社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE

レーザレンジファインダ搭載移動ロボットによる 動的環境の 3 次元地図生成

中本 琢実† 山下 淳† 金子 透†

†静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1
E-mail: †{f0530055, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 自律移動ロボットが自律的に行動するためには，障害物の位置情報を記した地図が必要となる．しかし，2 次元地図では，その地図平面上にない障害物は回避することができない．また，観測環境中に動物体が存在すると，正しい地図が生成できない．さらに別の問題として，実際に移動ロボットが地図を用いて行動するとき，地図上での現在位置が分からなければ，移動ロボットは行動を開始できない．本研究では，レーザレンジファインダを搭載した移動ロボットによる動的環境の 2 次元地図生成及び静的環境の 3 次元地図生成の手法，及び既知の地図上における自己位置推定の手法を提案する．

キーワード 移動ロボット，レーザレンジファインダ，ICP アルゴリズム，動的環境，3 次元地図生成，自己位置推定

3-D Map Generation in a Dynamic Environment by a Mobile Robot Equipped with Laser Range Finders

Takumi NAKAMOTO† Atsushi YAMASHITA† and Toru KANEKO†

† Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan

E-mail: †{f0530055, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract A map that has the information about obstacles is necessary for autonomous mobile robots, when they work in unknown environments. Additionally, they cannot avoid obstacles that are not on the same plane with a 2-D plane map. Moreover, moving objects may exist in the actual dynamic environment. In such a case, an exact map cannot be generated. Another problem is estimation of their present location on the map. They cannot start their action if they do not know the present location on the map. In this paper, we propose a method for 2-D map generation in a dynamic environment and 3-D map generation in a static environment. We also propose a method for estimating a present location of a mobile robot on a generated map.

Keyword Mobile Robot, Laser Range Finder, ICP algorithm, Dynamic Environment, 3-D Map Generation, Self-Localization

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，安全に走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]．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．

また，実際にロボットが地図を用いて行動するとき，地図上での現在位置がわからなければ，ロボットは行動を開始することができない．この場合，ロボットの初期位置の情報無しで，現在位置を推定しなければならない[4-9]．

そこで本研究では，移動ロボットが自ら動的環境の 2 次元地図，静的環境の 3 次元地図を生成する手法，及び既知の地図上でのロボットの現在位置を推定する手法を提案する．

2. 前提条件

障害物までの距離情報を取得するため，移動ロボッ

トにはレーザレーダを利用したレーザレンジファインダ（LRF）（Fig.1）を搭載する．

3 次元情報を得るために，LRF を移動ロボットに 2 台搭載する（Fig.2）．1 つ目の LRF をロボットに水平に搭載し（LRF1），ロボットの周囲環境における水平面を計測する．その結果，レーザの投光の高さに対応した水平断面で，障害物の 2 次元直交座標におけるレーザ距離画像を得ることができる（Fig.3）．さらに，2 つ目の LRF を傾けて搭載する（LRF2）ことで，周囲環境における 3 次元情報を取得する．また，移動ロボットは平面上を移動するものとする．

