果はデータ伝送スループットに換算すると、514Mbps(撮影データ容量を、見廻り依頼者の元に撮影データの転送

が完了するまでの時間で割った数値)に相当する。これは、2021年10月1日現在、国内で商用サービスとして利用可能な第5世代移動通信システム(5G)を用いた場合の技術規格上のデバイス間最大スループット480 Mbpsに匹敵する速度である。なお、本実証実験では、数百m範囲内の2台のサービスロボット間で協調動作を行い、より見廻り場所に近いロボットへの見廻り依頼や、待合せによる撮影データのロボット間受け渡しも可能なことを確認している。

図8に本実証実験で利用したサービスロボットの外観・機器構成を、図9に自律移動サービスロボット内のシステム構成を示す。このロボットは、配膳ロボットとして開発された縦539 mm、横460 mm、高さ1,088 mmの自律移動ロボットで、LiDARと呼ばれるセンサーを使って、常に周辺の障害物等との距離を計測し、障害物を回避しながら自律的に移動することができる。自己位置推定と環境地図作成を同時に行う技術(SLAM: Simultaneous Localization and Mapping)を採用した地図自動作成機能を備えており、リアルタイムに自ら

の周辺環境の変化も捉えた地図を更新しながら現在地を推定し、与えられた目的地点に向かう能力を有している。最大移動速度は、ゆっくりとした人の歩行速度と同程度の毎秒0.8 mである。

図8に示した自律移動サービスロボットには、3軸ジンバルに取り付けられた4Kカメラを搭載した。4KカメラからのHDMI出力映像は、ビデオコンバータを介してデバイス連携用PCに入力され、同PC内でH.264/AVC形式で圧縮保存される。また、ロボットにはTransferJet Xを用いたミリ波通信デバイスが搭載されており、デバイス連携用PCとは、USBケーブル(制御用)及び10 GbE(ギガビットイーサ)ケーブル(データ通信用)を用いて接続されている。ミリ波通信デバイスにはUSBケーブル経由で利用可能な制御APIが備わっており、対向するミリ波通信デバイスとのセッション確立状態や受信電力等の情報の取得が可能である。セッション確立後、撮影データは対向するミリ波通信デバイス間で無線伝送されます。ロボットの目的地設定や移動開始指示など移動に関する制御は、

