

# 3次元環境地図構築システムにおける 群ロボットの環境計測作業の自動計画手法

○永倉 翔吾\* 倉爪 亮\*\* 岩下 友美\*\* 長谷川 勉\*\*

\* 九州大学大学院システム情報科学府

\*\* 九州大学大学院システム情報科学研究院

E-mail: nagakura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp, {kurazume,yumi,hasegawa}@ait.kyushu-u.ac.jp

## 1. はじめに

レーザやカメラなどのセンサを搭載した移動ロボットが、移動しながら正確な環境地図を取得するためには、計測時のロボットの位置を高い精度で同定する必要がある。しかし、従来手法であるオドメトリ法やSLAM (Simultaneous Localization and Mapping), GPSでは、高い位置同定精度が得られない問題があった [1][2]。これに対して我々は、群ロボットによる協調ポジショニング法 (Cooperative Positioning System, CPS) を用いた3次元環境地図構築システムを開発した [3]。これは、複数のロボットが環境内を協調的に移動しながら、搭載したレーザ等の計測機器を用いて周辺の3次元地図を作成するものである。しかしこれまでに構築した群ロボットシステムでは、各ロボットの移動や環境計測作業を、全て人間が操作して行う必要があった。このため、広範囲の計測ではオペレータの負担が大きくなり、計測作業の自動化が課題となっていた。これまでも、鄭ら [4] によって計測作業の部分的な自動化が行われ、また横矢ら [5] によって、3次元地図の自動作成のための動作計画手法が提案されている。しかし、計測作業の全自動化は実現されておらず、また横矢らの手法では、どのような経路が得られるかは凸多角形の生成手順に依存していた。

そこで本稿では、横矢ら [5] の手法を拡張した群ロボットによる環境計測作業の自動計画手法を提案する。開発システムでは、ロボットの相互観測に基づく位置同定手法を採用しているため、経路計画にあたってはロボット間の見通しの確保や位置同定誤差が最小となるロボットの配置を考慮しなければならない。また、効率的な環境計測作業やロボット同士や壁などの障害物との衝突回避も考慮し、かつ移動経路の解が常に安定して求められる必要がある。提案手法は、これらの諸条件を考慮し、効率的な環境計測作業を自動的に計画するものである。

## 2. システム構成

図1に、構築したレーザ計測ロボット群の構成を示す。このシステムは、1台の親ロボットと2台の子ロボットからなる。

親ロボットは、レーザレンジファインダ (LMS511, SICK), および子ロボットとの相対位置取得のためのトータルステーション (GPT-9005A, TOPCON) を搭載している。トータルステーションは、子ロボット上部のコーナーキューブを計測してロボット間の相対位置

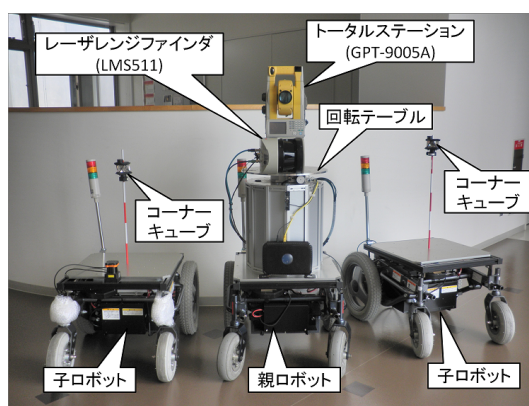


図1 レーザ計測ロボット群

を取得し、これを交互に行うことで親および子ロボットの位置を高精度で同定する。また、親ロボット上部に搭載した回転テーブル (ARS-136-HP, 中央精機) を垂直軸周りに回転させながら、レーザレンジファインダからスライス状にレーザビームを投射し、レーザ反射点の距離データを連続して計測することで、ロボットの周囲の3次元幾何データが得られる。

