

光切断法を用いた トンネル3次元計測に ついての技術研究開発

山下 淳 (Atsushi Yamashita)

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

／ **i-Construction**システム学寄付講座

yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp>



2021年11月25日 16:20-16:40, オンライン (Zoom)

謝辞

2

- 本研究は令和3年度 国土交通省関東地方整備局「技術シーズマッチング」の援助を受けて実施致しました。厚く御礼申し上げます。

光切断法を用いたトンネル3次元計測についての技術研究開発

山下 淳¹・伊藤 哲²・吉田 健一²・谷口 信博²



1：東京大学 i-Constructionシステム学寄付講座

2：株式会社 大林組

研究の背景

■ トンネル形状の3次元計測

- トンネルの施工・維持管理に必要不可欠

■ 人力による計測

- 作業員4名 + 高所作業車 + メジャー
- **手間がかかる**



<https://www.monotaro.com/g/01997538/>



■ トータルステーション

- 1点のみに光を照射・計測
- **複数点 (多点) 計測は不向き**
- **密な (高密度な) 計測は不向き**



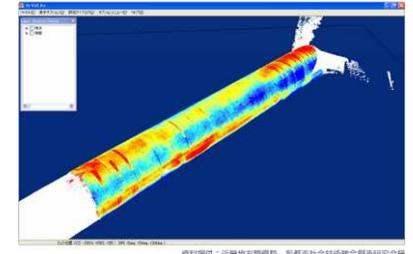
従来研究

■ MMS (三菱電機)

- NETIS KK-090011-A
- Mobile Mapping System (移動計測車両)



<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/>



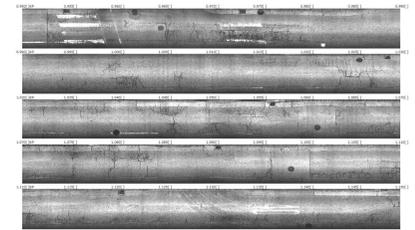
資料提供：三菱地方整備局 新都市社会基盤総合調査研究会

■ トンネル覆工表面レーザ計測システム (トノックス)

- NETIS KT-140074-A
- MMSでトンネル計測

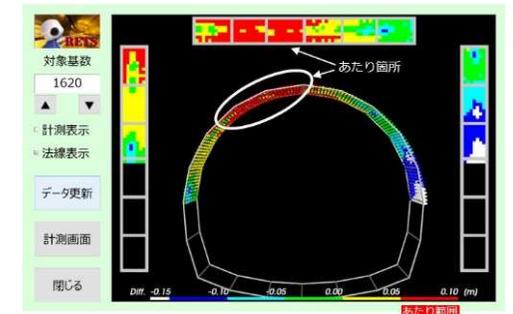


<http://tonox.jp/20190604/blog14/>



■ 切羽掘削形状モニタリングシステム (西松建設)

- 3Dレーザスキャナを利用



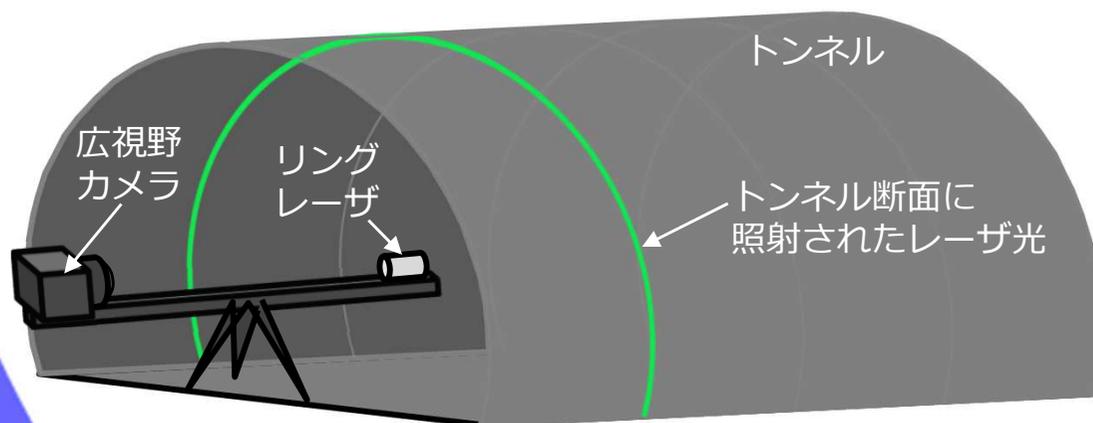
<https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/1902/20/news023.html>

