

特別研究報告

題目

電波環境センシングを用いた小型5G移動基地局の 移動制御手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

挟間 敦久

2023年2月7日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

近年の通信技術の発展に伴い、交通や医療などの多岐にわたる分野において様々なマルチメディアサービスの需要が高まっており、それに伴って、移動体通信システムがスマート農業や無人配達などの様々な分野で利用が検討されているが、これらの取り組みでは、セルラーネットワークの基地局を固定的に設置し、基地局から発する電波が届く範囲で通信端末が動くものとなっている。その一方で、移動型の基地局を構築できれば、情報および情報交換が必要な時・場所が限定される場合や固定型の基地局が設計時に前提としていた環境条件が変わって通信できない場合に移動基地局を展開することで様々な活用形態が期待できる。実際に、トラック等の大型車両に基地局を搭載した車載基地局の研究では、地震などの災害時に固定基地局が使用不能になった時に被災地へトラックを派遣し一時的に移動通信システムを復旧させることや、花火大会や野外フェスなどの多くの人々が集まる大型イベントの開催時に通信電波を増強して安定した通信環境を提供することが考えられている。ただし、車載基地局は車道がない山間部での利用は不可能であり、密集環境で利用する場合、人が密集している場所が変化する場合や一時的な障害物によって発生する通信品質の劣化に対応することはできない。従って、小型の移動基地局の構築が望まれる。

本報告では、まず5G通信技術を用いた小型の移動基地局を構築する。現有の基地局設備は20kg以上の機材で動作しており市販の移動体には搭載不可能であることから、使用周波数帯域を限定し信号処理量を抑えることで基地局設備の小型化を図った。その結果、基地局設備は3kgとなり、市販の移動型ロボットへ搭載して10cmの精度で移動制御が可能であることを確認した。次に、小型移動基地局の利用例として、移動基地局が巡回しながら電波環境をセンシングし、複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となる位置に移動基地局を移動させる移動制御手法を実機上で動作させた。端末の受信信号品質の測定には、基地局-端末間のハンドオーバー時に用いられるMeasurement Report機能を利用する。Measurement Reportは、5G通信におけるRRC(Radio Resource Control)層の情報である。RRC層の情報を抽出して移動基地局のアプリケーション層で各端末の受信信号強度を管理し、受信信号強度の合計が最大になる位置に移動体を制御する。電波シールド室を用い

て移動制御手法を評価した結果、電波環境のセンシングを行うことにより、2台の端末における受信信号強度の合計が最大となる地点へ自律的に移動制御することが可能であることが分かった。

主な用語

移動基地局、5G セルラーシステム、電波環境センシング、移動制御、Measurement Report

目次

1	はじめに	6
2	関連研究	8
2.1	5G セルラーシステム	8
2.1.1	5G セルラーシステムの構成	8
2.1.2	5G セルラーシステムのプロトコルスタック	9
2.2	移動基地局	11
3	移動基地局の構築	12
3.1	移動基地局の製作	12
3.1.1	移動基地局の構成要素	12
3.1.2	基地局	12
3.1.3	移動体	13
3.1.4	電源	14
3.1.5	移動基地局諸元	14
3.2	信号品質の測定	14
3.3	移動制御 API	15
4	移動基地局を利用した電波環境センシングに基づく移動制御	17
4.1	電波環境センシングによる電波マップの作成	17
4.2	電波マップに基づく自律移動制御	18
4.3	実験環境	19
4.3.1	実験環境 1	19
4.3.2	実験環境 2	19
4.4	評価方法	21
4.5	実験結果	22
5	おわりに	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目次

1	5G セルラーネットワークの構成	9
2	U-Plane のプロトコルスタック	10
3	C-Plane のプロトコルスタック	10
4	移動基地局の構成	13
5	移動基地局	15
6	構築するシステムの概念図	18
7	実験環境 1 の構成	20
8	実験環境 1	20
9	実験環境 2 の構成	21
10	実験環境 2 (地点 1)	21
11	実験環境 2 (地点 2)	21
12	実験環境 2 (地点 3)	21
13	電波マップ (実験環境 1)	22
14	電波マップ (実験環境 2)	23
15	RSRP の時系列変化: 実験環境 1	24
16	RSRP の時系列変化: 実験環境 2	24

表 目 次

1	移動基地局の構成要素	12
2	AMD Ryzen 7 搭載の小型 PC の仕様	13
3	Raspberry Pi 4 の性能表	13

1 はじめに

近年の通信技術の発展に伴い、交通、エンターテインメント、医療などの多岐にわたる分野において様々なマルチメディアサービスの需要が高まっており、それに伴って、移動体通信システムが様々な分野で利用されている。特に、通信端末が一定箇所にとどまらず移動する場合においては、5G 技術を用いた移動通信システムの利用が必要不可欠となっている。例えば農業の高度化を図る取り組みとして、セルラーネットワークに接続された複数の自動走行トラクターやドローンなどの端末が農場やその上空を広大に動き回り、人に代わって農作業を行うことが検討されている [1]。また、他にも郵便・物流の領域において、セルラーネットワークに接続された自動配送ロボットが公道を走行し、指定された場所へ荷物を配送する取り組みもある [2]。これらの取り組みでは、セルラーネットワークの基地局を固定的に設置し、基地局から発する電波が届く範囲で通信端末が動くものとなっている。

現在の法令では、基地局は固定設置であることが原則となっている。その一方で、移動型の基地局を構築できれば、様々な活用形態が期待できる。例えば山間地や離島の一部などの非生活圏で商用系セルラーネットワークが展開されていない場所や、トンネルや高層ビルでの建築土木工事など、情報および情報交換が必要な時・場所が限定される場合に移動基地局を展開することが考えられる。また、災害時など、固定型の基地局が設計時に前提としていた環境条件が変わって通信できない場合に移動基地局を派遣することも考えられる。実際に、トラック等の大型車両に基地局を搭載した車載基地局の研究では、地震などの災害時に固定基地局が使用不能になった時に被災地へトラックを派遣し一時的に移動通信システムを復旧させることや、花火大会や野外フェスなどの多くの人々が集まる大型イベントの開催時に通信電波を増強して安定した通信環境を提供することが考えられている [3]。ただし、車載基地局は車道がない山間部での利用は不可能である。また、イベント等の密集環境で利用する場合、人が密集している場所が変化する場合や一時的な障害物によって発生する通信品質の劣化に対応することはできない。さらに、一般に車両費用は高額であることから基地局台数を増やすことは容易ではなく、そのため移動基地局を利用するシチュエーションが限定的となる。従って、小型の移動基地局の構築が望まれる。

