

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—

鄭 龍 振* 岩 下 友 美* 倉 爪 亮*

Study on CPS-SLAM

—Improvement of Measurement Precision and Application for Tunnel Shape Measurement System—

Jeong Yongjin*, Yumi Iwashita* and Ryo Kurazume*

This paper presents a high precision 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. To improve the positioning accuracy, several devices were replaced or newly installed. The experimental results show the system achieves quite high accuracy of the 0.03% of target's size. As an example of applications, we applied the system to shape measurement of tunnels under construction, and verified that the accuracy of the developed system is as high as a high-precise 3D laser scanner.

Key Words: Multiple Robots, Laser Measurement, 3D Map, Laser Range Finder, Information-oriented Construction

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三次元測により、大規模な三次元環境地図を構築する CPS-SLAM を提案している [1]. 本論文では、このシステムの具体的なアプリケーションとして、土木建築分野において効率的な施工管理を実現する情報化施工の実現に向け、施工中のトンネル三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と実トンネルでの精度評価実験を紹介する。

近年、ICT（情報通信技術）を用いて高品質で高効率な施工を実現する情報化施工 [2] が国策として推進され、さらに品質法の策定 [3] などにより公共工事における三次元形状データの施工や施工管理への利用事例の報告が増えている。

一方、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も現在各地で行われている。我々もこれまでに、レーザ計測装置、デジタルカメラを搭載した3台の移動ロボットが大規模文化財の周囲を協調して移動し、カメラやレーザにより

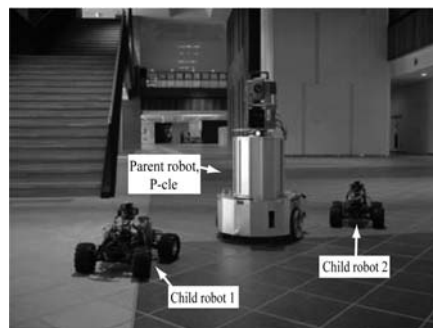


Fig. 1 3D laser measurement system, CPS-V

見えや形状を計測するシステムを開発した (Fig. 1 [1]). またその実応用として、これまでに太宰府天満宮 (福岡市) をはじめとした広域文化遺産の三次元デジタルモデルの作成と保存に成功した [4]. 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、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 System, CPS) [5] を採用することで、建築物周囲の多くのレーザ計測位

原 2011年5月9日

*九州大学

*Kyushu University

■ 本論文は有用性で評価されました。

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。

本システムは文化遺産のデジタルアーカイブを目的に開発されたものであるが、その適用範囲は広く、例えば上述した土木建築分野での三次元施工管理システムにも適用可能である。特にトンネル工事現場では、掘削箇所や一次、二次覆工作業でのコンクリート吹き付け量の正確な見積もりが工期の短縮、費用の低減に直結する。このためトンネル出来形の三次元形状計測の要望が強く、これまでに (1) 専用の 2 軸三次元レーザスキャナを用いたシステム [6]~[9] や、(2) 走行車両にレーザセンサを搭載して移動計測するシステム [10]~[13] が開発されている。(1) には Leica ScanStation C10 や TOPCON GLS-1500 などの製品も市販されており、高精度な計測が日常的に行われている。しかし、計測作業には専門業者による数日の工数と多額の費用が必要であり、計測直後に出来形の施工精度を確認し、施工管理をリアルタイムで行う用途には向かない。一方、(2) は高速な計測が可能であるが、トンネル内は GPS を使用できないため、計測位置は走行距離計や慣性ユニット (IMU) による推定値に頼らざるを得ず、計測精度、信頼性ともに施工管理には不十分であった。

