

# LRF を搭載した群ロボットによる未知環境三次元地図の自動作成

Autonomously generating 3D map of unknown environment by using mobile robots equipped with LRF

○ 横矢 剛 (九大)

長谷川 勉 (九大)

倉爪 亮 (九大)

Tsuyoshi YOKOYA, Kyushu University, yokoya@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

Ryo KURAZUME, Kyushu University

This paper proposes an automated 3D map generation method of an unknown environment by using mobile robots equipped with LRF. A 3D map is necessary for intelligent robots to plan a path of the robots. If the 3D map generation is automated, information of environment is quickly obtained in disaster scenes. Renewal of the map of a daily human life environment is easy even though the obstacle position is changed by human activities. We have developed a group of robots for 3D map generation by using CPS proposed as a high accuracy self localization technique. We propose a path planning of the robots to automate the map generation.

**Key Words:**3D SLAM, Autonomous Mobile Robot, Cooperative Positioning System

## 1 はじめに

人間と共生して働くロボットが自律的に行動するには、建造物の壁や通路などの構造情報やロボット移動時の障害物の位置情報を記した3次元環境地図を取得しなければならない。我々は、この3次元地図を自動的に取得する群ロボットを開発した。本稿では、環境地図を作成するための群ロボットの移動計画について述べる。

環境地図作成は、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)の研究分野で様々行われている[1][2]。広域空間を対象とした環境地図作成には、一般的に次の方法が用いられる。LRF(Laser Range Finder)やステレオカメラを搭載したロボットが環境内の数地点へ移動し、各地点でローカルな環境地図を作成する。地図作成時のロボットの位置姿勢を用いて、各ローカル地図の位置合わせを行い、1つのグローバルな地図へと統合する。この3次元環境地図作成を自動化すると、次のような利点が得られる。災害現場などで働く救助ロボットは、人の進入が不可能な未知環境内でも迅速に環境情報を取得し、被災者を救助できる。また、人との共生環境では、外乱や人の行動によって障害物位置が変化する。そのために必要となる環境地図の定期的な更新が容易になる。

従来用いられるオドメトリによる手法では、ロボットの自己位置推定精度が悪い。そのため、統合した地図にはズレが生じる。このズレはICP法[3]を用いて、ローカル地図の位置合わせを精度よく行うことにより修正される。しかし、ICP法を適用するには、各ローカル地図がある程度正しい相対位置関係になるように、通常人手により大まかな初期位置合わせをされなければならない。そのため、これら従来手法は自動化には不向きである。

未知環境の測定では、移動位置の決定に用いることができる情報はロボット自身が取得した環境情報のみである。しかし、環境の構造情報が少ない中で、ロボットの自己位置測定精度を保ちながら、効率よく環境測定するための移動位置を決定するのは容易でない。不適切な移動計画は、環境測定時間を大きくし、自己位置測定精度も悪くする。したがって、環境地図作成を自動化するには、高精度な自己位置測定を行うロボットの移動位置を未知環境内で機械的に決定しなければならない。

我々は、移動ロボットの高精度位置同定手法として提案されたCPS(Cooperative positioning system)[4]を用いた群ロボットによるSLAM[5]の自動化を行う。CPSとは、2つのロボット群が位置測定と移動を交互に行い、それぞれの位置姿勢を測定しながら移動するシステムである。この群ロボットは、レーザ計測装置を搭載した親ロボットと2台の子ロボットとで構成されている。子ロボットを移動式のランドマークとして用いながら、親ロボットが環境内を巡回して、3次元環境地図を作成する。

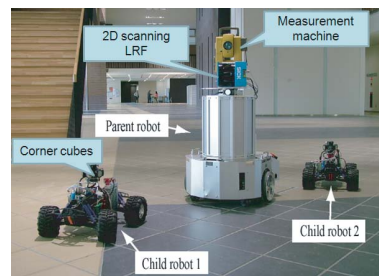


Fig.1: Group of robots

本稿では、この群ロボットによる環境地図作成を自動化するための移動経路計画について述べる。未知環境内では、群ロボットが移動できる領域は、親ロボット自体の環境測定によって作成される3次元環境地図から得られる。この領域内で親ロボットの移動位置を決定して、環境測定を行う。このとき、自己位置測定精度を保つための子ロボットの適切な配置を決定した後に、親ロボットの移動位置を決定する。