そこで本報告では、まず 5G 通信技術を用いた小型の移動基地局（以降、単に移動基地局と書く）を構築する。既存の基地局設備は 20kg 以上の機材で動作しており市販の移動体には搭載不可能であることから、使用周波数帯域を限定し信号処理量を抑えることで基地局設備の小型化を図った。その結果、基地局設備は約 3kg となり、市販の移動型ロボットへ搭載して 10cm の精度で移動制御が可能であることを確認した。

次に、移動基地局の利用例として、Cell-Edge 問題 [4] に着目し、その軽減を可能とする移動制御手法を検討する。Cell-Edge 問題は、隣接する基地局のセルの境界線上のことであ

る。一般に、無線信号の受信電力は伝搬距離に応じて減衰する。Cell-Edge はどの基地局からも離れた場所に位置しているため、そこに届く電波は減衰して非常に弱くなり、これによってセルの中心部に近い場所で通信を行う端末と比べてスループットが大幅に低下してしまう可能性がある。また、距離に応じた電波の減衰は、電波が高周波であるほど大きくなるため、特に 5G 通信においては Cell-Edge 問題はより深刻な問題になる。そこで、本報告では Cell-Edge 問題の軽減に必要な、複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となる移動基地局の移動制御手法を検討する。端末の受信信号品質の測定には、基地局-端末間のハンドオーバー時に用いられる Measurement Report 機能を利用する。Measurement Report は、5G 通信における RRC (Radio Resource Control) 層の情報である。そこで、移動基地局を移動させながら RRC 層の情報を抽出して移動基地局のアプリケーション層で各端末の受信信号強度を管理する電波環境センシングを行い、各地点における端末の電波品質を表した電波マップを作成する。そして、作成した電波マップに基づいて受信信号強度の合計が最大になる位置に移動体を制御する。

本報告の構成は以下の通りである。まず 2 章では移動基地局で動作する 5G 関連技術を説明し、さらに移動基地局に関する関連研究を述べる。3 章では構築した移動基地局の諸元を述べる。4 章では、構築した移動基地局を用いて、電波環境をセンシングし信号品質に優れた位置に基地局を移動する移動制御に関する動作実験の結果を示す。最後に 5 章では本報告のまとめと今後の課題を述べる。

2 関連研究

本章では関連研究として、5G セルラーシステムについての研究、及び移動基地局についての研究について記述する。

2.1 5G セルラーシステム

2.1.1 5G セルラーシステムの構成

5G セルラーシステムの構成について説明する [5,6]。5G セルラーシステムの構成を表した図を図1に示す。図1に示した5Gセルラーシステムにおける5G Core (5GC) の構成要素について、それぞれの要素が担う機能について説明する。

- Core Access and Mobility Management Function (AMF) は、アクセス制御とモビリティの処理を行う機能のことである。具体的には、User Equipment (UE) の登録や接続、リーチャビリティ、モビリティの管理や、アクセス認証、アクセス認可等の処理を行う。
- Session Management Function (SMF) は、セッション管理と UE への IP アドレスの割り当てを行ったり、データ転送のための User Plane Function (UPF) の選択と制御等の処理を行う。UE が複数のセッションを持つ場合には、複数の SMF を各セッションに割り当てることで、セッションを個別に管理し、場合によってはセッションごとに異なる機能を提供することが可能である。
- Policy Control Function (PCF) は、ネットワーク挙動を制御する統一されたポリシーフレームワークを提供し、C-Plane (制御プレーン) 機能にポリシールールを適用・強制する処理を行う。
- User Plane Function (UPF) は、サービスタイプに応じて、ユーザのデータトラフィックを処理・転送できるように、いくつかの構成とロケーションで展開することを可能にする処理を行う。
- Unified Data Management (UDM) は、5GC における加入者データ、UE の在圏情報、セッション情報などの格納や情報提供を行う。
- Network Repository Function (NRF) は、Network Function (NF) の登録・発見機能を提供し、5GC 機能が相互に発見し、API (Application Programming Interface) 経由で通信することを可能にする。利用可能なネットワークサービス、NF、およびそ

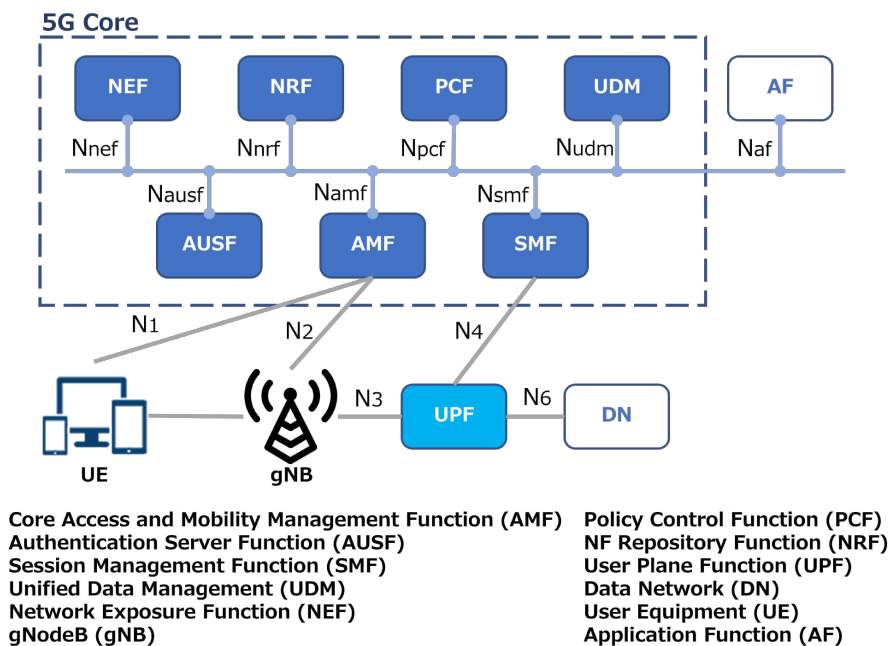


図 1: 5G セルラーネットワークの構成

これらのプロファイルに関する情報を保存し、NF の登録、ディスカバリー、認証、認可などの主要なサービスを容易にする。

- Authentication Server Function (AUSF) は、UDM に格納されている加入者情報に対して、加入者である UE の認証を行う。

上記で説明した 5GC の機能のうち、UE-gNB 間、及び gNB-UPF 間の通信は参照インターフェースを使用してユーザのデータパケットの通信を行う。これら以外の機能は共通の通信バスで接続される。

2.1.2 5G セルラーシステムのプロトコルスタック

5G セルラーシステムのプロトコルスタックについて説明する [7]。5G セルラーシステムのデータプレーンである U-Plane と制御プレーンである C-Plane におけるプロトコルスタックを表した図をそれぞれ図 2、3 に示す。

