



ムーンショット目標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

終了報告書

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

永谷 圭司

筑波大学 システム情報系



1. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本研究開発プロジェクトの目標は、MS 目標「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」の中の「人が活動することが難しい環境で、自律的に判断し、自ら活動し成長する AI ロボット」の実現に貢献することである。自然災害に代表される状況が刻一刻と変化する難環境では、現在のロボット技術では現場に応じて柔軟に対応することが難しい。そこで本プロジェクトでは、「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」をテーマに掲げ、研究開発を実施した。前半の 3 年間は、難環境である対象を河道閉塞災害ならびに月面インフラ構築と設定し、19 の研究開発機関で、要素技術の開発に取り組んだ。後半 2 年間は、河道閉塞災害にターゲットを絞り、無人で環境情報を取得する技術ならびに、最小限の人員で災害の応急復旧が可能となる 3t 級の小型協働 AI ロボット群の実現を目指し、システムインテグレーションを実施した。以下に、災害対応システムを中心に、本プロジェクトの概要を記す。

現在の災害対応では、自然災害の発災後、限られた情報をもとに、災害対応担当者や災害協定を結んだ企業が対応策を立案し、多数の作業員が被災エリアに進入して重機を活用しながら応急復旧作業を行っている。例えば河道閉塞が発生した場合、調査段階では地盤が安定しない山間部において、人が直接赴いて被災状況の確認を行う。また、応急復旧段階でも、不安定な地盤の中で、最大で数十名の作業員が、重機を用いながら排水ポンプの設置や仮設排水路の施工を進める。このような状況に対し、本プロジェクトでは、ドローンを用いたセンサの遠隔配備や AI の活用により、遠隔地から状況を確認することが可能なシステムの実現を進めてきた。さらに応急復旧作業では、現場に配置する人員を監督者のみに限定し、作業員 0 人のもとで、無人建設ロボットのみが危険区域に進入して作業を行うシステムの実現に取り組んできた。

これらの研究開発を継続的に進めることで、2050 年までには、自然災害発生時に災害対応にあたる人員の安全を確保しつつ、迅速な対応が可能になると期待できる。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトのテーマは「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」である。具体的には、自然災害発生時に無人で災害環境の情報を取得すると共に、周辺地域への二次被害を防ぐため、対応人員の安全を確保しながら環境変化に柔軟に対応可能な小型協働 AI ロボット群を開発し、河道閉塞災害の応急復旧に資するロボットシステムの構築を目的としている。

2023 年度までの 3 年間は、河道閉塞災害対応システムおよび月面着陸拠点構築を見据えた要素技術の研究開発に取り組み、「1. 土工を革新する AI ロボットシステム」「2. 複数台ロボットの動的協働システム」「3. 現場を俯瞰するセンサポッドシステム」「4. 動的協働 AI ロボット群と Dynamic Synthesis の実証」の 4 項目を設定して、19 の研究開発機関により、要素技術に関する研究開発を進めた。2024 年度以降は、月面着陸拠点に関する研

究を終了し、河道閉塞災害対応を実施可能なシステムのインテグレーションを中心とする方針へ移行した。これに伴い、15 の研究開発機関に再編し、「項目 5:河道閉塞緊急調査のためのシステムインテグレーション」「項目 6:河道閉塞災害応急復旧作業のシステムインテグレーション」「項目 7:河道閉塞災害対応を支える技術」の 3 項目を設定して、研究開発を進めた。以下に、本プロジェクトで開発した緊急調査ならびに応急復旧に関する研究開発概要を紹介する。

本プロジェクトで開発する緊急調査技術は、ドローン空撮で取得する画像／三次元地形情報収集技術、ドローンによる遠隔設置による湛水部の水位/水深調査技術、ドローンによる遠隔設置による地形変位調査技術、河道閉塞崩壊部リスク評価により構成される。さらに、取得されたデータや評価結果を、CECIUM(Cesium GS, Inc.が提供する 3D 地図プラットフォーム、国土交通省の PLATEAU:日本全国の都市デジタルツイン実現プロジェクトにも採用)を用いた情報共有プラットフォーム上に集約するシステムを実現した。これらの調査技術は、過去に河道閉塞災害が発生した中越の芋川ならびに、九州大学に構築した模擬河道閉塞フィールドにて実証実験を行うことで、TRL5(Technology Readiness Level 5:模擬的な環境下における機能・性能の実証)の達成を確認した。

本プロジェクトで開発する応急復旧技術は、災害環境において遠隔から作業を行うための「デジタルツイン」を実現するセンサポッドの開発ならびにセンサ設置技術、排水ポンプの遠隔設置技術から構成される。河道閉塞環境では、天然ダムの越流によって生ずる土石流を防止するため、上流の湛水部から下流側への速やかな水の移動が求められる。ただし、対象とする河道閉塞は山岳地帯で発生することが多く、ヘリコプターによる建設機械の運搬重量には制限が存在する。そこで、本プロジェクトでは、複数小型建設ロボットを活用した、センサ設置や排水ポンプの設置を実現するロボットシステムの開発を進めてきた。開発したプロトタイプシステムの検証は、九州大学に構築した模擬河道閉塞フィールドにて実施し、動作確認を行うことで、TRL5 を達成した。

以上の成果により、自然災害環境に柔軟に対応し、応急復旧を実施可能な、自然災害対応に資するロボット技術の発展に貢献した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

本プロジェクトは、令和 2 年 12 月、永谷 PM の下で、東京大学を中心に 4 つの研究開発機関でスタートし、令和 3 年 4 月より、全 19 の研究開発機関で研究開発が進められた。この中で、運営会議、PM サイトビジット、タスクフォース(TF)会議を継続して開催した。特に TF 会議は、各研究開発機関の進捗把握を目的とし、7 つに分けたグループがそれぞれ、月 1 回 90 分程度の会議を実施することで、進捗の可視化と、各研究開発機関の間の課題共有を実現した。令和 6 年度には、方針変更に伴い、15 の研究開発機関にプロジェクトの構成を再編し、システムインテグレーションに関する研究開発を進めた。令和 6 年度半ばには、スイス工科大学チューリッヒ校(Prof. Katzschmann)の研究グループが研究開発機関として加わり、革新的な土工作業の実現を目指した研究を実施した。

なお、5 年間の全体を通し、研究資金の効果的かつ効率的な活用、広報・アウトリーチ活動、データマネジメントに関する取り組みについても着実に実施することができた。

2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:(土工を革新するAIロボットシステム)

当該研究開発項目の概要:

土工を革新する協働 AI ロボットのハードウェアやシステムを実現するため、開いた設計を体系化し、これに基づいた革新的な技術を開発する。この技術は、革新的な土工作業に関する技術と革新的なロボット移動に関する技術に分類される。これらの技術を個別に開発した後、協働 AI ロボットのプラットフォームに統合する。なお、本プロジェクトにおいて対象とする河道閉塞対応ならびに、月面着陸拠点構築については、それぞれの課題に対応したシステムが必要となるため、これらのシステム開発についても並行して行う。この研究開発項目 1 の研究開発課題とその構成要素を図 1 に示す。