**自動車が走行不可能なトンネル施工時にも
大掛かりな装置を用いずに簡便に計測したい**

研究の目的

■ 簡便かつ高速かつ密なトンネルの3次元形状計測手法の新規提案

- 密な計測に適する**光切断法**を利用
- 広い視野を有する**広視野カメラ**
- 広範囲を照射可能な**リングレーザー**



光切断法を用いたトンネル3次元計測

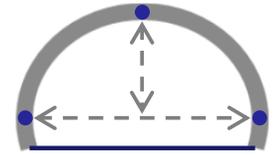


トンネル3次元計測の様子

提案手法のポイント

■ 貢献・社会に果たす役割

- 従来：**少数の計測点**のデータで管理
 - 簡便・高速な断面の全形状計測が技術的に困難なため
- 提案手法：**トンネル断面の全形状**を計測可能
 - 設計値通りの施工であるかの確認
 - 通行車両との接触判定
 - トンネル形状の経年変化の定期的調査



■ 実用性

- トータルステーション：計測箇所が**目視できない**
- 提案手法：照射したレーザー光を**目視可能** → 作業者が計測箇所をリアルタイムで把握・変更可能
- **使い勝手**：作業者の意図通りに直感的に扱える
- **納得性**：メジャーと同様，理解できる

チャレンジ (1/2)

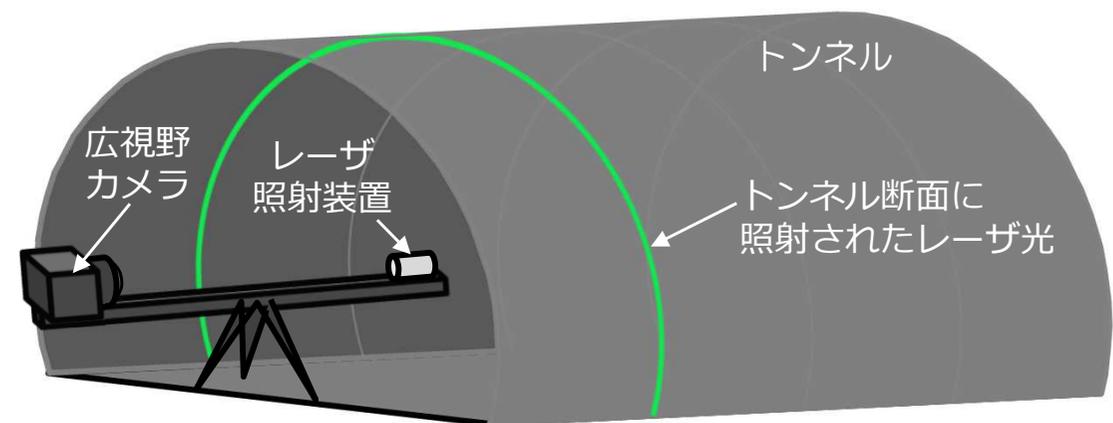
7

■ 簡便かつ高速に密な3次元計測

- トンネル内の**1断面**を**1回**のレーザー照射で計測
- 断面数のレーザー照射で複数の断面形状計測・**自動統合**

■ 解決すべき課題

- **非整備環境**
- **大型構造物**



チャレンジ (2/2)

8

■ 非整備環境 (照明条件制御不可 = 不安定)

- レーザ光出力を変更した2枚の画像を取得して、**画像間の差分解析** → 安定性の問題を解決

■ 大型構造物

- 魚眼カメラ+リングレーザで、広い範囲を同時に**ワンショット計測**
- 複数断面の計測結果の**自動統合**：光切断法 + Structure from Motionのような**画像解析**

研究内容

■ 1年目 (2020年10月～2021年3月)

- トンネルの**一断面**の3次元計測手法の**基礎理論構築**
- 計測システム**プロトタイプ**の構築
- プロトタイプを用いた理論検証

■ 2年目 (2021年4月～2022年3月)

- 前年度に構築した計測システムのプロトタイプの**改良**
- **高精度に密な3次元計測**が可能な計測システムの構築

■ 3年目 (2022年4月～2023年3月)

- 令和2～3年度に構築した一断面の3次元計測手法を用いて取得した**複数の断面形状の計測結果統合**を行う手法の構築
- トンネルでの検証実験および評価

■ 三角測量の原理 (点光源)

