

群ロボットによる大規模構造物レーザ計測システム 計測精度の向上とトンネル出来形計測実験

○ 鄭 龍振* 倉爪 亮** 岩下 友美** 長谷川 勉**

* 九州大学大学院システム情報科学府

** 九州大学大学院システム情報科学研究所

E-mail: yongjin@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, {kurazume,yumi,hasegawa}@ait.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

これまでに我々は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、大規模な3次元環境地図を構築するCPS-SLAMを提案している[1]。

本稿では、このシステムの土木建築分野における具体的なアプリケーションとして、施工中のトンネル3次元形状を正確にレーザ計測する群ロボットシステムを提案し、これまでに構築したシステムの精度向上のための改良点と実トンネルでの精度評価実験を紹介する。

2. 計測用群ロボットシステムの概要

開発したシステムを図1に示す。本システムは、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軸レーザ距離計測装置(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)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。

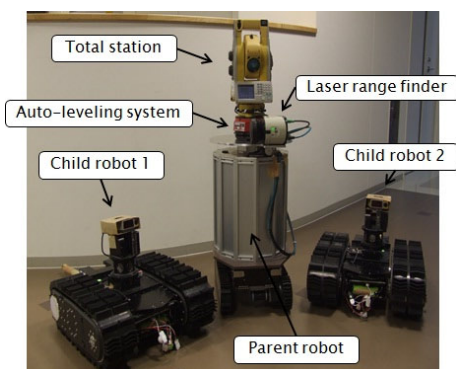


図1. 開発したシステム

図2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る。図3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、親口

表1. トータルステーションの仕様 (GPT-9005A)

Range	1.3 ~ 3,000m
Angular resolution	0.5"/1"
Accuracy (distance)	$\pm 2mm + 2ppm \times Distance$
Accuracy (angle)	1"
Max. range	100m

表2. レーザ距離計測装置の仕様 (LMS 151)

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

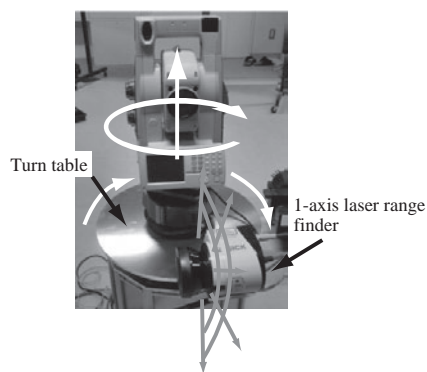


図2. 1軸レーザ距離計測装置と回転台

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、その相対位置から群ロボットによる協調的ポジショニング法(Cooperative Positioning System, CPS)[1][2]に基づき、交互に決定される。

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、従来のシステムで高低差10mを含む323.9m移動後の位置精度は0.97m(移動距離の0.30%) [3]であり、オドメトリ(車輪走行距

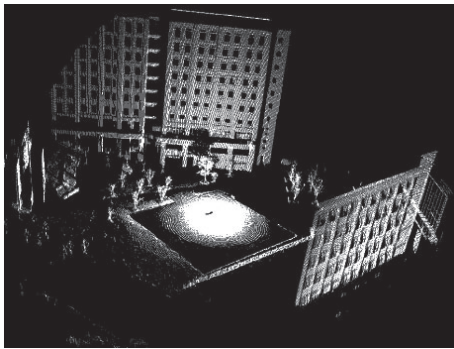


図 3. 屋外環境で計測された 3次元モデル

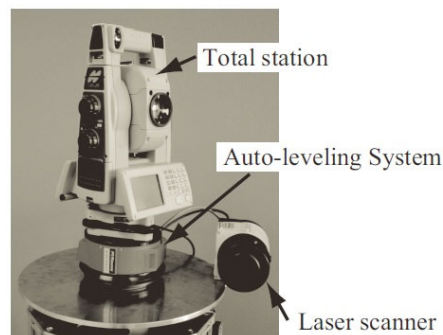


図 4. 自動整準台

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証明されている。

3. 計測精度の向上に向けた改良

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. コーナキューブを 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
4. レーザポインタによるトータルステーションと回転台のキャリブレーション手法の投入

