

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

- 第4報 河道閉塞現場における杭型センサポッドの設置と可視化 -

○高野 智也 (九州大学), 秋成 光太 (九州大学), 堤 哲之介 (九州大学),
笠原 侑一郎 (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 Pile-type Sensor Pods for Monitoring Civil Engineering Sites - Deployment and Visualization of Pile-Type Sensor Pods at a River Channel Blockage Site -

○ Tomoya KOUNO (Kyushu Univ.), Kota AKINARI (Kyushu Univ.), Akinosuke TSUTSUMI (Kyushu Univ.),
Yuichiro KASAHARA (Kyushu Univ.), Kohei MATSUMOTO (Kyushu Univ.),
Kazuto NAKASHIMA (Kyushu Univ.), and Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)

Abstract: We have developed the *Pile-type Sensor Pod*, a prototype sensing terminal designed to collect essential environmental information for emergency restoration work. The system is equipped with two wide-angle cameras enabling omnidirectional monitoring of terrain and robot motion, vibration sensors for ground condition assessment, and a GNSS receiver for position data acquisition. We report the results of visualizing the construction site in a simulated river channel blockage environment using a cyber-physical system (CPS) that integrates environmental data collected by the pile-type sensor pod with positional information transmitted from construction machinery. By employing virtual reality (VR) to seamlessly switch between the cyber and real worlds, we demonstrated the practical utility of this approach for monitoring construction sites.

1. 緒言

日本では、全国各地で台風や地震、火山噴火などの自然災害が頻発しており、人的被害や住宅被害は甚大である。これらの災害による被害を最小限に抑えるためには、迅速な応急復旧が不可欠であり、そのための技術開発が強く求められている。

我々は、災害現場のような複雑かつ変化の激しい環境において、想定外の状況にも臨機応変に対応し、応急・復旧作業を実施できる「協働 AI ロボット」の研究開発を進めている。この技術は、災害現場での応急復旧だけでなく、社会インフラの構築や維持管理への応用も期待されている¹⁾。

特に我々は、「河道閉塞災害」への対応技術に注力している。河道閉塞とは、土砂崩れや火山噴火などによって河川がせき止められ、一時的に天然のダムが形成される現象である。この状態が続くと水が貯留し、決壊時には大規模な洪水や土石流が発生するなど、甚大な二次災害を引き起こす危険がある。そのため、現場の状況を時々刻々と監視し、変化に応じて迅速に復旧する必要がある。

この課題に対して我々は、現場の地形情報、重機やロボットの位置情報、地盤強度などを取得できる多種類の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。これまでに、試作機 (図 1(a))²⁾³⁾⁴⁾ や、小型・低コストの実証機「プチ・センサポッド」 (図 1(b))⁵⁾ を開発した。しかし、これらは三角コーンに搭載する方式であり、無人建設機械による運搬や設置を考慮すると、軟弱地盤や傾斜地での固定が難しいという課題があった。

そこで、新たに無人建設機械で容易に運搬・設置でき、低消費電力かつ長時間稼働が可能な「杭型センサ

ポッド」を開発した⁶⁾⁷⁾。さらに、これらのセンサで収集した情報と、建設機械から直接送信される位置姿勢情報を統合して仮想世界を構築し、作業者がその世界を virtual reality (VR) ゴーグルを用いて自由に歩き回ることによって現場を遠隔監視できるサイバーフィジカルシステム (CPS) プラットフォームも開発している⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

本報告では、河道閉塞現場を模擬した実験フィールドに杭型センサポッドを分散配置して収集した環境情報と、建設機械から送信される位置姿勢情報をリアルタイムに取得して仮想世界を構築し、施工現場の状況を監視した結果について報告する。