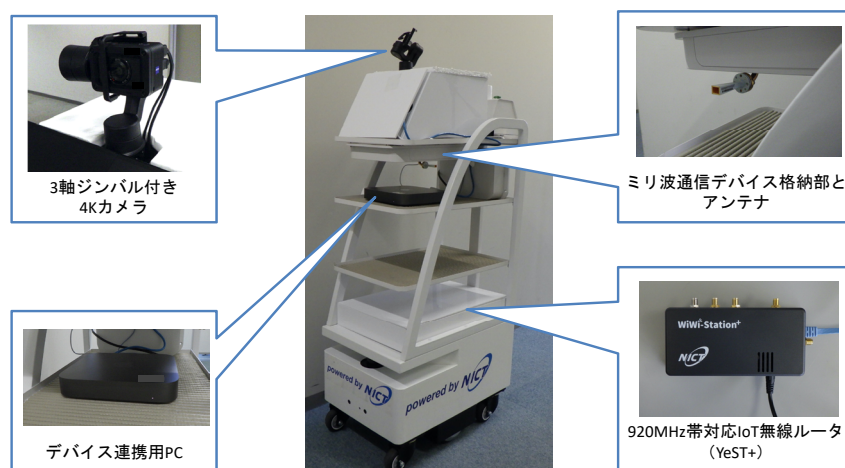


図8 実証実験で利用した自律移動サービスロボットの外観・機器構成

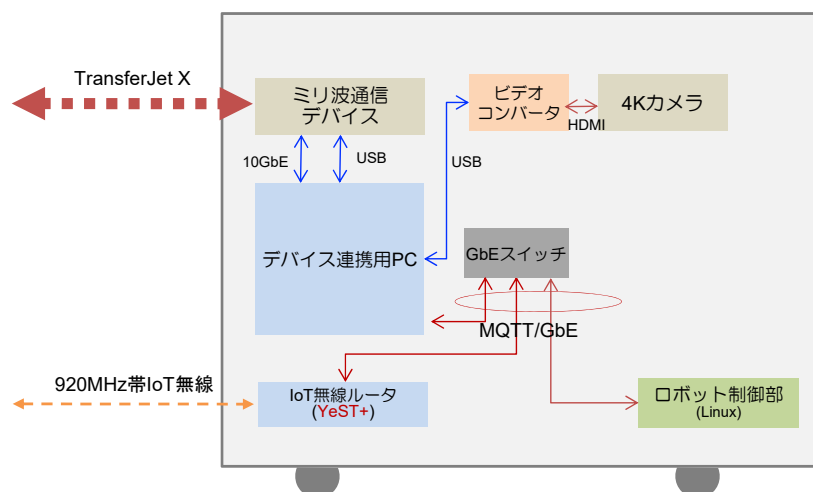


図9 自律移動サービスロボット内のシステム構成

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発

図9のロボット制御部に対してMQTTプロトコルによりメッセージを送信することで行っている。

本実験では、免許不要 920 MHz 帯 IoT 無線通信規格 IEEE802.15.4 g に基づく無線通信機能とプログラマブルな信号処理機能を有する IoT 無線ルータ (YeST+: ワイステーションプラス) を開発し、人が操作するデバイスからの見廻り依頼をロボットが受け付けることや、ロボット同士で協調動作するための各種機器の自律制御を可能にした。同一ロボット内における各デバイス間の制御メッセージは、GbE ケーブル経由で MQTT プロトコルを用いて伝達されるが、YeST+ が本ロボットシステムの中核的な役割を担い、ロボットの移動指令、4K カメラによる撮影の指令及び TransferJet X を用いた通信の指令を行っている。

自律移動サービスロボットに搭載している無線通信技術 TransferJet X は、数 m 程度の近距離であれば超高速の無線伝送が可能であり、短時間で大容量データを非接触に収集・配信できる。よって、ロボットの移動によって遠方の撮影データを近傍まで届けてもらい、TransferJet X によって無線伝送することで、実質離れた場所の撮影データを短時間で無線転送した場合と同等の効果を得ることが可能になる (図10)。

開発したサービスロボット協働型見廻りシステムによる非接触でのデータ配信能力を検証するための基本的な実証実験では、およそ 8 m × 18 m のオフィスルーム内において、見廻り依頼者の位置から約 10 m 先の様子を見廻りとして1分間の動画撮影を自律移動

サービスロボットに依頼し、撮影データを届けてもらう。見廻り依頼者の元では、撮影データの転送完了と同時に映像が自動再生される再生装置を構築した。

本実証実験の結果、見廻り場所においてロボットが撮影したデータを物理的に依頼者の近傍まで運搬するために要した時間が21秒、また、TransferJet X によって撮影データの再生装置への無線伝送が完了するまでの時間が34秒であった。データ容量を、見廻り依頼者の元への配信が完了するまでの時間で割ることでスループット換算値が得られる。上記の場合、撮影データは4K解像度の映像をH.264/AVCで即時圧縮することで10.48 Gbyte (83.84 Gbit) の容量となるが、これを配信完了に要した合計時間55秒で割ると、スループット換算値としては1.52 Gbps 相当になる。

次に、オフィスビルにおける複数の異なる場所で撮影したデータが、特定の見廻り依頼者の位置 (データの届け先に該当) まで転送が完了するまでの時間を実際のロボットを用いて評価した。図11は、ロボットのSLAMで構築されたフロアマップ上に、本実証実験で設定した見廻り依頼者と複数の見廻り場所の位置をプロットしたもので、図中の距離は、各見廻り場所からデータの届け先となっている見廻り依頼者の位置までの移動距離を示している。

ロボットは、依頼を受けた各々の見廻り場所に到着後、1分間の4K解像度での撮影を行うと想定した。このときの撮影データは、上述のオフィスルーム内の実験で取得されたものと同じデータ容量 (10.48 Gbyte)

