

# ワイヤレス距離センサのNLoS情報を活用した屋内ロボット位置推定手法の開発

○井塚智也 倉爪亮 (九州大学)

## 1. はじめに

屋内ロボットの自律移動には安定した位置推定手法が求められる。屋外環境ではGPSによって、地図上の高精度な位置が取得可能である。しかし屋内環境では屋根や壁に阻まれGPSの信号を取得できない。

屋内ロボットにおいて、広く用いられる位置推定手法に2D-LiDARによって得られた周囲形状と事前に構築した占有格子地図を比較するAdaptive Monte-Carlo Localizationによる手法がある。しかしながら補正が環境形状に依存しており、単純/複雑な形状や類似形状が多く存在する環境では補正が難しく、環境中の物体が移動することによって生じる地図と実環境の差異にも影響を受けてしまう。また一度マッチングミスを起こすと正確な位置に戻ることが困難である。

近年Ultra WideBandや超音波による測距手法の発展により、2つのセンサ間の距離を測定するワイヤレス距離センサの精度が向上している。これらセンサを環境に配置することで既知点からの距離が取得可能であり、本研究ではロボット位置推定に利用することで屋内環境において安定した位置推定手法を目指す。

ワイヤレス距離センサは環境中の反射の影響によって大きな測定誤差を生む。しかし反射経路まで考えれば、見通し条件(LoS)が満たされていなくとも測定できる利点となりえる。本稿では測距ビーコンの反射経路利用の足がかりとして、天井反射も考慮した位置推定手法を提案する。

## 2. 関連研究

ビーコンによる手法は、測定ビーコン間に障害物が存在する場合(Non Line of Sight, NLoS)、信号が反射や透過し誤差が生じてしまう。先行研究でもNLoS状態の識別や緩和について取り組まれてきた[1]。

2D-LiDARとビーコンを組み合わせたロボット姿勢推定はSLAMの文脈で取り組まれており、特に特徴の少ないトンネルや廊下環境で実験が行われている[2][3]。

本研究では反射波経路も利用できる屋内ロボットの姿勢推定手法を実現することで、歩行者など動的障害物によるNLoSでも安定して動作する手法を目指す。

## 3. ハードウェア

本研究では、環境既知点から距離の測定を行うためMarvelmind社製の超音波ビーコン(図2)[4]を利用した。この超音波ビーコンは超音波の送受信が可能なビーコン本体、および複数のビーコンを制御するためのモデムからなる。ビーコン本体は異なる送信周波数を持つ8種類のビーコンが存在する。また、これら異なる周波数を持つ超音波は、ビーコンの種類にかかわらずすべてのビーコンで受信可能である。

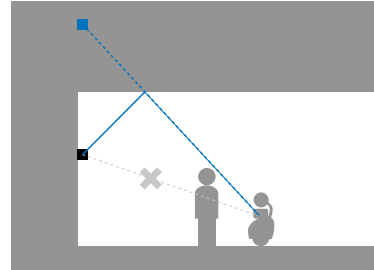


図1: 天井反射の利用. 測定を行う2つのビーコン間に障害物が存在すれば、主に反射経路が測定される。そのため、推定では実座標の他に天井で鏡面反射したビーコンの座標を仮想的に利用する。



図2: 超音波ビーコン (Marvelmind社製). 左および中央: ビーコン本体. 環境既知点およびロボットに搭載させ、その間の距離を測定する. 右: 環境中のビーコンを制御するモデム.

本研究では環境側に置くビーコンから超音波を発信し、ロボットに搭載したビーコンで受信するInverse Architecture(IA)セットアップ[4]で実験を行った。

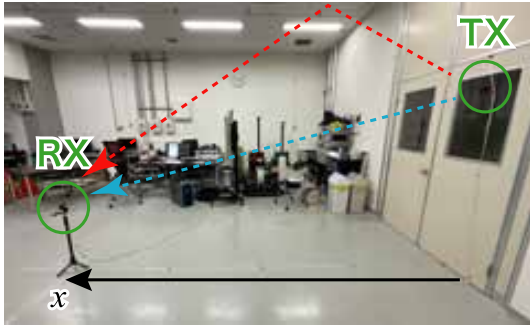
## 4. 超音波反射の測定実験

ビーコン間に障害物が存在する場合の測定距離、および天井による反射が利用できるか検証するため、四方が壁の室内にて実験を行った。

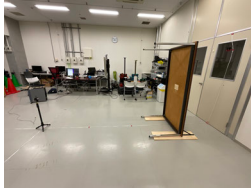
実験はおよそ $9m \times 9m$ の四角形状の部屋で行った。天井の高さ $h_c = 3.49[m]$ 、送信周波数は $f_{TX} = 31[kHz]$ および $45[kHz]$ 、受信ビーコンの高さは $h_{RX} = 0.7[m]$ 、壁に取り付けた送信ビーコンの高さは $h_{TX} = 1.8[m]$ である。また障害物として机を立てて利用した。この場合の障害物の高さは $h_o = 1.82[m]$ である。

