2020.9.28

新都市社会技術融合創造研究会

第１７回新都市社会技術セミナー

●研究テーマ

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

プロジェクトリーダー
日本工業大学 機械工学科 准教授
石川　貴一朗

研究の背景と目的

道路トンネル定期点検の今後の方向性（２巡目の動向）

１巡目の点検を踏まえた効率化・合理化

・損傷，構造特性に応じた点検の着目箇所の特定化による点検の合理化

⇒ ・支援技術による**スクリーニング**により打音・触診箇所の明確化

・適切な健全性診断の実施

⇒ ・点検支援新技術の利活用、健全性診断に資する情報の明確化

⇒ ・変状原因（**外力**or材質劣化、**進行性**）の評価法の確立とマニュアル化

⇒ ・覆工巻厚変状に背面空洞も考慮

⇒ ・付属物診断の重要性（落下に繋がる可能性、取付部材の腐食）

点検支援技術の積極的な活用

・近接目視の補完・代替・充実する技術の活用

⇒ ・活用範囲、精度、運用方法の明確化　⇒　**社会実装**

↓

定期点検の質の確保、向上

□：目的

参照　：　社会資本整備審議会 道路分科会　道路技術小委員会　平成30 年12 月14 日

研究項目

研究項目	目的	平成30年度	平成31年度	令和2年度
①非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化	✓ 変状原因（外力or材質劣化、進行性）の評価法の確立とマニュアル化 ✓ 活用範囲、精度、運用方法の明確化	トンネル定期点検の支援技術の明確化 レーザー計測に対する検出能力，精度の検証（外力性、進行性）	Point１ 点検要領判定目安に対する支援内容の整理	社会実装に向けた外力変状のスクリーニング，変状進行性評価の高度化の検証 コスト縮減 省力化
②画像・計測データへのAI技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上	✓ 支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化	点群データによる各損傷の自動認識，損傷展開図の自動作成 課題の明確化	Point３ 適切な教師データによるAI学習（変状，展開図，判定をセットにして属性付与） AIによる健全部の診断，スクリーニング技術の開発	Point２ レーザ点群を活用した検出精度向上
③i-Construction推進に向けたトンネルDBの有効活用検討	✓ 活用範囲、精度、運用方法の明確化	誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法（位置情報、差分解析） Point４ 衛星不可視下での正しい中心軸決定の課題を解決		SLAMによる縦断方向計測精度の向上 ３次元形状データの出来形検測への活用

レーザー検証計測の目的と検証方法

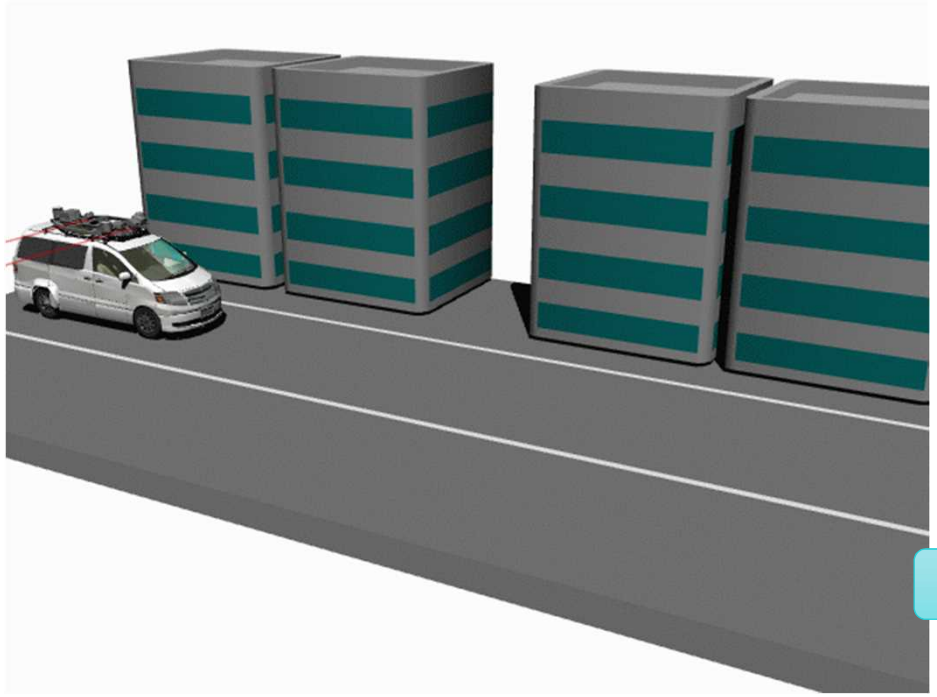
	目的	検証方法
①	✓ 進行性評価のための差分解析を正しく評価するための検証、横断面計測（回転、ゆがみの検証）	✓ 同一の計測速度（40km/h)による再現性の検証 ✓ 計測速度の違い（20km/h，40km/h，60km/h）による再現性の検証
②	✓ トンネル内の特に縦断方向の位置（相対）精度検証（2時期比較のためには誤差5cm程度が望ましい）	✓ 縦断方向位置精度向上検討のためSLAM/スキャンマッチング技術の導入を検討
③	✓ 衛星不可視下の位置精度検証（目的①,②を裏付けるための検証）	✓ 取得点群位置座標のドリフト誤差の検討

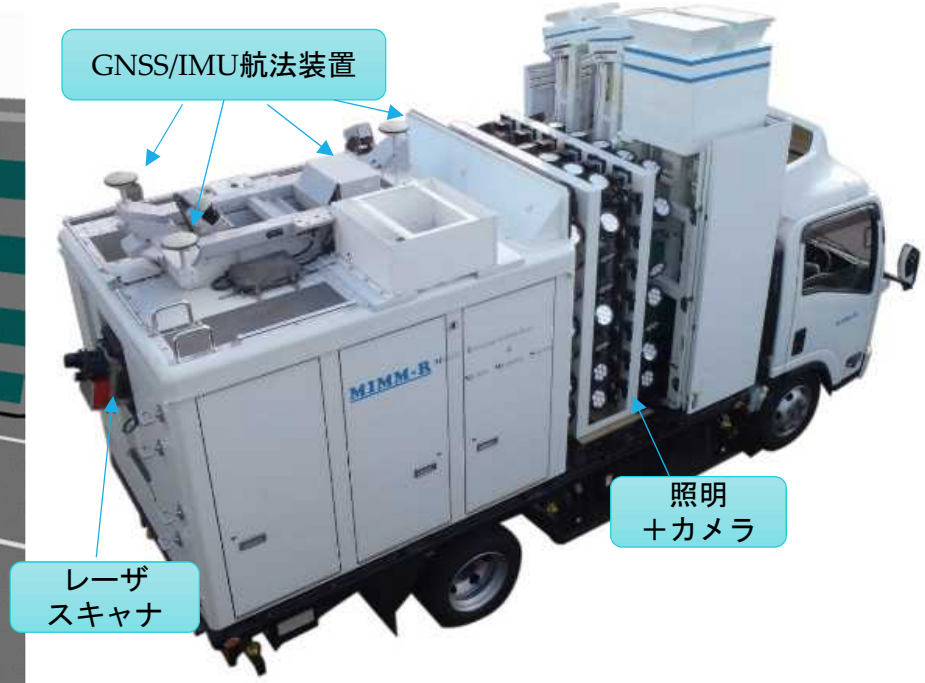
注釈）**絶対座標精度の検討ではない。衛星不可視下において、目的①,②にどの程度の誤差が生じるかを把握しておく必要がある（基準点の必要性、坑内標定点の必要性）**

移動体計測に主に使用される航法装置の課題点

・システムの位置を求めるための航法装置，周辺の環境を計測するための属性センサから構成される.
・自分の位置を計測しつつ，そこから周辺までの距離などを計測することで三次元復元する.

・高精度に計測するためには、レーザ発振時のセンサの位置姿勢を正確に計測する必要がある。移動計測における全体(絶対精度)の誤差は位置姿勢推定の性能で決まる。
断面計測精度(相対精度)はレーザスキャナの性能に因る





移動体計測に主に使用される航法装置の課題点

・GNSS/IMU複合航法　GNSS/INS複合航法　GNSS/DR複合航法

GNSSの観測更新によりデッドレコニング航法による誤差を補正する方法.
GNSSが使えない状況ではデッドレコニング航法単体の性能と同じになる.

