

## 群ロボットによる大規模環境のレーザ観測の自動計画

大島 漱一郎<sup>\*1</sup>, 永倉 翔吾<sup>\*1</sup>, 岩下 友美<sup>\*2</sup>, 倉爪 亮<sup>\*2</sup>

### Automatic planning of laser measurements for a large-scale environment using multiple robot system

○Souichiro Oshima<sup>\*1</sup>, Syogo Nagakura<sup>\*1</sup>, Yumi Iwashita<sup>\*2</sup>, Ryo Kurazume<sup>\*2</sup>

3次元レーザスキャナにより多地点から大規模環境の3次元レーザ計測を行う際、適切なレーザスキャナの設置位置を逐次選択することで、観測作業の効率化を図ることができる。これまでに著者らは、レーザスキャナを搭載した親子ロボットからなる大規模環境のレーザ計測のための群ロボットシステム(CPS-SLAM)を開発し、トンネル内部形状計測などの実証実験を行ってきた。本稿では、開発したCPS-SLAMに対し、ロボット間の見通しや位置同定誤差の抑制、効率的な移動計画などの条件を同時に考慮した、大規模環境に対するレーザ観測計画の自動化手法を提案する。

キーワード：群ロボット，レーザスキャナ，3次元計測，自動計画

Laser scanning for architectural structures has been widely used in recent years. By planning a proper scanning strategy depending on a structure, it is possible to perform laser scanning efficiently and accurately even for a large-scale environment. We have proposed a multiple robot system named CPS-SLAM as a robotic laser scanning system which consists of parent robots with a laser scanner and child robots with corner cubes. This paper proposes an automatic planning technique for an efficient laser measurement by taking several criteria, such as visibility between robots, error accumulation, and efficient traveling, into consideration.

*Keywords:* multiple robots, laser scanner, 3D measurement, automatic planning.

---

\*1 九州大学大学院システム情報科学府, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

\*2 九州大学大学院システム情報科学府, Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

大規模な環境をレーザ計測する際、一地点から観測される領域は限られることから、複数の地点に移動して繰り返しレーザ計測を行う手法が通常用いられる。この際、次にどの地点に移動すべきか、すなわち大規模環境におけるレーザ観測計画は、観測作業の効率化には重要な要素であるが、これまでは作業者の経験により決定されているのが実情である。

これに対し、もしこれまでの計測履歴に基づき設定された評価指標により、次回以降の最適な観測位置が自動的に立案されるならば、作業員の熟練度に寄らず観測作業の効率化が実現できる。

これまで、著者らはロボットに搭載したレーザスキャナにより、大規模環境におけるレーザ計測と位置同定を繰り返し実現する、大規模環境のレーザ計測のための群ロボットシステム (CPS-SLAM) を提案し、太宰府天満宮の3次元計測やトンネル工事現場での出来形計測などの実証実験により、その有効性を確認してきた [1],[2],[3]。

本システムは、環境計測用レーザスキャナと測量用トータルステーションを搭載した1台の親ロボットと、全方位コーナキューブを搭載した2台の子ロボットからなる。親ロボットは2台の静止した子ロボットまでの距離と方位を計測することで、親ロボット自身の位置を同定する。また子ロボットも同様に、静止した親ロボットまでに距離と方位から、自身の位置を同定する。さらに親ロボットに搭載した環境計測用レーザスキャナにより、同定された位置から計測を繰り返すことで、複数地点で計測されたレーザ計測データを世界座標系に変換、統合する。

このシステムにおいても、これまで観測計画の立案はオペレータや作業者の経験に基づいて行われており、観測計画の自動立案は重要な検討課題である。そこで本稿では、この大規模環境におけるレーザ計測のための群ロボットシステム (CPS-SLAM) に対して、ロボット間の見通しや位置同定誤差の抑制、効率的な移動計画などの諸条件を満たした観測計画を自動的に立案する、大規模環境におけるレーザ観測計画の自動化手法を提案する。

