

LRF 搭載移動ロボットによる 移動効率を考慮したビュープランニングを用いた 3 次元地図生成

3-D Mapping Using Efficient View Planning for a Mobile Robot with LRF

○学 大内 隆史 (静岡大) 正 山下 淳 (静岡大)
金子 透 (静岡大)

Takafumi OUCHI, Shizuoka University, daig_shinj@kikai.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, Shizuoka University
Toru KANEKO, Shizuoka University

When an autonomous mobile robot acts in constructed environments, a map which has the information about obstacles is necessary for the mobile robot. Even if the map is given, 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 a 3-D SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) method using efficient view planning by a mobile robot equipped with two LRFs (Laser Range Finders). In the 3-D SLAM, the robot considers the most suitable position for 3-D mapping by efficient view planning, and then, measures distances to obstacles around it with LRFs at the positions. The 3-D map is generated by integrating range information obtained from multiple measurements. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Mobile robot, LRF, 3-D SLAM, View Planning

1. 緒言

近年、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。自立移動ロボットには安全で正確な動作が求められるため、ロボットは環境を正しく認識する必要がある。周囲環境を認識する方法の一つとして、障害物の位置情報を記入した 2 次元地図を用いる方法がある。2 次元地図を用いて周囲環境を認識すれば、ロボットはその障害物の位置情報に応じて経路を設定でき、安全かつ自律的な行動が容易となる。

しかし、障害物の位置情報を記入した地図は必ずしも存在するとは限らない。また、人が計測を行い、地図を生成するのは手間がかかる。したがって、センサを搭載した自律移動ロボットに地図生成を行わせることが重要となる。

ロボットによる地図生成の研究は以前から行われており、代表的な方法に SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) がある[1]。

SLAM とは地図生成と自己位置推定を同時に行う方法である。具体的には、まず周囲環境に対して、ロボットが 1 回目の計測を行い、データを得る (図 1 (a), 赤で示されるデータ)。次に、1 回目の計測位置から移動し、2 回目の計測を行い、データを得る (図 1(b), 青で示されるデータ)。ここで、1 回目の計測データと 2 回目の計測データにおいて重複して計測した部分 (図 1(b)中、緑の円) が一致することを用いて地図同士を位置合わせする。このとき、車輪の回転量によって推定された自己位置を地図の位置合わせ結果を用いることで修正している。これを繰り返すことにより地図生成を行う。

周囲環境の 2 次元地図を生成することが出来れば、ロボットの自律的な活動の助けとなる。しかし、2 次元地図では、その地図平面状にない障害物は回避することができない。例えば、環境中に椅子や机が存在した場合、2 次元地図では脚の部分しかデータが存在しないため、脚の部分は回避できても本体に衝突してしまうなどの危険性がある。そこで、周囲環境の 3 次元地図の生成が重要となる[2][3]。

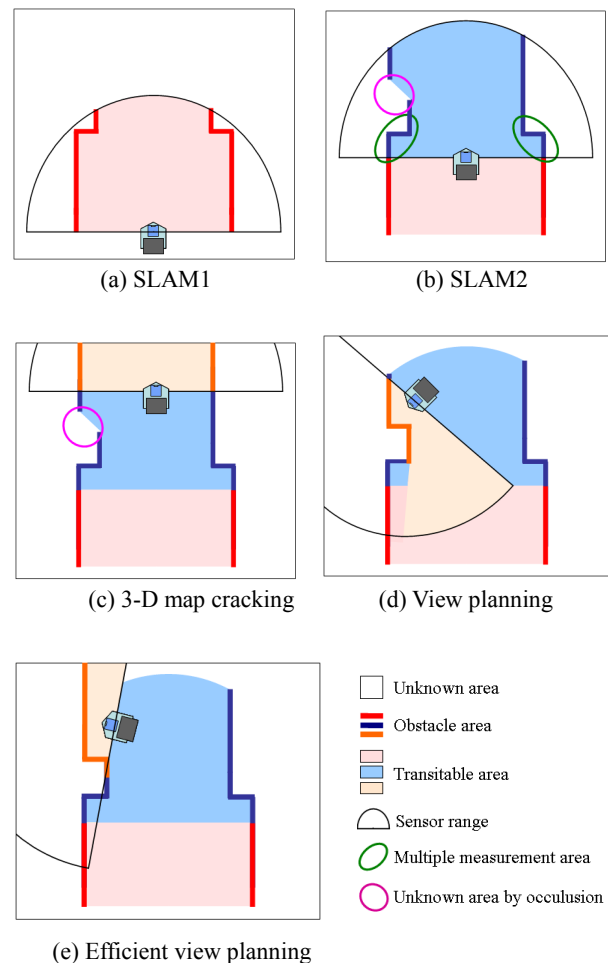


Fig.1 SLAM with view planning

また、SLAMには画像を用いる手法とレンジデータを用いる手法があり、特にレンジデータを用いる手法は計算コストと計測精度に優れている。レンジデータを用いるSLAMには、動的環境における手法[4][5]やビュープランニングを用いた手法[7][8]などがある。

