

作業休止時間の有効活用に向けたレーザーสキャナ昇降型自律移動ロボットによる 出来形計測システム

(株)イクシス	正会員	○山崎 文敬	(株)イクシス	北林 綾子
(株)イクシス		山崎 亘	(株)イクシス	前田 幸祐
(株)イクシス		佐原 真介	(株)イクシス	渡辺 諒
清水建設(株)	正会員	柳川 正和	清水建設(株)	正会員 宮岡 香苗

1. 目的

国土交通省が推進する i-Construction¹⁾により建設現場において ICT の全面的な活用が進む中、2024 年 4 月には時間外労働の上限適用の猶予期間が撤廃され、現場の 4 週 8 閉所の確保など作業員の働き方にも注目が集まってきている。さらには新型コロナウイルス感染症対策により非対面・非接触が推奨され、DX（デジタルトランスフォーメーション）による施工管理の高度化や安全性の確保、省力化に向けた技術開発が盛んに行われている。シールドトンネルの施工管理においても同様で、高所や狭隘な場所での作業や対面での作業を伴う出来形管理を DX により高度化し、これら課題を解決していくことが求められている。

本稿ではシールドトンネルの出来形管理を対象に、作業休止時間を活用して、レーザーสキャナを搭載した自律移動ロボットで取得した 3 次元点群データから自動で出来形計測を行い、計測結果をクラウド経由で BIM/CIM モデル上で管理できるシステムを構築した。ロボットの自律移動、取得した 3 次元点群データから内空断面・蛇行量の自動算出、出来形計測値の BIM/CIM モデルでの管理についてそれぞれ検証を行った。本システムの開発は、国土交通省 令和 3 年度建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクトにより実施されたものである。

2. システム概要

シールドトンネル工事において閉所時間（192 時間/4 週）や作業引継ぎ時の作業休止時間を有効に活用し、且つ出来形管理の高度化や安全性の確保、省力化を実現するための手法として、出来形の計測、記録といった一連の作業を自動化することが挙げられる。またこれらの出来形に関する情報を遠隔地からも確認できるようにすることで、非対面・非接触での出来形管理の実現も可能となる。

図-1 に本システムの全体概要を示す。本システムでは坑内に適宜ターゲットマーカを設置し、3 次元スキャナ（以下 TLS）を搭載した自律移動ロボットが坑内を自動走行して 3 次元点群データを取得する。取得した点群データは坑内全線に敷設した通信網を経由してクラウドに送信され、点群処理プログラムにより自動で内空断面および蛇行量を計測する。計測した出来形の数値データは出来形管理アプリケーションに送信され、BIM/CIM モデルで管理できるようにする。次章以降でそれぞれの技術開発の詳細について述べる。

3. TLS を搭載した自律移動ロボット

シールドトンネル坑内を自律的に移動するロボットは、坑内に置かれた障害物を適宜回避しながら一定程度の不整地を走破できる必要があり、また大口径のシールドトンネルの 3 次元点群データを精度良く取得するために内空中心付近に TLS を配置できる昇降装置、無線伝送装置、安全装置などを搭載している必要がある。図-2 に開発した自律移動ロボットの全景を示す。ロボットは全長約 1100mm、全幅約 800mm、高さ約 2800mm（収縮時）で昇降装置は最大+2500mm まで伸長することが可能である。不整地での走破能力を確保するためロボットにはバッテリーによる電気駆動のクローラ式を採用し、台車部に 2D LiDAR を前後対角位置に 2 個設置しロボ

