

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

古賀祐一郎(九州大学) 倉爪亮(九州大学) 遠藤健(東急建設) 池野谷尚史(東急建設)

Measuring of structure's shape by 3D Measurement Mobile -Measurement Experiment in Simulated Tunnel-

*Yuichiro Koga (Kyushu Univ.), Ryo Kurazume (Kyushu Univ.)

Ken Endou (Tokyu Construction), Takafumi Ikenoya (Tokyu Construction)

Abstract— A 3D measurement system of a tunnel shape is being developed. This system is composed of a mobile robot equipped with a 2D laser scanner and a three-axis fiber optic gyro, integrated software, and a total station placed in the tunnel. Measured data by the robot is transformed to the tunnel's coordinates system using the position information measured by the total station and the optic gyro. The integrated software is able to load the design data of 3D CAD system via LandXML format, and compare with the measured data. The error of the measured data is displayed in the software interface on-site. This paper describes the basic system architecture and the results of the measuring experiments in a simulated tunnel.

Key Words: Laser scanner, 3D modeling, 3D measurement

1. はじめに

トンネル掘削工事では、一般に平面図・横断面などの二次元形状データを用いて施工管理が行われているが、建造物は三次元であることを考えると、施工管理は三次元形状データを用いて行うことが望ましい。また近年、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 [1] が建設現場に導入され始めている。この情報化施工においても、三次元施工管理は重要な機能の一つである。

トンネル施工管理を三次元データを基に行う場合、施工途中のトンネル内形状を正確に計測することは重要である。これまでも、トンネル内形状の三次元計測を行う手法として、定置式三次元レーザスキャナによる手法やレーザや姿勢センサ等の計測機器を自動車に搭載し、走行しながら三次元計測を行うモービルマッピングシステム（MMS）が実用化されている [2]。定置式三次元レーザスキャナはトンネル内の数点の計測点から計測するため、装置を移動させる必要があり多大な時間がかかる。MMSは自動車をを用いたシステムであるため高価であり、システムの規模も大型である。さらにこれらの手法では、計測と施工管理を同時に実施することが出来ず、施工現場でリアルタイムに施工管理を行うことはできない。そこで我々はシンプルで小型かつ、施工現場においてリアルタイムに三次元施工管理を実現する情報化施工システムを開発している。

本システムは、LRF（レーザレンジファインダ）や姿勢センサなどの計測機器を台車に搭載した三次元形状計測装置、既知点から台車の位置座標を正確に計測するトータルステーション、および計測機器から得られるデータを統合し処理する統合ソフトウェアから構成される。この計測装置を手動で移動させ、トータルステーションにより装置の位置座標を連続的かつ正確に計測することで、施工途中のトンネル内でも手早く正

確な三次元形状計測が可能である。また、本システムの統合ソフトウェアに、3DCADにより作成された設計データを汎用データフォーマットである LandXML 形式で予め入力し、LRFからの計測データを比較し差異情報を求める。この差異情報を統合ソフトウェアのインターフェースに表示し、トンネル施工現場でのリアルタイム三次元施工管理を実現する。

本稿では、開発した三次元計測システムおよび統合ソフトウェアについて説明し、実大規模の模擬トンネルにおける計測実験の結果について報告する。

2. トンネル形状三次元計測システム

Fig.1 にトンネル形状三次元計測システムの構成を示す。本システムは、LRF や姿勢センサ等の計測機器を台車に搭載した計測装置、外部固定点に設置したトータルステーション (TS)、計測装置上の PC 内で動作する統合ソフトウェアから構成される。TS により計測装置の位置を追跡しながら、LRF を用いてトンネル断面を計測する。各センサから得られた情報は統合ソフトウェアにより処理され、ソフトウェアのインタフェースを介して、三次元モデルとして作業者に提示される。

2-1 三次元形状計測装置

三次元形状計測装置を Fig.2 に示す。この計測装置は、手押し式の台車に二次元 LRF (LMS151, SICK)、三軸の姿勢センサ (JCS7402-A, 日本航空電子工業) の 2 つのセンサを搭載している。また、台車には計測用ターゲット (360°全周プリズム A7P 型, TOPCON) を設置している。

この計測装置を作業者が移動させながら、二次元 LRF によりトンネル断面を計測する。移動中の装置の姿勢は前述した姿勢センサから取得するが、装置の位置は既知点に設置したトータルステーション (GPT-9005A, TOPCON) で台車上の計測用ターゲットを計測するこ

