

ロボット群による大規模実環境の高精度レーザ計測

鄭 龍 振^{†1} 岩下 友美^{†2}
倉 爪 亮^{†2} 長谷川 勉^{†2}

我々は複数台の移動ロボットによる協調位置同定作業と、ロボットに搭載したレーザ計測装置による3次元計測により、大規模な3次元環境地図を構築するCPS-SLAMを提案している。本報告では、提案システムの精度を従来の約10倍（移動距離比0.03%）に高めた新たな群ロボットによる環境計測システムを紹介し、屋内外における計測精度評価実験の結果を示す。また本システムと併用して用いる、複数RGB-Dカメラを搭載した環境計測ロボットおよび計測実験を紹介する。

Laser-based modeling of large-scale environment using multiple mobile robots

YONGJIN JEONG^{†1}, YUMI IWASHITA^{†2},
RYO KURAZUME^{†2} and TSUTOMU HASEGAWA^{†2}

We have been proposing a high precision laser-based 3D measurement system by multiple mobile robots. This system is composed of three mobile robots consisting of a parent robot and two child robots. The parent robot is equipped with a 3D laser scanner, attitude sensor and a total station, and the child robots are equipped with corner cubes. The parent robot moves and stops repeatedly, and measures the 3D shape using the equipped laser scanner at several positions. Meanwhile, the child robots also move and stop repeatedly, and act as mobile landmarks for the positioning of the parent robot. This paper presents some improvements of the proposed system by replacing and installing several devices to make the positioning accuracy higher. The experimental results show the system achieves quite high accuracy of the 0.03 % of target's size. The omni-directional sensing robot equipped with four RGB-D cameras and its measurement experiments are also introduced.

1. はじめに

現存する大規模な歴史的建築物をデジタル計測し、その見えや形状をデジタルデータとして永久保存するデジタルアーカイブの研究が各地で行われている¹⁾²⁾。またデジタルデータ化の対象は文化財に留まらず、道路やトンネル、炭鉱、プラントなどの大規模建造物の現況データ作成でも、施工品質管理を目的に同技術が使用され始めている³⁾⁴⁾⁵⁾。

我々はこれまでにレーザ計測作業の自動化、省力化を目的に、複数台の移動ロボットによる協調動作とロボットに搭載したレーザ計測装置による3次元計測により、大規模建造物の形状モデルを構築するシステムを提案している（図1⁶⁾⁷⁾）。またその実用として、これまでに太宰府天満宮（福岡市）を始めとした広域文化遺産の3次元デジタルモデルの作成と保存に成功した⁸⁾。本システムは、測量用トータルステーション、測量用コーナミラー、

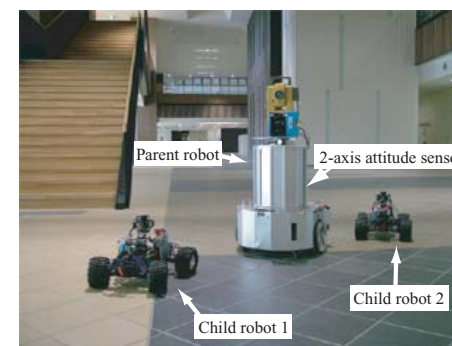


図1 3次元環境計測システム, CPS-V

レーザ計測装置、デジタルカメラを搭載した複数台の親子ロボットを用い、親子ロボットが三辺測量法によりそれぞれの位置を確定しつつ、搭載したカメラやレーザ計測装置により多くの視点からデジタルデータを取得するものである。本システムの最大の特徴は、ロボットの位置同定に、群ロボットによる協調的ポジショニング法 (Cooperative Positioning

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

^{†2} 九州大学大学院システム情報科学研究所
Kyushu University, Faculty of Information Science and Electrical Engineering

System, CPS)⁹⁾を採用することで、建築物周囲の多くのレーザ計測位置を、GPS や慣性ユニット (IMU) などの従来手法とは桁違いの高精度で同定できることである。この機能により、従来必須であったレーザ計測結果の統合処理など後処理にかかる手間をほぼ完全にゼロにすることに成功し、デジタルデータの高精度化と計測作業の迅速化、省力化を実現した。