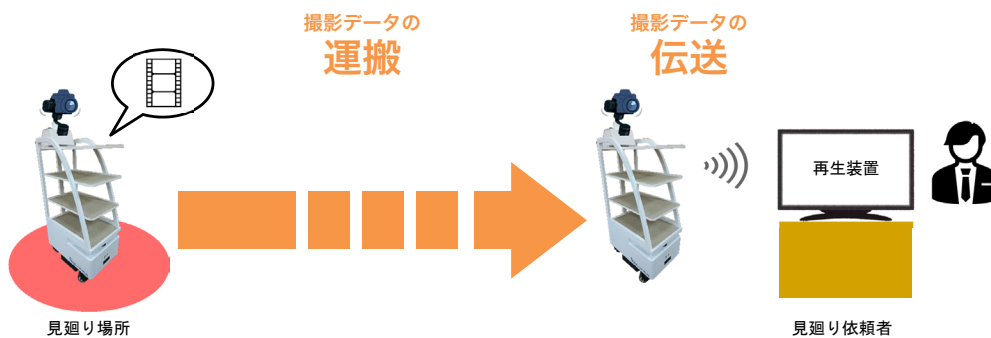


図10 撮影データが見廻り依頼者の元に届くまでの流れ

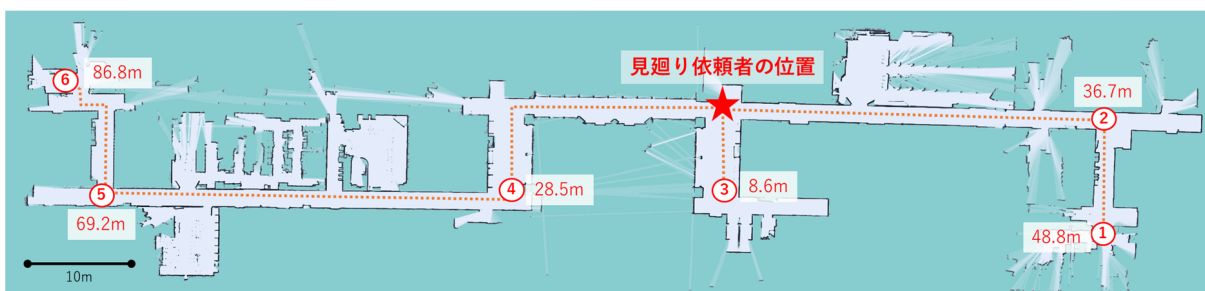


図11 見廻り依頼者 (データの届け先) と複数の見廻り場所の位置をプロットしたフロアマップ

となる。この撮影データは、ロボット自身の移動によって見廻り依頼者の再生装置近傍まで届けられ、TransferJet X によって無線伝送される。

図 12 (a) に、各見廻り場所から見廻り依頼者の元に撮影データの転送が完了するまでの時間を示す。各見廻り場所から見廻り依頼者の元に撮影データの転送が完了するまでの時間は、見廻り場所によって異なることがわかる。

図 12 (b) に、各見廻り場所と見廻り依頼者間における撮影データ転送時間のスループット換算値を示す。例えば、見廻り場所①における撮影データが見廻り依頼者の元に撮影データの転送が完了するまでの時間は、ロボットの移動に要した時間 71 秒に、TransferJet X による撮影データの伝送時間 34 秒を加えた 105 秒となるため (図 12 (a) 参照)、撮影データ容量 10.48 Gbyte (83.84 Gbits) をこの 105 秒で割ることで、スループット換算値 798 Mbps が得られる (図 12 (b) 参照)。

4.2 サービスロボット協働型見廻りシステムにおけるロボット間協調動作の仕組み

開発したサービスロボット協働型見廻りシステムで

は、異業種の自律移動サービスロボットが運用される現場において、各々のロボットが担当する持ち場で“本来業務”を行いつつ、人からの見廻り依頼やほかのロボットからの協力依頼に応じて見廻りを行うことを想定している。最初に見廻り依頼を受け付けたロボットが、自らよりも見廻り場所に近いほかのロボットの存在を確認できた場合には、代わりにそのロボットに見廻りを行ってもらうことで効率的な見廻りが可能となる。また、撮影データを有するロボットにとって、データを届ける先が本来業務の移動範囲外であった場合、異なるロボットにデータの運搬を依頼することでデータ配信エリアの拡張も可能になる。

図 13 に、本実証実験により確認した見廻り場所の撮影の依頼を協調動作によって実現する場合の動作フローを示す。ここでは、システムは見廻り依頼を最終的に引き受けて撮影を担うロボット (見廻り係ロボット) と、見廻り依頼の情報を中継発信することに加え、撮影データを引き取って見廻り依頼者の元まで届けるロボット (運搬係ロボット) で構成している。今回開発したサービスロボット協働型見廻りシステムにおけるロボットは、920 MHz 帯 IoT 無線を用いた各種情報の