動的環境における手法では、移動物体が存在する環境において、計測データに含まれる移動物体を検出し、静止障害物の情報だけが含まれる地図の生成を実現している。

ビュープランニングを用いた手法では、地図生成に適切な計測位置・姿勢を考慮して計測を行う。地図を拡張していく際、ロボットが単純に直進して計測を行うと、オクルージョンによる未知領域(図1(c), ピンクの楕円部分)が発生し、地図が欠けてしまうことが考えられる。そこで、この未知領域を計測し、地図の欠損を低減するために、ビュープランニングを用いる。

また、我々の従来研究に、動的環境における手法とビュープランニングを用いた手法を包括した研究がある[8]。文献[8]では、移動物体が存在する環境においても地図生成に影響を受けることのない、ビュープランニングを用いた3次元地図生成を実現している。

文献[8]のビュープランニングの様子を図1(d)に示す。文献[8]のビュープランニングでは計測姿勢が十分に考慮されておらず、必要以上に大きく姿勢を変化させて計測を行うことがある。例えば、同じ位置において計測を行うのであれば姿勢変化を抑えた計測姿勢(図1(e))であれば十分である。必要以上に姿勢を変化させると、移動に要する時間が長くなるため、地図生成範囲が広いほど地図が完成するまでの時間が長くなり、効率が悪い。

本研究では、計測姿勢を考慮することでより効率のよいビュープランニングを行い、地図の生成効率を向上させることを目的とする。本研究において、地図の生成効率とは単位時間に生成できる地図の大きさとする。

2. 処理手順

本研究で用いる自律移動ロボットを図2に示す。このロボットは、2台のLRF(レーザレンジファインダ)を搭載している。使用するLRFは前方180度のある1平面を計測でき、その平面に存在する障害物との距離をレンジデータとして得る。

LRF1は2次元計測に用いる。ロボットの前方180度にある周囲環境における水平面を計測可能である。LRF2は3次元計測に用いる。LRF2直下の回転台が鉛直軸周りに回転することで、ロボットの前方180度にある周囲環境の3次元情報を取得可能である。

処理手順を図3に示す。まず、ロボットが停止した状態で自己位置推定を行う。次に、移動物体の検出処理を行い、計測範囲に移動物体が存在しない状態になるまで待機し、その後3次元計測を行う。3次元計測終了後ビュープランニングを行い、次の計測位置・姿勢を算出する。最後に、その位置・姿勢まで移動を行う。移動中は自己位置推定を繰り返す。計測位置・姿勢に到着後ロボットは停止する。以上の処理を繰り返し3次元地図を生成していく。

2.1 自己位置推定

2次元計測で得たレンジデータを用いてSLAMを行う。2次元データのマッチングにはICPアルゴリズムを用いる。

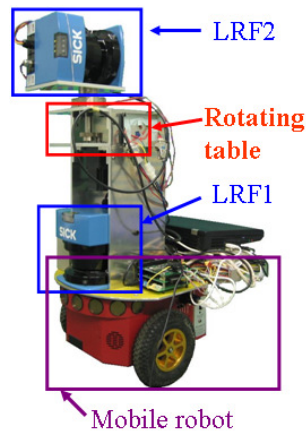


Fig.2 Mobile robot with LRF

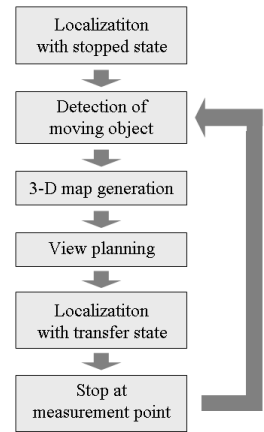


Fig.3 Procedure

2.2 移動物体検出

2次元計測で得たレンジデータを時間方向に比較し、差分処理を行い、ロボットの計測範囲内に含まれる移動物体を検出する。移動物体が検出された場合、移動物体が計測範囲内から存在しなくなるまで計測を停止する。検出されない場合、次の処理に進む。

