

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

-第4報 長距離の廊下環境での位置推定と地図作成-

○井塚 智也 倉爪 亮 (九州大学)

ワイヤレス距離センサ（超音波ビーコン）の NLoS 情報を活用した屋内ロボットのための位置推定手法を開発する。特に長距離の廊下やトンネルのような環境は従来の LiDAR ベースのスキャンマッチングでは補正が難しい。またビーコンは障害物による NLoS で大きな誤差が発生する。本稿では、これまでに提案したビーコン反射面も同時推定する手法が、長距離の廊下でも有効であるかを検証するため、ビーコンの配置、およびファクターグラフを用いた SLAM との統合について検討した。

1. はじめに

屋内ロボット位置推定によく用いられる LiDAR のスキャンマッチング手法は、特に長距離の廊下やトンネルのような環境では補正が難しい。そこでワイヤレス距離センサ（超音波ビーコン）を利用した屋内位置推定手法を開発する。ワイヤレス距離センサは Ultra Wide Band (UWB) や超音波によって、2つのビーコン間の距離をワイヤレスかつ高精度に測定できる。しかし、測定対象のビーコン間に障害物が存在する Non-line-of-sight (NLoS) 状態では、主に環境中のマルチパスを代わりに計測してしまい測定距離の誤差が発生する。

前報[1]ではこの NLoS 時の信号をも利用できる手法を目指し、天井や床面で生じた反射経路による誤差を動的に予測し、それを利用できる位置推定手法を提案した。また屋内の直形状の部屋にて障害物を設置し NLoS が生じやすい環境で実験を行った。本研究では廊下形状のように LiDAR 点群による位置推定結果が縮退してしまう環境にて、ビーコンの有効性を検証する。

2. 関連研究

LIO-SAM[2] は 3D-LiDAR、IMU、GPS をファクターグラフにて融合し高性能な 3D-LiDAR SLAM を実現した。ファクターグラフ中の LiDAR 利用法としては、LIO-SAM では IMU によるオドメトリ値にスキャンマッチングにより補正をかけた後、ファクターグラフに取りこまれている。また、Koide et al.[3] は、3D-LiDAR によるスキャンマッチング自体も matching cost factor として取り込み、他のセンサ情報と同時にファクターグラフにて最適化する手法を提案した。

ワイヤレス距離センサのような距離センサによるファクターの構成として、Pfeifer et al.[4] は NLoS 誤差に対応するため、ファクターグラフ中の I: ビーコンの NLoS 誤差関数の Gaussian Mixture Model (GMM) による推定、II: GMM によるノイズモデルを利用しロボットの位置推定に利用、の 2つの推定を交互に行うことによる Nested-EM アプローチによる手法を提案した。

我々も、第3報 [1] ではこの研究を応用し、環境中の反射を GMM ノイズモデルに推定させ利用する手法を提案した。実験では屋内の部屋内にてホイールオドメ

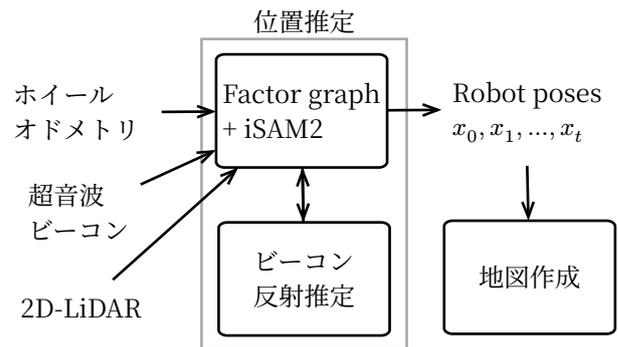


図1: プログラム全体像

トリとビーコンを利用し、事前に反射面を与えることなく NLoS によってマルチパスで生じる誤差を利用し位置推定を行うことができた。

3. 提案手法

本稿では、第3報[1]で提案したビーコンを用いた位置推定手法をもとに、これと 2D-LiDAR を用いた位置推定をファクターグラフで融合する手法を提案する(図1)。第3報[1]で提案した手法は NLoS 状態におけるビーコン測定も利用できるよう、ロボットの位置推定および反射ノイズモデルの推定を交互に行う手法である(3.1節および3.2節)。