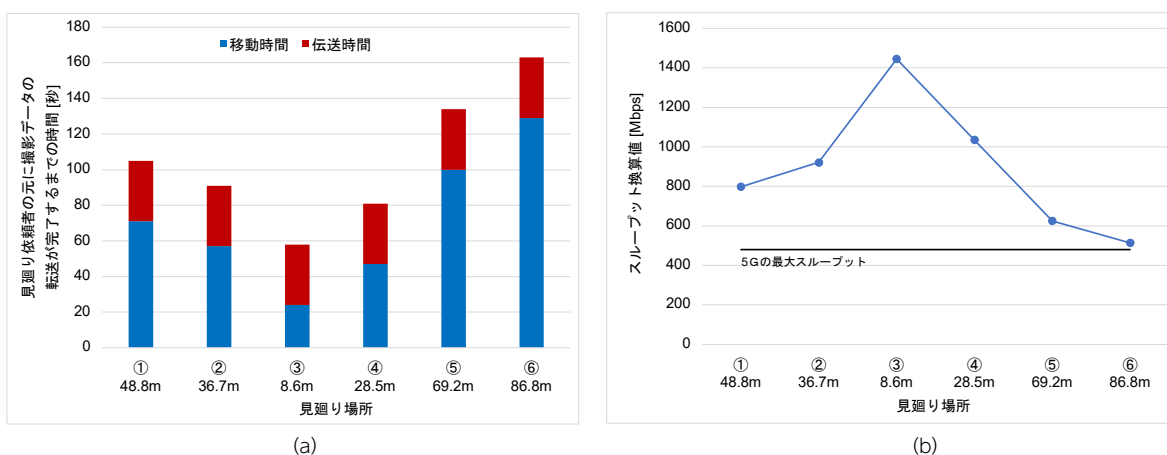


図 12 各見廻り場所から見廻り依頼者の元に撮影データの転送が完了するまでの時間 (a) とスループット換算値 (b)

