

LRF 搭載移動ロボットを用いた動的環境における 3-D SLAM

○岩科進也 (静岡大学) 山下淳 (静岡大学) 金子透 (静岡大学)

3-D SLAM in Dynamic Environments by a Mobile Robot Equipped with two Laser Range Finders

*Shinya IWASHINA (Shizuoka University), Atsushi YAMASHITA (Shizuoka University),
Toru KANEKO (Shizuoka University)

Abstract — When an autonomous mobile robot acts in constructed environments, a map that has the information about obstacles is necessary for the mobile robot. Even if a map is given, however, the mobile robot cannot start its action without the information of its present location on the map. Therefore, techniques of map generation and self-localization are important for mobile robots. In this paper, we propose 3-D SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) method by a mobile robot equipped with two LRFs (Laser Range Finders). The robot measures the distances from obstacles around it with LRFs at multiple positions, and generates a map by integrating these range information. The integration is realized by using an odometry (dead-reckoning method) and ICP (Iterative Closest Point) algorithm. Experimental results have shown the validity of the proposed method.

Key Words: Map Building, SLAM, Dynamic Environment

1. 序論

近年のロボット産業の発展に伴い、警備ロボットや介護ロボットなどの、自律移動ロボットの導入が期待されている。一般に、自律移動ロボットが自ら考えて行動するためには、障害物の位置情報などが必要となる。その情報を表すための手段の1つとして、周囲環境の平面地図がある。例えば、周囲環境の平面地図によって、障害物の位置情報がわかれば、走行可能な通路を探し出し、安全に移動することが可能となる。しかし、周囲環境の平面地図は必ずしも存在するとは限らない。このことから、まず平面地図の生成をロボットに行わせることが重要となる[1]。一方で、周囲環境の地図を生成するためには、ロボットの走行中各位地計測されたデータを位置合わせし統合する必要がある。計測データの位置合わせには、ロボットの自己位置推定データが重要となる。地図生成と自己位置推定を同時に行う手法として、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) が広く用いられている。しかし平面地図では、その平面上に無い障害物には対応できない。そこで、周囲環境の3次元地図生成が重要となってくる[2-3]。

また、観測環境中に動物体が存在すると、地図中に動物体が映ってしまい、動物体が存在しない環境における正しい地図が生成できない。そこで、動物体が存在する環境下でも地図を生成できる手法が重要になる[4-6]。

本研究では、人間などの移動物体が存在する動的環境における3-D SLAMを行う手法を提案する。

2. 概要

Fig.1 に本研究で使用する移動ロボットを示す。移動ロボットには、周囲環境を計測するための LRF (Laser Range Finder) が2台搭載されている (Fig.2)。Fig.2(a) に示す LRF は床と平行な面を計測する。Fig.2(b) に示す LRF は回転台に搭載されており、床と垂直な面を計測しながら回転し、周囲 360 度の 3 次

元データを取得する。

Fig.3 は SLAM の概要である。移動ロボットは、Fig.1(a) に示す LRF により取得されたデータに対し ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム[7]を適用し自己位置を推定する。同時に、得られた自己位置推定データに基づいて Fig.2(b) に示す LRF が取得したデータを位置合わせし、3次元地図を生成する。また、Fig.1(a) の LRF が取得したデータを時間方向に比較し差分処理を行うことで動物体を検出する。

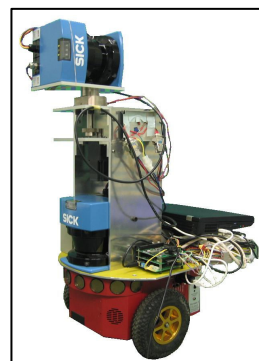


Fig.1 移動ロボット



(a) 2次元計測用 LRF



(b) 3次元計測用 LRF

Fig.2 ロボット搭載センサ

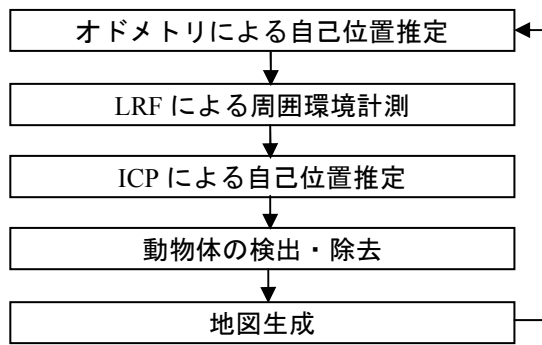


Fig.3 フローチャート (地図生成)