なお 3 次元地図は，まず LRF1 で平面地図を生成し，その平面地図と LRF2 で取得した 3 次元データを統合することで生成する．

Fig.1　LRF

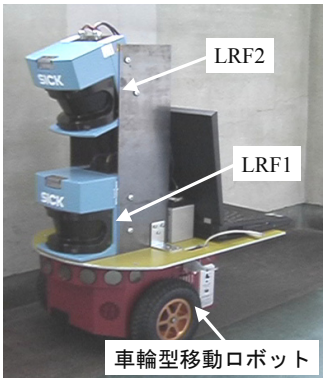


Fig.2　LRF 搭載移動ロボット

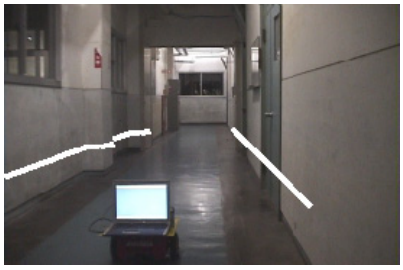


Fig.3　LRF の計測範囲

3. 地図生成

3.1. 計測データの統合

地図生成は，LRF で得られたデータを用いて行うが，LRF は計測できる距離範囲に限りがあり，固定位置からの計測では必要とする範囲のデータを取得することは困難である．そのため，LRF を搭載した移動ロボットによって，現場を複数の位置から計測し，各計測データを 1 つに統合することで地図生成を行う．LRF で計測したデータを統合するためには，各計測データの位置関係を推定する必要がある．車輪型移動ロボットの自己位置推定の方法には，内界センサを用いた手法としてデッドレコニングがある．しかし，デッドレコニングは単に車輪の回転数を計測しているため，車輪のスリップなどにより位置誤差が生じてしまう．さらに，生じた位置誤差を補正することができず，走行距離が増えるほど，誤差が累積していってしまう．それゆえ，デッドレコニングのみを用いて地図生成を行うと，各計測データの位置関係に誤差が生じ，歪んだ地図が生成されてしまう．そこで，デッドレコニングによる自己位置推定で生じた位置誤差を補正するために，外界センサとしてステレオカメラ，レーザレンジセンサなどを用いる方法[10]が提案されている．今回は，各計測データの重なった部分（複数回観測領域）を用いて，各計測データ間の位置合わせ（マッチング）を行うことで，自己位置推定の補正を行うことにする．

位置合わせには様々な方法が提案されているが，今回は計測データから直接位置合わせする手法の 1 つである ICP（Iterative Closest Point）アルゴリズム[11]に基づいた方法を用いる．

3.2. ICP アルゴリズム

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．具体的には，まず 2 つの点群 M, S があるとき，点群 S 中の各点 $\boldsymbol{s}_i$ $(1 \le i \le N)$について，点群M中で最も近い点$\boldsymbol{m}_j$ $(1 \le j \le N)$を対応点とする（Fig.4）．そして，式(1)で表される各対応点間の距離の 2 乗和E_1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．

$$E_1(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}) = \sum \left\| \boldsymbol{m}_j - (\boldsymbol{R}\boldsymbol{s}_i + \boldsymbol{t}) \right\|^2 \qquad (1)$$

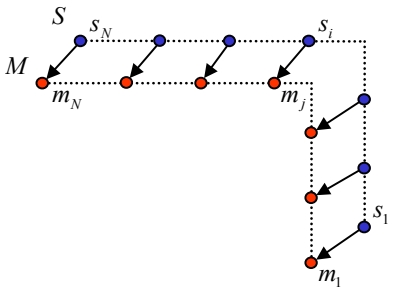


Fig.4　ICP アルゴリズム

実際にマッチングを行うとき使用する対応点群は，対応点間が一定の距離以下のものを使用する（Fig.5）．そして，その対応点群と式(1)によって求めた移動パラメータ$(\mathbf{R}, \mathbf{t})$を用いて，すべての点群を修正する．

