

# 転圧地盤評価のための分散型センサポッドの開発

— 加速度応答スペクトルに基づく転圧評価手法の検討 —

○福田 健太郎 (九州大学), 中嶋 一斗 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

## Development of Distributed Sensor Pods for Evaluation of Compacted Ground

— Study on Compacted Ground Evaluation Based on Acceleration Response Spectrum —

○ Kentaro FUKUDA (Kyushu Univ.), Kazuto NAKASHIMA (Kyushu Univ.), and Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)

Abstract : In this study, we develop a distributed sensor pod to evaluate the stiffness of the ground compacted by a vibrating roller. The sensor pod is equipped with a vibration sensor, a LiDAR, and a 360° camera to predict the danger of the surrounding area and to evaluate the ground stiffness. In this paper, we introduce the outline of the sensor pod and the evaluation method of ground stiffness based on the acceleration response spectrum of ground vibration.

### 1. 緒言

現在, ムーンショット型研究開発プロジェクトにおいて, 目標3「2050年までに, AIとロボットの共進化により, 自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」を目指し, 「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」が実施されている。このプロジェクトは, 自然災害からの応急復旧や, 月面有人探査の拠点構築を行う協調型ロボットの開発を目的としている。上記の目的を達成するための基本的なロボット技術は, 地上での無人化施工やインフラ整備にも適用でき, 労働者の高齢化, インフラの老朽化, 建設業界で働く人々の減少などの問題への貢献が期待されている。

無人化施工などロボットによるインフラ施工には, 施工現場の環境情報の取得が重要である [1]。施工現場の環境情報には, 地形形状, 盛土形状, 重機やロボットの位置, 姿勢, 作業員の動きなどが考えられるが, 特にロボットや重機を用いた土工施工では, ロボットや重機が現場を移動可能か (traversability) を事前に確認する必要があり, 施工現場の地盤強度の計測も極めて重要である。従来, 土工現場での地盤強度の把握には, 振動ローラの転圧回数による管理が一般的である。これに加えて, FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験やコーン貫入試験などの人手による計測や, ラジオアイソトープ (RI) 法など非接触な計測方法が用いられているが, これらは転圧領域の数点で疎な計測を行うものである。これに対し, 振動ローラによる転圧時に, ローラに取り付けた加速度センサの応答波形から, 地盤強度を推定する方法 [2] が実用化されている。しかし振動源である振動ローラにセンサを取り付けることは, 計測精度やセンサの耐久性の点で問題がある。

そこで本研究では, 地盤評価のための振動計測センサや, 地形形状やロボットの動きを計測するための 3D-LiDAR, 全方向カメラ, GNSS 受信機などを搭載した複合センサ端末 “センサポッド” を開発する。このセンサポッドを施工現場の数カ所に置くことで, ロボットや重機の動きの計測に加えて, ロボットや重機の移動により生じる振動を計測することで, 地盤強度の計測の可能性を検討する。本稿では, 開発した分散型センサポッドのシステムについて述べた後, 本システムを用いた野外実験場での計測実験, および地盤強度の評価結果について報告する。

### 2. ハードウェア構成

センサポッドは, 各種センサを用いて周囲環境のデータを取得する。土木現場などの広域で情報を収集するには, 複数のセンサポッドのデータを統合する必要があり, 各センサポッドが設置された位置情報が不可欠である。本章では, 開発した分散型センサポッドを構成する振動計測センサや 3D-LiDAR, 360° カメラなど, 周囲環境のデータを取得するセンサと, Network-RTK-GNSS を用いた自己位置推定手法について述べる。なお, 制御用 PC として Intel 社の NUC を搭載した。センサポッドの全体図を Fig.1 に示す。

#### 2.1 振動計測センサ

地盤振動の計測のために高精度振動センサ (小野測器, NP-7310) を搭載した。NP-7310 は, 0.1~400Hz の低周波振動の計測が可能であり, 高感度な計測ができる。また, 3 軸方向の振動が同時に計測可能である。

