

# 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\*

岩科進也<sup>\*1</sup>, 山下淳<sup>\*2</sup>, 金子透<sup>\*2</sup>

## 3D Map Building in Dynamic Environments by a Mobile Robot Equipped with two Range Sensors

Shinya IWASHINA<sup>\*1</sup>, Atsushi YAMASHITA<sup>\*2</sup> and Toru KANEKO<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University  
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

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, 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 by a mobile robot equipped with two LRFs (Laser Range Finders). The robot measures 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. In addition, to generate a map quickly, it is important that the robot examines effective view points. Therefore, the robot searches for effective view points by predicting new measurement domains in the next view points. Experimental results show 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<sup>(1)</sup>。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で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、移動ロボットはその平面上に無い障害物を回避で

きない。そこで、周囲環境の3次元地図生成が重要となる<sup>(2)~(3)</sup>。また、観測環境中に移動物体が存在すると、地図中に移動物体が映ってしまい、移動物体が存在しない環境における正確な地図が生成できない。そこで、移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<sup>(4)~(6)</sup>。

一方で、ロボットに搭載可能なセンサは計測有効範囲が限られており、1度の計測で周囲環境すべてを計測するのは困難である。一般的にロボットが周囲環境の地図を生成する場合、異なる位置・姿勢から取得したセンサデータを統合して地図を生成するが、センサデータを取得する際のロボットの位置・姿勢が適切でないと、オクルージョンなどにより未計測の領域が存在してしまい地図に欠損が生じる。そこで、未計測領域を効率よく削減するために、最適なセンサデータの取得位置・姿勢を計算するビュープランニング手法が提案されている<sup>(7)~(8)</sup>。

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、SLAMを用いた自己位置推定と3次元地図生成の手法を提案する。また、現時点までに生成された地図を用いて、未計測領域を効率的に削減できるロボットの位置・姿勢を検討するビュープランニング手法の提案を行う。

\*原稿受付 2008年10月24日

<sup>\*1</sup> 学生員, 静岡大学

(〒432-8561 静岡県浜松市中区城北3-5-1)

<sup>\*2</sup> 正員, 静岡大学

E-mail: {f0730017,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

## 2. 概要

本研究で使用する移動ロボットを図1に示す。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。図1における2-D LRFは床と平行な1断面を計測する。3-D LRFは回転台に設置されており、床と垂直な面を回転しながら計測し、周囲360度の3次元データを取得する。

SLAMの概要を図2に示す。移動ロボットは図2(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<sup>(9)</sup>を適用し自己位置を推定する。同時に、図2(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。得られた自己位置推定データに基づいて図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、生成された3次元地図データを用いてビュープランニングを行う。

### 3. 移動ロボットの自己位置推定

地図生成は図2(b)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、

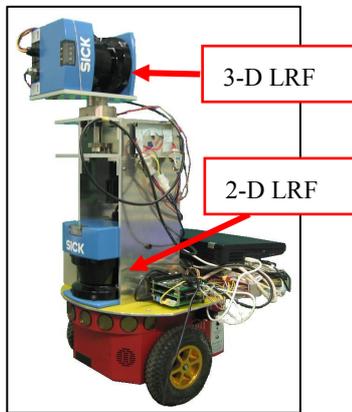


Fig.1 Mobile Robot

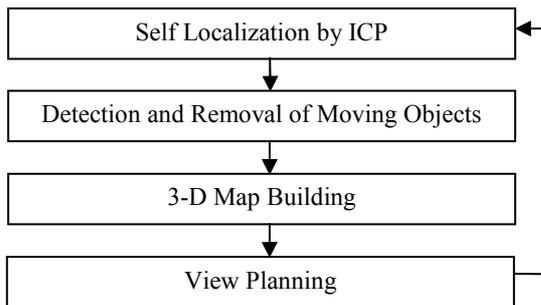


Fig.2 Flow Chart (Map Generation)

自己位置推定データに基づいて、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を行う。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(図3)。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。

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

ここで、 $\mathbf{R}$ は回転行列で、 $\mathbf{t}$ は並進移動ベクトルあり、 $\mathbf{m}_\perp$ は $\mathbf{m}$ に直交し大きさが $|\mathbf{m}|$ であるベクトルを表す。

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。

### 4. 移動物体の検出

移動物体は常に同じ場所に存在するわけではないため、地図生成は静止物体のみを対象として行われるのが一般的である。しかし、計測環境中に移動物体が存在した場合、地図に移動物体が書き込まれてしまう。そこで、環境中に存在する移動物体を検出することが重要となる。