2.3 3次元地図生成

LRF2を設置した回転台を回転させ、周囲環境の3次元計測を行う。その後、3次元計測で得たレンジデータを回転台の回転角度データとロボットの自己位置推定データを用いて位置合わせし、3次元地図を生成する。

2.4 ビュープランニング

生成した3次元地図を用いて、ロボットが現在の位置・姿勢から次のある計測候補位置・姿勢に移動したと仮定して、どの位置・姿勢に移動するのが地図生成に最適か評価し、次の計測位置・姿勢を決定する。

まず、図4に示すように3次元地図をボクセル単位に分割し、ロボットが通過できる自由領域と通過できない障害物領域に分けたボクセルマップを生成する。次に、ボクセルマップを高さ方向に圧縮したピクセルマップを生成する。このとき、ボクセルマップで障害物領域であったボクセルと、自由領域であったボクセルはピクセルマップでのピクセルに対応しており、床面からロボットの全高までの高さに1つでも障害物領域を含む場合、ピクセルマップでも障害物領域となる。最後に、ピクセルマップを用いて評価式を計算する。

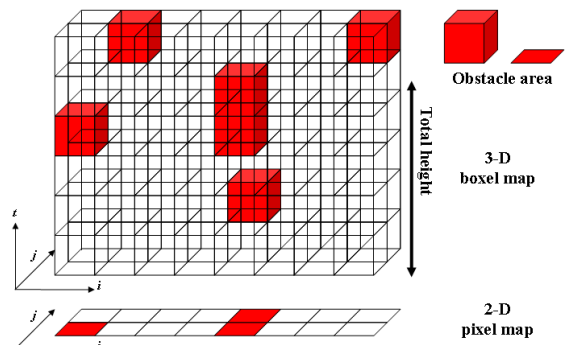


Fig.4 Transformation from voxel map to pixel map

文献[8]では、姿勢変化に対する考慮がされていなかったため、本研究では、ロボットが現在の姿勢から次の計測姿勢までの姿勢変化を抑えるように評価式 v_3 を変更した。評価関数は式(1)で表され、式(1)の各項は式(2)~(4)で表される。図5に評価関数の説明図を示す。

$$V(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \alpha \times v_1(\mathbf{R}, \mathbf{t}) + \beta \times v_2(\mathbf{R}, \mathbf{t}) + \gamma \times v_3(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \quad (1)$$

$$v_1(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left\{ \min(g_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j) \times d_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j)^2) \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$v_2(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left\{ \sum_{i=0}^{i=l} \sum_{j=0}^{j=N} (h(i, j) \times d_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j)^4) \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$0 \leq i \leq M, \quad 0 \leq j \leq N$$

$$v_3(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left\{ \frac{l_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}}{m} \right\}^2 + \left\{ \frac{\theta_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}}{n} \right\}^2 \quad (4)$$

$$g_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j) = \begin{cases} 1: \text{グリッド}(i, j) \text{が障害物領域} \\ 0: \text{グリッド}(i, j) \text{がその他} \end{cases}$$

$$h_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j) = \begin{cases} 1: \text{グリッド}(i, j) \text{が新規計測領域} \\ 0: \text{グリッド}(i, j) \text{がその他} \end{cases}$$

$d_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}$ = グリッド (i, j) とロボットとの距離

$l_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}$ = 現在の位置から計測候補位置までの距離

$\theta_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}$ = 現在の姿勢から計測候補姿勢までの角度

ここで、 m はロボットの移動速度、 n はロボットの姿勢変化速度、 (\mathbf{R}, \mathbf{t}) はロボットの位置・姿勢を表す回転行列、並進移動ベクトル、 α 、 β 、 γ は重み係数である。

式(2)は安全性の評価式である。周囲の障害物からどれだけ離れているかを評価する。具体的には、次回計測候補位置から一定の距離内にある障害物の位置までの距離の総計を2乗し、逆数をとったものである。近くに障害物の少ない安全な位置ほど値は小さくなり、評価は高くなる。図5では黄色の円と矢印で表されている。これにより、障害物から離れた安全な計測位置を求めることができる。

式(3)は新規計測可能領域の評価式である。新たに計測できるであろう未知領域の大きさを評価する。具体的には、ロボットがある計測候補位置・姿勢において、新規に計測できるであろう面積の逆数である。新規計測領域が大きいほど値は小さくなり、評価が高くなる。図5では青の領域で表されている。これにより、より多くの新規計測領域を計測できる位置・姿勢を求めることができる。また、ロボットの現在位置から近くにある新規計測領域ほど重みが大きい。この重みは試行錯誤的に求めた。これにより、ロボットの現在位置に近いオクルージョン領域を優先的に計測できる。