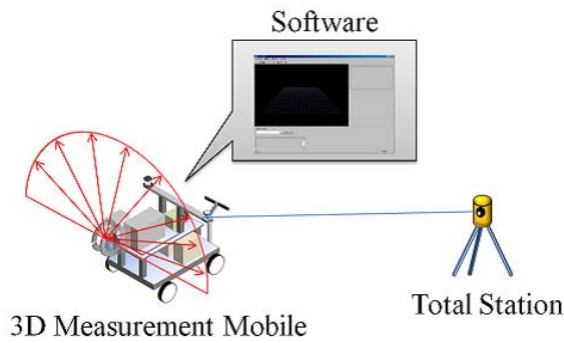


Fig.1 System configuration

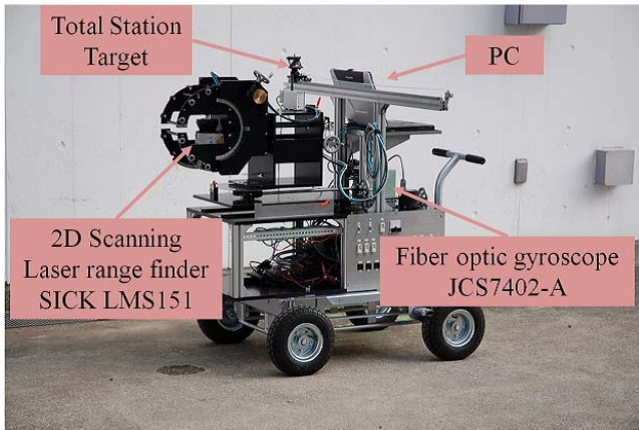


Fig.2 3D measurement system

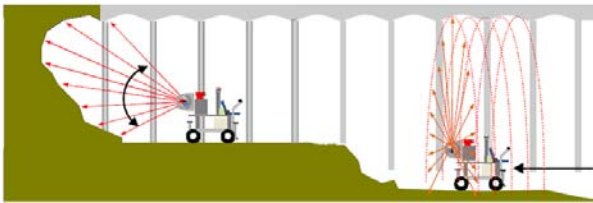


Fig.3 Measurement of tunnel shape

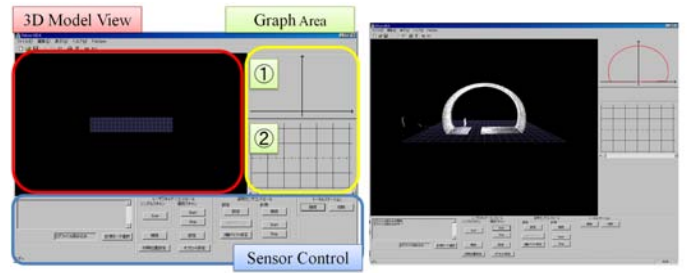
とにより取得する。

また、LRFの取り付け部は任意の角度に変更できる構造であるため、台車に対して任意の向きにLRFの姿勢を固定することができる。そのため、計測を行う状況に合わせ最適な姿勢で計測することが可能である (Fig.3)。

2.2 統合ソフトウェア

2.2.1 ユーザインターフェース

統合ソフトウェアは、各種センサのコントロール及び計測データの解析・表示を行う機能を有する。Fig.4 (a) にソフトウェアのインターフェースを示す。LRFにより計測された距離データは、姿勢センサから取得された姿勢情報、トータルステーションから取得された位置情報を用いて座標変換され、ソフトウェア上で三次元モデルとして表示される。グラフ領域の1部分には計測した最新のトンネル断面を表示し、2の部分に



(a) 統合ソフトウェアインターフェース (b) 計測中のソフトウェアインターフェース

Fig.4 Integrated software

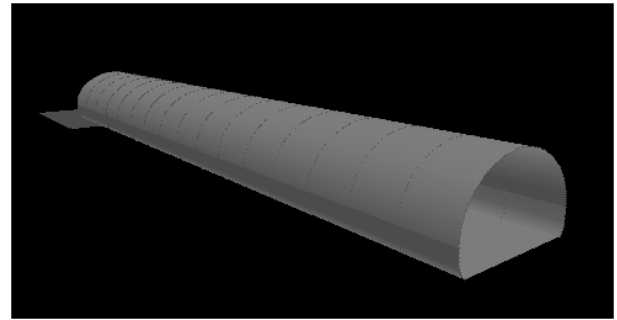


Fig.5 3D model of design data

は設計データとの差異を、差異の大きさに応じて色をつけて表示する。

Fig.4 (b) に計測中の統合ソフトウェアの画面の一例を示す。計測したデータが三次元表示され、さらにグラフ1に断面が表示されている。

2.2.2 LandXML形式による設計データの読み込み

統合ソフトウェアには、土木系CADソフトウェア (CIVIL 3D, Aotodesk) により3D設計された設計データを、LandXML形式で入力可能である。この設計データには、トンネルの中心線・断面の情報、三次元点の座標、面の情報が含まれており、統合ソフトウェアでトンネルの三次元モデルを描画する。