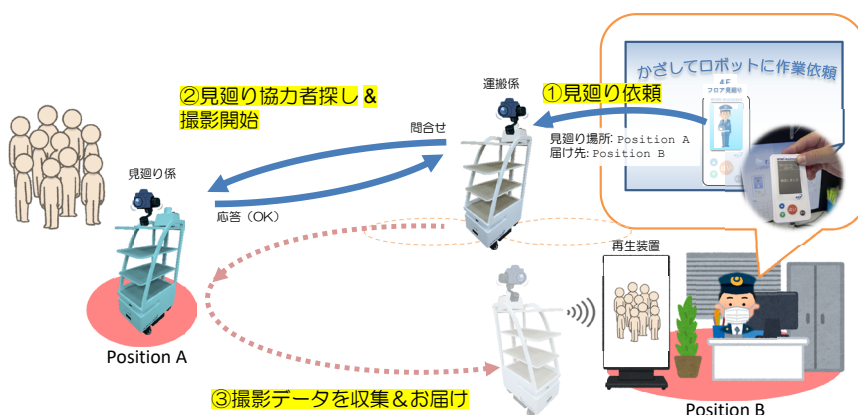


図 13 本実証実験で確認した見廻り場所の撮影の依頼を協調動作によって実現する場合の動作フロー

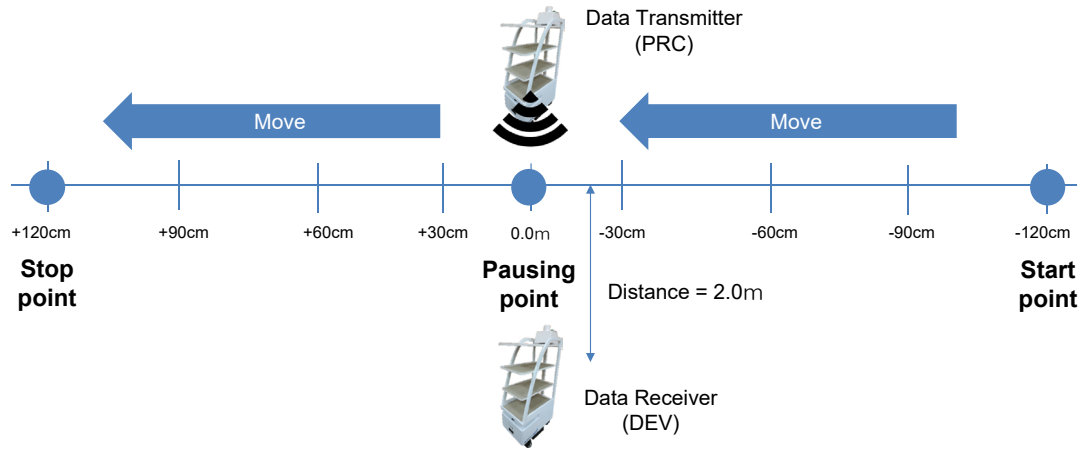


図 14 「ストップ&ゴー」によるモビリティ間ずれ違い実験の構成

発信や交換を行う機能を有する YeST+ を搭載しており、数百 m 範囲内に存在するほかのロボットの存在検出や協力依頼、互いの位置情報を知らせ合うなど、ロボット同士で協調動作することが可能となっている。

図 13 では、まず、見廻り依頼者は IoT メッセージ端末を用いて 920 MHz 帯 IoT 無線フレームを発信し、周辺のロボットに見廻りを依頼するが、この際に、見廻り場所の位置情報 (Position A) と見廻り映像データの届け先の情報 (Position B) が無線フレームの中に挿入している (図 13 ①参照)。

見廻り依頼を受け付けたロボットは、同じく 920 MHz 帯 IoT 無線を用いて、見廻り場所である “Position A” により近い位置に見廻り可能なロボットがないか検索を行い、発見された場合には、そのロボットに対して見廻り場所の撮影を依頼する (図 13 ②参照)。今回の実証システムでは、この検索・撮影依頼は、“問合せ・応答” という 1 往復のメッセージ交換でまとめて実現している。問合せ無線フレームには、見廻り場所の撮影を依頼することを示す情報が搭載されており、周辺に複数存在し得るロボットに同報 (ブロードキャスト) される。これを受信して見廻り場所の撮影を行うことを了承したロボットは、依頼元のロボットに対してユニキャストで了承応答するとともに、見廻り場所に移動して撮影を開始する。

図 13 では、さらに、運搬係ロボットは見廻り係ロボットからの応答を受信後、見廻り場所 “Position A” に移動し見廻り係から撮影データを受け取っている。その後、届け先である “Position B” まで撮影データを運搬し、TransferJet X により再生装置に無線伝送する (図 13 ③参照)。

なお、今回の実証システムは、3 台以上のロボットの協調動作にも対応しており、例えば、撮影データを異なるロボット間で協力してバケツリレー的に転送を行うことで、より広域かつ柔軟な範囲の撮影データの

収集・配信が可能になる。また、図 13 ①～③の見廻りの依頼から撮影データが届くまでの動作については、同時に複数の異なる見廻り場所に対して実践することも可能である。

4.3 ミリ波 IoT 搭載自律型移動サービスロボットを使った「ストップ&ゴー」実証

ミリ波 IoT 搭載自律型移動サービスロボット 2 台を用いた、「ストップ&ゴー」方式によるすれ違い通信実験も行った。図 14 に実験構成を示す。2 台のうち片方のサービスロボットは停止状態として、他方のサービスロボットがスタート地点から遠隔操作による発進命令に基づき 240 cm 離れた目的地 (ストップ地点) まで移動するようにスケジュールしつつ、ロボット同士が最接近する地点を一時停止なしで通過する場合と、最接近地点で 5 秒から 40 秒までの停止時間を設けた場合のファイル転送能力について確認した。データ転送については、搭載するミリ波 IoT 送受信機間が通信可能な圏内となった後 2 ミリ秒以内にリンクが確立され、即座にファイル転送が開始される仕様となっている。異なるサイズのファイル転送を上位アプリケーションとしては FTP を用いて行い、同アプリケーションログによって確認可能な、ファイル転送時間とスループット値を評価した。