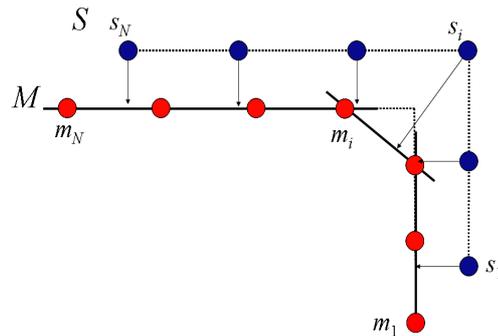
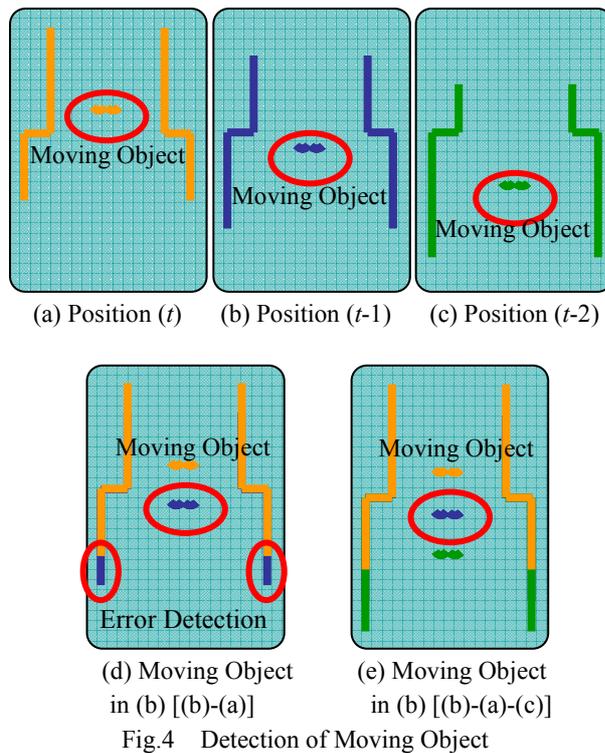


Fig.3 ICP Algorithm

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差分処理を行い、移動物体を検出する。移動ロボットは時刻  $(t-1)$  における計測データ (図 4(b)) と時刻  $t$  における計測データ (図 4(a)) を比較し差分処理を行う (図 4(d))。しかし、この方法では移動物体は検出できるが、壁などの一部の静止物体も移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  $n+1$  個の計測データ (図 4(c)) を用い、時刻  $(t-1)$  のデータから他の時刻のデータを差分することで、移動物体を検出する (図 4(e))。これにより移動ロボットは移動物体のみを正確に検出可能となる。本手法では現時刻ではなく時刻  $(t-1)$  での移動物体を検出するが、検出間隔が十分に短いため影響は少ない。

### 5. 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次元データの取得は、ビュープランニングによって求めた位置・姿勢でロボットを一時停止させ、回転台を回転させながら LRF により周囲環境を計測することで行う。3次元データの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。また、移動物体が検出された場合、計測を一時中断し、移動物体が通過後再計測する。

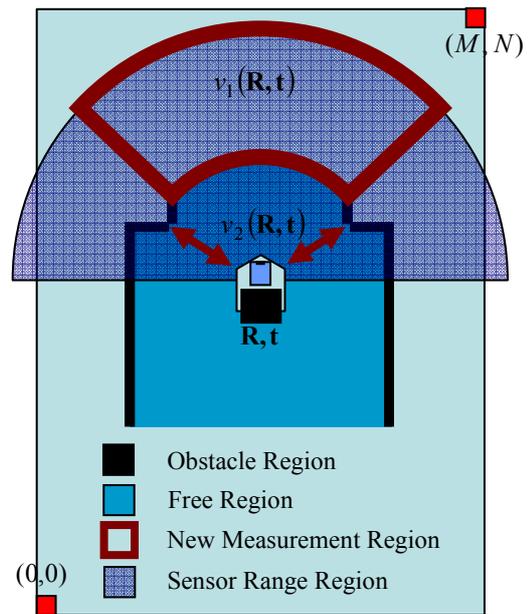


### 6. ビュープランニング

生成された3次元地図にはセンサの有効範囲やオクルージョンなどの影響により未計測領域が存在する。地図生成においては、未計測領域を効率よく削減することが重要となるが、ロボットが闇雲に走行しても未計測領域を効率よく削減できない。そこで、次にロボットがどの位置・姿勢に移動し計測を行えば未計測領域を効率よく削減できるかを検討する必要がある。