まず、U-Plane のプロトコルスタックについて説明する。

U-Plane のプロトコルスタックを構成する階層についてそれぞれ説明する。

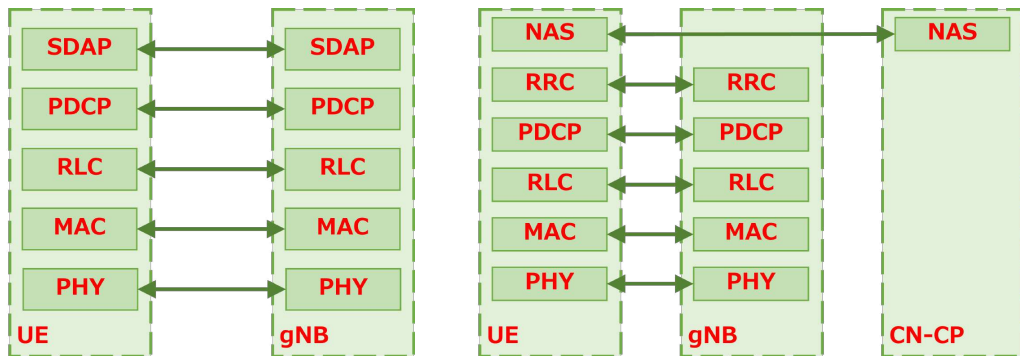


図 2: U-Plane のプロトコルスタック

図 3: C-Plane のプロトコルスタック

Physical (PHY) 層

MAC トランスポートチャンネルからの全ての情報をエアインターフェース上で伝送し、電力制御、リンク適応、セルサーチなどのさまざまな機能の処理を行う。

Medium Access Control (MAC) 層

論理チャンネルとトランスポートチャンネル間のマッピングを提供し、RLC PDU の多重化及び多重解除、スケジューリング情報の報告、エラー訂正、UE 間の優先処理、トランスポートフォーマットの選択などの処理を行う。

Radio Link Control (RLC) 層

伝送モードに応じた上位層 PDU の転送、エラー訂正、シーケンス番号の付与、セグメンテーション、再セグメンテーション等の処理を行う。

Packet Data Convergence Protocol (PDCP) 層

ユーザデータの転送、ヘッダ圧縮、シーケンス番号の付与、重複検出、パケット重複などの処理を行う。

Service Data Adaptation Protocol (SDAP) 層

主に QoS フローとデータ無線ベアラの間のマッピングを処理します。

次に、C-Plane のプロトコルスタックについて説明する。

C-Plane では、PHY 層、MAC 層、RLC 層は U-Plane と同じ機能を実行する。また、PDCP 層は、暗号化及び整合性の保護を行う。

C-Plane では、PHY 層、MAC 層、RLC 層、PDCP 層に加えて、以下に説明する層から構成されている。

Radio Resource Control (RLC) 層 データ無線及びシグナリング無線ベアラの確立、設定、維持、解除を行う。また、DC (Dual Connectivity) の追加、変更、解除、システム情報のブロードキャスト、モビリティ処理などの処理も行う。ハンドオーバー時に用いられる Measurement Report は、5G 通信における RRC (Radio Resource Control) 層の情報である。

Non-Access Stratum (NAS) 層 主に UE と 5GC 間の接続及びセッションの管理機能を処理する。

2.2 移動基地局

本報告の関連研究として、大型の移動基地局に関する研究 [3] が挙げられる。この研究では、トラック等の大型車両に基地局を搭載して車載基地局を構築しており、固定型の基地局が設計時に前提としていた環境条件が変わって通信できない場合に移動基地局を派遣することが考えられている。この大型の移動基地局の利用例として、地震などの災害時に固定基地局が使用不能になった時に被災地へトラックを派遣することで一時的に移動通信システムを復旧させることや、花火大会や野外フェスなどの多くの人々が集まる大型イベントの開催時に通信電波を増強して安定した通信環境を提供することが考えられている。

しかしながら、このような大型の移動基地局は、派遣する場所に車道があることが前提となっており、車道のない山間部等での利用は不可能である。また、イベント等の密集環境で利用する場合、人が密集している場所が絶えず変化する場合や、一時的な障害物によって通信品質の劣化が発生する場合には、これに常に対応して移動を行うことは大型であるが故に不可能である。さらに、一般に車両費用は高額であることから基地局台数を増やすことは容易ではなく、そのため移動基地局を利用するシチュエーションが限定的となる。従って、小型の移動基地局の構築が望まれる。

小型の移動基地局に関する研究として、LTE 技術を用いた移動基地局に関する研究 [8] が挙げられる。この研究では、ドローンに小型携帯電話基地局を搭載することで、無人航空機型基地局を構築している。しかしながら、[8] における移動基地局は、災害時に携帯電話からの信号を捕捉し、被災者の位置を推定するために用いられるものであり、端末とのデータ通信は行わないものとなっている。

小型の移動基地局を用いてデータ通信を行うことで Cell-Edge 問題に対処するためには、移動基地局と通信する複数の端末の電波環境情報を捉え、その情報をもとに移動基地局を自律的に移動制御することが重要である。

3 移動基地局の構築

3.1 移動基地局の製作

3.1.1 移動基地局の構成要素

本報告では、Double Robotics 社の移動体 Double3 [9] に基地局を搭載することで移動基地局を製作し検証を行う。Double3 は、NVIDIA jetson を搭載した自律走行車であり、リアルタイムの画像分類、物体検出、自己位置推定などのアプリケーションを実行することが可能である。構築する移動基地局の構成要素を表 1 にまとめる。表 1 の機材を用いた移動基地局の論理構成は図 4 である。なお、移動体である Double3 は有線 LAN 接続用のインターフェースを有していないため、本報告では無線アクセスポイントを介して接続することとしている。

3.1.2 基地局

本節では基地局の物理的な構成と諸元を述べる。本報告では、移動体である Double3 に基地局を搭載することで移動基地局を製作し検証を行う。基地局は gNB、5GC、RU、アンテナの 4 つの要素から構成される。

gNB には小型 PC を、5GC には Raspberry Pi 4 を使用する。また、RU には USRP B210 を使用する。アンテナには、水平方向に対して指向性を持たないアンテナである 3.7/4.7GHz 帯 MIMO 対応 V 偏波可視光透過アンテナを使用する。また、gNB はオープンソースソフトウェア OAI [10]、5G-Core は Open5GS [11] をそれぞれ改変したものをを用いている。小型 PC、Raspberry Pi 4 の性能をそれぞれ表 2、表 3 にまとめる。