図 15 に、停止時間を設けることなくロボット間でのファイル転送を試みた場合のファイルサイズに対するデータ転送効率 (スループット) の関係の一例を示す。本検証では、ファイルサイズとして 1 MB、10 MB、50 MB、100 MB、500 MB のファイル転送について、サービスロボットの移動速度が、0.2 m/s、0.4 m/s、0.6 m/s 及び 0.8 m/s の場合の 4 パターンについて検証した。いずれの速度についてもファイル転送に成功したのは、100 MB サイズのファイルまでであり、500 MB のファイル転送には失敗した。なお直感的には低速移動であ

ればあるほど、より高安定な通信リンクが確立され、転送効率(スループット)も向上すると予想したが、実際にはそのような結果とならなかった。より具体的には、1 MB、10 MB とのファイル転送試験において、0.6 m/s でロボットがすれ違う場合には各々約 350 MB/s、約 255 MB/s の転送効率を得られたが、速度が 0.2 m/s の場合にはこれらが 50 MB/s を下回るよ

うな現象が確認された。一方で、50 MB、100 MB のファイル転送試験においては、このような現象はやや緩和されて見える。より詳細な検証をもって、このような現象の原因を特定すべきではあるが、低速であるほど十分な受信電力が得られる以前にリンク確立を行ってしまうことで、より低速な通信モードで通信を開始することになり、これが更に上位の TCP 層のフロー制御等に影響を与える可能性が考えられる。転送しようとするファイルサイズが大きくなることで、転送そのものに全体として時間がかかることから、TCP 層におけるフロー制御の振る舞いによって転送効率もより改善されることが考えられる。

図 16 (a) ~ (d) には停止時間が 5 秒、10 秒、20 秒、40 秒の場合のロボット間でのファイル転送を試みた場合のファイルサイズに対するデータ転送効率(スループット)の関係の一例を示す。これらより、先に図 15 で示した停止時間を設けない場合と比較して、停止時間を設けることでより大きなファイルサイズの転送が可能となることが分かる。停止時間を設けなかった場合には 100 MB 程度までのファイル転送しか実現できなかったが、5 秒間の一時停止制御を行うこと

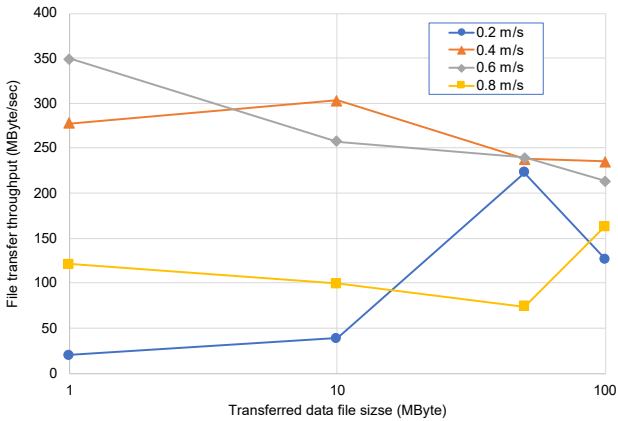
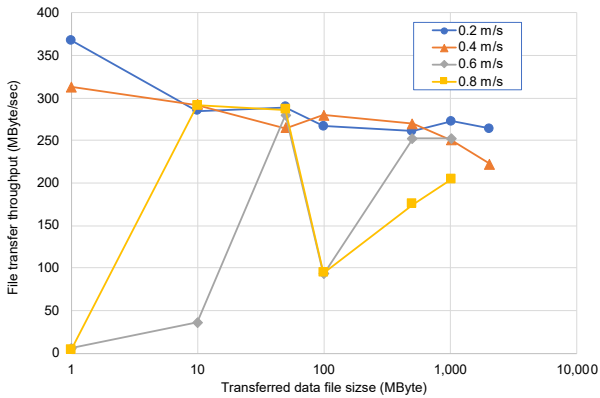
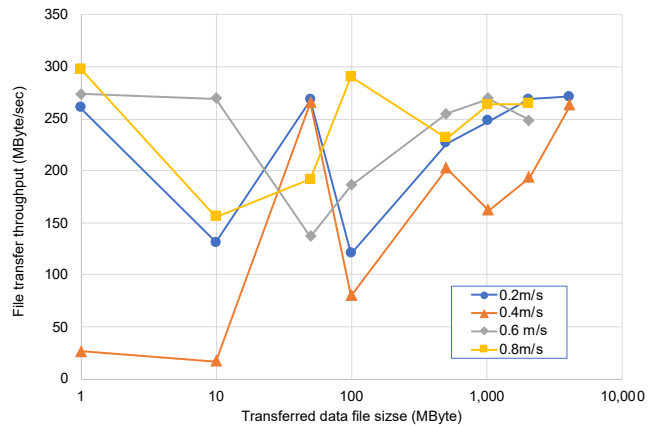