本研究では、現時点までに生成された地図を用いて、次にロボットがある位置・姿勢に移動したと仮定した場合の、新規に計測できる未計測領域を算出し、どの位置・姿勢に移動するのが効率的かを検討する。まず、どの領域に障害物が存在するのかを判定するため、点群データとして保持されている3次元地図を、立方格子に区切り3-D ボクセル地図を生成する。障害物計測点を含むボクセルを障害物領域とし、計測によって障害物が存在しないと判明した領域を自由領域とする。次に、ビュープランニングの計算量削減のため、3-D ボクセル地図を高さ方向に圧縮した、2-D グリッド地図 (図 5) を生成する。この2-D グリッド地図は、3-D ボクセル地図の地上から一定の高さまでの、異なった高さ存在する障害物領域の情報を一平面上に持つ。つまり、椅子や机等の本来は異なった高さ存在する障害物領域の情報を、同一平面に存在する障害物領域として扱うことにより処理を簡略化する。この2-D ボクセル地図を用いてビュープランニングを行う。

本研究では、どの位置・姿勢で計測を行うのが効率



的か求めるための評価関数として式(2)を用い、式(2)を最小化することにより、効率的なロボットの位置・姿勢  $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  を順次求める。式(2)は式(3)~(5)で表される。式(3)を最小化することで、1度の計測でより多くの新規計測領域を得られる。式(4)を最小化することで、障害物から離れた計測地点を得られる。式(5)を最小化することで、ロボットの移動量が少ない効率的な計測位置が得られる。

$$V(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \alpha \times v_1(\mathbf{R}, \mathbf{t}) + \beta \times v_2(\mathbf{R}, \mathbf{t}) + \gamma \times v_3(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \quad (2)$$

$$v_1(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left\{ \sum_{i=0}^{i=I} \sum_{j=0}^{j=J} \left( f(i, j) \times h_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j)^4 \right) \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$v_2(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \left\{ \min \left( g(i, j) \times h_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j)^2 \right) \right\}^{-1} \quad (4)$$

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

$$v_3(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = l_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}^2 \quad (5)$$

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

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

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

$$l_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})} = \text{1計測あたりのロボットの移動距離}$$

ここで、 $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  はロボットの位置・姿勢を表す回転ベクトルと並進移動ベクトルである。 $(i, j)$  は2-Dグリッド地図上の各位置を表す。 $\alpha, \beta, \gamma$  は重み定数である。

$v_1(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  で示される新規計測領域とは、ロボットが位置・姿勢  $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  に移動したとき、センサによって新たに計測できると考えられる領域である。ロボットから近い新規計測領域ほど重みが大い。ロボットと新規計測領域の距離に対する重みである  $h_{(\mathbf{R}, \mathbf{t})}(i, j)^4$  は試行錯誤的に求めた。 $v_2(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  はロボットとロボットから最短の障害物領域間の距離の2乗となる。 $v_3(\mathbf{R}, \mathbf{t})$  は前回の計測位置からのロボットの移動距離である。

## 7. 実験

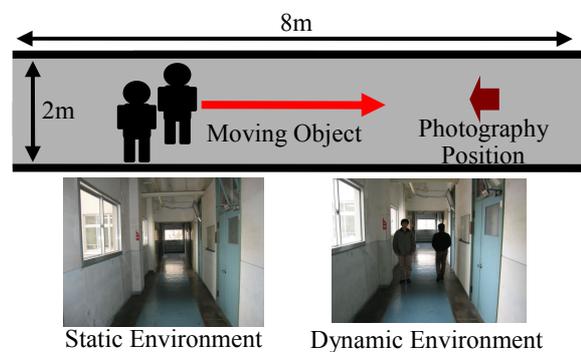
**7.1 実験条件** 本研究で用いるLRFは、レーザー光のパルスの伝播時間により距離を測定するものであり、ダイレクトな距離計測を行うことができる。LRFは、SICK社製(型式LMS 200-30106)で、計測精度

は最大誤差4cm、最大スキャン角度 $180^\circ$ 、距離測定範囲30mという特徴を持つ。本実験では、レーザーレンジファインダの設定は、距離測定範囲6m、スキャン角度 $180^\circ$ 、角度分解能 $0.5^\circ$ で行った。

