

土木施工現場の状況把握のためのセンサポッド実証機の開発

○高野 智也 (九州大学), 松本 耕平 (九州大学), 中嶋 一斗 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

Development of Petit-Sensor Pods for Monitoring Civil Engineering Sites

○ Tomoya KOUNO (Kyushu University), Kohei MATSUMOTO (Kyushu University),

Kazuto NAKASHIMA (Kyushu University), and Ryo KURAZUME (Kyushu University)

Abstract: In this study, we develop Petit-Sensor Pods for monitoring conditions at civil engineering sites. The Petit-Sensor Pod is equipped with a multi-core processor, a 220° camera, Wi-Fi and Bluetooth module, a GNSS receiver, and a vibration sensor, and can be placed on a triangular cone. This paper presents the functionality of the Petit-Sensor Pod and the results of experiments to verify its performance.

1. 緒言

我が国では近年、さまざまな自然災害が各地で頻発しており、人々の生活を守り、災害の被害を最小限に抑えるために、応急復旧の迅速化、高度化が望まれている。そこで、2050年までに、人が活動することが難しい災害現場で、自ら判断し、自律的に応急復旧を行うAIロボットを開発することを目標に、ムーンショット目標3において「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」の研究開発が進められている。多様な災害現場でのロボットシステムの実現には、想定外の状況に対応しながら、複数台のフィールドロボットが自律的に動的協働作業を実施することが必要となる^[1]。さらに、無人化施工によるインフラ構築は、近年の日本が抱える、労働者の減少、施工現場における労働災害の発生、インフラの老朽化などの問題解決にも貢献することが期待される。

無人化施工によるインフラ構築の実現には、施工現場の状況を正確に把握することが重要となる。施工現場の状況には、地形情報、重機やロボットの位置情報、地盤強度などが考えられるが、我々はこれらの状況を遠隔地から把握するため、様々なセンサを搭載した複合センサ端末「センサポッド」を開発している。

本研究では、後述する先行研究で開発された複合センサ端末「センサポッド」^{[2][3][4]}の実証機として、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監視するための超広角カメラ、GNSS受信機などを搭載した、よりコンパクトで汎用的な複合センサ端末「プチ・センサポッド」を開発する。これを施工現場の数箇所に置くことで、ロボットや重機の動きの監視に加えて、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、地盤強度を推定することが可能となる。

2. 先行研究

前述したとおり、先行研究^{[2][3][4]}では、施工現場の環境情報を収集するために、図1のセンサポッドが開発された。このセンサポッドは、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ている。また、制御用コンピュータとしてIntel社のNUCをコーンの内部に搭載している。バッテリーなどもコーンの内部に搭載しているため、コーン全体を移動・設置する必要があるが、重量も大きく、

施工現場においては可搬性・利便性に欠ける。

そこで、本研究では、一般的な施工現場で使用されるコーンの上部に載せるだけで、施工現場の状況を把握することのできる、可搬性に優れた実証機「プチ・センサポッド」を開発する。さらに、このプチ・センサポッド上で処理を完結させ、受信側のマスタPCでは、情報を受け取るのみにすることにより、施工現場での利便性を高める。

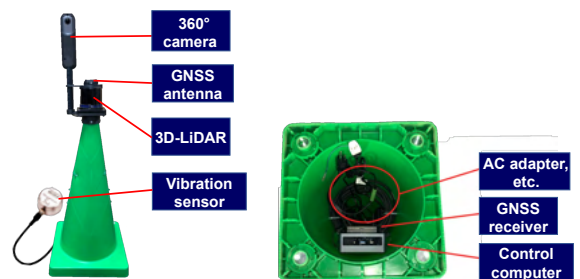


Fig.1 Overview of Sensor Pod

3. ハードウェア構成

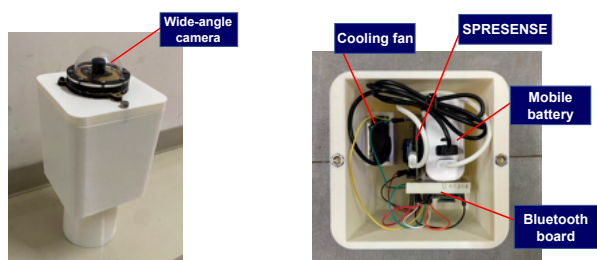
プチ・センサポッドの全体図を図2に示す。プチ・センサポッドは、各種センサを用いて施工現場の状況を把握する。本章では、使用している振動計測センサや、超広角カメラなどの各種センサについて述べる。さらに、制御用マイコン (Sony, SPRESENSE^[5])、および搭載されたGNSS受信機についても説明する。