そこで本論文では、まずデジタルアーカイブを目的に開発された上記システムに対し、各種センサの変更や自動整準器の導入などにより、計測精度の向上を試みる。さらに本システムを土木建築分野での三次元計測、特にトンネル内の出来形計測のアプリケーションに適用し、走行距離計や慣性ユニットに比べて桁違いに高精度かつ信頼性の高いトンネル計測システムを実現する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず第 2 章で計測精度の向上を目指したシステムの変更と、新たに開発したトンネル出来形計測用群ロボットシステムの詳細を説明し、第 3 章で模擬トンネルで行った実験結果を示す。第 4 章はまとめである。

2. トンネル出来形計測用群ロボットシステム

2.1 システムの概要

開発したシステムを Fig. 2 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, Table 1)、自動整準台 (リズム, AS-21)、1 軸レーザ計測装置 (SICK, LMS-151, Table 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, Table 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

Table 1 Specification of GPT-9005A (TOPCON)

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

(TOPCON, RC-3) が搭載されている。

Fig. 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二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。Fig. 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、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、その相対位置から群ロボットによる協調的ポジショニング法 (Cooperative Positioning System, CPS) [1] [5] に基づき、交互に決定される。Fig. 5 に CPS による位置同定手法を示す。本手法では、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。

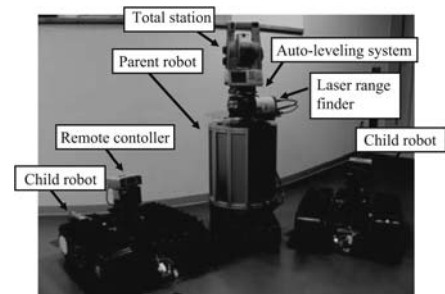


Fig. 2 The developed tunnel shape measurement system

Table 2 Specification of LMS 151 (SICK AG)

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

Table 3 Specification of MD-900-TS (Applied Geomechanics Inc.)

Range	$\pm 25^\circ$
Resolution	0.004°
Repeatability	0.01° (= 36")
Hysteresis	0.02° (= 1'12")

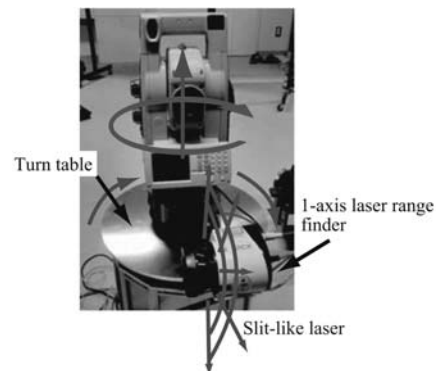


Fig. 3 Scanning system by 1-axis laser range finder and rotating table

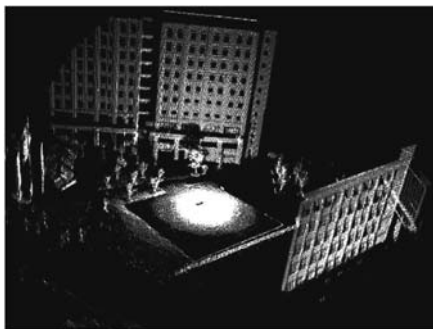


Fig. 4 Scanned 3D data in outdoor environment

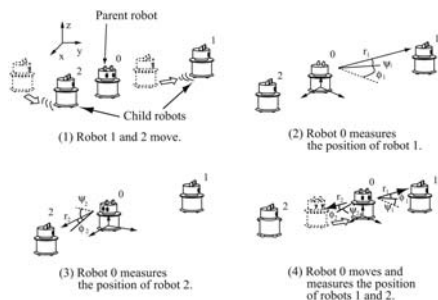


Fig. 5 Cooperative Positioning System, CPS

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文献[1]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10[m]を含む323.9[m]移動後の位置精度は0.97[m]（移動距離の0.30%）[14]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証明されている。

また、一般に大規模環境に対して三次元レーザ計測を行う場合、オクリュージョンが生じな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、一つの三次元モデルを生成する必要がある。しかし、この後処理には専門的知識と多くの人手が必要であった。