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。

これまでに開発したシステム [1] では，測量用トータルステーション (AP-L1) の姿勢は，搭載した 2 軸傾斜計センサ (MD-900-TS) により補正されていた。これは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のチルト補正機構により精密に傾斜角度を補正するが，当初開発したシステムでは，ロボットの姿勢がチルト補正可能域から逸脱することが多いためである。しかし 2 軸傾斜計センサはトータルステーションではなくロボット本体に固定されており，チルト補正值が不正確である可能性が高い。そこで本システムでは，自動整準台 (リズム, AS-21, 表 3) により機械的にトータルステーションの水平調整を行い，その後，トータルステーションのチルト補正機構により，精密に傾斜角度を補正することとした。

表 3. 自動整準台の仕様 (AS-21, Rizumu)

Leveling accuracy	±10''
Max. range	±4°

4. 精度確認実験

4.1 廊下環境における精度確認実験

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。実験環境と得られた 3次元モデルを図 5 に示す。実験の結果，ループのある廊下環境を親子ロボットが 180.9m 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。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 6 に示す。このときの誤差は 98mm，比較したデータ間の移動距離 (149.5m) の 0.066 % であり，従来の計測精度である移動距離の 0.3 % [3] から大きく改善された。

4.2 屋外環境における精度確認実験

屋外環境において，3次元モデルの計測実験を行った。実験環境と得られた 3次元モデルを図 7 に示す。実験の結果，ループのある屋外環境を親子ロボットが 343.6m 移動し，途中の 20 か所から環境をレーザ計測し，約 1700 万点のデータを得た。ループ状の屋外を一周した前後の計測で，同一物体の座標値を比較した結果を図 8 に示す。このときの誤差は 116mm，比較したデータ間の移動距離 (343.6m) の 0.034 % であった。

5. 模擬トンネルにおける出来形計測実験

トンネル出来形計測へ適用した場合の本システムの計測精度や操作性を確認するため，施工技術総合研究所 (静岡県富士市) 内の模擬トンネル (図 9, 全長 80m, 勾配 0.3 %, 内空断面積 77.6m²) にて精度検証実験を実施した。実験の様子を図 11 に示す。

5.1 設計形状との比較による計測精度の評価

実験では，まずロボット自身の座標系とトンネル座標系を一致させるため，トンネル内の既知点 2 か所にプリズムを設置し，三辺測量により親ロボットの初期位置，初期姿勢を計測した。次に，2 台の子ロボットの初期位置を親ロボットから計測した。その後，親ロボットによる計測と移動を繰り返し，トンネル内部の 3次元形状を計測した。80m のトンネル先端から終端まで，親ロボットは 12 回移動し，親ロボットにより 11 回のレーザ計測を行った。各ロボットの移動軌跡を図 10 に示す。全長 80m のトンネルの計測に要した時間は約 30 分であり，およそ 429 万点の点データを計測した。

