

3次元LiDARを搭載した自律走行ロボットを用いた Wi-Fi電波強度および通信速度測定システム

盛下 泰暉¹ 浅井 悠佑¹ 浦野 健太¹ 米澤 拓郎¹ 河口 信夫^{1,2}

概要: 本研究では、3次元LiDARを搭載した自律走行ロボットを用いたWi-Fiの電波強度および通信速度を取得・可視化するシステムを提案する。現在、スマートフォンや通信機器の普及により、多くの人がネットワークを利用して通信する機会が増えている。しかし、電波はその性質上、届きやすい場所と届きにくい場所が存在し、特に屋内では障害物などの影響により、良質な電波を受信できないエリアが存在する可能性がある。また、電波の届きやすさだけでなく、同時に接続する端末の数や電波の干渉などによって通信速度が低下するエリアも存在する可能性がある。本研究では、屋内のあらかじめ決められた経路点を順番に巡りながら、空間のWi-Fi強度だけでなく、通信速度についても一定距離ごとに測定し、得られたデータの可視化を目指した。ルートを走行しながら等間隔で測定を行う場合、間隔が大きい場合には通信状況が急激に変化するポイントを測定できない可能性がある。測定間隔を小さくすると、そういった急激な変化に対する測定は可能であるが、空間全体の測定に時間を要してしまう。本研究では測定値の変化が小さな場所では測定間隔を広く取りつつ、測定値の急激な変化が見られた際にはその地点付近を細かく測定する、というような測定地点を動的に生成する手法を取った。

Wi-Fi signal strength and communication speed measurement system using an autonomous robot equipped with 3D LiDAR

TAIKI MORISHITA¹ YUSUKE ASAI¹ KENTA URANO¹ TAKURO YONEZAWA¹
NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

1. はじめに

ここ数十年の間にスマートフォンやノートパソコンなどの通信機器が普及し、多くの人々が無線によってネットワークに接続するようになった。それに伴い、各通信キャリアによる基地局の増設や屋内の中継機の設置、また、各施設におけるフリーWi-Fiの導入などが進んでいる。

無線通信では端末が最寄りの基地局、またはルータと電波を介して情報のやりとりを行う。電波の強度は一般に発信源からの距離に比例し、発信源から遠くなる程電波は弱くなり、通信速度も低下する。また、基地局に対する通信

機器の数にも比例し、1つの基地局に複数の端末が接続すると端末1台あたりの通信速度は低下する。その他にも障害物による電波の反射、回折も発生するため、人やものが動く空間の電波の強度や通信速度は動的に変化する。通信品質の動的な変化を観測する場合、多数のセンサを設置して常時観測するか、定期的に測定員が空間を巡回しながら測定する方法をとる必要がある。大手通信キャリアでは屋内の大型イベントなどの通信品質を安定させるために、無線LANに接続している人数を常時観測し、通信が不安定な可能性のあるエリアに小型のWi-Fi基地局を持ったスタッフを派遣するという「人間Wi-Fi」[1]と呼ばれる取り組みを行なっている。

本研究の目的は、人間Wi-Fiのような通信品質を安定させる取り組みを自律走行ロボットにて実施する前段階として、空間のWi-Fi電波強度および通信速度のヒートマップ

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering Nagoya University

² 名古屋大学 未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

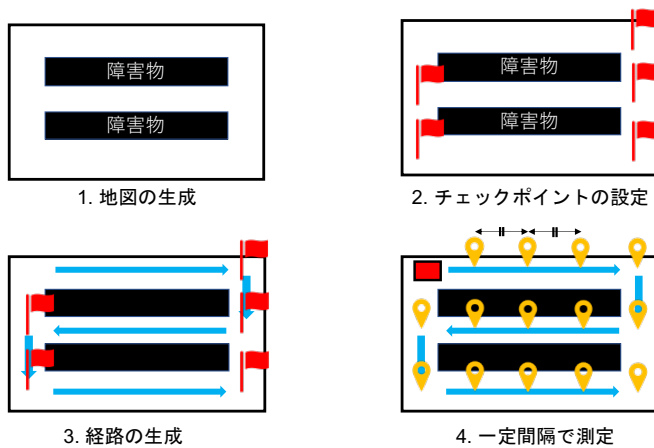


図 1 提案手法の概要

を自律走行ロボットにて作成することである。

空間の Wi-Fi 環境地図は屋内における位置推定の研究にも用いられ、盛んに研究されている [2][3][4]。屋内位置推定に用いられる Wi-Fi 環境地図は精度が非常に高い。そのため、多くの地点で電波強度を測定する必要がある。多くの地点にて測定を行うのは非常にコストがかかるため、少ない測定データと機械学習によってそのコストを低減させたり、ノイズの影響を除去した環境地図を構築する研究なども行われている [5][6]。しかし、これらの研究で用いられる Wi-Fi 環境地図は電波強度、つまり電波の飛び方を表現したものであり、同時に接続している端末数や他の機器による電波干渉に影響する通信速度を正確に表現できるものではない場合が多い。