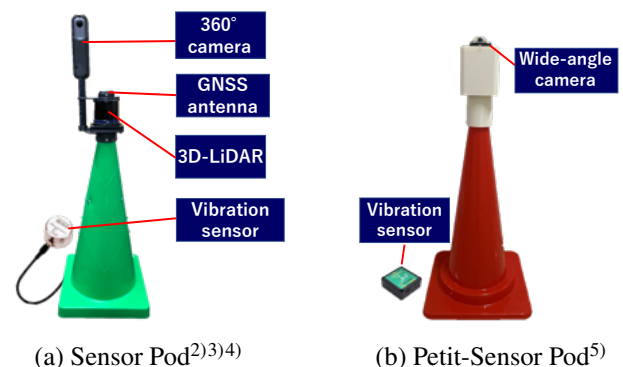


Fig. 1 Overview of Previous Sensor Pods

2. 杭型センサポッド

杭型センサポッドの構成図を図 2 に示す。杭型センサポッドは、杭にセンサポッド本体が取り付けられた構造をし、杭内部に搭載される約 35000mAh のバッテリーシステムから電源が供給され、約 10 時間の連続稼働

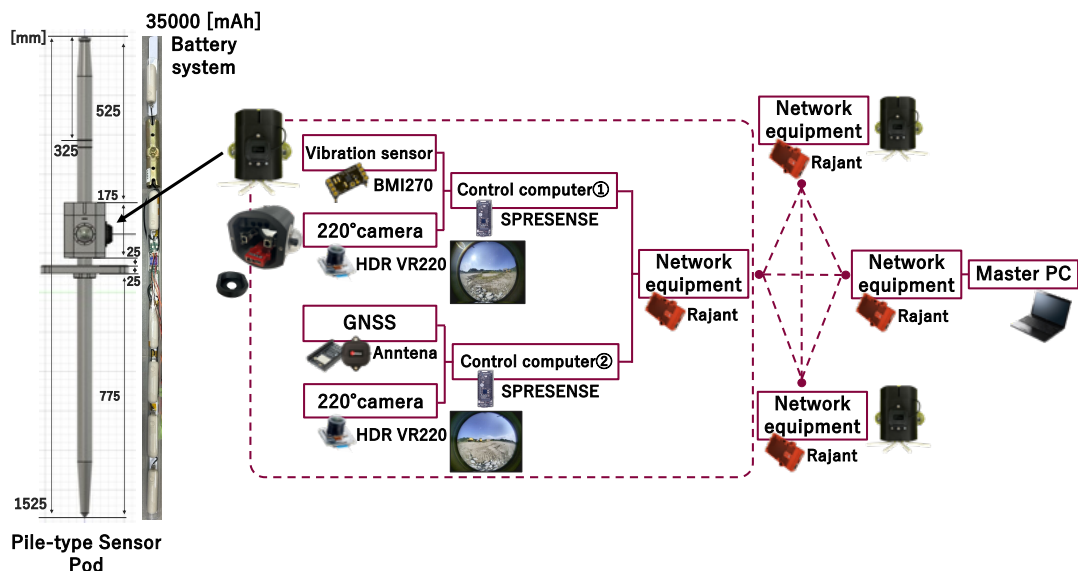


Fig. 2 Overview of Pile-type Sensor Pod

が可能である。センサポッド本体には、2つの制御用マイコンが、総じて2つの220°カメラ、GNSSモジュール、振動センサを制御する。これらのセンサにより得られる、周囲360°のカメラ映像、杭型センサポッド自身の位置情報、地盤強度の推定情報¹¹⁾を現場の環境情報として収集する。収集した環境情報は、Rajantと呼ばれるメッシュネットワークでマスタPCへと送信され、集約される。センサポッドは現場に、複数台、配置をすることにより、それぞれがネットワークの中継機の役割を兼ねるため、広範囲でのネットワークを構成できる。さらに、通信状況により、通信経路を自動で切り替えるため、安定した通信速度での通信が可能である。

これらの特徴を踏まえ、杭型センサポッドは、これまでに開発したセンサポッドと比較して、以下のような利点を持つ。

- ・杭型であり、軟弱地盤や傾斜地での設置が可能
- ・重機で設置可能で、人手による設置の危険性を低減
- ・低消費電力で、10時間の連続稼働が可能
- ・メッシュネットワークにより、ネットワーク設備のない現場でネットワーク構築が可能

3. 土工現場用 CPS プラットフォーム

図3に我々の開発する土工現場用CPSプラットフォームの概念図を示す。このCPSプラットフォームは、センサポッドや建設機械をはじめとする現場を構成するシステムが収集する環境情報をもとに、仮想世界を構築する。仮想世界を構築することで、より分かりやすく現場の情報を可視化することが可能であり、仮想世界上を歩き回って監視をすることで、多角的な視点で監視が可能となる。また、現場の情報を仮想世界上で解析し、現実フィードバックすることで、安全性と効率性を同時に向上させることが可能となる。