## 3. 提案手法

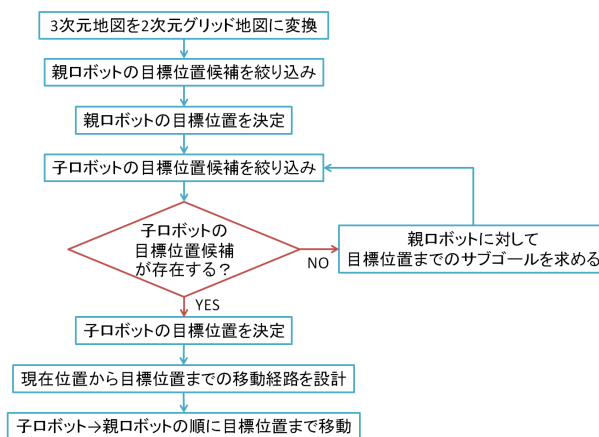
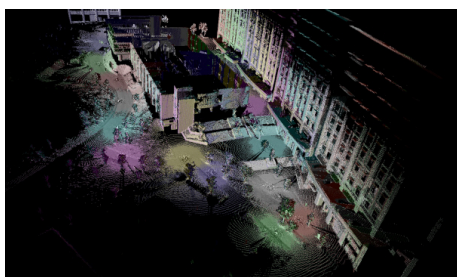


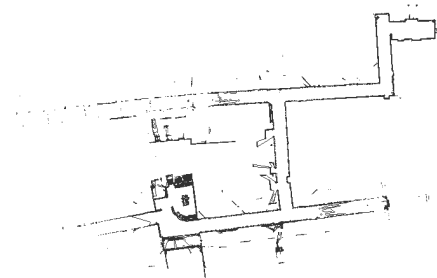
図2 自動計画アルゴリズム

図2に、本稿で提案する自動計画アルゴリズムを示す。本手法では、まずある時点までにロボット群が計測した3次元地図を、障害物情報を含む2次元グリッ

ド地図に変換する(図3)。次に、2次元グリッド地図上において、親ロボット、子ロボットの順でそれぞれの移動目標位置を探索、決定する。ここで、親ロボットの目標位置に対して、例えば壁などでロボット間の見通しが確保できないなど、必要な条件を満たす子ロボットの目標位置候補が存在しない場合がある。この場合、まずロボット間の見通しを示す Visibility Graph[6]を作成し、グラフの頂点を元に親ロボットのサブゴールを求め、再度、子ロボットの目標位置候補を計算する。移動目標位置が確定したら、障害物情報と目標位置までの距離情報を用いて動作計画を行い、実際に経路に沿って移動、計測を行う。



(a) 3次元地図



(b) 2次元グリッド地図

図3 地図データの例

本章では、提案した自動計画アルゴリズムにおいて、特に親子ロボットの移動目標位置の探索手法について述べる。

### 3.1 親ロボットの移動目標位置の探索

親ロボットの計測位置としては、1) これまでに計測できた領域(既知領域)と計測していない領域(未計測領域)の境界に近く、2) 現在位置にできるだけ近く、また3) 新たに計測できる未計測領域が大きいと見込まれる位置が望ましい。しかし、計測対象領域が広い場合、2次元グリッド地図全体を対象として親ロボットの移動目標位置を探索すると、アルゴリズムの実行時間が膨大になる可能性がある。そのため、親ロボットの目標位置の探索前に探索対象空間の絞り込みを行い、少数の目標位置候補を求める。

親ロボットの目標位置候補の絞り込みには、K-means法によるクラスタリングを利用する。以下に具体的な手順を示す。

- (1) 既知領域と未計測領域の境界を見つける(障害物は除外)。

- (2) 境界のグリッドから一定半径以内のグリッドをクラスタリング用のデータとして登録する。
- (3) (2)で登録したグリッドに対して、クラスタリングを実行する。
- (4) 得られたクラスタ中心を親ロボットの目標位置候補とする。

ただし、クラスタ数は境界領域の広さに応じて決定する。次に、得られた目標位置候補に対して、以下の条件を考慮して最終的な目標位置を決定する。

- (1) 既知かつ到達可能な位置
- (2) 障害物に衝突しない位置
- (3) 親ロボットの現在位置からの移動距離が小さい位置
- (4) 新たに計測できる未計測領域の範囲が大きい位置