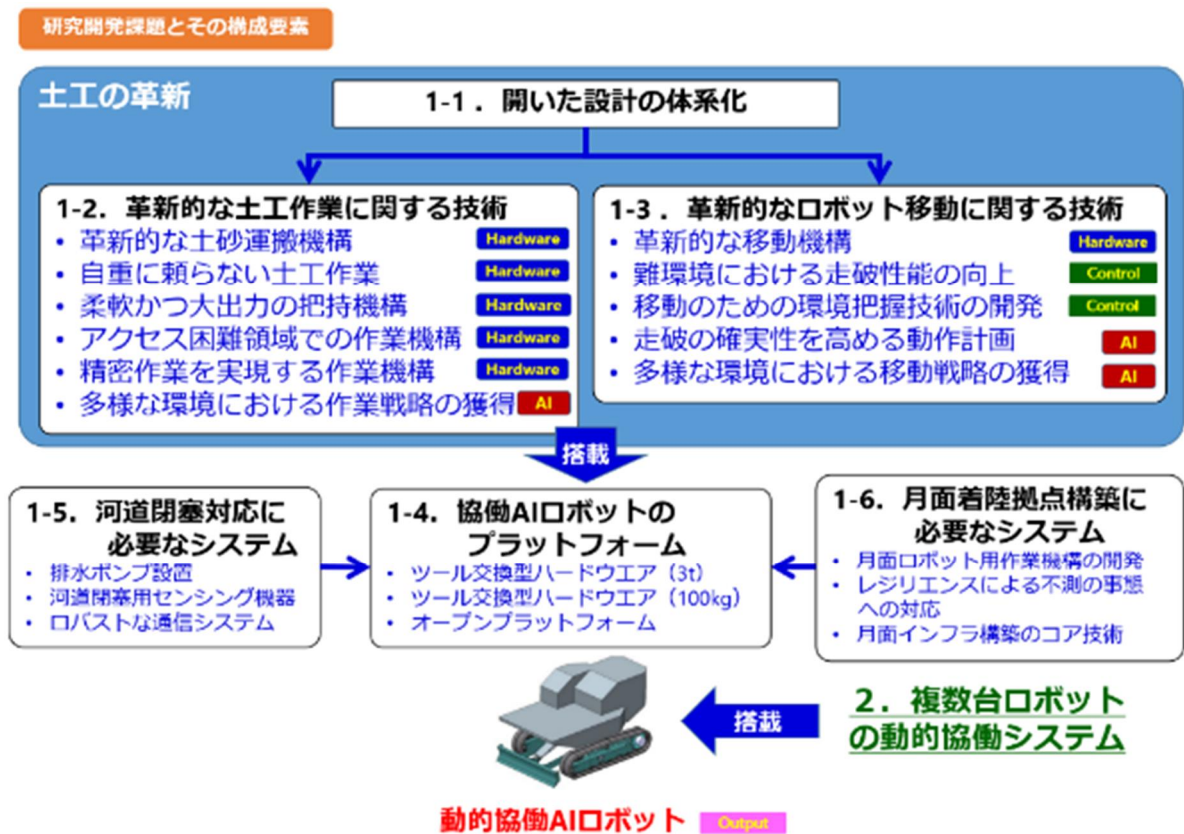


図 1 土工を革新する AI ロボットシステムの研究開発課題とその構成要素

研究開発課題 1-1:開いた設計の体系化

課題推進者:大須賀公一(大阪大学大学院工学研究科)

実施内容:

本研究開発課題では、「立ち往生しない土工機」を如何に設計するか、という点について体系化を行った。想定される技術課題は「想定環境が無限定(行ってみないとわからない)である」「汎用大型建機が行けない」「軟弱地盤が支配的」の3つである。そのうち特に「無限定環境」で立ち往生することなく移動できる機械を如何にして設計するか、が「開いた設計」に直接関わる。ここで「開いた設計」とは、図 2 に示すように、「境界条件があらかじめ閉じられていない設計問題を如何に解くか」という設計問題である。大阪大学 大須賀PI グループでは、「陰陽制御」と「多義性」を考えることで、「開いた設計」をより具体的に体系化することを目指しており、当初の思惑通りの結果が得られた。具体的には、望ましい「陰的制御」が生まれるための考え方を生み出した。

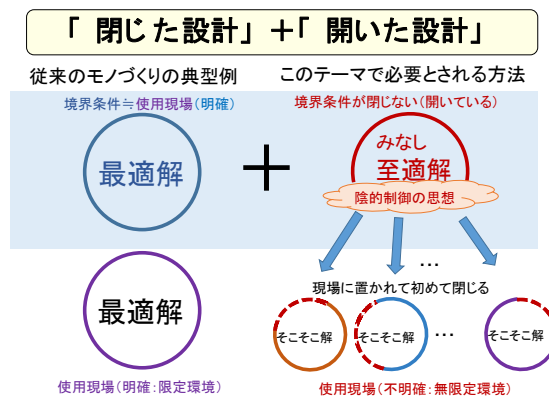


図 2:閉じた設計と開いた設計

「開いた設計」において大切な点は、対峙する相手が無限定環境であるという点で、その「無限定性」をどのように捉えてこちらの味方につけるかという所にある。そのときの感覚は、「環境に抵抗感を感じさせず、知らず知らずの内にこちらの意のままに操られている(変形させられている)」というものである。すなわち、「環境と闘わず渾然一体化することで味方につける」という思想である。より具体的には、境界条件が現場に行かないと閉じないのであれば、その対象物が置かれる未知環境に馴染む身体を考えておき、現場の環境とのやりとりは身体に任せるつもりになる、という設計方針が重要である。この「現場にまかせる」考え方が「開いた設計」に通ずる(図 3)。

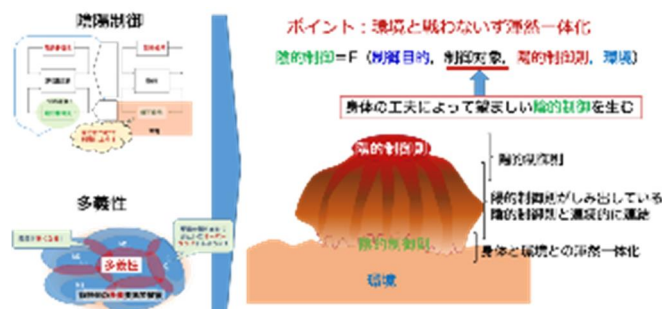


図 3:開いた設計の一つの姿

研究開発課題 1-2:革新的な土工作業に関する技術

課題推進者: 大須賀公一(大阪大学大学院工学研究科)

鈴森康一 (東京工業大学 工学院)

松原崇充 (奈良先端科学技術大学院大学)

杉浦恒 (ヤンマーホールディングス株式会社)

実施内容:

大阪大学 大須賀 PI グループでは、当該期間を通じて、「研究開発課題 1-1:開いた設計」の考え方にに基づき、以下の4つのテーマを実施した。

- (1) 水を吸い上げる :i-CentiPot-Hose シリーズ
- (2) 土に根を張る :Root-Anchor
- (3) 土・水を取り込む :土喰らい・水喰らい
- (4) 土を投げて運ぶ :Throwing-Robot