カメラによる監視など、センサの最適配置計画や最適観測計画の問題は、計算幾何学やコンピュータビジョンの分野で古くから研究されてきた [4][5][6]。一般に、この問題は、環境や物体の幾何情報が既知である場合と未知である場合に大別できる。幾何形状が既知である場合の最適観測計画は、死角のない広域監視を実現するセンサ配置や、効率的な外観検査などに用いられる。特に屋内環境でのセンサ (監視要員) の最適配置問題は「Art gallery problem」と呼ばれ、計算機科学の分野で研究されてきた [7][8]。Allen ら [9] は、3次元の都市空間で死角の無い観測を行うためのインタラクティブなセンサ配置手法を提案した。[10] はより広大な地形図を対象に、センサの最適配置と観測の秘匿性を両立する手法を提案している。一方、Chen[11],Scotto[12] らは、3次元距離センサを用いて既知形状の対象物上の特徴を、効率的かつ正確に計測するための最適観測計画手法を提案している。またPrieto ら [13] は、CAD データが与えられた対象を、距離センサを用いて精度よく検査するための最適観測計画について議論している。

一方、幾何情報が未知な場合には、未知物体の形状計測のための観測計画 [14][15][16][17][18] や、センサを積極的に移動させて物体認識を行う能動的物体認識 [19][20] などが提案されている。Okamoto ら [21] は、観測を連続的に繰り返して観測結果を統合し、確率的にモデルを表現して次時刻の最適観測位置を決定する基本的枠組みを提案した。Li ら [18] はモデルの不確実性を示す情報エントロピーを用い、最も得られる情報量が多いと予想される点を Next Best View (NBV) として選択した。

本論文で取り扱う内容は、後者の幾何情報が未知な場合に属する。しかし提案システムでは、観測位置を変更する際に協調ポジショニング法を利用するため、ロボット間が常に見通せなくてはならないという強い拘束がある。このため、観測位置を自由に選択できる従来手法とは全く異なるアプローチが必要となる。

### 3 大規模環境のレーザ計測のための群ロボットシステム (CPS-SLAM)

大規模環境におけるレーザ計測のための群ロボットシステム (CPS-SLAM) では、各ロボットの自己位置

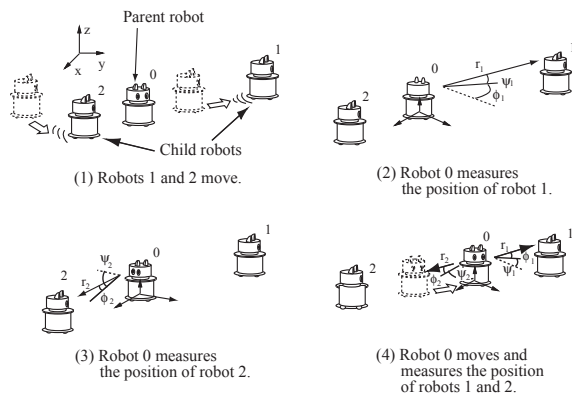


Fig.1 Cooperative Positioning System, CPS

は協調ポジショニング法 (Cooperative Positioning System, CPS) により同定される。CPS の動作例を Fig.1 に示す。この例は、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットからなる群ロボットシステムにおいて、親ロボットに搭載したレーザ距離測定器 (トータルステーション) により、子ロボットおよび親ロボット自身の位置を計測するものである。まずあらかじめ、初期位置を計測した状態で親ロボットを静止させ、

- (1) 子ロボット 1, 2 を移動させた後、停止させる。
- (2) 親ロボットに搭載した測定器により、子ロボット 1 までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット 1 の位置を同定する。
- (3) (2) と同様に、子ロボット 2 までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット 2 の位置を同定する。
- (4) 親ロボットを移動させた後、停止させ、親ロボットに搭載した測定器により子ロボット 1, 2 までの相対距離、方位角、仰角を計測して、親ロボットの位置を三辺測量法により同定する。

という動作を繰り返す。

CPS-SLAM では、親ロボットにトータルステーションに加えてレーザスキャナを搭載し、上記 CPS により位置が同定された複数地点から環境構造を繰り返しレーザ計測する。得られた局所的な 3 次元モデルは、CPS により計測位置が同定されていることから、簡単な座標変換により世界座標系へ変換でき、大規模な環境モデルも ICP (Iterative Closest Point) 法などの位置合わせのための後処理を用いることなく、容易に得られる。