キーワード シールドトンネル, ロボット, 出来形自動計測, BIM/CIM, 3 次元点群データ

連絡先 〒212-0032 神奈川県川崎市幸区新川崎 7-7 株式会社イクシス TEL044-589-1500

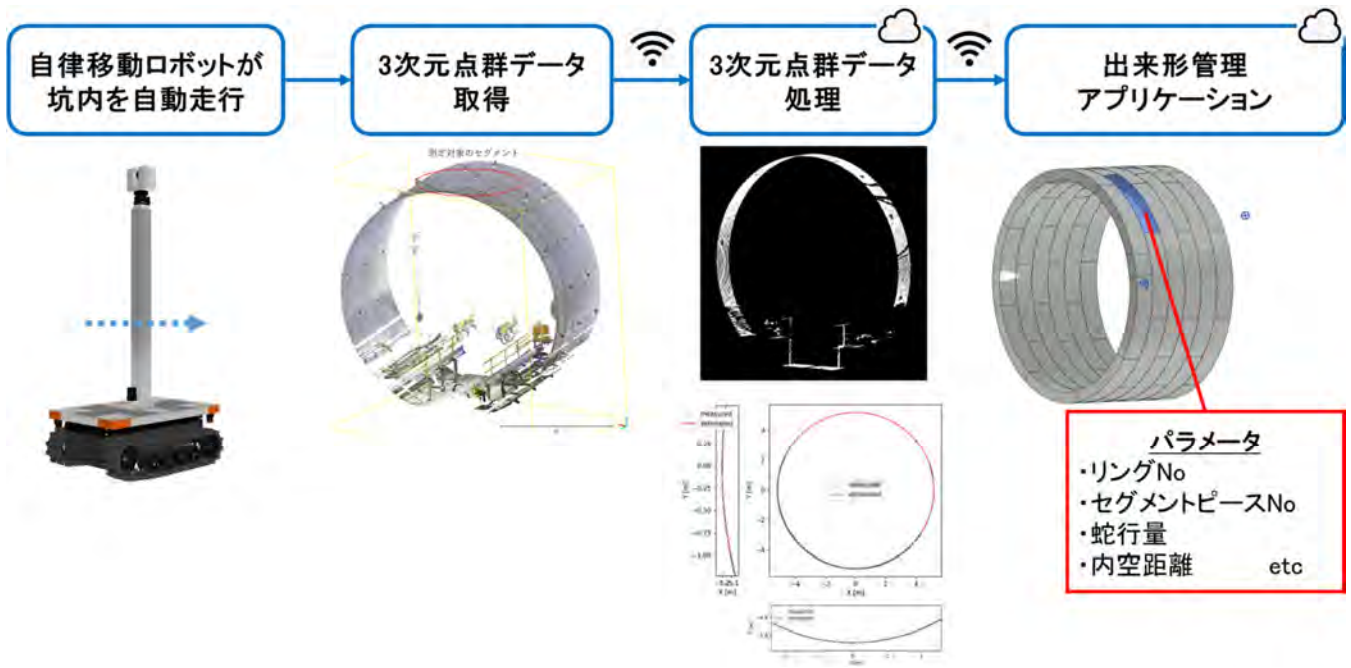


図-1 本システムの全体概要

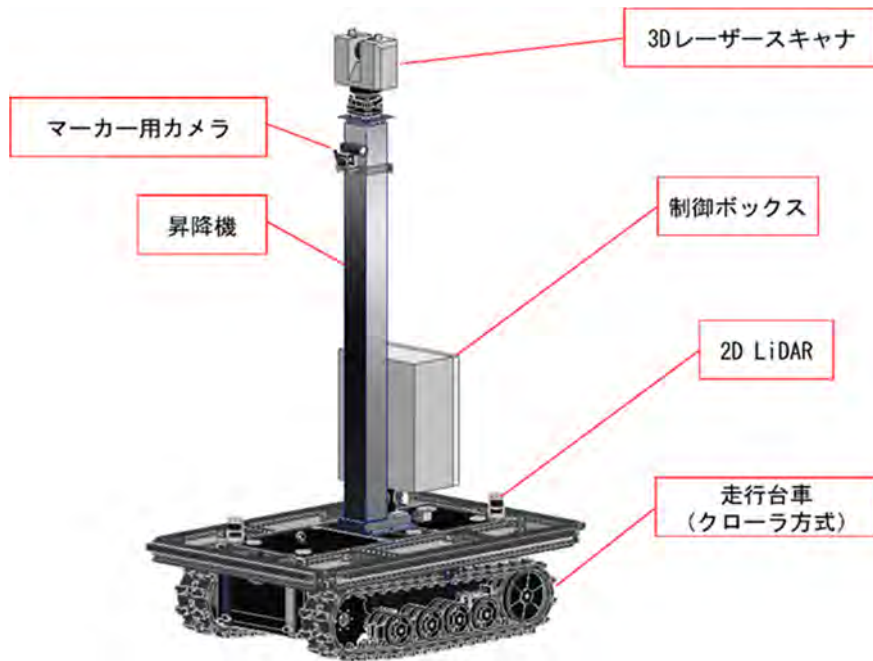


図-2 開発した自律移動ロボットの全景

ット全周の 360 度スキャンを可能として周囲の状況を把握できる仕様とした。

ロボットは搭載した 2D LiDAR のデータを用いた SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ²⁾により坑内を自律移動し、トンネル壁面に設置されたターゲットマーカをカメラで認識しながら一定間隔で停止し TLS により計測を実施する。TLS には図-3 および表-1 に示すライカジオシステム社製 TLS の RTC360 を採用した。ロボット本体に搭載されたシステムより TLS を制御することによりスキャンの開始制御や取得データの外部送信といった一連の操作をロボットの制御と併せて自動化する。

表-1 ライカジオシステム社製 RTC360の諸元