以下に、(1)河道閉塞対応用移動型ホースロボットに関する詳細を示す。

本研究開発テーマでは、不整地においてホース敷設を行う機構について、令和 3 年度に、概念設計した原理検証用モデル(2 種類)から発展させた原理検証用試作機(i-CentiPot-Hose)を開発し、令和 4 年度には、i-CentiPot-Hose 試作機に加え、より発展させたホース敷設ロボット i-CentiPot-Hose-Ammonite の概念設計ならびにプロトタイプを用いた原理検証実験を行った。i-CentiPot Hose Ammonite プロトタイプ原理検証実験では、先頭車両による牽引とホースを根本のブロワーによる空気流で、蛇腹ホースの収縮と伸展を行った。令和 5 年度には、上記の原理検証モデルの検証結果をもとに、i-CentiPot Hose Ammonite の試作機を開発し、九大デモフィールド内での実験を行った(図 4)。実験では、先頭車両と根本のブロワーから送られる空気圧によりそれぞれ約 10m のホースを左右に展開することで、デモフィールド内の 2 つの溜め池を結ぶことに成功した。この結果から、提案ロボットのホース自動展開動作の妥当性を示した。



図 4:i-CentiPot Hose Ammonite 試作機のホース伸展実験の様子

東京科学大学(東京工業大学)鈴森 PI グループでは、当該期間を通じて、以下の4つのテーマを実施した。

- (1) ゾウ鼻型パワーソフトロボット
- (2) 絡みつきグリッパ

(3) 化学繊維ロープを用いた協調リール型ロボット

(4) インパクト駆動装置

ここでは、(2) 絡みつきグリップに関する詳細を示す。

建設ロボットの先端に取り付けるグリップとして、空気圧で動作する**絡みつきグリップ**を開発し、その効果を確認した。絡みつきグリップは、ホース状のゴムチューブの内部に板バネを挿入し、空気加圧時にはまっすぐに伸び、空気を抜いた状態ではコイル状に巻き付く。グリップの一部が周囲の物体に触れるとその周りに巻き付くように動作するので、様々な形状のものを把持することができる。さらにこのグリップを、協働 AI ロボットのプラットフォームに搭載して、模擬倒木や模擬コンクリート片を把持し、その有用性を示した。



図 5 絡みつきグリップの外観及び機構

ヤンマー 杉浦 PI グループでは、当該期間を通じて、協働 AI ロボット(CAFE)と接続可能な作業ツールの設計、開発を行った。当該期間に開発した協働 AI ロボットのプロトタイプは、ベース部分と作業アーム(ヤンマーツール)から構成されている。研究開発課題 1-2 におけるヤンマーの担当は、SEA (Series Elastic Actuator) 搭載の力制御可能なツールの開発である。ツール先端における力のいなし、ならいを実現しつつ、重量やサイズを抑えるために、影響が大きい根本のアーム関節とブーム関節に SEA を搭載した。また、従来の油圧機構で見られる直動型のシリンダではなく、回転関節を用いることで軽量化やコンパクト化を図っている。これにより、特にアーム関節の動作範囲が大幅に広がり、従来のバックホウでは実現できなかった姿勢がとることができ、例えば屋内作業において高所での作業が可能になる。また、関節型アクチュエータにすることにより、関節の位置はこれまでのシリンダ型の場合、そのストロークなどで配置に制限があったが、回転型を用いることでその制限が緩和されるほか、ツール先端で出すことができる力が姿勢によって大きく変わることがない特徴もある。

奈良先端科学技術大学院大学 松原 PI グループでは、当該期間を通じて、以下の 2 つのテーマを実施した。

(1) Cyber-physical 土工作业実験環境の構築

(2) ドメインランダム化による行動戦略学習手法の開発

ここでは、(2)ドメインランダム化による行動戦略学習手法の開発に関する詳細を示す。

臨機応変な土工作業戦略の獲得に適した学習手法の実現に向けて、①部分観測性に基づく模倣学習、②部分観測性に基づく強化学習、および③ドメインランダム化分布の能動学習、に関する研究開発を実施した。対象作業として、土砂に埋もれた形状・サイズ・重量の異なる岩石を取り除く岩石除去タスクを設計した。このタスクを用いて、開発した模倣学習および強化学習手法の実験評価を実施した。

部分観測性に基づく模倣学習による方策学習：部分観測性の高い土工作業に適用可能な模倣学習手法を開発した。提案手法は、不確実環境下におけるオペレータの振る舞いを、非タスク指向の探索とタスク指向の行動との切り替えによってモデル化し、観測系列を用いた状態推定器に基づくタスク指向行動方策および非タスク指向の探索方策に切り替えるモードスイッチング方策を同時に模倣学習する。

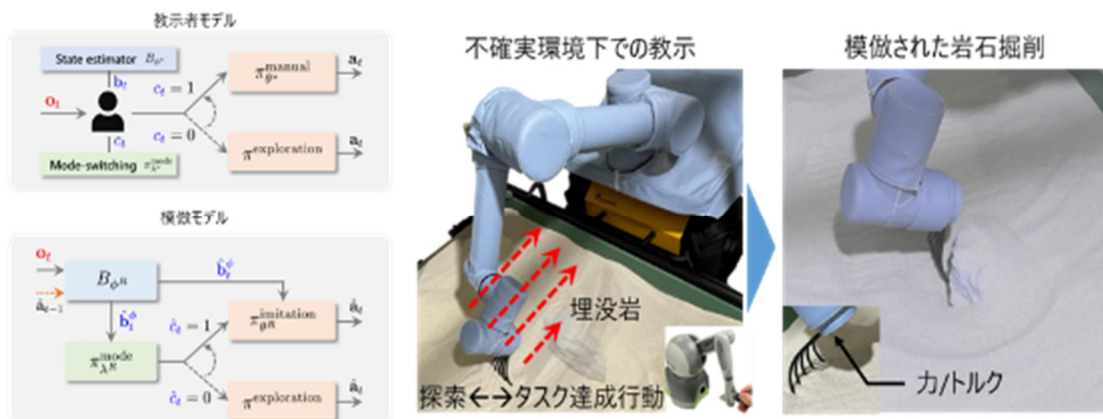


図 6: 部分観測性に基づく模倣学習の枠組み(左)と岩石掘削作業実験の様子(右)

部分観測性に基づくドメインランダム化強化学習による方策学習：部分観測性を持つ土工作業に適用可能なドメインランダム化強化学習手法として循環方策蒸留を開発した。提案手法では、部分観測性への対処として、過去の観測から状態を近似復元可能な LSTM 方策モデルを用いる。ドメインランダム化強化学習では、シミュレーションと実環境のモデル化誤差に頑健な方策を獲得するために、シミュレーションパラメータをランダム化しながら学習を行う。しかし、土工作業シミュレーションの場合、ドメインパラメータの次元数が高くランダム化範囲も広いため、適用する環境のパターンが増加し、方策パラメータの勾配推定が不安定化する課題がある。その解決への着想として、提案法ではドメインを多数のサブドメインに分割して扱うドメイン分解のアプローチを採用し、各サブドメインを循環し知識共有をしながら効率よく学習を行う。様々なシミュレーション環境にて提案法の性能を検証した結果、従来手法と比べて高いサンプル効率および安定性を有することを確認した。

ドメインランダム化強化学習におけるランダム化分布の能動学習：ドメインランダム化強化学習において、ランダム化分布は人手で設計する必要があり、その設定は獲得される方策の性能および頑健性に強く影響する。そこで、実環境データを収集し、物理シミュレーションのパラメータの事後分布を推定して、ドメインランダム化強化学習のランダム化分布として利用する枠組みを検討した。