GNSS→衛星測位技術による位置測位，世界測地系で誤差数cmで位置が測位できる
一方で，位置測位するためには，4基以上(経験的に理想は7基以上)の衛星を同時に観測する必要がある.
空が十分に開けていない場所では，使えない．当然トンネル内でも使えない.

GNSSが使える場所

安定して位置測位できない場所

GNSSが使えない場所

デッドレコニング

IMUによって計測された姿勢と，オドメータによって計測したタイヤの回転数から積分により，位置を推定する方法．(目をつぶって歩くのと同じ)
IMUの誤差やオドメータの誤差が累積する．誤差量は距離や時間によって大きくなる.

IMU

オドメータ

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \begin{bmatrix} v_k \cos\theta_k \\ v_k \sin\theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} \Delta t$$

$$\mathbf{P}_k = [x_k \quad y_k \quad \theta_k]^{\mathrm{T}}$$

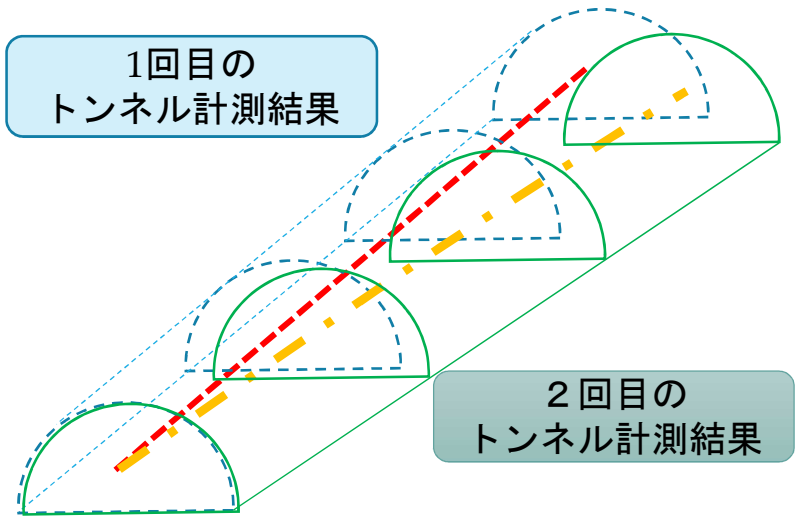
$\boldsymbol{v}_{\mathbf{k}}$:速度、
$\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{k}}$:姿勢角
$\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{k}}$:角速度

MIMM/MMSに使用される航法装置の絶対精度

トンネル1040m間を計測した場合 *1

- 水平方向に最大1.3mのズレが発生(絶対精度)
- MMSの移動10m当たり，5mmのズレ

トンネル中央で最大誤差



GNSSが使えないトンネル内では，
ジャイロのみによる位置推定状態が続くため，
GNSSS/IMU複合航法のメリットである累積誤差が抑制できない

トンネルの計測結果は必ず累積誤差を持つ．
その誤差は走行環境で毎回変わる．

*1 *Kiichiro Ishikawa, et al,* Tunnel Cross-Section Measurement System Using a Mobile Mapping System, Journal of Robotics and Mechatronics ,Vol.21 No.2 pp.

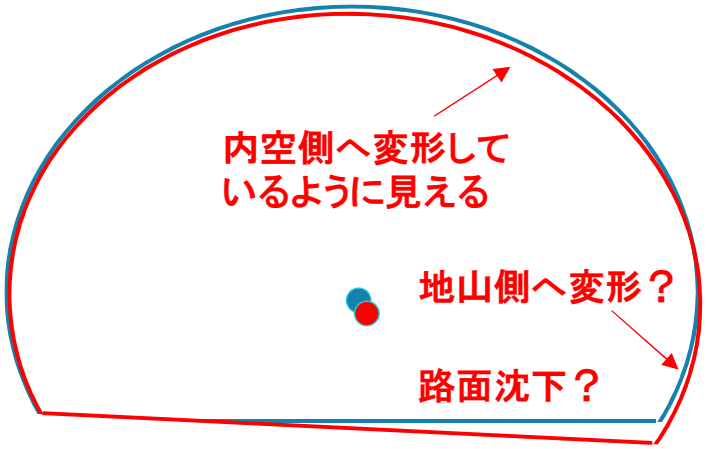
走行型レーザ計測の課題

Point 4

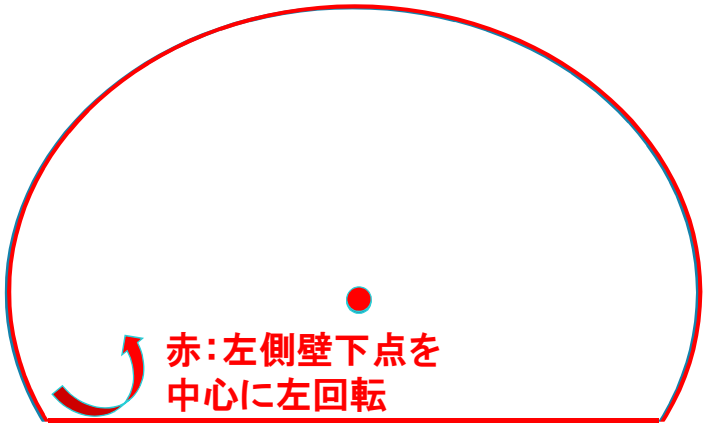
レーザ 点群活用:方針②

誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法の検討

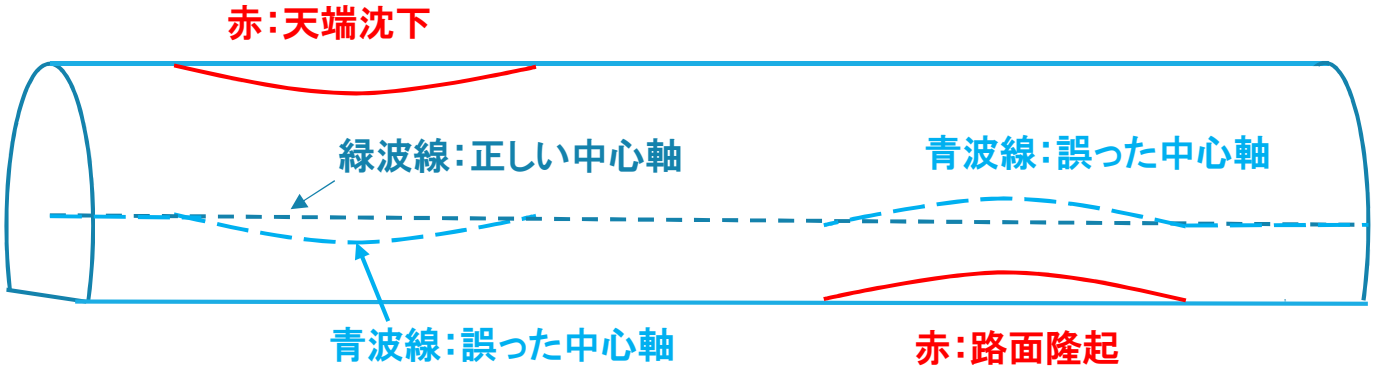
複数計測時の衛星不可視下でのトンネル中心軸、断面回転の課題



緑:1回目計測　赤:2回目計測
計測断面差分を断面変形進行と評価してしまう



緑:1回目計測　赤:2回目計測
2回目回転補正すると完全に同じ断面となり
実際には断面変形、進行性はない



天端沈下、路面隆起(沈下)などの影響を受け、中心軸を誤ってしまう。2回計測の正しい重ね合わせができない。正しい変形進行性が評価できない。

検証実験　トンネル計測

延長：740.0m
施工法：NATM

計測

速度	回数
20km/h	往復2回
40km/h	往復4回
60km/h	往復2回

検証断面

評価用データの計測

断面計測

P40, BLK360

＋TS基準点測量

移動体計測(既存技術)