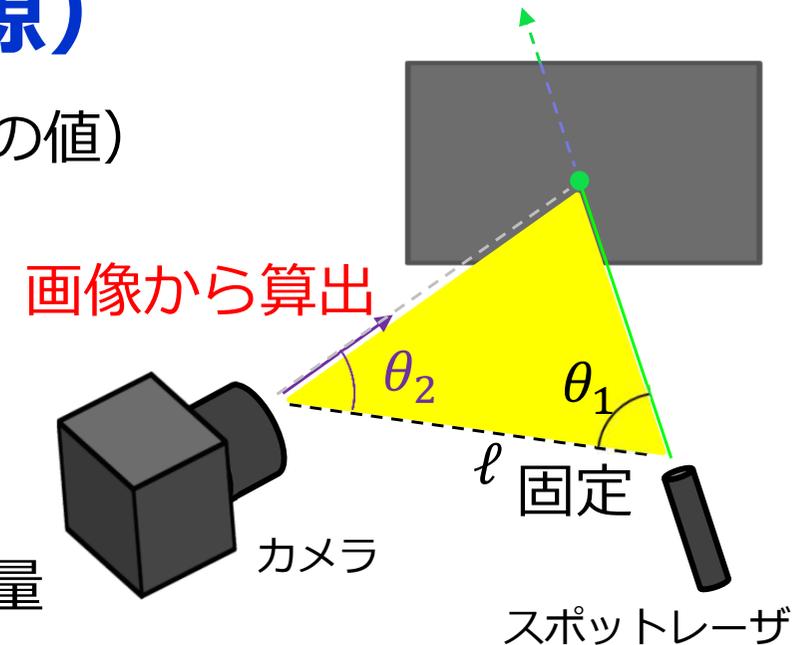
装置を組むと固定される関係性 (既知の値)

- ・ カメラとレーザの距離 (ℓ)
- ・ カメラとレーザの角度 (θ_1)

画像から算出される視線方向

- ・ カメラの視線方向 (θ_2)

カメラの視線とレーザ方向による三角測量

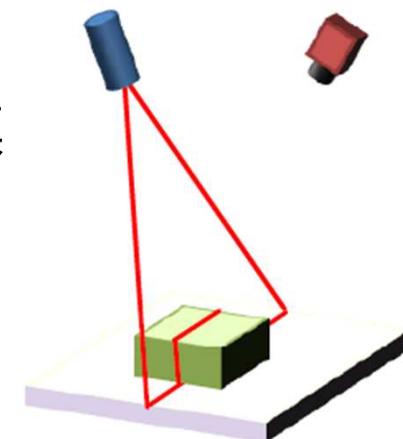


■ 光切断法の原理 (線光源)

点光源：光が当たった**1点のみ**の3次元座標

線光源：光で**切断した断面**の3次元座標

(= **光切断法**)



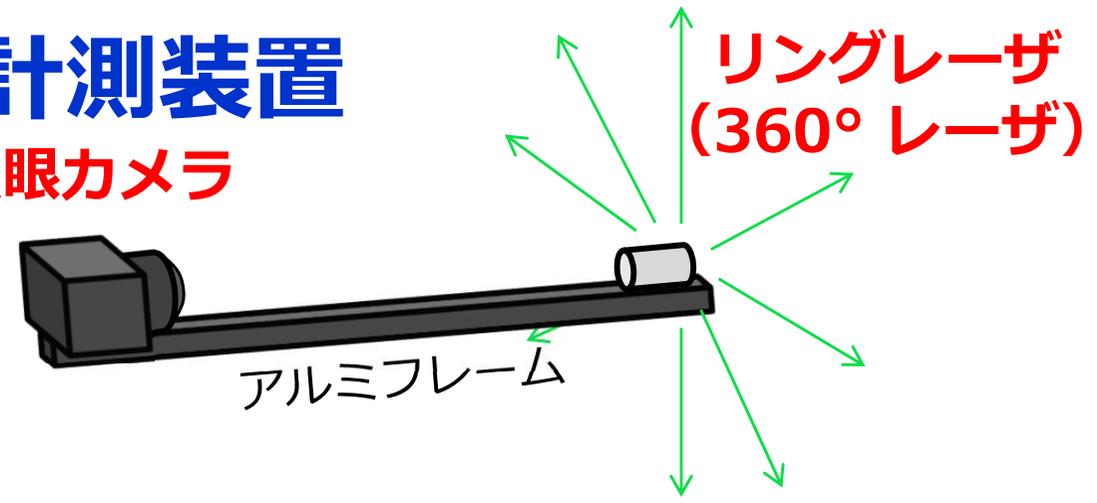
<https://www.eyedeaal.co.jp/eyemlsm.html>

