

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

挟間 敦久[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: †{a-hazama,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年の通信技術の発展に伴い、様々な分野で5G移動体通信システムの利用が検討されているが、これらの取り組みでは、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（以降、単に移動基地局と書く）を構築できれば、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。本稿では、まず5G通信技術を用いた小型の移動基地局を構築した。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3kgとなり、市販の移動型ロボットへ搭載して誤差5cm以内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。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移動基地局を自律的に移動制御し、2台の端末の通信品質が改善されることが確認された。

キーワード 移動基地局, 5G, 移動制御, 電波環境センシング

Development and Evaluation of Mobility Control for Small-sized 5G Base Stations Using Radio Environment Sensing

Atsuhisa HAZAMA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Information Science & Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †{a-hazama,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract With the recent development of communication technology, the use of 5G mobile communication systems is being considered in various fields. In these efforts, base stations are installed in fixed locations and communication terminals move within the range of radio waves emitted from the base station. On the other hand, if mobile base stations (hereafter simply referred to as "mobile base stations") can be constructed, various forms of utilization can be expected by deploying mobile base stations. In this paper, we first constructed a small mobile base station using 5G communication technology. Since the existing base station equipment weighs more than 20 kg and cannot be installed on commercially available mobile devices, we attempted to reduce the size of the base station equipment by limiting the frequency bands used and reducing the amount of signal processing. As a result, the base station equipment weighed only 3 kg, and we confirmed that it could be mounted on a commercially available mobile robot to control its movement with an accuracy of within 5 cm. Next, as an example of the use of a small mobile base station, we operated a mobile control method on an actual robot in which the mobile base station moves to a position where multiple terminals can communicate without loss of signal quality by sensing the radio wave environment as the mobile base station travels around. As a result of evaluating the mobile control method using a radio shield room, it was confirmed that the communication quality of two terminals was improved by autonomously controlling the movement of the mobile base station by sensing the radio environment.

Key words Mobile Base Station, 5G, Mobility Control, Radio Environment Sensing

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 [1], [2]。例として、ドローンを用いたスマート農業 [3] や自動配送ロボットを用いた配送サービス [4] が挙げられるが、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。

現在の法令では、基地局は固定設置であることが原則である。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、花火大会や屋外イベント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 [5]。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。小型の移動基地局を活用することにより、5G 通信において深刻な問題とされる Cell-Edge 問題 [6] に対応できる可能性がある。

そこで本稿では、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。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る。

次に、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 [7]。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平均値が最大になる位置に移動体を制御する。

2. 関連研究

本稿の関連研究として、大型の移動基地局に関する研究 [5] 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、花火大会や屋外イベント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、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り通信品質が劣化する場合には、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。

小型の移動基地局を用いてデータ通信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位置に移動基地局を移動させるためには、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

本稿では、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を図 1 である。

3.1.2 基地局

基地局の物理的な構成と諸元を述べる。本稿では、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

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

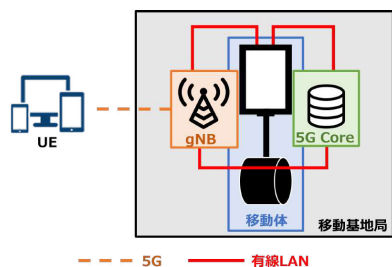


図 1 移動基地局の構成

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

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。

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



図 2 移動基地局

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。

3.1.4 電源

本稿では、移動基地局を自立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

本稿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 2 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。

3.2 信号品質の測定

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。

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。そのため本稿では 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、保存を行う。

3.3 移動制御 API

本章では、移動制御に必要な Double3 の制御用 API [12] 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 層で動作するため、移動体を制御するためには、RRC 層で得られる情報を移動制御 API に渡し、その上で移動制御 API による移動量計算と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。利用するコマンドを以下に示す。