この環境中で受信ビーコンを壁から1m, 2m, 3m, ..., 8m離れた場合の測定距離を、①障害物がない条件(LoS)、②障害物が送信側ビーコンから $x = 1.0m$ 地点に存在する条件(NLoS-1m)、③障害物が $x = 2.0m$ 地点に存在する条件(NLoS-2m)の3種類の環境で実験を行った。1つの条件ごとに1000回測定距離を得た。

結果を箱ひげ図、散布図で図4に示す。なお、NLoS-1m条件での $x = 1.0[m]$ およびNLoS-2m条件での $x = 2.0[m]$ に関しては机になるべく接する形で計測を行った。また理論値として、直線距離 $d^*$ 、および天井



(a) LoS. 青矢印は直線距離, 赤矢印は天井による反射経路のイメージ。



(b) NLoS-1m



(c) NLoS-2m

図 3: 測定実験環境

からの反射距離  $d^{r,*}$  を求めプロットした。

$$d^* = |\mathbf{x}_{RX} - \mathbf{x}_{TX}|$$

$$= \left| \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ h_{RX} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h_{TX} \end{pmatrix} \right|$$

$$d^{r,*} = \left| \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ h_{RX} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h_c + (h_c - h_{TX}) \end{pmatrix} \right|$$

結果として、障害物がない環境 (LoS) では高精度にビーコン間の直線距離が測定できた。障害物がある環境 (NLoS-1m, NLoS-2m) では、障害物がない場合と比べて測定距離が伸びており、一部を除き天井での反射経路と近い。なおかつ測定結果は障害物の位置 (1m および 2m) による違いが見受けられないため、これらの条件では天井反射光が計測できていると推測する。

また、NLoS-1m での 1m の測定結果および NLoS-2m の 2m の測定結果のような障害物である机とビーコンが接している環境では、天井からの反射経路も遮られてしまうため、まばらな測定結果が得られていると考えられる。

## 5. 屋内ロボット姿勢推定

本手法では屋内移動ロボットに広く用いられている 2D-LiDAR による AMCL に対し、測距ビーコンによる尤度を追加することで安定した屋内姿勢推定を目指す。

### 5.1 Adaptive Monte-Carlo Localization

Adaptive Monte-Carlo Localization (AMCL) [5] とは、パーティクルフィルタを利用した位置推定手法である。パーティクルフィルタは候補点群をパーティク

ル群として保持し、以下に示すステップを繰り返し行うことで位置推定を行う。

- 予測ステップ  
オドメトリを制御信号  $u_t$  とみなし、動作モデル  $p(x_t|u_t, x_{t-1})$  からサンプリングを行うことで各パーティクルを移動させる。
- 観測ステップ  
センサ信号から計測モデル  $p(z_t|x_t, m)$  により尤度の計算を行い、各パーティクルの重み付けを行う。本研究では 2D-LiDAR と環境地図とのマッチングに尤度場モデル [5] を利用している。
- リサンプリング  
重みを持つパーティクルの分布から、新たにパーティクルを分布させる。

本研究では AMCL の著名な実装である navigation2-amcl [6] を参考に測距ビーコンの統合のため観測ステップの追加を行う。

### 5.2 ビーコン距離情報による尤度の追加

前節の観測ステップにビーコンによる測定距離を使用するため、計測モデルを追加する。ビーコン距離情報に基づく尤度をビームモデル [5] をもとに実装した。

- 計測誤差による分布  
まず、地図上のパーティクル位置およびビーコン座標から理想的な測定距離  $z^*$  を計算する。計測雑音はこの  $z^*$  を中心に、標準偏差は  $\sigma_{hit}^2$  にて分布すると仮定し計測雑音を模擬する。
- でたらめな計測による分布  
何らかの原因で観測を得てしまった場合の分布として、観測可能範囲での一様分布を仮定する。センサの最大値を  $z_{max}$  として模擬する。

$$p_{hit}(z_t|x_t, m) = \mathcal{N}(z_t; z_t^*, \sigma_{hit}^2)$$

$$p_{rand}(z_t|x_t, m) = \begin{cases} \frac{1}{z_{max}} & \text{if } 0 \leq z_t < z_{max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