3. 2次元地図生成

3.1 移動ロボットの自己位置推定

地図生成は Fig.2 に示す LRF によって取得されたデータを用いる。しかし、LRF の計測範囲には限界があるため、1度の計測では周囲環境すべての地図を生成できない。そこで、移動ロボットは自己位置を推定し、自己位置推定データに基づいた、複数の異なった位置から計測された LRF データの位置合わせが重要となる。これにより、LRF データを統合し周囲環境の地図を生成する。本研究では ICP アルゴリズムを用いてロボットの自己位置を推定する。

ICP アルゴリズムは、複数の距離画像間で重複して計測された部分を利用して、繰り返し計算により誤差関数を最小化する解を求める方法である (Fig.4)。点群 S 中の各点 s_i ($1 \leq i \leq N$) について、点群 M 中で最も近い 2 点 m_j, m_k ($1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq N$) を求め、その 2 点からなる直線を対応線とする。そして、式 (1) で表される各点と直線間の距離の 2 乗和 E が最小となる移動パラメータ (\mathbf{R}, \mathbf{t}) を求める。ここで、 \mathbf{R} は回転行列で、 \mathbf{t} は並進移動ベクトルである。ただし、 \mathbf{m}_\perp は \mathbf{m} に直交し大きさが $|\mathbf{m}|$ であるベクトルを表す。

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum \frac{|(\mathbf{R}s_i + \mathbf{t})(\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_j)_\perp + \mathbf{m}_k \mathbf{m}_{j\perp}|^2}{\|\mathbf{m}_k - \mathbf{m}_j\|^2} \quad (1)$$

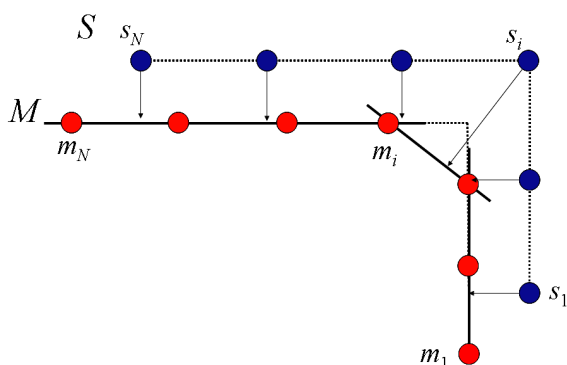


Fig.4 ICP アルゴリズム

本研究では、デッドレコニングによる自己位置推定データを初期値として、滑降シンプレックス法に

よる収束計算を行い、移動パラメータ (\mathbf{R}, \mathbf{t}) を求める。滑降シンプレックス法は実装が簡単で、収束計算に目的関数の導関数を用いない方法であり、収束過程において導関数が不安定に変動する ICP アルゴリズムに適した手法である。

3.2 動物体の検出と除去

動物体は常に同じ場所に存在するわけではないので、地図生成は静止物体のみを対象として行われるべきである。しかし、計測環境中に動物体が存在した場合、地図に動物体を書き込まれてしまう。そこで、環境中に存在する動物体を検出・除去することが重要となる。

本研究では、2次元計測用 LRF の計測データを時間方向に比較して差分処理を行い、動物体を検出・除去する。移動ロボットは時刻 $(t-1)$ における計測データ (Fig.5(b)) と時刻 (t) における計測データ (Fig.5(a)) を比較し差分処理を行う (Fig.5(d))。しかし、この方法では動物体は検出できるが、壁などの一部の静止物体も動物体として検出してしまふ。そこで、時刻 (t) から $(t-n)$ までの合計で n 個の計測データ (Fig.5(c)) を用いて差分処理を行い、動物体を検出する (Fig.5(e))。これにより移動ロボットは動物体のみを正確に検出可能となる。