空間の Wi-Fi 電波強度地図を手作業による測定にて作成する場合、あらかじめ決められた場所にて測定を行い、データを取得していくと想定される。本研究では、決められた測定地点ではなく、決められたチェックポイントを自律走行にて巡りながら一定距離ごとに測定を行い、データを収集する手法をとった。本研究の基本的な手法の概要を図 1 に示す。本研究では、以上の手法にて Wi-Fi の電波強度と通信速度の測定実験を実施した。Wi-Fi の電波強度や通信速度はその性質から、少し場所が変化するだけで測定値が大きく変化する場合がある。実験では、Wi-Fi の通信速度を細かく測定するために、通信速度の大きな変動が見られた場合に測定地点を追加するという手法をとった。これにより、測定値の変化が大きな場所にて詳細な測定が可能である。以上の実験の結果、少ない労力にて電波強度および通信速度のヒートマップを作成できた。

2. 関連研究

2.1 屋内位置推定

前章で述べた通り、Wi-Fi の電波強度地図を用いる研究例として、屋内位置推定に関する研究がある。屋外では全地球測位システム (GPS) によってその端末の座標を測定で

きるが、屋内では人工衛星からの電波を受信できず、正確な位置を取得できない場合が多い。一方、屋内では Wi-Fi 環境が整備されている場合が多く、発信された複数の Wi-Fi の電波強度を組み合わせることで屋内での位置を推定可能である。そのため、Wi-Fi による位置推定は屋内の GPS に置き換わろうとしている。屋内位置推定のためには高精度な Wi-Fi 電波強度地図が必要である。一般的には人の手によって空間内の様々な場所で測定したデータから構築するが、機械学習を用いて測定時のノイズを考慮した高精度な Wi-Fi 環境地図を作成する手法も多く提案されている。

Gingxue らは適応的経路損失モデルによる補間により、少ない測定点から高精度の Wi-Fi 環境地図を構築した [7]。その結果、9.6 m 間隔で取得した Wi-Fi データから構築したマップが、1.2 m 間隔で人の手によって構築されたマップと同等の精度を達成した。Han らは実測値による Wi-Fi 環境地図と敵対的生成ネットワーク (GAN) によって構築した Wi-Fi 環境地図を合成することで高精度な Wi-Fi 環境地図を構築した [8]。ロボットが測定できないような机の上などの空間の電波強度を GAN によって生成できるように学習されているため、実測値と合成させることできめ細かいマップを構築している。坂らは Wi-Fi 環境地図に加え、建物の残留磁気マップと組み合わせることで屋内での位置推定を行なった [9]。残留磁気は建築物に用いられる鉄筋コンクリートから発せられ、場所によってその磁場の強さが変化する。これにより Wi-Fi のみの屋内位置推定よりも高い精度を達成している。その他にも Bluetooth Low Energy (BLE) の受信電力 [10] による位置推定やスマートフォンの加速度センサの情報 [11] と組み合わせることで位置を推定する研究も行われている。

以上のように、Wi-Fi の電波強度に限らず、屋内位置推定の研究は非常に盛んに行われている。しかし、いずれの研究も屋内での位置を推定するために Wi-Fi の受信信号強度を収集しているものであり、Wi-Fi の通信速度を評価できるとは限らない。

本研究では、電波強度に加え、研究例の少ない通信速度を自律走行ロボットを用いて収集し、少ない労力にてヒートマップを作成する。また、通信速度の変動に応じて、測定地点を動的に生成するという手法により、測定値の変化に強いマップを作成する。

3. 提案手法

本研究では、空間内のチェックポイントを自律走行で巡回しながら一定間隔で Wi-Fi の電波強度と通信速度を測定しつつ、測定値に変動があった場合には測定地点を動的に生成するという手法をとった。本章ではその手法に関する説明を行う。