Fig.2 に、これまでに構築したレーザ計測ロボット群 (CPS-VII) を示す。このシステムは、トータルステーションとレーザスキャナを搭載した 1 台の親ロボットと、全方向コーナキューブを搭載した 2 台の子ロボットからなる。地上移動型ロボットの台車部分は電動車いすを改造したものである。また、本システムにおける移動ロボットを三脚に変更し、荒地での 3 次元計測を可能にした簡易型 3 次元計測システムも開発している (Fig.3)。Fig.4 に、Fig.2 のシステムを用いて計測した大規模建造物の 3 次元モデルを示す。

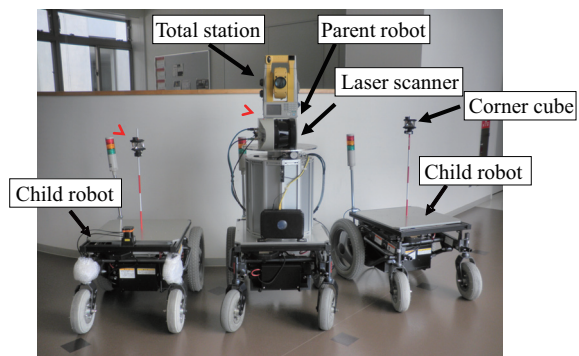


Fig.2 CPS-SLAM machine model, CPS-VII

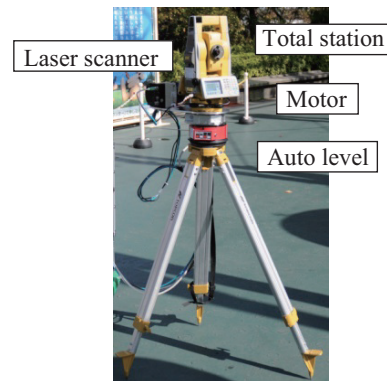


Fig.3 Handy measurement system

さらに Fig.5 に、新たに構築したレーザ計測ロボット群 (CPS-VIII) の構成を示す。このシステムは、1 台の地上移動型親ロボットと 2 台の地上移動型、3 台の飛行型の計 5 台の子ロボットからなる。地上移動型ロボットは CPS-VII と同一であり、飛行型ロボットはクアッドロータを利用している。また、親ロボットには、トータルステーションに代わり 3 次元レーザスキャナ (Focus 3D, Faro) を、子ロボットにはコーナキューブに代わり、位置同定のための基準球を搭載している。Fig.1 に示すように、CPS-SLAM の実現に

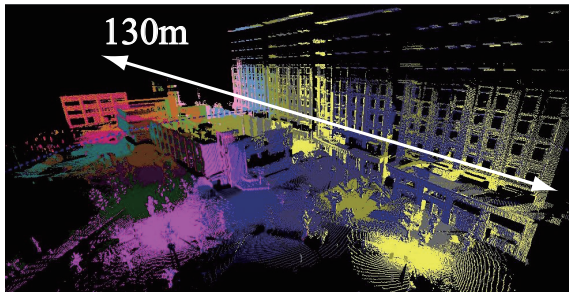


Fig.4 3D model of large building

は1台の親ロボットと最低2台の子ロボットが必要であるが、子ロボットを増やすことで、位置同定精度、および頑強性の向上が期待できる [22]。本論文では、CPS-VII,あるいはCPS-VIIIのうち、地上移動型の3台の親子ロボットからなるシステムを対象とする。

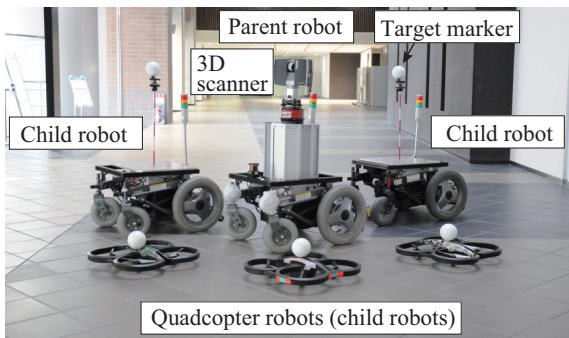


Fig.5 New CPS-SLAM machine model, CPS-VIII

#### 4 自動計画手法

計測作業の自動化には、無駄のない効率的なレーザ計測のみならず、様々な状況において解が必ず得られる信頼性、誤差の蓄積の低減や移動距離の最小化、ロボット同士や壁などの障害物との衝突回避など、様々な要素を考慮する必要がある。