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[1]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Fig. 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、Fig. 7に示すように統一座標

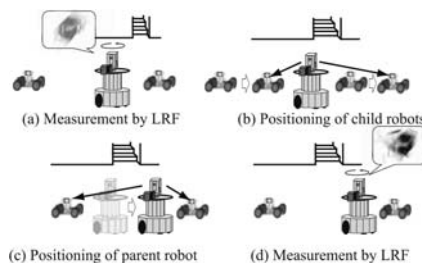


Fig. 6 3D measurement using CPS and laser range finder

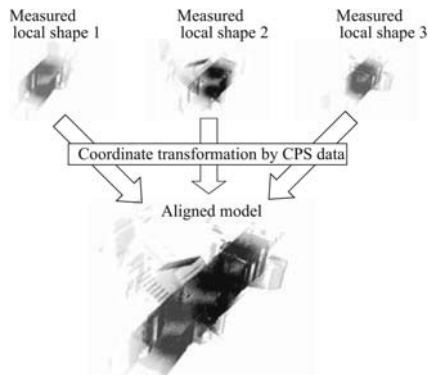


Fig. 7 Coordinate transformation by CPS information for creating aligned 3D model

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。

2.2 計測精度の向上に向けた改良

本論文では、上記システムを土木建築分野における情報化施工システムに適用する。土木建築現場には、施工途中の建造物の三次元形状をその場でレーザ計測し、その結果をその後の工事に反映させたいという強いニーズがある。本システムは、土木現場での親和性の高いレーザ測量機器を用いており、簡便、高精度に出来形の三次元形状をレーザ計測し、後処理不要で計測直後に現場で評価し、その後の施工工程に反映できる。しかし、CPSの精度は上述のように移動距離の0.30%程度であり、例えば全長100[m]のトンネルの中心付近では、150[mm]程度の誤差が生じる可能性がある。

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18[mm]）からA3型（TOPCON、プリズム定数0[mm]）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



Fig. 8 Two-axes attitude sensor (MD-900-TS) and auto-leveling system (AS-21)

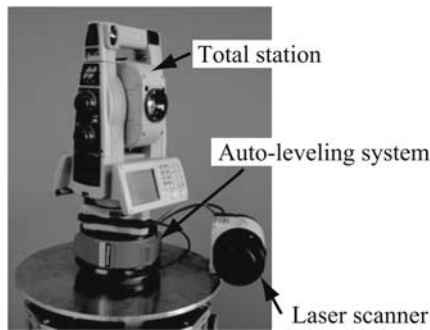


Fig. 9 Auto-leveling system

Table 4 Specification of auto-leveling system (AS-21, Rizumu)

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

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[1]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, Fig. 8, Table 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値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 (リズムム, AS-21, Fig. 8, 9, Table 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 (Table 5) により、精密に傾斜角度を補正することとした。Fig. 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。

トータルステーションの傾斜角度の補正誤差は、特に仰角測定値に大きく影響し、コーナミラーまでの距離が長い場合、垂直方向に大きな誤差を生じる原因となる。例えば仰角測定値に $10'$ の誤差が含まれている場合、距離測定値を l とすると、測定点座標値には単純計算で垂直方向に $l \tan 10' \approx 3l \times 10^{-3}$ 、す

Table 5 Specification of internal attitude sensor in total station (GPT-9005A, TOPCON)