3.1 ファクターグラフによるポーズ推定

ファクターグラフは状態ノードおよびファクターノード、およびそれらを接続する辺からなる。

状態ノードは、ロボットの姿勢など推定対象を示す。ファクターノードは状態ノード間を得られたセンサ値で拘束する。SLAM でファクターグラフを解くには、繰り返し手法による非線形最適化が主に用いられる。Gauss-Newton 法や Levenberg-Marquardt 法では全体のグラフを一度に解くため、センサによるファクタが逐次的に増えていく SLAM ではリアルタイム動作が難しい。iSAM2 [5] はこのファクタの逐次的増加に対して有効なソルバである。

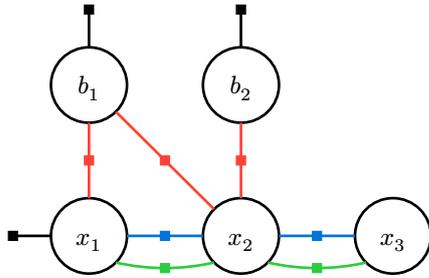


図 2: ファクターグラフ 赤: Range Factor 青: ホイールオドメトリによる Between Factor 緑: matching cost factor 黒: Prior Factor

3.1.1 ファクターグラフの構成

ロボットの位置・角度を推定するためにファクターグラフを構築する。状態ノードにロボットの位置・角度を、ファクターノードにホイールオドメトリおよび超音波ビーコンでの拘束を追加する(図 2)。

- **Prior Factor**

ロボットの初期姿勢およびビーコンの位置を事前に与える。

- **Between Factor**

ロボットの位置・角度状態間を、ホイールオドメトリによる推定をもとに拘束する。

- **Matching Cost Factor**

ロボット状態間を、2D-LiDAR によって取得した前後フレーム間の幾何形状をもとに拘束する。

- **Range Factor + 反射ノイズモデル**

ビーコンとロボットの状態間を、ビーコンによる測定距離により拘束する。この測定値は Gaussian Mixture Model(GMM)による反射誤差モデルによって重み付けされ推定に利用する。

3.2 反射ノイズモデルの推定

前節にて推定したロボットポーズ列 x_1, x_2, \dots, x_t を入力として、天井・床方向の反射面を推定する。モデルとして GMM を利用し、Expectation-Maximization 法によりフィッティングさせる。これをファクターグラフの誤差モデル(反射ノイズモデル)として取り込む。

3.3 2D-LiDAR スキャンマッチング ファクタ

前後フレームの LiDAR 形状により、ロボット位置状態間を拘束する。Koide et al.[3] を参考に、Iterative Closest Point 法(ICP)、Point-to-Plane ICP、GICP の 3つのマッチング手法によるファクタを実装した。

3.3.1 Iterative Closest Point (ICP)

通常の Iterative Closest Point アルゴリズムでは以下の式を最適化する。

$$T \leftarrow \arg \min_T \{ \sum_i w_i \| T \cdot b_i - m_i \|^2 \} \quad (1)$$

ここで m_i は $T \cdot b_i$ の最近傍点である。 w_i は重みであり、現在は Tukey ロバスト関数を利用している。

条件	車輪オドメトリ	2D-LiDAR	ビーコン+反射モデル
1	✓		
2	✓		✓

表 1: 予備実験の条件

3.3.2 Point-to-Plane ICP

ICP では廊下のような形状により点群が縮退する場合正しいマッチングが困難である。Plane-to-Plane ICP は以下の式を最適化する。

$$T \leftarrow \arg \min_T \{ \sum_i w_i \| \eta_i \cdot (T \cdot b_i - m_i) \|^2 \} \quad (2)$$

ここで η_i は点 m_i の法線ベクトルである。法線方向はその点の最近傍点から計算した。

3.3.3 Generalized-ICP (GICP)

GICP[6] は点群の分布も考慮した plane-to-plane による ICP である。

$$T \leftarrow \arg \min_T \left\{ \sum_i d_i^{(T)T} (C_i^B + T C_i^A T^T)^{-1} d_i^{(T)} \right\} \quad (3)$$

ここで $d_i^{(T)} = b_i - T a_i$ である。

3.4 地図作成

地図作成処理では推定した過去から現在までのロボットポーズ列 x_0, x_1, \dots, x_t 、およびそれぞれの時刻での 2D-LiDAR による周囲形状スキャン $z_{scan,1}, \dots, z_{scan,t}$ を入力とし、占有格子地図を作成する。これには slam_toolbox[7] を利用した。

