

高性能レーザスキャナを搭載した走行・飛行型群ロボットシステムの開発 レーザ観測計画の自動化と屋外計測実験

Development of 3D scanning system using multiple robots and a precise laser scanner
-Automatic planning of laser measurements and Outdoor experiment-

学 大島漱一郎 (九州大) 岩下友美 (九州大)
正 倉爪亮 (九州大)

Soichiro OSHIMA, Kyushu University
Yumi IWASHITA, Kyushu University
Ryo KURAZUME, Kyushu University

This paper proposes an automatic planning technique of a new laser measurement system using CPS-SLAM named CPS-VIII. The CPS-VIII consists of a parent robot which is equipped with a precise laser scanner and several child robots including wheeled robots and quadcopters. Each robot position is identified by Cooperative Positioning System, CPS. We conducted the 3D modeling experiment and verified that the accuracy of the 3D model is 0.023m after the parent robot moved 270.1m.

Key Words: Laser measurement, Multiple robots, 3D modelling, Automatic sensing planning

1 はじめに

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。また、日常生活空間内でサービスロボットが安全に作業を行うには、環境地図は欠くことのできない重要な環境情報である。大規模対象を地上固定式3次元レーザスキャナにより計測する際、一地点からでは観測される領域が限られることから、複数の地点に移動してレーザ計測を繰り返す手法が用いられる。しかし、地上固定式3次元レーザスキャナは一般に重く、人手で複数地点に運び、設置するのは困難を伴う。また複数地点からの計測結果を精度よく統合するには、移動後の新たなレーザ設置位置も、何らかの手法により高精度に計測されなければならない。これに対し、我々はこれまでに複数のレーザ計測装置を移動ロボットに搭載し、大規模環境でのレーザ計測とロボットの位置同定を高精度に実現する群ロボットシステム (CPS-SLAM) を提案した [1][2]。図1に、これまでに開発した CPS-SLAM のためのレーザ計測群ロボット (CPS-VII) を示す。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。しかし、CPS-VIIでは、ロボットの位置と環境の計測を2台のレーザ装置を用いて別々に行っているため、全体の計測時間が長くなる問題があった。また親子ロボットに地上走行ロボットを用いているため、ロボットの移動可能領域が現在位置から走行により到達可能な領域に限られる制約があった。さらに CPS-VIIでは、2台のレーザ計測装置を組み合わせて環境計測と位置合わせを行っていたため、装置間のキャリブレーションが必要であり、位置同定誤差の原因となっていた。

本稿では、高性能レーザスキャナを搭載し、環境のレーザ計測と位置同定を同時かつ高精度に実現する群ロボットシステム (CPS-VIII)、およびレーザ観測計画の自動化手法を提案する。CPS-VIIIでは、レーザスキャナにより取得した計測データから基準球の位置を検出することで、環境計測と位置同定を同時に行うことが可能である。さらに、CPS-VIIでは必要であったレーザ装置間のキャリブレーションが不要になり、位置同定の精度が向上した。また、子ロボットの一部にクワッドコプタを用いることで屋外での到達可能領域を増加させた。

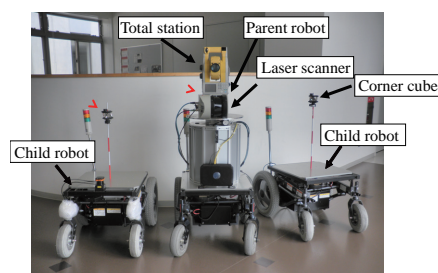


Fig.1 CPS-SLAM machine model, CPS-VII

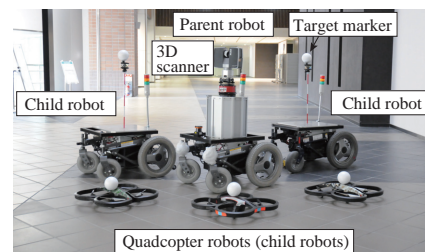


Fig.2 The 8th CPS machine model, CPS-VIII

2 レーザ計測群ロボットシステム CPS-VIII

図2に新たに開発したレーザ計測群ロボットシステム、CPS-VIIIを示す。本システムは、1台の地上移動型の親ロボットと複数の地上移動型およびクワッドコプタ型子ロボットで構成される。親ロボットには、従来の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に代わり、新たに3次元レーザスキャナ (Focus 3D, Faro)、自動整準台 (リズム, AS-21) を搭載している。一方、地上移動型およびクワッドコプタ型子ロボットには、位置同定のための直径150[mm]の基準球を搭載している。親ロボットの自己位置推定は、レーザスキャナと基準球を用いて行われ、各スキャンにおいて子ロボット上の基準球を検出することにより、複数地点で行われたスキャンの位置合わせを行う。

