

3D センサを活用した地表面変位計測技術の現場検証

加藤 竜之信*¹・中村 征史*²

概 要

線路下や営業線近接の工事では、軌道設備に影響を与えないよう、軌道や周辺地盤変状を監視しながら工事を行う必要がある。このうち周辺地盤変状、すなわち道床等の隆起や陥没については、機械的な監視手法が確立されておらず、主に作業関係者の目視確認に依存している。そこで、3D センサを用いて取得した点群データから地盤高さの変化を記録する手法の開発を行った。本稿では、建設技術総合センターの複線軌道および現場の営業線を使用して実施した機器設置位置の最適化および本システムの適用性の検証結果について報告する。

キーワード：3D センサ，点群，地盤変位，隆起，陥没

VERIFICATION ON FIELD OF A SURFACE DISPLACEMENT MEASUREMENT TECHNOLOGY
USING 3D SENSORSRyunoshin KATO*¹, Seishi NAKAMURA*²

Abstract

In construction work under or near the railway lines in operation, it is necessary to carry out the work while monitoring the track and its surrounding ground for any changes so as not to affect the track infrastructure. Among these, when surveying changes in the surrounding ground, that is, uplifts or subsidence of the track bed, a standard mechanical monitoring method has not yet been established, and inspections mainly rely on visual confirmation by work personnel. To address this issue, a method was developed to record changes in ground height from point cloud data obtained using a 3D sensor. This paper reports how optimization was made of the positions where the equipment and machines were to be installed, using the track of the Construction technology research center and the operational line, and presents the results for the applicability of the system.

Keywords: 3D sensor, Point cloud, Ground displacement, Uplift, Subsidence

*1 Construction Technology Group, Research & Development Center

*2 J-TEC Corporation

3D センサを活用した地表面変位計測技術の現場検証

加藤 竜之信*1・中村 征史*2

1. はじめに

線路下に構造物を設置する工事や営業線内および近接箇所での工事では、作業を実施する際に、その直上あるいは直近にある軌道設備に影響を与える恐れがあるため、軌道変位および周辺地盤変状を監視しながら工事を行う必要がある。このうち周辺地盤変状、すなわち道床等の隆起や陥没については、機械的な監視手法が確立されておらず、主に作業関係者の目視確認に依存している。

しかし、直接目視による確認は営業線内への立ち入りを必要とするため、線路閉鎖時間外では実施が困難であること、短時間で広範囲を確認できないこと等の問題がある。

そこで、広範囲の変位を常に監視する手法としてレーザ光測距による三次元点群データ取得技術（3D-LiDAR）を用いて取得した点群データを分析・活用する手法に着目した。

本稿で紹介する手法は、点群データから予め軌道周辺の地盤高さを求め、その値を初期値として以降の地盤高さの変化を記録するものである。しきい値を設定しておくことで、一定以上の変位を記録した際には、その箇所を画面上に表示することができる。

さらに、現地では音声や光によるアラート発報を、現地にいない関係者へはアラートメールの送信を行うことで、現地・遠隔双方での状況確認を行うことができる¹⁾²⁾。

鉄道工事における本手法の適用性を明らかにするために、軌道設備を再現した建設技術総合センターの複線軌道および実際の現場においての営業線を使用して、機器設置位置の最適化およびシステムの検証を実施した。

2. 計測方法

2.1 3D-LiDAR の概要

本検証では点群データの取得に 3D-LiDAR を用いた計測システムを採用した。

3D-LiDAR とはレーザ光を利用して対象物を三次元的に測量する技術およびその計測機器のことである。レーザ光の照射方向とレーザ光が反射して機器に到達するまでの時間を計測することで、対象とする形状を点群データとして取得する。レーザ光には波長が比較的短い近赤外線を使用しており、従来のレーダ技術と比べてより高精度な計測が可能である。

本検証で使用した計測機器の基本性能を表-1に示す。以降では、3D-LiDAR と記載した場合、この計測機器を指すものとする。

3D-LiDAR の正面上下に 77.2°、左右に 70.4°程度、距離は最大で 450m までの計測が可能である。3D-LiDAR の誤差は 20m の距離で 20mm 程度であるが、比較的広い面積の隆起・陥没を対象とする場合には問題とはならないと判断した。

2.2 3D-LiDAR による変位の計測

3D-LiDAR を用いた地盤変位の計測では、変位を確認したい全域を 3D-LiDAR の視野角内に収める必要がある。そのため、本検証では軌道脇の電化柱に 3D-LiDAR を設置することとした。

表-1 3D-LiDAR の基本性能

寸法	91 × 62 × 65 [mm]
本体質量	500g
レーザ波長	905nm
視野角	70.4°(Horizontal)
	77.2°(Vertical)
精度	20mm(@Distance:20m)
動作温度	-20～65℃