3.1 チェックポイントの巡回

本研究では、事前に設定したチェックポイントを巡回しながら測定を行う手法をとった。これにより、事前に自律運転の走行ルートを大まかに決定可能なため、測定地点を1つ1つ設定することなく一定間隔での測定が実施可能である。また、1つ1つ測定地点を設定しないことにより、人の移動などによって測定値の変動の大きなエリアが変化しても、環境に合わせて測定値を新たに追加することができる。測定値の追加については3.2節にて説明する。なお、チェックポイントの座標については、自己位置推定にて使用する3次元点群地図と同じ座標系にて設定する必要がある。

3.2 Wi-Fi の測定

Wi-Fi の測定については、後述する測定コマンド・測定ツールを使用して Wi-Fi の受信信号強度と通信速度を取得した。受信信号強度と通信速度は、人やものが動く環境では常に変化する。特に通信速度は毎秒単位で変化するため、測定する地点にて数秒間停止して測定を実施する必要があった。本手法では、測定する地点に到達したタイミングで自動運転を停止し、その後数秒間 Wi-Fi 通信速度を測定した後、自動運転を再開し、次の測定地点へ移動するという流れとなっている。数秒間停止して測定することで、より信頼可能な測定値が取得可能であると考えた。

測定するタイミングについては、1つ目のチェックポイントで最初の測定を行い、その後は次のチェックポイントに向かって走りつつ、前回の測定地点から一定距離だけ離れるたびに測定を行った。例外として、チェックポイントに到達した場合は、一定距離だけ離れていなくても測定を行った。また、取得した測定値は csv 形式でファイルに記録・保存した。

本研究では一定間隔で測定することに加え、測定値の変動が大きかった場合には前回の測定地点まで戻り、その後短い間隔で再測定するという手法をとった。前回の測定地点に戻る方法として様々な手法を検討したが、本研究では移動指令の逆再生をすることでバック走行を再現し、前回測定地点に移動した。逆再生することで、ロボットの向きを変えることなく移動できるため、移動時間を短縮可能である。

以上の手法より、変動の小さな場所では広い間隔で効率よく測定でき、変動の大きな場所では詳細な測定が可能となった。再測定の概要を図2に示す。

4. システム構成

本章では研究にて使用した機器や開発環境、使用したソフトウェアの構成や Wi-Fi の測定方法について記す。

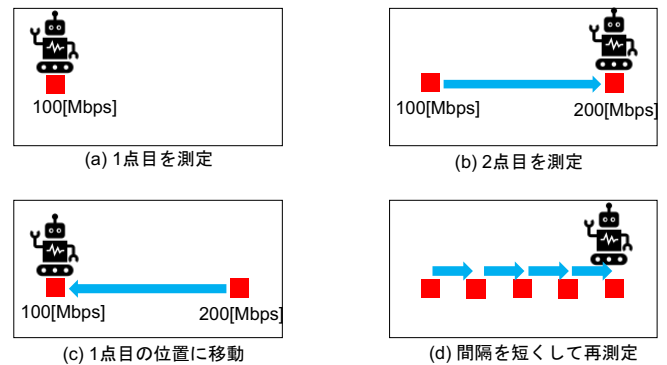


図2 再測定の概要



図3 測定用ロボット

4.1 ハードウェア構成

本研究ではロボットを使用して実験を行なった。ロボットの土台には、ヴイストーン社製の4輪オムニホイール台車ロボットであるメカナムローバー Ver2.1[12]を用いた。この台車ロボットには前方と後方に北陽社製の2次元 LiDAR が搭載されているが、今回は前方の2次元 LiDAR のみを障害物検知用の補助センサとして使用した。また、空間を認識するメインセンサとしてアルゴ社製の全方位レーザー LiDAR イメージングユニットである Velodyne VLP-16 を用いた。Velodyne VLP-16 は、垂直方向の環境も認識可能な3次元 LiDAR であるため、高精度な自己位置推定および障害物検知を可能にする機器である。本研究では台車ロボットに制御兼 Wi-Fi データ取得用のノートパソコンと3次元 LiDAR を搭載して実験を行なった。測定用ロボットの外観を図3に示す。