3.1 SPRESENSE

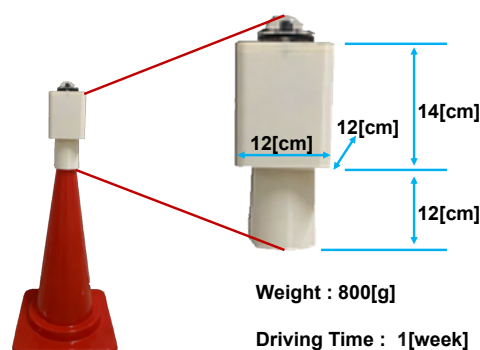
SPRESENSEは、ソニーが開発したスマートセンシングプロセッサCXD5602を搭載したIoT用ボードコンピュータである。低消費電力で動作可能な、ARM®Cortex®-M4Fが6つ搭載されており、マルチコアによる並列処理が可能である。さらに、図3のようにWi-Fiモジュール(IDY, iS110B)を接続することで、Wi-Fiによる無線通信が可能である。

3.2 振動計測センサ

振動計測センサとして、8チャンネル小型無線モーションレコーダー(MicroStone, MVP-RF8-JC)を用いた。従来のセンサポッド(図1)では、有線で動作する高精度振動センサ(小野測器, NP-7310)を搭載していたが、このプチ・センサポッドの振動計測センサは、SPRESENSEとの間でBluetoothを用いた無線通信を



(a) Outer components of Petit-Sensor Pod (b) Inner components of Petit-Sensor Pod



(c) Petit-Sensor Pod put on a cone

Fig.2 Overview of Petit-Sensor Pod

行うことができるため、より計測が容易である。0～100Hz の低周波振動の計測ができ、3 軸同時に計測することが可能である。なお、Bluetooth 通信を行うために、振動計測センサの仕様から LINBLE-Z1（ムセンコネク）を用いた通信基板（図 3）を製作した。

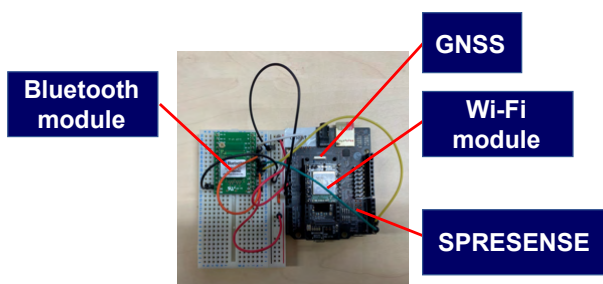


Fig.3 Connection between SPRESENSE and other modules

3.3 超広角カメラ

ロボット作業時の施工現場の監視のために、220° カメラ（インタニヤ、HDR VR 220 カメラ）を搭載した。従来のセンサポッド（図 1）では、360° カメラ（RICOH, THETA V）を搭載していたが、220° カメラを図 2(a) のように、上向きに設置することにより、全周方向の監視が実現できる。

3.4 GNSS

施工現場における、プチ・センサポッドの位置情報を把握するために、SPRESENSE に内蔵されている GNSS (Global Navigation Satellite System) を使用した。この GNSS は、GPS、みちびき、GLONASS に対応し、複数システムを同時受信する。さらにみちびきの SLAS (Sub-meter Level Augmentation Service) が利用でき、サ

ブメートル級の測位が可能である。なお、GNSS 信号は後述するセンサ情報の時刻同期にも使用される。

4. ソフトウェア構成

プチ・センサポッドは、ソフトウェア処理において SPRESENSE のマルチコアによる並列処理を利用する。本章では、プチ・センサポッド内部で行われる処理の概要について述べる。ソフトウェア構成図を図 4 に示す。

