

医療・介護施設内見守りロボット Quriana の開発

○井塚智也 河村晃宏 安琪 倉爪亮（九州大学）

1. はじめに

近年、医療や介護現場での労働力不足や共働き世代の増加など、ロボットによる生活支援サービスへの期待が高まっている。特に最近では新型コロナウイルスの急速な蔓延による医療逼迫が現実になりつつあり、人同士の接触を避ける点からも医療現場へのロボットの導入が強く望まれている。

そこで本研究では、医療・介護施設で働く医療従事者の負担を軽減するため、人に代わり医療施設の利用者の見守りを行うサービスロボット Quriana を開発する。ロボット Quriana は頭部に 360 度カメラを搭載し、ロボット周囲に存在する施設利用者を撮影できる。医療従事者の手を煩わせることなく見守りを行うために、Quriana に屋内の部屋を順次巡回する自律移動機能を搭載することを目標とする。

2. ロボットアーキテクチャ

2.1 見守りサービスロボット Quriana

サービスロボット Quriana (図 1) は、360 度カメラを搭載し医療・介護施設利用者の見守りを行う。また屋内自律走行のための自己位置推定を実現するため、各種センサ（ワイヤレス距離センサ、2D-LiDAR、ホイールエンコーダ）を搭載している (図 3)。自律走行を行う廊下の壁面にも対となるワイヤレス距離センサを複数設置する (図 2)。便宜上、以降はロボットに取り付けたワイヤレス距離センサをタグ、環境に取り付けたワイヤレス距離センサをアンカと呼称する。

ロボットソフトウェアの開発は Robot Operating System 2 (ROS2) を用いて行う。また各種指令のための、クライアント PC とロボット間の通信も ROS2 を用いて行う。

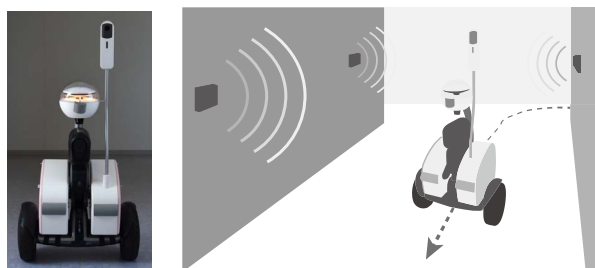


図 1: Quriana 図 2: ワイヤレス距離センサによる自律走行

2.2 360 度カメラを利用した見守り

ロボットによる施設利用者の見守りを行うため、360 度カメラ THETA V から得られた周囲の映像をクライアント PC に転送するシステムを構築する。現在は GitHub 上で公開されているアプリケーションを用い、WebRTC を使った映像伝送に成功した (図 4)。また

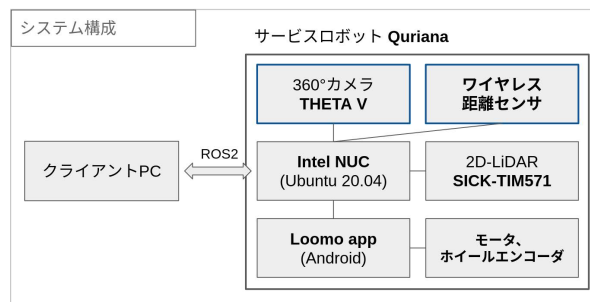


図 3: Quriana システム構成図

ROS2 上でも 360 度カメラからの映像を扱えるよう開発を進めている。

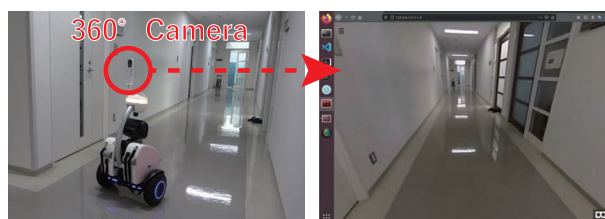


図 4: 360 度カメラの映像伝送

3. ワイヤレス距離センサ

3.1 ワイヤレス距離センサの特徴

屋内位置推定でよく用いられる 2D-LiDAR は、環境が変化しなければ正確な位置同定が可能であるが、家具や壁の配置など、環境が大きく変化した場合には測位が困難になる。また、レーザが壁まで届かない広い空間や、特に Quriana のように倒立振り子型ロボットでは、ロボット本体が前後左右に振れてレーザが水平に放射されない場合など、搭載したレーザによる測位が困難な場合もある。そのような場合、事前に保持した環境地図と測位によって得られた周囲の距離情報のマッチングによる定位は難しい。また、廊下のような環境ではロボットが 180° 反対方向に進んでいても同様の周囲形状が得られてしまう。そのため、一度大きくマッチングを間違えてしまうとその後の位置推定に支障がでてしまう恐れがある。