## 2 群ロボットによる3次元環境地図の作成原理

群ロボットは、以下の手順を繰り返して環境地図作成を行う。

- (1) 親ロボットが周囲環境を測定し、ローカル地図を作成する。
- (2) 未知の環境を測定できるように、親ロボットが移動する。このとき、群ロボットによるCPSで親ロボットの自己位置姿勢を測定する。

### 2.1 親ロボットによる環境測定

群ロボットを図1に示す。親ロボットには環境データ取得のための2次元LRFと、子ロボットの位置を取得するための高精度3次元測量機器を搭載する。また、移動式ランドマークとなる子ロボットには高精度3次元測量機器の測定対象となるコーナキューブを搭載する。

2次元LRFは角度180度の半円形の範囲内にある障害物までの距離データを最大80mで得ることができる(表1)。親ロボット本体上部に搭載した回転テーブルに2次元LRFを取り付ける。この回転テーブルを床面に対して垂直軸周りに回転させながら、2次元LRFからスライス状の距離データを連続して計測するこ

Table 1: specification of LRF

Range	80[m]
Field of view	180[deg.]
Resolution (distance)	10[mm]
Resolution (angle)	0.5[deg.]

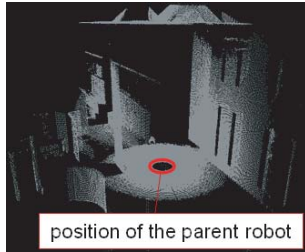


Fig.2: A 3D environmental map image scanned at a point

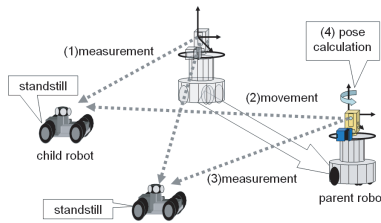


Fig.3: Principle of CPS

とにより、ロボット周囲の3次元距離データ(図2)を得ることができる。

## 2.2 群ロボットによるCPS

親ロボットは、前節のような測定を環境内の複数点で行う。ローカル地図の位置合わせは、測定時の親ロボット位置姿勢が取得されれば可能である。そこで、CPSを用いて、親ロボットの位置姿勢を正確に測定する。

CPSでは、群ロボットを次の手順で操作する。まず、2台の子ロボットが親ロボットから測定可能である適当な位置へ移動し、静止する。親ロボットは自身の移動前に2台の子ロボットの相対位置を測定し、移動した後、再び子ロボットの相対位置を測定する。親ロボットの移動前の位置姿勢が既知であるとき、これらの測定データより、移動後の親ロボットの位置姿勢を計算できる(図3)。

CPSにおける子ロボット位置の計測には、レーザを用いた3次元位置測量機器を用いる。この3次元位置測量機器は測定対象点にコーナキューブを配置し、3次元位置測定機器の計測レーザの照準をその方向に概略あわせておけば、当該コーナキューブを自動探索して正確な3次元位置を得ることができる。コーナキューブを子ロボットに搭載することにより、子ロボットの親ロボットから見た相対位置を正確に測定できる。測量機器の性能を表2に示す。

親ロボットの3次元測定座標系および世界座標系のZ軸は、水平面に対して鉛直上向きとする。親ロボットの位置姿勢のうち、X軸、Y軸周りの姿勢角は2軸の傾斜角センサで計測する。残りのZ軸周りの姿勢角 ${}^W\phi_p$ と3次元位置 ${}^W\mathbf{P}_p$ とを次のように求める。親ロボット移動前に測定した子ロボットの世界座標系での位置を ${}^W\mathbf{P}_{c1}$ 、 ${}^W\mathbf{P}_{c2}$ とし、親ロボット移動後の子ロボット位置