MS60，ProScan

TSによる
外部トラッキング

新規開発手法

SLAM
スキャンマッチング

MIMM+OS1

SLAM/GNSS/IMU複合

VLP-16
STIM300
GNSS

車載計測

GNSS/IMU複合航法

Pegasus2

MIMM

歩行計測

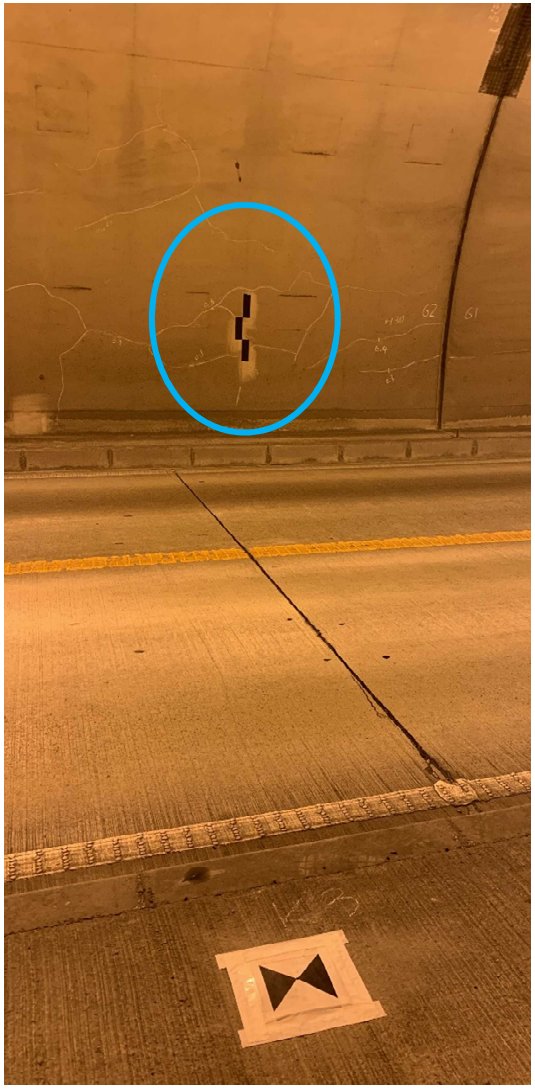
SLAM

GNSS/IMU
複合航法

Pegasus
Backpack

検証状況

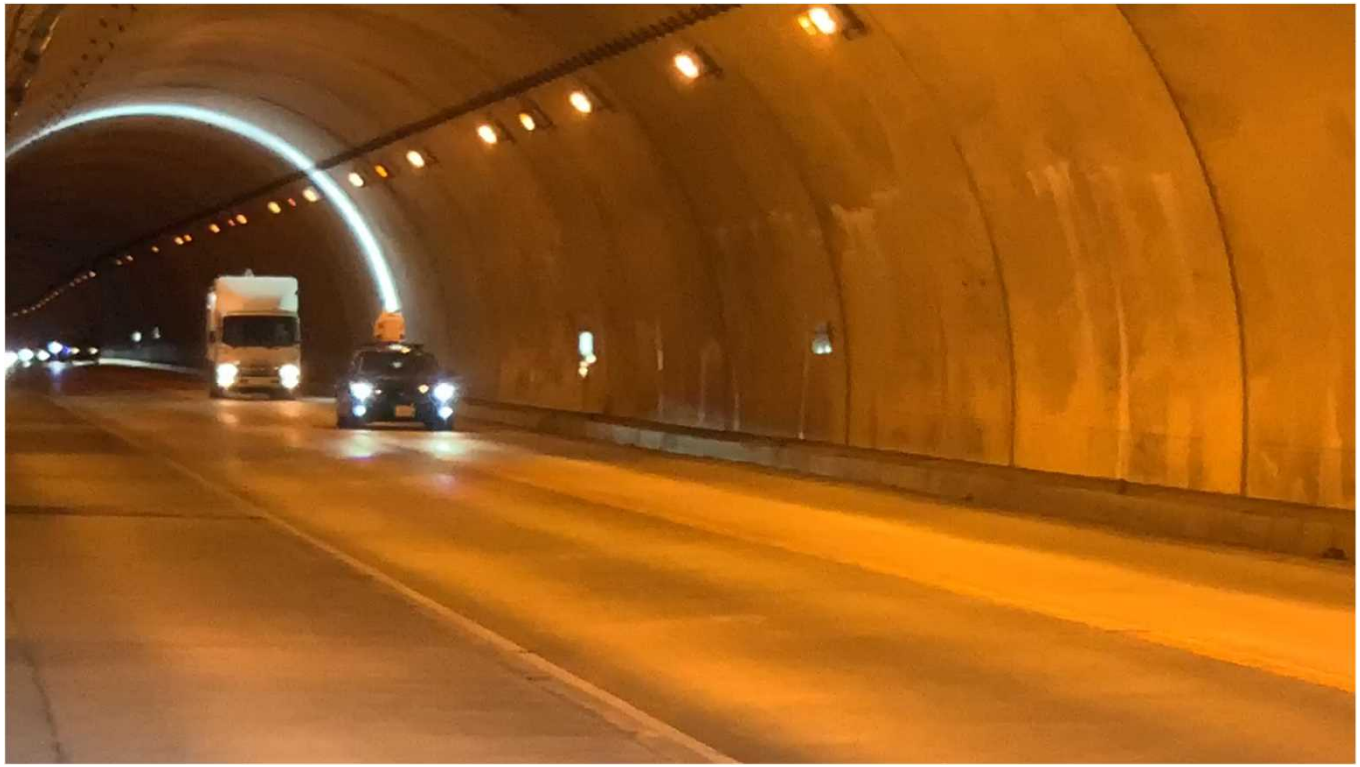
坑外基準点



坑内基準点、比較断面用マーカ

検証状況

P40による3次元断面計測

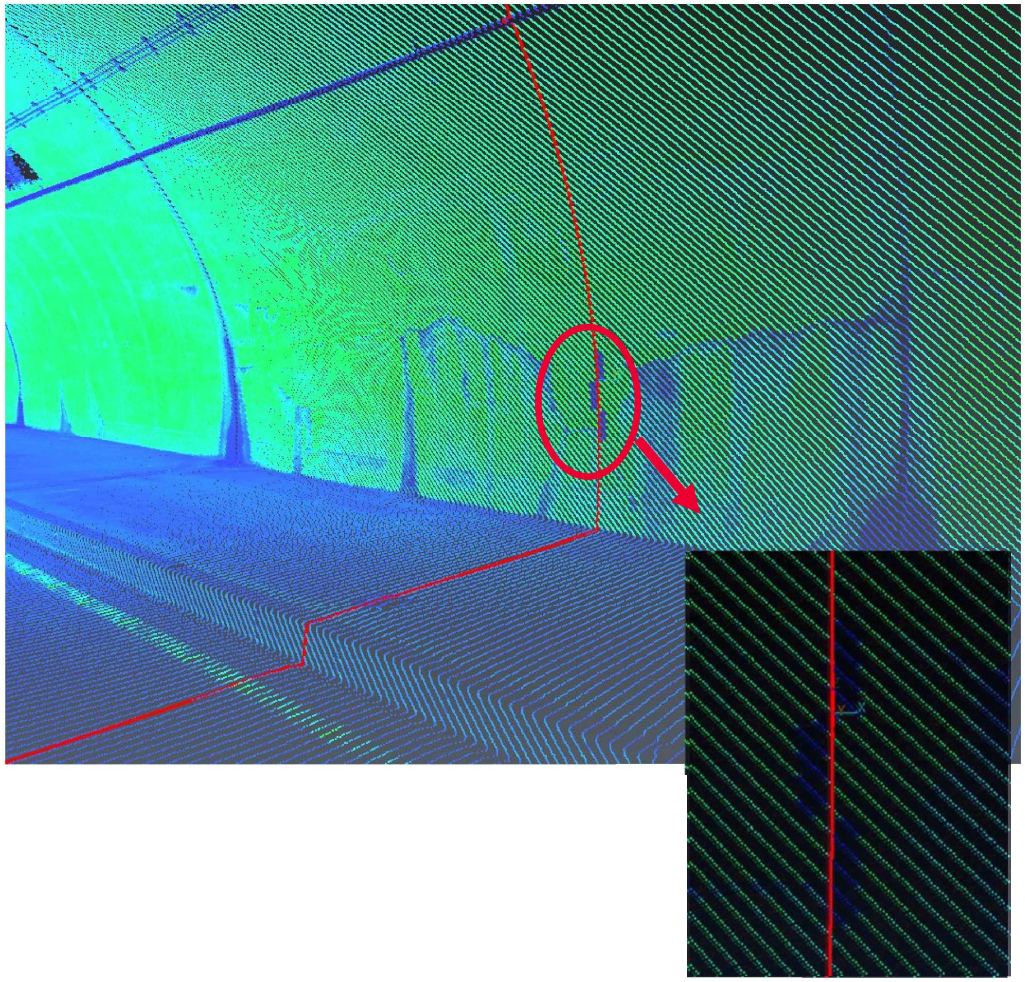


走行計測状況
MIMM　　Pegasus 2 U

検証結果

1）精密測量(3Dスキャン　P40）による参照断面（比較ベース：正解値）

断面位置



1・測量された座標を元に、高性能固定型スキャナーの点群データに座標を紐づく。

2・固定型スキャナーデータを正にして、比較用のベーズ断面データを作成する。
（断面幅は5cm）

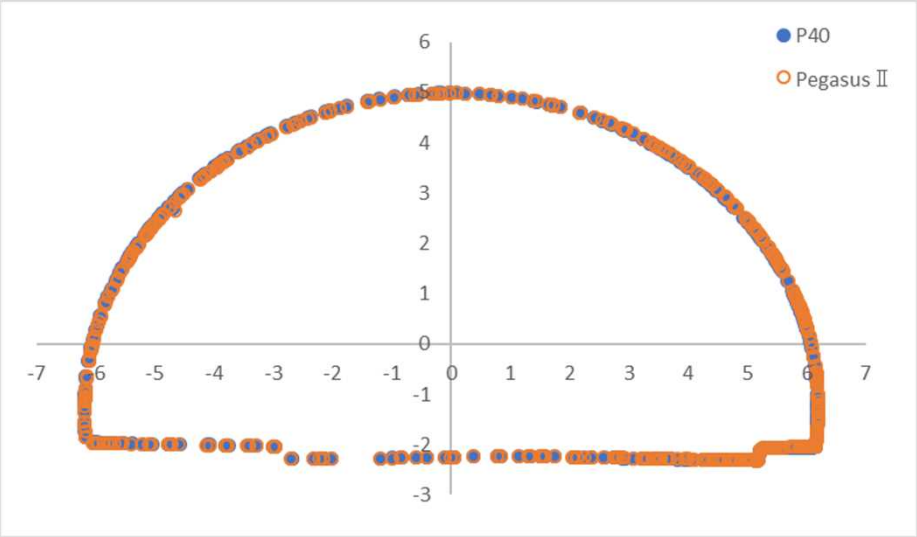