一方、ワイヤレス距離センサはアンカとして環境側に複数設置する。そのため得られる情報は常に環境に固定された既知点からの距離であり、2D-LiDAR のように環境地図と距離情報とのマッチングに失敗することがない。

そこで本研究ではワイヤレス距離センサを利用した定位に取り組み、またワイヤレス距離センサと 2D-LiDAR を組み合わせた手法についても検討する。

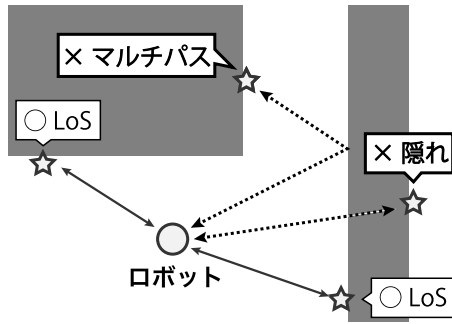


図 5: アンカ（星マーク）の隠れとマルチパス（環境上面から見た図）

3.2 NLoS 状態による問題

ワイヤレス距離センサは、センサ間に障害物が存在することにより、隠れやマルチパスの影響を受けやすい（図 5）。特にマルチパス条件下では直接光でなく反射光が通過したパスを計測してしまい、大きく測定距離が伸びてしまう [1]。ワイヤレス距離センサを用いた屋内ロボット自律走行に関する先行研究では、センサ間に障害物がない Line of Sight (LoS) 環境下や、Non-LoS (NLoS) 環境かつ歩行者など動的障害物が存在しない静的環境下で取り組まれてきた [2] [3]。

4. 静的障害物を考慮したワイヤレス距離センサによる位置推定

ワイヤレス距離センサによる位置推定ではできるだけ NLoS 状態にあるアンカの値を反映させずに、LoS 状態のアンカからの信号のみを利用して定位することが求められる。本研究ではあらかじめ保持している環境地図および環境上のアンカの位置から、各アンカが見える範囲を計算し保持しておくことで、静的障害物を考慮したロボットの位置推定を行う。

4.1 事前準備

4.1.1 環境の測定およびアンカの設置

まず、走行する環境の占有格子地図を作成しておく。本研究では FARO 社製レーザースキャナを使用し走行する室内、廊下の環境を 3D スキャン、その後データから外形を取り、占有格子地図を作成した。

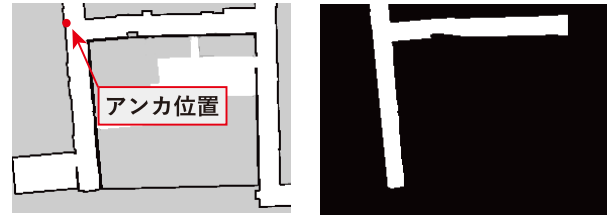
また、屋内の位置を取得するため、ロボットの中央高さ 90cm の場所にタグを取り付け、環境の壁高さ 90cm の各地点にアンカを複数取り付ける。同じ高さに取り付け、定位計算ではタグとアンカは二次元平面上に存在するものと仮定する。

4.1.2 LoS マップ作成

あらかじめ環境地図および環境上のアンカの位置から、各アンカが見える範囲を計算し、地図として記録しておく。本研究では 4.1.1 項にて作成した環境の占有格子地図およびアンカの取り付け位置から自動で、各アンカごとに LoS 条件にて測定できる範囲を計算し LoS マップとして保存するツールを作成した（図 6）。

