

群ロボットによる 3 次元環境地図自動構築システムの開発

- 位置同定誤差の蓄積を低減する観測戦略 -

Development of automatic 3D modeling system by cooperative multiple robots

永倉 翔吾 (九大) ○ 正 倉爪 亮 (九大)
岩下 友美 (九大) 正 長谷川 勉 (九大)

Shogo NAGAKURA, Kyushu University, nagakura@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Ryo KURAZUME, Kyushu University
Yumi IWASHITA, Kyushu University
Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

This paper presents an automatic 3D modeling system for a large-scale environment by cooperative multiple robots. We have developed the 3D modeling system by multiple robots equipped with laser range finders. In this system, the robots move and scan the environment while identifying their positions by Cooperative Positioning System (CPS) with high accuracy. However, this system needs an operator to plan an observation strategy and control the robot motion. In order to reduce the burden on the operator, this paper gives the method to plan the robots' paths for the measurements automatically.

Key Words: Laser scanning, Navigation, Mapping, Motion planning, Localization

1 はじめに

レーザやカメラなどの環境計測用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には、計測時のロボットの位置を高精度で同定する必要がある。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 [1]。これは、複数のロボットが環境内を協調的に位置同定を行いながら移動し、搭載した距離センサを用いて周辺の 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 [2] 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 [3] によって、凸多角形を用いた 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、横矢らの手法 [3] とは異なるアプローチに基づく、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。対象となるシステムでは、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、経路計画に当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。著者らはすでにこれらの諸条件を考慮した環境計測手法を開発している [4] が、本稿ではさらに、観測に伴う誤差の蓄積を低減する観測戦略を提案する。

2 システム構成

Fig.1 に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

Fig.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 (Fig.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、ロボット間の見通しを示す Visibility Graph [5] を作成し、そ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。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。

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

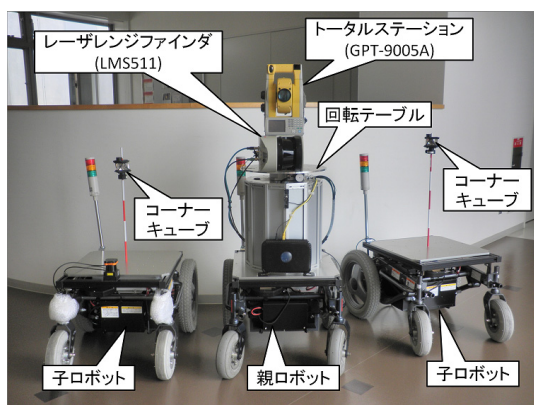


Fig.1 レーザ計測ロボット群

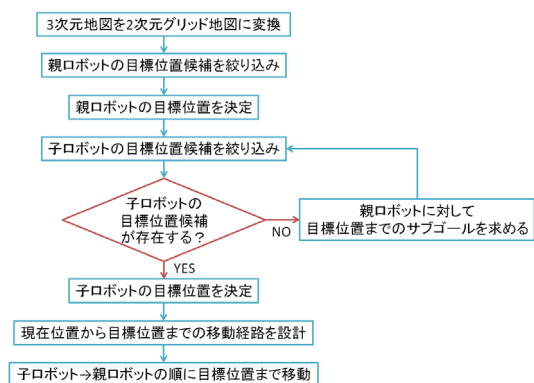


Fig.2 自動計画アルゴリズム

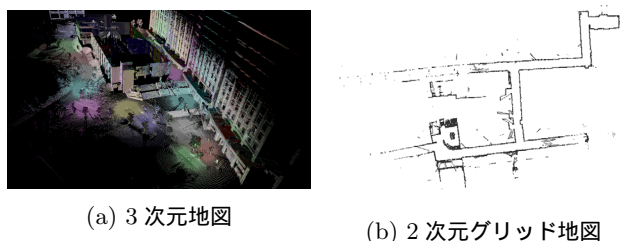


Fig.3 実験環境

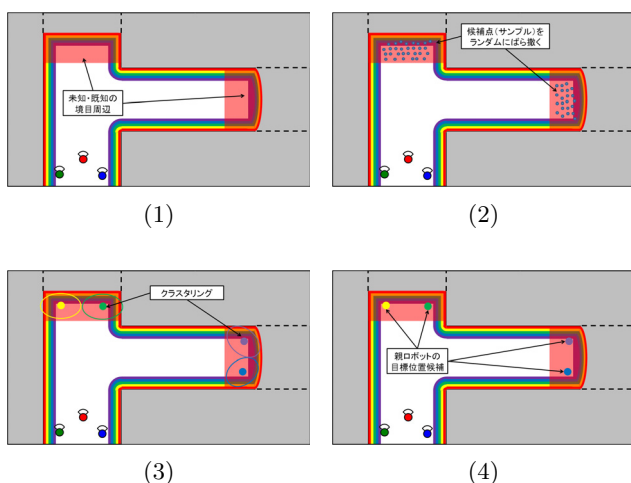


Fig.4 親ロボットの目標位置候補絞り込みの流れ

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。以下にその手順を示す。また、その流れを Fig.4 に示す。

