

群ロボットを用いた大規模3次元環境計測システム

戸畑 享大(九州大学) 倉爪 亮(九州大学) 村上 剛司(九州大学) 長谷川 勉(九州大学)

3D laser measurement system using multiple mobile robots

*Yukihiro TOBATA (Kyushu University), Ryo KURAZUME (Kyushu University),
Kouji MURAKAMI (Kyushu University), Tsutomu HASEGAWA (Kyushu University)

Abstract— We propose a system named the “ CPS-SLAM ” to generate highly reliable environment map even in an unknown and rough environment. The local range images obtained by onboard laser range finder can be converted to the world coordinate system directly with simple transformation calculation using the high precise positioning system method named “ CPS ”. The measurement experiments in unknown and large indoor/outdoor environment, especially for the accuracy comparison of generated maps for two moving strategies, are presented.

Key Words: SLAM, 3D map, Multiple robot, Cooperative positioning, Laser range finder

1. はじめに

ロボットタウンでは、タウンマネジメントシステムがタウン内の地図を含む環境情報を一元管理し、ロボットからの問い合わせに応じて必要な情報を適切な精度、粒度で提供することが想定されている。なかでも地図情報は移動ロボットにおける最も基本的な環境情報であるが、車輪型、脚型など移動形態の違うロボットを同時に用いる場合、通常の平面的な地図だけでは不十分であり、段差やスロープなど3次元的な構造情報を含む地図が不可欠である。しかし多くの場合、広範囲で詳細な3次元環境地図は図面等では用意されておらず、実際に現場で計測し、製作する必要がある。これをロボットにより自動的にに行わせる有力な手段として、自律移動ロボットによるSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) の利用が考えられる。SLAMとは、移動ロボットが自己位置同定とロボット周囲の環境計測を繰り返し行ないながら移動することで、移動経路周囲の環境地図を作成する手法であり、移動ロボットの分野で盛んに研究が行なわれている。

高精度な環境地図を作成するSLAMの実現には、以下の2つのサブシステムが重要となる。

- (1) 高精度な自己位置同定サブシステム
- (2) 高精度な環境計測サブシステム

しかし、(1)については、オドメトリなどの従来提案されている自己位置同定手法では凹凸面や高低差のある環境での精度が低く、また観測履歴を元に逐次的に自己位置を同定するSLAMシステムでは、特徴的なランドマークが必要であり、観測装置の誤差の蓄積などの問題がある。また、GPSによる位置同定は、使用可能な環境に限られており、例えば屋内環境では使用することができない。一方、(2)については、近年、比較的安価で精度のよいレーザレンジファインダが多用されている。

我々はこれまでに、移動ロボットの高精度な位置同定手法として、群ロボットによる協調ポジショニングシステム (Cooperative Positioning System , CPS) を提案している [1]。このシステムは、レーザによる相対位

置計測システムを搭載した複数の移動ロボットを協調的に動作させ、全くの未知、不整地環境でも従来の内界センサとは比較にならない高精度の位置同定を実現するものである。我々はこれまでに、本手法とロボット搭載型レーザ計測装置を組み合わせることで、ICP法などの後処理や密な測定を必ずしも必要とせず、またGPSが利用困難な環境でも高精度な環境地図の作成が可能で、移動ロボット群によるSLAM (CPS-SLAM) を提案した [3],[4]。本稿では、構築したCPS-SLAMシステムを用いた屋内外大規模環境地図作成実験の結果を紹介する。特に、群ロボットの移動形態の工夫により環境地図の構築精度が格段に向上することを示す。

2. 協調ポジショニングシステム (CPS)

協調ポジショニングシステムとは、複数の移動ロボットを2つのグループA,Bに分け、グループAのロボットが移動している場合にはグループBは静止し、グループAの移動終了後にグループBからの相対位置をレーザなどで精密に計測する作業をA,Bが繰り返し行うことで、未知不整地環境でも移動ロボット全体として高精度な位置同定を実現するものである。CPSの例を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により、子ロボットの位置、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てある親ロボットを静止させ、