表 1: 移動基地局の構成要素

構成要素	詳細
移動体	Double3
5GC	Raspberry Pi 4
gNB	AMD Ryzen 7 搭載の小型 PC
基地局 RU	USRP B210 mini
アンテナ	可視光透過アンテナ
電源	モバイルバッテリー

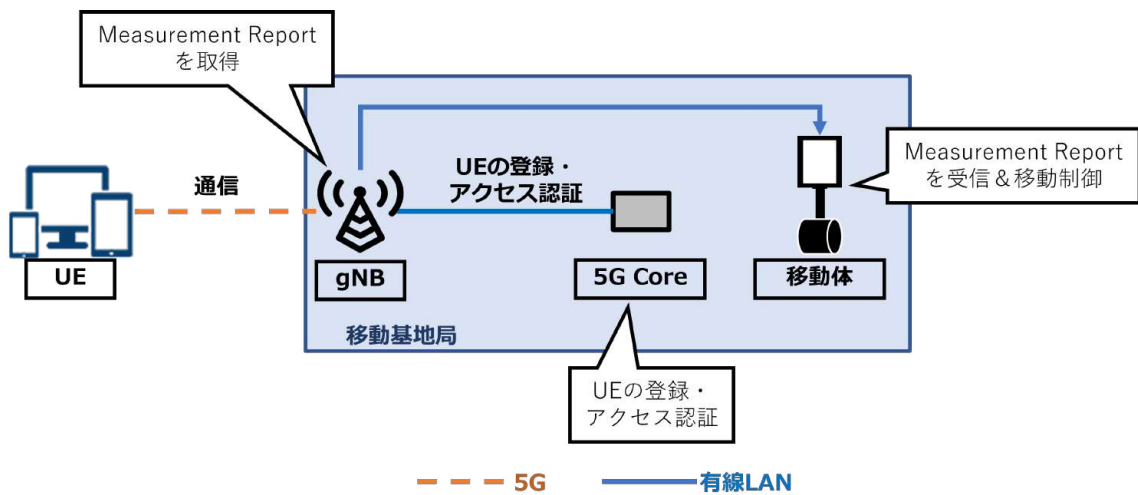


図 4: 移動基地局の構成

表 2: AMD Ryzen 7 搭載の小型 PC の仕様

CPU	クアッドコア AMD Ryzen 7 3750H
CPU クロック	2.3GHz
筐体サイズ	幅 12.4 cm、高さ 11.2 cm、奥行 4 cm
消費電力	約 65W

表 3: Raspberry Pi 4 の性能表

CPU	クアッドコア Cortex-A72 (ARM v8)
CPU クロック	1.5GHz
消費電力	約 15W

3.1.3 移動体

Double3 の制御方法について説明する。Double3 では、開発者モードに変更することで開発者向け機能にアクセスすることが可能である。Double3 は、さまざまな内蔵センサーやデバイスに接続された Nvidia Jetson TX2-4GB システムオンモジュールを搭載しており、独自のカスタムコードを記述して実行することが可能である。また、Double3 は aarch64 アーキテクチャで Ubuntu 18.04 を実行するため、そのプラットフォームで実行される任意の言語でコードを記述できる。

Double3のコアソフトウェアは、d3と呼ばれるシステムサービスとして実行される。d3には指定した移動量の移動や位置座標の取得、カメラ操作などが可能な制御用APIが組み込まれている。コードを記述し実行することにより、コマンドの送信やイベントの受信を行い、d3の制御用APIを利用することが可能である。また、すべてのコマンドとイベントは、標準のUnixドメインソケットを介して送信される。

Double3は有線LAN接続用のインターフェースを有しておらず、Wi-Fiとの接続のみが想定されている。そのため本報告では、別途無線アクセスポイントを用意している。なおDouble3ではLinuxが動作しているため有線LAN化は可能であると考えている。

3.1.4 電源

本報告では、移動基地局を自律的に移動させる必要がある。Double3は充電式であるため、検証前に充電を行えば良いが、基地局については給電用の電源が必要である。したがって、基地局への給電用電源として、モバイルバッテリーを使用する。容量は87.04Whである。このモバイルバッテリーについて、100VのAC出力端子をgNBである小型PCへ接続し、USB-C出力端子を5GCであるRaspberry Pi 4へ接続することで給電を行う。

3.1.5 移動基地局諸元

本報告で使用する移動基地局は、移動体であるDouble3に対し、基地局及び電源を搭載する。基地局は電源であるモバイルバッテリーから給電して動作させる。移動基地局の写真を図5に示す。

移動基地局で使用する電波の中心周波数は3.433GHzとした。また、使用帯域を20MHz (RB51)とし、MCSの上限値を0に設定した通信を行ったところ、約80分動作することが確認された。完成した移動基地局について、20MHz (RB51)、MCS0による通信を行ったところ、約80分動作することが確認された。

3.2 信号品質の測定

本報告では、端末の受信信号品質を測定することにより移動基地局の移動制御を行う。端末の受信信号品質の測定には、基地局間のハンドオーバー時に用いられるMeasurement Report機能を利用する。Measurement Reportは、5G通信におけるRRC層の情報である。そこで、RRC層の情報を抽出して移動基地局における基地局のアプリケーション層で各端末の受信信号強度を管理する。



図 5: 移動基地局

移動体に搭載する基地局では、Measurement Report である各端末の RSRP (Reference Signal Received Power; 基準信号受信電力)、RSRQ、SINR を一定時間間隔で取得する。取得間隔は 120ms~30 分までの間で設定可能であるが、ここでは 240ms ごとに取得する。尚、チャンネル状態 (CSI) 情報もしくは OFDM 信号処理時の情報を使うことで、より短周期で信号品質を取得することも可能であるが、処理が煩雑になり消費電力増加や重量増加となる。そのため本報告では Measurement Report 機能を用いて受信信号強度を取得することとした。gNB である小型 PC では、通信を行う UE の ID である RNTI (Radio Network Temporary Identifier) と取得した RSRP、RSRQ、SINR をログファイルとしてリアルタイムで更新し、保存する。

3.3 移動制御 API

本章では、移動制御に必要な API のコマンドの説明と、移動制御用に作成した移動制御 API のプログラムについて記述する。Measurement Report 機能は、5G 通信における RRC 層で動作する。移動体を制御するためには、RRC 層で得られる情報を作成した移動制御 API に渡し、その上で移動量計算と移動制御 API による移動制御を行う必要がある。