本研究では測距ビーコンによる観測モデルをこれらの重み付きで足し合わせることで構築した。ここで  $w_{hit} + w_{rand} = 1$  である。

$$p(z_t|x_t, m) = w_{hit} \cdot p_{hit} + w_{rand} \cdot p_{rand}$$

### 5.3 天井反射の利用

測距ビーコンの天井による反射経路も利用するアルゴリズムとして、図 1 に示すように、天井に鏡面反射した仮想ビーコンについて利用する。その際、1つの環境ビーコンに対し 2通りの座標 (実座標, 鏡面反射座標) が考えられるため、前節の観測モデルにより計算された尤度から最尤推定により採用する座標を決定する。アルゴリズムを Algorithm 1 に示す。

まず、地図上のビーコンからパーティクルの位置までの①直線距離  $z_t^{*,d}$  および天井に鏡面反射した仮想ビーコンの位置  $m_r$  から得る②反射経路距離  $z_t^{*,r}$  を計算する。これら地図上から計算された距離 ( $z_t^{*,d}, z_t^{*,r}$ ) そ

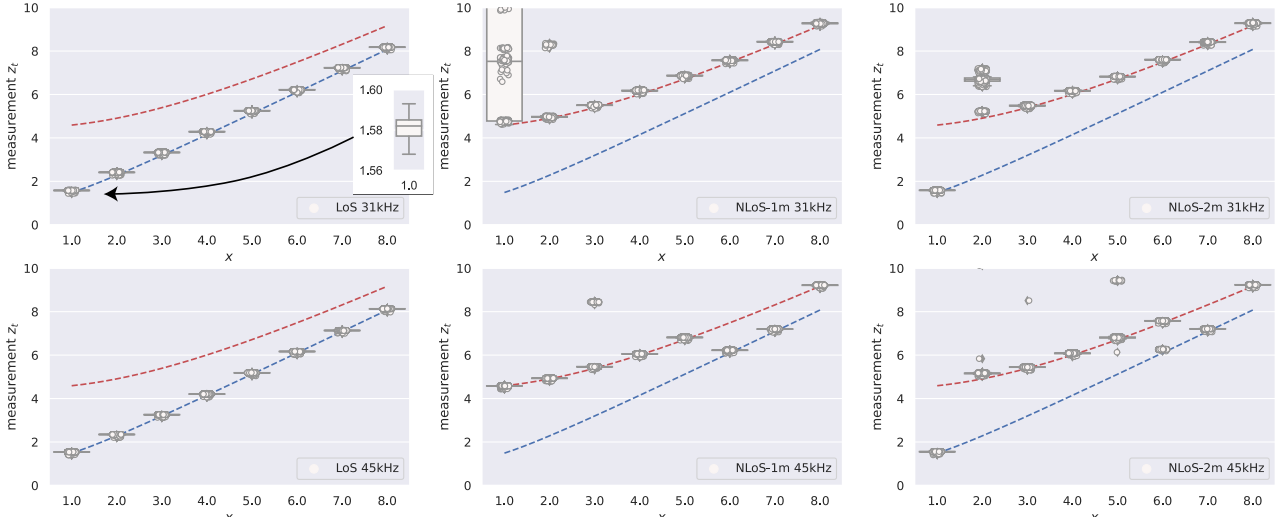


図 4: 測定実験結果. 箱ひげ図と散布図を重ねて表示. 横軸は受信と送信ビーコンの水平距離 [m], 縦軸は実測値 [m]. 青点線は直線経路, 赤点線は天井反射経路の理論値. 反射の有無に関わらず, ほとんどの条件で測定距離がかなり偏っており, 箱ひげ図が潰れて横線のようにになっている.

### Algorithm 1 観測モデル

**Input:**  $z_t$ : 測定距離

**Input:**  $x_t := (x, y, \theta)$ : パーティクル 1 つの状態

**Input:**  $m := (m_x, m_y, m_z)$ : 環境側ビーコン座標

**Input:**  $h_r$ : ロボット側ビーコンの高さ

**Input:**  $h_c$ : 天井の高さ

**Output:**  $w_t$ : パーティクル重み

```

1: function MEASUREMENT( $z_t, x_t, m, h_r, h_c, w_t$ )
2:    $z_t^{*,d} \leftarrow |x_t - m|$ 
3:    $w_t^d \leftarrow z_{hit} \cdot \mathcal{N}(z_t; z_t^{*,d}, \sigma_{hit}^2)$ 
4:   if  $z_t < z_{max}$  then
5:      $w_t^d \leftarrow w_t^d + z_{rand} \cdot \frac{1}{z_{max}}$ 
6:   end if
7:    $m^r \leftarrow (m_x, m_y, h_c + (h_c - m_z))$ 
8:    $z_t^{*,r} \leftarrow |x_t - m^r|$ 
9:    $w_t^r \leftarrow z_{hit} \cdot \mathcal{N}(z_t; z_t^{*,r}, \sigma_{hit}^2)$ 
10:  if  $z_t < z_{max}$  then
11:     $w_t^r \leftarrow w_t^r + z_{rand} \cdot \frac{1}{z_{max}}$ 
12:  end if
13:   $w_t \leftarrow \max(w_t^d, w_t^r)$ 
14:  return  $w_t$ 
15: end function