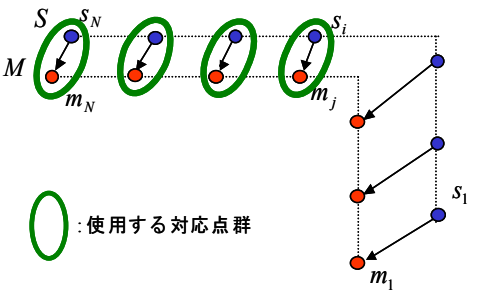


Fig.5　使用する対応点群

また，点群 S と点群 M の数が異なっている場合もこの方法で修正を行う．その場合，例えば点群 M のほう

が多いときは，点群 M 中で点群 S の対応点に選ばれない点が存在した状態で修正を行う（Fig.6）．

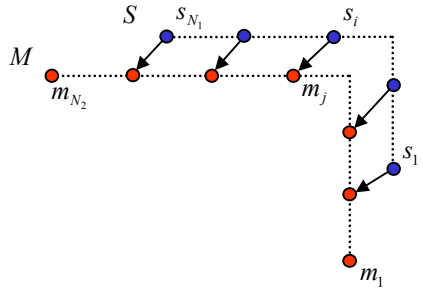


Fig.6　点群 M のほうが多い場合

逆に，点群 S のほうが多いときは，点群 M において点群 S 中で最も近い点を選び，その対応点間の距離が最小となるように点群 S を移動する（Fig.7）．

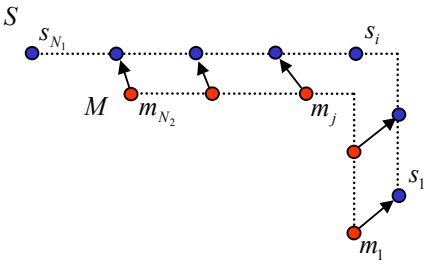


Fig.7　点群 S のほうが多い場合

3.3. 修正 ICP アルゴリズム

前項で ICP アルゴリズムについて説明した．しかし，計測データ間が離れすぎていると，修正したい方向に点が対応せず，点と点が正しく対応しない場合がある（Fig.8）．このような場合，正しくマッチングを行うことができず，誤差が修正できない．

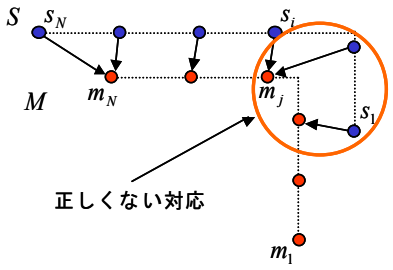


Fig.8　正しくない対応点群

そこで本研究では，点と点を対応させるのではなく，点と直線を対応させることにより位置合わせを行う修正ICPアルゴリズムを用いる（Fig.9）．すなわち，点群 S中の各点$\boldsymbol{s}_i$ $(1 \le i \le N)$について，点群M中で最も近い 2 点$\boldsymbol{m}_j$, $\boldsymbol{m}_k$ $(1 \le j \le N, 1 \le k \le N)$を求め，その 2 点からなる直線を対応点の代わりとする．そして，式(2)で表される各点と直線間の距離の 2 乗和E_2が最小となる移動パラメータ$(\mathbf{R}, \mathbf{t})$を求める．ただし，$\boldsymbol{m}_\perp$は$\boldsymbol{m}$に直交し大きさが$|\boldsymbol{m}|$であるベクトルを表す．なお以後本論文では，修正ICPアルゴリズムを単にICPアルゴリズムと呼ぶことにする．

$$E_2(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}) = \sum \frac{\left|(\boldsymbol{R}\boldsymbol{s}_i + \boldsymbol{t})(\boldsymbol{m}_k - \boldsymbol{m}_j)_\perp + \boldsymbol{m}_k \boldsymbol{m}_{j\perp}\right|^2}{\left\|\boldsymbol{m}_k - \boldsymbol{m}_j\right\|^2} \qquad (2)$$

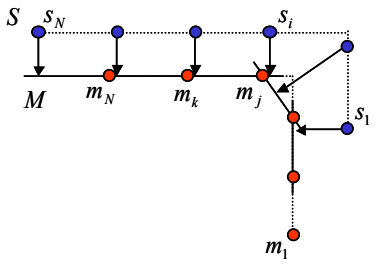


Fig.9　修正 ICP アルゴリズム

本研究では，全探索を行い，その全探索における各位置においてICPアルゴリズムを用いる．そして，探索範囲の中においてE_2が最も低い位置を，マッチしたとみなす．なお探索範囲は，デッドレコニングの値によって探索初期地点を決め，その位置からある一定範囲を探索範囲とする．

3.4. 動的環境

動物体が存在する環境（動的環境）で地図生成を行うと，地図に動物体の情報が含まれてしまう（Fig.10）．この場合，動物体の情報を地図から除去する必要がある．本研究では，デッドレコニングと ICP アルゴリズムによって，動物体の情報を含んだままの地図を生成し，その後動物体だけを除去することで地図生成を行う．そこで，地図中からの動物体除去方法について述べる．

動物体はその場に静止していないので，生成された地図を見ると，移動前後の計測データにおいて，点群が重ならない．そこで，移動前後の計測データにおいて，点群の重ならない部分を探索する．