4.2 ソフトウェア構成

ソフトウェアの構成として、ロボットの移動制御を行う部分と Wi-Fi を測定する部分に分けられる。本節ではそれ

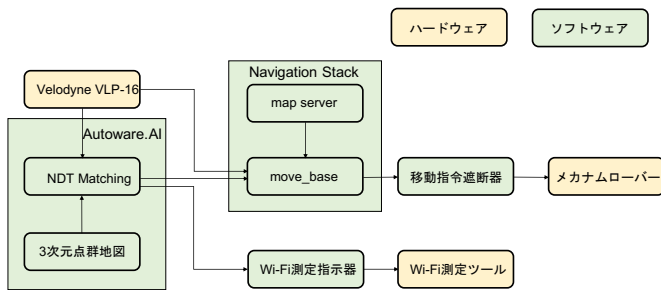


図 4 ソフトウェア構成

それぞれについて説明を行う。

4.2.1 制御ソフトウェア構成

本研究では、オープンなロボット開発プラットフォームである Robot Operating System(ROS) と自動運転ソフトウェアである Autoware.AI を使用して制御部分の開発を進めた。Autoware.AI は ROS をベースに作られているため、ROS で使用可能なノードと組み合わせることが可能である。図 4 にハードウェアを含めたソフトウェア構成を示す。ロボットの自己位置推定を行うノードとして、Autoware.AI で使用可能な ndt matching[13] を使用した。ndt matching は事前に作成した 3 次元点群地図と 3 次元 LiDAR からの現在の空間情報を利用してロボットの位置を算出するノードである。ndt matching で使用している Normal Distribution Transform(NDT) アルゴリズムは、3 次元空間をボクセルに区切り、正規分布として各ボクセルの情報を保持するため、自己位置推定に必要な計算量を削減しつつ、高い精度の位置推定が可能である。

また、ロボットの自律運転の経路生成を担うノードとして、ROS の自律運転パッケージである Navigation Stack の move base を利用した。move base は 2 次元の静的な環境地図と LiDAR からの情報によって空間のコストマップを構築し、それを元に大域的な経路と局所的な経路の生成および移動制御までを行う自律走行の核となるノードである。

その他にも、地図情報を提供するノードや、移動指令の発信・遮断・逆再生を行うノード・Wi-Fi の測定タイミングを指示するノードなど、複数のノードを組み合わせることでロボットの制御を行った。

4.2.2 Wi-Fi の測定

本研究では Wi-Fi の受信信号強度 (RSSI) と通信速度を測定した。受信信号強度については Linux のターミナルにて実行できる iwconfig コマンドを使用した。iwconfig は現在利用している無線 LAN の情報を表示するほか、無線 LAN の接続の切り替えも実行可能なコマンドである。コマンドを実行することで、接続中の Wi-Fi の受信信号強度を取得できる。また、通信速度については帯域幅測定ツールである iperf3 を使用した。iperf3 はクライアントの端末からサーバの端末へ TCP パケットを送信し、その送信パ

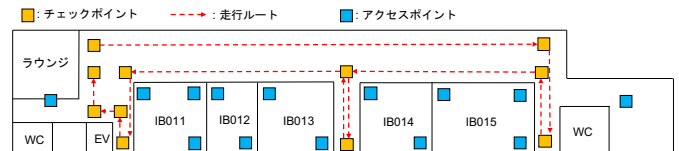


図 5 平面図と測定ルート



図 6 実験場所

表 1 測定内容

条件	内容
SSID	nuwnet
周波数	5.0 [GHz]
測定間隔	6.0 [m]
再測定条件	前回測定値より 30% 変動
再測定間隔	2.0 [m]

ケット数から通信速度を算出するツールである。本研究では制御用とは別にサーバ用仮想マシンを用意し、制御用 PC をクライアントとして接続することで測定対象の Wi-Fi の通信速度を測定した。

5. 実験

本研究では上述した提案手法にて実験を実施した。本章では実験の詳細とその結果・考察について記す。

5.1 実験場所

本研究の実験は名古屋大学 IB 電子情報館中棟の 1 階廊下にて行なった。この場所は直線が多いことに加え、障害物も少ないシンプルな空間である。また、複数の講義室と繋がっており、各講義室には Wi-Fi ルータが設置してあるため、本研究の実験に最適であると判断した。また、測定する時間については、滞在する学生の比較的少ない午後 6 時ごろを選択した。図 5 に実験場所の平面図と走行ルートを示す。なお、IB011 や IB012 などの空間は講義室を指している。また、図 6 にラウンジ側から見た実験場所の様子を示す。

