CPS-SLAMによる大規模環境のレーザ観測の自動計画手法

大 島 漱一郎* 永 倉 翔 吾* 鄭 龍 振*
岩 下 友 美* 倉 爪 亮*

Automatic Planning of Laser Measurements for a Large-scale Environment using CPS-SLAM System

Souichiro Oshima*, Syogo Nagakura*, Jeong Yongjin*,
Yumi Iwashita* and Ryo Kurazume*

In recent years, several low-price 3D laser scanners are being brought to the market and 3D laser scanning has been widely used in many applications. For example, 3D modeling of architectural structures and digital preservation of cultural heritages are typical applications for 3D laser scanning. Despite of the development of light-weight and high-speed laser scanners, complicated measurement procedure and large measurement time are still heavy burden for the widespread use of laser scanning. We have proposed a robotic 3D scanning system using multiple robots named CPS-SLAM, which consists of parent robots with a 3D laser scanner and child robots with corner cubes. This system enables to perform 3D laser scanning without complicated post-processing procedures such as ICP, and large-scale 3D models can be acquired by an on-board 3D laser scanner from several positions determined precisely by the localization technique named Cooperative Positioning System, CPS. This paper proposes an automatic planning technique for an efficient laser measurement for the CPS-SLAM system. By planning a proper scanning strategy depending on a target structure, it is possible to perform laser scanning efficiently and accurately even for a large-scale environment. Proposed technique plans an optimal scanning strategy automatically by taking several criteria, such as visibility between robots, error accumulation, and efficient traveling, into consideration. We conducted computer simulation and outdoor experiments to verify the performance of the proposed technique.

Key Words: Laser Measurement, Multiple Robots, 3D Modeling, Automatic Sensing Planning

1. は じ め に

FARO Focus 3D や Lieca Scanstation, TOPCON GLS-1500 など、三次元レーザスキャナの低価格化に伴い、レーザ計測は土木建築分野での現況確認、建造物のモデリングや文化財のデジタル化など、様々な分野で応用が進められている。

一般に、建造物や大型文化財など大規模な対象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い、あらかじめ設置したマーカーや Iterative Closest Point (ICP) 法等により、複数の計測データを後処理で位置合わせする手法が用いられる。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。しかし、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、筆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、太宰府天満宮の三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]~[3]。

提案した CPS-SLAM は大規模対象に対する高精度な三次元レーザ計測システムとして極めて有効な手法である。例えば SLAM や GPS, オドメトリを用いたレーザ計測システムと比較した場合の優位な点として、以下の点が挙げられる。

- SLAM により得られるモデルや経路の高精度化には、一般に閉ループとなる経路が必要である。これに対し、CPS-SLAM は閉ループがなくとも高精度な位置同定が可能であ

原稿受付 2014 年 5 月 13 日

*九州大学

*Kyushu University

■ 本論文は有用性 (システム設計・構築分野) で評価されました。

る。例えば鄭ら[3]は、屋内環境では210[m]移動後の誤差が98[mm]、屋外では313[m]高低差5[m]移動後の誤差が116[mm]であることが報告されており、GPSやオドメトリと比較して圧倒的な高精度である。

- 複数距離画像の位置合わせによく用いられるICP法は、通常人手により大まかな初期位置合わせを行う必要がある。また計測地点が多い場合には後処理の計算コストも膨大となり、さらにICP法により精度良く位置合わせを行うためには、各計測地点で得られた三次元点データに共通して特徴的な形状が含まれ、かつ点データの分布が十分に重なるように測定を密に行わなければならない。これはICP法を用いたSLAMにも当てはまる。これに対し、CPS-SLAMは点群そのものを位置合わせに使う必要がなく、重なりがまったくなくても統合したモデルが生成できる。
- RTK方式（リアルタイムキネマティック方式）やVRS方式（仮想基準点方式）など高精度なGPSは、衛星の見通せない建物の間や屋内環境、地下街では用いることができない。これに対し、CPS-SLAMは屋内、屋外を問わず適用可能である。

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の距離と方位から、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、主にオペレータや作業者の経験に基づいて行われていた。このため、効率性や最適性に対する数値的な裏付けがなく、オペレータのスキルによっては、例えば観測の重複が発生したり、不必要な移動、観測のために作業時間が長くなる恐れがあった。これに対し、観測回数や観測精度などの客観的指標に基づき、定量的に最適化された経路が得られる観測計画の自動立案は、オペレータの負荷低減のみならず、計測対象やオペレータのスキルによる計測回数、精度のばらつきを極力抑え、また無駄な観測を省き作業時間を短縮するのに有効であると考えられる。そこで本論文では、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。