3・各移動体計測機のデータから同じ位置に断面を作成する（断面幅20cm）
断面作成位置がテープにてマーキングされている。

4・各断面データを2D化にしてから、
断面のベーズにある2点利用して、
断面中心基準を作成する。

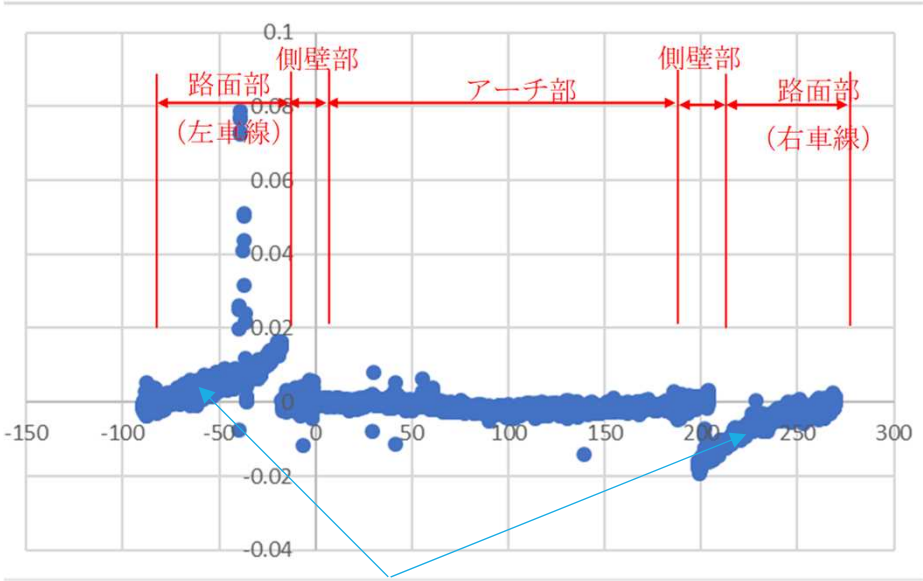
5・トンネル中心を利用してP2とP40の断面を重ねる

検証結果

1）断面計測精度：概ね良好な精度を確認
Case1-1-A：MIMMでは路盤部で一部に80mmの誤差があるが、その他アーチ部では補正なしの状態で、±5mm程度の誤差であった。
走行計測では、絶対誤差は問題にしておらず、3)の再現性で相対誤差が2mm程度以下に確保されていれば誤差の問題はないと考えている。
路面部での誤差、左車線と右車線で反転する傾向あり。
位置推定で課題となっている回転による影響と考えられる。



断面の比較例（Case1-1-A：坑口、坑内補正なしのケース
PegasusⅡ、A断面、20km/h）



路面部が反転。回転による影響

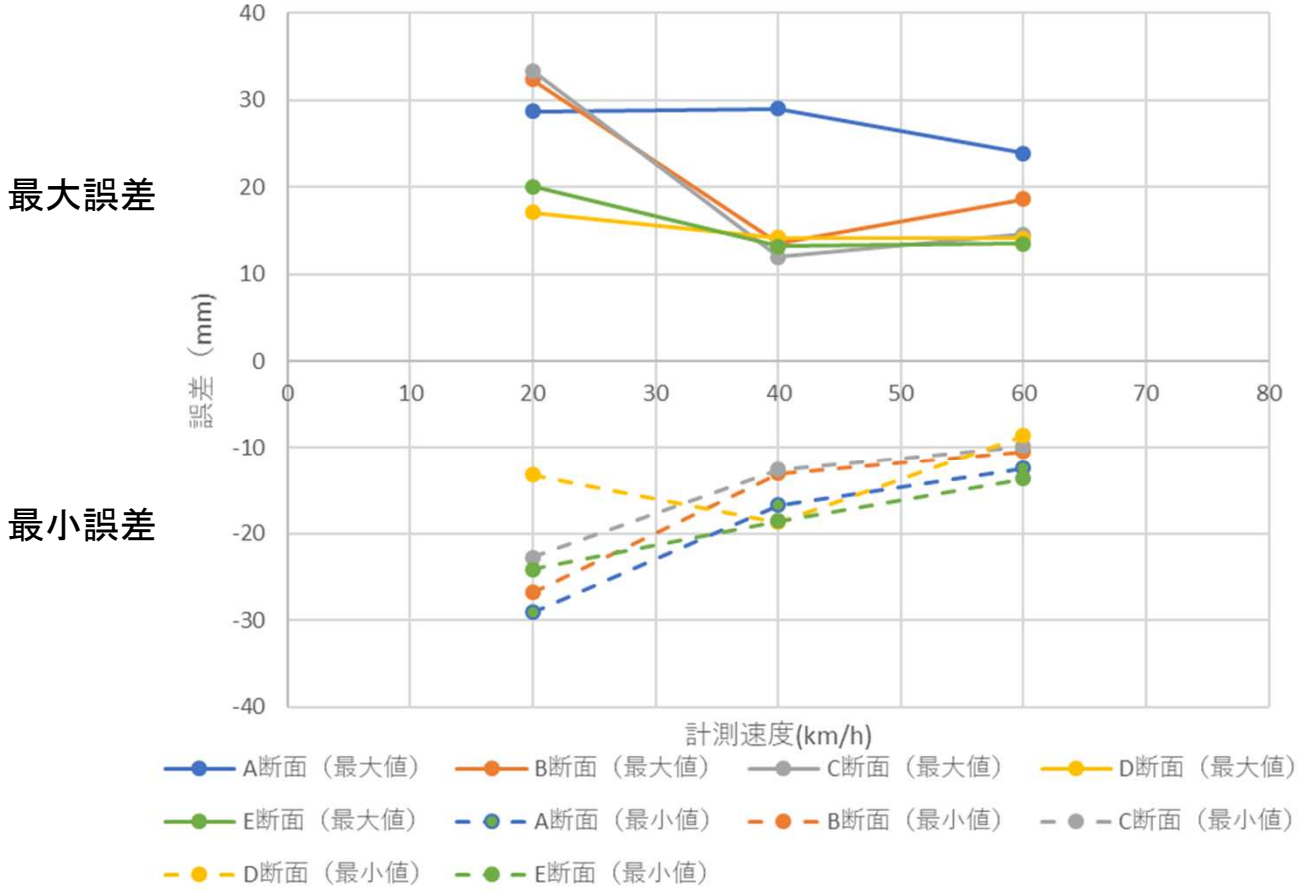
断面の比較例（Case1-1-A：坑口、坑内補正なしのケース
MIMM、A断面、20km/h）

