## 5. トンネル切羽版重機搭載レーザ計測システムの開発

### ~ICT 技術を使ったトンネル切羽掘削面のあたり計測検証~

株式会社フジタ	○中島	勇気
株式会社フジタ	浅沼	廉樹
ライカジオシステムズ株式会社	浮田	真樹

1. はじめに

山岳トンネルでは掘削発破後に発生する切羽面 の設計面より内側に突出した整形箇所(以下あた り箇所)について,作業員(誘導員)が切羽直下 に立入り,目視にてあたり箇所を確認しあたり取 り作業の指示を出していた。しかし,発破直後の 切羽は大変危険であり,安全性の確保が課題とな っていた。

近年では、これらの切羽作業に3Dレーザース キャナを用いた計測が行われているが、精密機器 かつ操作に専門的な知識が必要なことや、盛り替 えに時間を要するなどの難点があった。さらに、 トンネル坑内においてはGNSS(全球測位衛星シ ステム)が使えない為、GNSSを利用した簡易な 計測ができない等の制約条件があり、簡易に自己 位置を計測できる技術開発が望まれていた。 切羽版重機搭載レーザ計測システム (以下 切羽版重機 LS-TS)は、2年前に開発した「重機 搭載レーザ計測システム(インバート版)」を切 羽計測用に改良したものである。

トンネル重機(ブレーカー)に計測ユニットを 搭載して、切羽面を旋回しながらスキャニングす ることで、取得した点群データと設計データの差 分をヒートマップで出力し、重機オペレータが作 業中に単独で切羽のあたり箇所の判定を行い効率 的なあたり取りが可能となるシステムである。

本論文では、この技術を国土交通省四国地方整 備局発注の羽ノ浦トンネル工事の切羽面掘削工に て、検証した結果を報告する。

# 2. システムの概要

2.1 技術の概要

本システムは、トンネル内で運用可能なマシン ガイダンス、切羽版重機 LS-TS、追尾式 TS で構成され、トンネル切羽部の 3D 計測を行う。シス



本システムの特徴を以下に示す。

- ・GNSS が利用できないトンネル空間において も、明かり工事と同様に ICT 施工が適用可能。
- ・計測器に屋外用の安価で汎用性が高い 2D のレ ーザースキャナを用いて,重機を旋回させて計 測することで容易に 3D データを取得。
- ・重機に後付で搭載が可能。
- ・重機が旋回スキャンする事で取得した掘削施工 面の現状データを、3D 設計データと重ね合わ せ、差分を色分けしたヒートマップを重機運転 席の重機 LS モニタで計測結果閲覧可能。
- ・計測から解析までを短時間で行い,測量作業が 大幅に省力化され,生産性向上が可能。
- ・切羽面への誘導員の立入が不要になり,安全性 向上が可能。

3. 模擬トンネルでの実証実験

3.1 トンネル内環境対策

切羽版重機 LS-TS をトンネル坑内で運用するに あたり、あたり取りで発生するガラ飛散による各 センサの損傷が考えられた。そのため、専用の架 台及び防護ケースを製作し、防護措置を施した。 図-2に実際に使用した防護ケースを示す。

また,各センサがあたり取り作業の振動で破損 することも考えられたため,防振措置(2Dスキャ ナにはヘリカル防振器,傾斜計には防振ゴムを使 用)を施した。

図-2 に実際に使用した防護ケース・防振措置を 示す。



図-2 防護ケース,防振措置実施状況

3.2 模擬トンネル概要

実証実験を行う前に模擬トンネルで精度確認を 行った。以下に模擬トンネルの概要を示す。

検証場所:埼玉県飯能市 株式会社フジタ 機械工場敷地内 検証期間:2021/3/2~2021/3/12 トンネル寸法:高さ 4.0[m] 幅 8.0[m]

#### 3.3 模擬トンネルでの精度確認

精度確認試験は、「地上移動体搭載型レーザー スキャナを用いた出来形管理要領(土工編) (案)」(国土交通省)に準じた。模擬トンネル切 羽面に11点の検証ターゲットを設置し、この検証 点において、TSの計測値と、切羽版重機LS-TS の計測値の差分が基準値±50mm以内であるかを 確認した。また重機の姿勢は逆傾斜にした条件で の計測結果を表-1に示す。





図-3 模擬トンネルにおける精度確認状況

#### 表-1 模擬トンネルでの精度検証結果

傾斜 [度]	旋回 速度	旋回	旋回		差分	
[/支]	[度/秒]	円反	기미	ΔX	ΔY	ΔZ
		л	右	-0.014	-0.041	0.032
	1未満	.1.	左	-0.031	-0.040	0.031
		右	-0.002	-0.038	0.002	
			左	-0.002	-0.034	-0.018
		ds	右	-0.034	-0.029	-0.012
逆傾斜部	1	· ·	左	-0.013	-0.010	-0.025
[-10.9]	[-10.9] 上 大	+	右	-0.018	-0.041	-0.003
		左	0.010	-0.022	-0.001	
		ds	右	-0.048	-0.037	-0.030
	2	左	-0.001	-0.014	0.009	
2	2	2 大	右	-0.015	-0.047	0.001
			左	0 020	-0.022	0 008