式(4)は移動に要する時間の評価式であり、第1項、第2項の2つに分けて考えられる。

式(4)において、第1項は移動量の評価式である。現在位置からのロボットの移動量を移動に必要な時間として評価する。具体的には、現在位置から次回計測候補位置までの距離を移動速度で割った、移動時間の2乗である。距離が短く、移動時間が短いほど値が小さくなり、評価は高くなる。図5では紫の矢印で表されている。

式(4)の第2項は本研究において新しく追加した項で、姿勢変化量の評価式である。現在位置からのロボットの姿勢変化

量を姿勢変化に必要な時間として評価する。具体的には、現在姿勢から次回計測候補姿勢までの姿勢変化を姿勢変化速度で割った、姿勢変化時間の2乗である。姿勢変化が小さく、姿勢変化時間が少ないほど値が小さくなり、評価は高くなる。図5では緑の角度で表されている。

式(4)の第1項と第2項を併せて、移動に要する時間として評価し、時間効率的に優れる位置・姿勢を求めることができる。

以上、式(2)~(4)を含む、式(1)の値を最小化する計測候補位置・姿勢がビュープランニングにより得られた最適な次の計測位置・姿勢である。

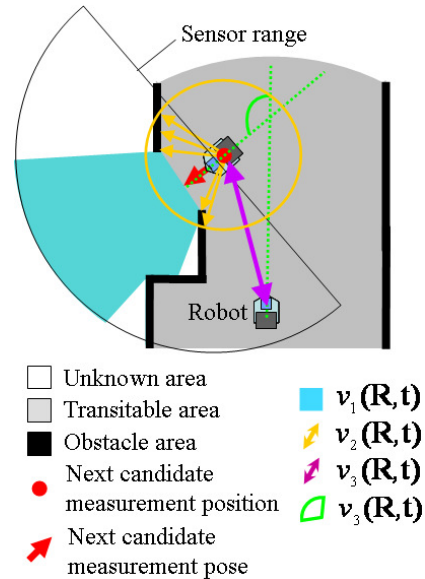
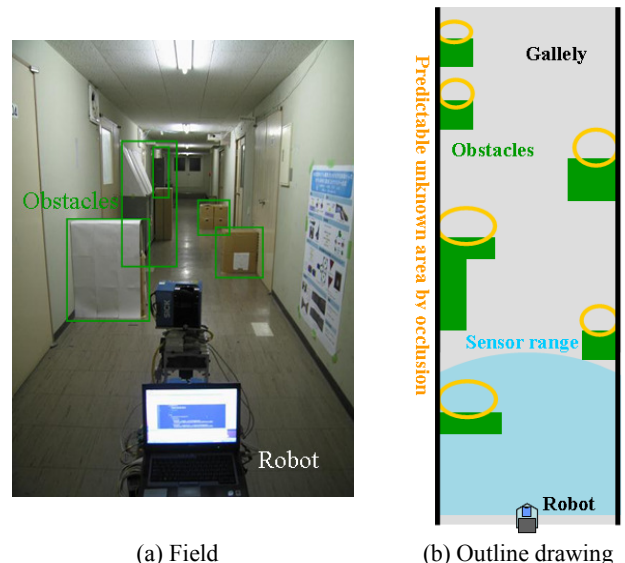


Fig.5 Evaluation formula

3. 実験

図1に示す自律移動ロボットを用い、屋内の廊下において地図生成の実験を行った。実験環境を図6(a)に、実験環境の概略図を図6(b)に示す。各障害物の裏にオクルージョンによる未知領域(黄色)の発生が予想される(図6(b))。今回の実験では、7回の計測で地図生成を終了させた。



(a) Field

(b) Outline drawing

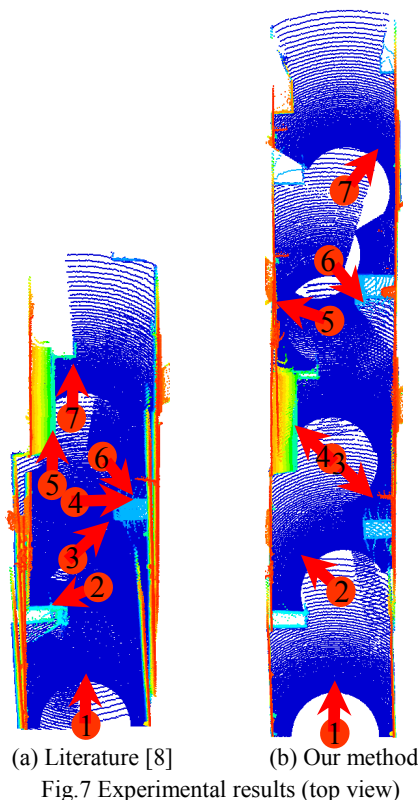
Fig.6 Environment

実験結果を図7, 図8に, 結果の比較を表1に示す.