提案手法は、オペレータの経験や勘に基づく従来のレーザ観測計画と比較し、以下のような利点がある。

- (1) 観測回数や観測精度など客観的指標に基づき、数値的に裏付けされた観測計画が得られる
 - (2) 計測対象やオペレータのスキルによる計測回数、精度のばらつきが抑えられる
- またこのほかにも、以下のような効果が期待できる。
- (3) 無駄な観測を省き作業時間を短縮できる

- (4) オペレータの負荷低減や計測作業に安心感を与える
- 上記4については、後述する実環境での実験において説明する。

2. 関 連 研 究

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]~[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、三次元の都市空間で死角のな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。Topcuogluら[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、三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]~[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、得られる情報量が最も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。しかし上述した従来手法では、レーザスキャナやカメラは、マニピュレータなどにより空間内の任意の位置に正確に移動できることを仮定している。このため、位置同定精度などは考慮せず、できるだけ未知領域が減少すること、できるだけ移動・観測回数が少なくなることを目標に観測が計画されていた。一方、提案システムでは、観測位置を変更する際、正確な位置は後述する協調ポジショニングシステムにより計測される。したがって、協調ポジショニングシステムを実現するために、上記に加えてロボット間の見通しの確保という新たな条件を考慮する必要がある。このため、観測位置を自由に選択できる従来手法とはまった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

Fig. 1 Cooperative Positioning System, CPS

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

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。得られた局所的な三次元モデルは、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。Fig. 3 に、Fig. 2 のシステムを用いて計測した大規模建造物の三次元モデルを示す。

本論文では、Fig. 2 に示した CPS-VII に対して、計測対象に

Fig. 3 3D model of large building

応じて計測位置を自動計画し、効率的なレーザ計測を実現する手法を提案する。

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、すでに数回、レーザ計測が繰り返され、環境構造の一部がすでに得られている状況を想定し、それまでに計測された一部の環境構造から次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に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. 4 に示す。

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三次元環境データを二次元グリッド地図に変換し、二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 (既計測領域) 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

Fig. 4 Flowchart of automatic planning algorithm

Fig. 5 Problem definition

Fig. 6 Determined candidate positions for parent robot by K-means clustering

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. 5 に問題設定を、Fig. 6 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) 既計測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 AND region and candidate positions for child robots

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) 既計測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、すべ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。

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

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=既計測・移動可)、 P はポテンシャル (最近傍の障害物からの距離の逆数、単位: 1/m)、 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)、 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ものを親ロボットの移動目標位置として決定する。ただし、ある目標位置候補から得られる未計測領域の面積 S は、それまでに検出された物体以外は環境に何も存在しないと仮定し、その目標位置候補から全周方向にレーザ計測を行った際に、すでに検出されている物体に遮られず、かつレーザの最大計測距離より内側に存在するグリッド数を数え上げることで求めた。

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。本論文では、Fig. 7 に示すように、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、すべ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 領域内の既計測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角差が 90° に

近い位置

などが考えられる. このうち (3) の条件は, 使用するレーザ距離測定器 (トータルステーション) は, 親子ロボット間の距離が一定以下になると急激に計測誤差が大きくなる [26] ためであり, (4) は, 子ロボット間の方位差が 90° 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.

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

ここで, G_c は子ロボットの目標位置の評価値, P はポテンシャル (最近傍の障害物からの距離の逆数, 単位: $1/\text{m}$), 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), θ_t , D_t は任意の角度, 距離定数, δ は 0 でない十分小さな実数, 係数 α_c , β_c は重みを表している. ただし, $\theta_t = 90^\circ$ である. 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. 8 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

Fig. 8 Visibility Graph

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) を繰り返す, 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, あらかじ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 計算機シミュレーション

提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価した. シミュレーションでは, あらかじめ Fig. 9 に示す 3 種類の二次元地図 (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手動で設定して, 移動目標位置の探索を開始した.

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. また, 親ロボットの環境測定可能範囲を $20[\text{m}]$ とした. 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. 一例として, MAP-A に対する各ロボットの移動軌跡を Fig. 10 に示す.