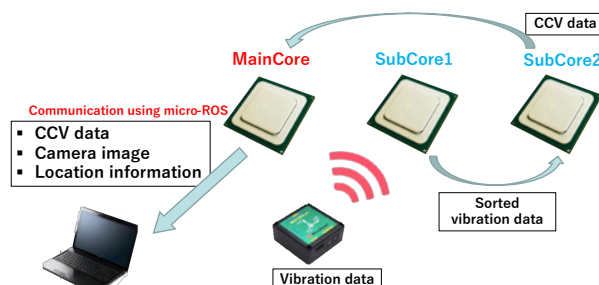


Fig.4 Software configuration

・ メインコア

SPRESENSE 上では、メモリアクセスの関係上、サブコアではできない処理がいくつか存在する。そのため、処理の中核を担うのが、このメインコアである。メインコアでは、220° カメラ映像を取得する。さらに、GNSS により、時刻取得と位置情報の取得を行う。これらの情報と併せて、後述するサブコアで取得する地盤評価の結果を micro-ROS による ROS2 通信を利用してマスタ PC に送信する。

・ サブコア 1

ここでは、自作した Bluetooth 基板を用いて振動計測センサと通信を行い、振動データを取得する。さらに、これをコア間通信を用いて、サブコア 2 に送信する。

・ サブコア 2

このコアでは、サブコア 1 から取得した振動データをもとに、短時間フーリエ変換 (stft) を行い、時間軸の情報を周波数スペクトルに変換する。これを用いて、地盤評価を行い、コア間通信を用いて、メインコアへと送信する。本研究では、周波数スペクトルに基づく地盤剛性指標である CCV を採用し、地盤評価の結果としている。CCV は以下の式によって計算される。

$$CCV = \frac{S'_0 + S'_1 + S_1 + S'_2 + S_2}{S'_0 + S_0}, \quad (1)$$

ただし、 S_0 は振動ローラなどの振動発生源の基本振動数に対するスペクトル、 S_n は n 倍の振動数に対する高調波スペクトル、 S'_n は $n + 0.5$ 倍の周波数に対する $1/2$ 分数調波スペクトルである。地盤の剛性が高まると、振動発生源の跳ね上がりにより加速度波形が乱れることで S_n と S'_n が卓越し、CCV が上昇する。式 (1) より、 N 台の振動センサごとに時系列 CCV を得る [6][7]。

5. ネットワーク構成

広大な施工現場の状況を把握するためには、複数箇所にプチ・センサポッドを配置する必要がある。それらを統合する必要がある。現場で使用する場合のネットワーク構成図を図5に示す。本研究では、Wi-Fiルーター（バッファロー、WXR6000AX12P）を用いて、ROS2 通信によって情報の統合を行う。マスタ PC 上で micro-ROS-agent を立ち上げることにより、SPRESENSE 上で動作する micro-ROS の通信が可能となる。前述したように、各プチ・センサポッドから送信される情報には、GNSS により取得したタイムスタンプが付与されている。マスタ PC 側では、これを整列し、施工現場の状況として保存する。

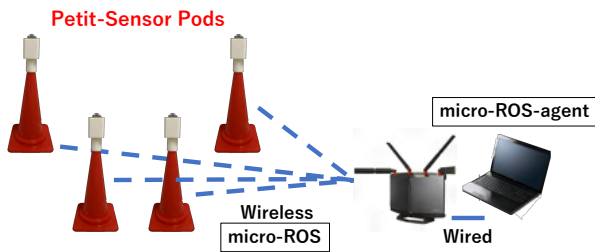


Fig.5 Network configuration

6. 実験

6.1 各センサからの情報取得実験

本実験では、搭載したセンサにより情報が適切に収集できること、およびそれら情報が、Wi-Fi 通信によりマスタ PC に集約できることを確認する。実験結果の表示に用いている航空写真は、Google マップを利用した可視化ツール Mapviz^[8] を使用している。

6.1.1 振動計測センサ

図6のように、スピーカの上に振動センサを置き、振動ローラの基本周波数である 40Hz とその 1.5 倍、2 倍である 60Hz と 80Hz の混成周波数の音源を再生し、CCV の値を確認した。マスタ PC 上で受信した CCV の値を図7に示す。これにより、赤線に囲まれた再生している部分に CCV の値の上昇が確認でき、正常に受信できることがわかる。