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

この結果より切羽版重機 LS-TS が要求精度を満 たしていることを確認した。

4トンネル現場での実証実験

4.1 実証実験現場の概要

工事名	:令	和元-	-4 年度横断道
	羽	]ノ浦	トンネル工事
工事場所	:徳	₿ 島県∕	小松島市
実施時期	: 1	回目	2022.1
	2	回目	2022.4
発注者	:国	土交i	通省四国地方整備局

4.2 現場実証時のキャリブレーションの見直し

実証実験開始前に重機を変更した為精度確認試 験を実施した。

以下に精度確認試験の条件を示す。 <条件 1>

本システムは, 追尾式 TS で位置と方位, 2D スキ ャナで距離, 傾斜計によるピッチ, ロールの補正を 行い各センサのデータを演算し3次元座標を求め る仕組みである(図-5参照)。計測距離が長距離 にまるとレーザスポット径の拡大, 入射角が小さ くなることから計測精度が低下する。要求精度の ±50mm に対して最大計測可能距離 10.0m 以内と する。

〈条件 2〉

本システムは、バックホウが走行せずに旋回す る事により3次元座標が得られる(図-4参照)。 出来形計測に必要な点群密度(0.01m2に1点)に 対して、旋回速度は4度/秒以内とする。



図-4 キャリブレーション確認範囲

現場実証時の精度確認において,上記キャリブ レーション確認範囲による試験を実施したところ 当初は基準値を満足する精度が得られない結果と なった。

この原因を調査したところ,重機旋回時の左右 区分におけるデータ数値の差異が大きいことか ら,重機の位置計測を行う追尾式 TS の応答速度遅 延が重機旋回の左右差で影響が発生していること が判明した(図-6参照)。

そこでセンサ類を後付けで設置した後に行うキャリブレーション時に行うパラメータの設定に左右旋回時の個別のパラメータ数値を入力できるようアルゴリズムを修正した。本改良にもとづく精度確認試験の結果を表-3に示す。この結果よりパラメータ設定でTS応答速度遅延の問題が解消できることを実証した。



図-5 重機 LS—TS における重機姿勢の求め方



図-6 TS の応答速度の遅延

表-3 トンネル坑内坑口部での検証結果

計測位置	旋回 速度	旋回	差分の平均		
[/文]	[度/秒]	1 IHI	ΔX	ΔY	ΔZ
	1	左	-0.019	-0.011	-0.009
	1	右	0.027	-0.002	0.003
坑口部	2	左	0.002	-0.009	-0.005
[0]	2	右	-0.007	-0.021	0.026
	Л	左	0.028	-0.002	0.014
	+	右	-0.008	-0.016	0.013

(単位[m],出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

4.3 トンネル切羽での精度検証結果

前述キャリブレーションの見直しにより高精度 が確認されたため,切羽計測での精度確認試験を 実施した結果を表-4 に示す。

1		•	1 1 2 3 3 3 4 6		
計測位置	旋回 速度	旋回	差分の平均		
[/支]	[度/秒]	게미	ΔX	ΔY	ΔZ
	1	左	-0.013	0.044	-0.018
	1	右	-0.040	-0.006	-0.011
傾斜部	2	左	-0.025	0.039	-0.020
[6]	4	右	-0.021	0.016	-0.005
		左	-0.045	0.014	-0.009
		右	-0.003	0.042	0.007

表-4 トンネル切羽部での検証結果

(単位[m],出来形計測のため評価基準は±0.050[m]以内)

この結果よりすべての計測値が±50mm 以内に収 まり切羽版重機 LS-TS の精度確認を行うことがで きた。

5. 作業時間の短縮化

作業員(誘導員)が切羽直下に立入り,目視に てあたり箇所を確認し作業指示を出していた従来 の確認方法から,重機オペレータが自ら作業しな がら出来形の良否を確認できるようになり,整形 作業が約22%短縮された(表-5参照)。

表-5 作業時間の比較

作業内容	従来方法	切羽版重機 LS-TS
あたり取り作業[min]	30. 0	30.0
余掘り確認[min]	15.0	5.0
合計時間[min]	45.0	35.0

6. 今後の課題

6.1 精度の向上

今回の実証実験では「国土交通省地上移動体 搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理要領 (土工編)(案)」に準拠して精度確認を行った が、「地上型(定置式)レーザスキャナを用いた 出来形管理」では±5mmの測定精度が求められる ため、さらなる精度向上が必要である。そのため の1例として検証点を改良する事が挙げられる。 これは2Dスキャナから放たれるレーザ光が検証 点に反射して、受光器に返ってくる具合が、センサ 認識としての質に影響を及ぼしている可能性があ る。そのため、異なる旋回方向や旋回速度でも同 様に反射レーザ光を受光できる検証点の開発が必 要である

#### 6.2 出来形帳票システム

今後はヒートマップ表示を行うソフトと連動し て余掘り量数値や覆エコンクリート巻厚確認のた めの出来形帳票として出力できるソフトの開発も 視野に入れて検証・開発を行う(図-7参照)。



図-7 ヒートマップ表示例

#### 7.おわりに

切羽版重機 LS-TS によるあたり箇所の 3D 計測 とヒートマップ化を実現することで,従来の誘導 員による目視確認と比較して誘導員が不要となる ため安全性の向上を図ることが可能である。

また,あたり箇所の判定を重機オペレータ単独で 行えるため省人化による生産性向上を図ることが 可能である。

本技術が建設現場への ICT 導入に対する更なる 普及促進につながれば幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり,多岐にわた りご指導を賜りました関係者各位に深く感謝を申 し上げます。