まず、移動制御 API の作成に利用する Double3 の制御用 API のコマンドについて説明す

る。利用する API を以下に示す。

- `navigate.target`
- `DRNavigateModule.arrive`
- `DRPose.pose`

`navigate.target` は、指定した移動量の移動命令を行うためのコマンドである。その引数として、 x 、 y 、`angleRadians`、`relative` を持つ。 x は前後方向の移動量（前方向が正）、 y は左右方向の移動量（左方向が正）であり、単位は m（メートル）である。`angleRadians` は到着地点での `Double3` の方向であり、単位は rad（ラジアン）である。`relative` は相対位置を指定するブール値であり、`true` を指定すると指定した移動量を現在位置から相対的に移動し、`false` を指定すると指定した移動量を位置座標系の絶対位置として移動する。その他の引数については今回の移動制御には関係しないため、説明は省略する。移動制御アプリケーションにおける移動命令では x 、 y のみを指定した。また `relative` は常に `true` とし、指定した移動量を相対的に移動する。`DRNavigateModule.arrive` は、`navigate.target` で命令した移動の完了のイベントを監視するコマンドである。`DRPose.pose` は、`Double3` の現在位置のイベントを監視するコマンドである。`Double3` の現在位置を位置座標系の絶対位置として取得することが可能である。`Double3` には自己位置推定機能が搭載されており、車輪回転量と IMU（慣性計測装置）に基づいて位置座標を推定している。

次に、移動制御用に作成する移動制御 API のシステムについて説明する。複数 UE 環境において、端末の受信信号品質に基づく移動基地局の移動制御を実現するために、移動制御 API を python 言語により作成する。`Double3` と基地局はともに 1 つのアクセスポイントに接続されており、このアクセスポイントを通して `Double3` から基地局である小型 PC に対して SSH 接続を行い、`Double3` 側で移動制御 API を実行することにより移動制御を行う。この API では、以下の手順で移動制御を行う。

1. 移動基地局を一定の距離間隔で移動させながら複数端末の電波品質の計測を行い、各地点における電波品質を計測する。
2. 計測した電波品質に基づき、複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となる位置を決定し、その地点へ移動基地局を移動制御する。

上記の 1 の手順では、計測によって得られた電波品質の情報は基地局のアプリケーション層で管理している。したがって、移動体から基地局に対し SSH 接続を行うことで基地局のアプリケーション層から各地点での電波品質を取得する。

4 移動基地局を利用した電波環境センシングに基づく移動制御

本章では、複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となる移動基地局の移動制御手法を検証するための移動通信システムの実装方法、及びその評価方法と実験結果について記述する。移動制御の手順を以下に示す。

1. 移動基地局を一定の距離間隔で移動させながら複数端末の電波品質の計測を行い、各地点における受信信号強度を表した電波マップを作成する。
2. 作成した電波マップから、複数の端末における受信信号強度の合計が最大となる位置を決定し、その地点へ移動基地局を移動制御する。

そこで本章では、まず電波マップの作成方法について説明し、次に作成した電波マップに基づいた移動基地局の移動制御方法について説明する。そして、この移動制御手法を検証するための移動通信システムの実装方法、及びその評価方法と実験結果について説明する。

4.1 電波環境センシングによる電波マップの作成

前節で説明した実験環境において、移動基地局の可動範囲における端末間の電波品質を測定することで、移動基地局の各位置における端末間の電波品質を表す電波マップを作成する。信号品質の把握には、基地局-端末間のハンドオーバー時に用いられる Measurement Report 機能を利用する。Measurement Report は、5G 通信における RRC 層の情報である。Measurement Report で得られる情報のうち、本報告では RSRP を信号強度を表す指標として利用する。RSRP は端末と基地局の位置関係で決まる基準信号の受信電力値であり、基地局の設置条件やエリアの障害物などに影響を受けることが知られている。

本報告では、端末の各地点での RSRP を電波品質として作成した電波マップに基づいて移動基地局の移動制御を行うことで、端末間の信号品質の向上を目指す。電波マップの作成方法について説明する。作製手順は以下の通りである。

1. 基地局である小型 PC に対し SFTP 接続を開始し、UE の RNTI と RSRP が記録されたログファイルを取得する。
2. 5 秒間処理を待機する。
3. 再度ログファイルを取得し、1 の処理で取得したログファイルとの差分を抽出する。
4. 得られた差分から各端末の RSRP のデータを抽出し、各端末について、5 秒間の計測による RSRP の平均、分散、位置座標を保存する。

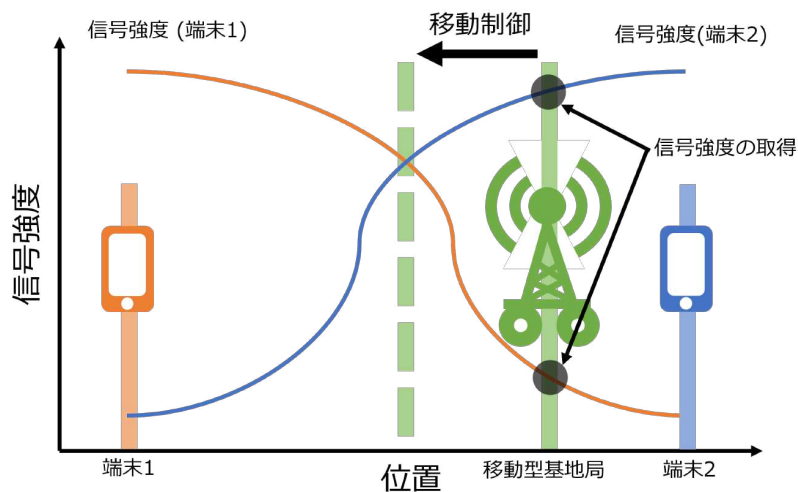


図 6: 構築するシステムの概念図

5. 実験環境の移動方向に対して移動基地局を約 50cm 移動する。

上記の処理を繰り返し、移動に要する時間を除いた電波品質の計測時間の合計が約 35 秒に達した場合、測定を終了する。このとき、移動基地局の位置は実験環境における計測終了地点に位置する。

以上の処理により、各地点における電波品質を表す電波マップを作成する。

4.2 電波マップに基づく自律移動制御

端末間の信号品質を向上させる移動基地局の移動制御手法を検証するために、図 6 のシステムを実装する。

本報告では移動基地局の移動制御を行うことで複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となることを目指す。

移動制御の方法として、信号品質の低い端末の方向へ移動基地局を移動させることを考える。信号品質の把握には、基地局間のハンドオーバー時に用いられる Measurement Report 機能を利用する。Measurement Report は、5G 通信における RRC 層の情報である。電波環境センシングにより作成した電波マップに基づき、各端末の RSRP の合計値が最大となる地点へ移動基地局を自律的に移動制御する。前節では、RRC 層の情報から端末の受信信号強度を示す値である RSRP を抽出し、一定時間における RSRP の平均値を信号品質とみなして電波マップを作成する方法を説明した。電波マップに基づいて移動基地局を自律的に移動制御する方法は、以下の通りである。