寸法	120 x 240 x 230 [mm]
重量	5.35 [kg]
スキャン範囲	360° (水平) / 300° (鉛直)
測定範囲	0.5 ~ 130 [m]
スキャンスピード	最大2,000,000点/秒
精度	測角精度 18" 距離精度 1.0 mm + 10 ppm 3D 座標精度 1.9 mm @10 m 2.9 mm @20 m 5.3 mm @40 m
レンジノイズ	0.4 mm @ 10 m 0.5 mm @ 20 m



図-3 ライカジオシステム社製 RTC360

4. TLSによる3次元点群データ取得

計測対象リングには専用のターゲットマーカ³⁾が貼り付けられており、ロボットはSLAMにより予め指定した計測ポイントまで移動した後、搭載されたカメラによりターゲットマーカを自動認識し自己位置同定を行う。また、昇降装置先端に取り付けられた TLS を内空断面中心付近まで昇降させ3次元点群データを取得することにより、内空断面を精度よく計測する。その後昇降装置を収納し次の計測ポイントへ移動する。これを繰り返すことで一連の3次元点群データを取得することが可能となる。図-4にロボット動作の一連のフローを示す。これらロボットのステータスや取得した3次元点群データからの計測結果は坑内全線に敷設された通信網を介してクラウドに送信される。