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

`navigate.target` は、移動体が存在する平面を 2 次元座標平面と捉え、目標地点の座標（前後方向への移動量と左右方向への移動量）、及び移動完了時の移動体の向きを指定して移動を命令するコマンドである。このコマンドによる移動命令では、指定した座標および回転量は現在位置からの相対座標、もしくは絶対座標として指定可能である。本稿においては、移動命令で指定する座標は全て絶対座標として指定した。ただし、実際には指定した移動量と実際の移動量には約 50cm の誤差が発生するため、誤差の修正を行った。

`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。

3.4 移動制御 API による移動制御

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 LAN ケーブルで有線接続されており、Double3 から基地局である小型 PC に対して SSH 接続を行うことで端末の情報を取得し、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平均値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。

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する。したがって、Double3 は基地局に対し 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。また、本稿では移動基地局を 1 次元的（直線的）な移動のみを行うことで電波マップの作成と移動制御を行う。理由としては、2 次元的あるいは 3 次元的に電波環境センシング及び移動制御を行うためには、

移動基地局の移動のみで広範囲なエリアを限なく電波品質を計測することは困難であるためである。将来的には、2 次元的あるいは 3 次元的な移動制御を可能にするために、超音波センサなどを用いて物理的環境を捕捉し、電波環境の予測を行うことで電波マップの作成を行う方法を考案する予定である。

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、3.4 節で説明した、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。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

4.3 節で説明する実験環境において、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、本稿では 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。

本稿では、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。

(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。

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 3 のシステムを実装する。

本稿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。

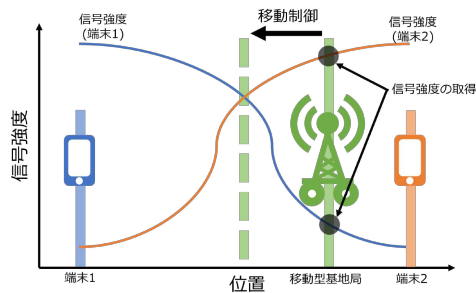


図3 構築するシステムの概念図

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 の平均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 の平均値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

本稿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。本稿では、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、障害物により各地点での電波品質に大きな差が発生する環境を構築する。障害物として、シールド室内の所定の位置に複数枚の電波遮蔽板を設置する。

この環境では、図 4 に示すように、各端末の前方にパネルを設置することで、移動基地局から端末へ発信される電波のうち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させている。また、端末の後方にある壁および横方向にある壁にも電波遮蔽板を設置することにより、基地局から発せられた電波が壁に反射することによる影響を軽減している。

地点 1 と地点 2 では、2 つの端末のうち 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 3 にお

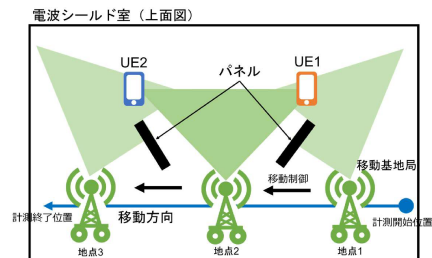


図4 実験環境の構成

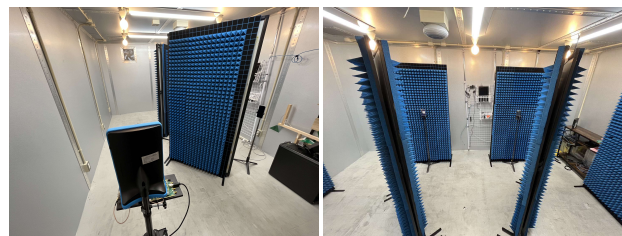


図5 実験環境 (地点 1)

図6 実験環境 (地点 2)



図7 実験環境 (地点 3)

いては、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 4 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 3 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 4 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 5~7 に示す。

4.4 評価方法

本稿では、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 の平均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。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 の平均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確認する。また、移動制御の前後における 2 台の端末の電波強度を比較する。さらに、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

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図 8 に示す。また、電波マップ作成時における RSRP の時系列変化を図 9 に示す。