そこで提案手法では、それまでに数回、レーザ計測が繰り返され、環境構造の一部が既に得られている状況を想定し、既知の環境構造から今回の計測で最も多く新たな観測データが得られると予想される地点を複数選択し、そこに到達するまでの移動距離を基準に最適な地点を絞り込むアプローチを取る。

また、提案した群ロボットシステム (CPS-SLAM) では、親子ロボットが交互に観測を繰り返すことから、位置同定時には常に両者が見通せる必要がある。しかし複雑な環境などでは、移動開始位置と絞り込ま

れた目標位置との間で、この条件が満たされない場合も多い。

そこで提案手法では、移動開始位置と目標位置間で見通し条件が満たされない場合には、Visibility Graph[23][24]を用いて開始 - 目標間の最短経路上にサブゴールを次々に設定し、見通し条件を満足する経路に細かく分解することで、ロボットの移動を可能にしている。本論文で提案する手法の概要を Fig.6 に示す。

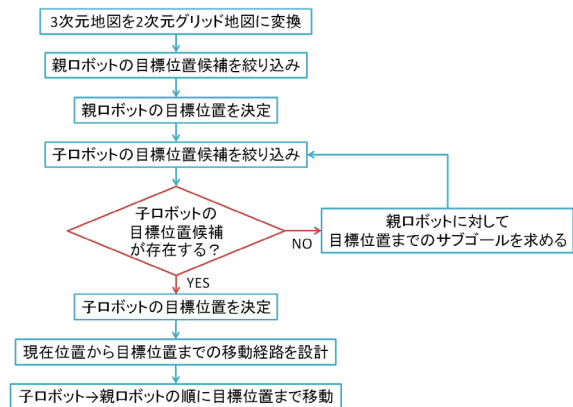


Fig.6 Automatic planning algorithm

以下、

1. 親ロボットの計測目標位置の自動計画
2. 子ロボットの移動目標位置の自動計画

のそれぞれに対し、上記手法の詳細を述べる。なお、提案手法ではまずそれまでに計測された3次元環境データを2次元グリッド地図に変換し、2次元地図上で観測計画を立案する。

##### 4.1 親ロボットの計測目標位置の自動計画 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) の境界に近い
2. 衝突を避けるため、障害物からある程度離れている
3. 現在位置からの移動距離が短い
4. 新たに計測できる未計測領域が大きい

などの条件を同時に満たす位置が望ましい。しかし、計測対象領域が広い場合、領域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、提案

手法では、親ロボットの目標位置の探索前に探索領域の絞り込みを行い、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。Fig.7 に問題設定を、Fig.8 に絞り込みの手順を示す。具体的には以下の手順に従う。

- (1) 既知領域と未計測領域の境界グリッドを見つける。
- (2) 境界グリッドから一定領域内に一定密度でランダムに候補点を設定する。
- (3) (2) の候補点に対して、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。

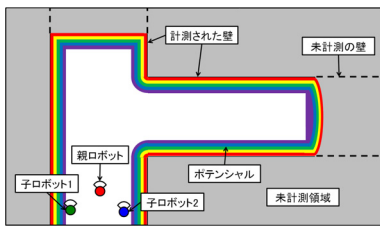


Fig.7 Problem definition

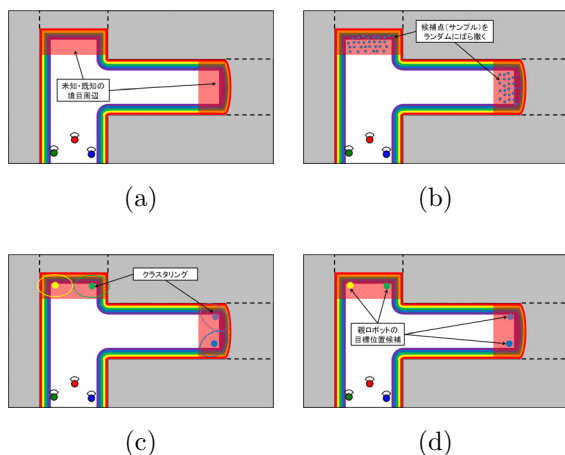


Fig.8 Candidate positions for parent robot by K-means clustering

次に、得られた目標位置候補から、以下の条件を考慮して最終的な親ロボットの計測目標位置を決定する。

- (1) 既知領域内かつ現在位置から到達可能
- (2) 障害物に衝突しない

- (3) 親ロボットの現在位置からの移動距離が小さい
- (4) 新たに計測できる未計測領域の範囲が大きい

これらの条件を満たす最適な目標位置を探索するため、全ての目標位置候補を含むグリッドに対して次の評価値を計算する。

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

ここで、 $G$  は各目標位置候補の評価値、 $R$  はグリッドの状態を表す 0 または 1 の整数 (0=未計測または移動不可, 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計測領域の面積 (単位:  $m^2$ )、 $\alpha, \beta$  は重みを表している。また  $\delta$  は 0 でない十分小さな実数である。目標位置候補の中で、この評価値が最大となるものを親ロボットの移動目標位置として決定する。