Table 2: Specification of laser measurement machine

Distance measurement	Range	1.3-2200[m]
	Precision	$\pm(2[\text{mm}] + 2\text{ppm} \times \text{dist.})$
	Output resolution	0.2[mm]
Angle measurement	Precision	5[sec.]
	Output resolution	1[sec.]
Automatic aim	Range of search	$\pm 5[\text{deg.}]$

の測定結果を ${}^M\mathbf{P}_{c1}$ 、 ${}^M\mathbf{P}_{c2}$ とすると、

$$\begin{aligned} {}^W\phi_p &= \text{atan2}({}^W y_{c1} - {}^W y_{c2}, {}^W x_{c1} - {}^W x_{c2}) \\ &\quad - \text{atan2}({}^M y_{c1} - {}^M y_{c2}, {}^M x_{c1} - {}^M x_{c2}) \\ {}^W\mathbf{P}_p &= {}^W\mathbf{P}_{c1} - \mathbf{R}({}^W\phi_p) {}^M\mathbf{P}_{c1}. \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\phi) &= \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^W\mathbf{P}_{ci} &= \begin{bmatrix} {}^W x_{ci} & {}^W y_{ci} & {}^W z_{ci} \end{bmatrix}^T \\ {}^M\mathbf{P}_{ci} &= \begin{bmatrix} {}^M x_{ci} & {}^M y_{ci} & {}^M z_{ci} \end{bmatrix}^T \quad (i = 1, 2). \end{aligned}$$

## 3 地図作成自動化のための群ロボット位置の決定手法

### 3.1 群ロボットの移動位置決定戦略

環境地図作成のためのロボットの移動戦略には、

- 迅速に測定を終えるために、総移動距離を小さくする
- 正確な環境地図を作るために、自己位置推定精度を保つ

の2つが考えられる。本稿では、(b)の戦略を実現する群ロボット移動位置決定手法を述べる。

CPSで測定されるロボット位置は、ランドマークとなる子ロボットが移動するたびに、誤差が蓄積する。そのため、子ロボットはできるだけ動かないほうがよい。また、CPSによる移動を行うため、親ロボットと子ロボットは常に互いに見通せる位置にいないなければならない。これらの条件を満たす群ロボットの配置を、親ロボットが測定した環境情報と2つの評価関数を用いて、計算する。

群ロボットは、任意の初期位置に配置され、以下の手順で環境測定を行う。

- 親ロボットによる環境測定を行う。得られた環境情報から、群ロボットが移動できる平面を得る。
- 移動平面内で子ロボットの配置を決定する。
- 2台の子ロボットが見通せる移動平面内で親ロボットの配置を決定し、手順(1)を行う。
- 自己位置測定誤差の蓄積を抑制しつつ、広範囲の環境を測定する。そのため、子ロボットが静止した状態で可能な環境測定を終えるまで、手順(3)を繰り返す。
- 手順(2)で子ロボット位置を変更し、親ロボットが測定できる範囲を広げる。以降、環境全体の測定を終えるまで、手順(4)、(2)を繰り返す。