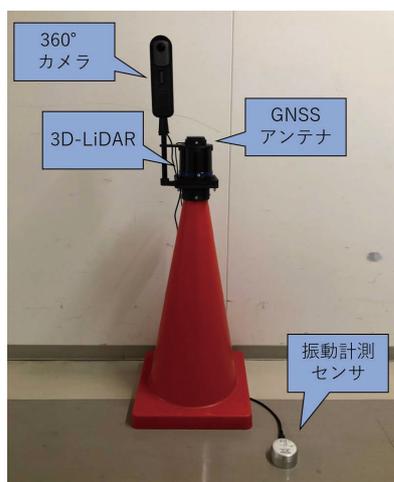


Fig. 1: Overview of the sensor pod

## 2.2 3D-LiDAR

本センサポッドには、作業するロボットや障害物の検出を目的に多層 3D-LiDAR (Quanergy, M8-PLUS) を搭載した。M8-PLUS の測距範囲は 0.5~150m であり、全方位に 8 ラインのレーザを照射し、全周の距離計測が可能である。3D-LiDAR は、作業ロボットや重機、作業員の検知に用いる。

## 2.3 360° カメラ

ロボット作業時のセンサポッド周囲の監視を目的に、360° カメラ (RICOH, THETA V) を搭載した。THETA V は、全周を撮影できるカメラであり、遠隔から作業員によるロボット作業の監視が可能である。野外実験場での撮影画像を Fig.2 に示す。



Fig. 2: Captured image by 360° camera

## 2.4 Network-RTK-GNSS

正確なセンサポッドの自己位置推定を実現するために小型 GNSS 受信機 (CORE, QZNEO) を用いた Network-RTK-GNSS を利用した。Network-RTK-GNSS は、利用

者が現場で取得した衛星データと、周辺の電子基準点の観測データから作成された補正情報を組み合わせ、リアルタイムでセンチメートル級の測量を効率的に行う方式である。特に本実験では、docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービス [3] を用いた。docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービスは、全国の電子基準点や NTT ドコモ独自の固定局から補正情報を取得することで、誤差センチメートルの高精度な測位が可能な Network-RTK-GNSS である。RTK 法では、高精度な測位を行うために衛星-アンテナ間に搬送波の波数を求める。波数の候補を絞り込む過程の解を Float 解といい、精度は 20cm~ 数 m 程度である。一方、波数を決定した解を Fix 解といい、精度は数 cm となる。RTK 法を用いることでセンチメートル級の測位結果が得られ、センサポッドの正確な自己位置推定が可能となる。

## 3. ソフトウェア構成

分散型センサポッドのシステムは、取得したデータを統合するために時刻で同期する必要がある。そこで取得したデータにタイムスタンプを付与することができ、複数端末間で時刻同期することが可能な ROS (Robot Operating System) を利用して開発した。

各センサポッドは、マスター PC と相互に通信する。センサポッドが取得したデータはマスター PC に送信され、マスター PC はセンサポッドの起動、停止の操作を行う。通信には Wi-Fi (2.4GHz) を用いており、センサポッド間の有線接続の必要はない。

## 4. 実験

### 4.1 データ取得実験

各センサポッドの同期とセンサの正常な動作の確認を目的に、九州大学伊都キャンパス内に設けられた野外実験場にて、振動ローラと分散型センサポッド 4 台を用いたデータ取得実験を行った。振動ローラが走行中のデータを取得している実験の様子を Fig.3 に示す。

実験の結果、4 台の各センサポッドの同期が取れていること、センサが正常に動作していることを確認した。

### 4.2 データ解析実験

振動ローラによる転圧を繰り返すと、地盤強度が変化する。一般には最初は次第に固くなるが、ある回数を越すと過転圧となり、逆に強度が低下する。この振動ローラによる転圧作業中に、振動ローラにより起振された地盤振動をセンサポッドで計測することで、転圧回数と地盤振動に相関があるかを調べた。実験は、データ取得実験と同じ野外