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

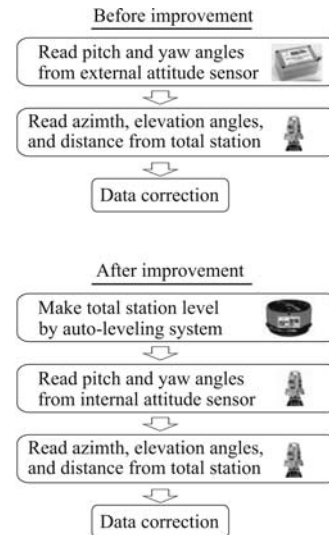


Fig. 10 Flowchart of data collection measured by total station

なわち距離測定値の 0.3% の誤差が含まれることになる。2軸傾斜計センサ (MD-900-TS) はロボット下部のクローラ部に固定されており、2軸傾斜計センサとトータルステーションの間にはロボット胴体部やアクチュエータが置かれていることから、2軸傾斜計センサの $10'$ 程度の取り付け誤差は十分に予想できる。実際にも文献[4]で示すように、従来システムでは垂直方向に大きな誤差が生じていた。一方、改良システムでは、後述する実験でも明らかのように、垂直方向の誤差が非常に小さく抑えられており、自動整準台を用いた傾斜角度の精密補正がシステムの精度向上に大きく寄与したと考えられる。

3. 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、三次元モデルの計測実験を行った。実験環境を Fig. 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 210 [m] 移動し、途中の 33 箇所から環境をレーザ計測し、約 4,034 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、得られた三次元モデルを Fig. 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 Fig. 13 に示す。このドア部の誤差は 98 [mm] (x 方向 93 [mm], y 方向 25 [mm], z 方向 19 [mm]) であり、これは比較したデータ取得位置間の移動距離 (180.9 [m]) 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% [14] から大きく改善されたことが確認された。

同様に屋外環境において三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 343 [m]、高低差 5 [m] を移動し、20 地点からレーザ計測を行った。得られた三次元モデルを Fig. 14 に、親ロボットの移動軌跡を Fig. 15 に示す。建物を一周する



Fig. 11 Photo of corridor

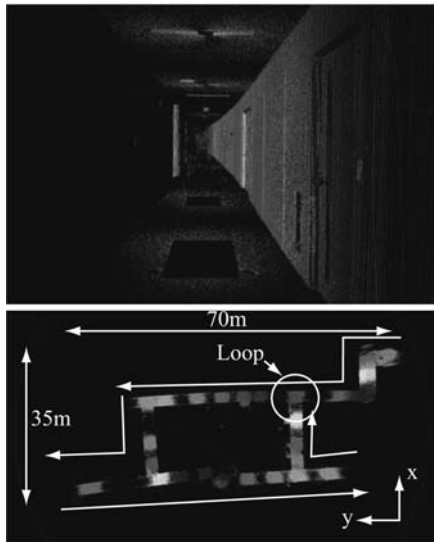


Fig. 12 3D model of corridor

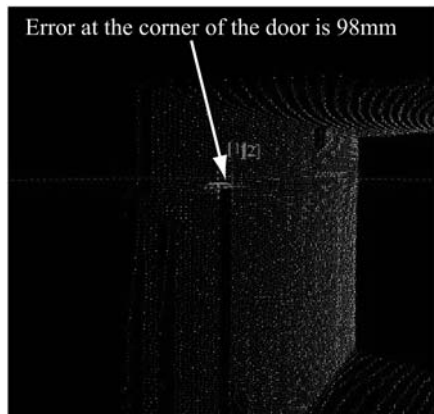


Fig. 13 Measured shapes before and after a long distance movement

前後で計測された同一モデル上の三次元点の差は 116 [mm] (x 方向 -47 [mm], y 方向 72 [mm], z 方向 -78 [mm]), 移動距離の 0.034%であった。

4. 模擬トンネルにおける精度測定実験

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(Fig. 16, 17, 全長 80 [m], 勾配 0.3%, 内