- (1) 子ロボット1,2を矢印のように移動させた後、停止させる。
- (2) 親ロボットに搭載した計測器により、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) 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) 親ロボットを矢印のように移動、停止させ、親ロボットにより子ロボット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．これまで高低差 10m を含む 323.9m の屋外長距離の移動実験の結果，移動後の位置誤差が 0.97m (移動距離の 0.3%) という高い同定精度を確認している [2] ．

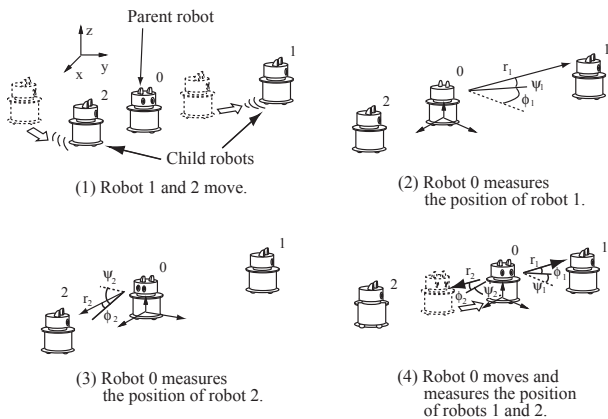


Fig.1 協調ポジショニングシステム (CPS)

3. 群ロボットを用いた3次元環境地図作成システム

我々はこれまでに，前章で示した協調ポジショニングシステム (CPS) とレーザ計測装置を組み合わせた第5次 CPS 機械モデル CPS-V を構築し，大規模建造物内外における3次元環境地図作成実験を行なっている [4] ．本章では，まず CPS 機械モデル CPS-V を紹介し，生成する環境地図の精度向上を目指した追加実験とその結果を示す．

3.1 第5次 CPS 機械モデル CPS-V

Fig.2 に2次元レーザレンジファインダを搭載した第5次 CPS 機械モデル CPS-V 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2次元レーザレンジファインダ (LMS 200, Sick) と，子ロボットとの相対位置算出のための測量用トータルステーション (AP-L1, TOPCON Ltd.) (Table 1) ，及び重力方向に対する傾きを検出するための2軸姿勢センサを搭載している．また，本体上部に搭載した回転テーブルを垂直軸周りに回転させ，回転を行いながら2次元レーザレンジファインダからスライス状の距離データを連続して計測することで，ロボット周囲の3次元距離データを得ることができる．この3次元距離データの取得作業を CPS 動作による移動，位置同定と組み合わせ，未知環境においても高精度な3次元環境地図を作成する．

AP-L1 (TOPCON Ltd.)	
Range	4 ~ 400[m]
Resolution (distance)	0.2[mm]
Resolution (angle)	5
Precision (distance)	$\pm 3 + 2\text{ppm}$ [mm]
Precision (angle)	± 5

Table 1 トータルステーション AP-L1

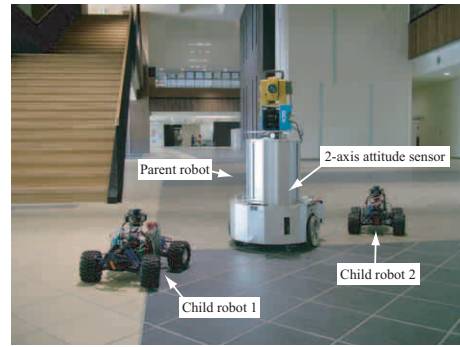


Fig.2 第5次 CPS 機械モデル CPS-V

3.2 屋内環境地図作成実験

構築した第5次 CPS 機械モデル CPS-V を用い，屋内空間における3次元環境地図の構築実験を行った [4] ．

実験では各ロボットを1回約4mずつ交互に移動させ，親ロボットが静止した地点で親ロボットに搭載した回転ステージを垂直軸周りに回転させてレーザレンジファインダにより計測し，得られた3次元距離データから環境構造を測定した．