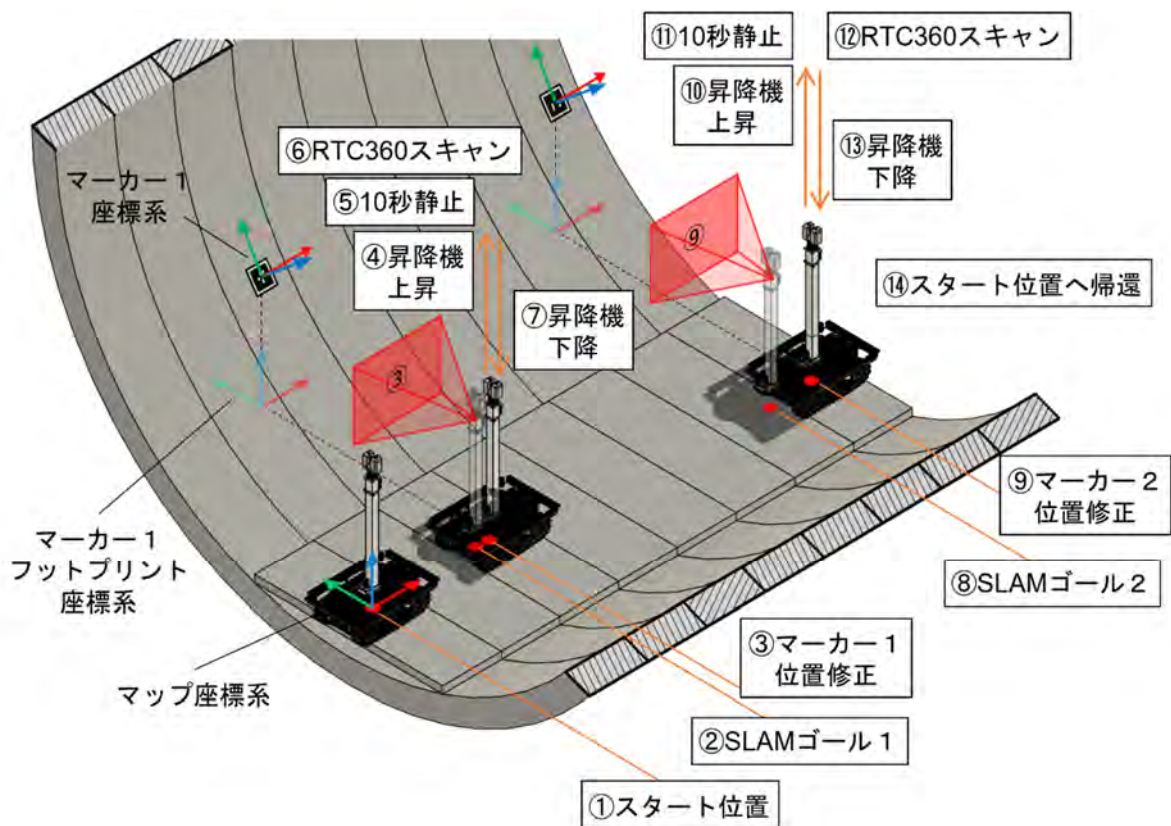


図-4 一連のロボット動作フロー

5. 3次元点群データ処理による内空断面および蛇行量の算出

図-5にシールドトンネルの内空断面および蛇行量の定義を示す。内空断面はセグメント内径の幅 W と高さ H である。高さ H をインバートコンクリートにより垂直に計測できない場合は、45度方向 ($W1$ および $W2$) にて計測する。蛇行量は、設計中心座標と計測中心座標との差 (X 方向 $D1$, Y 方向 $D2$) を指す。尚、坑口から切羽を見たときのリング断面の水平方向を X , 垂直方向を Y とする。出来形管理における規格値については、内空断面が 46 mm, 蛇行量が $\pm 50\text{mm}$ となっている。

TLSにより取得した3次元点群データから、以下のステップにて内空断面および蛇行量を算出した。

Step1: 作成した設計データを読み込む。設計データはリングの切羽方向の中心座標である。

Step2: 各点群データ内より事前に世界測地系の座標をもつターゲットマーカを自動で算出し、各3次元点群データを世界測地系に変換する。

Step3: 3次元点群データ内より設計データに対応するリングの点群データを抽出する。

Step4: 抽出したリングの3次元点群データを円筒推定しリングの径と方向を推定し、併せてセグメント以外のノイズを除去する。

Step5: 抽出したリングの3次元点群データを n 個にスライスする。

Step6: スライス的位置に対応する設計中心、リング断面が XY 平面となるようにスライスされた3次元点群データを2次元平面に投影する。

Step7: 楕円推定を行い蛇行量 (中心からのオフセット) と内空断面 (楕円の X 軸半径と Y 軸半径) を計算する。

Step8: 計 n 個のスライスの内空断面, 蛇行量の平均値を計算する。

以上のステップにより算出された内空断面および蛇行量を表-2に示す。この際、従来手法との精度比較を行うためトータルステーション (以下 TS) の結果も示す。内空断面は設計値が 10400mm であり規定値は 46mm である。TS および本手法による計測結果どちらも既定値内の結果となった。蛇行量の既定値は $\pm 50\text{mm}$ であり TS および本手法による計測結果どちらも既定値内の結果となった。さらに、従来はシールド工法トンネルセグメントのリング毎に内空断面および蛇行量の計測を行っていたが本手法をすることにより一度の計測で10個以上のリングでの計測が可能となった。