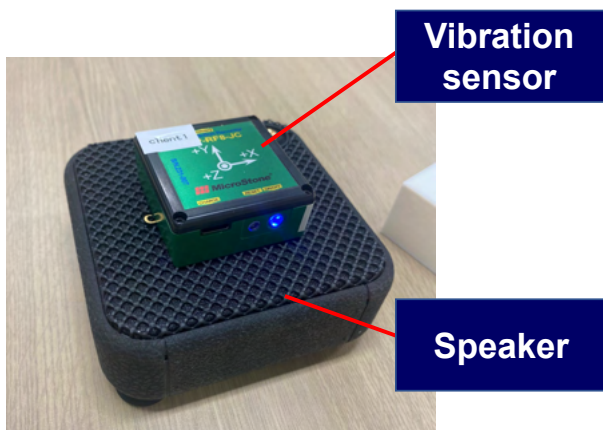


Fig.6 Setting of speaker and vibration sensor

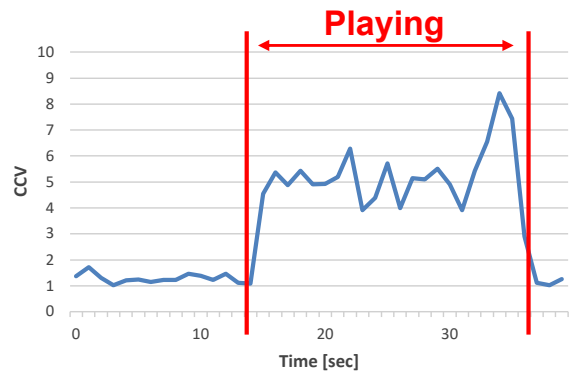


Fig.7 Result of received CCV

6.1.2 超広角カメラ

九州大学の伊都キャンパス内において、屋外の開けた場所に、プチ・センサポッドを図8のように配置し、画像取得実験を行った。マスタ PC 上で、受信された画像を図9に示す。この実験によりプチ・センサポッドで取得された画像が正常に受信できていることを確認した。



Fig.8 Arrangement of Petit-Sensor Pod



Fig.9 Received camera streaming

6.1.3 GNSS

図8での実験で、同時に GNSS により受信した位置情報をマップ上に表示した様子を、図10中の緑色の点で示す。

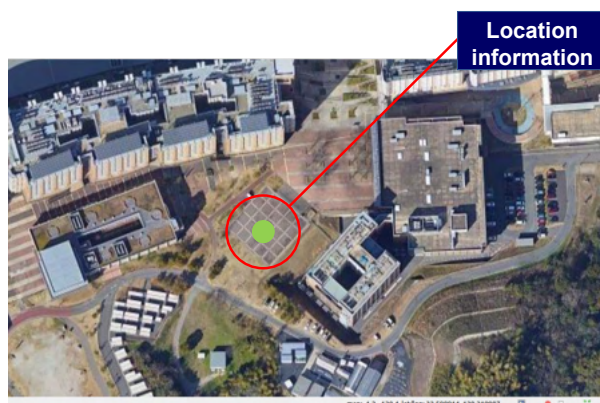


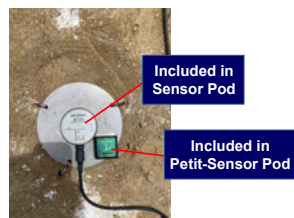
Fig.10 GNSS (SLAS) location information

6.2 振動計測センサの比較実験

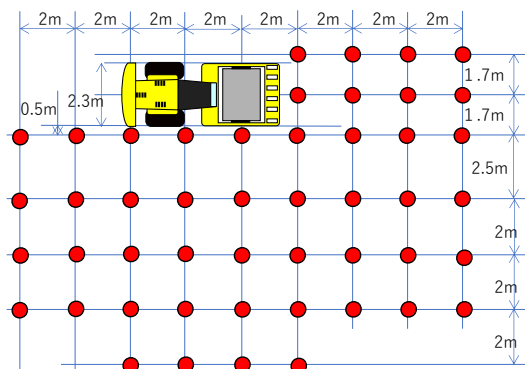
プチ・センサポッドには、センサポッドに搭載した振動計測センサとは異なる無線振動センサを用いている。そこで、センサポッドと同様の結果を得ることができることを確認するために実験を行った。図 11(b)のように、センサポッドの振動計測センサと、プチ・センサポッドに含まれる無線振動センサを同じ円盤上に固定し、図 11(c)の各点で順番に配置して、図 11(a)のように配置した振動ローラを振動させることにより、得られた CCV の値が等しいかどうかを確認した。一例として、この結果のうちの 1 つを図 12 に示す。赤線に囲まれた部分が振動ローラを振動させている時間であり、時刻同期を行っていないため、時間軸にずれはあるが、ほぼ同じ CCV の値が得られていることがわかる。



(a) Arrangement of vibratory roller and sensing positions



(b) Vibration sensors fixed to plate.