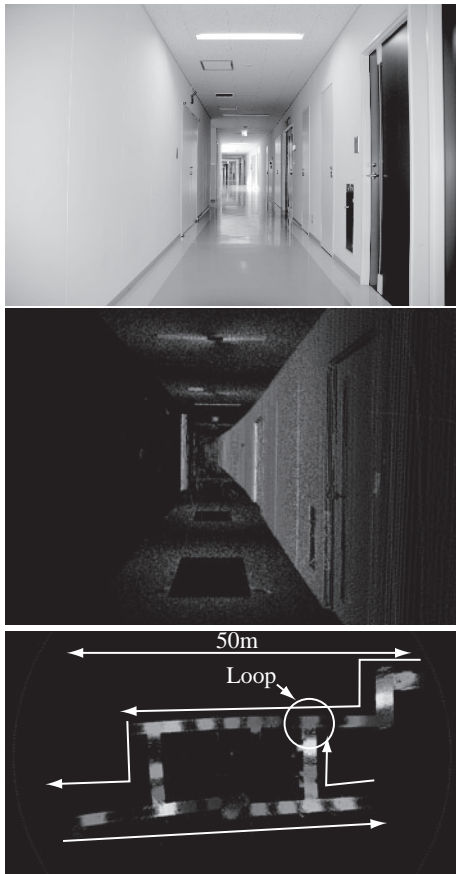


図 5. 廊下環境と得られた 3 次元モデル

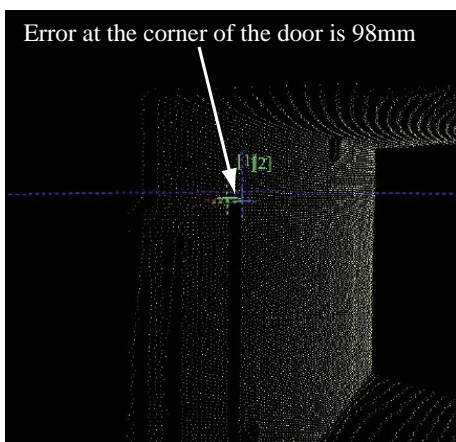


図 6. 長距離移動前後の計測結果比較

なお、模擬トンネル内には自動車や各種資機材などの障害物が多数存在し、床面から 2m の高さまでの範囲では、障害物のためトンネル形状が正確に計測できない。そのため床面から 2m 以上の約 348 万点の計測点を用いて差異を求めた。また、坑口から 7.5m ~ 17.5m の区間のトンネル内面はシートに覆われており、この区間に存在する点も除外し精度検証を行った。設計形状との誤差を図 12、および表 4 に示す。図 12 で色の濃い領域は誤差 50mm 以上で、誤差が小さくなるにつれて薄い色で示している。

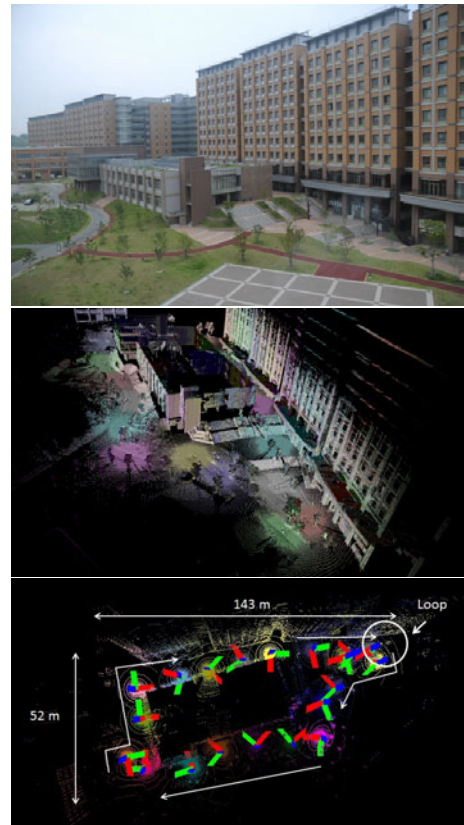


図 7. 屋外環境と得られた 3 次元モデル

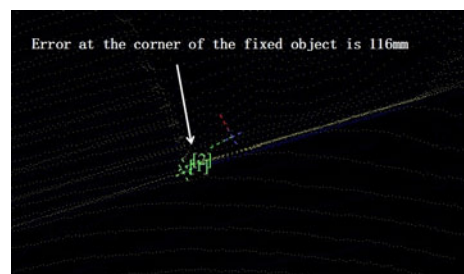


図 8. 長距離移動前後の計測結果比較

5.2 従来型トンネル出来型計測システムとの性能比較

前項では、レーザ計測結果とトンネル設計形状を比較したが、設計図面は必ずしも実際の施工寸法とは一致していない。そこで実際の施工形状をもとに提案システムの計測精度を評価するために、模擬トンネルに対して従来型の定置式 3 次元スキャナ (TOPCON GLS-1000) により実形状を計測し、その形状と提案システムの形状を比較した。比較結果を図 13,14 に示す。実験の結果、総点数の 91.7% が誤差 50mm 以下であることが確認された。一般に道路トンネルの施工で要求される出来形管理基準は数十メートル間隔の支保工で ±50mm あり、本システムの精度は十分に実用的であると考えられる。