4. 長距離廊下での予備実験

まず、長距離の廊下環境において、オドメトリと単一ビーコンによる補正のみで位置推定が可能か検証する予備実験を行った。ワイヤレス距離センサとして、marvelmind 社製の超音波ビーコンを利用した。

4.1 実験条件

長い廊下(九州大学ウエスト 2 号館 9 階)にて実験を行った。廊下には単一のビーコンを壁に配置し、ロボットと壁のビーコンの高さは揃えた。ロボットの初期姿勢、ビーコンの位置は予め Factor graph における Prior Factor の形で与えておく。また周囲の障害物や壁の幾何形状は与えない。実験条件を表 1 に示す。この実験では 2D-LiDAR による補正を入れず検証した。

4.2 実験結果

結果を図 3、図 4 に示す。オドメトリのみ(図 3)から、主に廊下の角など回転方向にて誤差が生じていることがわかる。しかし、単一ビーコンを配置した場合(図 4)でもうまく補正が働いていない。

そこで、問題を明確にするため廊下のような環境におけるビーコン配置とその働きについて 5. 節にてシミュレーションにより検討を行った。



図 3: 条件1 オドメトリのみ 赤矢印の両端は同じ地点

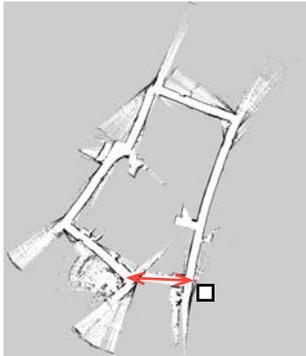


図 4: 条件2 オドメトリ+
ビーコン 赤矢印の両端は同じ地点, 白四角はビーコン
配置

5. シミュレーション

4. 節 では単一ビーコンとオドメトリによる廊下の SLAM について検証した。一般に、廊下環境では廊下壁方向のスペースが狭く、ビーコンのみでは廊下壁方向への補正が難しい。

そこで 2D-LiDAR によるファクタを採用し、ビーコン距離および 2D-LiDAR のスキャンマッチングを同時に解くことによる有効性を検証する。またビーコンの配置が与える影響を検証する。

5.1 シミュレーション設定

実環境実験にて利用した環境を模した 3D モデルを使い、ロボットシミュレータ Gazebo を利用して、2D-LiDAR、車輪オドメトリ、ロボット位置の真値からなるデータセットを構築した(図 5)。

本シミュレーションでは問題を簡単にするため、ロボット・ビーコン間の障害物の有無にかかわらずほぼ正確な測定値が得られるとした。評価する位置推定手法も簡単にし、提案手法からビーコンによるファクタは反射ノイズモデルを利用せず、ガウス分布を利用した。また、ロボットの初期姿勢、ビーコンの位置は事前に与えている。

実験条件を表 2 に示す。ホイールオドメトリは常にファクターグラフ中に取り込んだ。2D-LiDAR スキャンマッチングによるファクタは使用しない条件も含めて 4 通り、ビーコン配置は利用しない場合も含めて 5 通りとした。各条件に対してノイズのシード値を 10 通り

車輪オドメトリ(1 通り)	2D-LiDAR (4 通り)	ビーコン (5 通り)
✓ 常に利用	なし	なし
	ICP	1 個 (0,0)
	point-to-plane ICP	1 個 (40,0)
	GICP	2 個 (0,0),(40,0)
		3 個 (0,0),(40,0),(40,20)

表 2: シミュレーション条件 (1×4×5=20 通り)



図 5: シミュレーション環境 (Gazebo) 白四角はビーコン, 赤矢印はロボットの経路

設定し、得られるビーコン距離 r 、オドメトリによる推定位置 $T = (x, y, \theta)^T$ の各要素に正規分布から生成したノイズを加えた。

5.2 結果

表 3 は車輪オドメトリとビーコンのみを利用した場合の、最終時刻での推定経路 x_0, x_1, \dots, x_t と真値との誤差を示す Absolute Trajectory Error (ATE)の結果である。ビーコンを複数利用する下 2 つの結果ではおおよそ正確な推定結果が得られている。しかしながら実環境では壁に阻まれるため、常に複数のビーコンからの正確な距離値を得ることは難しい。

一方で単一のビーコンの利用では推定があまり改善されなかった。これは単一のビーコンの距離のみしか得られないため、ビーコンを中心とする同心円状に推定がずれている影響である。特に(40,0)の設定ではビーコンによる補正により廊下の壁方向に推定がまわり込むことで大きく誤差が生じるケース(図 7)があり、これにより推定精度が大きく悪化する。