研究開発課題 1-3:革新的なロボット移動に関する技術

課題推進者: 大須賀公一 / 大阪大学大学院工学研究科
永谷圭司 / 東京大学 大学院工学系研究科
高橋弘 / 東北大学 大学院環境科学研究科
松原崇充 / 奈良先端科学技術大学院大学

実施内容:

大阪大学 大須賀 PI グループでは、「研究開発課題 1-1:開いた設計」の考え方に基づき、以下の6つのテーマを実施した。

1. 双胴柔軟クローラ : d-FlexCraw(double-Flexible-Crawler)
2. 全方位球脚移動機構 : K3 (KyuKyaKu)
3. 水陸両用型柔軟多脚ロボット : i-CentiPot-Amphibian Jr.
4. 超長尺柔軟多脚ロボット : 龍宮の遣い
5. 非接触防水防塵コネクタ : d-Connector (dream-Connector)
6. 災害対応ロボット運搬用コンテナシステム: BENKEI

ここでは、双胴柔軟クローラ“d-FlexCraw”について詳細を示す。

本研究開発テーマでは、当該年度マイルストーンのうち、「開いた設計」に基づく柔軟な移動機構として、自身が柔軟に変形可能なクローラを二つ連結した双胴柔軟クローラ d-FlexCraw の開発および改良を行った。自然災害現場に代表されるような不整地における対応では、柔軟な活動が求められる。その不整地は、凹凸や軟弱地盤が予想されるだけでなく、時々刻々と環境が変化する「無限定環境」である。そのような「無限定環境」を踏破するための移動ロボットとして、d-FlexCraw は従来のクローラ機構とは異なり、履帯自体が能動的にピッチ、ヨー方向に湾曲可能な機構となっている。ピッチ方向には4つ、ヨー方向には6つの関節を持ち、上下に最大±60度、左右に最大±90度の屈曲が可能である。d-FlexCraw は左右二つの柔軟履帯と中央のコントロールボックス部分から構成されている。各柔軟履帯には履帯回転用のモータが二つ、上下左右屈曲用のモータがそれぞれ一つずつ、合計4つのDCモータが搭載されている。また各関節には関節角度計測用のポテンシオメータが搭載されており、屈曲時の姿勢を計測可能である。

d-FlexCraw の屋外走行実験の様子を図7に示す。実験場所は大阪大学吹田キャンパス内であり、屋外においても砂礫等が嵌合することなく走行可能であることを確認した。



図 7: d-FlexCraw 屋外走行実験の実施状況

東京大学 永谷 PI グループでは、軟弱地盤や凹凸のある難環境において、クローラ機構の走破性能を向上させるための革新的なロボット移動に関する技術を担当する。具体的には、当該期間中は、(1)単クローラの屋内走行実験による解析と難環境走行手法の考案と検証、(2)クローラキャリアダンプの自律化を実施した。ここでは、単クローラの屋内走行実験による解析と難環境走行手法の考案と検証を示す。

屋内走行実験用として、CuboRex 製 汎用クローラユニット「CuGoV2」をベースに改良を行った。また、模擬環境として、軟弱斜面装置を製作した。この装置は、上部のコンテナに土砂(真砂土)が入っており、この上でロボットを走行させる(図 8 右)。



図 8: 模擬障害物(左)と走行後のクローラと地面の様子(右)

次に、この実験装置を用いて走行実験を実施した。最初の段階として、斜度を変えながら、模擬軟弱地盤上で、断面が直径 32 mm の円形の障害物をクローラロボットに乗越えさせ、その挙動を観察した。斜度が 0 度(水平)の場合は、障害物がある場合もない場合も滑りなく走行することが確認できた。一方で、斜度が 20 度になると、障害物がなければ滑りなく走行できるものの、障害物を乗り越えることはできなかった。これは、障害物が斜面上を転がり落ちてくることに加え、クローラが前進できずに、(図 8 右)に示すように、後端で地面を掘り返して沈下してしまい、乗越えが難しい状況になるためである。さらに角度を上げて、斜度を 30 度にすると、障害物がなくても滑りが生じ、実際の走行速度が低下する。また、障害物があると、斜度 20 度の場合と同様に、障害物が転がり、かつ、クローラが地面に沈下し、乗越えることができなかった。以上の結果から、軟弱斜面、かつ、特に斜面上を動きやすい、円形の障害物がある環境は、走行が容易ではないことが分かった。

東北大学 高橋 PI グループでは、以下の 5 つのテーマを実施した。

- (1) バケット・ブレードに作用する地盤反力の取得と地盤強度推定
- (2) クローラの走行・旋回抵抗を用いた地盤定数・強度推定
- (3) フィールド掘削実験
- (4) コーン自由落下試験における衝撃加速度による地盤強度推定に関する研究
- (5) 走破の確実性を高める動作計画

ここでは、バケット・ブレードに作用する地盤反力の取得と地盤強度推定について述べる。

本研究開発テーマの最終目的は、バケットおよびブレードなどの作業ツールにより地盤

を掘削した際の地盤反力(掘削抵抗力)から地盤強度(コーン指数)を推定する手法の確立である。これまでの研究では、砂質土地盤を対象としたコーン指数推定手法を導出するとともに、粘性土地盤を対象とした平均掘削抵抗力とコーン指数の関係を考察した。

砂質土地盤をバケットで掘削した場合、特にせん断破壊が生じるような掘削では、掘削抵抗力は波打つ波形を示すことから、①波の数 n 、③波の傾き α 、④平均掘削抵抗力 F_{ave} の3つのパラメータを用いて重回帰分析により、コーン指数 q_c の推定式を得た。

$$q_c = 1010n^{-0.28}F_{ave}^{0.21}\alpha^{0.66} \quad (1)$$

コーン指数 q_c の実測値と式(1)による推定値を比較した結果、砂質土の種類に関わらず $\pm 50\%$ の精度でコーン指数を推定できることが分かった。なお、コーン指数を走行可否の判断基準になる 400kN/m^2 以上と 400kN/m^2 以下の2つに分類し、それぞれの範囲でコーン指数推定式の導出を行った場合、図9に示すように推定精度が $\pm 30\%$ に向上することが確かめられた。

一方、ブレード掘削に関しては、粒径パラメータを導入し、精度の向上を試みた。試行錯誤の結果、 $F_{ave} \cdot n$ に D_{50}/D_{30} を乗じたパラメータを用いた場合、最も精度が良くなることが確認された。得られた近似式を式(2)に示す。

$$q_c = -0.0025[F_{ave} \cdot n \cdot (D_{50}/D_{30})]^2 + 3.71F_{ave} \cdot n \cdot (D_{50}/D_{30}) \quad (2)$$

コーン指数の実測値と式(2)から推定される推定値との比較を図9に示す。式(2)を用いれば、コーン指数を $\pm 30\%$ の精度で推定できることが分かる。ただし、式(2)は粒度という粒子の物性値を用いているため、式(2)からコーン指数を推定するためには、予め粒子の物性値を知る必要がある。今後、粒子の物性値を必要とせず、かつ精度の高い推定式について検討する予定である。