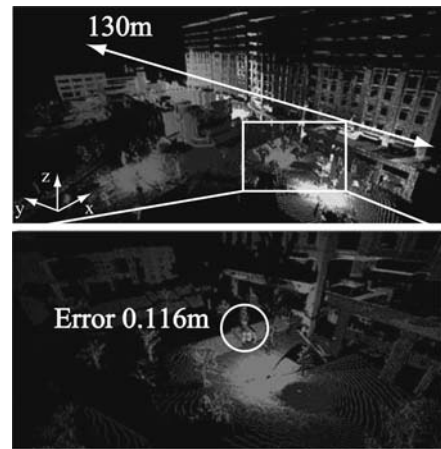


Fig. 14 Measured shapes and errors in outdoor environment

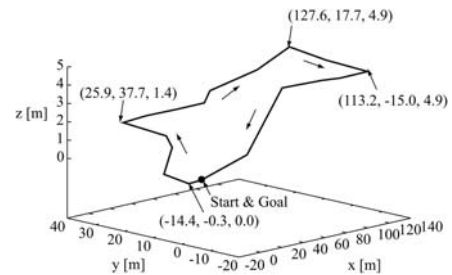


Fig. 15 Path of parent robots



Fig. 16 Target tunnel

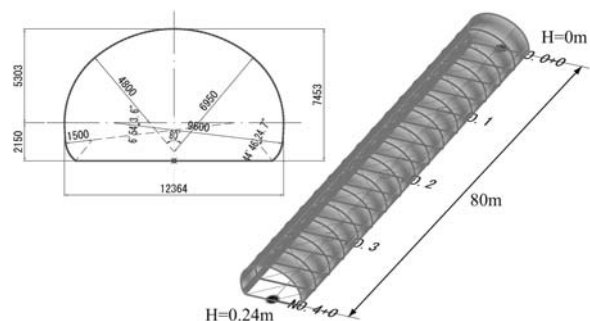


Fig. 17 The design drawing of the tunnel

空断面積 77.6 [m²])にて精度検証実験を実施した。実験の様子を Fig. 18 に示す。

4.1 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 箇所にプリズムを設置し、



Fig. 18 Measurement experiment in tunnel

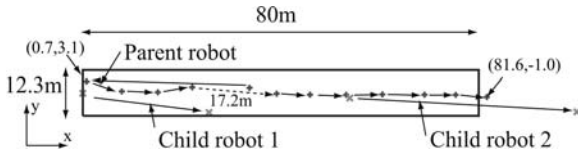


Fig. 19 Travel paths of the robots [m]

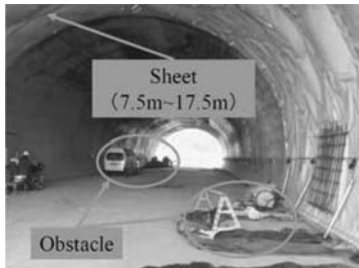


Fig. 20 Obstacles in the tunnel

Table 6 Errors against the design shape

Number of points	3,482,477
RMS error	32.2 [mm]

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、トンネル内部の三次元形状を計測した。80[m]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 Fig. 19 に示す。全長 80[m] 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。

なお、模擬トンネル内には Fig. 20 に示すように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 2[m] 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 2[m] 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 7.5[m]~17.5[m] 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 Fig. 21、および Table 6 に示す。Fig. 21 で色の濃い領域は誤差 50 [mm] 以上で、誤差が小さくなるにつれて薄い色で示している。

4.2 従来形トンネル出来形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

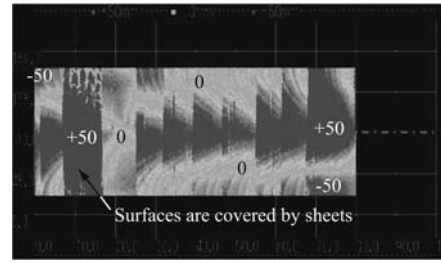


Fig. 21 Shape comparison between the design and the measured shapes [mm]

Table 7 Specification of GLS-1000 (TOPCON)

Range	1~150 [m]
Accuracy (distance)	4 [mm] (σ)/1~150 [m]
Accuracy (angle)	6''
Max. range	330 [m]
Scanning speed	3,000 [points/s]