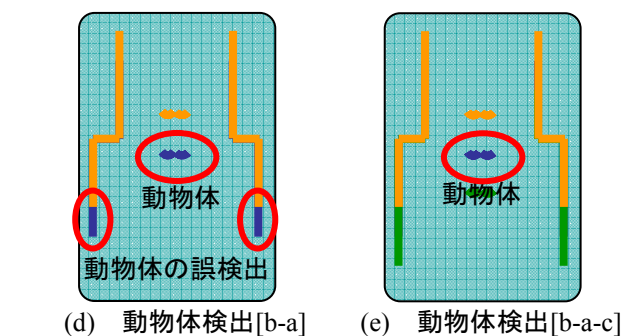
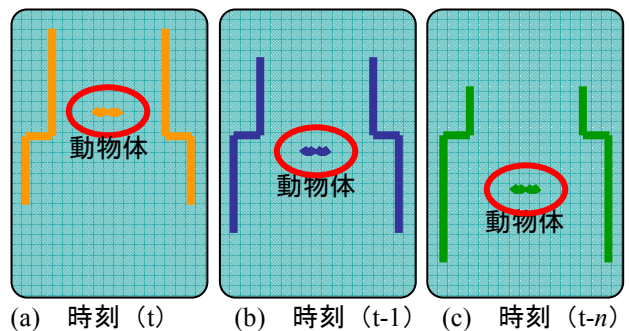


Fig.5 動物体の検出・除去

4. 3次元地図生成

移動ロボットが 2次元平面地図しか持っていない場合、その平面にない障害物には対応できない。そこで、周囲環境の 3次元地図生成が重要となる。本研究では、回転台に設置した LRF の計測データに基づいて 3次元地図を生成する。3次元データの計測は、連続的にロボットを走行させながら回転台を回転さ

せ、常時 LRF により計測する。

3次元地図生成は回転台に設置した LRF の計測データを位置合わせし統合して行う。位置合わせには回転台の角度データと、ロボットの自己位置推定データを用いる。しかし、自己位置推定に要する計算時間は、LRF の計測間隔より長いため、すべての LRF 計測位置において自己位置推定を行うことはできない。そこで、自己位置推定データ間を線形に補完して、自己位置推定データの不足を補い 3次元データの位置合わせに用いる (Fig.6)。この方法を用いると 3次元データの位置合わせに誤差が生じる可能性があるが、ロボットの移動速度に対して自己位置推定に要する時間は十分に短いので、誤差は無視できると考えられる。

3次元地図生成における動物体除去は、2次元地図生成において検出した動物体が LRF の計測範囲から離脱するのを待ち、その後動物体の存在により発生したオクルージョン領域を再計測することによって行う。

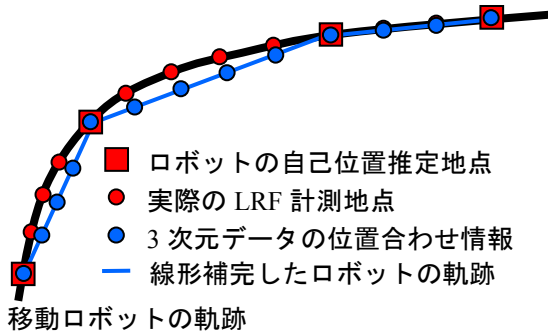


Fig.6 3次元データの位置合わせ

5. 実験

5.1 実験条件

本研究で用いる LRF は、レーザ光のパルスの伝播時間により距離を測定するものであり、ダイレクトな距離計測を行うことができる。LRF は、SICK 社製 (型式 LMS 200-30106) で、計測精度は最大誤差 4cm、最大スキャン角度 180° 、距離測定範囲 30m (反射率 100%における測定範囲。反射率 10%では 10m) という特徴を持つ。さらに、レーザ波の拡散が小さいために解像度が高く、 0.5° の高角度分解能を持ち、1方向の計測時間は 0.026s である。本実験では、レーザレンジファインダの設定は、距離測定範囲 4m、スキャン角度 180° 、角度分解能 0.5° で行った。

また実験に用いる移動ロボットは MobileRobots 社製 PIONEER 3-DX で、3輪 (駆動 2輪、補助 1輪) 型ロボットである。本実験では基本移動速度を 100m/s とした。

5.2 2次元地図生成

実験環境を Fig.7 に示す。実験環境は屋内の L 字廊下であり、動物体として徒歩の人間が存在した。この環境において LRF を 2台搭載した移動ロボットを走行させ、地図を生成した。実験結果を Fig.8 に示す。