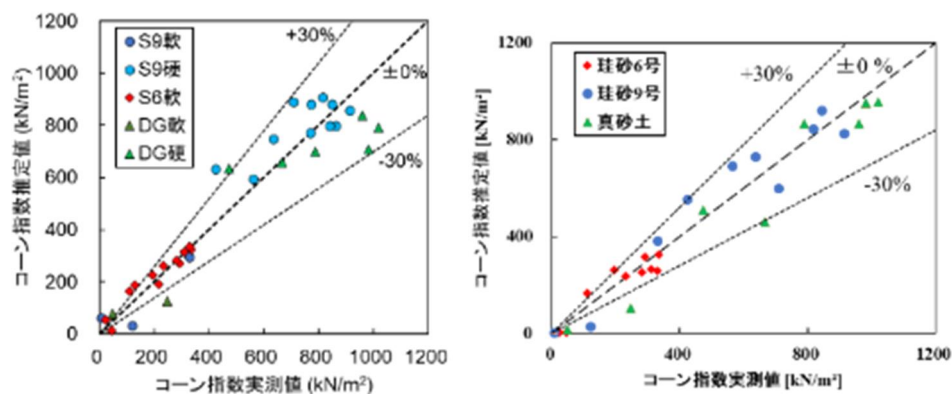


図9 400kN/m² で場合分けした際のコーン指数の実測値と推定値との比較(バケット掘削)(左)とコーン指数の実測値と式(2)から推定される推定値との比較(ブレード掘削)(右)

奈良先端科学技術大学院大学 松原PIグループでは、Cyber-physical 移動実験環境の構築を行い、開発した土作業戦略の学習手法をベースとした移動戦略の学習手法を開発した。また、長期作業の戦略を効率よく学習できる仕組みとして、Coarse2Fine 戦略の構造を取り入れた模倣学習手法の枠組みを開発した。

研究開発課題 1-4:協働 AI ロボットのプラットフォーム

課題推進者: 杉浦恒 (ヤンマーホールディングス株式会社)
石上玄也 (慶應義塾大学 理工学部)
橋本毅 (土木研究所 つくば中央研究所技術推進本部)

実施内容:

ヤンマー 杉浦 PI グループでは、当該期間を通じて、協働 AI ロボット(CAFE)のベース部分の設計、開発を行った。研究開発課題 1-2 で述べた通り、当該期間に開発した協働 AI ロボット(CAFE)のプロトタイプは、ベース部分と作業アーム(ヤンマーツール)から構成されている。SEA (Series Elastic Actuator) 搭載の力制御可能なヤンマーツールの開発については研究開発課題 1-2 にて説明を行っているため、ここでは主に、研究開発課題 1-4 におけるヤンマーの担当であるベース部分および東工大が開発したツールとの交換機能について、以下に説明する。



図 10:協働 AI ロボット プロトタイプ ベース部分(実機)の外観と内部構造

図 10 は、協働 AI ロボット プロトタイプ ベース部分である。このベースは、走行モータ、旋回モータ、ブレードシリンダを有し、それぞれのアクチュエータは油圧駆動する。油圧ポンプは電動モータによって駆動され、インバータによって回転数制御が行われる。エネルギー源としてリチウムイオンバッテリーを搭載しており、各部への供給やプリチャージ等のリレー回路実装のために強電系ジャンクションボックスを有している。また、ヤンマー内で動作確認を行うため、無線リモコンによって遠隔操作が可能なシステムとなっている。

さらに、協働 AI ロボットプロトタイプの制御システムについては、土木研究所 橋本 PI 担当の COM3 から動作指令を受信し、Vehicle Motion Controller が各下位コントローラに対して HUB Controller を介して操作指令を送信する構成としている。ヤンマー内で単独で動作確認を実施する場合は、操縦リモコンの操作指令が直接 Vehicle Motion Controller に入力される。

慶應義塾大学 石上 PI グループでは、まず月面着陸拠点の構築シナリオの検討に着手した。シナリオ策定においては、インフラ構築に必要な協働 AI ロボット(ツール交換型ハードウェア(100 kg))として、月面への輸送コストが抑制可能な小型軽量ロボットを前提とし、同ロボットを用いたその場での土質情報の獲得および土工作业に主眼を置いたシ

ナリオを設定した。本設定においては、アルテミス計画文書ならびに関連文書・論文を再度点検し、これらシナリオの作業を実現可能なロボットプラットフォームのシステム要求を定量化した。具体的には直径 50 m の作業領域における土質調査や土工作业が可能であること、さらにロボットのサイズを 1 立方メートル以内・重量 50 kg とした設定した(以降、小型ロボットプラットフォームと呼称する)。

次に、これら仕様要求に基づいた小型ロボットプラットフォームとして、四輪駆動、四輪操舵、多軸アクティブサスペンションを有する機構による全方向移動ロボットを開発した(図 11)。ロボット本体中央には、土質・土工ツールが取り付け可能なアタッチメントスペースを有している。令和 5 年には、JAXA 探査フィールドにおける同プラットフォームの全方向移動、アクティブサスペンションによる重心移動、障害物乗り越え、登坂試験などの一連のロボット動作性能を確認する走行試験、ならびに研究開発課題 1-6 にて開発した調査ツール試作機を搭載した移動調査試験を実施した。

令和 5 年度までに、過年度までに開発した小型ロボットプラットフォームを用いた調査・土工作业について、締結機構を用いたツール搭載、協働作業方式の考案に取り組んだ。具体的には当該年度四半期ごとにサクセスレベルを設け、ミニマムサクセスとして、調査・土工作业のロボットマニュアル操作による実施(第 1 四半期達成)、フルサクセスとして自動巡回調査と土工作业の実施(第 2 四半期達成)、エクストラサクセスとして情報量最大化を目指した自律的な移動調査と土工作业の自動制御(第 3 四半期に達成)にそれぞれ取り組んだ。



図 11 月面用の小型ロボットプラットフォーム

土木研究所 橋本 PI グループでは、当該期間中、(1)オープンミドルウェアの開発、ならびに (2)シミュレータの開発のテーマを担当した。ここでは、特にオープンミドルウェアの開発について記す。

本プロジェクトのように、建設機械をベースとした様々なハードウェアおよびソフトウェアの開発が各課題推進者により行われる場合、各研究開発を各課題推進者が個別に独自のシステムで行うよりも、共通のミドルウェアを用いて、それに基づいた開発を行っていくことが、成果物の再利用性確保や、開発の手戻り削減の観点から望ましい。このことから土木研究所では、本プロジェクトで横断的に活用することが可能な「オープンミドルウェア」の開発を行った。このミドルウェアは、令和 5 年度、複数台の既存建設機械による協調作業を実装し、土木研究所構内の試験場にて、土砂の掘削・積込み・運搬・放土を自動で行わせる実験を行った。これにより、開発したオープンミドルウェアが、既存建設機械に実装でき、自動運転用のアプリケーション開発が可能なことを確認した。

研究開発課題 1-5:河道閉塞対応に必要なシステム

課題推進者： 北原成郎 (株式会社 熊谷組 土木事業本部)
 島田徹 (国際航業株式会社 公共コンサルタント事業部 国土保全部)
 羽田靖史 (工学院大学 工学部)

実施内容：

熊谷組 北原 PI グループでは、当該期間を通じて、以下の 5 つのテーマを実施した。

- (1) 全体システム構成の設計
- (2) 排水ポンプ設置機器【水中バックホウ】の設計・製作
- (3) 養生マット敷設、ホースおよび発電機設置機器【クローラキャリア】の制作
- (4) 排水ポンプ設置システムの開発および要素技術の評価【技術研究所内試験】
- (5) 排水ポンプ設置システムの改良