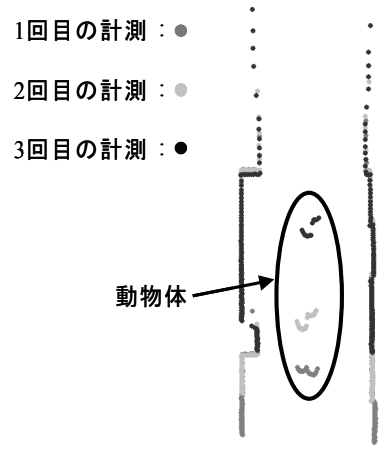


Fig.10　動物体を含む地図

具体的には，以下の通りである．まず，移動後の計測データを点群S, 移動前の計測データを点群Mとおく．

点群S中の各点$\boldsymbol{s}_i$ $(1 \le i \le N_1)$について，点群M中で最も近い点$\boldsymbol{m}_j$ $(1 \le j \le N_2)$を対応点とする．そして，距離$|\boldsymbol{s}_i - \boldsymbol{m}_j|$がある閾値以上のときの$\boldsymbol{s}_i$を動物体とみなし，除去する（Fig.11）．

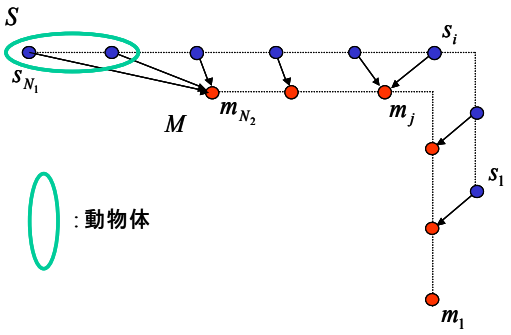


Fig.11　動物体とみなす条件

4. 自己位置推定

実際に地図を用いてロボットが行動を開始するとき，まず地図上でロボットがどの位置にいるかが分からなければ行動を開始することができない．また行動中に，車輪のスリップなどによってロボットが地図上での現在位置を見失ってしまった場合，ロボットがそれ以降行動を続けることは困難である．この場合にも，ロボットの初期位置を与えずにロボットの地図上での現在位置を推定する必要がある．

本研究では，その場で計測したデータに回転と並進を施し，既知の地図上において類似する位置（現在位置候補）を全探索することで，自己位置推定を行う．そこで，現在位置候補とみなす条件を説明する．

まず，その場で計測したデータを点群 S，既知の地図を点の集合とみなし点群 M とおく．点群 S 中の各点$\boldsymbol{s}_i$ $(1 \le i \le N_1)$について，点群M中で最も近い点$\boldsymbol{m}_j$ $(1 \le j \le N_2)$を対応点とする．そしてその対応点群のうち，対応点間の距離$|\boldsymbol{s}_i - \boldsymbol{m}_j|$がある一定値以下の個数を数え，その個数がある閾値以上になったときの位置を，地図上での現在位置候補とする．現在位置候補が複数存在するときは，現在位置から移動して計測を行い，その計測データを用いて同じ処理を行い，移動後の現在位置候補を計算する．そして，移動前後の現在位置候補の位置関係から現在位置を絞っていき，最終的に現在位置候補が 1 つになるまで処理を繰り返す．

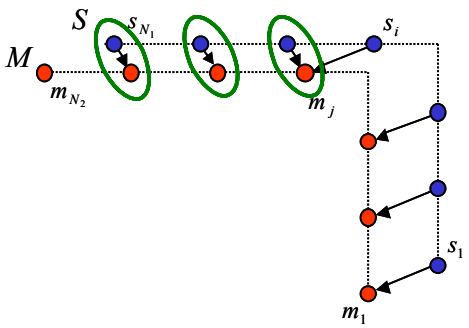


Fig.12　マッチしたとみなす条件

5. 実験

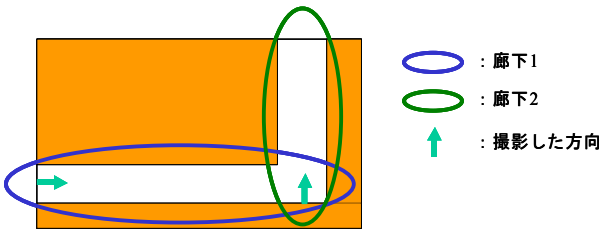
5.1. 地図生成

5.1.1. 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つ．また，レーザ光の波長は 905nm（近赤外）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 8m，スキャン角度 180°，角度分解能 0.5°で行った．