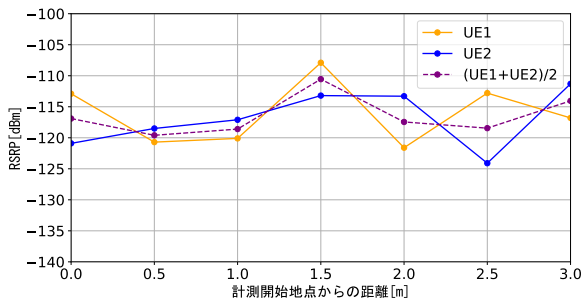


図8 作成された電波マップ

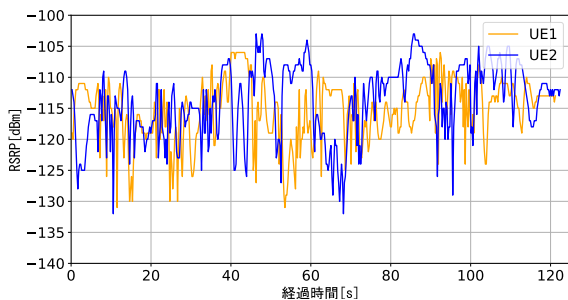


図9 RSRPの時系列変化

表4 実験結果

開始地点からの距離 [m]	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	平均
RSRP[dBm] (平均値)	-116.9	-119.6	-118.6	-110.5	-117.5	-118.5	-114.0	-116.5

なお RSRP は信号強度であり単位は dBm である。

実験の結果、計測開始地点からの移動基地局の距離が約 0m の地点（実験開始直後の位置）における計測開始地点からの移動基地局の距離が約 0m のとき、2つの端末の RSRP の平均値は-116.9dBmであった。また、電波強度計測時において計測開始地点からの移動基地局の距離が約 1.5m のとき、2つの端末の RSRP の平均値が最大となり、その値は-110.5dBmであった。移動制御後、移動基地局は計測開始地点からの距離が約 1.5m の地点に移動し、2つの端末の RSRP の平均値が-112.5dBmとなった。また、各地点の2つの端末の RSRP の平均値の平均値は-116.5dBmであった。

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稿の移動制御手法が効果的であることが確認された。また、移動制御後の地点における RSRP が実験開始直後の位置における RSRP 及び各地点における RSRP の平均値よりも高いことから、移動基地局の移動制御を行うことにより2台の端末の通信品質が改善されることが確認された。

5. おわりに

本稿では、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、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。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平均値が最大となる地点へ自律的に移動制御を行い、2台の端末の通信品質が改善されることが確認された。

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、本稿では、移動基地局を1次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、周囲の物理的環境から電波品質を予測することで移動基地局を2次的に移動させて電波センシングを行い、2次元空間を移動制御する手法についても考案する予定である。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 本研究の一部は JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMS2011 の支援を受けたものである。ここに記して謝意を示す。

文 献

- [1] I. Alawe, A. Ksentini, Y. Hadjadj-Aoul and P. Bertin: "Improving traffic forecasting for 5G core network scalability: A machine learning approach", IEEE Network, **32**, 6, pp. 42–49 (2018).
- [2] ETSI: "TS 123 501 V15.2.0 5G; system architecture for the 5G system (3GPP TS 23.501 version 15.2.0)" (2018).
- [3] 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>.
- [4] 総務省: "郵便・物流領域におけるテクノロジー活用の取組み" (2021). https://www.soumu.go.jp/main_content/000762584.pdf.
- [5] T. Hirose, F. Nuno and M. Nakatsugawa: "Development of wireless systems for disaster recovery operations", IEICE Transactions on Electronics, **98**, 7, pp. 630–635 (2015).
- [6] 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, **66**, 5, pp. 1883–1901 (2018).
- [7] A. Aijaz: "Packet duplication in dual connectivity enabled 5G wireless networks: Overview and challenges", IEEE Communications Standards Magazine, **3**, 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, **21**, 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] D. Robotics: "Double 3 developer resources". <https://www.doublerobotics.com/developer.html>.