群ロボットによる3次元環境計測と地図生成*

戸畑 享大 *1, 倉爪 亮 *1, 村上 剛司 *1, 長谷川 勉 *1

3D laser measurement and map generation by cooperative multiple robots

Yukihiro TOBATA*2, Ryo KURAZUME*2, Kouji MURAKAMI*2 and Tsutomu HASEGAWA*2

*2 Dept. of Intelligent Systems, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka 819-0395 Japan

In order to construct three-dimensional shape models of large-scale architectural structures using a laser range finder, a number of range images are normally taken from various viewpoints, and these images are aligned using post-processing procedures such as the ICP algorithm. The present paper proposes a new measurement system for large-scale architectural structures using a group of multiple robots and an on-board laser range finder. Each measurement position is identified by a highly precise positioning technique called Cooperative Positioning System (CPS), which utilizes the characteristics of the multiple-robot system. Measurement experiments in unknown and large indoor/outdoor environments are successfully carried out using the newly developed measurement system consisting of three mobile robots named CPS-V. Path planning experiments using 2D grid map generated from 3D local range data are also introduced.

Key Words : SLAM, 3D map, Multiple robot, Cooperative Positioning, Laser range Finder

1.はじめに

我々は,震災により倒壊した建物内部や崩落した坑 道,洞窟内などの極限環境において,人間や探索犬に代 わり走破性能の高い複数の移動ロボットを導入し,内 部状態の調査と要救助者の探索,発見を協調的に行う ロボットシステムの開発を行っている.倒壊した建物や 坑道の内部は,事前に環境構造を得ることが不可能で あり,全く未知の環境においてロボットの移動と環境 構造の獲得を同時,あるいは逐次的に行う必要がある. このような未知環境においてロボットが移動,定位,計 測を繰り返す手法は,SLAM(Simultaneous localization and mapping)と呼ばれ,現在精力的に研究が行われて いる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.

SLAM において高精度な環境地図を構築するには, 移動ロボットには以下の2つのサプシステムが必要となる.

- (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

(1) については,従来提案されているオドメトリベー スの自己位置同定手法では,特に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一般的な SLAM システムでは 特徴的なランドマークの必要性, 観測誤差の蓄積など の問題がある.さらに, GPS による位置同定は使用可 能な環境が限られており, 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,費用・精 度の面からレーザレンジファインダを用いたシステム が近年多用されている.

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⁽⁷⁾.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,通常 異なる位置から計測されたレンジデータの位置合わせ に不可欠な ICP 法⁽³⁾⁽⁴⁾などの後処理,或いは密な測定 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な, CPS を利用し た移動ロボット群による SLAM (CPS-SLAM)を提案 した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾.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.また,構築した高精度3次元環境地図を基に

^{*} 原稿受付 2007 年 10 月 22 日

^{*&}lt;sup>1</sup> 九州大学システム情報科学府知能システム学専攻 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 Email: tobata@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

グリッドベースの2次元地図を構築し,ロボットの移動経路計画を行った例を示す.

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 例を図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⁽⁸⁾.



3. 群ロボットを用いた3次元環境地図作成システム

本章では,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,移動ロボットがレーザ計測を繰り返しながら大規模建造物の周囲を巡回し,その計測位置をCPSにより正確に測定することで,ICP法などの後処理も用いなくても大規模建造物の全体像を精度良く求めることができるシステムを提案する.本章では,まずレーザ計測装置を搭載したCPS機械モデルCPS-Vを紹介し,次にCPS-Vを用いた屋内外環境地図作成実験の結果を示す.

3.1 第5次 CPS 機械モデル CPS-V 図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 (P-cle, Parent mobile unit, 図 4) と 2 台の子口 ボット (HPI Japan 製, 図 3) 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 (GTS-825A, TOPCON Ltd.)(表1)を搭載し ている.この2次元レーザレンジファインダは,スリッ ト状の距離データを最大 80m,角度 180°の範囲で得 ることができる(表2).また,親ロボットは,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, ロボット全周囲の3次元距離データを得ることができ る (図 4). なお,一回の全周囲の距離データ取得に要 する時間は 37.8 秒である.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.



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.