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 施工技術グループ

*2 株式会社ジェイテック

また、複数の 3D-LiDAR を近接箇所に配置した場合、解析システム内において取得した点群データを重ね合わせることでより広範囲を一括して計測することが可能である。本検証でも 2 台の 3D-LiDAR のデータを重ね合わせて検証を行った。

2.3 地盤の分割と計測方法

本検証では軌道およびその周辺の地盤を一定面積の平面で分割し、各ブロックの地盤高さを計測した。ブロックは図-1 に示すように一辺 400mm の正方形とした。よって、1 ブロック内で取得される点群数は、3D-LiDAR からの距離に依存してブロックごとに異なる。

はじめに各ブロックの地盤高さを取得・算出し、初期値として設定した。初期値はブロック内の点群のうち、上下 16%にあたるものを外れ値として解析対象から除去し、残りの点群の平均値とした。

初期値取得後、1 秒ごとに地盤高さを計測し、各ブロックの地盤高さについて、初期値との差が +50mm 以上の場合を隆起、-50mm 以下の場合を陥没として判定した。しきい値 50mm は、3D-LiDAR の精度や距離増加に伴う誤差拡大を考慮し、ノイズやばらつきを含めて誤判定しにくい安全側のしきい値として設定したものである。

3. 複線軌道における予備検証

3.1 試験の基本条件

本システムの鉄道工事での適用性を明らかにするために、軌道設備を用いて検証を行った。

はじめに、実際の営業線を模擬した建設技術総

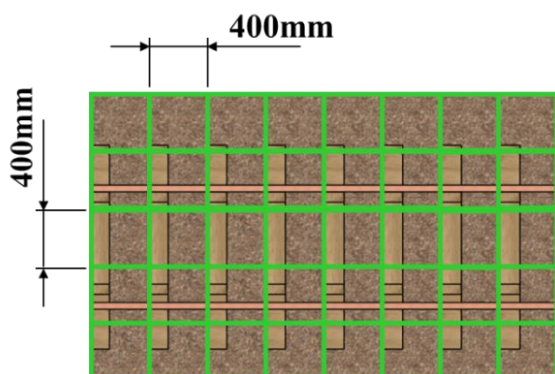


図-1 ブロックによる計測範囲の分割

合センターの複線軌道を使用して、機器設置位置の最適化およびシステムの検証を実施した。軌道脇の電化柱に 3D-LiDAR を 2 台設置し、地盤高さを変化させた際の検知性能を確認した。

計測対象範囲は幅方向に線路 2 線分 (10m 程度)、長さ方向に電化柱間隔分 (50m 程度) とした。これは営業線における一般的な電化柱間隔 (3D-LiDAR が設置可能な間隔) を想定したものである。

計測対象範囲内の軌道部分は、図-2 に示すように電化柱の真横から 10m おきに 40m 地点までの 5 箇所でバラストを土のう (高さ 80mm 程度) に置換えた。この土のうを除去することで陥没を、土のうの上にさらに 1 段土のうを積み重ねることで隆起を再現した。通常状態 (バラストを土のうに置き換えた状態) を写真-1(a)に、陥没を再現した状態を写真-1(b)に、隆起を再現した状態を写真-1(c)にそれぞれ示す。

3.2 3D-LiDAR の配置 (同一箇所からの計測)

はじめに最も簡易的に 3D-LiDAR を設置できる配置での計測性能を確認した。同一電化柱のレールレベルから高さ 4m の位置に 2 台の 3D-LiDAR を重なる部分を持つ程度に別の方向を向くように設置した。3D-LiDAR を設置した位置を原点として 0m、10m、20m、30m、40m の位置において隆起、陥没を再現した。

このときの 3D-LiDAR の配置を図-3 に、検知可否の結果を表-2 それぞれに示す。土のうを撤去または設置してから 1 分以内に該当箇所において 50mm 以上の変位を記録した場合、正常に検知ができたものとして評価する。

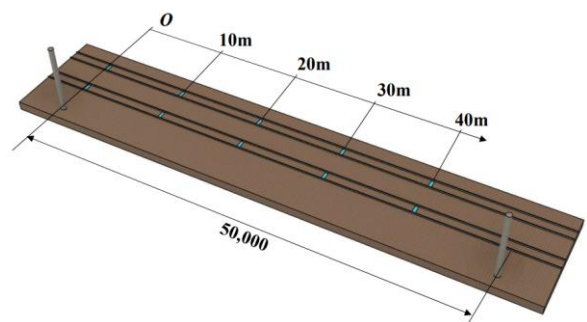


図-2 バラスト置換え箇所の配置

隆起は5箇所全てで検知できたが、陥没は30m, 40m の位置では検知できなかった。これはマクラギや手前のレールによって陥没箇所が死角となることが原因と考えられる。