トンネル計測方法

■ 新規に提案する計測装置

- 魚眼カメラ
- レングレーザ

魚眼カメラ



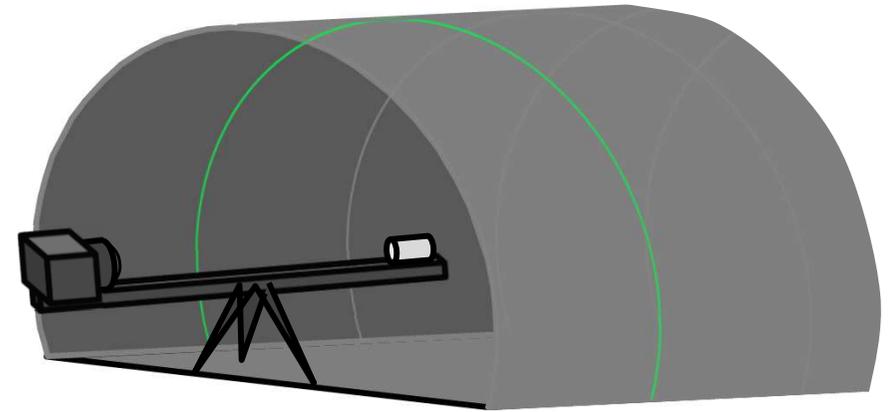
1断面の3次元形状計測

12

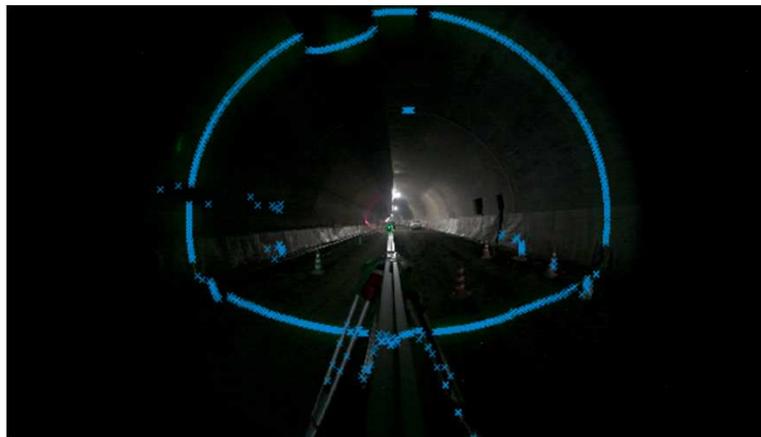
■ワンショットでトンネル断面形状計測

トンネル撮影

トンネルに照射したレーザの撮影



レーザの自動抽出



3次元座標算出



画像解析

計測の様子

13

- 計測装置：移動

- 後カメラ：停止



- 計測装置：停止

- 後カメラ：移動



交互に動かすことでトンネル内の長区間を計測

研究内容

■ 1年目 (2020年10月～2021年3月)

- トンネルの**一断面**の3次元計測手法の**基礎理論構築**
- 計測システム**プロトタイプ**の構築
- プロトタイプを用いた理論検証

■ 2年目 (2021年4月～2022年3月)