```

れぞれについて, 実際の観測値  $z_t$  をビームモデルに入力し尤度を求める. 最後に①直線距離, ②反射経路によって得られた尤度を比較し大きい方を採用する.

#### 5.4 天井以外の反射経路の利用

実際には NLoS 時に天井反射経路ではなく, 想定していない反射による大きな誤差が乗った測定距離が得られる可能性がある. しかし, そのような場合でも反射経路を計測しているため環境側ビーコンからロボッ

トまでの実際の直線距離より測定距離は長くなる. そのため, 想定していない反射による測定値が得られたとしても, この特性を利用した緩い拘束が可能である.

そこで観測モデル (Algorithm 1) を適用する際に, 現在のパーティクル分布  $\mathcal{X}_t$  中の全てのパーティクルから計算する直線経路, 天井反射予測値  $z_t^{*,d}, z_t^{*,r}$  が観測  $z_t$  と明らかに離れている場合に例外的な処理を行った.

$$\forall x_t \in \mathcal{X}_t, |z_t - z_t^{*,d}(x_t)| > \sigma_{th} \wedge |z_t - z_t^{*,r}(x_t)| > \sigma_{th}$$

実環境実験では観測と  $\sigma_{th} = 1.5[m]$  以上離れている場合には, 観測が直線経路, 天井反射経路に起因するものではないと考え, 観測モデル (Algorithm 1) による重み付けを行わない. その代わりに少なくとも真の姿勢は測定距離より内側に存在すると考えられるため, 測定距離より外側にあるパーティクルの重みをゼロとし, 内側にあるパーティクルの重みを正規化させる緩い拘束を行った.

### 6. 実環境データによるシミュレーション

2種類の実環境 (①ビーコン手前に障害物がある環境 (図 5b), ②動的障害物が存在する環境 (図 5c) にて, ビーコンを搭載したロボットに図 5a に示す経路を手動で走行させ, 各種センサのデータログを取得した. このデータログを使用し (a)2D-LIDAR のみを利用した姿勢推定, (b)2D-LiDAR と測距ビーコンを利用した姿勢推定 (本手法) を比較した. また 2D-LIDAR のマッチングに使う地図は, 事前に SLAM で構築した地図に, 角度など補正を加えたものを使用した (図 5a).

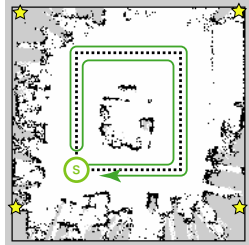
これら 2つの環境での結果を図 6, 7 に示す. また観測更新時パーティクルごとの直線経路 / 天井反射経路の判別の様子を図 8 に示す. 測距ビーコンの追加によりパーティクル分布が改善していることが見受けられる. また環境①中の障害物 (机) により天井反射経路しか得られない場合でも, 正しく天井反射経路を識別し利用できていることが確認できる (図 8a). 動的障害物が存在しビーコンによる測距も安定しにくい環境



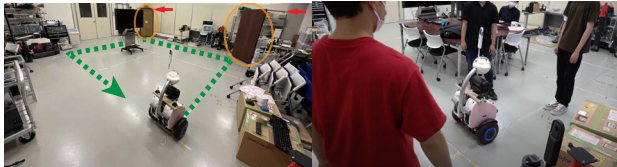
②でも、測定距離を直線経路、天井反射経路、その他に判別して利用している様子がわかる。

## 7. おわりに

本研究ではワイヤレス距離センサと 2D-LiDAR を組み合わせた位置推定手法の提案を行った。特に動的障害物が存在する環境で問題となるワイヤレス距離センサの NLoS 問題についてセンサの配置を工夫し天井による反射を利用する手法を提案した。今後は引き続き実環境での実験を行い、動的な障害物に柔軟に対応できる屋内位置推定手法の構築を目指す。