Fig.8(a)において、生成地図に記載された動物体が検出されているのがわかる。動物体の除去結果を Fig.8(b)に示す。本実験では動物体検出に用いる時間方向の計測データ数を $n=2$ とした。Table 1 に、Fig.8(b)における L_1 、 L_2 、 θ の各位置の実測値と計測値の比較を示す。Table 1 より、地図生成時の誤差が LRF の計測誤差範囲内に収まっていることがわかる。

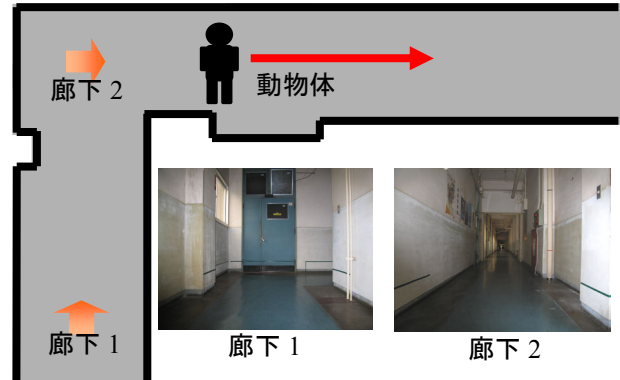
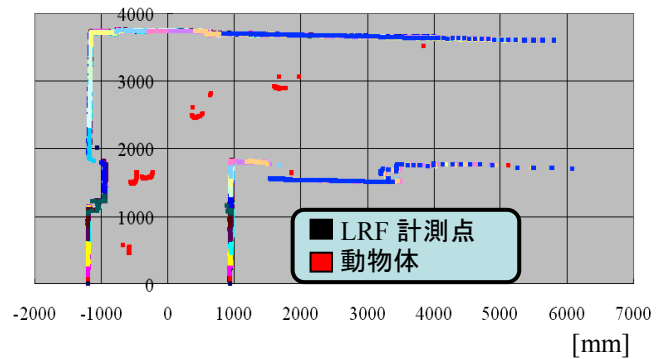
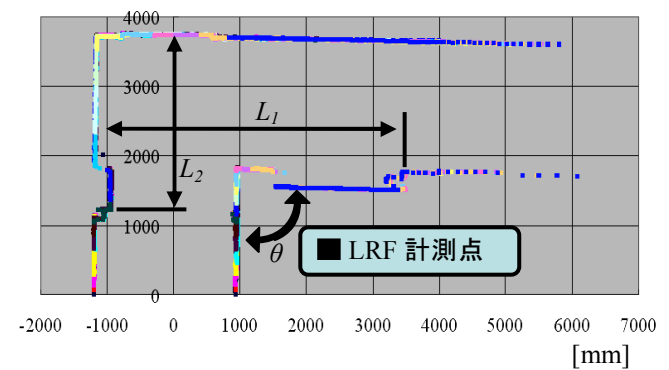