図7において, ロボットは, 赤い点において矢印の方向を向いて3次元計測を行った. 赤い点の上の数字は何回目の計測であるかを表す. 文献[8]の結果と本手法の結果を比べると, 本手法は地図が歪むことなく, 欠損も防ぎながら, 同じ計測回数で文献[8]より大きな地図を生成できている.

表1において結果を比較すると, 総姿勢変化は, 従来手法での約900度に対し, 本手法では約855度と改善された. 生成地図のボクセル数を地図完成までにかかった時間で割った, 単位時間当たりの生成地図は, 文献[8]では140.6に対し, 本手法では156.4となり, 本手法は文献[8]の約1.1倍の効率で地図生成を行った. ここで, ボクセル数とは, ビュープランニングの際に用いた, 生成地図をボクセル単位に分割した際のボクセルの個数である. 効率としてみれば, あまり改善がみられないように思えるが, これは, ロボットがより遠くまで移動して計測を行ったことで移動時間がより多くかかったためである.

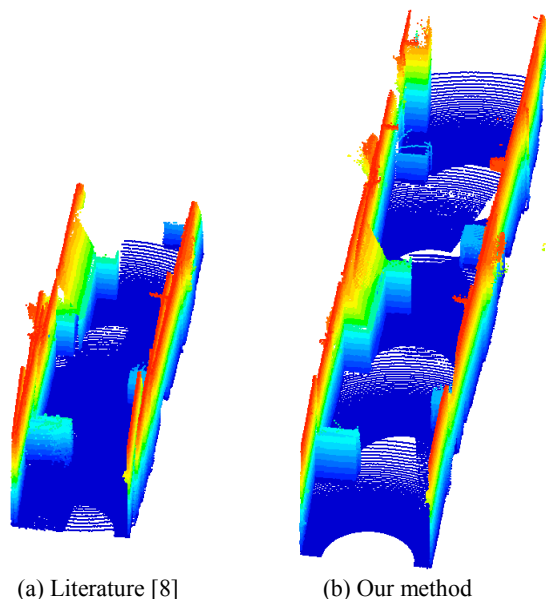
以上, 文献[8]に対し, 本手法では同じ計測回数でより大きな地図を生成し, 地図生成効率としてもより優れた結果を得た. 従って, 本手法では文献[8]に比べ, より効率的に地図生成を行うことができた.



(a) Literature [8] (b) Our method
Fig.7 Experimental results (top view)

Table 1 Comparing result of experimentation

	literature [8]	our method
Total turned degree[deg]	900	855
Time for 3-D mapping[s]	336	342
3-D map size per second [quantity of voxel / s]	140.6	156.4



(a) Literature [8] (b) Our method
Fig.8 Experimental results (top perspective view)

4. 結言

本研究では, LRF 搭載移動ロボットによる効率的なビュープランニングを用いた3次元地図生成手法を提案した. 実験結果から本研究の有用性が確認できた.

今後の課題としては, 移動しながらの地図生成が挙げられる. 第2章で示したように, 現在は, 停止して3次元計測, 次に, 次回計測位置・姿勢まで移動, その後再び, 停止して3次元計測というように, 停止と移動の繰り返しで地図生成を行っている. そこで, 今後は常に移動している状態で全ての処理を行う手法を構築していく.

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 Triever, 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] William R. Scott, Gerhard Roth and Jean-Francois Rivest, "View Planning for Automated Three-Dimensional Object Reconstruction and Inspection", ACM Computing Surveys, Vol.35, No.1, pp.64-96, 2003.
- [7] Hartmut Surmann, Andreas Nuchter and Joachim Hertzberg, "An Autonomous Mobile Robot with a 3D Laser Range Finder for 3D Exploration and Digitalization of Indoor Environments", Journal of Robotics and Autonomous Systems, Vol.45, pp.181-198, 2003.
- [8] 岩科進也, 山下 淳, 金子 透, "レンジセンサ搭載移動ロボットによる動的環境における3次元地図生成", 第14回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.300-305, 2009.