また，大学構内の L 字の廊下（Fig.13）を移動と計測を繰り返し行うことにより計 27 ヶ所のデータを取得し，データ間の位置合わせを行った．



(a)　廊下略図

(b)　廊下 1　　(c)　廊下 2

Fig.13　実験現場

5.1.2. 静的環境の 2 次元地図生成

まず，計測データをデッドレコニングのみでマッチングした例（Fig.14）と，ICP アルゴリズムに基づいて修正した例（Fig.15）を示す．なお，各計測データにおいて濃淡を変えて表示してある．

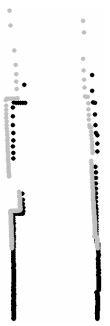


Fig.14　修正前

Fig.15　修正後

この結果から，デッドレコニングのみでは正しくマッチングされていないことがわかる．一方，ICP アルゴリズムに基づいて修正した結果，より正しくマッチングを行うことができている．

次に，全ての計測データをデッドレコニングのみを用いて統合した地図（Fig.16）と，ICP アルゴリズムに基づいて修正した地図（Fig.17），及び計測精度（Table 1）を示す．

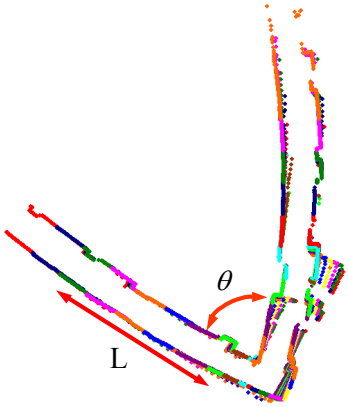


Fig.16　修正前の地図

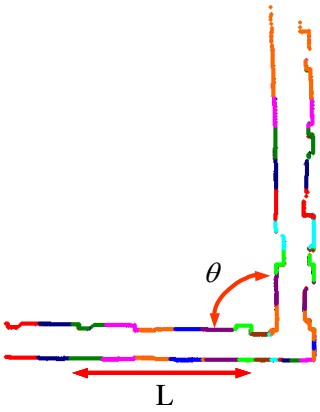


Fig.17　修正後の地図

Table 1　計測精度

	距離（cm）	角度（°）
現場の実測データ	960	90
修正前の地図によるデータ	1039	70
修正後の地図によるデータ	983	89

デッドレコニングのみで生成した地図は歪んだものになっているが，ICP アルゴリズムによって修正した地図は，より正しい地図となっている．また計測精度からも，本手法の有効性がわかる．

5.1.3. 動的環境の 2 次元地図生成

実験は，環境中に動物体が存在するという条件で行った．今回は，人を動物体として実験を行った．

動物体を除去する前（Fig.18）と除去した後（Fig.19）の結果を以下に示す．

Fig.18　除去前

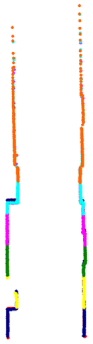
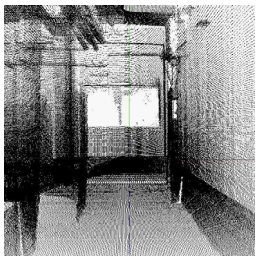


Fig.19　除去後

本手法適用前の地図では，地図中に動物体が映っているが，本手法を適用することで動物体が除去されていることがわかる．

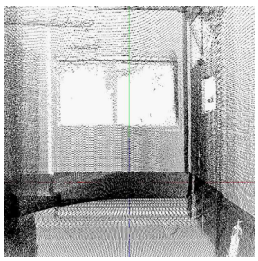
5.1.4. 静的環境の 3 次元地図生成

生成した平面地図から，3 次元地図を生成した結果を Fig.20 に示す．



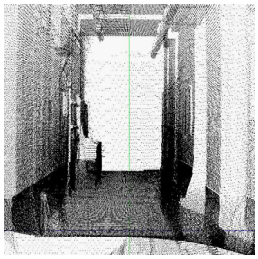
(a)　3 次元地図 1

(b)　実際の現場 1



(c)　3 次元地図 2

(d)　実際の現場 2



(e)　3 次元地図 3

(f)　実際の現場 3

Fig.20　実験結果

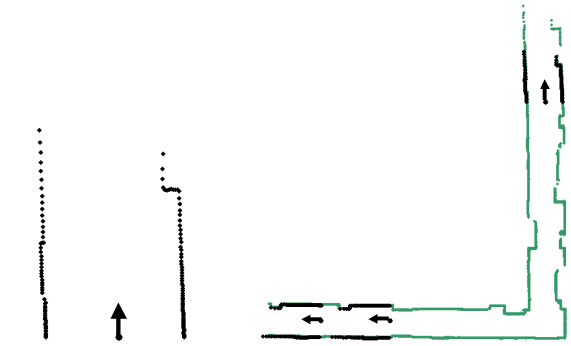
結果から，実際にカメラで撮影した画像と比べて，正しく 3 次元形状が生成されていることが確認された．なお今回は，2 つ目の LRF の設置する角度を上向きと