#### 4.2 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。

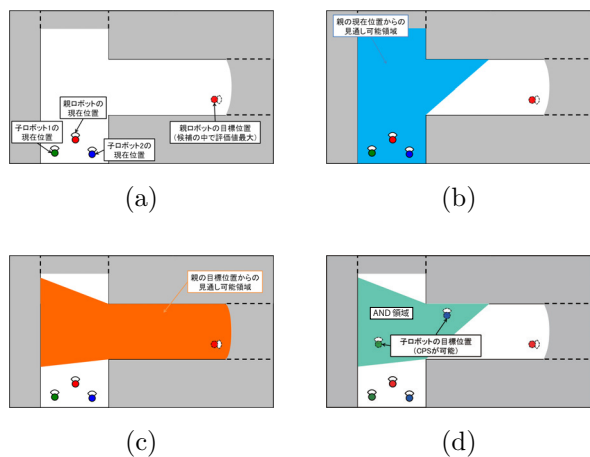


Fig.9 AND region and candidate positions for child robots

AND 領域を算出した後、全ての子ロボットの目標位置を AND 領域内で決定する。この際、考慮すべき条件としては、

- (1) AND 領域内の既知かつ移動可能な位置

- (2) 障害物に衝突しない
- (3) 親ロボットとの距離が一定範囲内
- (4) 親ロボットから見た、2台の子ロボットの方位差が  $90^\circ$  に近い位置

などが考えられる。このうち(4)の条件は、子ロボット間の方位差が  $90^\circ$  に近いほど、CPS での位置同定誤差の蓄積が小さくなるためである [26]。

上記の条件を同時に満足する子ロボットの目標位置を選択するため、本手法では以下の評価式を設定し、それが最小となる2台の子ロボットの位置を同時に探索する。

$$G_c = (P + \delta)^{-1} + \alpha_c \cdot (|\theta - 90| + \delta)^{-1} + \beta \cdot (|D - D_t| + \delta)^{-1} \quad (2)$$

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)、 $\theta$  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)、 $D_t$  は任意の距離定数、 $\delta$  は 0 でない十分小さな実数、係数  $\alpha_c, \beta_c$  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、移動しないこととする。

**4.3 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 領域が存在せず、子ロボットの目標位置が得られない。そこで、親ロボットの移動経路上に目標位置までのサブゴールを設定し、各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 [23][24] を用いる。Fig.10 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。CPS では、親子ロボット間で双方が見通せる必要があるが、Visibility Graph ではロボッ

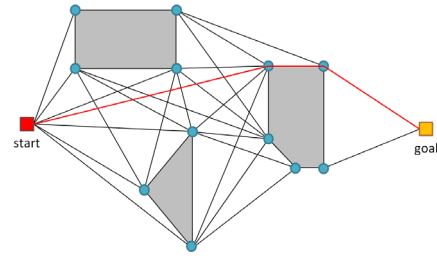


Fig.10 Visibility Graph

トが各辺上を移動する限り、確実に他のロボットを見通すことができる。すなわち、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 上で親ロボットの目標位置までの最短経路を探索する。
- (4) 最短経路上の頂点に対し、目標位置から順に親ロボットのサブゴールを設定する。
- (5) 設定されたサブゴールに対し、親ロボットの初期位置との AND 領域を求める。
- (6) AND 領域が存在する場合には、子ロボットの移動目標位置を探索する。存在しない場合にはサブゴールを一つ前に進める。
- (7) サブゴール間に AND 領域が見つかるまで、(5) ~ (6) を繰り返す。
- (8) 到達したサブゴールを初期位置として (4) ~ (7) を繰り返し、目標位置まで移動する。