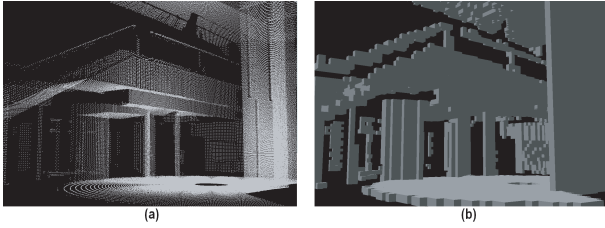


Fig.4: (a)Range image by point data (b)Voxel space of range image

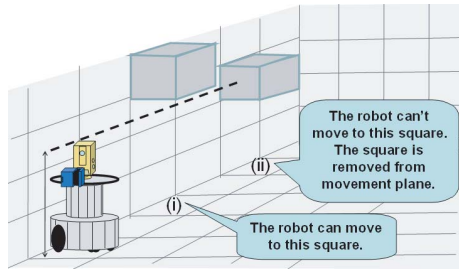


Fig.5: Decision of square where robots move

### 3.2 3次元環境地図から群ロボット移動平面を選択

群ロボットの移動位置の算出は、環境地図作成中に行われる。計算時間を減らすために、点データで得られた環境地図を octree によるボクセルで離散化する (図 4)。群ロボットの移動平面は、親ロボットが既に環境測定を行った範囲内にある床面である。この移動平面を 2次元のメッシュで表された離散的なグリッドとして扱い、群ロボットの移動位置を算出する。ただし、その上方方向にロボット高以上の自由空間が無いメッシュは、移動平面から除かれる (図 5)。

### 3.3 子ロボット位置の決定

親ロボットは、2台の子ロボットを見通せる移動平面内のみを動く。より多くの未測定領域を見通せる位置に子ロボットを配置すれば、子ロボットが静止した状態で、親ロボットが多くの環境を測定できる。そこで移動平面を  $M$ 、移動平面内の位置  $P \in M$  から見通せる可視領域を  $V(P)$ 、未測定領域を  $U$ 、領域  $C$  の境界面もしくは境界線を  $border(C)$  としたとき、

$$F_1(P_{c1}, P_{c2}) = border(M \cap V(P_{c1}) \cap V(P_{c2})) \cap border(U)$$

の長さが最大となる位置  $P_{c1}, P_{c2}$  を探索し、この  $P_{c1}, P_{c2}$  に子ロボットをそれぞれ配置する (図 6)。ただし、2つの子ロボット間距離が小さければ、親ロボット位置の測定誤差が大きくなる。また、親ロボット位置  $P_p$  と子ロボット位置との距離は、親ロボットに搭載された測定機械の測定可能距離内でなくてはならない。そのため、

$$dist(P_{c1}, P_p) > d_1 \quad dist(P_{c2}, P_p) > d_1 \quad dist(P_{c1}, P_{c2}) > d_2$$

の条件を加えて、 $P_{c1}, P_{c2}$  を探索する。ただし、 $dist(a, b)$  は点  $a, b$  間の長さ、 $d_1$  は測定可能距離の最小値にロボット半径を加えた  $1.5[m]$ 、 $d_2$  はその2倍の距離の  $3[m]$  と定める。

決定された子ロボットの移動位置が、親ロボットから見通せない位置である場合がある。このとき、互いを見通せる状態を保ちながら子ロボットが移動するために、親ロボットも移動する。それゆえに、子ロボット位置だけでなく、親ロボットの移動位置も決定しなくてはならない。