ビーコンを(40,0)地点においた場合において LiDAR によるファクタを加えた場合の結果を示す(図 6, 図 7)。図 6 は各時刻で推定された推定位置と真値の二乗平均平方根誤差(RMSE)を示しており、図 7 はホイールオドメトリとビーコンによる推定で一番精度が悪いシード値でのプロットである。図 7 でのオドメトリ+ビーコンのみの手法はビーコンの裏側に周りこむように推定してしまっており、その後正しい位置に収束できていない。この場面で LiDAR によるファクタを利用した場合、ICP は最後までたどり着いているものの、道中の推定位置が不安定であった。GICP と plane-to-point ICP は推定初期は安定しており、ビーコンの裏側に周

ビーコン (5 通り)	最終時刻の 推定軌跡の ATE 平均
なし (=車輪オドメトリ)	4.19
1 個 (0,0)	2.13
1 個 (40,0)	5.28
2 個 (0,0), (40,0)	0.16
3 個(0,0), (40,0), (40,20)	0.12

表 3: シミュレーション結果 車輪オドメトリ+ビーコン (LiDAR は使用しない)

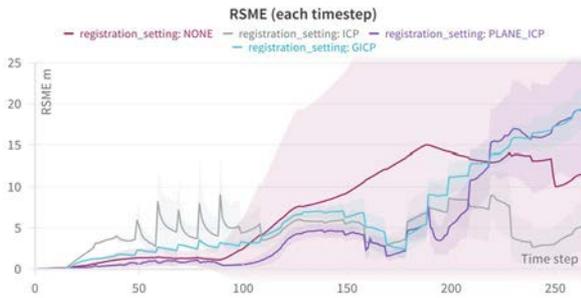


図 6: ビーコン配置(40,0)での RSME の推移 (範囲は土標準偏差) 赤線は車輪オドメトリとビーコンのみを利用。灰、紫、青はそれぞれ ICP, plane-to-point ICP, GICP



図 7: 各時刻における推定位置のプロット例 車輪オドメトリとビーコンのみを利用した赤線では、推定が大きく外れている

りこまず推定ができた。しかし左上の地点では、ビーコン測定により影響を受けスタックしてしまっている。ビーコンを(40,0)地点以外においた場合でも、現時点では LiDAR によるファクタを入れた場合は推定が安定しておらず、パラメータ調整を含め今後の課題である。

6. まとめ

本研究では廊下のような環境でワイヤレス距離センサ(ビーコン)を利用が位置推定・SLAM 問題に対して有効か検証するため、先行研究に地図作成システムを構築した。また、現手法の問題を考察するため、2D-LiDAR スキャンマッチングやビーコン配置によるシミュレーション実験を行った。

今後はこのシミュレーション実験の結果を踏まえ、ビーコンの適切な配置や 2D-LiDAR スキャンとの統合を検討しながら、ワイヤレス距離センサの利用および反射推定により廊下形状に有効な手法の実現を目指す。

謝辞

本研究の一部は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2132、および JSPS 科研費 JP20H00230 の助成によって実施されました。

参考文献

- [1] 井塚智也, 倉爪亮: “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 -第 3 報 ロボット位置とビーコン信号反射面の同時推定-”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2024, IP1-N04, 2024.
- [2] T. Shan, et al.: “LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping”, 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, pp. 5135–5142. doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341176.
- [3] K. Koide, et al.: “Tightly Coupled Range Inertial Localization on a 3D Prior Map Based on Sliding Window Factor Graph Optimization”, 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2024.
- [4] T. Pfeifer, P. Protzel: “Expectation-Maximization for Adaptive Mixture Models in Graph Optimization”, 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019, pp. 3151–3157. doi: 10.1109/ICRA.2019.8793601.
- [5] M. Kaess, et al.: “iSAM2: Incremental smoothing and mapping with fluid relinearization and incremental variable reordering”, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 3281–3288. doi: 10.1109/ICRA.2011.5979641.
- [6] A. Segal, et al.: “Generalized-ICP”, Robotics: Science and Systems, The MIT Press, 2009.
- [7] S. Macenski, I. Jambrecic: “SLAM Toolbox: SLAM for the dynamic world”, Journal of Open Source Software, vol. 6, no. 61, p. 2783–2784, 2021, doi: 10.21105/joss.02783.