以下に、(1) 全体システム構成の設計、(4) 排水ポンプ設置システムの開発を記す。

河道閉塞(天然ダム)に対応するロボットシステムとして、現実的かつ実効性の高い全体システムを設計するため、全体システム構成について、研究開発期間の全体を通して、検討・設計・見直しを繰り返す事で有効な災害対応技術の開発を目指してきた。特に、本テーマでは、河道閉塞に対応できるハードウェア技術を獲得することを目的とし、開発バックホウの規格構成を決定し、ベースマシンの選定・遠隔施工への適用に向けた改造を行った。図 12 に、要素技術を実証する熊谷組フィールドでの実施イメージを記す。

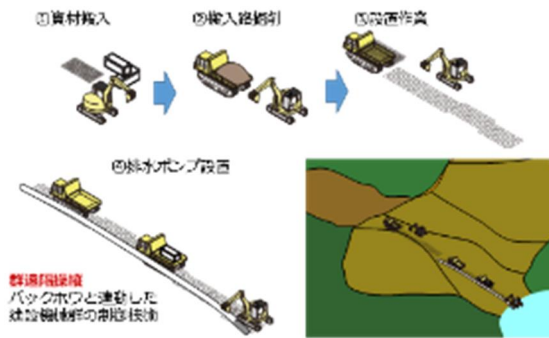


図 12 要素技術を実証する熊谷組フィールドでの実施イメージ

国際航業 島田 PI グループでは、検討した河道閉塞対策シナリオを基に、センシング機器(センサポッド)で取得する計測事項を検討(表 1)し、センシング機器試作機の開発ならびに、現地実証実験を行った。ここでは、開発したセンシング機器について述べる。

表 1:センシング機器(センサポッド)で取得する計測事項

項目	計測事項	計測方法(案)
災害環境全体の把握	閉塞部形状	ドローン空撮及びSfM、LIDAR計測
災害環境のモニタリング	閉塞部の変状 小規模崩壊	LIDARやカメラによる堤体(斜面)監視
	湛水位、水深	水深計測可能な新規開発デバイス LIDARやカメラによる水面標高監視

河道閉塞用の遠隔配備可能(小型・重量 4Kg 程度)なセンサポッドとして、水文観測用センサポッド(水位計測用デバイス)と②地形計測用センサポッドを製作した。本センサポッドは、河道閉塞上流の湛水地に投入して水深を計測する複数台の子機と、子機からの情報の集約と安全な観測拠点との長距離通信を担う親機からなり、これらをドローンで運搬、水面に設置する構成とした。令和 5 年度には、実際に水深計測を行う子機について、東京大学 永谷 PI グループと共同で、実現場に適用できる形に発展させた。

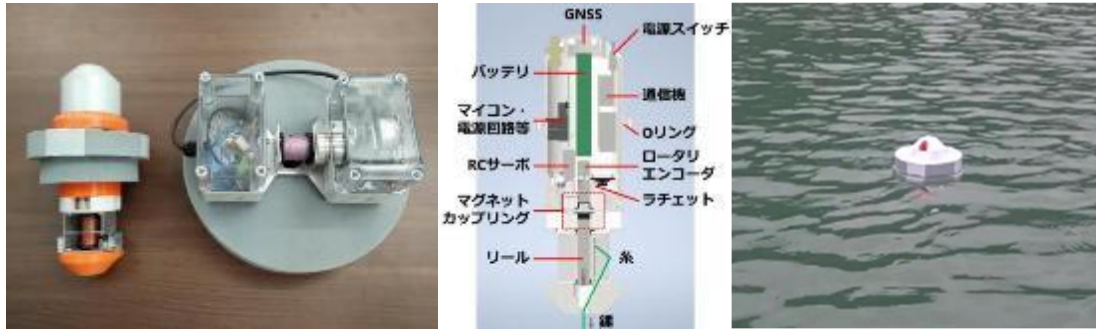


図 13 センシングデバイス概観 (左)、デバイスの構成 (中)、デバイスの計測の様子 (右)

地形計測用センサポッド試作機は、なるべく広角の計測を可能とするため雲台上に設置し、その他補足情報として魚眼カメラと GPS アンテナを配置した。また、制御用の CPU として Raspberry Pi 4 を使用した。



図 14: 地形計測用センサポッド試作機の外観(1 軸横回転型雲台)

上記の実証実験として、水深計測用センサポッドと同様に、二瀬ダムの上流域にて、令和 4 年 10 月 16 日に実施した。実験の結果、送信する地形データ量を圧縮し、通信負荷を軽減する必要があることや 複数のセンサポッドを合理的に配置し、漏れなく地形を計測することが課題として抽出された。また、電源・配線のスマート化を目的とし、基盤化による配線の削減やバッテリーとの一体化を行った。

工学院大学 羽田 PI グループでは、情報通信インフラシステムを活用し、河道閉塞への対応を行うためのシステムを構築することを目的とし、具体的には、長距離通信、大容量通信、全体通信から構成し、通信を実現するための無線機・アンテナ・電源・制御用コン

コンピュータ・設置機構などからなるロバスト通信システムの試作を進めることで、実際の状況においても信頼性の高い通信が行えることを確認した。また、そのシステムの配置位置を計画する手法についても研究した。河道閉塞時においても通信を確立するためには、適切な位置に機器を設置する必要がある。そこで、ドローンで取得した地形情報や通信の要件を考慮し、最適な通信機の位置を決定する手法を開発した。本研究により、河道閉塞への迅速な対応を支援するためのロバストな通信システムの試作と配置計画手法の開発が実現した。これにより、土工における課題解決の一環として、より効率的かつ信頼性の高い通信環境を確保できると期待される。

本研究開発で検討した無線通信方式とその得失について評価を行った(表 2)。すべての用途について万能な無線通信方式はなく、災害対応フローとそこで利用される機器の要求仕様に応じて複数の通信システムを組み合わせ、通信システム構築を行う必要がある。災害対応フローの各段階に対応した無線通信システムを下記に示す。

表 2:本研究開発で検討・利用した無線通信

	2.4GHz 無線LAN	5GHz 無線LAN	5.7GHz ロゴ無線	LPWA	STARLINK	旧来の 衛星通信	920MHz特 定小電力	4G(LTE) 携帯回線	5G 携帯回線	IEEE802.1 1ah
距離	100m	100m	5km	10km	550km	36000km	1km	5km	100m	1km
遅延	数msec	数msec	数msec	1秒～	数10msec	1秒～	数msec	数10msec	数msec	数msec
干渉	大	中	小	小	小	小	小	中	小	小
断絶				アリ	アリ	アリ				
通信量	1Gbps	1Gbps	30Mbps	100bps	100Mbps	100Mbps	100kbps	1Gbps	10Gbps	1Mbps
IP対応	対応	対応	対応	なし	対応	対応	なし	対応	対応	対応
価格	10k	10k	1000k	10k	50k	1000k	10k	10k	10k	10k
自営/公衆	自営	自営	自営	自営/公衆	公衆	公衆	自営	公衆	自営/公衆	自営
						青…良 黄…並 茶…劣				数値はオーダー(概算)