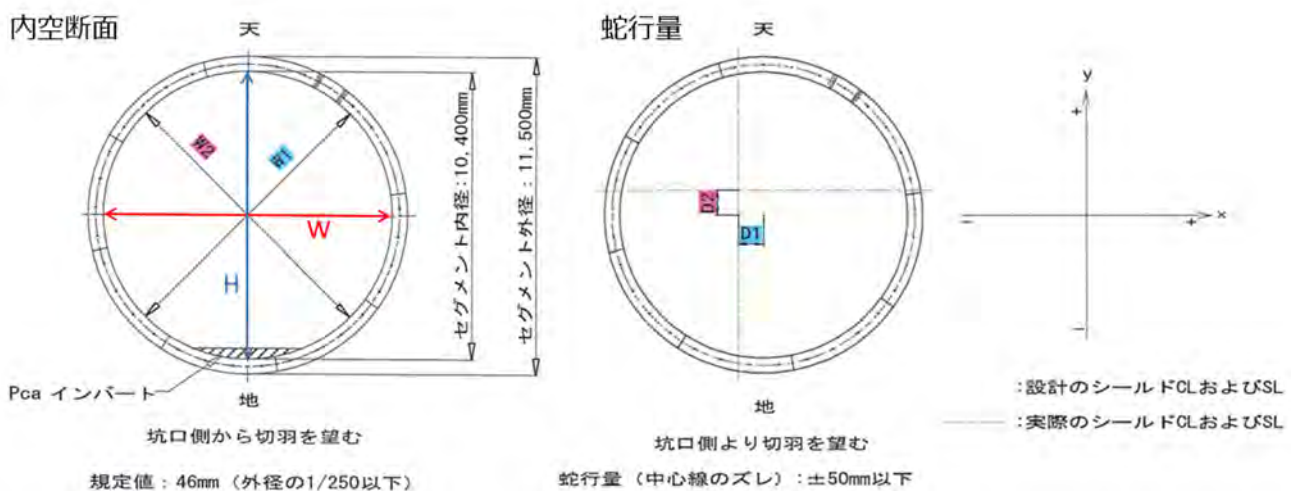


図-5 内空断面と蛇行量の計測方法

表-2 TS による計測結果と、本手法による計測結果比較 (単位 : mm)

	内空断面 W1	内空断面 W2	蛇行量 D1	蛇行量 D2
TS による結果	10400	10404	19	1
レーザースキャナと 出来形点群処理	10395.3 (W=10409.7)	10395.3 (H=10400.9)	2.3	9.4

6. BIM/CIM モデルを活用した出来形管理アプリケーション

開発した出来形管理アプリケーションの概要を図-6 に示す。本アプリケーションは、ユーザーが Web 上で操作できるもの (Web アプリケーション) とした。設計 BIM/CIM モデルは、Autodesk Revit (以下 Revit) を用いて作成し、Autodesk BIM360 (以下 BIM360) に保存する。設計 BIM/CIM モデルは、出来形の数値データを格納できるように、あらかじめ内空断面、蛇行量に関するパラメータをリング毎に設定しておく。出来形管理アプリケーションは、Autodesk Forge (以下 Forge) を利用して開発した。出来形管理アプリケーションは、3 次元点群データ処理により計測した出来形の数値データを受け付け、BIM360 上に保存された設計 BIM/CIM モデルの該当する属性情報に格納する。図-7 に開発した出来形管理アプリケーションのユーザーインターフェースを示す。