検証結果

2）走行速度による誤差

速度が上がるにつれ、誤差が小さくなる傾向となった。

GNSS不可視時間が短くなり、ジャイロの累積誤差が減少するため。



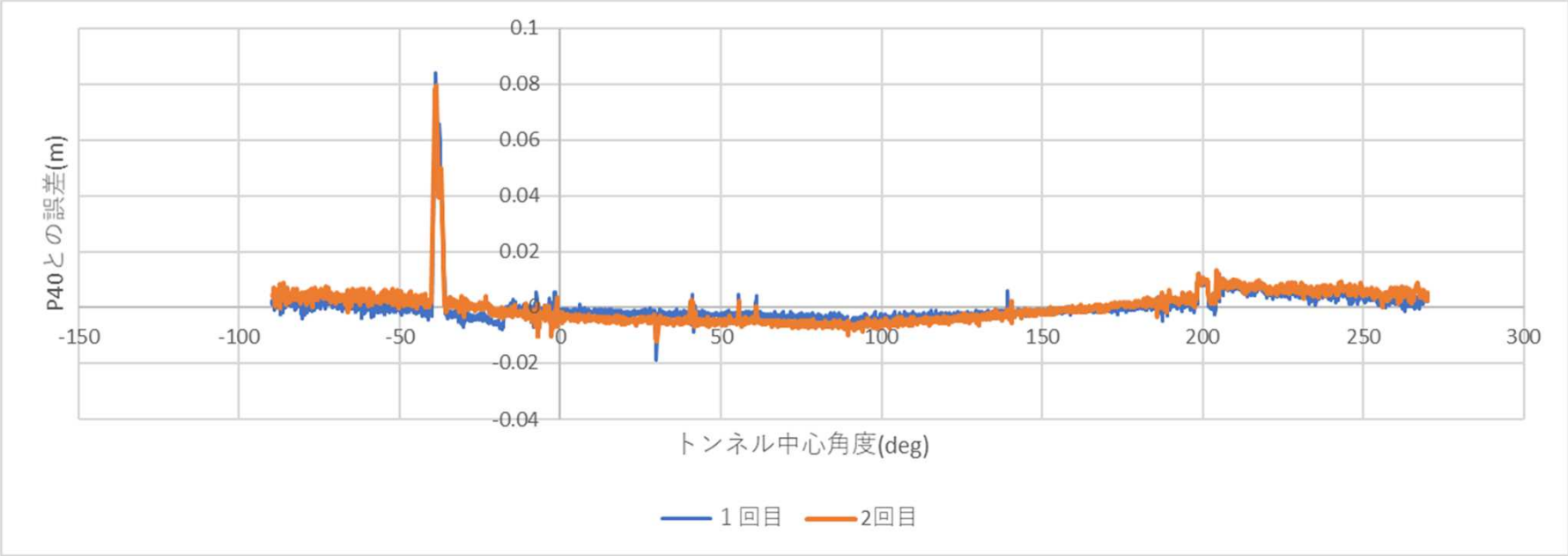
速度差による誤差の比較（PegasusⅡ、補正なし）

検証結果

3）再現性の検証

アーチ天端付近での同一速度による複数回計測結果の相対差分は1mm程度であった。

十分な再現性があり、複数時期比較のための相対差分誤差は問題にならない。



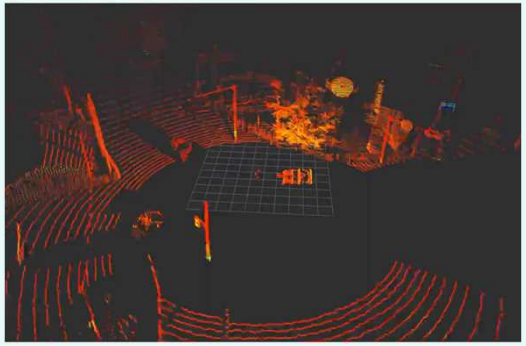
同一速度による誤差の比較（MIMM、補正なし）

成果まとめ その1

- 実トンネルに、坑内検証点、検証用マーカーを設置し、トンネル断面計測精度の比較を行った。
  - マーカー位置は基準点測量、3Dスキャナによる断面計測実施
- 走行型計測では以下の項目について検証した。
  - 断面計測精度：概ね良好な精度を確認
    ただし路面部での誤差、左車線と右車線で反転する傾向あり。
    位置推定で課題となっている回転による影響と考えられる。
  - 走行速度による誤差
    速度が上がるにつれ、誤差が小さくなる傾向となった。
    これはGNSS不可視時間が短くなるため、ジャイロの累積誤差が減少するためであり、理論と一致している。
  - 再現性の検証
    アーチ天端付近での同一速度による複数回計測した結果
    1～4㎜程度であった。

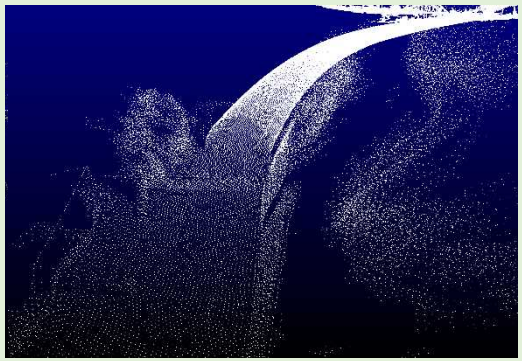
スキャンマッチングによる位置補正

OUSTER OS1
- 3次元距離センサ
- IMU



断面形状比較
最も形状が一致する解を
位置として算出

3次元点群地図
- 過去の3次元計測データ



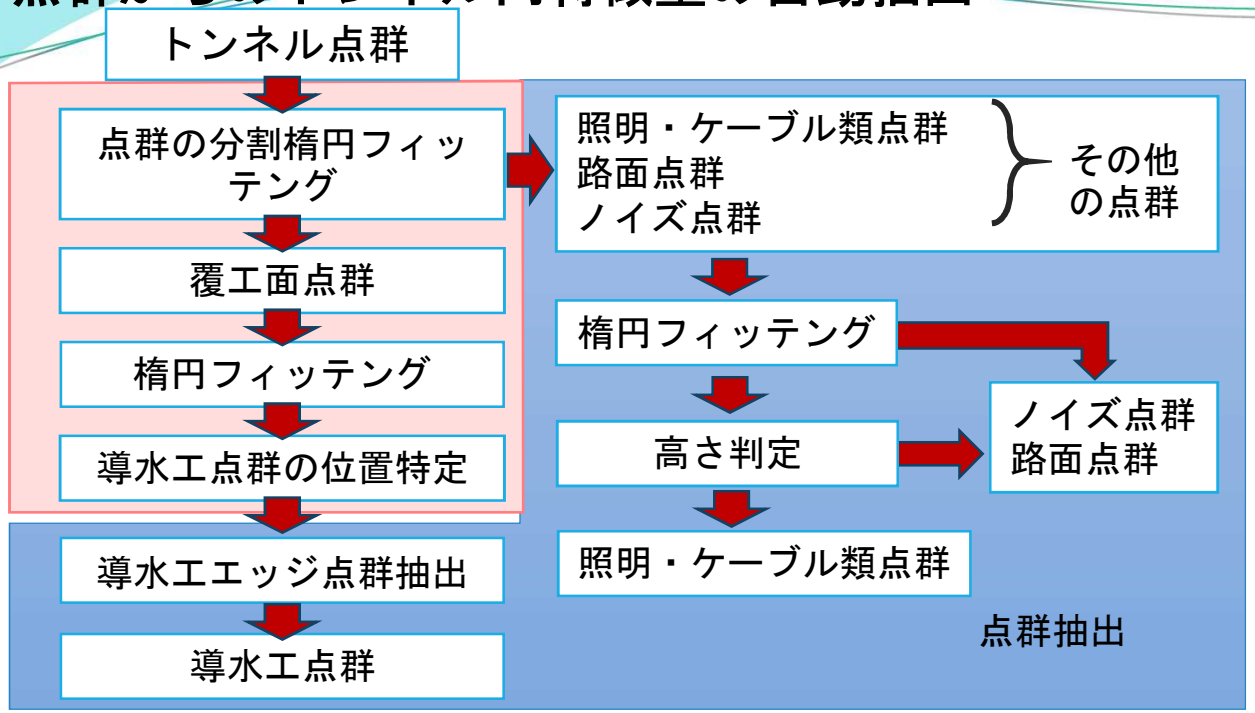
トンネルには，そのままでは使えない
(同じ形状が続くため)