- ドローン等による緊急調査のための通信(発災後 0 日～)
 - インフラ不要だが低速、上空撮影のみ
 - 通信距離 :2-5km 以上
 - 推奨周波数:169MHz、5.7GHz
- モニタリング、搬入・準備のための通信(発災後 2, 3 日～)
 - インフラがない中での低速通信での仮設工事
 - 通信距離 :1km～2km
 - 推奨周波数:920MHz、衛星通信
- 土木工事のためのネットワーク(発災後 7 日～)
 - インフラが整ったフルスペック高速通信
 - 通信距離 :2km 以上
 - 推奨周波数:5/6GHz、5G 携帯電話網、光ケーブル

研究開発課題 1-6: 月面着陸拠点構築に必要なシステム

課題推進者: 石上玄也 (慶應義塾大学 理工学部)
永岡健司 (九州工業大学 工学部)
上野宗孝 (宇宙航空研究開発機構 宇宙探査イノベーションハブ)

実施内容:

慶應義塾大学 石上 PI グループでは、本研究開始時において、国際誌の文献調査と関連技術のトレードオフに基づいて、月面土工に必要なシステムとして、現地の不確定な土質環境をその場で調査できること、また月面に適した土工作業として、エネルギー効率と土工量の観点から、主に排土と転圧締固めという2つの方式に特化することとした。

まず調査ツールとして、Resistive Force Theory (RFT) という比較的新しい接触力学モデルを援用し、土質の硬さ相当を計測できる調査ツールを開発した。さらに、実験室レベルでの試験検証による動作性能の確認を経て、JAXA 探査フィールドにおいて、同ツールを搭載した小型ロボットプラットフォームによる土質調査実験を達成した。また、排土作業に関し、排土距離と排土深さに対する排土効率の定量的特性を明らかにした。さらに、転圧作業については、転圧ローラ形状による締固め時のけん引負荷、沈下量の差異を実験的に確認し、転圧押し付け力に加え回転制御も必要であることが明らかとなった。

次に、実際に小型ロボットプラットフォームに搭載可能な調査ツール、排土ツール、転圧ツールの開発をおこなうとともに、研究開発課題 1-4 において開発した締結機構を用いて、小型ロボットプラットフォームへの搭載を完了した。調査ツールを搭載した小型ロボットプラットフォームによる土質調査については、ソフトウェアの改良により、土質機械パラメータを「その場・高信頼性・ロボット搭載状態」にて同定可能となり、さらに自動移動調査機能の実装も達成した。排土ツール搭載ロボットにおいては、昇降機構付き排土ツールを第3四半期において完成させ、排土ツール上部にステレオカメラを搭載し、逐次土工状態を計測できるようにした。さらに、四輪駆動ロボット車両へ同ツールを搭載し JAXA フィールド試験で動作確認を行った。転圧ツールについては、第4四半期において開発を完了し、締結機構を用いて小型ロボットプラットフォームに同ツールを装着させ、JAXA フィールド試験での動作確認を達成した。更に、土質情報の最大化を目的とした調査戦略手法の構築に取り組んでおり、ロボット搭載カメラによる地形分類・土質硬さの推論モデルを設定し、それぞれの確率分布から相互情報量を算出するアルゴリズムを開発した。



図 15: 左) 土質調査ツール搭載ロボットプラットフォーム、中) 昇降制御付き排土ツール開発と実機実装、右) 押し付け制御付き転圧ツールおよび小型プラットフォームへの実装

九州工業大学 永岡 PI グループでは、月面インフラ構築のための小型協働 AI ロボットの研究開発に向けて、利用可能なリソースが極めて限られた月面土工ロボットシステムに生じる不測の事態において、内外的な環境変化に順応して動作継続を可能とし、ミッション（タスク）を成し遂げるためのミッション・レジリエンス技術の実現を目指してきた。特に、ミッション・レジリエンスを誘導する知能としての正常と異常を判別する処理系、ミッション・レジリエンスを発揮する機構・構造としてのシンプルかつ適応的な機構・構造系を融合することで、ミッション・レジリエンス技術の開発を進めてきた。具体的には、ロボット単体でのタスク実行として発揮する (i) 機能レジリエンスと、複数台ロボットでのタスク実行として発揮する (ii) システムレジリエンスの実現を目標に定め、開発・評価・実証を進めてきた。以下に、機能レジリエンスを発揮するロボットプロトタイプの開発について記述する。

レジリエンスを発揮するロボットプロトタイプは、慶應義塾大学 石上 PI のグループで基本設計された月面土工ロボットモデル M3 Rover を共通プラットフォームとして、設計開発をおこなった。本ロボットは脚車輪型であり、本体に平行リンク型のアクティブサスペンション機構を有し、車輪を放射状に4つ配置した構造である。各車輪には回転駆動とステアリング駆動のアクチュエータがそれぞれ配置されており、アクティブサスペンションを含めて、合計 12 自由度を有し、重量は約 60kg である。ステアリング角を制御することで、本ロボットは全方向移動が可能である。これらの多自由度なアクチュエータを制御することで、直進、ステアリング走行、超信地旋回（その場旋回）、屈伸運動、Pivot 走行、インチング走行が実現できる。本ロボットプロトタイプに対し、機能レジリエンスを発揮するシンプルな機構・構造として、ワンウェイクラッチ機構を導入した(図 16)。これは、月面土工ロボットに想定される主要な内的環境変化である、車輪の回転駆動アクチュエータの故障に対するレジリエンスとしての機構的工夫である。通常、アクチュエータシステムの故障は致命的であり、特に車輪の回転駆動系の故障は、その後の動作の足枷になってしまうだけでなく、動作の継続を著しく困難にしてミッション終了を招く事態へと発展し得る。ここは、ワンウェイクラッチ機構の導入により、ロックモード（反時計回りの回転）で回転を伝達し、フリーモード（時計回りの回転）でフリーローラとして作用することで、車輪回転駆動系の単一故障時においても、効率的な移動の継続が可能である機構・構造を開発した。なお、開発したプロトタイプロボットは、九州工業大学戸畑キャンパス内に構築した屋内砂場フィールド、および JAXA 宇宙科学研究所内の宇宙探査実験フィールドにて動作実証をおこない、開発したロボットシステムが正常に機能することが確認できた。

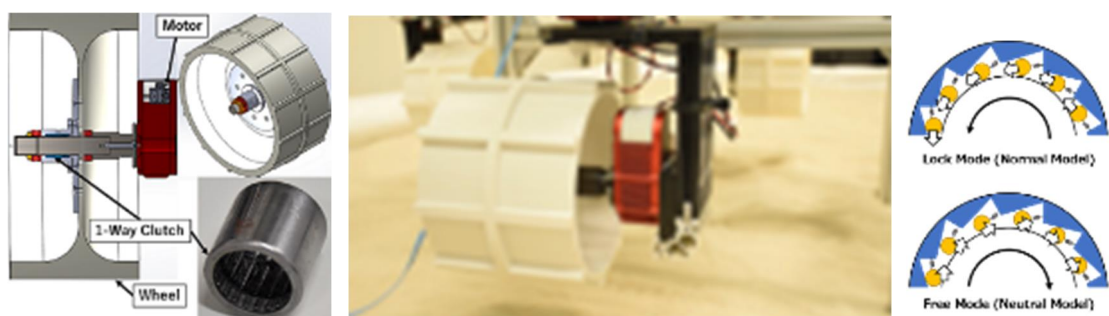


図 16 ワンウェイクラッチを組み込んだ車輪ユニット

JAXA 上野 PI グループでは、月面インフラ構築に向けたコア技術の研究開発に繋がる課題として、月面インフラを構築する際、輸送船着陸パッドの施工の際に必要なインフレーターもしくは発泡成型可能な施工素材を用いたインフレーター土嚢の研究開発を行った。まず、輸送時及び施工領域において最小限のリソースで体積を大幅に拡大させるという、極限環境での適用性に合致するものとして、物質材料研究機構により開発が行われた、超インフレーター特性を有するシリカエアロゲル素子をターゲット材料として選定した。この材料を、本プロジェクトにおいて、月面着陸パッドの整地を行う際に必要とされる地表面の凹部を補間する素材として活用することとした。しかしながら、土嚢に活用する予定の原材料の膨張率ならびに、膨張時の強度に問題が残っているため、土嚢としての実用化には、更なるブレイクスルーが求められる。