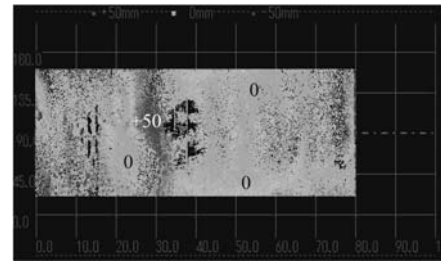


Fig. 22 Shape comparison between measured shapes by 3D laser scanner and the proposed system [mm]

Table 8 Errors against the measured shape by 3D laser scanner

Number of points	2,808,262
RMS error	29.6 [mm]

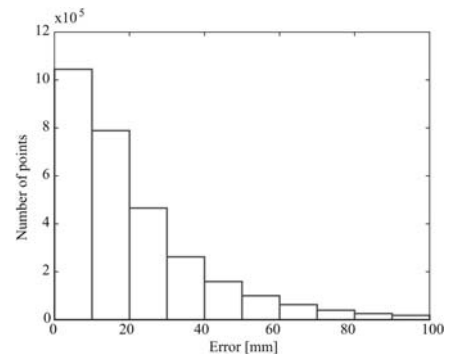


Fig. 23 Histogram of errors

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形の定置式三次元スキャナ (TOPCON GLS-1000, Table 7) 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。結果を Fig. 22, Table 8 に、また誤差の頻度分布を Fig. 23, Table 9 に示す。Fig. 22 で色の濃い部分は誤差 50 [mm] 以上であり、色が薄くなるにつれて誤差が減少する。誤差は入口から約 30 [m] の領域で 50 [mm] 以上の大きな誤差が見られるが、その他の部分ではほ

Table 9 Cumulative distribution

Error [mm]	~10	~20	~30	~40	~50
Ratio [%]	35.2	61.8	77.5	86.4	91.7

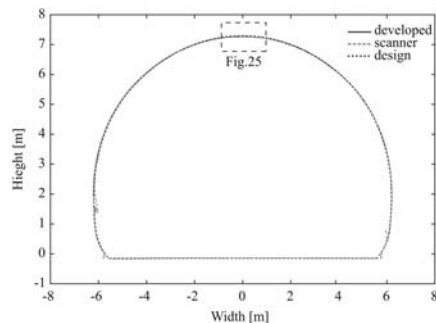


Fig. 24 Measured cross-section at 50 [m] position

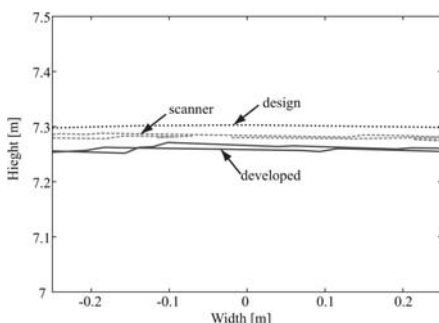


Fig. 25 Zoom of measured cross-section at 50 [m] position

は 50 [mm] 以下の誤差となっている。さらに、50 [m] 地点での断面形状と、天頂付近の拡大図をそれぞれ Fig. 24, 25 に示す。これらより、総点数の 91.7% が誤差 50 [mm] 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 [m] 間隔の支保工で ± 50 [mm] であり、本システムの精度は十分に実用であると考えられる。なお、入口から約 30 [m] の領域で誤差が大きく観測された原因としては、Fig. 19 の破線部分に示すように、親ロボットによる観測の間隔が平均 8.2 [m] であるのに対し、この部分では 17.2 [m] と広がっている。レーザ計測装置の姿勢の補正は、ロボット本体の 2 軸傾斜計センサ (MD-900-TS) により行われており、レーザ計測距離が長くなったため、レーザ計測装置の姿勢補正誤差、および取り付け誤差が測定精度に大きく影響したものと考えられる。