1. 作成した電波マップから、2台のRSRPの合計が最大となる地点を目標位置とする。
2. 現在位置と目標位置の位置座標から相対的な移動量を算出する。
3. 算出した移動量分の移動を移動体へ命令し、目標位置へ移動制御を行う。

尚、目標位置に到達後は、再度目標位置におけるRSRPの計測を5秒間行い、5秒間におけるRSRPの平均、分散を各端末について算出する。

4.3 実験環境

本報告では移動基地局の移動制御を行うことで複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となることを目指す。ここではシステムの単純化のため、端末には2台のスマートフォンを用いて検証を行う。5Gシステムに接続する端末(UE)はSamsung Galaxy S21 5G及びSamsung Galaxy S21Ultra 5Gを使用する。本報告では、電波シールド室(大阪大学大学院情報科学研究科B棟706室)において実験を行う。実験環境として、室内に障害物が無い場合(実験環境1)と障害物がある場合(実験環境2)の、2つの環境を構築する。

4.3.1 実験環境1

障害物のない実験環境として、移動基地局と端末以外には何も配置せず、通信電波を遮る障害物が無い状態で移動基地局を直線的に移動させる環境を用意した(図7)。以降では、この環境を実験環境1と呼ぶ。

この環境では、移動基地局は初期座標から図7の矢印で示した方向に対して直線的に移動を行いつつ電波環境をセンシングし、センシングした地点のうちRSRPの合計値が最大となる地点に基地局を移動制御することを目指す。通信電波を遮る障害物が無いことから、2つの端末の中央に近い位置に移動基地局を移動することが本環境での移動制御目標となる。図7の実験環境を撮影した写真を図8に示す。

4.3.2 実験環境2

次に、障害物のある実験環境として、図9に示す実験環境を用意した。以降では、この環境を実験環境2と呼ぶ。

この環境では、図9に示すように、各端末の前方にパネルを設置することで、どちらか一方への端末への電波を遮り、電波品質に差を生じている。地点1と地点3では、2つのうち1つの端末の電波がパネルによって遮られた状態となっている。一方、地点2においては、

電波シールド室（上面図）

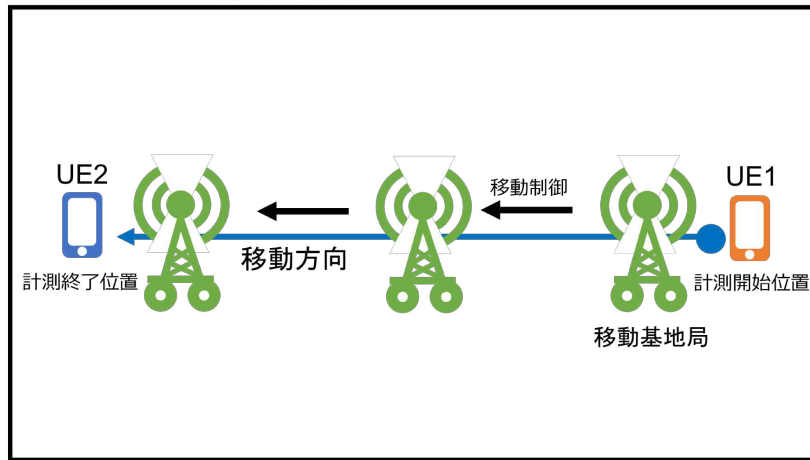


図 7: 実験環境 1 の構成



図 8: 実験環境 1

両方の端末に対して電波は遮られることなく到達する状態となっている。移動基地局を図 9 の矢印で示した方向に対して直線的に移動を行いつつ電波環境をセンシングし、地点 2 近傍に移動基地局を移動することが本環境での移動制御目標となる。

図 9 の実験環境を撮影した写真を地点 1～3 で撮影した写真を図 10～12 に示す。

電波シールド室（上面図）

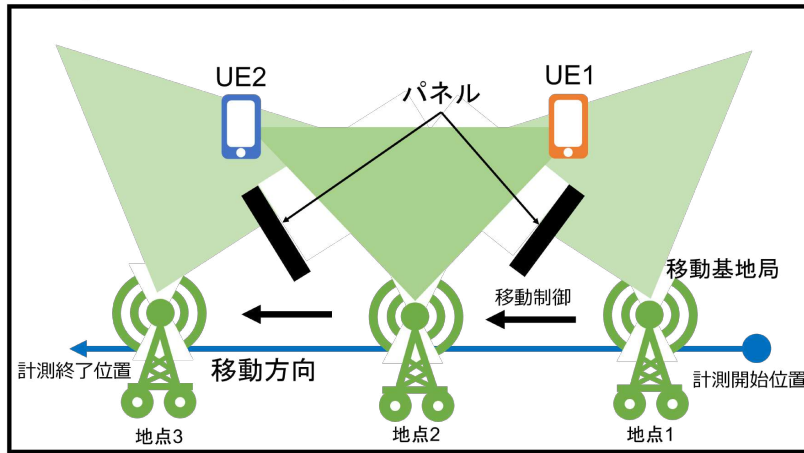


図 9: 実験環境 2 の構成



図 10: 実験環境 2 (地点 1)



図 11: 実験環境 2 (地点 2)

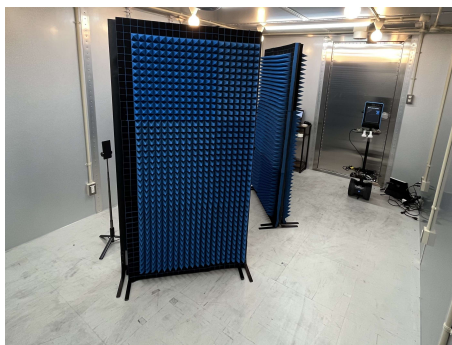


図 12: 実験環境 2 (地点 3)

4.4 評価方法

本報告では、基地局-端末間のハンドオーバー時に用いられる Measurement Report 機能を利用することで、Cell-Edge 問題の軽減に必要な、複数の端末が信号品質を損なうことな