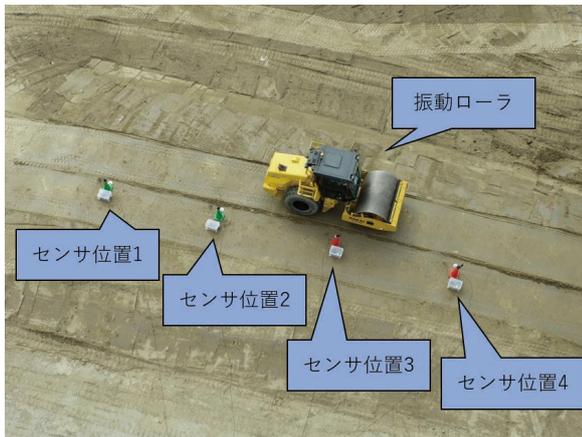


Fig. 3: Experiment setup in an outdoor field

実験場で、振動ローラと FWD 試験によって起振された地盤振動をそれぞれ計測した。FWD 試験は、載荷板上に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を加え、生じた変位量を測定する試験のことである。本研究では、各センサポッドの正面で FWD 試験を行い、重錘の衝突振動を計測する。実験は、振動ローラを用いて地盤を 10 往復転圧し、2 往復ごとに FWD 試験を実施し、振動を計測した。この際、振動ローラが地盤を転圧する際の振動データ、および、転圧後に行った FWD 試験の振動データを記録し、転圧回数による振幅や位相差の変化を計測した。

まず、振動ローラにより起振された振動について、計測された振動を周波数解析して得られた、振動ローラの基本周波数に対応した周波数の振幅の推移を Fig.4 に示す。また、FWD 試験によって起震された振動の振幅の推移を Fig.5 に示す。

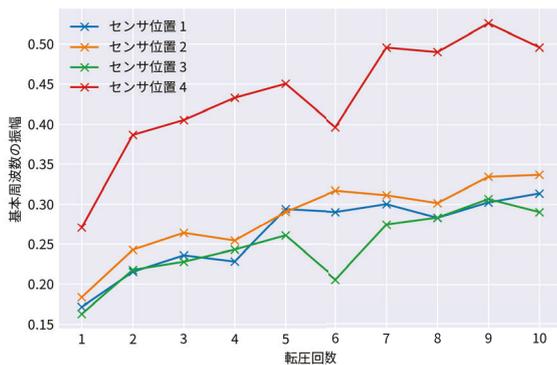


Fig. 4: A peak amplitude of a roller's vibration as a function of the number of compaction

解析の結果、振動ローラでの転圧回数が増えると地盤を伝播する振動の振幅が増加することを確認した。実験の結果、地盤の転圧回数と振動の振幅の増加は、相関関係にあると考えられる。今後は、センサポッド間で計測した振動の位相差を求め、転圧回数との関係性を調べる予定である。

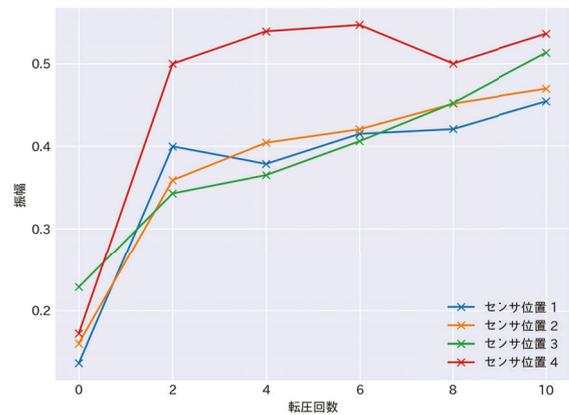


Fig. 5: A peak amplitude of a FWD's vibration as a function of the number of compaction

## 5. 結言

本稿では、土木施工現場の環境把握を目的に、現在開発している分散型センサポッドについて紹介した。また開発した分散型センサポッドを用いて、振動ローラによる転圧作業を計測し、伝播振動からの地盤強度推定の可能性を検討した。今後、より高精度な地盤評価の実現を目指すとともに、インフラ構築を革新する協働 AI ロボットの実現を目指す。

## 謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2032】の支援を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Keiji Nagatani, Masato Abe, Koichi Osuka, Pangjo Chun, Takayuki Okatani, Mayuko Nishio, Shota Chikushi, Takamitsu Matsubara, Yusuke Ikemoto and Hajime Asama: "Innovative technologies for infrastructure construction and maintenance through collaborative robots based on an open design approach", *Advanced Robotics*, 35:11, 715-722(2021)
- [2] 古屋 弘, 藤山 哲雄: "振動ローラ加速度応答法による地盤剛性評価装置「αシステム」の開発と実用化", *建設の施工企画*, No.728, 42-46(2010)
- [3] NTT ドコモ: "docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービス", [https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/highprecision\\_gnss\\_positioning/](https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/highprecision_gnss_positioning/), (参照 2021 年 10 月 22 日)