2.2.3 差異計算と表示機能

計測データと設計データとの差異は、リアルタイムで統合ソフトウェアのインターフェースに表示され、作業者に直感的に提示される。設計データは面の情報として、三次元点群内の3点により構成される三角パッチの情報とその法線ベクトルを持つ。そこで、計測した三次元点から設計データの三角パッチに垂線を下ろし、最も短い垂線の長さを計測した三次元点と設計データとの差異とした。

この差異の計算において、各計測点に対する最近傍三角パッチを検出する際、計測データ内の全ての三角パッチに対して距離計算を行ったのでは、計算時間が増大しリアルタイム性が大きく損なわれる。このため、あらかじめ設計データの三角パッチを構成する全ての頂点に対してkd木を構築し、実行時は計測点に近傍の少数この頂点をkd木により探索し、その頂点を含む少数個の三角パッチに対してのみ距離計算を行うこととした。近傍の頂点の上位何位までに厳密に最少の差

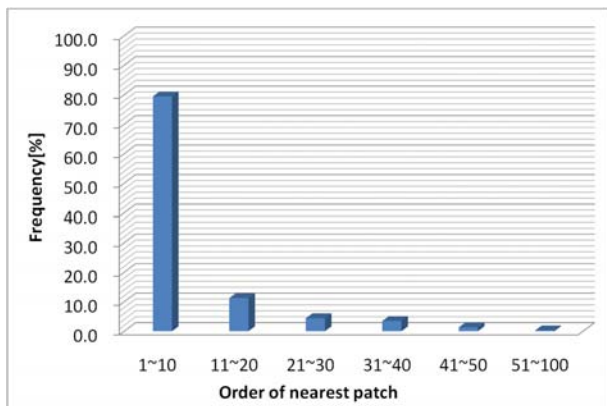


Fig.6 Order of nearest patch for approximated error calculation



Fig.7 Simulated tunnel



Fig.8 3D measurement experiment

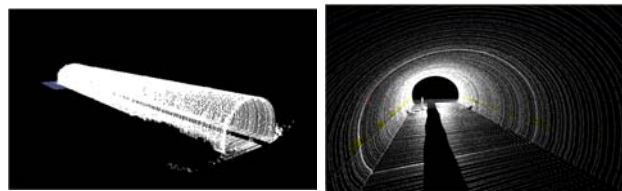


Fig.9 Measured 3D model

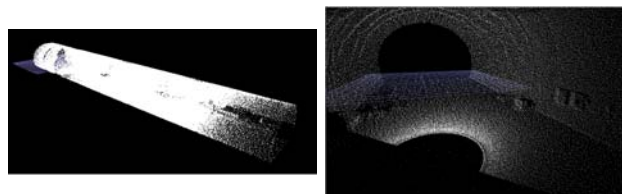


Fig.10 3D model measured by 3D laser scanner

異なる三角パッチがあるかを求めた結果を Fig.6 に示す．横軸は順位，縦軸は総計測点に対する割合である．差異が最小となる三角パッチが計測点近傍上位 20 位までに存在する割合は 90.6% であった．この結果より，計測点近傍の上位 20 位までの三角パッチを探索することで，リアルタイム性を実現する．

3. 模擬トンネルによる計測実験

3.1 計測実験の概要

開発した三次元計測システムを用いた計測実験を，施工技術総合研究所（静岡県富士市）内の模擬トンネル（Fig.7，全長 80m，内空断面積約 77.6m²）にて実施した．

実験では，計測装置に搭載した PC で統合ソフトウェアを動作させ，作業者が計測装置を手動で移動させながらトンネルの断面計測を行った．Fig.8 に計測風景を，Fig.9 に計測結果を示す．全長 80m のトンネルの計測に要した時間は約 3 分であり，およそ 530 万点の点データを計測した．

3.2 定置式三次元レーザスキャナによる計測

本システムの計測精度を調査するため，トンネル内の既知点に定置式三次元レーザスキャナを設置し，トンネルの三次元モデルを高精度に計測した．Fig.10 に定置式三次元レーザスキャナにより取得した三次元モデルを，本ソフトウェア上で描画した結果を示す．