2.1 基準球を用いた位置同定

CPS-VIIIに搭載したレーザスキャナで計測できる範囲は、最大120[m]であるが、計測により得られた環境地図から基準球を

認識できる範囲には、さらに制限がある。得られた3次元点群中に存在する基準球の認識範囲は、基準球の大きさや、レーザスキャナの解像度の設定に依り、位置同定の際には親ロボットと基準球の距離を考慮する必要がある。

また、自動整準台やレーザスキャナに搭載された傾斜計を用いた場合、2地点で得られたスキャンデータの位置合わせには、最低2つの基準球を両方のスキャンデータで検出する必要がある。しかし2つの基準球だけを用いた場合、レーザスキャナを搭載した親ロボットが移動した後、

1. 親ロボットによる基準球を含む周囲環境のレーザ計測
2. 基準球を搭載した子ロボットが移動
3. 親ロボットによる移動後の基準球を含むレーザ計測

と、親ロボットは同一地点からのレーザ計測を2度繰り返す必要があり、効率が悪い。

そこで、CPS-VIIIでは3台以上の子ロボットに基準球を搭載することにより、計測の効率化を図っている。3つの基準球を用いた環境計測の動作例を図3に示す。

1. まず、レーザスキャナから基準球が検出できる範囲に3つの基準球(1,2,3)を配置し、レーザ計測を行う。(図3(a))
2. 次に、3つの基準球のうち少なくとも2つの基準球(2,3)を検出できる位置に親ロボットを移動させる。
3. 同時に、レーザスキャナから最も遠い位置にある基準球(1)を、親ロボットの先のレーザ検出範囲内(1')に移動させ、レーザ計測を行う。(図3(b))
4. 計測の前後で場所が変わっていない基準球(2,3)を用い、親ロボットの位置同定、すなわち移動前後のスキャンデータを位置合わせする。
5. 2つの基準球(1',3)について、2~5を繰り返す。(図3(c))

これにより、親ロボットによる同一地点からのレーザ計測は1度で済み、効率的な移動と計測が可能となる。得られた局所的なスキャンデータは、基準球の観測による親ロボットの位置同定により、簡単な座標変換で世界座標系に変換でき、大規模な環境モデルを容易に取得できる。

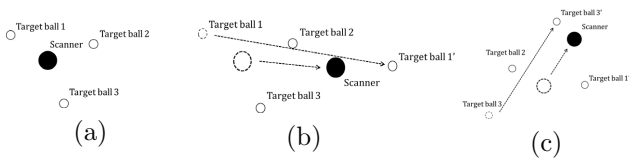


Fig.3 Position identification

3 自動計画手法

本稿では、図2に示したCPS-VIIIに対して、計測対象に応じて計測位置を自動計画し、効率的なレーザ観測を実現する自動計画手法を提案する。CPS-VIIIでの自動計画手法は、既に数回、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する。ここで、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。CPS-VIIIでの自動計画手法では、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を見通せる必要がある。また、基準球の検出範囲の制限がある。しかし、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制約条件を満たす各ロボットの目標地点が存在しない場合には、開始-目標間にサブゴールを次々に設定し、制約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。

提案する手法の概要を図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。

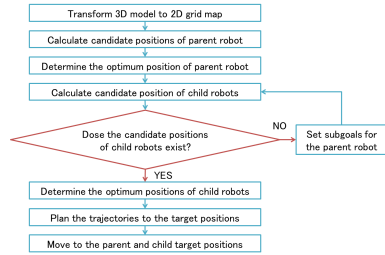


Fig.4 Flowchart of automatic planning algorithm

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ている領域(既知計測領域)と計測していない領域(未知計測領域)の境界に近い
2. 障害物との衝突を避けるため、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知計測領域が大きい

などの条件を同時に満たす位置が望ましい。

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。クラスタリングでは、既知領域と未知領域の境界に一定密度でランダムに候補点を設定した後に行う。次に、得られたクラスタの中心を親ロボットの目標位置候補とし、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、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、既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。