4. 実験

我々は、図4の河道閉塞現場を模擬した実験環境において、災害復旧作業を想定した実験を行った。川の流れが南から北に流れている環境において、斜面崩壊

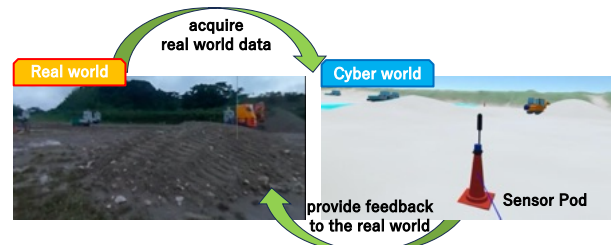


Fig. 3 Concept of CPS platform for earthwork site

が東側から発生し、土砂山及び湛水池が形成され、河道閉塞が発生したと想定した。作業エリアでは、バックホウやダンプトラックが杭型センサポッドの運搬・設置や湛水池の水の排出作業などの復旧作業を行った。杭型センサポッドは、計4台、作業エリア内に設置し、それぞれの杭型センサポッドから環境情報を収集している。また、以下で紹介する実験は運搬・設置から、CPSの構築において、復旧作業を想定して順番に行った。

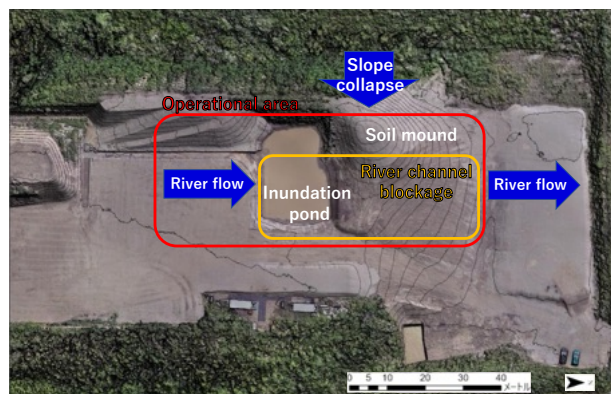


Fig. 4 Experiment environment

4.1 杭型センサポッドの運搬・設置

直列弾性アクチュエータ (SEA) による力制御を実装したミニバックホウ¹²⁾を用いて、遠隔操作での杭型センサポッドの運搬・設置を行った。今回、実験時間

の関係上、設置する4台の杭型センサポッドのうち、1台を無人建設機械で運搬・設置し、残りの3台は手動で設置した。

図5のように、ダンプトラックが、その側面に杭型センサポッドを4台取り付けた状態で運搬し、バックホウが杭型センサポッドを1台掴んで、所定の位置に差し込み、設置を行うことができた。実験の結果から、災害現場の中に人間が立ち入らず、設置することができることを確認した。

Pull-out



Put-in



Fig. 5 Experiment of transporting and installing Pile-type Sensor Pod

4.2 CPS の構築と作業の監視

設置した4台の杭型センサポッドと建設機械の位置姿勢情報をもとにCPSを構築する実験を行った。図6のように、構築したCPS上の仮想世界上には、杭型センサポッドの位置情報に基づいた杭型センサポッドのモデルが設置されており、また建設機械の位置姿勢情報に基づいた建設機械の動作の様子が確認できる。仮想世界上の杭型センサポッドをVRゴーグルのコントローラで選択することで、現実世界のカメラ映像と切り替えながら、施工の様子を確認することができる。