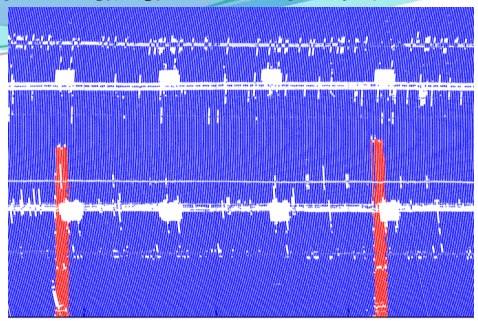
改良を実施
付帯設備のみ(照明)を抽出

Point 2　レーザ点群活用:方針③　AI活用:方針⑤

非破壊検査技術の有効活用による
トンネル点検支援技術の高度化

点群からのトンネル内特徴量の自動抽出





導水工点群抽出例

照明・ケーブル類点群抽出例

評価結果

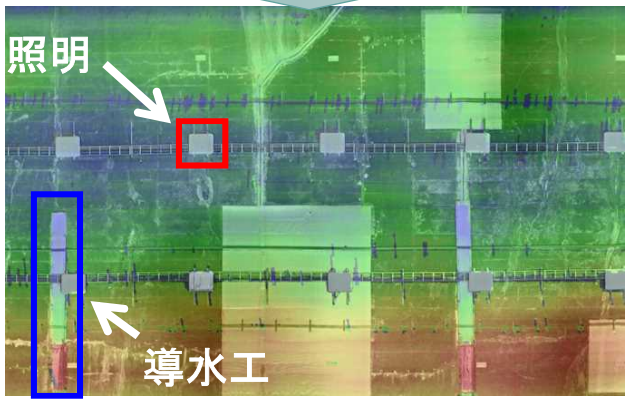
導水工点群の自動抽出率　92～97%

照明・ケーブル点群の自動抽出率　43～94%

■抽出率低下の原因
覆工面から比較的近いケーブル類点群の抽出率が低い
一方で照明は抽出率が高い

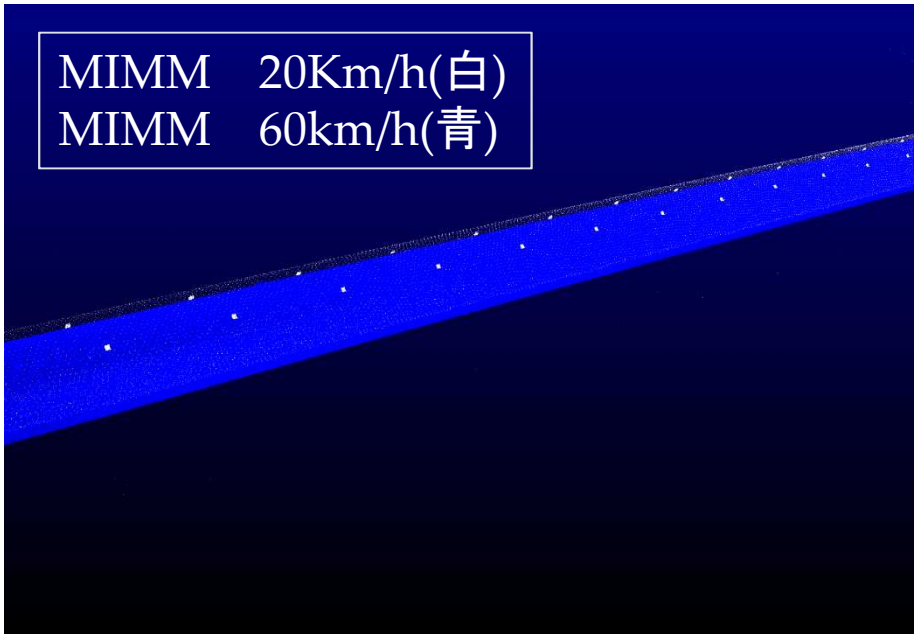
照明や導水工による画像と点群の自動位置合わせが可能な見通しを得た

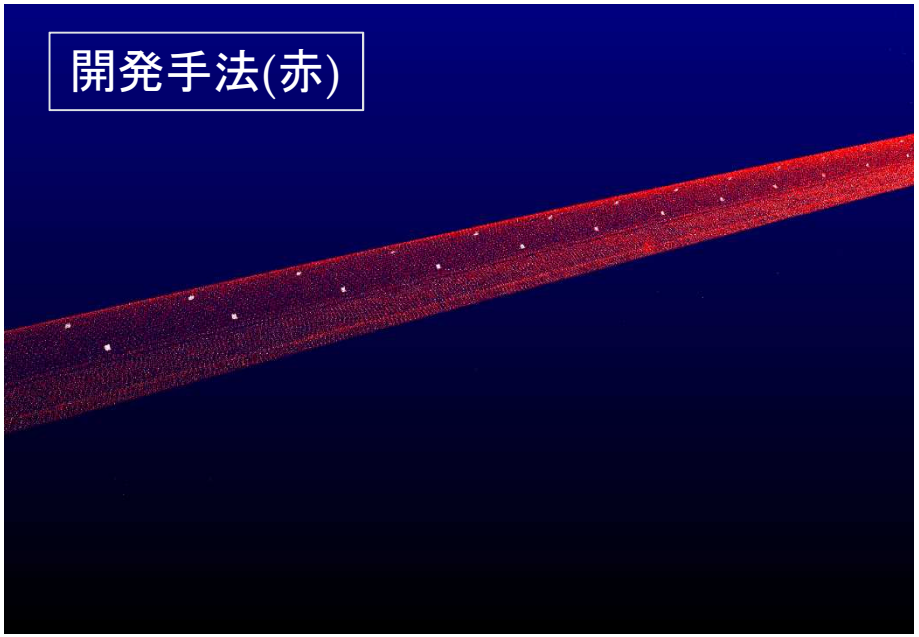
➡ 多種類データの統合AIや複数年での変状比較への可能性

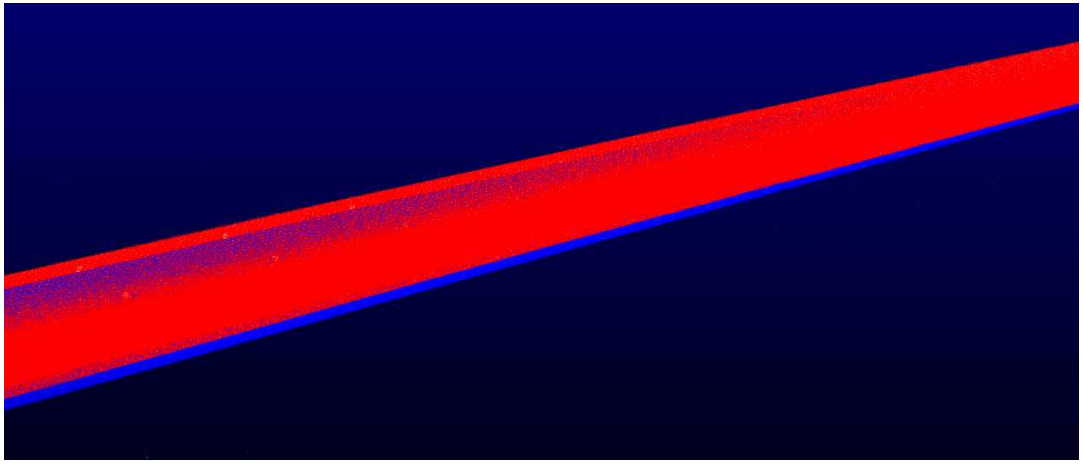


展開画像と点群の位置合わせ重畳表示
(照明位置で位置合わせした場合)