下向きの 2 通りに変えて，2 回同じ場所を計測することで，環境全体の 3 次元地図を生成した．

5.2. 自己位置推定

実験は，5.1.2 項で作成した地図上のある位置にロボットをおいて，その位置を推定した．

まず，その場で計測したデータ（Fig.21(a)）と，自己位置推定を行った結果（Fig.21(b)）を示す．ここで，矢印の向きはロボットの向きを表す．

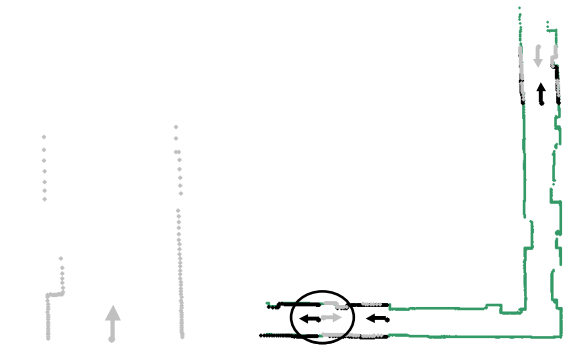


(a) 計測データ 1　　(b) 自己位置推定 1

Fig.21 自己位置推定の結果 1

結果を見ると，現在位置候補が複数あり，このままでは現在位置がわからない．

そこで，現在位置から 180° 回転し，もう一度計測を行い（Fig.22(a)），その位置で自己位置推定を行った（Fig.22(b)）．



(a) 計測データ 2　　(b) 自己位置推定 2

Fig.22 自己位置推定の結果 2

回転後の計測においても，現在位置候補が複数になった．しかし，回転前後の現在位置候補の組み合わせとその位置関係において，180° 回転したことを考慮すると，現在位置を 1 ヶ所に絞ることができる．このように，1 回で現在位置を推定できない場合でも，移動を行いその位置における計測データを用いることで，現在位置を推定可能となった．

6. 結論

本研究では，レーザレンジファインダ搭載移動ロボットを用いた動的環境の 2 次元地図，静的環境の 3 次元地図の生成手法，及び既知の地図上で自己位置推定手法を提案した．今回の実験から，ICP アルゴリズムに基づいた方法による地図生成の有効性を確認できた．また本研究の手法を用いて，動的環境及び 3 次元の地図生成が行えることが確認できた．さらに，本研究の手法を用いて自己位置推定を行えることが確認できた．

今後の展望としては，実際に生成した地図を用いて障害物を避ける手法を構築することなどが挙げられる．

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] John J. Leonard and Hugh F. Durrant-Whyte, “Simultaneous Map Building and Localization for an Autonomous Mobile Robot,” Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.1442-1447, 1991.

[5] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller and Ben Wegbreit, “FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem,” Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, 2002.

[6] Nicola Tomatis, Illah Nourbakhsh and Roland Siegwart, “Hybrid Simultaneous Localization and Map Building: A Natural Integration of Topological and Metric,” Robotics and Autonomous Systems, Vol.44, pp.3-14, 2003.

[7] Masahiro Tomono, “Robust Robot Localization and Map Building using a Global Scan Matching Method,” Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1059-1064, 2004.

[8] Masahiro Tomono, “3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection,” Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3353-3358, 2005.

[9] Masahiro Tomono, “Efficient Global Scan Matching Using Saliency-based Scan Point Resampling,” Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1433-1438, 2005.

[10] 友納正裕，“スキャンマッチングによる移動ロボットのマップ構築と大域的自己位置推定，” 第 9 回ロボティクスシンポジア講演予稿集，1B2, pp.32-37, 2004.

[11] P. J. Besl and N. 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.