4.2 ロボットの位置推定

ロボットの現在位置を取得するため、本節で述べる位置推定は繰り返し行っている。現在は 1Hz の周期で



(a) 環境地図およびアンカ位置 (b) 生成した LoS マップ

図 6: 環境地図・アンカ位置による LoS マップの生成例

ワイヤレス距離センサから距離情報を得る。

4.2.1 ロボットとアンカ間の距離測定

最初のループのみ、環境地図上のロボット初期推定位置を手動で設定する。与えた初期位置、および作成した LoS マップ（図 6b）から現在の推定位置から見えるアンカの情報を取得し、ロボットのタグとアンカ間の距離を取得する。次ループからは位置推定処理で最終的に推定した位置と、LoS マップを照合させ、LoS 条件にて取得できるアンカを特定しそれらとの距離を取得する。

ロボットとの距離が近いアンカからの情報の方が正確であるという想定から、これらによって取得した距離情報が 5 つ以上の場合、距離が近い順に 4 つの距離情報のみを使い、4.2.2 項の定位計算を行う。また距離情報が 2 つ以下しか得られなかった場合、定位計算は行わない。

4.2.2 ワイヤレス距離センサから得られる距離情報を利用した定位

ワイヤレス距離センサから得られた 3 つまたは 4 つの距離情報から、ロボットの位置座標 (x, y) の推定を行う。まず、あらかじめ与えている環境地図上の i 番目のアンカの位置を $A_i := (a_{ix}, a_{iy})$ とし、また i 番目のアンカから実際に得られた距離情報を d_i とする。この時、環境地図上のロボット位置 $X := (x, y)$ を求めるため、以下の目的関数 f を最小化する解を Nelder-Mead 法により求め、ワイヤレス距離センサによって得られたロボット位置とする。また、Nelder-Mead 法の探索開始点は前回の推定位置とした。

$$f(x, y) = \sum_i \left(\sqrt{(x - a_{ix})^2 + (y - a_{iy})^2} - d_i \right)^2$$

4.2.3 拡張カルマンフィルタ (EKF) による位置情報および速度情報の統合

前項まででワイヤレス距離センサによる位置推定について述べた。しかし、自律移動のためにはより推定周期が短く、位置情報の他に角度情報も合わせた姿勢情報が必要である。そこで、本研究では高い周期で車輪の回転速度が得られるホイールエンコーダから、ロボットの速度 (\dot{X}, \dot{Y}) および Yaw 角の角速度 $\dot{\theta}$ を得、4.2.2 項で得られた位置情報と合わせて統合することで拡張カルマンフィルタによりロボットの状態（姿勢）を推定した。

拡張カルマンフィルタはバイズ推定をもとにしており、状態、および状態の共分散を2段階の処理（予測ステップ、観測ステップ）を用い、繰り返し更新を行うことで状態の推定を行う。

ロボットの位置、角度、速度、角速度、加速度を状態 X として扱う。予測ステップではロボットモデルにより状態、共分散の更新を行う。観測ステップでは、ワイヤレス距離センサによって得られた位置座標 x, y 、ホイールエンコーダによって得られた速度 \dot{X}, \dot{Y} と角速度 $\dot{\theta}$ 、および共分散により、状態および共分散の更新を行う。本研究ではロボットモデルなどこれら EKF の実装に `robot_localization` パッケージ [4] を利用している。

4.3 走行実験

本アルゴリズムの性能を確かめるため、大学内に設置した模擬コース上で、Quriana に本アルゴリズムを搭載し幅およそ 2m の廊下での走行実験を行い、走行できることを確認した (図 7)。しかしながら、病室を想定した部屋への入室は幅 90cm のドア部分の通り抜けに失敗した (図 8)。

5. 動的障害物による影響

ワイヤレス距離センサは壁などの環境に固定された障害物だけでなく、歩行者など動的障害物の影響によっても NLoS 状態に陥る。そこで現在動的障害物による影響を調べ、対処法を検討するため2種類の実験・検証を行っている。

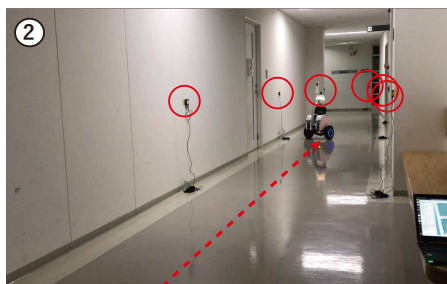
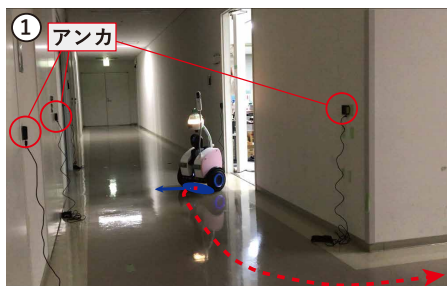