本論文では、開発したシステム (図 1⁶⁾) の更なる精度向上を目指し、上記システムに対して各種センサの変更や自動整準器の導入などにより、計測精度の飛躍的な向上を図った新たなシステムを紹介する。屋内外での精度計測実験の結果、新たに開発したシステムの精度は従来システムの約 10 倍 (移動距離比 0.03%) であり、同様の目的で提案されている様々な SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 手法¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾と比較しても、はるかに小さな誤差に留まることが確認された。さらに本論文では、本システムと併用して用いる、複数台の RGB-D カメラ (Microsoft Kinect) を搭載した環境計測ロボットを紹介し、両者を用いた計測実験の結果を示す。

2. 精度向上を目指したシステム変更

2.1 システムの概要

新たに開発した第 6 次機械モデルを図 2 に示す。本システムはこれまで同様、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットからなる。親ロボットには測量用トータルステーション (TOPCON, GPT-9005A, 表 1)、自動整準台 (リズム, AS-21)、1 軸レーザ計測装置 (SICK, LMS-151, 表 2)、1 軸回転テーブル (中央精機, ARS-136-HP)、2 軸傾斜計センサ (Applied Geomechanics Inc., MD-900-TS, 表 3) が搭載されている。一方、子ロボットには測量用コーナミラー (TOPCON プリズムユニット A3 型)、光リモコン (TOPCON, RC-3) が搭載されている。

表 1 GPT-9005A (TOPCON)

Range	1.3 ~ 3,000m
Angular resolution	0.5"/1"
Accuracy (distance)	$\pm 2mm + 2ppm \times Distance$
Accuracy (angle)	1"

図 3 に示すように、親ロボット上部に縦方向に設置した 1 軸レーザ計測装置は、スリット状にレーザを投射し、反射光の到達時間から縦方向の 2 次元の断面形状が得られる。これを 1 軸回転テーブルで垂直軸周りに回転させることで、全周方向の断面形状を得ることができ

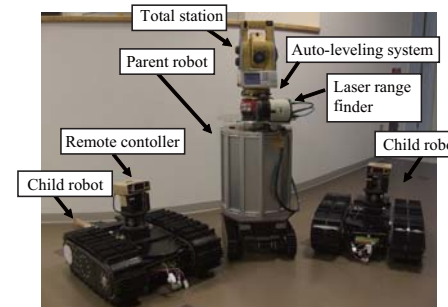


図 2 第 6 次機械モデル CPS-VI

表 2 LMS 151 (SICK AG)

View angle	270°
Angular resolution	0.25°/0.5°
Systematic error	±30mm
Statistical error	±12mm
Scanning frequency	25Hz/50Hz
Max. range	50m

表 3 MD-900-TS (Applied Geomechanics Inc.)

Range	±25°
Resolution	0.004°
Repeatability	0.01° (= 36")
Hysteresis	0.02° (= 1' 12")

る。図 4 に得られた距離データの一例を示す。

一方、親ロボットおよび子ロボットの位置は、群ロボットによる協調的ポジショニング法 (Cooperative Positioning System, CPS)⁹⁾⁶⁾ (図 5) に基づき同定される。本手法は、親ロボットの自動整準台上に設置した測量用トータルステーションから、子ロボットの測量用コーナミラーを計測し、その相対位置から親子ロボットの位置を交互に決定するものである。具体的には、まず (1) 親ロボットが静止した状態で、子ロボット 1, 2 が移動、静止する。次に、(2) 親ロボットが搭載した測量用トータルステーションにより静止した子ロボット 1 の位置を計測し、確定する。同様に、(3) 親ロボットが子ロボット 2 の位置を計測し、確定する。最後に、(4) 親ロボットが移動、静止し、子ロボット 1, 2 を観測して、自身の位置を計測する。各ステップでの詳細は⁶⁾を参照されたい。この CPS を利用することで、親子ロボットは、未知不整地環境においても自身の位置を高精度で同定できる。これまでの実証実験の結果、高低差 10m を含む 323.9m 移動後の位置精度は 0.97m (移動距離の 0.30%)¹⁶⁾であり、オドメトリ (車輪走行距離) 法や IMU 慣性航行など他の手法と比較して高い位置同定精度が実現可能であることが示されている。