実験では,子ロボットをできるだけ広域に配置する ように移動し,静止している子ロボットをランドマー



Fig. 3 子ロボット



Fig. 4 親ロボット搭載の Yaw 軸回転ステージを利 用した 3 次元レーザ計測

GTS-825A (TOPCON Ltd.)		
Range	1.3 ~ 2,200[m]	
Resolution (distance)	0.2[mm]	
Resolution (angle)	3	
Precision (distance)	± 2 + 2ppm[mm]	
Precision (angle)	± 5	

Table 1 トータルステーション GTS-825A

LMS 200 (SICK Corp.)	
Range	80[m]
Field of view	180 °
Resolution (distance)	10[mm]
Resolution (angle)	0.5 °

Table 2 レーザレンジファインダ LMS200

クとして,親ロボットが移動と停止・位置同定・環境 計測を繰り返した.親ロボットの移動軌跡を図5に示 す.本実験では,親ロボットの移動回数22回に対し, 子ロボットの移動回数は5回とした.実験の結果,親 ロボットは最大で x 軸方向に43m, y 軸方向に13m 移動し,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%), yaw 軸周りの角度誤差は1.5°であった.図 6,7 に構築した3次元環境地図を示す.但し,図7のそ 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にレーザによる環境計測を23回 行った.また,a2とb2は点で,c2は得られた点デー タに三角パッチを貼り,面で表示している.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.



Fig. 5 屋内実験における親ロボットの移動軌跡



Fig.6 取得した3次元環境地図(全体図)

3.3 大規模建造物の3次元形状計測実験 次に 同様に CPS-V を用い,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 トの移動軌跡を図8に,計測結果を図9,10に示す.こ のように屋外環境においても,屋内環境と同様に本シ



(a1)







(b1)







(c1) (c2) Fig. 7 取得した 3 次元環境地図



Fig. 8 屋外実験における親ロボットの移動軌跡

ステムにより環境地図の作成が可能であることが分かる.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する必要がなく,単純な形状の計測対象に対しては少ない計測回数 で3次元環境構造を得ることができる.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147.7 m





Fig.9 建造物の3次元形状



(a1)

(a2)



(b1)

(b2)



Fig. 10 建造物の3次元形状

に対し,0.63m(総移動距離の0.43%), yaw 軸周りの 角度誤差は0.9°であった.

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 た結果を図 11 に示す.親ロボットは図 12 に示す軌跡 で移動した.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.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130.6m に対し,0.80m(総移動距離の0.61%),yaw軸周りの 角度誤差は0.7 °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 効であることが確認された.



Fig. 11 高低差のある屋外3次元環境



Fig. 12 高低差のある屋外環境における親ロボットの 移動経路

3.5 2次元地図の作成と経路計画 これまでの実 験では,移動ロボットの移動目標,計測地点などは,す ベてオペレータが自らの目で直接観察し,ロボットを 誘導していた.しかし,本システムの目標である倒壊 建物内部の3次元環境計測では,オペレータが移動環 境を直接確認できず,またビデオカメラを搭載する場 合でも,奥行き情報の欠如から正確で安全,あるいは 大域的な経路計画は難しい.これに対し,CPS-SLAM により得られた移動途中の3次元環境地図を積極的に 用い,次の計測目標地点やその地点までの安全な移動 経路の探索などを行う手法が考えられる.本手法は, 取得した移動環境の3次元構造をもとに,任意視点からの画像を自由に合成でき,オペレータが環境構造や 適切な移動経路を直感的に把握しやすいという利点が ある.

そこで図13に示す屋外環境で,3次元計測と経路計 画を交互に行う実験を行った.本実験では,図16に 示すような3次元環境地図から直接生成できる任意視 点画像に加えて,ある地面から一定の高さの平面地図 を作成し,これらを用いて経路計画を行った.この-定高さの平面地図は,まずある時点までに獲得した3 次元環境の点データから,一定の高さの点データを抽 出し,次にそれを平面を一様な四角形領域で分割した グリッド地図へ変換することにより作成した.点デー タからグリッド地図への変換には,記憶容量の少ない Ouadtree 形式を用い, 最小のグリッド幅は 20cm とし た.本手法による点データから高さ一定のグリッド地 図への変換時間は 0.06 秒 (Pentium(R) 4 CPU 3.00GHz × 2,1.00GB RAM) であり, 必要に応じて3次元環境 地図から任意の高さの平面地図を瞬時に作成できるこ とが確認された.