5. おわりに

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施工中のトンネルの三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三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ロボットからなる計測ハードウェアの精度向上、模擬トンネルでの計測精度の評価、および従来形トンネル出来形計測システムとの性能比較を行い、全長 80 [m] のトンネルで RMS 誤差 29.6 [mm]

の高精度な出来形計測が実現できることを確認した。

今後は、回転テーブルやレーザ計測装置を自動整準器上に取り付け、レーザ計測装置の姿勢補正精度の向上を図るとともに、トータルステーション、レーザ計測装置間の高精度なキャリブレーション手法についても検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST 研究成果最優展開支援事業 フィ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形管理システム」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。また定置式三次元スキャナの形状データは東急建設株式会社殿から御提供いただきました。

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三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.
- [2] 国土交通省: 報道発表資料: 「情報化施工推進戦略」について. <http://www.mlit.go.jp/common/000020669.pdf>, 2008.
- [3] 国土交通省: 公共工事における品質確保の促進に関する法律. <http://www.mlit.go.jp/common/000004840.pdf>, 2005.
- [4] R. Kurazume, Y. Noda, Y. Tobata, K. Lingemann, Y. Iwashita and T. Hasegawa: “Laser-based geometric modeling using cooperative multiple mobile robots,” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3200–3205, 2009.
- [5] 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.
- [6] T. Nuttens, A. de Wulf, L. Bral, B. de Wit, L. Carlier, M. de Ryck, C. Stal, D. Constaes and H. de Backer: “High resolution terrestrial laser scanning for tunnel deformation measurements,” FIG Congress 2010, 2010.
- [7] M.J. Henriques and J. Casaca: “Uncertainty in tacheometric measurement of convergences in tunnels,” 3rd IAG / 12th FIG Symposium, 2006.
- [8] J.-S. Yoon, M. Sagong, J.S. Lee and K.-S. Lee: “Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data,” NDT&E International 42, pp.97–105, 2009.
- [9] S. Feketea and M. Diederichsa: “Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels,” Tunnelling and Underground Space Technology, vol.25, no.5, pp.614–628, 2010.
- [10] S. Thrun, S. Thayer, W. Whittaker, C. Baker, W. Burgard, D. Ferguson, D. Haehnel, M. Montemerlo, A.C. Morris, Z. Omohundro, C. Reverte and W. (Red) L. Whittaker: “Autonomous exploration and mapping of abandoned mines,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.11, no.1, pp.79–91, 2004.
- [11] K. Ishikawa, J. Takiguchi, Y. Amano, T. Hashizume and T. Fujishima: “Tunnel cross-section measurement system using a mobile mapping system,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.21, no.2, pp.193–199, 2009.
- [12] 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会—”, 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.
- [13] 古賀祐一郎, 倉爪亮, 遠藤健, 池野尚史: “三次元形状計測装置による建設構造物の出来形計測—第二報 模擬トンネルを用いた計測実験—”, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集 DVD-ROM, 2G2–7, 2010.
- [14] 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.



鄭 龍振 (Jeong Yongjin)

2010 年韓国釜山大学工学部情報コンピュータ工学科卒業。現在九州大学大学院システム情報科学府在学中。群ロボット、レーザ計測の研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)



倉爪 亮 (Ryo Kurazume)

1991 年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了。同年(株)富士通研究所入社、1995 年東京工業大学機械宇宙学科助手、2000 年スタンフォード大客員研究員、同年東京大学生産技術研究所博士研究員、2002 年九州大学システム情報科学研究所助教授、2007 年より同教授、現在に至る。群ロボット、歩行機械、レーザ計測の研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)



岩下友美 (Yumi Iwashita)

2007 年九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、Imperial College London 客員研究員を経て、同年より九州大学大学院システム情報科学研究所助教授。現在 Jet Propulsion Laboratory 客員研究員。コンピュータビジョン、パターン認識の研究に従事。博士(工学)。

(日本ロボット学会正会員)