これらの条件を満たす最適な目標位置を探索するため、2次元地図上の各グリッドに対して次の評価値を与える。

$$G = R \cdot ((P + 1)^{-1} + \alpha \cdot L^{-1} + \beta \cdot S) \quad (1)$$

ここで、 $G$ は親ロボットの目標位置の評価値、 $R$ はグリッドの状態を表す0または1の整数(0=未知または移動不可、1=既知・移動可)、 $P$ は最近傍の障害物からの距離、 $L$ は親ロボットの現在位置から当該グリッドまでの移動距離(単位:m)、 $S$ は当該グリッドから計測可能な未知領域の面積(単位: $m^2$ )、 $\alpha, \beta$ は重みを表している。目標位置候補の中で、この評価値が最大となるグリッドを、親ロボットの移動目標位置として決定する。

### 3.2 子ロボットの移動目標位置の探索

子ロボットの目標位置探索では、まず候補位置が親ロボットの現在・目標位置の双方から見通せるか否かを考える。これは、ロボットの位置同定にCPSを用いており、親子ロボット間に障害物が存在すると位置同定が不可能になるためである。本研究では、親ロボットの現在・目標位置双方から見通せる領域をAND領域と呼ぶ。

親ロボットの現在・目標位置を元にAND領域を算出した後、そのAND領域中のグリッドに対し、以下の条件を満たす子ロボットの目標位置を決定する。

- (1) 既知かつ移動可能な位置
- (2) 障害物に衝突しない位置
- (3) 親ロボットとの距離が一定範囲内
- (4) もう一方の子ロボットとの距離と角度がある程度離れた位置

### 3.3 Visibility Graphによるサブゴール探索

上述した手法では、親ロボットの目標位置に対して、見通しなどの条件を満たす子ロボットの目標位置候補が存在しない場合がある。例えば、親ロボットの目標位置が遠く、曲り角を複数回曲がるなどした場合、現在・目標位置間で見通し可能なAND領域が存在しない。そこで、親ロボットに対して目標位置までのサブゴールを求め、サブゴールを親ロボットの目標位置として子ロボットの目標位置を順次決定することとする。

本研究では、サブゴールの探索にはVisibility Graphを用いる。図4にVisibility Graphの例を示す。Visibility Graphは、ロボットの探索空間内における障害

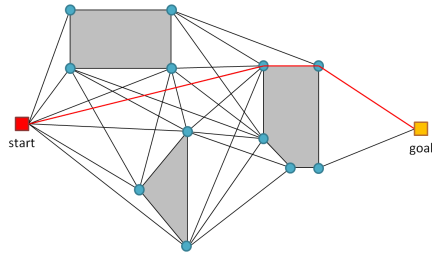


図4 Visibility Graph

物の頂点すべてと、ロボットの現在・目標位置をノードとする可視グラフを作成し、グラフ探索アルゴリズムを実行することで、ロボットの目標位置までの最短経路を求めるものである。なお、グラフの各辺は、その辺で結ばれた頂点間が見通し可能であることを表す。Visibility Graph を用いてサブゴールを決定することで、確実に目標位置までの移動経路を求めることが可能となる。Visibility Graph を用いたサブゴール探索の実行手順を以下に示す。

- (1) 親ロボットの現在・目標位置間における AND 領域の有無を確認する。
- (2) AND 領域が存在しない場合、Visibility Graph を生成する。
- (3) Visibility Graph 上における親ロボットの目標位置までの最短経路を探索する。
- (4) (3) の最短経路上の頂点から親ロボットのサブゴールを探索する。
- (5) (4) を元に、子ロボットのサブゴールを探索する。
- (6) サブゴール間に AND 領域が見つかるまで、(1)～(5) を繰り返す。
- (7) 求めたサブゴールを辿り、各ロボットの目標位置まで移動する。