実験の結果,親ロボットは最大で x 軸方向に 106m, y 軸方向に 33m 移動し, 建物周囲を合計で 220m 移動 した.親ロボット移動経路を図14に,実験の結果得ら れた3次元環境地図を図15,16にそれぞれ示す.また, 図 17 に獲得したグリッド地図とそれに基づく経路計 画の様子を示す.図中の赤色の四角印は親ロボットの 環境計測位置を, 黄色の三角印は計画された次回の計 測目標位置を示している.なお,本実験では計測目標 位置の決定と実際のロボットの移動は,安全のためオ ペレータにより途中に障害物がないことを確認しなが ら手動で行った.また,レーザレンジファインダから 取得する距離データは,計測対象がセンサから遠くな るに従い疎なデータとなるため,センサからの距離が 10m 以内 (データ中の点間距離が 9cm 以内)となる 位置で,かつグリッドの存在しない位置を親ロボット の次回の移動目標位置とした.



Fig. 13 建物に囲まれた実験環境



 Fig. 14
 親ロボットの移動経路(建造物に囲まれた環 境での実験)



Fig. 15 構築した3次元環境地図



(a) 実験環境(b) 構築した環境地図Fig. 16 構築した 3 次元環境地図

4. ま と め

本論文では,移動ロボットの高精度位置同定手法で ある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移動ロボッ ト群による大規模3次元レーザ計測システムを用いて 行なった,屋内外環境における3次元環境地図構築実 験の結果を示した.実験により,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高精度な環境地図を 構築することが確認された.また,完全に自動化され たシステムへの拡張を目指し,取得した3次元点デー タから2次元地図を作成し,移動ロボットの経路計画 に利用する実験を行った.尚,今回の実験では,得ら れたグリッド地図は障害物の有無の判断にのみ用い, 移動目標地点の自動的な選択などは行っていない.



 (g) Position 15
 (h) Position 19

 Fig. 17
 各地点における親ロボットの位置

今後は,作成した2次元地図を用いて経路計画を完 全に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.

文 献

- K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda : "Bayon Digital Archival Project, " In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pages 334-343, Nov. 2004.
- (2) Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan

Shade, and Duane Fulk : "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues", Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000,pp.131-144, Jul. 2000

- (3) P. J. Besl and N. D. McKay : "A method for registration of 3-D shapes,"IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 14(2) 1992, 239-256.
- (4) Y. Chen and G. Medioni: "Object modelling by registration of multiple range images," Image and Vision Computing 10(3), 1992, 145-155.
- (5) H. Zhao, R. Shibasaki : "Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne lase range scanners and line cameras," Machine Vision and Applications, vol. 14, pp. 35-41, 2003.
- (6) K. Ohno, T. Tsubouchi, S. Yuta : "Outdoor Map Building Based on Odometory and RTK-GPS Positioning Fusion," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 684-690, New Orleans, LA, Apr. 2004.
- (7) S. Hirose, R. Kurazume, S. Nagata : "Cooperative Positioning System with Multiple Robots," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 13, no. 6, pp. 838-845, Sep. 1995.
- (8) R. Kurazume, S. Hirose : "Study on Cooperative Positioning System," Proc. the 16th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, pp.169-170, Oct. 1998.
- (9) R. Kurazume, S. Hirose, T. Iwasaki, S. Nagata : "Study on Cooperative Positioning System -Map creation by CPS Based Active Touch," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 17, no. 1, pp. 84-90, Jan. 1999.
- (10) Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa : "Study on CPS SLAM: SLAM experiments using CPS-V and LRF," Proc. the 24th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2N17, Sep. 2006.
- (11) Y. Tobata, R. Kurazume, H. Yamada, K. Murakami, T. Hasegawa : "Study on CPS SLAM: Automatic construction of 3D map by CPS and laser range finder," Proc. robomec '07, 2P1-G04, 2007.
- (12) Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa: "3D laser measurement system using multiple mobile robots," Proc. the 25th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 1134, Sep. 2007.
- (13) R. Kurazume, S. Hirose, T. Iwasaki, S. Nagata, N. Sashida : "Study on Cooperative Positioning System Optimized Moving Strategy for the CPS- system," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 15, no. 5, pp. 773-780, July 1997.
- (14) Andress Nuchter and Hartmut Surmann : "6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1998-2003, 2004.
- (15) Jan Weingarten and Roland Siegwart : "EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 2089-2094, 2005.
- (16) David M . Cole and Pual M . Newman : "Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outoor Environment," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1556-1563, 2006.