**4.4 Voronoi 境界に沿った安全なロボットの移動** Visibility Graph により決定されたサブゴールを親ロボットが順々に辿ることで、現在位置から目標位置まで確実に CPS 動作を繰り返しながら移動することができる。しかし実際には、Visibility Graph により決定された経路は、障害物の頂点を結ぶものであり、実際には移動時にサブゴール近傍で障害物に衝突する可能性が高い。そこで、予め計測された環境に対して Voronoi 図 [27] を作成し、その Voronoi 境界上をロボットが移動することで、障害物から離れた位置を安全に走行する。ただし、移動する Voronoi 境界は、始

点、終点、および Visibility Graph により決定されたサブゴールに最も近い Voronoi 境界上の点を節とし、それらを結んだ線とする。

## 5 実験

5.1 誤差評価シミュレーション 4.2 節で提案した CPS 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 (MAP-A, B, C) 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した。

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  $3 \sim 50\text{m}$  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  $\alpha = 0.01, \beta = 0.001$ 、子ロボットの目標位置の評価式において  $D_t = 3[\text{m}]$  に設定した。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は一切持たず、それまでに計測された情報のみを用いて観測計画を立案する。

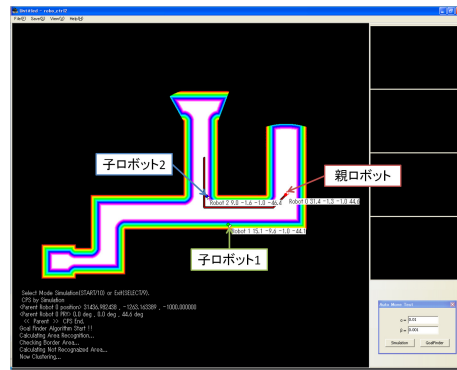
本シミュレーションでは、子ロボットの目標位置の評価式において、以下の 4 通りの条件で検証を行った。

1. 永倉らの手法 (従来手法) [25]
2.  $\alpha_c = 1, \beta_c = 1$  (角度・距離均等)
3.  $\alpha_c = 100, \beta_c = 1$  (角度重視)
4.  $\alpha_c = 1, \beta_c = 100$  (距離重視)

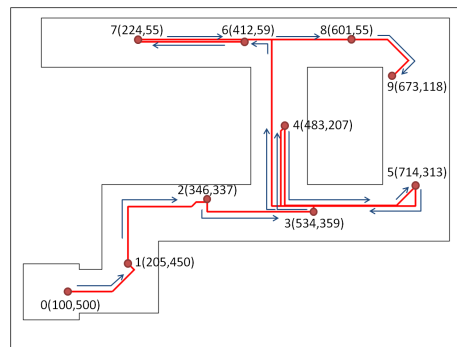
1 は、式 (2) を用いずに、子ロボットをそれぞれ CPS が適用可能な位置に適当に配置する手法である。また 3 では子ロボット間の角度が  $90^\circ$  に近い位置が、4 では親・子ロボット間の距離が  $D_t = 3[\text{m}]$  に近い位置が、それぞれ優先して目標位置に選ばれるようになっている。

また、各ロボットの移動経路と親ロボットの位置同定誤差の関係は、CPS の誤差伝播の基本方程式 [26] により計算した。MAP-A に対する各ロボットの移動軌跡を Fig.11 に示す。

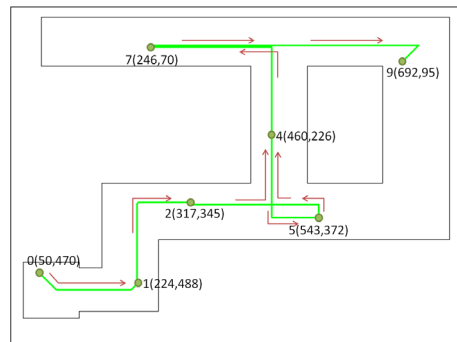
また MAP-A における条件ごとの位置同定誤差の蓄積の様子を、Fig.12 に示す。これより、特に配置の最適化を行わない従来手法、および距離を重視した場合