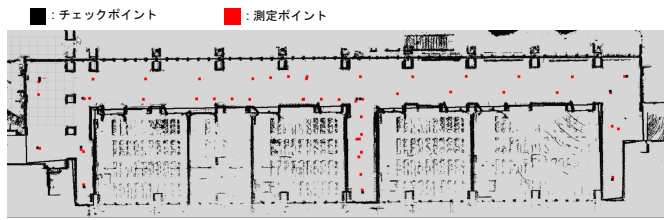


図 7 測定地点



図 8 実験の様子

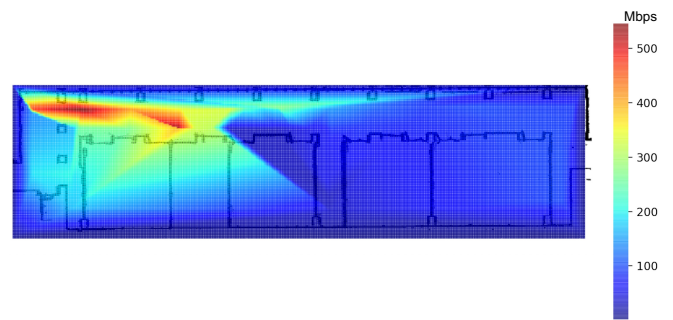


図 9 通信速度ヒートマップ

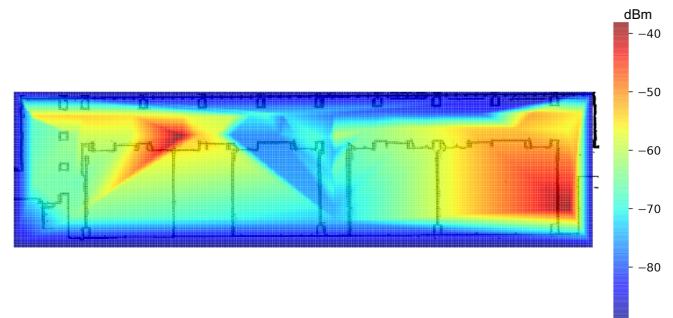


図 10 電波強度ヒートマップ

5.2 測定内容

本実験の測定内容を表 1 に示す。本実験にて測定した Wi-Fi については、各講義室や通路に同じ SSID の Wi-Fi ルータが設置されている。再測定の条件については、前回の通信速度測定値の 30% 以上の変動が起こった場合とした。例えば、前回測定地点の通信速度が 100 [Mbps] だった場合、次の測定地点で 70 [Mbps] 以下、または 130 [Mbps] 以上の測定値が観測された場合に再測定が行われる。再測定の結果、最終的に図 7 の赤い四角形に示した場所にて測定を行った。図 8 にその実験の様子を示す。

5.3 測定結果

実験にて収集したデータを補間して作成した通信速度と電波強度のヒートマップを図 9、図 10 に示す。なお、地図全体を補間するため、地図の四隅は通信速度 0 [Mbps]、電波強度 -90 [dBm] とした。図 9 より、開始地点付近にて 500 [Mbps] 程度の高い通信速度が観測されたことが確認できる。これは、開始地点にて Wi-Fi を一度切断し、再度接続してから実験を行なったため、IB011 講義室に設置された Wi-Fi ルータに接続されたのではないかと考えられる。

一方、図 10 からは開始地点から離れた場所にも電波強度が高いエリアが存在することが確認できる。これは同じ SSID の Wi-Fi ルータがすぐそばにあったため、高い電波強度を観測したが、通信相手は IB011 講義室のルータから切り替わらなかったため、通信速度は低いままであったのではないかと考えられる。

テスト走行時にも同様の実験を行なったが、今回と同じような結果になっているため、今回測定した Wi-Fi は通信するルータが正しく切り替わりにくかったと考えられる。