Fig.7 実験環境 1



(a) 動物体検出



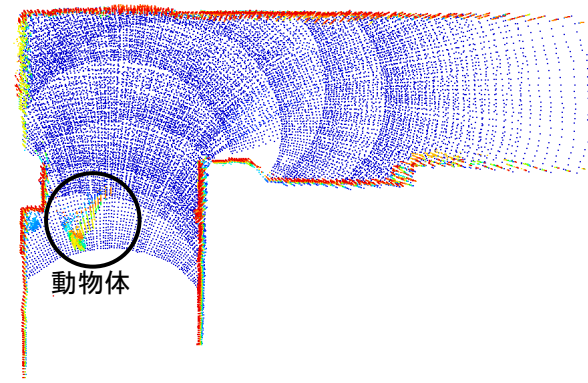
(b) 動物体除去

Fig.8 2次元地図

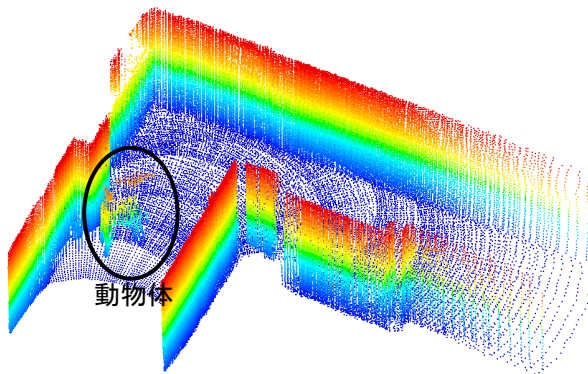
Table 1 地図生成精度

	実測値	計測値
L_1	4668 mm	4696 mm
L_2	2514 mm	2541 mm
θ	90 deg	90 deg

5.3 3次元地図生成

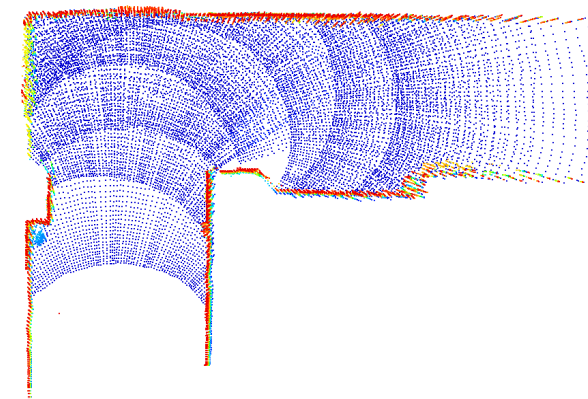


(a) 3次元地図 1

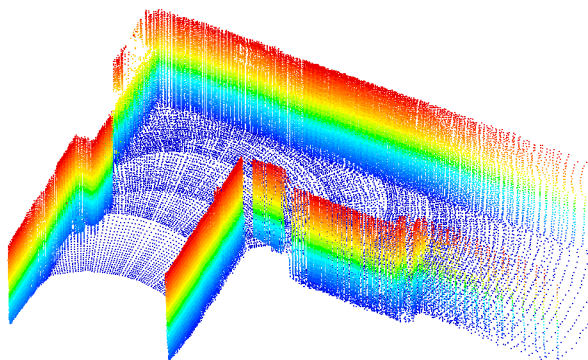


(b) 3次元地図 2

Fig.9 3次元地図 (動物体除去なし)



(a) 3次元地図 3



(b) 3次元地図 2

Fig.9 3次元地図 (動物体除去なし)

実験環境は Fig.7 と同様である. 実験結果を Fig.9, Fig.10 に示す. Fig.9 は動物体除去処理を行わなかった地図生成結果, Fig.10 は動物体除去処理を行った地図生成結果である. Fig.10 において動物体が除去されているのがわかる. 以上の実験より, 移動ロボットの地図生成において本研究が有効であると考えられる.

6. 結論と今後の展望

本論文では, 2 台の LRF を搭載した移動ロボットを用いて, SLAM による 3 次元地図生成を行う手法の提案をした. また, 差分処理による動物体の検出・除去により動的環境における地図生成手法を提案した.

実験結果より本手法は移動ロボットによる 3 次元地図生成において有効であると考えられる.

参 考 文 献

- [1] Sebastian Thrun: "Robotic Mapping: A Survey," *CMU-CS-02-111*, 2002.
- [2] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard and Dieter Fox: "A Real-Time Algorithm for Mobile Robot Mapping with Applications to Multi-Robot and 3D Mapping," *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.321-328, 2000.
- [3] Sebastian Thrun, Dirk Hahnel, David Ferguson, Michael Montemerlo, Rudolph Triebel, Wolfram Burgard, Christopher Baker, Zachary Omohundro, Scott Thayer and William Whittaker: "A System for Volumetric Robotic Mapping of Abandoned Mines," *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4270-4275, 2003.
- [4] Boyoon Jung and Gaurav S. Sukhatme: "Detecting Moving Objects Using a Single Camera on a Mobile Robot in an Outdoor Environment," *Proceedings of the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*, pp.980-987, 2004.
- [5] George K. I. Mann and Raymond G. Gosine: "Moving Object Detection in Indoor Environments Using Laser Range Data," *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.802-807, 2006.
- [6] Chung-Hao Chen, Chang Cheng, D. Page, A. Koschan and M. Abidi: "A Moving Object Tracked by A Mobile Robot with Real-Time Obstacles Avoidance Capacity," *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, Vol.3, pp.1091-1094, 2006.
- [7] Paul J. Besl and Neil D. McKay: "A Method for Registration of 3-D Shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.