また、一般に大規模環境に対して 3 次元レーザ計測を行う場合、オクリュージョンが生じな

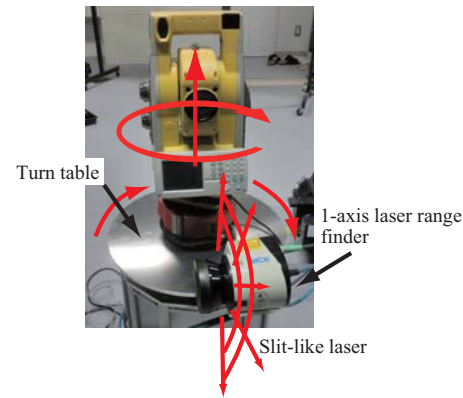


図 3 レーザスキャナと回転テーブルによる計測システム



図 4 計測された 3 次元データ

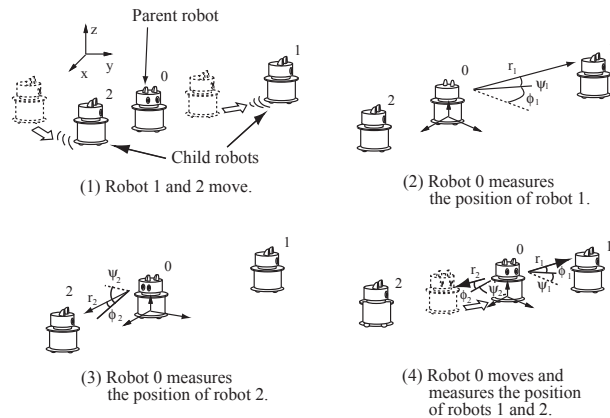


図 5 協調ポジショニングシステム, CPS

いようにレーザ計測装置を多地点に設置して多くの距離画像を取得する。しかし、それぞれの距離画像は計測地点を原点とする局所座標系で記述されているため、それを ICP (Iterative Closest Point) 法などの後処理により統一座標系に変換して、1 つの 3 次元モデルを生成する必要がある。

一方、もしレーザ計測装置を設置した位置が正確に既知であれば、複雑な後処理を必要と

せず、簡単な座標変換により局所座標系を統一座標系に変換できる。そこでこれまでに構築したシステム⁶⁾では、移動ロボットにレーザ計測装置を搭載し、移動ロボットによる計測位置を上述した CPS で正確に計測することで、直接的な座標変換を実現している。手法の詳細を図 6 に示す。各地点で計測された距離画像は、CPS により計測された位置、姿勢により座標変換され、図 7 に示すように統一座標系で表現される。本手法は、CPS による自己位置同定と、レーザ計測装置による環境計測を交互に繰り返すことで、大規模環境の幾何構造を既知の多地点からレーザ計測するものである。

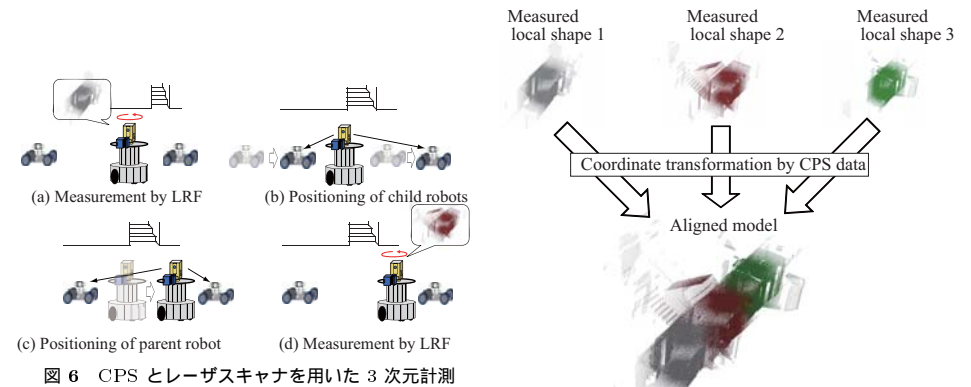


図 6 CPS とレーザスキャナを用いた 3 次元計測

図 7 CPS の測定結果を用いた座標変換

2.2 計測精度の向上に向けた改良

従来の上記システムの計測精度は移動距離の 0.3% 程度であった⁶⁾¹⁶⁾。しかし、本システムで使用しているトータルステーションは測量分野で広く用いられている高精度光波測距儀であり、これまでのシステムではその性能を十分に活用しているとは言い難い。