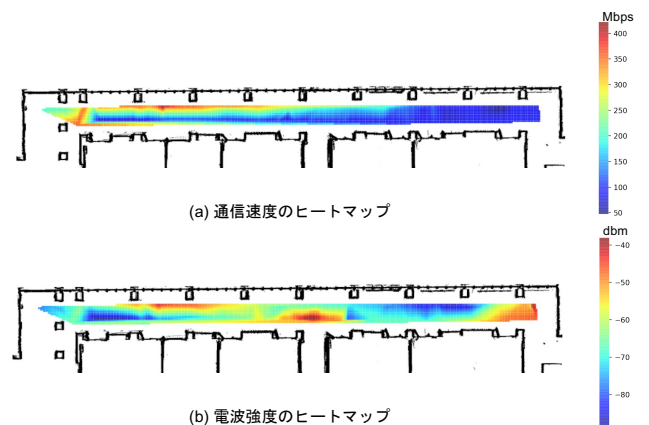


図 11 テスト走行時の測定結果

しかし、通信速度の高いエリアにおいては電波強度も高いなど、通信速度と電波強度に相関があることも確認できたため、Wi-Fi の通信速度および電波強度を自動測定するシステムとしては十分な結果ではないかと考えられる。今後は人の多い時間帯や場所においても同じような相関があるのかを確認する必要がある。

6. おわりに

本研究では自律走行ロボットを用いて Wi-Fi の電波強度と研究例の少ない通信速度を一定間隔で測定し、それぞれのヒートマップを作成した。提案した手法により、ロボットを用いた自動測定による人的コストの低下、チェックポイント巡回式測定による測定地点の自動生成および動的な追加を実現しつつ、測定値の可視化を行った。また、実験

の結果、提案した手法による自動測定システムの有効性を示した。

現段階では複数のSSIDの情報を取得できないため、これを実装してさらに効率の良い空間情報の測定・可視化が課題となる。また、今回は移動指令を逆再生することでバック走行による移動を実現したが、単なる逆再生では動的な障害物に対応できないため、改善する必要がある。また、今回はチェックポイントを巡回しながら測定する形式を取ったが、空間の地図から等間隔に測定地点を生成できれば、より効率の良い測定が行えると考えられる。

今後の展望として、今回は1回のテスト実験・1回の実験しか実施しなかったが、一定時間ごとに同様の測定を行うことで、時系列の変化の可視化も可能であると考えられる。それに伴い、通信品質の悪い場所に移動式のWi-Fiルータを設置することで、通信品質の改善にも応用可能ではないかと考えられる。また、Wi-Fiの通信速度に限らず、騒音・大気汚染・照度など、様々な自動測定にも提案した手法を応用できると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、NICT委託研究に支援していただいた。

参考文献

- [1] <https://time-space.kddi.com/au-kddi/20190717/2697>
- [2] Ocana, Manuel, et al. "Comparison of wifi map construction methods for wifi pomdp navigation systems." International Conference on Computer Aided Systems Theory. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [3] Chen, Zhenghua, et al. "Fusion of WiFi, smartphone sensors and landmarks using the Kalman filter for indoor localization." Sensors 15.1 (2015): 715-732.
- [4] Chen, Chen, et al. "High accuracy indoor localization: A WiFi-based approach." 2016 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). IEEE, 2016.
- [5] Pan, Sinno Jialin, et al. "Transfer learning for wifi-based indoor localization." Association for the advancement of artificial intelligence (AAAI) workshop. Vol. 6. The Association for the Advancement of Artificial Intelligence Palo Alto, 2008.
- [6] Abbas, Moustafa, et al. "WiDeep: WiFi-based accurate and robust indoor localization system using deep learning." 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications PerCom. IEEE, 2019.
- [7] Bi, Jingxue, et al. "Fast radio map construction by using adaptive path loss model interpolation in large-scale building." Sensors 19.3 (2019): 712
- [8] Zou, Han, et al. "Adversarial learning-enabled automatic WiFi indoor radio map construction and adaptation with mobile robot." IEEE Internet of Things Journal 7.8 (2020): 6946-6954.
- [9] 坂涼司, 梶克彦, and 河口信夫. "磁気とWiFi電波強度を含んだマップ情報に歩行者デッドレコニングを併用した屋内位置推定手法." 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報 113.399 (2014): 23-28.
- [10] 浦野健太, et al. "ニューラルネットワークを用いた大規

模イベント向け BLE 屋内位置推定の比較評価." マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2019 論文集 2019 (2019): 29-35.

- [11] 谷内大祐, and 前川卓也. "位置フィンガープリントの自動更新を用いた電波環境変化に頑健な屋内位置推定手法." 情報処理学会論文誌 55.1 (2014): 280-288.
- [12] <https://www.vstone.co.jp/products/wheelrobot/ver2.1.html>
- [13] Biber, Peter, and Wolfgang Straßer. "The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching." Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). Vol. 3. IEEE, 2003.