- 前年度に構築した計測システムのプロトタイプの**改良**
- **高精度に密な3次元計測**が可能な計測システムの構築

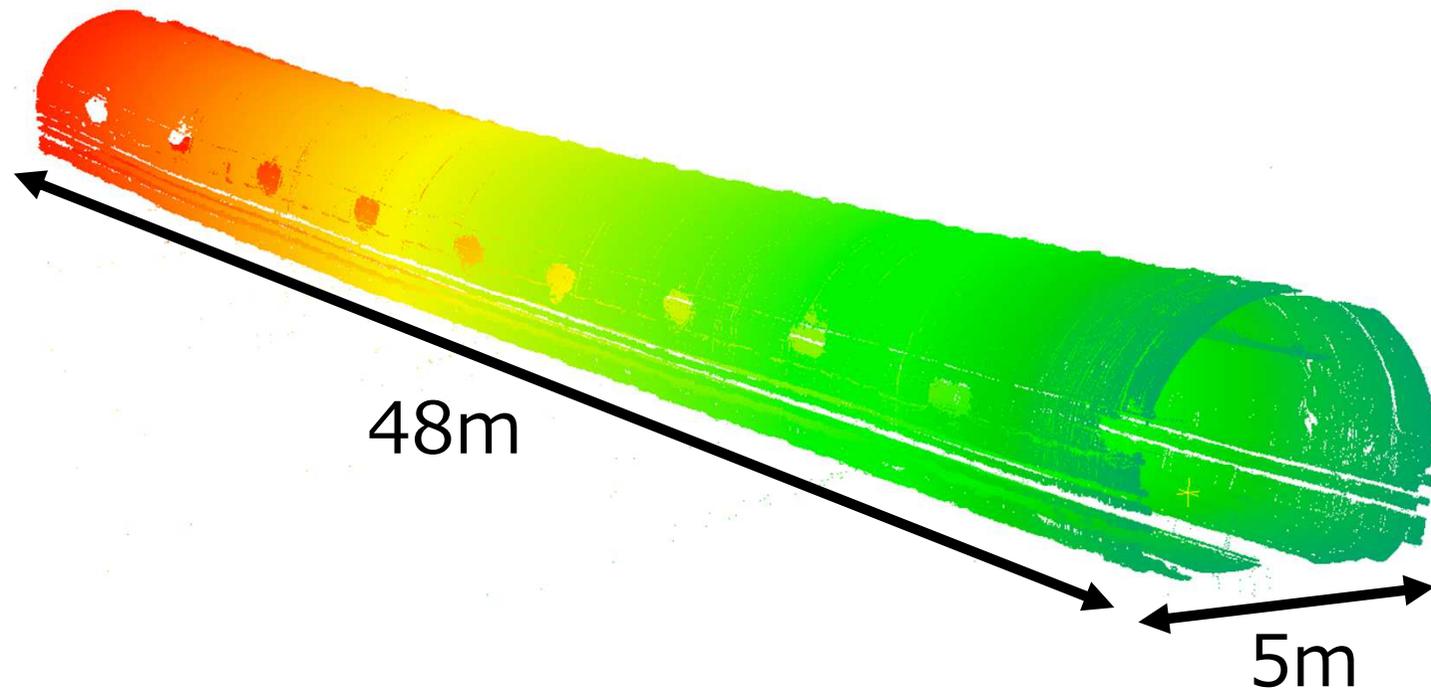
■ 3年目 (2022年4月～2023年3月)

- 令和2～3年度に構築した一断面の3次元計測手法を用いて取得した**複数の断面形状の計測結果統合**を行う手法の構築
- トンネルでの検証実験および評価

高精度・密な計測結果

15

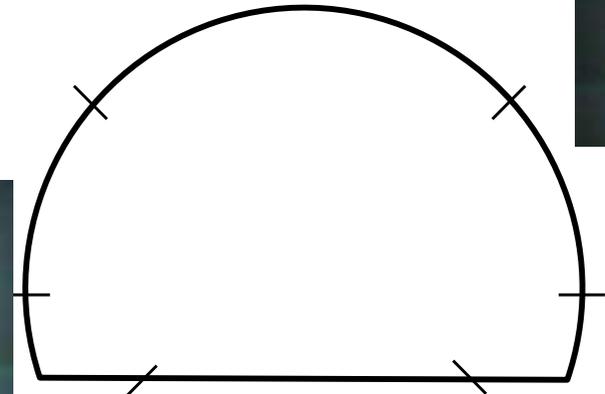
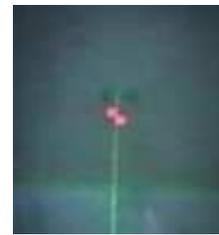
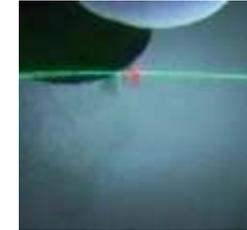
- 計測対象：48mの区間
- 計測点群：716万点 (4335断面分)
- 計測時間：10分