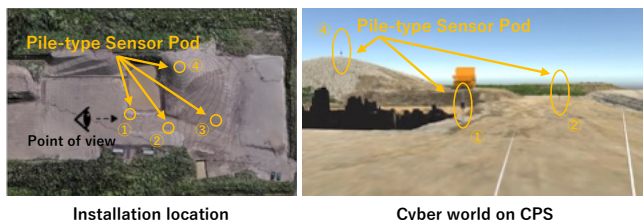


Fig. 6 Installation of Pile-type Sensor Pod on cyber world and real world

この実験中、建設機械は、バックホウ1台とダンプトラック2台が湛水池の水の排出作業を行っており、それぞれの建設機械から位置姿勢情報が送信されてい

る。また、4台の杭型センサポッドからは、それぞれ周囲360°のカメラ映像、GNSS情報が送信されている。図7にCPS上で仮想世界と現実のカメラ映像から施工の様子を監視している様子を示す。VRを用いてCPS上の仮想世界を歩き回り、カメラ映像と切り替えながら、復旧作業の様子を確認することで、河道閉塞でできた湛水池から水を排出するためのポンプを設置から排出作業の様子を監視することができた。

4.3 考察

設置した杭型センサポッドは、実験中、1時間以上安定して動作し、環境情報を収集することができた。また、リアルタイムで、CPSを構築することで、仮想世界と現実世界を切り替えながら、施工の様子を監視することができた。仮想世界上は、VRを用いて没入感を持って自由に歩き回ることができるため、現場の状況を多角的な視点で監視することができた。さらに、杭型センサポッドのカメラ映像を確認することで、より詳細な作業の様子を確認することができ、災害復旧作業の進捗状況を把握することが可能である。

5. 結言

本稿では、危険が伴う河道閉塞災害を模擬した現場において、杭型センサポッドを用いて、応急復旧作業の監視や作業の支援を目的としたCPSの構築を行った。杭型センサポッドは、これまでに開発したセンサポッドと比較して、無人建設機械での運搬・設置が可能であり、より人間が入る危険性を低減した状態で設置が可能である。また、メッシュネットワークにより構築されるネットワークの利点を活かし、広大な作業エリアにおいても、安定してカメラ映像を用いた監視が可能である。さらに、土工現場用CPSプラットフォームと連携させることにより、VRを用いて現場の状況を没入感を持って確認することができ、設置を含めた一連の施工操作を遠隔・自動で行うことができる。今後、杭型センサポッドや、施工現場の環境情報をさらに充実させることによって、より詳細な施工現場の監視が可能となり、施工の安全性と効率性をさらに向上させることが期待される。

謝辞

本研究の一部は、JST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2032】の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 19.9.2025, URL: <https://moonshot-cafe-project.org/>.
- [2] 福田 健太郎, 中嶋 一斗, 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, 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, 中嶋 一斗, 玉石 祐介, 前田 龍一, 松本 耕平, 倉爪 亮: 土木工事における地盤剛性評価・安