(c) Layout of vibration sensor

Fig.11 Comparative experiment on vibration sensors

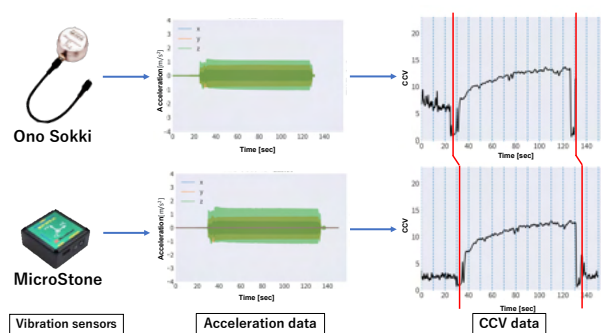


Fig.12 Comparison of CCV values

6.3 振動計測センサの解析実験

センサポッドでは、PC 上で Python 言語を用いて解析し、CCV の値を算出していた。プチ・センサポッドでは、メモリ等資源に制限のある SPRESENSE 上で Arduino 言語を用いて解析を行うため、その値が PC 上で解析した場合と比較し、同一の結果となることを確認した。図 13 を見ると、同じ入力データに対して、同様の値が得られている。ここで、stft のパラメータは、窓関数を矩形窓、FFT サイズを 2048、オーバーラップを FFT サイズの 1/2 としている。

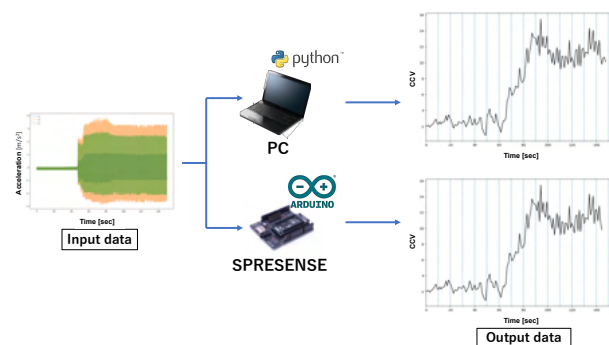


Fig.13 Comparison of analysis results

7. 結言

本稿では、無人化施工・インフラ構築を行うための必要となる、土木施工現場の状況を把握するためのセンサポッド実証機「プチ・センサポッド」について紹介した。プチ・センサポッドは、振動計測センサからの情報から地盤評価を行ったうえで、マスタ PC に送信することができ、さらに施工現場でよく用いられるコーンの上部に配置するのみで、状況を把握することができ、可搬性・利便性が高い。今後、SPRESENSE に AI を組み込み、全周画像からロボットや建機との位置関係を推定するなど、プチ・センサポッドのさらなる改良に努めるとともに、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、またソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社から機材・技術支援を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] *Moonshot* 型研究開発事業 目標 3 CAFE プロジェクト. Accessed on 07.10.2023. URL: <https://moonshot-cafe-project.org/>.
- [2] 福田 健太郎, 中嶋 一斗, and 倉爪 亮: “転圧地盤評価のための分散型センサポッドの開発”. 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会. 2021, 3H4-05.
- [3] 福田 健太郎, 中嶋 一斗, and 倉爪 亮: “転圧地盤評価のための分散型センサポッドの開発 -第 2 報多点同期振動データの波形歪みに基づく地盤剛性の定量化-”. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2022. 2022, 1A1-E04.
- [4] 福田 健太郎 et al.: “土木工事における地盤剛性評価・安全管理のための分散型センサポッドの開発”. 第 23 回ロボティクスシンポジウム. 2023, 4A2.
- [5] ソニー株式会社: *Overview* | ソニーの開発者ポータル. Accessed on 07.10.2023. URL: <https://developer.sony.com/ja/spresense/>.
- [6] 福田 健太郎, 中嶋 一斗, and 倉爪 亮: “多点同期振動データの波形歪みに基づく地盤剛性評価手法の提案”. 第 20 回建設ロボットシンポジウム. 2022, P2-2.
- [7] Y.Tamaishi, K.Fukuda, K.Nakashima, R.Maeda, K.Matsumoto, R.Kurazume: “Evaluation of ground stiffness using multiple accelerometers on the ground during compaction by vibratory rollers”. 2023, pp. 262–269.
- [8] *Mapviz - Modular ROS visualization tool for 2D data*. Accessed on 07.10.2023. URL: <https://github.com/swri-robotics/mapviz>.