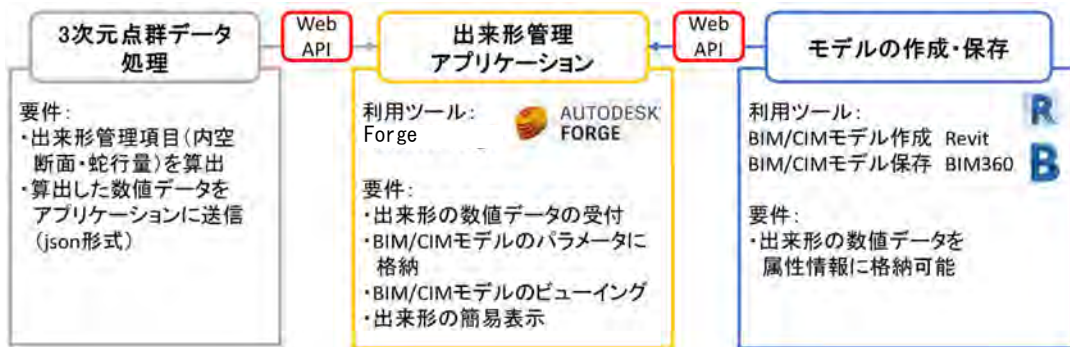


図-6 出来形管理アプリケーションの概要

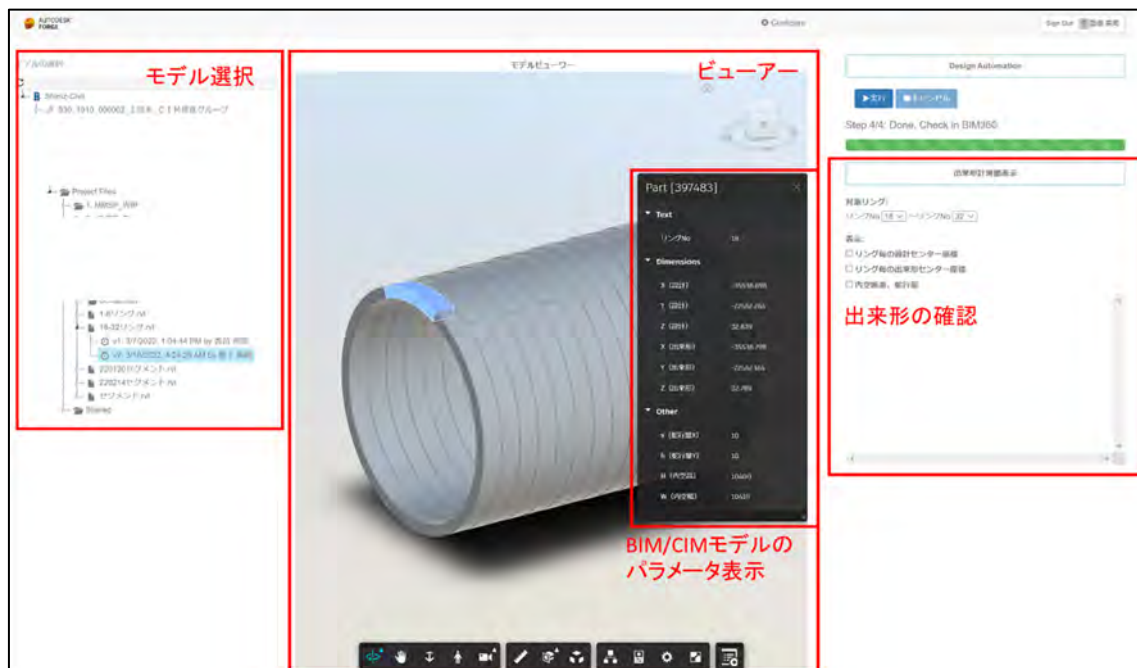


図-7 出来形管理アプリケーションのユーザーインターフェース

7. まとめ

本稿では、国土交通省が推進する i-Construction により建設現場において ICT の全面的な活用が進む中、現場での DX を活用した出来形管理の高度化や安全性の確保、省力化などの技術開発としてシールドトンネルにおけるロボットを活用した出来形自動計測システムを開発した。

本技術により、TLS を搭載した自律移動ロボットにより得られたシールドトンネルの 3 次元点群データから内空断面や蛇行量を自動で計測し、その結果が精度内に収まっていることを確認した。また、その結果を出来形管理アプリケーション内にて BIM/CIM モデル内で比較できることも確認できた。

本技術により現場の 4 週 8 閉所の確保などの作業員の働き方改革や、新型コロナウイルス感染症対策による非対面・非接触が推奨されるといった課題解決の一助になると期待される。

今後は建設プロセスにおける BIM/CIM モデルを活用したデータ連携の効率化の取り組みなどにも積極的に関与し、維持管理段階への情報連携などに貢献していきたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ, <https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 2) 友納正裕, “移動ロボットの環境認識—地図構築と自己位置推定”, システム/制御/情報, Vol. 60, No. 12, pp. 509-514, 2016.
- 3) 山崎文敬, 前田幸佑, “再帰反射ターゲットマーカを活用した高精度点群自動結合”, 第 4 回「i-Construction の推進に関するシンポジウム」, 2022.