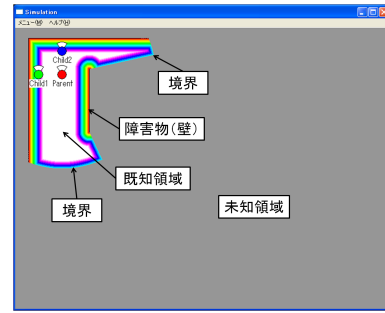
## 4. 実験

### 4.1 シミュレーション実験

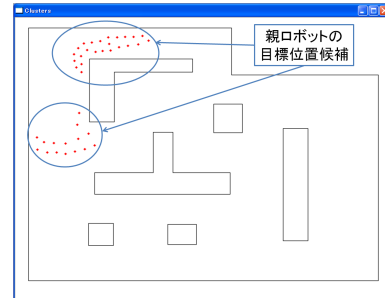
提案した手法の動作確認のため、仮想的な環境で計算機シミュレーションを行った。図5に実行中のシミュレーション画面の例を示す。図5(a)の赤い円が親ロボット、緑の円が子ロボット1、青の円が子ロボット2をそれぞれ表す。また、黒い部分が障害物領域、灰色の部分が未知領域、それ以外の色は移動可能な領域であり、かつポテンシャルの大きさを表している。シミュレーションではあらかじめ適当な2次元地図を準備し、各ロボットの初期位置をオペレータが任意で設定して、動作計画を開始する。

シミュレーションでは、探索空間となる地図は  $800 \times 600$  のグリッドに分割されており、グリッドのサイズは  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  である。さらに、親ロボットの環境測定可能範囲を  $20\text{m}$ 、親ロボットと子ロボット間の距離を  $5\sim 50\text{m}$  の範囲になるようにし、また親ロボットの目標位置の評価値の係数を  $\alpha = 0.01$ 、 $\beta = 0.001$  と設定した。なお、シミュレーションでは地図は事前に準備されているが、ロボットはこの地図の情報を持たないものとする。

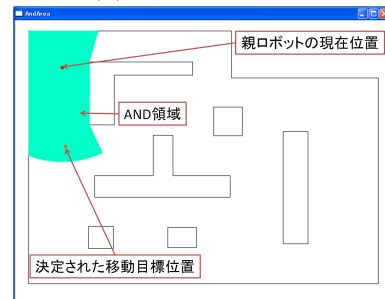
表1にシミュレーションの実行結果を示す。実験で



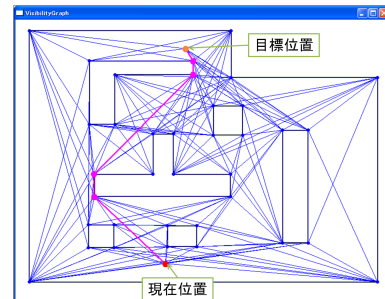
(a) シミュレーション画面



(b) クラスタリング



(c) AND 領域



(d) Visibility Graph

図5 自動計画アルゴリズムによる探索の様子

は、配置の異なる3つの地図について、各ロボットの移動回数、1回の移動ごとの平均移動距離、準備した地図に対するデータの取得率を評価した。この結果から、地図によって移動回数や移動距離は異なるものの、いずれも環境計測をほぼ完全に行えることが確認できた。

また、シミュレーション実行時の各手法の様子を、それぞれ図5(b),(c),(d)に示す。図5(b)では、図5(a)の状態で行ったクラスタリングを行い、各クラスタ中心が赤い点の位置に分布したことを表している。このクラスタリングの結果を元に、評価値から得られた親ロボットの目標位置が図5(c)の橙の点である。図5(c)では、こ

表 1 シミュレーション結果

地図 データ	移動回数			平均移動 距離 [m]	データの 取得率 [%]
	親	子 1	子 2		
地図 1	10	5	6	27.24	99.98
地図 2	15	9	10	44.79	99.99
地図 3	13	5	5	42.40	99.97



(a) (b)

図 6 実験環境

の目標位置と、赤い点で表された親ロボットの現在位置との間で得られた AND 領域を緑色で表している。また、図 5(d) は、移動、計測を何度か繰り返した後に、現在位置から遠い目標位置が決定された場合を示している。図中の親ロボットの現在位置（赤）と目標位置（橙）の間には、障害物のために AND 領域が存在しない。そこで Visibility Graph（青）により、最短経路（紫）と途中のサブゴールを探索し、それを經由することで現在位置から目標位置まで親子ロボットが移動できる。以上の結果から、提案手法により自動で動作計画が立案できることが確認できた。