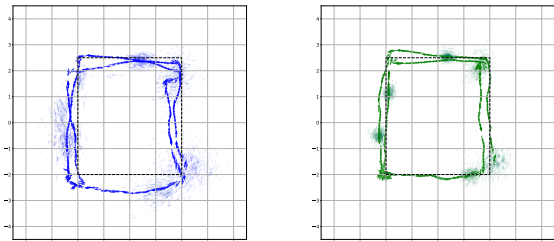


(a) 環境地図。部屋の4隅、高さおよそ 1.8m にビーコンを配置 (星印)。ロボット側ビーコンは高さ 0.5m に搭載。左下開始地点から反時計回り、時計回りに1周ずつロボットを手動で走行させデータ収集を行った。



(b) ①ビーコン手前に障害物がある環境。地図上での右側2つのビーコン (赤矢印) の前に 1.8m の机 (橙) を立てて設置した。  
(c) ②ロボット周囲に人がいる環境。協力者2名にはロボットの前方、1名には後方を併進させた。

図 5: 実環境データの取得



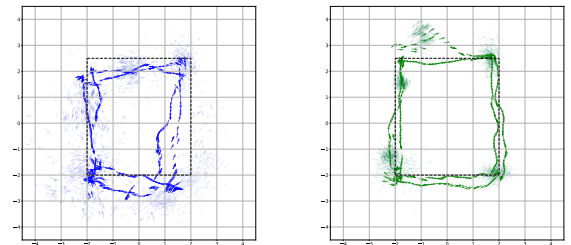
(a) 2D-LiDAR のみ (b) 2D-LiDAR + 測距ビーコン

図 6: ①ビーコン手前に障害物がある環境 結果。一連の推定姿勢、および一定間隔ごとのパーティクル分布を重ねて表示。

謝辞 本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェロシップ創設事業 JPMJFS2132、および内閣府が進める「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」(管理法人: NEDO) によって実施されました。

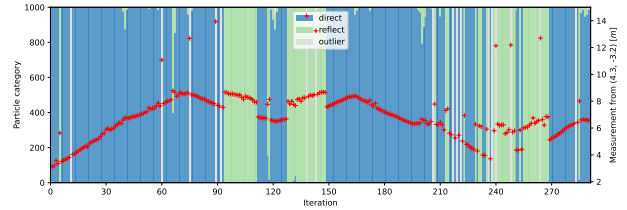
## 参考文献

[1] Jasurbek Khodjaev, et al. Survey of NLOS identification and error mitigation problems in UWB-based po-

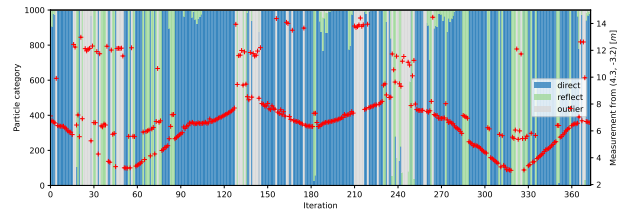


(a) 2D-LiDAR のみ (b) 2D-LiDAR + 測距ビーコン

図 7: ②ロボット周囲に人がいる環境 結果。一連の推定姿勢、および一定間隔ごとのパーティクル分布を重ねて表示。ロボット前方に人間を二人、後方にも一人併進させた。2D-LiDAR は前方 180° を観測。



(a) ①ビーコン手前に机がある環境。



(b) ②ロボット周囲に人がいる環境。

図 8: ビーコン測定距離実測値の直接経路 / 天井反射の判別による観測更新。地図右下のビーコンについてプロット。横軸は更新回。(左縦軸) 青: 直接経路を採用するパーティクル数, 緑: 天井反射を採用するパーティクル数, 白: 予測値と実測値が  $\sigma_{th}$  以上離れているパーティクル数。パーティクル総数は 1000。(右縦軸) 赤: 右下ビーコンの測定距離の実測値。

sitioning algorithms for dense environments. *annals of telecommunications - annales des télécommunications*, Vol. 65, No. 5-6, pp. 301-311, jun 2010.

[2] Yang Song, et al. UWB/LiDAR Fusion For Cooperative Range-Only SLAM. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2019-May, pp. 6568-6574. IEEE, may 2019.

[3] Weikun Zhen and Sebastian Scherer. Estimating the Localizability in Tunnel-like Environments using LiDAR and UWB. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Vol. 2019-May, pp. 4903-4908. IEEE, may 2019.

[4] Marvelmind robotics. <https://marvelmind.com/>. Accessed: 2022-07-01.

[5] Sebastian Thrun, et al. *Probabilistic Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents)*. The MIT Press, 2005.

[6] Steve Macenski, et al. The marathon 2: A navigation system. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2718-2725, 2020.