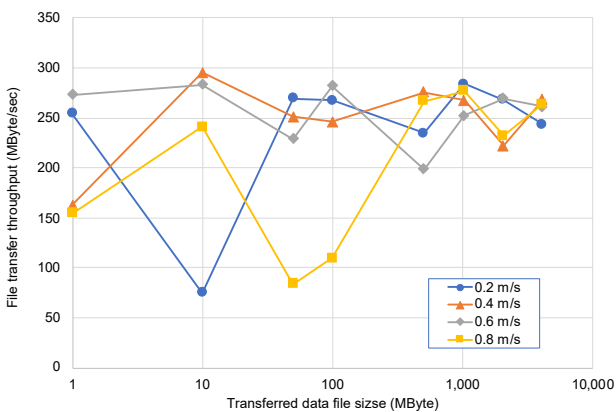
図 15 すれ違い通信における転送ファイルサイズとデータ転送効率の関係 (一時停止なし)



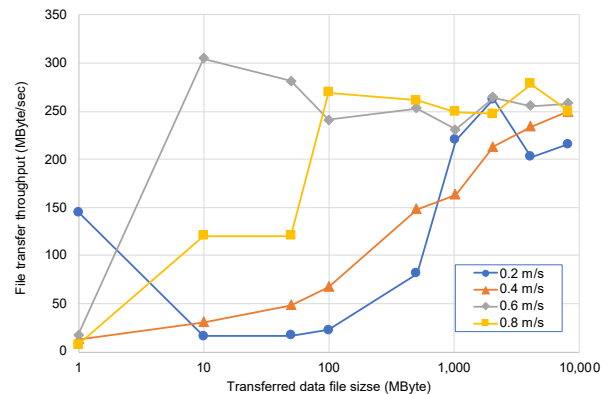
(a) Stop time is 5 sec.



(b) Stop time is 10 sec.



(c) Stop time is 20 sec.



(d) Stop time is 40 sec.

図 16 すれ違い通信における転送ファイルサイズとデータ転送効率の関係 (一時停止あり)

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発

で1 GBのファイル転送が可能となった。また10秒ないしは40秒の停止時間を設けることで、4 GB及び8 GBのファイル転送も確認できた。

5 まとめ

ソーシャルICTシステム研究室が推進する2030年代のBeyond5G時代における自律型モビリティ活躍社会の到来を見据えた、自律型モビリティ協働型のデータ集配信プラットフォームの構想、潜在的性能について議論すると同時に、自律移動型ロボットを使った実証的取組について一部実験データを紹介した。

【参考文献】

- 1 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>
- 2 <https://b5g.jp>
- 3 岸山祥久, 中村武宏, “5Gの発展と6Gに向けた現実と未来,” MWE2018 ワークショップFR2A-1, 2018年11月.
- 4 Y. Shoji, W. Liu, and Y. Watanabe, “Community-based ‘Piggy-back Network’ utilizing Local Fixed Mobile Resources supported by Heterogeneous Wireless AI-based Mobility Prediction,” Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), pp.1–5, May 2020.
- 5 IEEE Std 802.15.3 e-2017, IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks, Amendment: High-Rate Close Proximity Point-to-Point Communications, Approved 14 Feb, 2017.
- 6 <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0109-07-003-e-technicalguidance-documnet-3-e.docx>
- 7 Claude Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” Bell System Technical Journal, vol.27, pp.379–423 and pp.623–656, 1948.



庄司洋三 (しょうじ ようぞう)
総合テストベッド研究開発推進センター
ソーシャルICTシステム研究室
室長
博士(工学)
ミリ波通信システム、光通信システム



中内清秀 (なかうち きよひで)
総務省 国際戦略局 技術政策課 研究推進室
課長補佐
博士(工学)
モバイルネットワーク、ネットワーク制御



渡辺良人 (わたなべ よしと)
総合テストベッド研究開発推進センター
ソーシャルICTシステム研究室
テニユアトラック研究員
博士(工学)
無線通信、符号理論、マルチメディア信号処理
ブロックチェーン