#### 4.2 実環境における動作実験

提案したアルゴリズムを実機（図 1）に搭載し、屋外環境での確認実験を行った。図 6 に実験を行った環境を示す。今回は、図 6(a) の奥側に見える建物付近を初期位置として実験を行った。

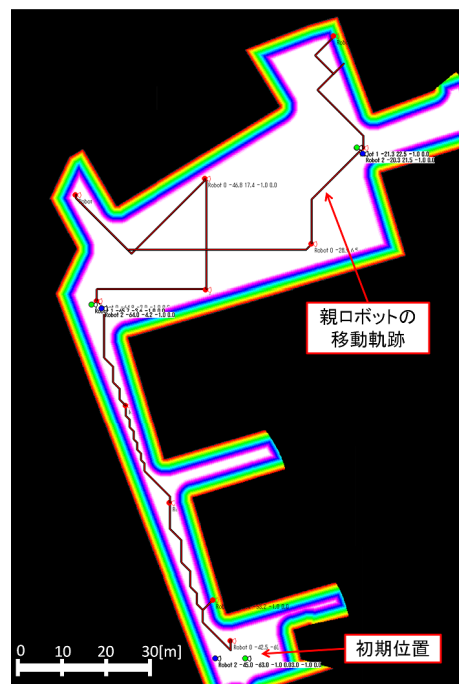
図 7(a) に、提案手法によって計画された親子ロボットの経路を示す。親ロボット（赤い円）は、初期位置から図 6(a) の手前側に直進していき、手前の建物のところで曲がって図 6(b) 周辺を計測した。子ロボット（緑・青の円）は、親ロボットが曲がる時と図 6(b) の奥の方に進んだ時に位置を変更した。この動作計画の結果、最終的に図 7(b) の 3 次元地図を構築することに成功した。

### 5. まとめ

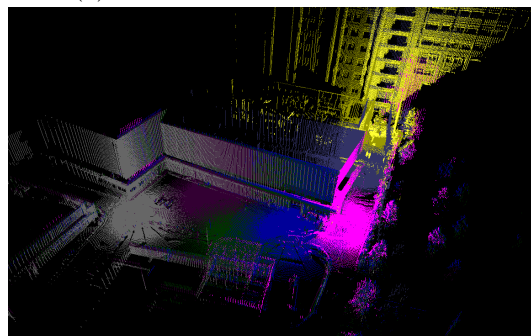
本稿では、我々がこれまでに開発してきた環境地図構築ロボットに対し、ロボット間の見通し確保などの様々な条件を考慮し、効率の良い計測作業を実現するための、群ロボットによる環境計測作業の自動計画手法を提案した。またシミュレーションおよび屋外環境での実機実験により、提案手法の動作を確認した。今後は多様な環境で実験を行い、提案手法の有効性を確認する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 23360115) の支援を受けた。



(a) 計画された親子ロボットの経路



(b) 計測された 3 次元地図

図 7 自動計測実験の結果

#### 参考文献

- [1] S.Tugawa: "Traveling Path Measurement for Navigation of Robot Rover by Precise Counting of Wheel Revolution", 10th IMEKO World Congress, vol.5, pp.41-48, 1985.
- [2] David M.Cole and Pual M.Newman: "Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environment", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1556-1563, 2006.
- [3] 倉爪 亮, 戸畑 享大, 村上 剛司, 長谷川 勉: "CPS-SLAM の研究 大規模建造物の高精度 3 次元幾何形状レーザ計測システム", 日本ロボット学会誌, vol.25, no.8, pp.1234-1242, 2007.
- [4] 鄭 龍振, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉: "自動化された協調ポジショニングシステムによる 3 次元環境地図の自動生成", 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 113-4, 2010.
- [5] 横矢 剛, 長谷川 勉, 倉爪 亮: "群ロボットによる未知環境 3 次元地図の自動作成のための動作計画手法", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J93-D, No.6, pp.1024-1035, 2010.
- [6] Chatila.R: "Path planning and environment learning in a mobile robot system", Proc. European Conf Artificial Intelligence, Torsey, France, 1982.