図 7: 廊下での自律走行

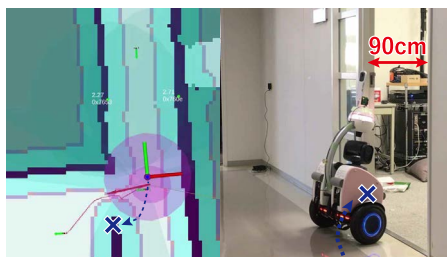


図 8: ドアの通り抜け

証を行っている。

5.1 歩行者による NLoS が引き起こされる状況での自律移動シミュレーション

ロボットと壁に設置したワイヤレス距離センサ間に、歩行者など動的障害物の存在によって NLoS 状態に陥ってしまう。本実験では、歩行者を幅 50cm の角柱だとみなし、歩行者がロボットの側を歩いたり、通り抜けることでアルゴリズムにどのような影響があるかシミュレータ Gazebo 上でシミュレーションを行い実験した (図 9)。アルゴリズムは、4.章で説明した①ワイヤレス距離センサとホイールエンコーダによる手法の他に、②2D-LiDAR とホイールエンコーダを用いる Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) [5]、さらに AMCL の位置推定とワイヤレス距離センサによる定位 (4.2.2 項を参照) を拡張カルマンフィルタの観測とした、③ワイヤレス距離センサ+AMCL の手法について検証を行った。③で用いた AMCL は ROS2 の実装に一部変更を加え、パーティクルの更新を最低 1Hz の周期で行うようにした。

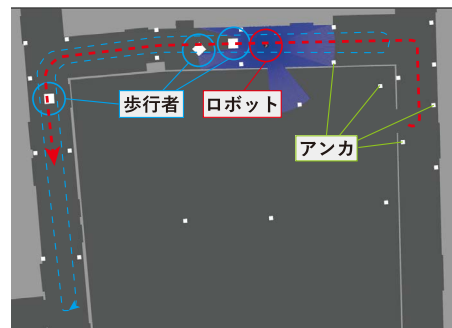


図 9: 自律移動シミュレーション環境

5.1.1 ワイヤレス距離センサのシミュレーション

Barral, V., et al. による ROS プラグイン [1] を ROS2 に移植し実験を行った。このプラグインでは以下の4つの状態について、実験により得られたバイアスや分散によりワイヤレス距離センサから得られる測定距離および信号強度がシミュレートされる。

LOS タグとアンカ間に障害物が存在せず、直接波が観測され距離をほぼ正確に得ることができる。

NLOS Soft タグとアンカ間に薄い障害物が存在し、信号強度が不安定な透過波が観測される。

NLOS Hard タグとアンカ間に厚い障害物があり、かつ反射経路が存在する。反射波が観測され距離推定値が実際より長くなる。

NLOS 障害物により観測値が得られない。

5.1.2 歩行者のシミュレーション

歩行者シミュレーションプラグイン `pedsim_ros`¹ を ROS2 に移植し利用した。歩行者ごとに、設定した巡

¹https://github.com/srl-freiburg/pedsim_ros

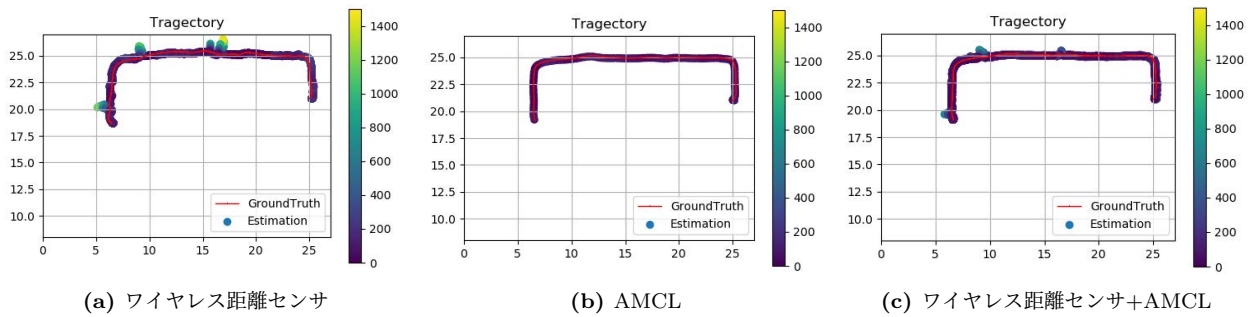


図 10: 自律移動シミュレーション 位置推定・走行経路例 (プロットの色は真値と位置推定の差 [mm] を示す)