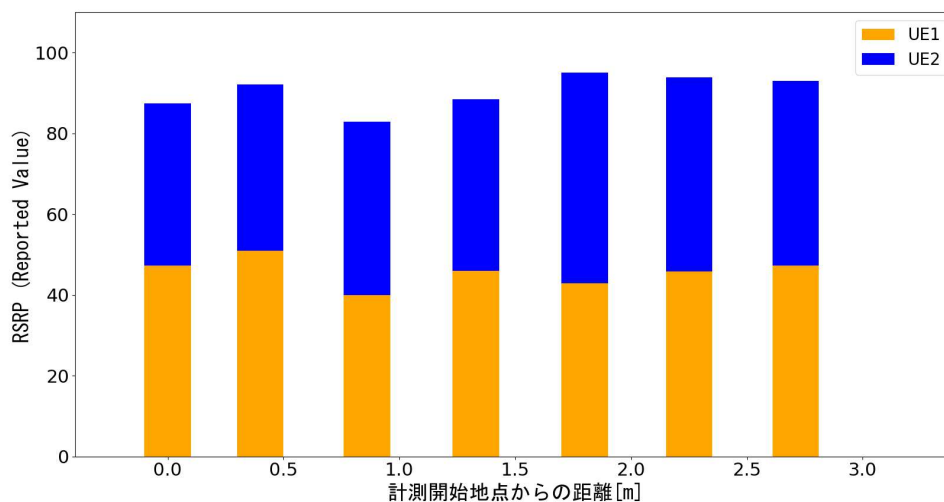


図 13: 電波マップ (実験環境 1)

く通信可能となる移動基地局の移動制御手法が可能であるかを評価する。この実験では、電波環境センシングにより作成した電波マップに基づき、2 台の端末の RSRP の合計値が最大となる地点へ移動基地局を自律的に移動制御する。したがって、評価方法として、作成した電波マップにおいて 2 台の端末の RSRP の合計値が最大である地点と移動制御後の移動基地局の位置を比較し、それらの位置が概ね一致しているかどうかを 2 つの実験環境でそれぞれ確認する。また、電波環境センシングによる電波マップの作成時に計測した各端末における RSRP の時系列変化を 2 つの実験環境でそれぞれ示す。

4.5 実験結果

2 つの実験環境において、電波環境センシングにより得られた電波マップをそれぞれ図 13、図 14 に示す。また、電波マップ時における RSRP の報告値の時系列変化をそれぞれ図 15、図 16 に示す。なお RSRP は信号強度であり単位は dBm であるが、図 13、図 14、および以降では Measurement Report における Reported Value (以降、報告値) を示している。Reported Value は 1dBm 刻みでインデックス化したものであり、報告値が高いほど RSRP が強くなる (文献 [12] の Table 10.1.6.1-1 参照)。

実験環境 1 では、計測開始地点からの移動基地局の距離が約 1.80m の地点における電波強度計測時において、2 つの端末の RSRP の報告値の合計値が約 95.0 で最大となった。移動制御後、移動基地局は、計測開始地点からの距離が約 1.94m の地点に移動し、2 台の端末

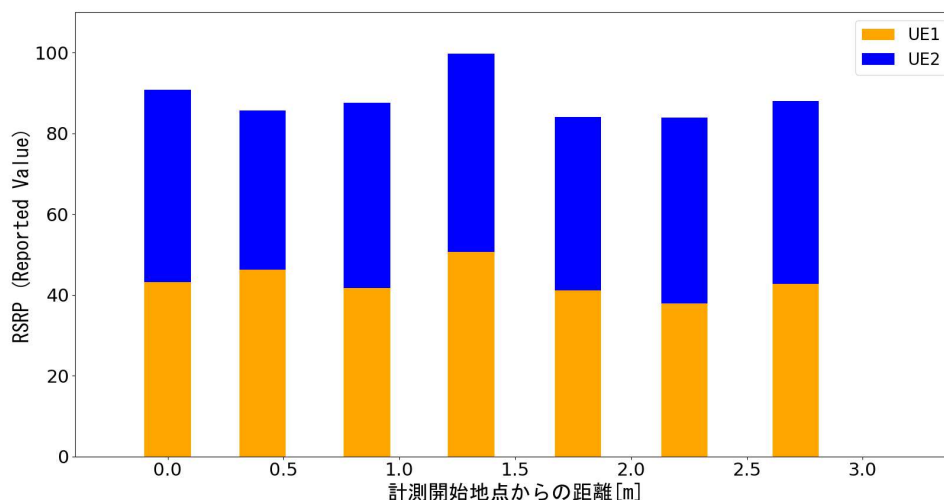


図 14: 電波マップ (実験環境 2)

と通信を行うことが確認された。実験環境 1 において同様の実験を計 3 回行ったところ、電波強度計測時に 2 つの端末の RSRP の報告値の合計値が最大であった地点と移動制御後の移動基地局の地点の誤差は 0.14m、0.9m、0.03m となった。

実験環境 2 では、計測開始地点からの移動基地局の距離が約 1.36m の地点における計測時において、2 つの端末の RSRP の報告値の合計値が約 99.7 で最大となった。移動制御後、移動基地局は、計測開始地点からの距離が約 1.41m の地点に移動し、2 台の端末と通信を行うことが確認された。実験環境 2 において同様の実験を計 3 回行ったところ、電波強度計測時に 2 つの端末の RSRP の報告値の合計値が最大であった地点と移動制御後の移動基地局の地点の誤差は 0.05m、0.12m、0.09m となった。

いずれの実験環境においても、電波強度計測時に 2 つの端末の RSRP の報告値の合計値が最大であった地点と移動制御後の移動基地局の地点の誤差は 15cm 以内であった。また、実験環境 2 では電波を遮る障害物が存在するため、障害物が存在しない実験環境 1 と比較して、作成された電波マップにおける各地点の RSRP の差は大きくなり、地点 2 における RSRP が突出して大きくなる結果となった。これらの結果から、Measurement Report 機能を利用した電波環境センシングによって作成した電波マップに基づき、2 台の端末の RSRP の報告値の合計値が最大となる地点へ移動基地局を自律的に移動制御することが可能であり、特に障害物が存在し各地点の電波品質に偏りのある環境下において本報告の移動制御手法が効果的であることが確認された。