親ロボットの移動軌跡を Fig.3 に示す．親ロボットは最大で， x 軸方向に 39m ， y 軸方向に 10m 移動し，2台の子ロボットは，親ロボットの次の環境計測予定地点，及び前回環境計測を行なった地点でそれぞれ停止させた．また，実験の結果得られた3次元地図を Figs.4,5 に示す．それぞれの図中の3次元地図内に開いた穴は，親ロボットが環境計測を行った位置を表しており，親ロボットはこれらの地点から移動中にレーザによる環境計測を23回行った．実験の結果，異なる地点において取得した3次元点データを，CPSによって同定された位置情報のみを用いて位置合わせすることで，ICP法等の後処理を全く用いることなく3次元環境地図が生成できることが確認できた．なお，本実験の結果得られた CPS の位置同定誤差は，親ロボットの総移動距離 86.21m に対し，1.25m (総移動距離の 1.45%) であり，この誤差は第2章で示した従来の CPS による位置同定精度 [2] に比べて著しく大きい．このため，例えば Fig.3 中に示す Corner において，第1回目の観測結果と第23回目の観測結果を比較した場合，Fig.7(a) に示すように 1.17m のずれが生じている．

本実験におけるこのような大きな誤差蓄積の主な原因として，

- (1) 位置同定用レーザレンジファインダの誤差特性
- (2) 移動に伴う CPS 動作の反復回数

の2つが考えられる．(1) はロボット間の距離測定時に発生する誤差である．トータルステーション (Table 1) の測定誤差の特性として，測定対象までの距離が 5m 以下の場合，測距誤差は急激に増加することが分かっている [5] ．本実験では，子ロボットと親ロボットの相対距離を約 4m に保って移動させたため，測定誤差が特に大きかったと考えられる．また (2) については，22回の CPS 動作を繰り返したために，誤差が大きくなり蓄積したことが考えられる．CPS はデッドレコニング等と比べれば誤差の蓄積は小さいものの，高精度な位置同定

には、できる限り少ないCPS動作回数での移動が望ましい。一方で、密な3次元環境地図の構築にはできるだけ多くの観測が必要である。ところが、CPSの特性の一つに、ロボットが次の位置同定目標地点までの移動中に何か作業を行ったり、障害物と衝突したとしても、CPSによる位置同定精度には何ら影響がないことがある[1]。そこで、本システムにおいては、親ロボットの位置同定精度は子ロボットの移動回数に大きく依存することから、子ロボットをできる限り動かさないように広範囲に散らばって静止させ、親ロボットだけが短い移動、子ロボットの観測による位置同定、レーザによる環境計測を繰り返すことで、前述の実験よりも高精度な環境地図の生成が可能であると考えられる。

この手法の精度検証のため、親ロボットの移動経路は前述の実験と同様とし、子ロボットはできるだけ少ない移動回数となるように移動させて、同様に環境地図を生成した。親ロボットの移動軌跡をFig.6に示す。実験では、親ロボットの移動回数22回に対し、それぞれの子ロボットの移動回数は5回とした。実験の結果得られたCPSの位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離93.9mに対して0.22m(総移動距離の0.24%)であった。またFig.6中に示すCornerの移動前後の位置を比較した結果、Fig.7(b)に示すように誤差は0.22mとなり、(a)と比較して格段に精度が向上したことが確認できた。