3.3 3D-LiDAR の配置（挟み込みによる計測）

同一箇所に 2 台の 3D-LiDAR を設置した場合、



(a)通常状態

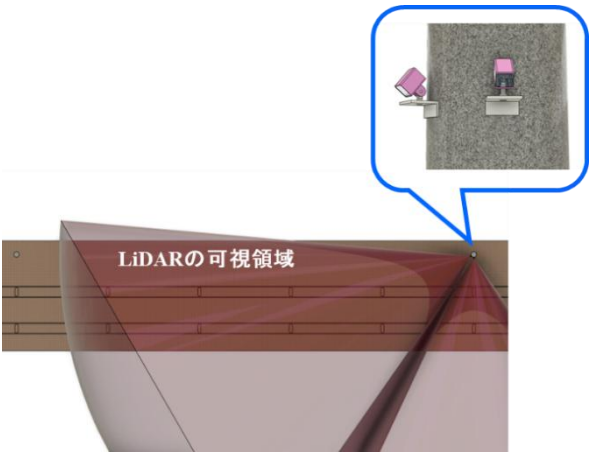


(b)陥没状態



(c)隆起状態

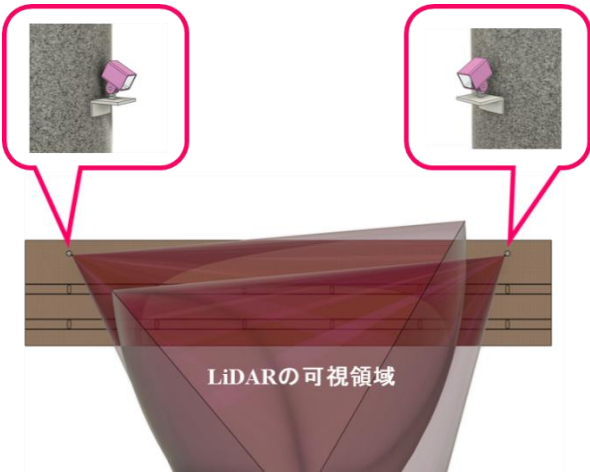
写真－1 隆起・陥没の再現方法



図－3 3D-LiDAR の配置（同一箇所）

表－2 検知可否の結果（同一箇所）

原点からの 線路方向距離[m]	隆起	陥没
0	○	○
10	○	○
20	○	○
30	○	×
40	○	×



図－4 3D-LiDAR の配置（挟み込み）

表－3 検知可否の結果（挟み込み）

0m 地点からの 線路方向距離[m]	隆起	陥没
0	○	○
10	○	○
20	○	○
30	○	○
40	○	○

陥没において検知ができない箇所が存在することから、隣接する2本の電化柱(距離50m)に3D-LiDARを1台ずつ設置し、計測対象範囲を挟み込む形とした。

また、マクラギやレールによって死角が発生することを防ぐため3D-LiDARの設置高さもレールレベルから7mの位置とした。

このときの3D-LiDARの配置を図-4に、隆起、陥没の検知可否の結果を表-3それぞれに示す。この配置では3D-LiDAR設置箇所の直下(0m地点)が死角となることから0mの位置については計測を行っていない。

10m~40mの4箇所については全ての位置で隆起、陥没のいずれも検知できた。これは、0m地点に設置した3D-LiDARが10m、20m地点を、50m地点に設置した3D-LiDARが30m、40m地点を主体として監視するというように監視範囲が分担されることで、3D-LiDARから最も離れた変位計測地点までの距離を短くする効果が得られたこと、2台の3D-LiDARの中間点付近では点群データを重ね合わせることで死角が少なくなったことによるものと考えられる。

以上より、隣接する2本の電化柱に3D-LiDARを配置することで電化柱間全範囲の隆起、陥没を検知可能であることが確認できた。ただし、3D-LiDARの直下は死角となっており、この箇所を検知範囲とするには、さらに1台の3D-LiDARを追加しなければならないことに留意が必要である。また、3D-LiDARの高さはレールレベルから7mが営業線において架線の干渉を受けない範囲で高さを確保できるため最適値といえる。

4. 営業線における本検証

4.1 試験の基本条件

予備検証で得られた知見をもとに、実際の営業線において適用性の検証を実施した。

営業線近傍のレールレベルから7mの高さに3Dセンサを設置し、地盤変状の検知が可能な範囲を調査した。検証箇所の俯瞰図を図-5に、平面図を図-6にそれぞれ示す。3D-LiDARは隣接

する2本の電化柱(距離52.7m)に1台ずつ計2台設置した。

線路はほぼ平行方向に合計で7線並んでおり、手前から3線目は切替え工事用の新設線であり途中で行き止まりとなっている。幅方向の計測対象範囲は手前の2線分(10m程度)を基準として、その先の5線分も一部箇所では計測を行った。長さ方向に電化柱間隔から両端6m程度を除いた46m程度を計測対象範囲とした。