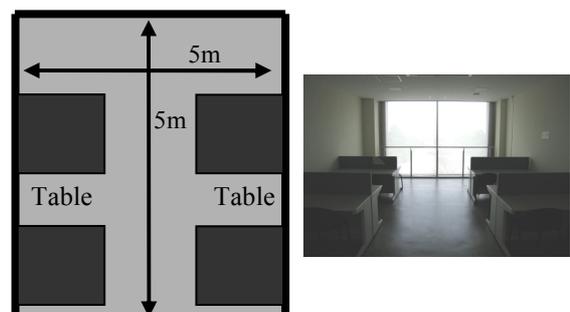
また、実験に用いる移動ロボットはMobileRobots社製PIONEER 3-DXで、3輪(駆動2輪、補助1輪)型である。本実験では基本移動速度を100mm/sとした。

実験環境を図6に示す。実験環境は屋内の廊下とホールであり、廊下には移動物体として2名の歩行者が存在した。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、地図の生成実験を行った。

**7.2 3次元地図生成** 実験結果を図7, 8, 9に示す。図7は移動物体除去を行った場合と行わなかった場合の実験結果の比較である。移動物体除去処理によって環境中に存在した移動物体が除去されている。図8は移動物体除去を行った場合の廊下全体の地図生成結果である。また、図9はホールの地図生成結果である。Table 1に、図8(a)における $L_1, L_2, \theta$ 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の最大誤差程度となっていることがわかる。実験結果より、周囲環境の地図生成が成功しているのがわかる。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。

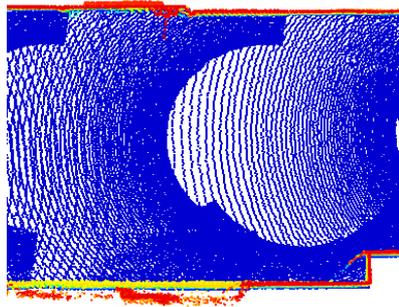


(a) Corridor

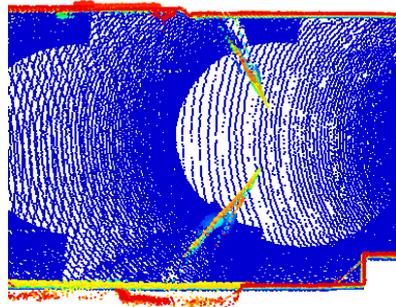


(b) Hall

Fig.6 Experiment Environment

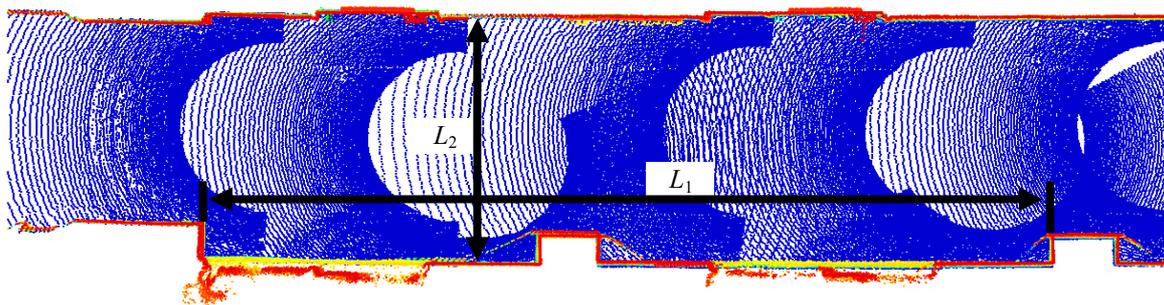


(a) 3-D Map 1 (After Removed Moving Objects)

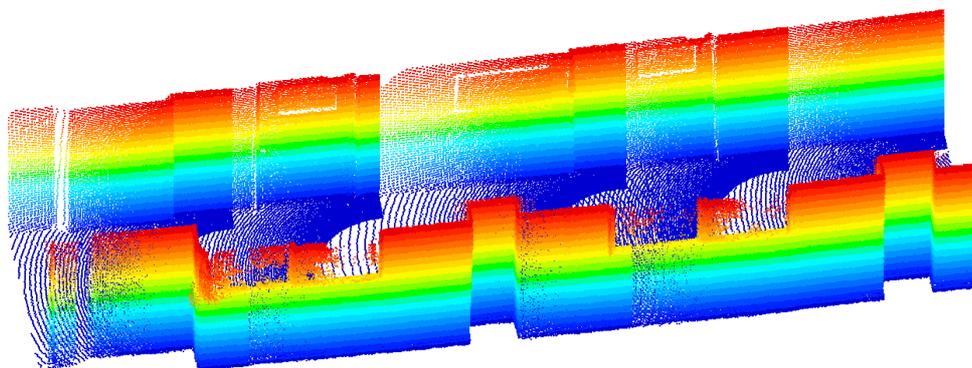


(b) 3-D Map 2 (Before Removed Moving Objects)