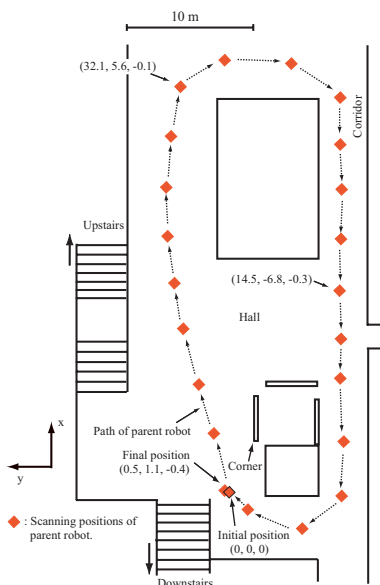


Fig.3 親ロボットの移動軌跡

3.3 大規模建造物の3次元形状計測実験

次に屋外環境において建造物の3次元形状計測実験を行った。計測は屋外13地点から行い、建造物側面の3次元形状を計測した。親ロボットの移動軌跡をFig.8に、計測結果をFig.9に示す。本実験における位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離147.7mに対し、0.63m(総移動距離の0.43%)であった。また、従来のようにICP法を適用するために点データの分布が十分に重なるように測定しなくても、単純な形状の計測対象に対しては少ない計測回数で3次元環境構造が得られるこ

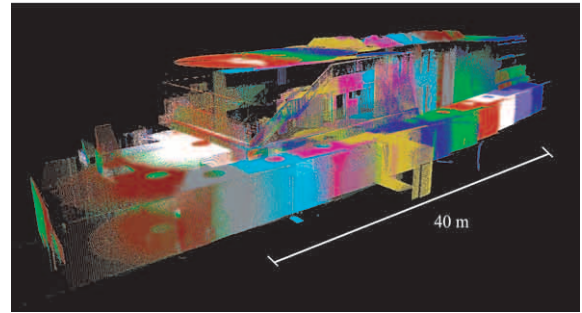


Fig.4 屋内3次元環境(全体図)



Fig.5 屋内3次元環境

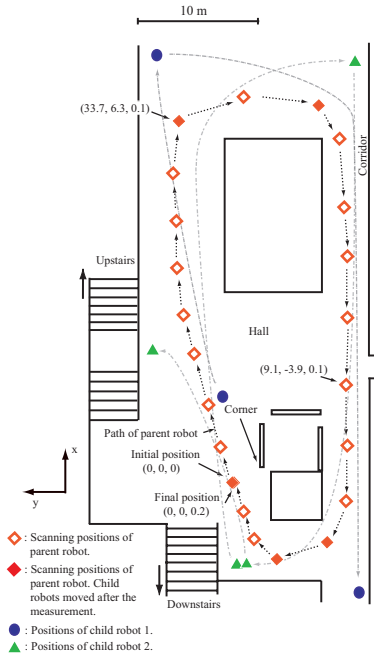
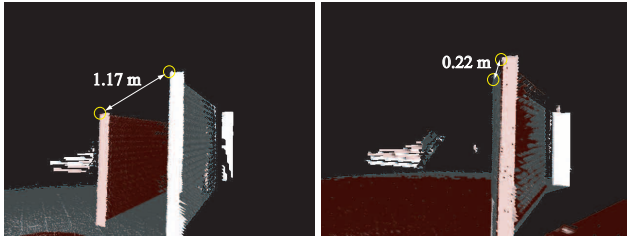


Fig.6 親ロボットの移動軌跡(子ロボットの移動回数が5回の場合)

とを確認した。

3.4 起伏のある屋外環境における3次元計測実験

次に、高低差約3mの起伏のある屋外環境で実験を行った結果をFig.10に示す。親ロボットは2軸姿勢センサを搭載しており、傾いた地形でも本体姿勢を補正することで、子ロボットの計測やレーザ計測が可能である。環境における位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離130.6mに対し、0.80m(総移動距離の0.61%)であった。このように起伏のある屋外環境においても、屋内環境と同様に本システムが有効であることが分かる。