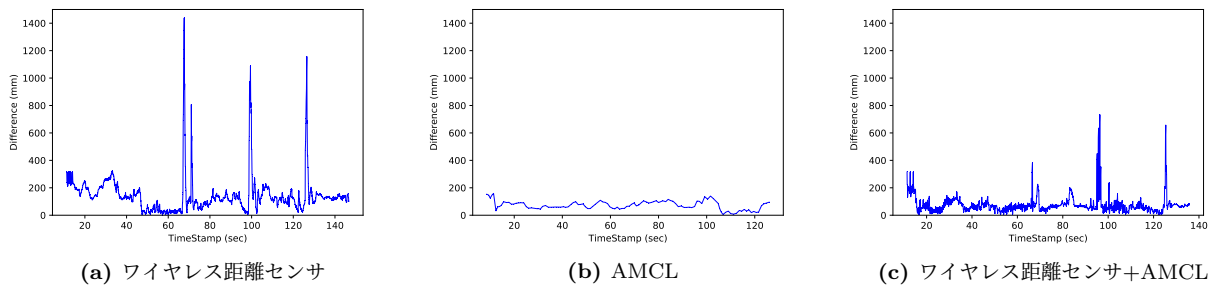


図 11: 自律移動シミュレーション 真値と位置推定の差の時間推移

回地点方向の力、壁を避ける力、他の歩行者やロボットを避ける力の3つの力を足し合わせる Social Force Model [6] により、歩行者のシミュレーションを行っている。

5.1.3 検証結果

シミュレータ Gazebo 上で、ロボットシミュレータに 5.1.1 節のワイヤレス距離センサを搭載し、5.1.2 節の歩行者を3人歩行させた環境で、3種の位置推定手法による自律移動の実験を行った(図9)。現在、提案手法である①ワイヤレス距離センサは6回中3回、②AMCLは7回中7回、提案手法とAMCLを組み合わせた③ワイヤレス距離センサ+AMCLは6回中6回目標地点への到達に成功した(図10, 図11)。

6. おわりに

本発表ではサービスロボット Quriana による医療・介護施設見守りサービスを実現するため、主にワイヤレス距離センサによる屋内位置推定・自律走行に取り組んだ。

現在、幅2m程度の廊下の走行には成功しており、今後はドアの通り抜けや歩行者など動的障害物への対処の実現のため、拡張カルマンフィルタなどパラメータ調整や、ワイヤレス距離センサと2D-LiDARの組み合わせによる手法など、さらなる精度の向上やアルゴリズムの検討・改良に取り組む予定である。

謝辞 本成果の一部は、内閣府が進める「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期/フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」(管理人: NEDO)における研究開発によるものです。

参考文献

- [1] Valentín Barral, Carlos J. Escudero, José A. García-Naya, and Roberto Maneiro-Catoira. Nlos identification and mitigation using low-cost uwb devices. *Sensors*, Vol. 19, p. 3464, 8 2019.
- [2] Valerio Magnago, Pablo Corbalan, Gian Pietro Picco, Luigi Palopoli, and Daniele Fontanelli. Robot localization via odometry-assisted ultra-wideband ranging with stochastic guarantees. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1607–1613, 2019.
- [3] Xiaomin Zhu, Jianjun Yi, Junyi Cheng, and Liang He. Adapted error map based mobile robot uwb indoor positioning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 69, pp. 6336–6350, 9 2020.
- [4] T. Moore and D. Stouch. A generalized extended kalman filter implementation for the robot operating system. In *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-13)*. Springer, 7 2014.
- [5] Steve Macenski, Francisco Martín, Ruffin White, and Jonatan Ginés Clavero. The marathon 2: A navigation system. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2718–2725, 2020.
- [6] Dirk Helbing and Péter Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51, pp. 4282–4286, 5 1995.