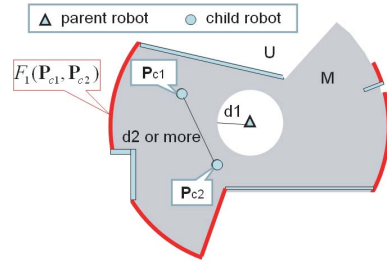


Fig.6: Solution of  $F_1$

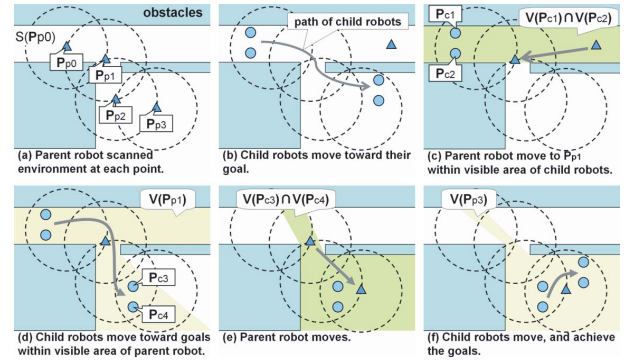


Fig.7: Movement within visible area of robots

環境測定を行ったときの親ロボットの位置群を  $G$  とする。地点  $P_p$  に親ロボットを配置したときに LRF で測定できる範囲を  $S(P_p)$  とする。群ロボットの移動平面  $M$  上の任意の点は必ず  $S(P_{pi}) | P_{pi} \in G$  内に含まれる。子ロボットが任意の2点間を移動するときは複数の領域  $S(P_{p0}), \dots, S(P_{pn}) | P_{p0}, \dots, P_{pn} \in G$  を経由して移動することになる。また、 $S(P_{pi}) | P_{pi} \in G$  は必ず他の2領域  $S(P_{p(i-1)}), S(P_{p(i+1)}) | P_{p(i-1)}, P_{p(i+1)} \in G$  と重複部分を持つ。よって、親ロボットが適当な地点  $P_p | P_p \in G$  へ移動すれば、子ロボットは親ロボットを見通せる状態を保ちながら目的地方向へ移動できることが保障される。そこで、群ロボットは以下の手順で移動する。

- (1) 子ロボットが目的地へ到達するために経由する領域群  $S(P_{p0}), \dots, S(P_{pn}) | P_{p0}, \dots, P_{pn} \in G$  を得る。
- (2) 2台の子ロボットの現在位置  $P_{c1}, P_{c2}$  での可視領域の積  $V(P_{c1}) \cap V(P_{c2})$  を算出する。
- (3)  $V(P_{c1}) \cap V(P_{c2})$  内で子ロボットの目的地に最も近い測定位置  $P_{pi} \in G$  へ、親ロボットが移動する。
- (4) 親ロボットの移動後、子ロボットは  $V(P_{pi})$  内で目的地に最も近い領域  $S(P_{pj})$  へ移動する。
- (5) 手順 (2) ~ (4) を子ロボットが目的地へ到達するまで、繰り返す。

この群ロボットの移動例を図 7 に示す。図 7 の円は、(a) で三角に表された位置で親ロボットが環境測定を行ったときの測定範囲を表す。(b) のように子ロボットが移動するときの群ロボットの移動計画を (c) ~ (f) に示す。

### 3.4 親ロボット位置の決定

親ロボットは2台の子ロボットが見通せる範囲内で、新たに測定できる領域が最大となる位置へ移動する。そのため、

$$F_2(P_p) = V(P_p) \cap S(P_p) \cap U$$

の体積が最大となる位置  $P_p$  を探索し、この地点  $P_p$  へ親ロボットが移動して環境を測定する (図 8)。



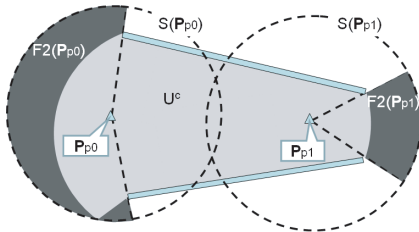


Fig.8: Solution of  $F_2$

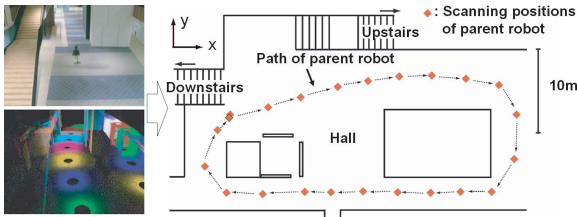


Fig.9: Environmental measurement data point group for simulation

子ロボットが静止したままの状態、親ロボットが新たに測定できる領域が小さくなると、評価関数  $F_2$  の最大値が小さくなる。このとき、子ロボットの配置位置を変更して、親ロボットが測定可能な領域を広げていく。この動作を繰り返して親ロボットが環境測定を行い、3次元地図を作成する。

#### 4 シミュレーション

実際の環境を測定して得られた環境測定データ (図 9) をシミュレーション用のデータとして用いる。このデータは奥行き 60m、幅 15m の屋内環境で、オペレータが群ロボットを一周させて取得したデータである。屋内環境の任意位置に親ロボットを配置したときに得られる環境測定データは、このシミュレーション用のデータから算出できる。