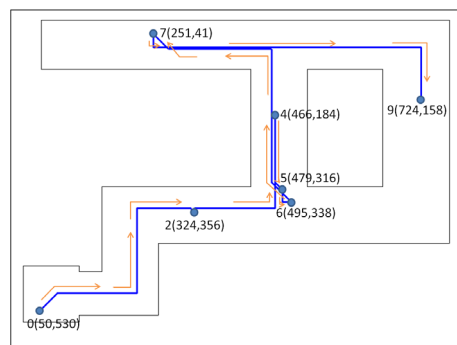
Simulation view



Parent robot



Child robot 1



Child robot 2

Fig.11 Examples of trajectories of robots

の誤差が大きく増加しているのに対し、角度・距離を均等に評価した場合、および角度を重視した場合は誤

差の蓄積を押さえることができた。同様の結果は、他の2つの地図 (MAP-B, MAP-C) においても得られ、誤差の蓄積を抑えるには角度の条件が最も重要であることが確認された。

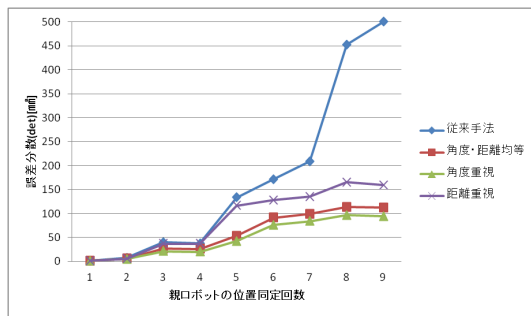


Fig.12 Comparison of positioning errors

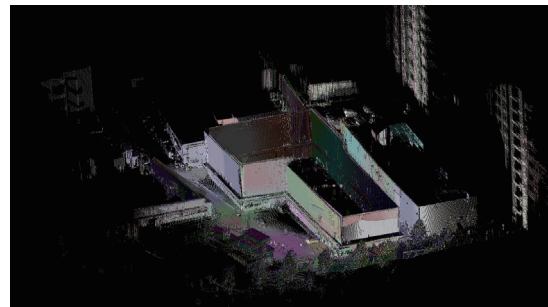
5.2 実環境における動作実験 提案したアルゴリズムを実機 (Fig.2) に搭載し、屋外環境での確認実験を行った。Fig.13に実験環境を示す。また、得られた3次元地図を Fig.14(a)(b) に、提案手法によって計画された親子ロボットの経路を Fig.14(c) に示す。親ロボット (赤線) は、初期位置から Fig.13(a) の左側の建物周囲を一周し、移動とともに子ロボットの位置が逐次計画され (緑線, 青線), 最終的に計測を自動で行うことができることを確認した。

### 6 まとめ

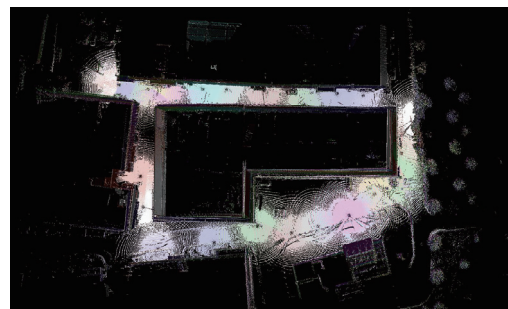
本稿では、著者らが開発した CPS-SLAM による大規模環境のレーザ計測システムに対し、ロボット間の見通しの確保や位置同定誤差の低減、効率的な環境計測作業の実現を目指した自動観測計画の立案手法を提案した。本手法は、親ロボットと子ロボットのそれぞれの目標位置選択において、K-means 法による目標位置の絞り込みや観測効率性を表す評価値の最適化、AND 領域や Visibility graph を用いたサブゴール設定に基づく見通しの確保、Voronoi 境界による安全な移動経路の実現などを行うものである。本論文では、シミュレーションにより提案手法の有効性を確認するとともに、実機による動作実験を行い、各ロボットが自動で観測計画を立案しながら、3次元環境地図を取得できることを確認した。



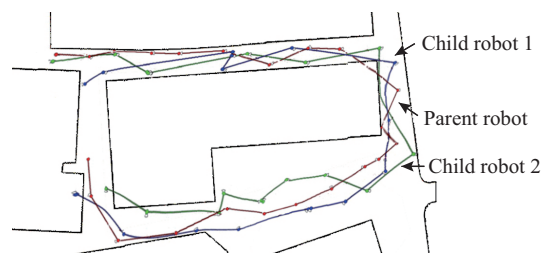
(a) (b)  
Fig.13 Experimental environment



(a) 3D model



(b) 3D model (Top view)