5.1.1 親ロボットの移動目標位置の選択

4.1 節で提案した親ロボットの移動目標位置の選択法に対し, 式 (1) のパラメータ α , β を変えてシミュレーションを行い, それぞれのパラメータに対する親ロボットの移動軌跡の変化を調べた.

シミュレーションは,

- a) 親ロボットの移動距離 L をできるだけ小さくする ($\beta = 0$)
- b) 目標位置で計測可能な未計測領域 S をできるだけ大きくする ($\alpha = 0$)

Fig. 9 MAP A, B, and C

Fig. 10 Planned trajectories of parent and child robots for MAP A

Fig. 11 Measured map and trajectories of parent robot in case that a closest target position is selected ($\beta = 0$) for MAP C

の2種類に対して行った。

MAP-Cに対して、親ロボットの初期位置をFig. 9 (c)の星印として観測計画を自動計画した場合の環境地図の獲得の様子をFig. 11およびFig. 13に、そのときのロボットの移動軌跡をFig. 12, およびFig. 14, 15に示す。

a) 親ロボットの移動距離 L を小さくするように目標位置を

Fig. 12 Trajectories of robots in case that a closest target position is selected ($\beta = 0$) for MAP C

選択した場合 ($\beta = 0$, Fig. 11, 12), 離れた目標位置は選択されないため, 見通せない目標位置が選択されることがなく, サブゴールの探索は行われていない (Fig. 12). しかし, 一度に計測される領域が狭く, 全域の取得に 23 回の移動, 計測が必要であった (Fig. 11). 一方, b) 目標位置で計測可能な未計測領域 S を大きくするように目標位置を選択した場合 ($\alpha = 0$, Fig. 13, 14, 15), 移動距離が長くても計測範囲ができるだけ

Fig. 13 Measured map and trajectories of parent robot in case that a target position where a measurable area is maximized is selected ($\alpha = 0$) for MAP C

大きくなる目標位置が選択されたため, 計測 10 回め, 12 回め, 16 回めでそれぞれ Visibility Graph によるサブゴール探索が行われている (Fig. 14, 15). しかし全域の取得に必要な計測回数は少なく, 18 回の移動, 計測で計測が終了した (Fig. 13). Fig. 11 ($\beta = 0$) と Fig. 13 ($\alpha = 0$) を比較すると, Fig. 13 のほうが Fig. 11 に比べて, 親ロボットの 1 回の移動距離が長いことが分かる.

さらに, MAP-C に対して, a) 親ロボットの移動距離 L を小さく ($\beta = 0$), また b) 目標位置で計測可能な未計測領域 S を大きく ($\alpha = 0$) するように目標位置を選択した場合の移動距離 (回数にサブゴール間の移動も含む) と計測領域 (計測可能領域のカバー率・回数にサブゴール間の移動は含まない) を **Fig. 16** に示す. さらに提案した親ロボットの計測目標位置の自動計画を用いずに, オペレータが手動により親ロボットの位置を決定した場合の結果の一例も合わせて示す. これより, a) は総移動距離は短い, 測定回数が多く, 測定回数に対するカバー率の上昇値 (計測効率・右図の傾き) は 5.46 [%/回] であるのに対

Fig. 14 Trajectories of robots in case that a target position where a measurable area is maximized is selected ($\alpha = 0$) for MAP C (1st ~ 13rd measurements)

し、b) は総移動距離が長い、測定回数が少なく、計測効率は 6.14 [%/回] であった。一方、人手により決定した手法は、総移動距離、測定回数ともに多く、計測効率は 5.02 [%/回] (5 回平均) であった。また、移動距離 1 [m] 当たりのカバー率の上昇値 (移動効率) は、a) が 0.430 [%/m]、b) が 0.232 [%/m] であったのに対し、手動が 0.331 [%/m] (5 回平均) であり、a) は手動に比べて移動効率が 30.2% 向上した。また、カバー率が 98% 以上となるまでの計測回数は、a) が 18 回、b) が 16 回に対し、手動は 19.6 回 (5 回平均) であり、b) は手動に比べて計測回数が 18.4% 減少した。

Fig. 15 Trajectories of robots in case that a target position where a measurable area is maximized is selected ($\alpha = 0$) for MAP C (14th ~ 18th measurements)