精度評価方法

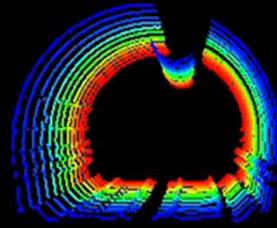
■ トータルステーションを用いた精度評価

- 各断面6点マーカを設置
- 合計13断面

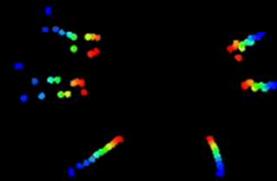


トータルステーションの計測箇所

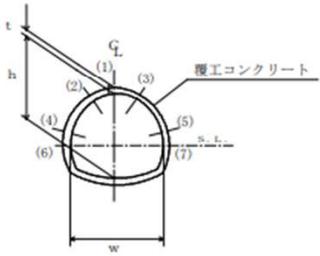
光切断法 (提案手法) の3次元計測結果



トータルステーションのみの3次元計測結果

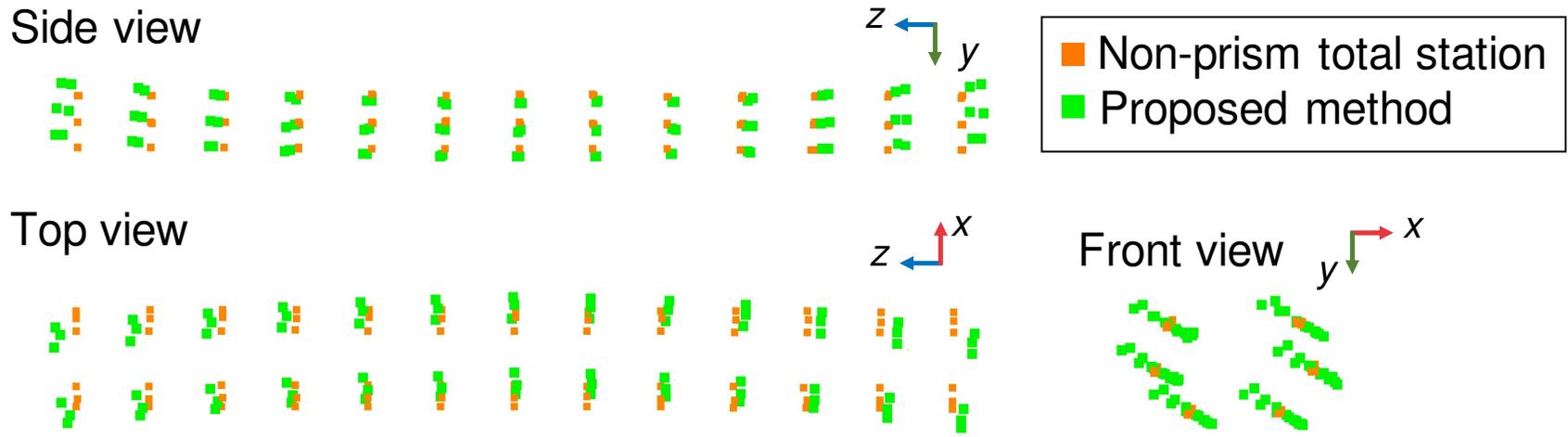


■ 出来形管理基準及び規格値

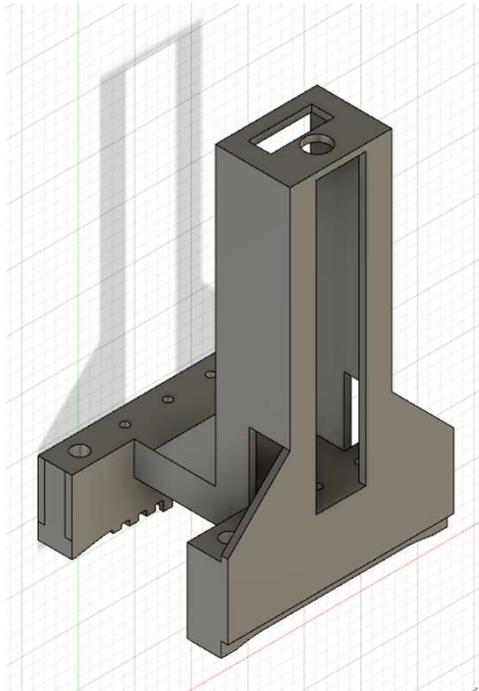
編	章	節	条	枝番	工 種	測 定 項 目	規 格 値	測 定 基 準	測 定 箇 所	摘 要
10 道路編	6 トンネル (N A T M)	5 覆工	3		覆工コンクリート工	基準高▽ (拱頂)	±50	(1) 基準高、幅、高さは、施工40mにつき1ヶ所。 (2) 厚さ (4) コンクリート打設前の巻立空間を1打設長の終点を図に示す各点で測定。中間部はコンクリート打設口で測定。 (5) コンクリート打設後、覆工コンクリートについて1打設長の端面(施工継手の位置)において、図に示す各点の巻厚測定を行う。 (ハ) 検測孔による巻厚の測定は図の(1)は40mに1ヶ所、(2)~(3)は100mに1ヶ所の割合で行う。 なお、トンネル延長が100m以下のものについては、1トンネル当たり2ヶ所以上の検測孔による測定を行う。 ただし、以下の場合には、左記の規格値は適用除外とする。 ・良好な地山における岩又は吹付コンクリートの部分的な突出で、設計覆工厚の3分の1以下のもの。 なお、変形が収束しているものに限る。 ・異常土圧による覆工厚不足で、型枠の据付け時には安定が確認されかつ別途構造的に覆工の安全が確認されている場合。 ・鋼アーチ支保工、ロックボルトの突出。		10-6-5-3
						幅 w (全幅)	-50			
						高さ h (内法)	-50			
						厚さ t	設計値以上			
						延長 L	—			