$x$  軸を奥行き方向、 $y$  軸を幅方向、 $z$  軸を高さをとる。親ロボットの初期位置における LRF のレーザー光射出位置を原点として、 $x: -15 \sim +30\text{m}$ 、 $y: -10 \sim +10\text{m}$ 、 $z: -3 \sim +8\text{m}$  の環境を測定する。ただし、ボクセルの一边の長さは一般的なロボット半径である 20cm、親ロボットの測定可能半径距離は 20cm の解像度を満たすため 10m とした。図 10 にシミュレーションでの群ロボットの動作を示す。図 11 は親ロボットの移動経路を示し、図 12 にシミュレーションで得られた環境測定データのうち、床面からの高さ 2.5m までの障害物位置を表示する。

このように、群ロボットが自ら測定する環境情報を用いた経路計画を適用することにより、環境地図作成を自動化できることが示された。また、オペレータがロボットを操縦するよりも少ない測定回数で環境地図を作成できる可能性が示された。

#### 5 むすび

本稿では、3次元地図の作成を行う群ロボットが未知環境の地図作成を自動的に行うための、移動計画手法を提案した。群ロボットは3次元レーザー計測装置を搭載し、高精度な自己位置測定可能な CPS を用いて環境内を移動することにより、3次元環境地図を作成する。随時取得される環境測定データから群ロボットの移動計画を行い、未知環境下での3次元地図を自律ロボットで作成可能であることを実計測データを用いたシミュレーションにより確認した。

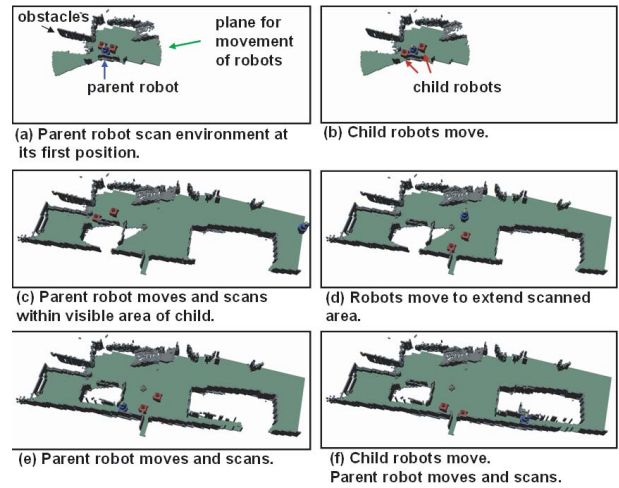


Fig.10: Behavior of robots in simulation

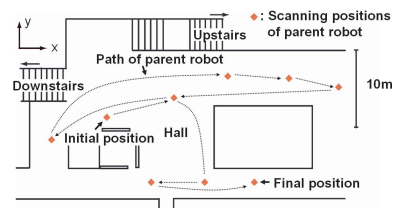


Fig.11: Scanning positions of parent robot

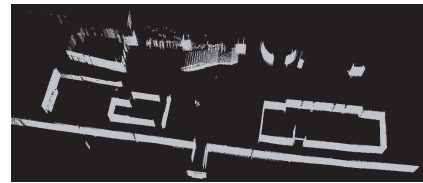


Fig.12: Simulation result

#### 文献

- [1] Andress Nuchter and Hartmunt Surmann, "6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1998-2003. 2004.
- [2] Jan Weingarten and Roland Siegwart, "EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction", Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 2089-2094, 2005.
- [3] P. J Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intel. 14(2) 1992, 239-256.
- [4] Ryo Kurazume, Shigemi Nagata and Shigeo Hirose, "Co-operative Positioning with Multiple Robots", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1250-1257, 1994.
- [5] Ryo Kurazume, Yukihiro Tobata, Yumi Iwashita, Tsutomu Hasegawa, "3D laser measurement system for large scale architectures using multiple mobile robots", The 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM2007), August 2007.