(c) Trajectories

Fig.14 3D models and trajectories of parent and child robots

### 参考文献

- [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] Yukihiro Tobata, Ryo Kurazume, Yusuke



- Noda, Kai Lingemann, Yumi Iwashita, Tsutomu Hasegawa: "Laser-based geometrical modeling of large-scale architectural structures using co-operative multiple robots", *Autonomous Robot*, Vol.32, No.1, pp. 49-62, 2012.
- [3] 鄭 龍振, 岩下 友美, 倉爪 亮, "CPS-SLAM の研究 -計測精度の向上とトンネル出来形計測システムの構築-", *日本ロボット学会誌*, Vol.30, No.2, pp.180-187, 2012.
- [4] K. A. Tarabanis, P. K. Allen, and R. Y. Tsai, A survey of sensor planning in computer vision, *IEEE Trans. on Robotics and automation*, Vol.RA-11, No.1, pp. 86-104, 1995.
- [5] T.S. Newman and A.K. Jain, A survey of automated visual inspection, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.61, No.2, pp.231-262, 1995.
- [6] Aaron Mavrincac and Xiang Chen. Modeling coverage in camera networks: A survey, *International journal of computer vision*, Vol.101, No.1, 205-226, 2013.
- [7] A. Aggarwal, The art gallery theorem: Its variations, applications, and algorithmic aspects, Ph.D. thesis, Johns Hopkins University, 1984.
- [8] J. O Rourke, Art Gallery Theorems and Algorithms. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 1987.
- [9] I. Stamos, P. K. Allen, Interactive sensor planning, *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.489-494, 1998.
- [10] Haluk Rahmi Topcuoglu, Murat Ermis, and Mesut Sifyan, Positioning and Utilizing Sensors on a 3-D Terrain Part I Theory and Modeling, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* Vol.41, No.3, 2011.
- [11] S.Y. Chen and Y.F. Li, Automatic sensor placement for model-based robot vision, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, *IEEE Transactions on*, vol.34, no.1, pp.393-408, 2004.
- [12] W.R. Scott, G. Roth, and J.-F. Rivest, View planning with a registration constraint, *Proc. Third Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 127 -134, 2001.
- [13] F. Prieto, T. Redarce, et al, CAD-based range sensor placement for optimum 3D data acquisition, *Proc. Second Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 128 -137, 1999.
- [14] D. Papadopoulos-Orfanos and F. Schmitt, Automatic 3-D digitization using a laser rangefinder with a small field of view, *Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 60 -67, 1997.
- [15] H. Zha, K. Morooka, T. Hasegawa, and T. Nagata, Active modeling of 3-D objects: Planning on the next best pose (NBP) for acquiring range images, *Proc. Int. Conf. on Recent Advances 3-D Digital Imaging Modeling*, pp. 68-75, 1997.
- [16] E. Marchand and F. Chaumette, Active sensor placement for complete scene reconstruction and exploration, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 743-750, 1997.
- [17] S.Y. Chen and Y.F. Li, Vision sensor planning for 3-D model acquisition, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol.35, no.5, pp.894-904 2005.
- [18] Y.F. Li and Z.G. Liu, Information entropy-based viewpoint planning for 3-D object reconstruction, *IEEE Transactions on Robotics*, vol.21, no.3, pp.324-337, 2005.
- [19] Ruzena Bajcsy, Active perception, *Proc. of the IEEE*, Vol.76, No.8, pp.966-1005, 1988.
- [20] Yiannis Aloimonos, ed. Active perception. Psychology Press, 2013.
- [21] J. Okamoto, M. Milanova, U. Bueker, Active perception system for recognition of 3D objects in image sequences, *5th Int. Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 700-705, 1998.
- [22] 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-冗長位置情報の融合と機械モデル実験-", *日本ロボット学会誌*, Vol.14, No.8, pp.1229-1236, 1996.
- [23] Chatila.R: "Path planning and environment learning in a mobile robot system", *Proc. European Conf Artificial Intelligence*, Torsey,

France, 1982.

- [24] Mark de Berg et al., Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer, 1997.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Franz Aurenhammer, Voronoi Diagrams, A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure, ACM Computing Surveys (CSUR), Vol 23, Issue 3, pp.345-405, 1991.
- [28] J.C.Latombe: “Robot Motion Planning”, Kluwer Academic Publishers, 1991.