そこで、より一層の位置同定精度、およびレーザ計測精度の向上を図るため、

- (1) 測量用トータルステーションを AP-L1 (TOPCON) から GPT-9005A (TOPCON) に変更
- (2) レーザ計測装置を LMS200 (SICK) から LMS151 (SICK) に変更
- (3) コーナミラーを A5 型 (TOPCON, プリズム定数 18mm) から A3 型 (TOPCON, プリズム定数 0mm) に変更

などの機器の変更を行うとともに、最も誤差が生じやすいと考えられる姿勢計測誤差の低減を試みた。

測量用トータルステーションが水平に設置されていない場合、仰角、方位角、距離などの計測値は誤差を含む。通常のトータルステーションを用いた測量では、まず横気泡管等を用いて三脚の水平調整を行い、その後トータルステーションに内蔵された精密チルトセンサにより正確に傾斜角度を補正する。しかし、これまでに開発したシステム⁶⁾では、測量用トータルステーション (AP-L1) の計測値は、ロボットに搭載した 2 軸傾斜計センサ (Applied Geomechanics, Inc., MD-900-TS, 図 9, 表 3) により補正されていた。これはトータルステーション内蔵の精密チルトセンサは計測可能範囲が狭く、トータルステーションをロボットに搭載した場合、ロボットの姿勢がこの範囲から逸脱することが多いためである。しかし外付けの 2 軸傾斜計センサはトータルステーションから離れたロボット本体に固定されており、また 2 軸傾斜計センサ自体の精度も精密チルトセンサよりも低いため、2 軸傾斜計センサの角度補正值は不正確である可能性が高い。そこで本システムでは、まず自動整準台 (リズム, AS-21, 図 8,9, 表 4) により機械的にトータルステーション (GPT-9005A) の水平調整を行い、その後、トータルステーション内蔵のチルトセンサ (表 5) により、精密に傾斜角度を補正することとした。図 10 に改良前後のトータルステーションによる計測の手順の比較を示す。

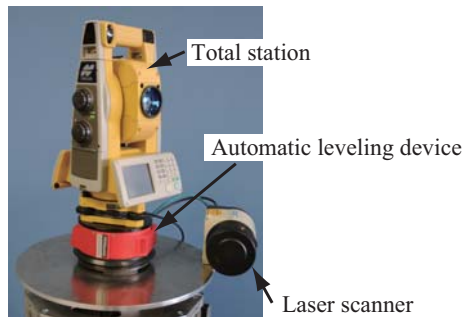


図 8 自動整準システム

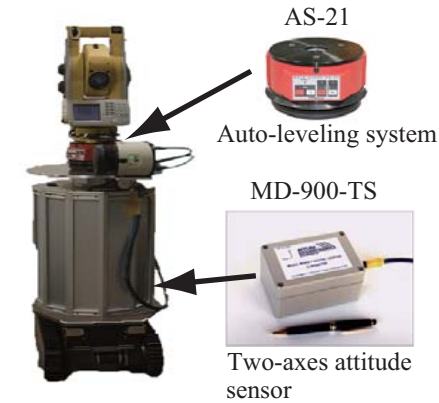


図 9 2 軸姿勢センサ (MD-900-TS) と自動整準システム (AS-21)

表 4 自動整準システム (AS-21, Rizumu)

Leveling accuracy	$\pm 10''$
Max. range	$\pm 4^\circ$

表 5 トータルステーション内蔵 2 軸姿勢センサ (GPT-9005A, TOPCON)