6. 結論

本稿では、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囲の 3 次元形状

表 4. 計測モデルの誤差評価

Number of points	3,482,477
RMS error	32.2mm
Average error	-4.9 mm

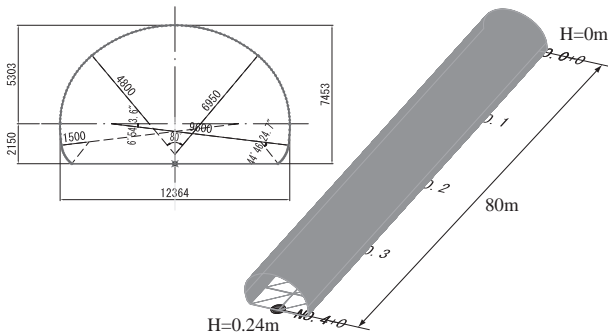


図 9. トンネルの設計図

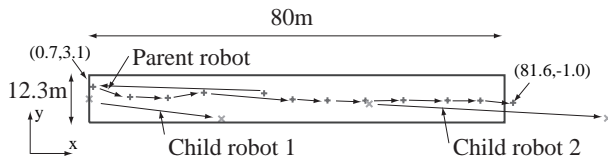


図 10. ロボットの移動経路 [m]



図 11. トンネル計測実験

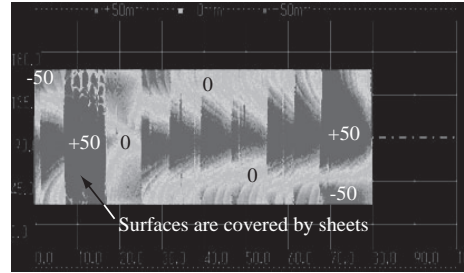


図 12. 設計データと計測データの形状比較 [mm]

を計測するシステム (CPS-SLAM) に対し、計測精度の向上手法、屋内廊下環境、屋外環境、施工中のトンネルでの計測実験の結果を紹介した。今後は、この計測された 3 次元形状をもとに、ロボットの高精度な位置推定を実現する手法を開発する。

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 (B) (課題番号 23360115) 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 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, November 2007.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 鄭 龍振, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉: “自動化された協調ポジショニングシステムによる 3 次元環境地図の自動生成”, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 113-4, 2010.

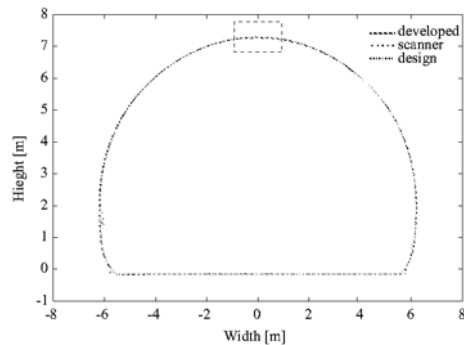


図 13. 計測された断面形状 (50m 地点)

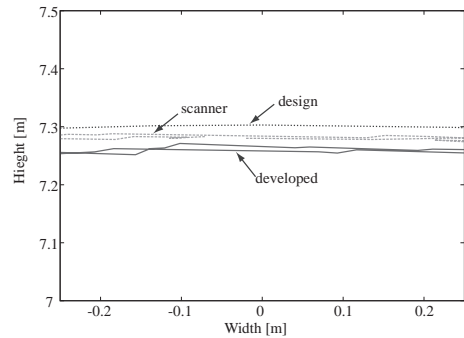


図 14. 天頂付近の断面形状の拡大図 (50m 地点)