Fig. 16 Comparison of travel distance and measured area of parent robot

5.1.2 子ロボットの最適配置

4.2 節で提案した誤差の蓄積を低減する子ロボットの配置法について、その妥当性を検討するため、式 (2) においてパラメータ α_c 、 β_c を変えてシミュレーションを行い、それぞれのパラメータと蓄積誤差の関係を調べた。シミュレーションは、以下の 4 とおりの条件で行った。

- a) 永倉らの手法 [25]
- b) $\alpha_c = 1$, $\beta_c = 1$ (角度・距離均等)
- c) $\alpha_c = 100$, $\beta_c = 1$ (子ロボット間の角度重視)
- d) $\alpha_c = 1$, $\beta_c = 100$ (親子ロボット間の距離重視)

Fig. 17 Comparison of positioning errors

Table 1 Comparison of positioning error variances for MAP A, B, and C after parent robot moves nine times [mm^2]

	(a) [25]	(b) angle/distance	(c) angle	(d) distance
MAP A	500.0	112.3	94.0	159.3
MAP B	46.5	43.6	43.7	165.2
MAP C	254.2	45.3	47.2	145.8

a) 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ランダムに配置する手法である。またc) では子ロボット間の角度が $\theta_t = 90^\circ$ に近い位置が、d) 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。またマップの大きさが 800×600 グリッド ($=80[\text{m}] \times 60[\text{m}]$) であることから、 P がおよそ $0 \sim 5$ グリッド、 L がおよそ $100 \sim 1,000$ グリッド、 S がおよそ $1,000 \sim 10,000$ 平方グリッドであると見込み、各項のオーダーを揃えるために、親ロボットの目標位置の評価値の係数は $\beta = 0.001$ とした。また、長距離の移動も選択されるように、移動距離よりも計測領域を優先する 5.1.1 節 (b) に近い条件として $\alpha = 0.01$ とした。

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. 17 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。また、親ロボットが Fig. 9 の×印から観測を開始したとき、すべての地図に対して計算された9回めの移動後の誤差分散値を Table 1 に示す。これより、

- (1) すべての地図で、角度のみ、あるいは角度・距離を均等に評価した場合は誤差の蓄積が小さい
- (2) すべての地図で、距離のみを評価した場合は誤差の蓄積が大きい
- (3) 子ロボットの配置をランダムに行う手法[25]は地図、試行間で精度の差が激しい

Fig. 18 Experimental environment

Fig. 19 Outdoor experiment

Fig. 20 Trajectories of parent and child robots (case 1)

- (4) 誤差の蓄積が小さくなるように子ロボットの配置を決定することで、安定した精度で計測できるなどのことが分かった。

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. 18 に実験環境を示す。また、Fig. 19 に屋外実験の様子を、Fig. 20, 21 に計画された親子ロボットの経路を示す。各図中の矢印は移動方向、番号は親ロボットの

Fig. 21 Trajectories of parent and child robots (case 2)

Fig. 22 Obtained 3D model (case 1)

Fig. 23 Obtained 3D model (case 2)

移動回数を示している。Fig. 20 では、親ロボット（実線）は初期位置から直進して、手前の建物の角で曲がり、開けた空間を計測した。子ロボットは、親ロボットが曲がる時（Fig. 20 の移動 4 回め）と、開けた場所の奥の方に進んだとき（Fig. 20 の移動 9 回め）に位置を変更した。また、Fig. 21 では、親ロボットが T 字路の中央から左右に振動しながら計測を行い、最終的に地図上部の広い通路に移動した。この広い通路のほうへ移動する際、VisibilityGraph によるサブゴール探索を用いての移動が 1 回行われた。子ロボット 1 は Fig. 21 の移動 2, 3, 7 回め、子ロボット 2 は移動 2, 4, 6, 7 回めのときに、それぞれ移動を行った。この動作計画の結果、最終的に Fig. 22, 23 の三次元地図を構築することに成功した。

さらに、建物を一周する実験を行った。得られた三次元地図を Fig. 24 (a)(b) に、提案手法によって計画された親子ロボッ

(a) 3D model

(b) 3D model (Top view)

(c) Trajectories

Fig. 24 3D models and trajectories of parent and child robots (case 3)

トの経路を Fig. 24 (c) に示す。親ロボット（実線）は、初期位置から Fig. 18 (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（破線）、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。