3.3 精度検証

本システムにより計測したデータと定置式三次元レーザスキャナにより計測されたデータを用いて，設計デー

タとの差異をそれぞれ導出し比較することで，本システムの計測精度を検証する．

模擬トンネル内には Fig.11 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，床面からおよそ 2m の範囲ではトンネルの形状を正確に計測できない．そのため床面から 2m 以上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．

Fig.12 に差異分布カウンター図を示す．横軸がトンネルの奥行き，縦軸はトンネルを展開図にした場合のトンネル天端からの距離である．差異が 10mm ~ 50mm の点を黄，差異が 50mm 以上の点を赤で描画している．各グラフ左側の空白区間は，トンネル壁面がシートで覆われている区間である．

次に，それぞれの手法で計測した差異データの RMS を導出した．Table.1 に結果を示す．また，Fig.13 に差異の分布を示す．横軸は差異 (mm)，縦軸は各範囲内の点数の総計測点数に対する割合 (%) である．定置式三次元レーザスキャナはほぼ全ての点に置いて高い精度で計測出来ている．本システムは，トンネル天端では精度の高い計測が出来ているが，トンネル側面では大きな差異が生じている．トンネル側面での計測精度向上が今後の課題と言える．

4. まとめ

本報告では，トンネル内形状計測を目的に開発した三次元形状システムを紹介した．このシステムは，二次元レーザレンジファインダや姿勢センサを搭載した三次元計測装置，外部固定点に設置したトータルステー



Fig.11 Obstacles in tunnel

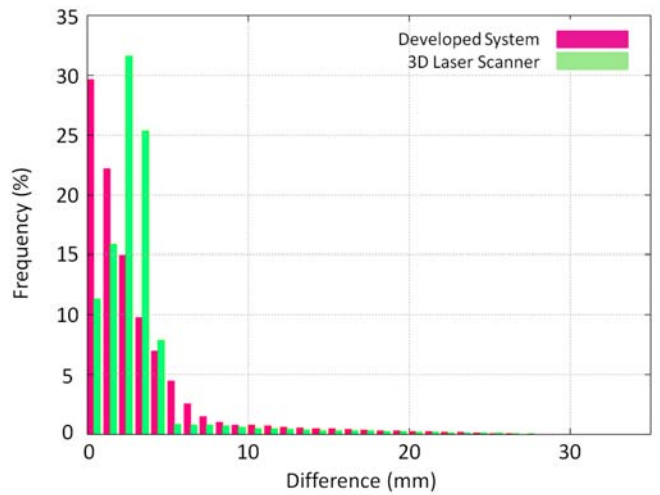
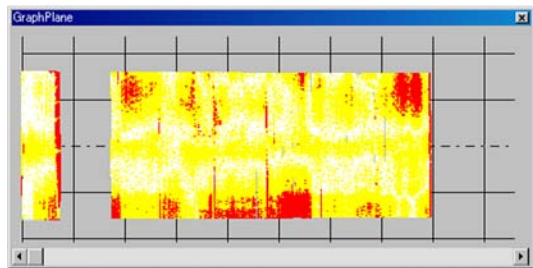
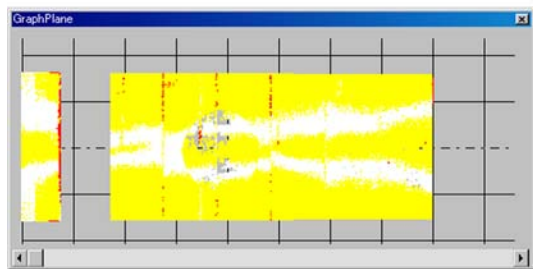


Fig.13 Histogram of measurement differences



(a) Developed system



(b) 3D laser scanner

Fig.12 Distribution of measurement differences

Table 1 RMS

	Proposed	3D Laser Scanner
N. of points	2791854	1279517
RMS(mm)	50.7	46.4

ション、各センサからのデータを統合し解析・表示を行う統合ソフトウェアから構成されている。また、開発したシステムを用いて施工技術総合研究所内模擬トンネルを計測し、トンネルの三次元モデルを計測できることを確認した。さらに本システムにより計測したデータと一般的な建設現場で用いられる三次元レーザスキャナによるデータとを比較し、本システムの計測精度について検証を行った。

なお、本研究は平成 21 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度による支援を受けた。

参考文献

- [1] 国土交通省 HP, 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>, 7月
- [2] Kiichiro Ishikawa, Jun-ichi Takiguchi, Yoshiharu Amano, Takumi Hashizume, and Takashi Fujishima, "Tunnel Cross-Section Measurement System Using a Mobile Mapping System", Journal of Robotics and Mechatronics Vol.21 No.2 pp.193-199, 2009.
- [3] 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, 1A1-A28, (2010.6)