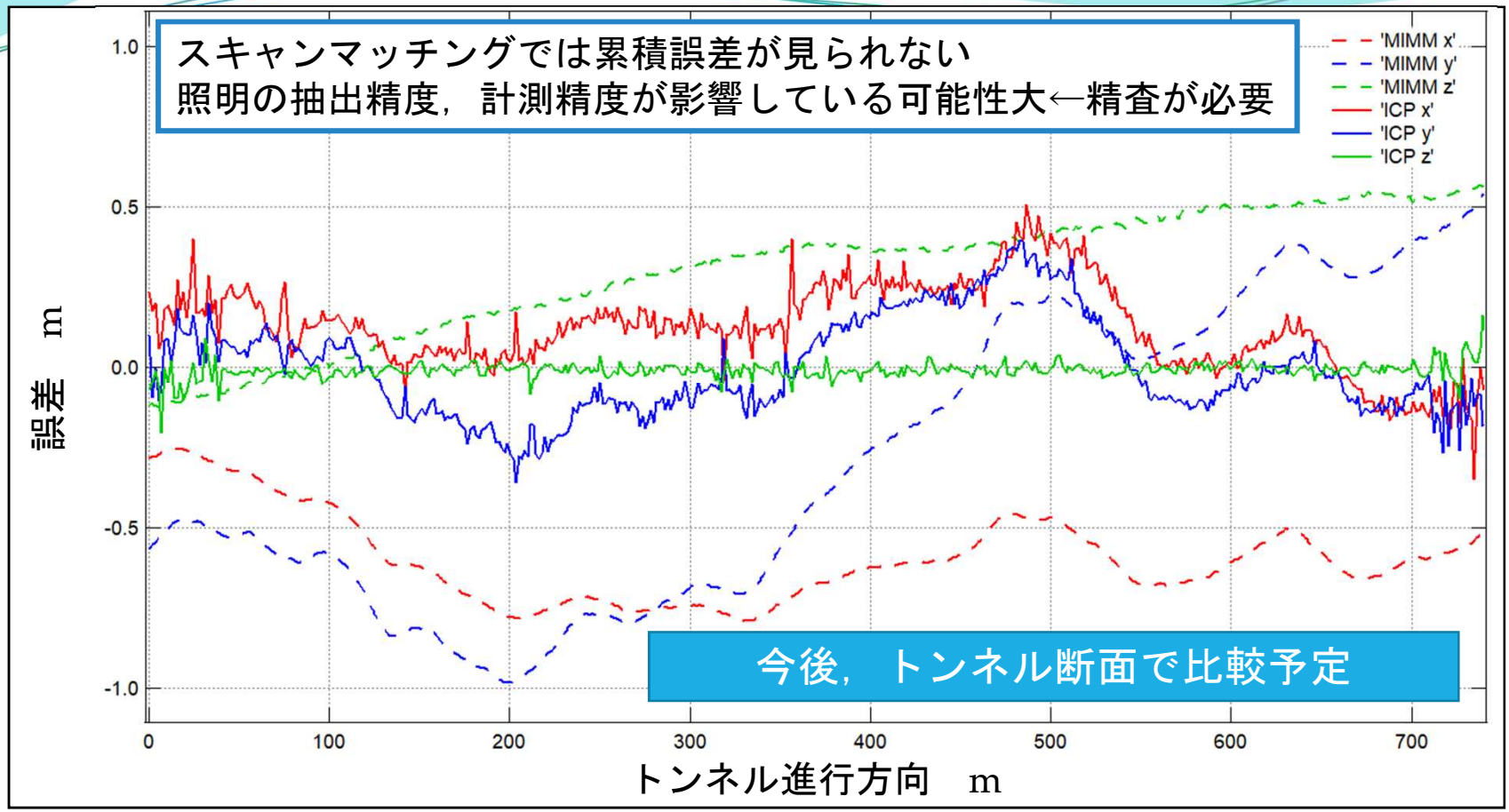
スキャンマッチングによる補正結果







トンネル照明位置比較によるICPスキャンマッチング自己位置推定(2時期差分) 性能評価



MIMMによる走行1回目(時速20km)と，9回目(時速60ｋｍ)を比較(点線)
MIMMによる走行1回目(時速20km)と，
OS-１点群(9回目走行時)を1回目点群へICPスキャンマッチングした結果(実線)

	X m(rms)	Y m(rms)	Z m(rms)	d m(rms)
GNSS/IMU	0.612	0.543	0.360	0.740
開発手法	0.183	0.153	0.027	0.214

高さ方向の精度が
著しく向上(5cm以下)