3.2 子ロボットの移動目標位置の探索

基準球を使った位置同定では、親ロボットが現在位置から目標位置に移動する前後で、二つの基準球を制止させておく必要がある。そこで、子ロボットの目標位置探索では、まず各子ロボットが、AND 領域内に存在するか否かを考える。CPS-VIII を用いた自動計画での AND 領域とは、親ロボットの現在・目標位置双方から基準球を検出できる領域を指し、AND 領域は、親ロボットからの見通しだけでなく、基準球の認識範囲に依存するため、基準球の大きさや、レーザスキャナの解像度に依る。図 5 に AND 領域の例を示す。

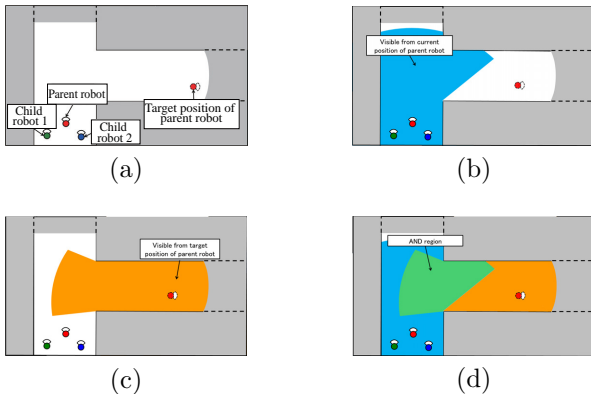


Fig.5 AND region and candidate positions for child robots

AND 領域を算出した後、AND 領域内に存在する子ロボットのうち、2 台を静止させ位置同定に用いる。この際、考慮すべき条件としては、

1. AND 領域内に存在
2. 親ロボットとの距離が一定範囲内
3. 親ロボットの目標位置から見た、2 台の子ロボットの方位差が 90° 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° 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 [3]。

上記の条件を可能な限り満たす子ロボットを位置同定に用いるため、AND 領域内に存在する子ロボットを 2 台ずつ選択し、以下の評価式を適用し、それが最小となる 2 台の子ロボットの組を探索する。

$$G_{c1} = (P + \delta)^{-1} + \alpha_c \cdot (|\theta - 90| + \delta)^{-1} + \beta \cdot (|D - D_t| + \delta)^{-1} \quad (2)$$

ここで、 G_{c1} 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_t は任意の距離定数、 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。

位置同定に用いるため、静止させておく 2 台の子ロボットを選択した後、選択されなかった子ロボットの移動目標位置を探索する。この際、考慮すべき条件としては、

1. 親ロボットの目標地点から認識可能かつ移動可能な位置
2. 障害物に衝突しない
3. 親ロボットの目標位置から見て、各子ロボットが周辺に散らばって存在している位置

などが考えられる。このうち (1) の条件は、子ロボットが、親ロボットの目標地点からの基準球の認識範囲内に存在しない場合に、次回以降の位置同定に用いることが出来ないためである。また (3) の条件は、親ロボットが次回以降にどの方向に移動する場合でも、できるだけ子ロボットを AND 領域に収めるためである。

上記の条件を可能な限り満たすため、親ロボットの現在位置と目標位置の位置同定に用いない 2 台の子ロボットには、親ロボットの目標位置からの基準球の認識範囲内で、以下の評価式を適用し、それが最小となる 2 台の子ロボットの組を探索する。

$$G_{c2} = (P + \delta)^{-1} + \gamma_c \cdot (D_1 + D_2 + D_c) \quad (3)$$

ここで、 G_{c2} 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)、 D_1 と D_2 はそれぞれ位置同定に用いる子ロボットとの直線距離 (単位: m)、 D_c は位置同定に用いない子ロボット間の距離 (単位: m)、 δ は 0 でない十分小さな実数、係数 γ_c は重みを表している。

3.3 サブゴールの探索

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。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、サブゴールの探索は以下の

1. 親ロボットの現在位置と目標位置の見通し可能
2. 親ロボットの現在位置と目標位置の見通し不可能

のそれぞれの場合に対してサブゴール探索を行う。

3.3.1 親ロボットの現在位置と目標位置の見通し可能

親ロボットの現在位置と目標位置の見通しが可能な場合のサブゴール探索では、現在位置と目標位置の直線上に複数のサブゴールを設定する。設定するサブゴール数は現在位置と目標位置の距離に比例し、また、各サブゴール間で十分な AND 領域が存在する場所に設定する。