Fig.7 3-D Map (Removed Moving Objects)

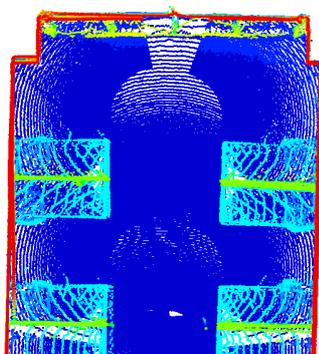


(a) 3-D Map 3

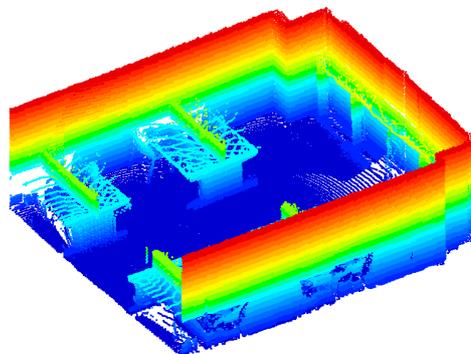


(b) 3-D Map 4

Fig.8 3-D Map (Corridor)



(a) 3-D Map 5



(b) 3-D Map 6

Fig.9 3-D Map (Hall)

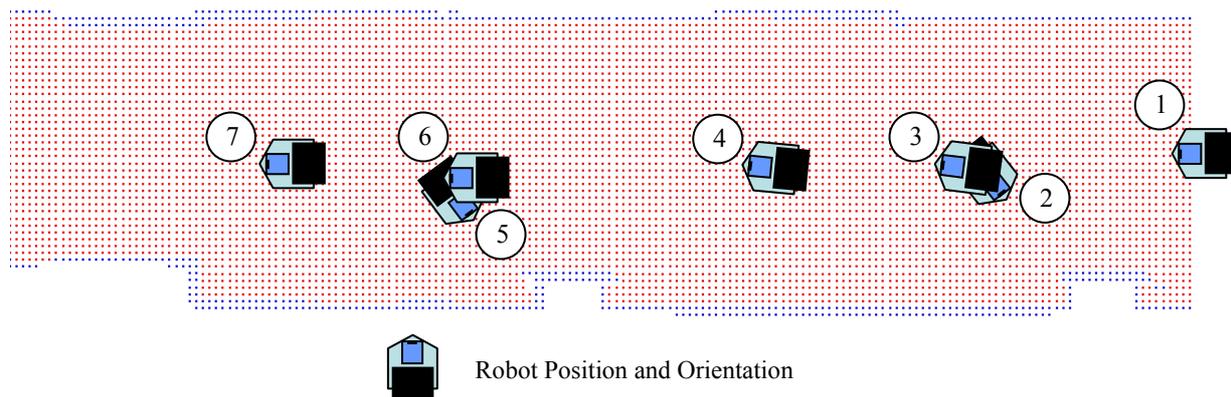


Fig.10 View Planing Result

Table 1 Map Generation Accuracy

	True value	Measurement data
$L_1$	6650 mm	6590 mm
$L_2$	2120 mm	2120 mm

**7・3 ビュープランニング** 地図生成に際して行われたビュープランニングの結果を図 10 に示す。図 10 に掲載した地図はビュープランニングに用いた 2 次元グリッド地図であり、ロボットシンボルマークは、ロボットがビュープランニングによって選択した周囲環境の計測に適したロボットの位置・姿勢である。また、番号はロボットの移動順序である。

ビュープランニングを行うことにより、ロボットが地図を生成する際、障害物から一定の距離を確保しつつ、柱の影などのオクルージョン領域を効率的に計測できる位置・姿勢に移動したことがわかる。

## 6. 結 論

本論文では、2 台の LRF を搭載した移動ロボットによるビュープランニングを用いた、SLAM による 3 次元地図生成を行う手法の提案をした。また、差分処理による移動物体の検出・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の有効性が確認された。今後の課題として、移動物体の動きを考慮したビュープランニングの検討が挙げられる。

## 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) 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) 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.

(8) 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.

(9) 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.