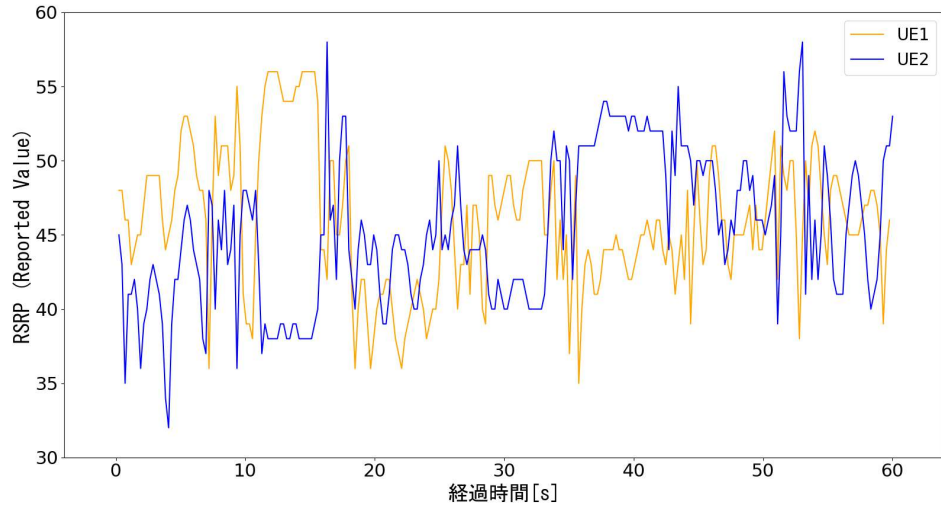


図 15: RSRP の時系列変化：実験環境 1

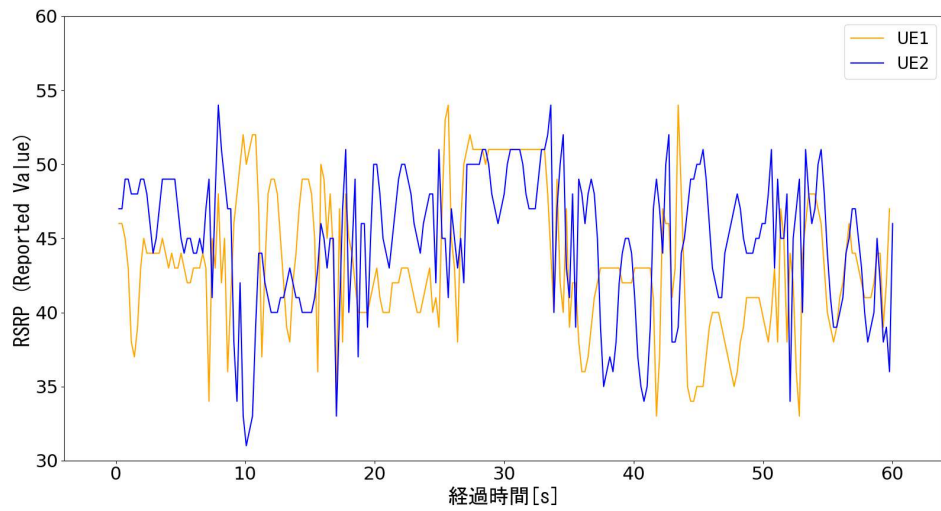


図 16: RSRP の時系列変化：実験環境 2

5 おわりに

近年の通信技術の発展に伴い、5G 技術を用いた移動通信システムの利用が必要不可欠となっている。現在の法令では、基地局は固定設置であることが原則となっている。その一方で、移動型の基地局を構築できれば、様々な活用形態が期待できる。移動型の基地局として、車載基地局等の大型の移動基地局に関する研究が進められているが、大型の移動基地局は移動基地局を利用するシチュエーションが限定的であるため、小型の移動基地局の構築が望まれる。

本報告では、まず 5G 通信技術を用いた小型の移動基地局を構築した。その結果、基地局設備は約 3kg となり、市販の移動型ロボットへ搭載して 10cm の精度で移動制御が可能であることを確認した。

次に、移動基地局の利用例として、Cell-Edge 問題に着目し、Cell-Edge 問題の軽減に必要な、複数の端末が信号品質を損なうことなく通信可能となる移動基地局の移動制御手法を検討した。端末の受信信号品質の測定には、基地局-端末間のハンドオーバー時に用いられる Measurement Report 機能を利用した。電波シールド室を用いて移動制御手法を評価した結果、電波環境のセンシングを行うことにより、2 台の端末における受信信号強度の合計が最大となる地点へ自律的に移動制御することが可能であることが分かった。

今後の課題として、受信信号強度の分散を考慮した移動基地局の移動制御が挙げられる。受信信号強度の分散を考慮した移動制御を行うことで、複数の UE に対してより公平な通信環境を提供することが可能であると考えられる。また、本報告では、移動基地局を 1 次元的に移動させることで電波センシングを行い電波マップを作成したが、移動基地局を 2 次元的に移動させて電波センシングを行い、2 次元空間において移動制御を行う手法についても考察する予定である。さらに、移動基地局に搭載した 5G システムの軽量化を進めてドローンなどの飛行体に搭載し、3 次元空間で電波センシングを行いつつ移動制御を行う手法についても検討する。

謝辞

謝辞本報告を終えるにあたり、大阪大学大学院情報科学研究科村田正幸教授にはご多忙の中数々の貴重なご助言を賜りましたこと深く感謝いたします。大阪大学情報科学研究科荒川伸一准教授には、研究の進捗や方向性の確認、論文執筆に至るまで、日頃より多大なご指導やご助言を下さいましたこと心より厚く感謝いたします。また、平素よりご指導、ご教示いただきました大阪大学先導的学際研究機構大下裕一准教授並びに大阪大学情報科学研究科小南大智助教に心より感謝申し上げます。最後に、日々の学生生活を支えてくださった家族、友人、研究室の皆様に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] 農林水産省, “スマート農業の展開について,” 2022. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/#smart>.
- [2] 総務省, “郵便・物流領域におけるテクノロジー活用 of 取組み,” 2021. https://www.soumu.go.jp/main_content/000762584.pdf.
- [3] T. Hirose, F. Nuno, and M. Nakatsugawa, “Development of wireless systems for disaster recovery operations,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 98, no. 7, pp. 630–635, 2015.
- [4] T. N. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, and B. An, “Improving the performance of cell-edge users in NOMA systems using cooperative relaying,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 5, pp. 1883–1901, 2018.
- [5] I. Alawe, A. Ksentini, Y. Hadjadj-Aoul, and P. Bertin, “Improving traffic forecasting for 5G core network scalability: A machine learning approach,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 42–49, 2018.
- [6] ETSI, “TS 123 501 V15.2.0 5G;system architecture for the 5G system (3GPP TS 23.501 version 15.2.0),” 2018.
- [7] A. Aijaz, “Packet duplication in dual connectivity enabled 5G wireless networks: Overview and challenges,” *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 20–28, 2019.
- [8] A. Albanese, V. Sciancalepore, and X. Costa-Pérez, “SARDO: An automated search-and-rescue drone-based solution for victims localization,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 9, pp. 3312–3325, 2021.
- [9] D. Robotics, “Double 3.” <https://www.doublerobotics.com/double3.html>.
- [10] “OpenAirInterface.” <https://openairinterface.org>.
- [11] “Open5GS open source project of 5GS and EPC.” <https://open5gs.org>.
- [12] ETSI, “TS 138 133 V15.12.0 5G;requirements for support of radio resource management,” 2021.