3.3.2 親ロボットの現在位置と目標位置の見通し不可能

親ロボットの現在位置と目標位置の見通しが不可能な場合では、サブゴールの探索には Visibility Graph [4][5] を用いる。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する。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 により見つかったサブゴール間で、AND 領域が存在しない場合がある。AND 領域が存在しない場合でも、各サブゴール間は見通しが可能なので、3.3.1 節で述べた、親ロボット間の見通し可能な場合の AND 領域の設定方法をサブゴール間に適用し、新たなサブゴールを追加することで、確実に目標位置に到達できる。

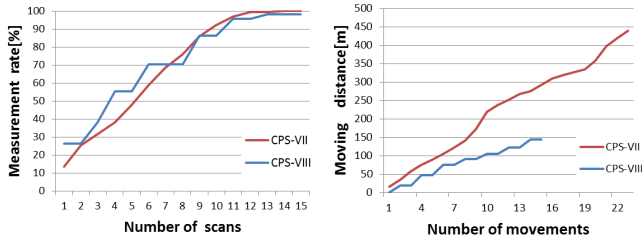
4 実験

4.1 シミュレーション

本稿で提案した自動計画と CPS-VII の自動計画を、計算機シミュレーションを用いて比較した。シミュレーションでは二次元地図を準備し、各ロボットの初期地点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、計算機シミュレーションでは親ロボットの環境測定可能範囲を $60[\text{m}]$ 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を一切持たず、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。パラメータ α 、 β はそれぞれ、 $\alpha = 0.01$ 、 $\beta = 0.001$ とし、また、 $\alpha_c = 100$ 、 $\beta_c = 1$ とした。図 6 に計測回数と計測領域および移動回数と移動距離の関係を示す。

図 6 では、CPS-VII と CPS-VIII において、計測回数あたりの計測率に大きな差は見られないが、移動距離に注目すると、CPS-VIII での自動計画を用いた場合は、移動距離が短くなっている。

また、CPS-VIII では環境計測と位置同定を同時に行うので、計測回数と移動回数が一致し、CPS-VII を用いた場合と同一の計測回数ならば、移動回数が減少する傾向がある。移動距離 1[m] 当たりの計測率の上昇値 (移動効率) は、CPS-VII が 0.227[% /m] であったのに対し、CPS-VIII では 0.681[% /m] であり、移動効率が 3 倍に向上した。



(a) measurement rate (b) moving distance
Fig.6 Comparison of measurement rate and moving distance

4.2 実環境における動作実験

提案した自動計画手法を CPS-VIII の実機 (図 2) に搭載し屋外環境での確認実験を行った。図 7 に実験の様子を示す。実験では 4 台の子ロボットを用い、建物を一周し環境地図を取得した。得られた 3 次元点群を図 8 に、親ロボットが環境計測を行った地点を図 9 に示す。また、計測を行った環境の写真と 3 次元形状の比較を図 10 に示す。親ロボットは図 9 の上図の赤丸の地点から計測を開始し、中央の建物を反時計回りに一周し 14 回の計測を繰り返した。計測時の親ロボットの総移動距離は 270.1[m] であった。なお、自動車との衝突防止などの安全性の観点から、図 9 の上図の青丸で示した部分では、自動計画により決定された観測地点から可能な限り近く、安全な地点をオペレータが選択することとした。



Fig.7 Outdoor experiment



Fig.8 3D model created by CPS-VIII

また、計測により得られた環境地図を用いて、位置同定誤差測定を行った。位置同定誤差の計測は図 9 の上図で囲んだ地点で行い、環境内を一周する前後での 6 箇所での 3 次元座標の位置のずれを計測した。なお、環境内を一周した前後でのループによる位置同定誤差の補正は行っていない。

位置同定誤差の測定実験の結果、誤差計算に用いた 6 箇所における 3 次元座標のずれの平均は 0.02306[m]、距離に対する誤差の割合は 0.0085% であった。



Fig.9 Route planned by the proposed algorithm



Photos 3D models
Fig.10 Comparison with photos and 3D models

5 まとめ

大規模環境のレーザ計測システムである CPS-VIII を開発し、自動観測計画手法を提案した。また、実環境において実験を行い、高精度な三次元環境地図が取得できることを確認した。

謝辞

本研究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

References

- [1] 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
- [2] Yukihiro Tobata, Ryo Kurazume, Yusuke Noda, Kai Lingemann, Yumilwashita, 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] 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.
- [4] Chatila.R: “Path planning and environment learning in a mobile robot system”, Proc. European Conz Artificial Intelligence, Torsey, France, 1982.
- [5] Mark de Berg et al., Computational Geometry: Algorithms and Applications, Springer, 1997.