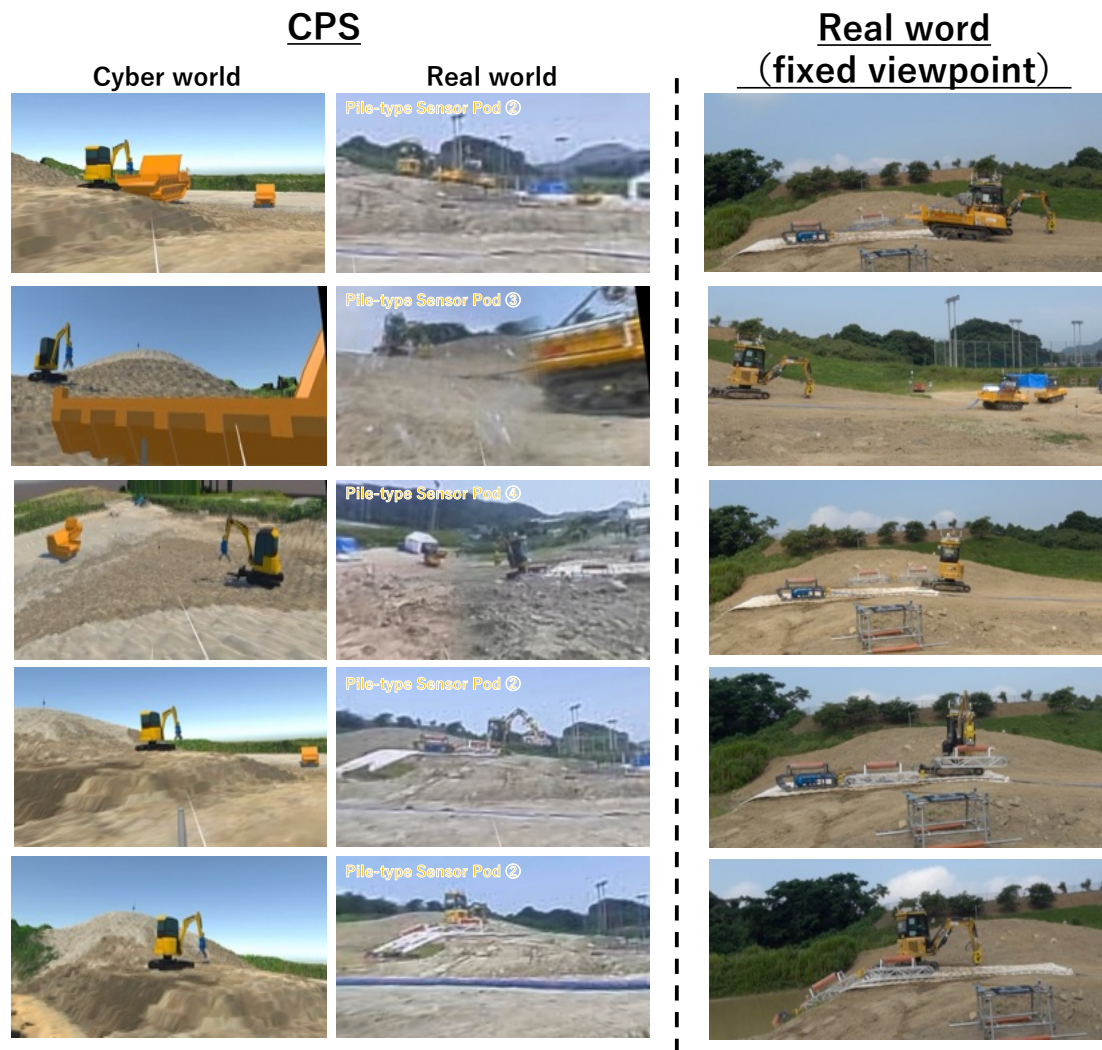


Fig. 7 Experiment of constructing CPS and monitoring

- 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ア (2023), 4A2.
- [5] 高野 智也, 松本 耕平, 中嶋 一斗, 倉爪 亮: 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, 第 24 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 (2023), pp. 1D3-02.
- [6] 高野 智也, 前田 龍一, 松本 耕平, 中嶋 一斗, 倉爪 亮: 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-第 2 報 運搬・設置が容易で長時間駆動する杭型センサポッドの開発-, 第 25 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 (2024), pp. 2C2-09.
- [7] 高野 智也, 前田 龍一, 松本 耕平, 中嶋 一斗, 倉爪 亮: 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-第 3 報 杭型センサポッドの改良と性能検証-, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2025 (2025), 1A1-B05.
- [8] 前田 龍一, 高野 智也, 松本 耕平, 中嶋 一斗, 倉爪 亮: 土工現場用 CPS プラットフォーム ROS2-TMS for Construction の開発-第 2 報 360 度カメラ映像を用いた CPS 可視化実験-, 第 24 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 (2023), pp. 1D1-10.
- [9] R. Maeda, K. Matsumoto, T. Kouno, T. Itsuka, K. Nakashima, Y. Tamaishi, and R. Kurazume: ROS2-TMS for Construction: CPS platform for earthwork sites, 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 29th 2024) (2024).
- [10] R. Maeda, T. Kouno, K. Matsumoto, Y. Kasahara, T. Itsuka, K. Nakashima, Y. Tamaishi, and R. Kurazume: Sensor Pods and ROS2-TMS for Construction for Cyber-Physical System at Earthwork Sites, IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) (2024), pp. 58-63.
- [11] Y. Tamaishi, K. Fukuda, K. Nakashima, R. Maeda, K. Matsumoto, and R. Kurazume: Evaluation of ground stiffness using multiple accelerometers on the ground during compaction by vibratory rollers, 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2023) (2023), pp. 262-269.
- [12] T. Hiramatsu, M. Saiki, N. Hara, M. Yamada, M. Momii, Y. Uebayashi, and H. Sugiura: Development Force Control of a Series Elastic Actuator to Excavator for Mechanization of Manual Work, 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (2024), pp. 13577-13583.