- (1) 既知領域と未計測領域の境界を見つける。
- (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) のグリッドに対して、クラスタリングを実行する。
- (4) (3) の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。

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

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)、 α 、 β 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、ロボットの位置同様に 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。本稿では、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。

AND 領域を算出した後、各子ロボットの最終目標位置を決める際に、[4] では目標位置として必要な条件を定め、その中で最初に求められた位置を目標位置とする、という手法を用いていた。具体的には以下の条件である。

- (1) 既知かつ移動可能な位置。
- (2) (1) の中で、親ロボットの目標位置との距離が一定範囲内になる位置。
- (3) (2) の中で、もう一方の子ロボットとの角度が 90° に近い位置。
- (4) (3) の中で、ポテンシャルが最小となる位置。

ここで、(3) におけるもう一方の子ロボットとの角度とは、親ロボットを頂点としたときに、子ロボット同士で作ら

れる角度のことである．この角度は， 90° に近いほど CPS 時に得られる位置同定の誤差の蓄積が小さくなることが知られている [6] しかし，この手法では，最終的に得られる目標位置が複数存在する可能性がある．また子ロボットが両方とも移動する場合には，1 台目，2 台目と順番に決めていくため，1 台目の目標位置を決める時には，距離と角度の条件は考慮されないという問題があった．

これらの問題を解決するためには，目標位置候補が複数存在する場合に，優先すべき条件を決め，移動目標位置を 1 点に定めること，また複数台の子ロボットの目標位置を同時に評価できるような指標を設定する必要がある．そこで本稿では，位置同定の蓄積誤差を減らすために，誤差に関わる条件を用いた評価値を準備し，それが最小となる複数台の子ロボットの位置を同時に探索することで，位置同定の蓄積誤差を低減する手法を提案する．具体的には，以下の評価値を設定する．

$$G_c = (P+1)^{-1} + \alpha_c \cdot (|\theta - 90| + 1)^{-1} + \beta_c \cdot (|D - D_{\text{target}}| + 1)^{-1}$$

ここで， G_c は子ロボットの目標位置の評価値， P は最近傍の障害物からの距離（ポテンシャル）， θ は子ロボット間の角度（単位： $^\circ$ ）， D は親ロボットの目標位置からの直線距離（単位：m）， D_{target} は任意の距離定数，係数 α_c ， β_c は重みを表している．なお，子ロボットの現在位置が AND 領域に含まれる場合は次の目標位置は求めず，移動しない．

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．

提案手法では，サブゴールの探索には Visibility Graph を用いる．Fig.5 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．

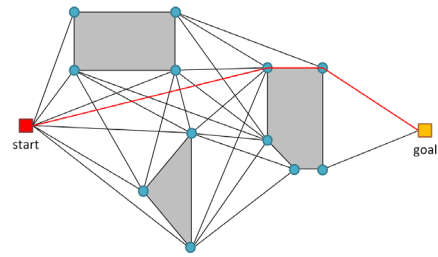


Fig.5 Visibility Graph

- (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 誤差評価シミュレーション

3.2 節で提案した CPS 時の位置同定誤差の蓄積を低減する評価値について，計算機シミュレーションにより妥当性を評価した．本シミュレーションでは，あらかじめ適当な 3 種類の 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，移動目標位置の探索を開始する．

シミュレーションでは，探索空間となる地図は 800×600 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 20m ，親ロボットと子ロボット間の距離を $3 \sim 50\text{m}$ 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．

本シミュレーションでは，各地図について以下の 4 通りの条件で検証を行った．

- (1) 従来手法 [4]
- (2) 提案手法： $\alpha_c = 1$ ， $\beta_c = 1$ （角度・距離均等）
- (3) 提案手法： $\alpha_c = 100$ ， $\beta_c = 1$ （角度重視）
- (4) 提案手法： $\alpha_c = 1$ ， $\beta_c = 100$ （距離重視）

特に，(3) では子ロボット間の角度が 90° に近い位置が，(4) では親・子ロボット間の距離が D_{target} に近い位置が，それぞれ優先して目標位置に選ばれるようになっている．なお，本シミュレーションでは $D_{\text{target}} = 3[\text{m}]$ と設定した．また，各ロボットの条件ごとの移動経路と，親ロボットの位置同定時に得られる測定誤差を求めた．このうち，測定誤差は CPS の誤差伝播の基本方程式 [6] により取得した．