精度評価結果

- 誤差平均 : 18.36mm
- 標準偏差 : 8.27mm



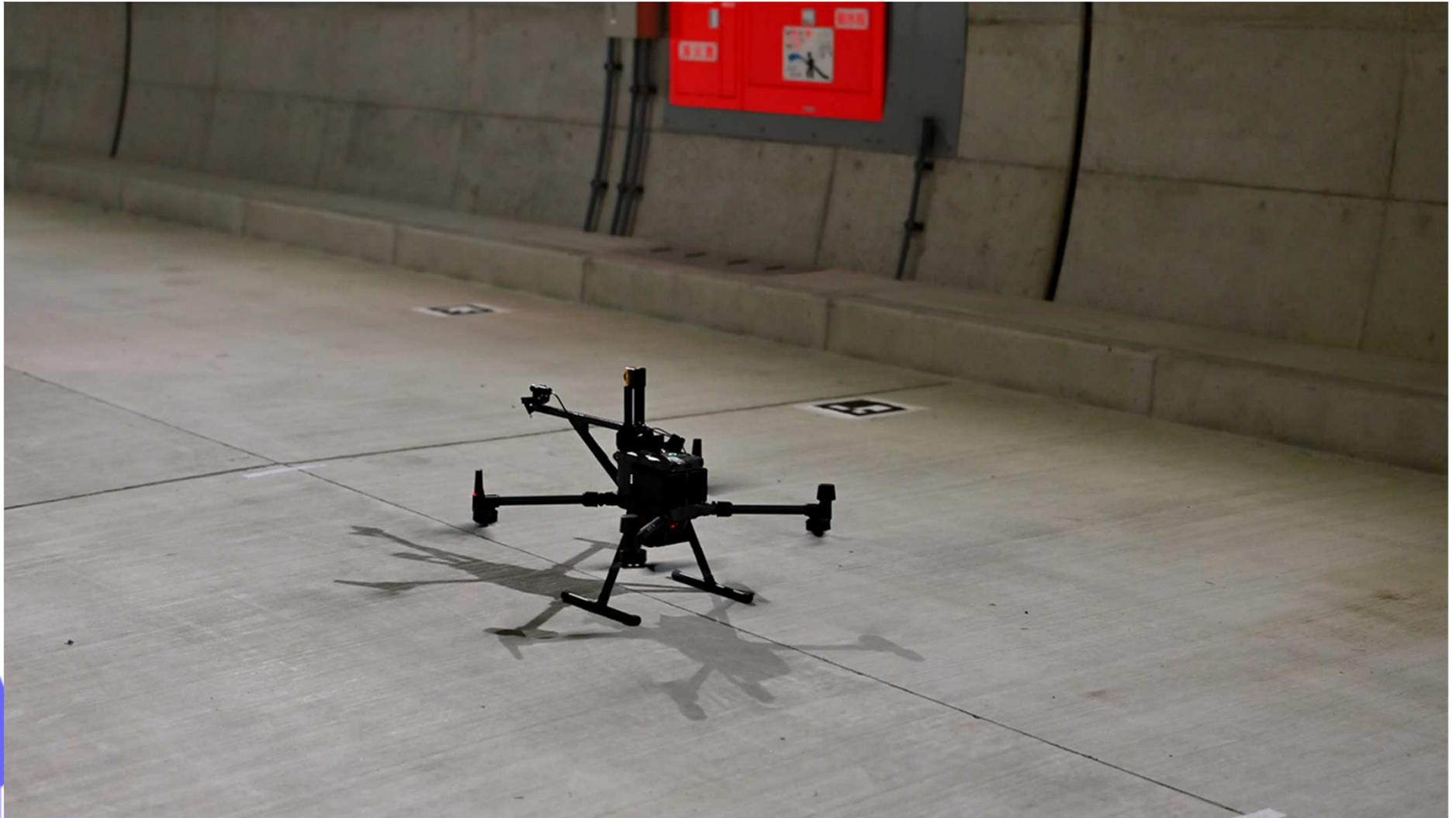
- ドローンへの固定具を3Dプリンタで製作
 - 小型化・軽量化を実現



ドローンによる計測

21

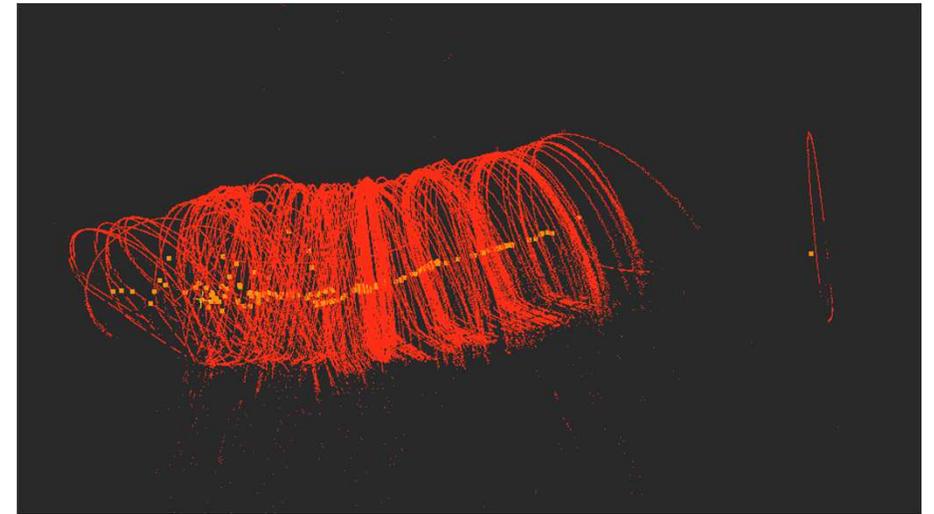
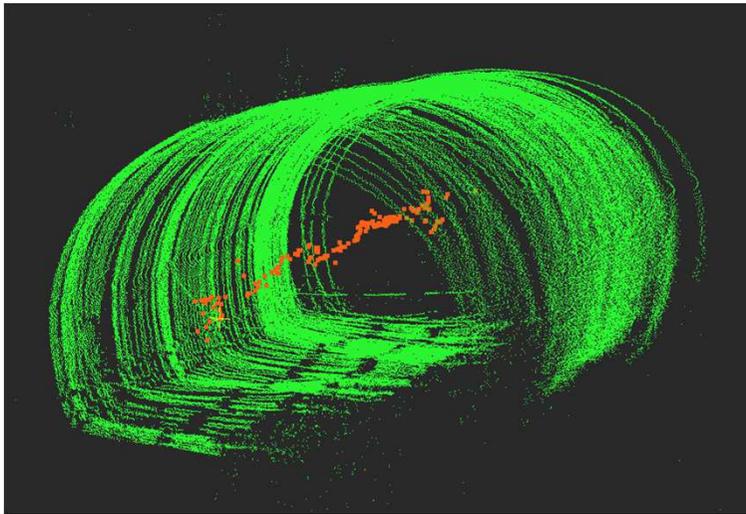
■ ドローンを用いたトンネル計測



ドローンによる計測結果

22

■ 現在解析中の途中結果



研究内容

■ 1年目 (2020年10月～2021年3月)

- トンネルの**一断面**の3次元計測手法の**基礎理論構築**
- 計測システム**プロトタイプ**の構築
- プロトタイプを用いた理論検証

■ 2年目 (2021年4月～2022年3月)

- 前年度に構築した計測システムのプロトタイプの**改良**
- **高精度に密な3次元計測**が可能な計測システムの構築

■ 3年目 (2022年4月～2023年3月)

- 令和2～3年度に構築した一断面の3次元計測手法を用いて取得した**複数の断面形状の計測結果統合**を行う手法の構築
- トンネルでの検証実験および評価

おわりに

■ 学術的・技術的に新しい手法の提案

- 光切断法を用いた3次元計測技術の提案
- **簡便**かつ**高速**に**密な**3次元計測を実現

■ 大学+企業の得意分野の融合

- 東京大学：新規**理論**の構築
- 大林組：**現場**適用

■ i-Construction普及への寄与

- 新規・高性能な技術であっても、難解でブラックボックスの方法は、実現場では普及しにくい
- **使い勝手**：意図通りに直感的に扱える
- **納得性**：メジャーと同様、理解できる



■ まとめ (本研究の目指すところ)

- **新規 + 高性能 + 実現場での活用導入**のハードルが低い
- i-Construction技術導入で**生産性向上・省力化**

謝辞

25

- 令和2・3年度 国土交通省関東地方整備局
「技術シーズマッチング」
- 静岡県 河津トンネル
- 北海道 大沼トンネル
- 広島県 久井原トンネル
- 静岡県 施工技術総合研究所
- 福島ロボットテストフィールド