Resolution	$5''$
Max. range	$\pm 6'$

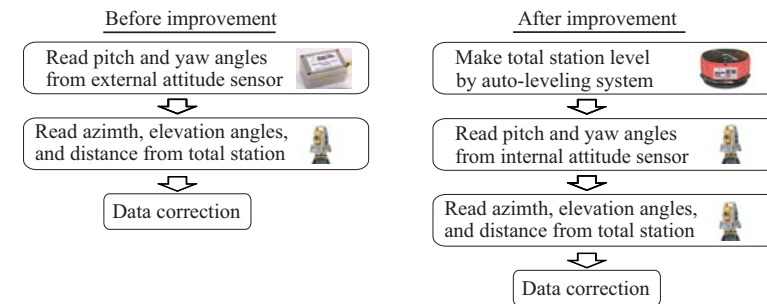


図 10 計測データの補正手順

3. 精度評価実験

3.1 廊下環境における精度評価

改良したシステムの計測精度を確認するため、屋内廊下環境において、3次元モデルの計

測実験を行った。実験環境を図 11 に示す。実験では、ループのある廊下環境を親子ロボットが 210m 移動し、途中の 33 か所から環境をレーザ計測し、約 4034 万点のデータを得た。親ロボットの移動回数は 38 回、2 台の子ロボットの移動回数は 7 回および 8 回であった。実験の結果、得られた 3 次元モデルを図 12 に、ループ状の廊下を一周した前後の計測で、同一のドア部の座標値を比較した結果を図 13 に示す。このドア部の誤差は 98mm (x 方向 93mm, y 方向 25mm, z 方向 19mm) であり、これは比較したデータ取得位置間の移動距離 (180.9m) の 0.054% であった。本実験の結果、改良後の計測精度は従来の移動距離の 0.3%⁽⁶⁾¹⁶⁾ から大きく改善されたことが確認された。



図 11 実験環境 (廊下)

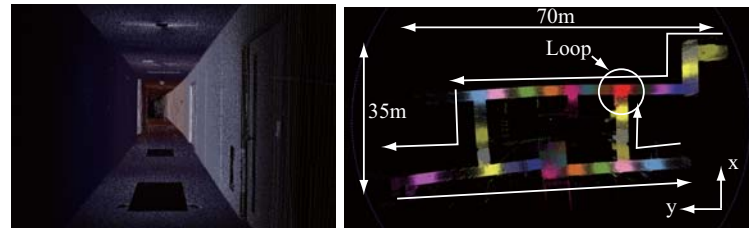


図 12 廊下の 3 次元モデル

3.2 屋外環境における精度評価

同様に屋外環境において 3 次元計測実験を行った。実験では、親子ロボットが建物周囲を 343m、高低差 5m を移動し、20 地点からレーザ計測を行った。得られた 3 次元モデルを図 14 に、親ロボットの移動軌跡を図 15 に示す。建物を一周する前後で計測された同一モデル上の 3 次元点の差は 116mm (x 方向-47mm, y 方向 72mm, z 方向-78mm), 移動

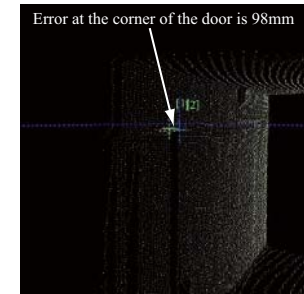


図 13 長距離移動前後の形状比較

距離の 0.034% であった。

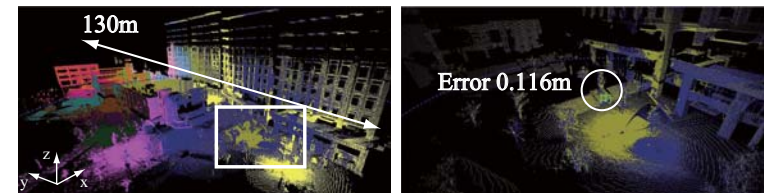


図 14 屋外環境の計測形状と誤差

4. 4 台の RGB-D カメラを搭載した全方向環境計測ロボット

本章では、上述のシステムに併用して用られる、RGB-D カメラを全方向に 4 台搭載したロボットと、ロボットの位置同定手法、および環境計測実験の様子を紹介する。上述した群ロボット計測システムは、レーザスキャナにより高精度な 3 次元環境地図を得ることができるが、1 回の計測に数十秒ないし数分の時間が必要であった。そこで、動的に変化する環境やロボットが移動しながら計測を行うために、より短時間で 3 次元環境地図が得られるシステムとして、RGB-D カメラを搭載した環境計測ロボットを試作した。