成果まとめ その2

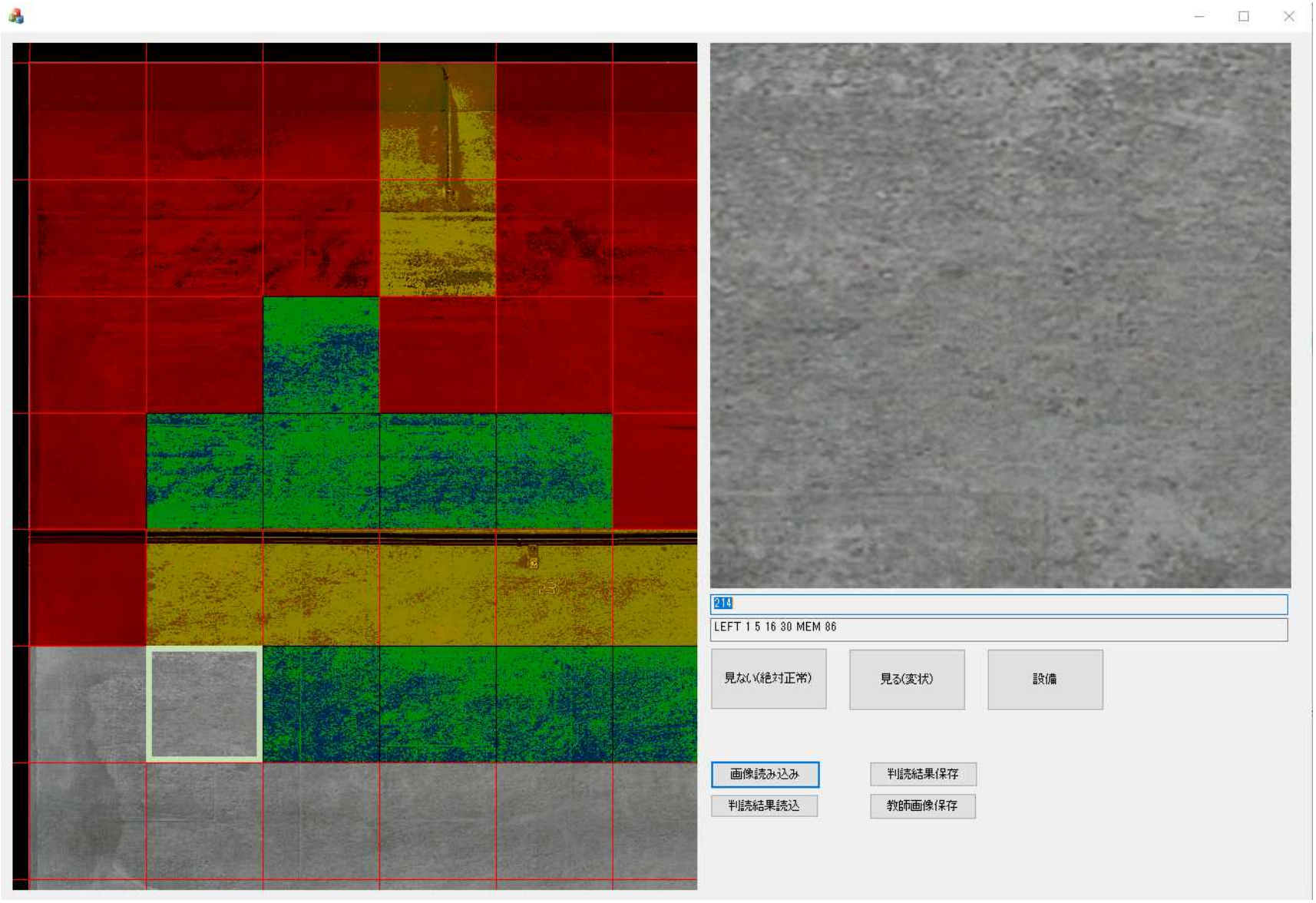
【複数時期差分比較のためのSLAM技術による位置精度検証】

•レーザスキャンマッチングによる位置推定手法の開発と評価

- トンネル内の付帯設備を自動抽出し、それをランドマークとして位置推定する手法を新たに開発した。

- 実トンネルでの検証の結果、従来に比べて高い自己位置推定精度を得ることができた。従来、位置補正のために、ランドマークアップデート処理を必要としていたが、本技術により自動化できる見通しとなった。
- 今後は、本技術を使用した際の差分解析の精度検証を行っていく必要がある。

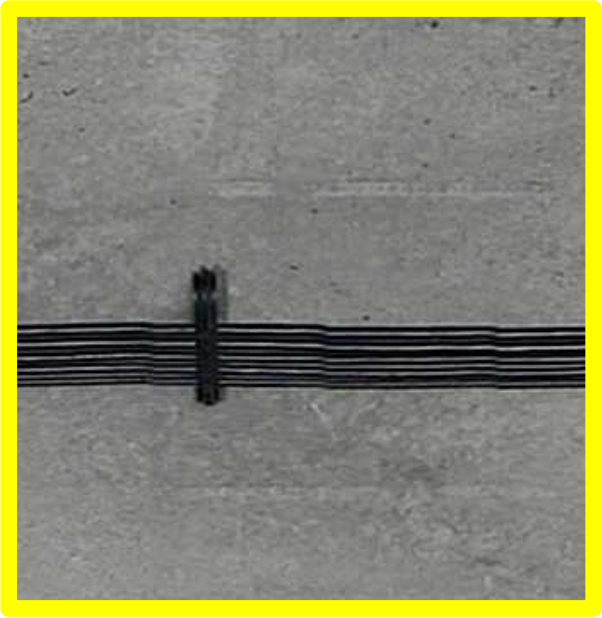
教師データ作成ツール


214
LEFT 1 5 16 30 MEM 86
見ない(絶対正常)
見る(変状)
設備
画像読み込み
判読結果保存
判読結果読込
教師画像保存

教師データ作成のための条件

見ない(絶対正常)

見る変状

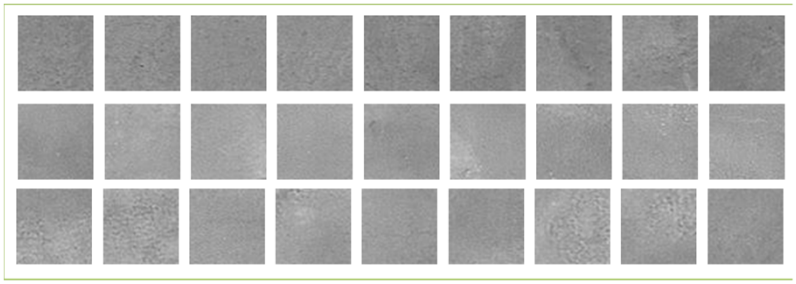


付帯設備

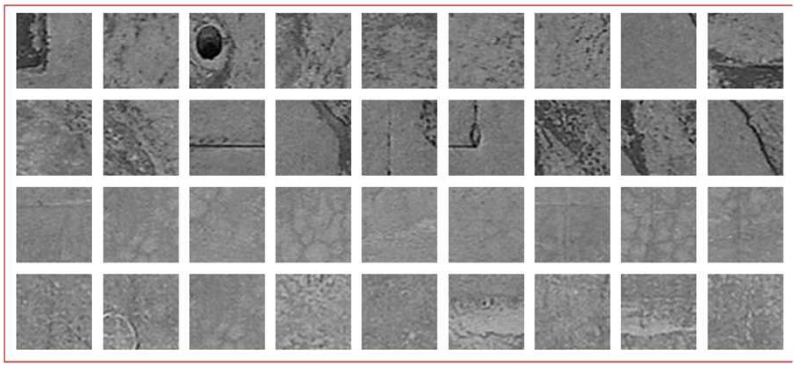
AIによる変状見落としを防ぐため，正常箇所を抽出する

検証結果

1）教師データ画像例

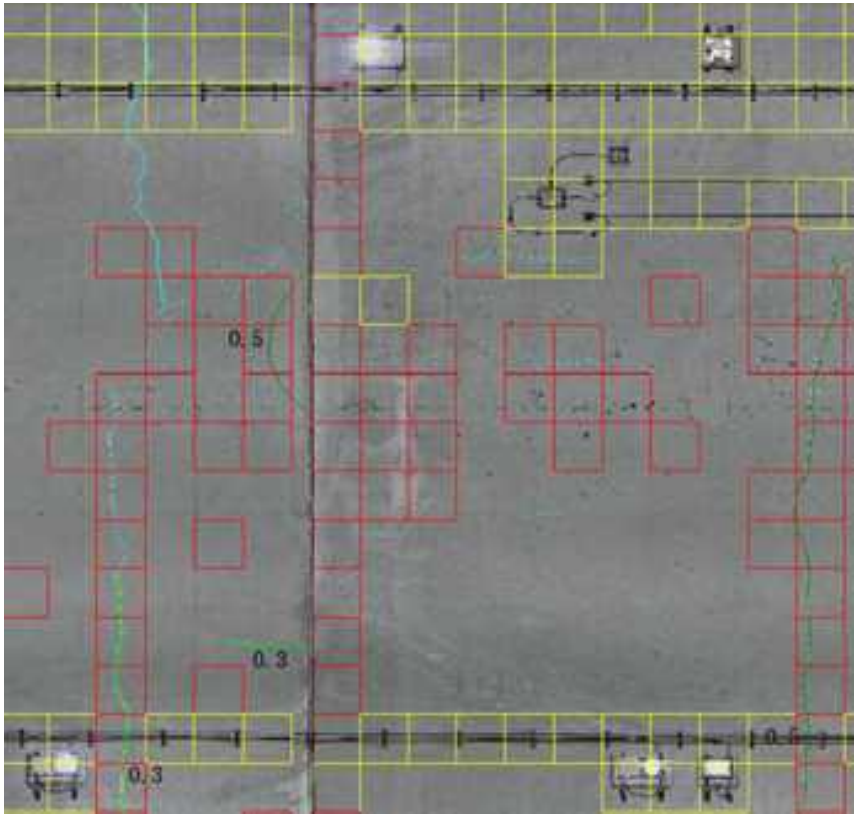


正常として分類した教師画像例



変状(見る)として分類した教師画像例

2）開発中AIの性能評価試験



成果まとめ その3

【AIを活用した健全部スクリーニング、着目箇所の抽出】

- AI用教師データ収集ツールの開発
- トンネル点検の実務経験を持つ技術者による教師データ収集
- 収集教師データを用いたAIの試作

➢ 目視点検前のスクリーニングを目的としており、変状を発見するのではなく、正常な箇所を見つけ出すことにより、目視点検時に、点検不要な健全部を抽出する。

➢ 教師画像は、正常、変状の可能性あり、付帯設備の三種類とし、点検業務従事者により、本ツールを使って分類収集した。収集した画像枚数はそれぞれ、18,499枚、8,155枚、7,375枚となった。

➢ 収集した画像をSony Neural Network Consoleを使用して学習させ、分類器を試作した結果、F値0.95となり、有効性が期待される結果となった。