なお、Fig. 20, 21 の実験は、路面がアスファルトの平坦な場所で行い、Fig. 24 の実験は図中の丸印で書かれた場所で 1 [m] の高低差がある環境で行った。また、自動車との衝突防止などの安全性の観点から、実際の実験では、システムが提案手法に基づき次の観測地点候補を数点提示し、オペレータはの中から適当な点を選択することとした。この提示された候補から選択する手法は、実際の作業では非常に効率的で、安心感があり、提案手法の有効性が確認できた。

6. ま と め

本論文では、筆者らが開発した 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、三次元環境地図を取得できることを確認した。

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 (A) (課題番号 26249029) の支援を受けた。

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三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] Y. Tobata, R. Kurazume, Y. Noda, K. Lingemann, Y. Iwashita and T. 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. Tarabani, P.K. Allen and R.Y. Tsai: “A survey of sensor planning in computer vision,” *IEEE Trans. on Robotics and automation*, vol.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] A. Mavrinac and X. Chen: “Modeling coverage in camera networks: A survey,” *International journal of computer vision*, vol.101, no.1, pp.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*. Oxford Univ. Press, 1987.
- [9] I. Stamos and P.K. Allen: “Interactive sensor planning,” *Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.489–494, 1998.
- [10] H.R. Topcuoglu, M. Ermiş and M. 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, pp.376–382, 2011.
- [11] S.Y. Chen and Y.F. Li: “Automatic sensor placement for model-based robot vision,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 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] R. Bajcsy: “Active perception,” *Proc. of the IEEE*, vol.76, no.8, pp.966–1005, 1988.
- [20] Y. Aloimonos, ed.: *Active perception*. Psychology Press, 2013.
- [21] J. Okamoto, M. Milanova and 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] R. Chatila: “Path planning and environment learning in a mobile robot system,” *Proc. European Conf. Artificial Intelligence*, Torsey, pp.211–215, 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予稿集 DVD-ROM, 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] F. Aurenhammer and V. 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.

付録 A. 屋内環境における計測実験

Fig. 25 (a), (b) に示す屋内環境 (ホール) において, 提案手法により計測経路を自動計画した場合と, 手動により計画した場合で計測作業を行った. 自動計測によって得られた三次元モデルを Fig. 25 (c) に, 自動計画と手動計画それぞれの計測経路を Fig. 25 (d), (e) に示す. それぞれの計測回数は, 自動計画が13回, 手動計測が16回であった. しかし, Fig. 25 (d), (e) を詳しく比較すると, 自動計画では, 細い通路はロボットが通過できないと判断されたため, 手動計画で計測された左端 (Fig. 25 (d) 14 番) や上側の通路 (16 番) のデータが得られていないことが分かる. また手動計測では, 床面でレーザ光が反射し距離データが得られにくいため, 操作者の判断で繰り返し計測を行った箇所 (Fig. 25 (d) 2, 6 番, 3, 7 番) もあった. このため, 両者の直接的な比較はできないが, 自動計画では手動計画に比べてより一定の間隔で均一に計測されていることが分かる.

Fig. 25 Example of measurement paths by manual and automatic planning

大島 漱一郎 (Souichiro Oshima)

2013 年九州大学電気情報工学科卒業。現在九州大学大学院システム情報科学府修士課程在学中。群ロボットによるレーザ計測の研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

永倉 翔吾 (Syogo Nagakura)

2013 年九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了。在学中、群ロボットによるレーザ計測の研究に従事。

鄭 龍振 (Jeong Yongjin)

2010 年韓国釜山大学工学部情報コンピュータ工学科卒業。2012 年九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了。2014 年九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程入学。移動ロボット、群ロボット、レーザ計測の研究に従事。

岩下 友美 (Yumi Iwashita)

2007 年九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、Imperial College London 客員研究員を経て、同年より九州大学大学院システム情報科学研究院助教、現在に至る。2011 年から NASA ジェット推進研究所客員研究員 (2015 年まで)。コンピュータビジョンの研究に従事。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

倉爪 亮 (Ryo Kurazume)

1991 年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了。同年 (株) 富士通研究所入社。1995 年東京工業大学機械宇宙学科助手。2000 年スタンフォード大学客員研究員。同年東京大学生産技術研究所博士研究員。2002 年九州大学システム情報科学研究院助教授。2007 年より同教授。現在に至る。日本ロボット学会論文賞 (1993, 2014)、日本ロボット学会功労賞 (2008)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞 (2012) 等受賞。群ロボット、歩行機械、レーザ計測、医療画像処理の研究に従事。博士 (工学)。
(日本ロボット学会正会員)