4.1 システム構成

開発したロボットシステムを図 16 に示す。このシステムは、上述の群ロボットシステムで用いられる親ロボットと、RGB-D カメラを搭載した環境計測ロボットからなる。環境計測ロボットには、測量用コーナミラー (TOPCON プリズムユニット A7P 型)、および 4

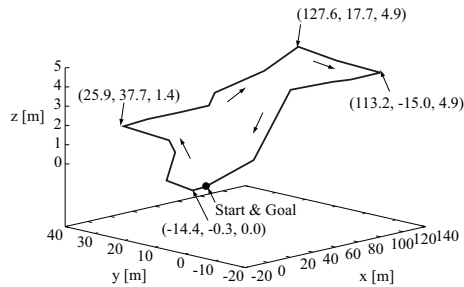


図 15 親ロボットの移動軌跡



図 17 Microsoft Kinect を 4 台搭載した全方向環境計測ロボット

台の RGB-D カメラ (Microsoft, Kinect, 表 6) が前後左右の全方向に搭載されている。

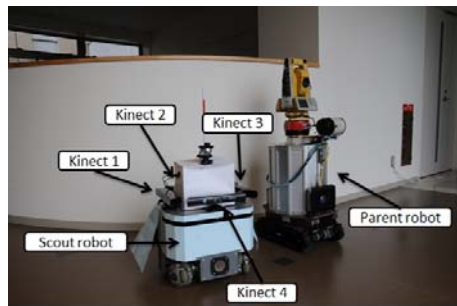


図 16 環境計測ロボットシステム

表 6 使用した RGB-D カメラ (Microsoft Kinect)

Horizontal field of view	57°
Vertical field of view	43°
Image size	640 * 480
Scanning frequency	30Hz
Depth sensor range	1.2m - 3.5m

Microsoft Kinect は、本体から投影したパターン光をカメラで計測することで、高速に距離画像を得ることができる低価格センサである。開発した全方向計測ロボットは、図 17

に示すように Kinect 4 台を前後左右の全方向に搭載し、周辺環境を高速に計測する。データ計測時間は、前章で示した群ロボット搭載レーザ距離計測装置で 45 秒であったのに対し、Kinect の場合 0.03 秒であった。

この全方向計測ロボットの位置は、他の子ロボット同様、親ロボットにより同定される。すなわち、親ロボットから計測ロボットが観測可能な場合、親ロボットに搭載した測量用トータルステーションの自動追尾機構により、計測ロボットに搭載したコーナミラーを連続的に計測し、正確な位置を決定する。また、親ロボットから観測できない場合には、全方向計測ロボット自身のオドメトリにより位置を推定する。

この全方向計測ロボットと前章に示した 3 次元レーザ計測ロボット群を組み合わせ、まず全方向計測ロボットで大まかな 3 次元地図を獲得し、それをもとに経路計画を行い、前章に示した 3 次元レーザ計測ロボット群で高精度、高精細な 3 次元モデルを獲得することを想定している¹⁷⁾。

4.2 全方向計測ロボットによる環境計測実験

複雑な形状の廊下環境において、全方向計測ロボットによる環境計測実験を行った。実験の様子を図 18 に、得られた 3 次元環境形状を図 19 に表す。

5. 終わりに

本論文では、複数台の移動ロボットが交互に移動しながら、搭載されたレーザ計測装置で周辺環境の 3 次元形状を計測するシステムを提案した。本システムは、複数台の移動ロボットが相互観測に基づき高精度に位置同定を行う協調ポジショニング法 (CPS) と、レーザ計測装置による実物体の 3 次元形状計測を組み合わせたものである。本研究では複数台の口

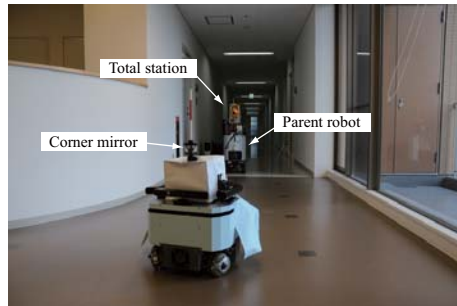


図 18 計測実験の様子

ロボットからなる計測ハードウェアの精度向上を行い、従来システムの約 10 倍の高精度となる移動距離の 0.03%ないし 0.05%の精度で計測可能であることを確認した。また本システムと併用して用いる、複数台の RGB-D カメラ (Microsoft Kinect) を搭載した環境計測ロボット、および計測実験を紹介した。