(a) 子ロボットの移動 22 回 (b) 子ロボットの移動 5 回

Fig.7 3 次元モデルの誤差

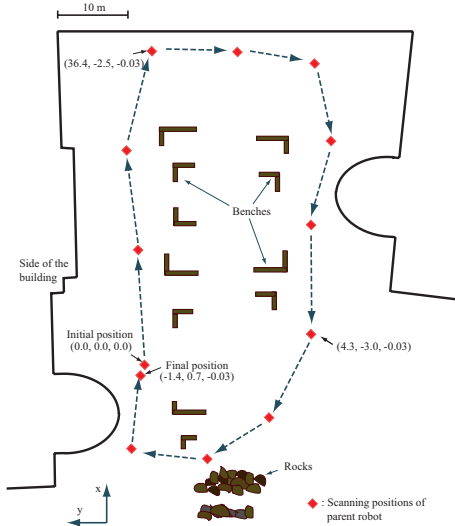


Fig.8 親ロボットの移動軌跡



Fig.9 大規模建造物の 3 次元形状

4. まとめ

本論文では、群ロボットによる協調ポジショニング法 (CPS) と移動可能なレーザ計測装置を組み合わせた第 5 次 CPS 機械モデル CPS-V を用い、生成する環境地図の高精度化を目指した実験とその結果を示した。本システムは ICP 法などの後処理や密な測定を必ずしも必要としないことから、大規模建造物の 3 次元レーザ計測を高速かつ完全に自動化できる可能性がある。屋

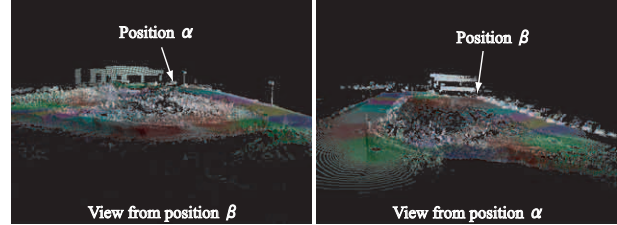
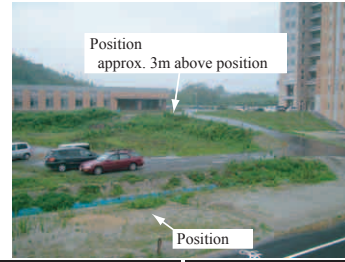


Fig.10 高低差のある屋外 3 次元環境

内外環境における 3 次元計測実験の結果から、ロボットが CPS 動作回数が最少となる移動形態で移動することにより、より高精度な 3 次元環境地図が生成できることを確認した。また、高低差のある屋外環境においても本システムが有効であることが示された。

今後は、現在はオペレータの指示により行われている計測地点の選択と群ロボットの移動、実際のレーザ計測作業を自動化したシステムの開発を目指すとともに、状況に応じて ICP 法と組み合わせることで、移動ロボット群の位置同定精度および 3 次元環境地図の高精度化を図る。

謝辞 本研究は、文部科学省の平成 18 年度科学技術振興調整費による「科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進」の一環として実施したものであり、また一部は文部科学省科研費補助金基盤 B 「ロボット群と環境固定センサ群の相互支援による人間・ロボット共生環境の情報構造化 (18360124)」および「5 感センサネットワークによる被災建造物内 RT システムの開発 (19360119)」の助成を受けて行われました。

- [1] 広瀬茂男, 倉爪亮, 長田茂美, “ 群ロボットによる協調ポジショニング法,” 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.838-845, 1995.
- [2] 倉爪亮, 広瀬茂男, “ 協調ポジショニングシステムの研究 (第 8 報: CPS-III による長距離移動測定実験), ” 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.169-170, 1998.
- [3] 戸畑 享大, 倉爪亮, 村上 剛司, 長谷川 勉, “ CPS SLAM の研究 (CPS-V の構築と SLAM 実験), ” 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2N17, 2006.
- [4] 戸畑 享大, 倉爪亮, 山田 弘幸, 村上 剛司, 長谷川 勉, “ CPS SLAM の研究 (第 2 報: CPS とレーザ計測による屋内 3 次元地図の自動構築実験), ” 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2P1-G04, 2007.
- [5] 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.