ある地図における条件ごとの位置同定誤差の蓄積の様子を，Fig.6 に示す．これより，従来手法と距離を重視した場合の誤差が大きく増加しているのに対し，提案手法で角度・距離を均等に評価した場合と角度を重視した場合は増加量が少なかった．他の 2 つの地図においても，同様の結果が確認された．このことから，誤差の蓄積を抑える上で，角度の条件が最も重要であることが確認できる．

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 (Fig.1) に搭載し，屋外環境での確認実験を行った．Fig.7 に実験を行った環境を示す．今回は，Fig.7(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．

Fig.8(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 Fig.7(a)

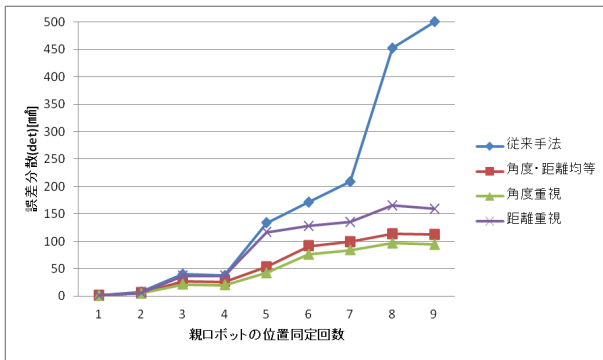


Fig.6 位置同定誤差の比較



(a)

(b)

Fig.7 実験環境

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 Fig.7(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 Fig.7(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 Fig.8(b) の 3次元地図を構築することに成功した。

5 まとめ

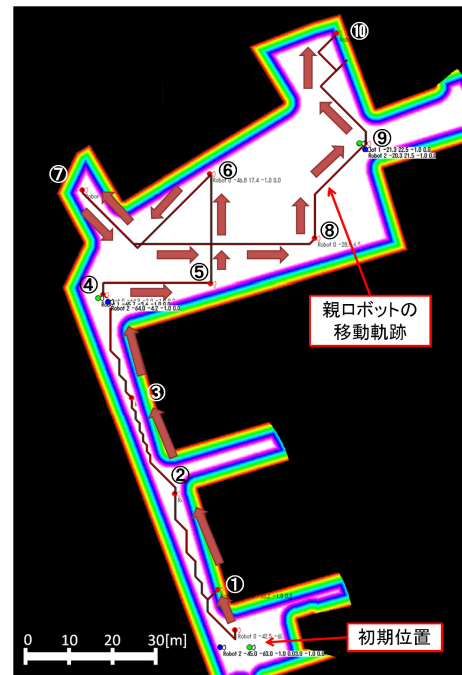
本稿では、我々がこれまでに開発してきた環境地図構築ロボットに対し、ロボット間の見通し確保などの様々な条件を考慮し、かつ位置同定誤差の蓄積を低減する、群ロボットによる環境計測作業の自動計画手法を提案した。またシミュレーションおよび屋外環境での実機実験により、提案手法の動作を確認した。今後は多様な環境で実験を行い、提案手法の有効性を確認する予定である。

謝辞

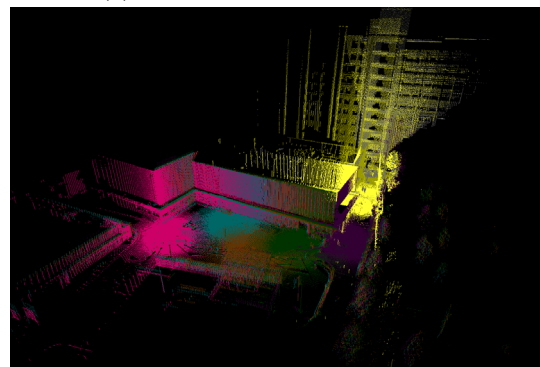
本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 23360115)の支援を受けた。

文献

- [1] 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.
- [2] 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, 1I3-4, 2010.
- [3] 横矢 剛, 長谷川 勉, 倉爪 亮: “群ロボットによる未知環境三次



(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

Fig.8 自動計測実験の結果

- 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.
- [4] 永倉 翔吾, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉: “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”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, 1B2-3, 2012.
- [5] Chatila.R: “Path planning and environment learning in a mobile robot system”, Proc. European Conf Artificial Intelligence, Torsey, France, 1982.
- [6] 倉爪 亮, 広瀬 茂男, 岩崎 倫三, 長田 茂美, 指田 直毅, “協調ポジショニングシステムの研究 -CPS-II 型システムの最適化移動形態-”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.5, pp.773-780, 1997.