謝辞 本研究の一部は、JST 研究成果最適展開支援事業フェージビリティスタディステージ探索タイプ「レーザ搭載群ロボットによるトンネル出来型管理システム」、および文部科学省科学研究費「多次元環境地図の自動構築を行う群移動ロボットシステムの開発 (基盤研究 (B) 課題番号 23360115)」の支援を受けた。

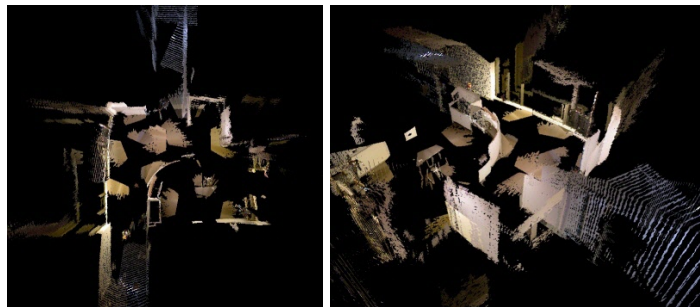


図 19 計測ロボットから得られた 3 次元環境形状

参考文献

- 1) Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Gintzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J. and Fulk, D.: The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp.131-144 (2000).
- 2) Ikeuchi, K., Hasegawa, K., Nakazawa, A., Takamatsu, J., Oishi, T. and Masuda, T.: Bayon Digital Archival Project, *In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia*, pp.334-343 (2004).
- 3) Ishikawa, K., Ichi Takiguchi, J., Amano, Y., Hashizume, T. and Fujishima, T.: Tunnel Cross-Section Measurement System Using a Mobile Mapping System, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.21, No.2, pp.193-199 (2009).
- 4) 遠藤 健, 倉爪 亮, 古賀祐一郎: 三次元形状計測装置による建設構造物の出来形計測 - 施工中の計測データと設計データのリアルタイム照合 -, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, pp.A1A-A28 (2010).
- 5) Thrun, S., Thayer, S., Whittaker, W., Baker, C., Burgard, W., Ferguson, D., Haehnel, D., Montemerlo, M., Morris, A.C., Omohundro, Z., Reverte, C. and Whittaker, W. R.L.: Autonomous exploration and mapping of abandoned mines, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.11, No.1, pp.79-91 (2004).
- 6) 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).
- 7) Tobata, Y., Kurazume, R., Noda, Y., Lingemann, K., YumiIwashita and Hasegawa, T.: Laser-based geometrical modeling of large-scale architectural structures using co-operative multiple robots, *Autonomous Robots*, Vol.31, No.1 (2012).
- 8) Kurazume, R., Noda, Y., Tobata, Y., Lingemann, K., Iwashita, Y. and Hasegawa, T.: Laser-based Geometric Modeling using Cooperative Multiple Mobile Robots, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3200-3205 (2009).
- 9) 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).
- 10) Nüchter, A., Surmann, H., Lingemann, K., Hertzberg, J. and Thrun, S.: 6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1998-2003 (2004).
- 11) Weingarten, J. and Siegwart, R.: EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp.2089-2094 (2005).
- 12) Cole, D.M. and Newman, P.M.: Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor

- Environment, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1556–1563 (2006).
- 13) Grisetti, G., Stachniss, C. and Burgard, W.: Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.23, p. 2007 (2007).
 - 14) Olson, E., Leonard, J. and Teller, S.: Fast iterative alignment of pose graphs with poor estimates, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2262–2269 (2006).
 - 15) Kümmerle, R., Steder, B., Dornhege, C., Ruhnke, M., Grisetti, G., Stachniss, C. and Kleiner, A.: On Measuring the Accuracy of SLAM Algorithms, *Autonomous Robots*, Vol.27, No.4, pp.387–407 (2009).
 - 16) 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).
 - 17) 鄭 龍振, 石橋正教, 倉爪 亮, 岩下友美, 長谷川勉: 4 台の Kinect を搭載した全方向計測ロボットによる環境計測, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会, pp.103–4 (2011).