計測対象範囲内の軌道部分は5mおきにバラスト上に土のう(高さ80mm程度)を配置した。営業線では複数箇所のバラストを土のうに置き換えることが難しいため、写真-2に示すように土のうを設置している状態を基準として初期値を取得し、土のうを除去することで相対的な陥没として再現した。

4.2 陥没の検知結果

営業線で実施した陥没の検知結果を表-4に示す。土のうを設置してから1分以内に該当箇所において50mm以上の変位が記録された場合、正常に検知ができたものとして評価する。

手前の2線では全ての測点で陥没を検知するこ

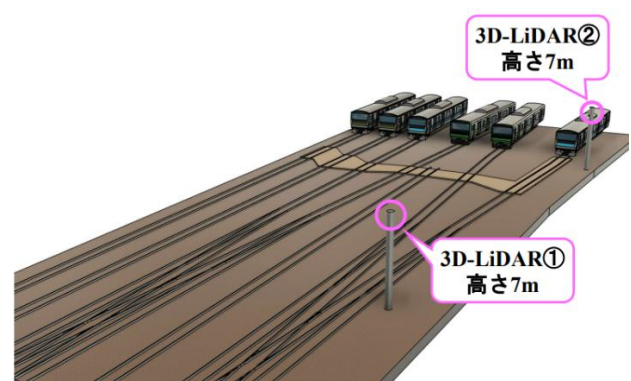


図-5 本検証実施箇所の俯瞰図

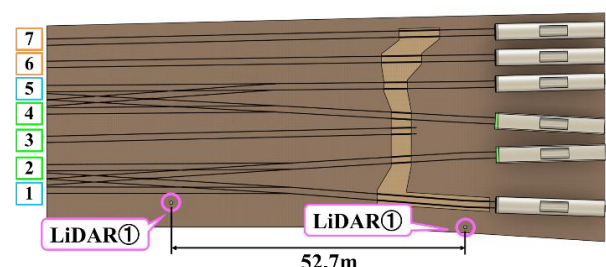


図-6 本検証実施箇所の平面図

とができた。3 線目，4 線目においても概ね検知できたが，一部検知ができない箇所も存在した。5 線目～7 線目は，2 台の 3D-LiDAR の中間点にあたる 26m 地点にて陥没を検知できたが，点群濃度が薄く信頼性に乏しい結果となった。

以上から手前 2 線分では安定して陥没を検知できるが，その奥では検知できないことがあるため，3D-LiDAR を追加するなどの補完が必要となることが確認できた。



(a)土のう設置時（相対的な基準）



(b)土のう撤去時（相対的な陥没状態）
写真－2 土のうによる変状の再現

表－4 本試験における陥没の検知結果

線路	LiDAR中間点 における線路 からの距離[m]	左側LiDARからの線路平行距離[m]								
		6	11	16	21	26	31	36	41	46
7	31.9	-	-	-	-	○	-	-	-	-
6	27.5	-	-	-	-	○	-	-	-	-
5	22.9	-	-	-	-	○	-	-	-	-
4	18.5	×	○	○	○	○	○	○	○	○
3	14.5	○	○	○	○	○	○	○	×	○
2	8.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1	4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○

5. まとめ

短時間に広範囲の地盤変状を確認する計測手法として 3D-LiDAR を用いた点群データによる計測法に着目し，模擬的に周辺地盤を変化させることで，営業線におけるその適用性を検証した。実線を模擬した複線軌道において 3D-LiDAR 設置箇所の最適化と計測範囲の確認を行った。その結果，隣接する電化柱の高さ 7m の位置に 2 台の 3D-LiDAR を設置し，取得したデータを重ね合わせることで，線路方向に 50m 程度，線路直角方向におよそ線路 2 線分に相当する 10m 程度の範囲で 80mm 程度の地盤隆起・陥没を検知することができた。また，営業線においてもこの範囲は安定して相対的な陥没を検知することができた。今後は，線路直下のアンダーパス工事等において，鉄道事業者による地上部の変状監視への適用が期待される。

謝辞

本開発の実施にあたり，東日本旅客鉄道株式会社東京建設プロジェクトマネジメントオフィスよりご協力，ご助言をいただきました。関係者各位に心から感謝申し上げます。

参考文献

1) 中村征史，篠野正樹，布施尚之，青木教之，上野悟己，澤井伸介：3D センサによる立入禁止エリア進入検知システム，鉄建技術報告 No.35，p1，2021.12

2) 中村征史，斉藤栄治，篠野正樹，青木教之，上野悟己，澤井伸介：3D センサによる立入禁止エリア進入システム～実現現場でのデータ採取～，鉄建技術報告 No.36，pp.1-2，2023.3