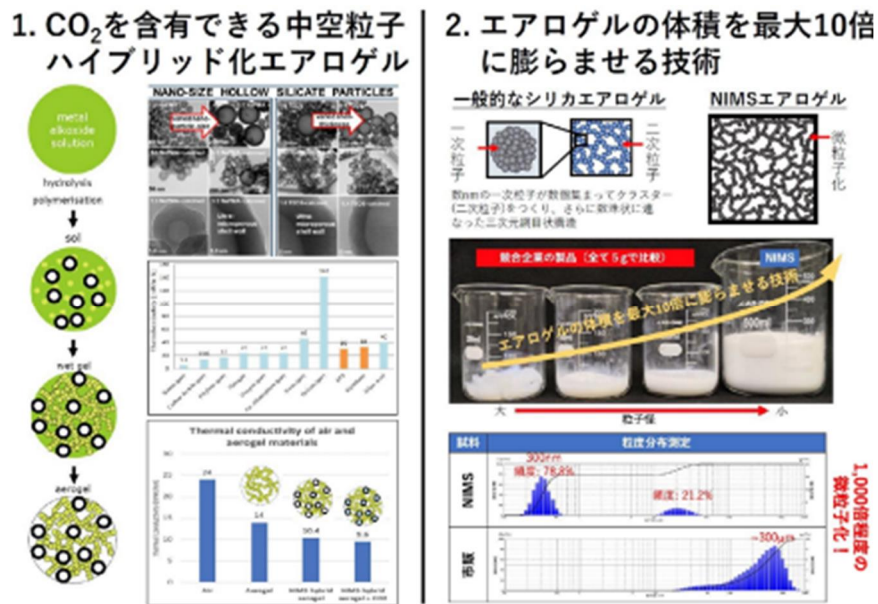


図 17 シリカエアロゲルの特徴

(2) 研究開発項目2:複数台ロボットの動的協働システム

当該研究開発項目の概要:

環境が逐次変化する無限定環境に適応する小型ロボット群を実現するため、動的協働AIを体系化し、これに基づいた自律分散型の動的協働システムを開発する。この技術は、臨機応変なチーム編成の実現と1人のオペレータによる複数台ロボット遠隔操作の2種類に分けられる。これらのアルゴリズムを開発し、シミュレーション、模型を用いた実証実験ならびに、複数台実建設ロボットによる土砂運搬作業の実証試験を行うことで、アルゴリズムの有用性を検証した後、2023年以降にインテグレートされる動的協働ロボットに、このアルゴリズムを搭載することを目指す。この研究開発項目2の研究開発課題とその構成要素を図18に示す。

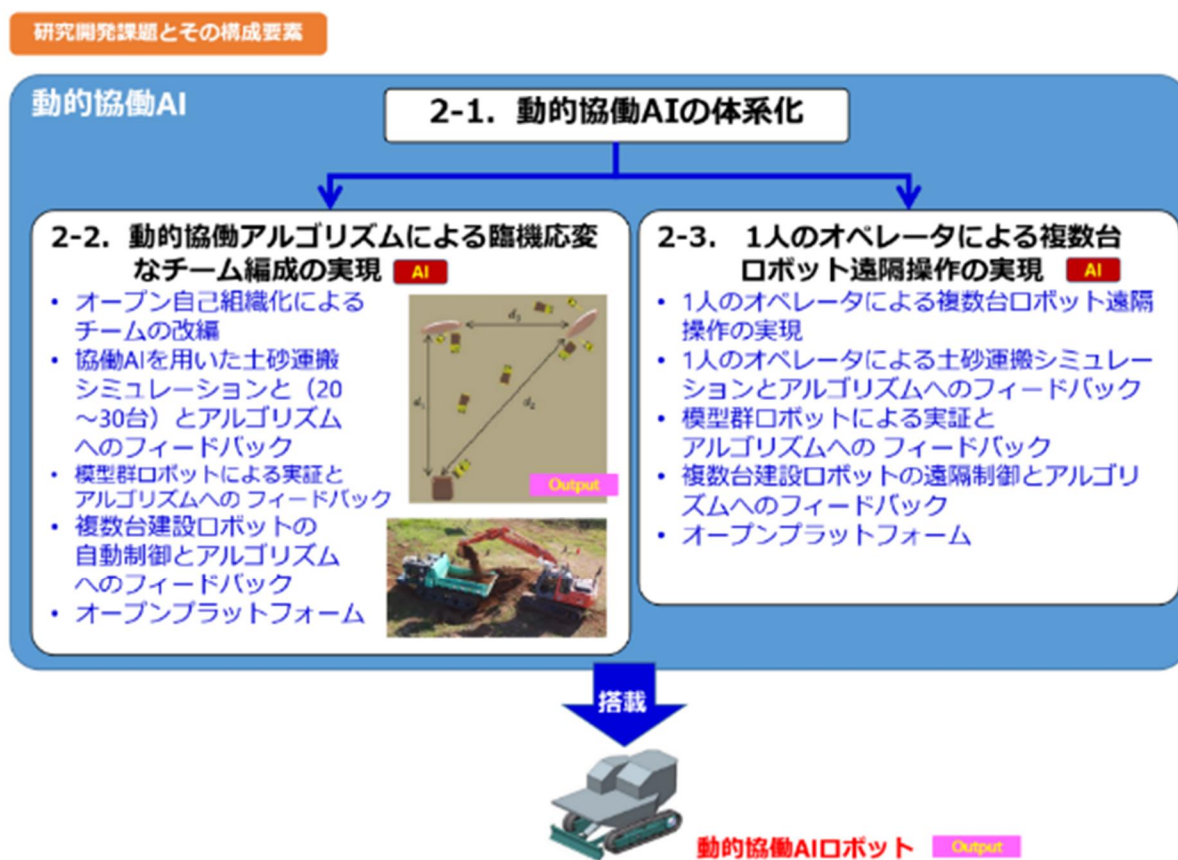


図 18 : 複数台ロボットの動的協働システムの研究開発課題とその構成要素

研究開発課題 2-1: 動的協働 AI の体系化

課題推進者: 永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)
浅間 一 (東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)
池本 有助 (名城大学 理工学部機械工学科)
筑紫 彰太 (近畿大学 工学部ロボティクス学科)
末岡裕一郎 (大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻)

実施内容:

東京大学 永谷 PI 及び 浅間らは、無限定(未知・想定外・不確か)な現場環境においても適応的に協調し、動作可能な自律型小型建設ロボット群システムを設計するため、数理的枠組みの体系化を行い、協働を自己組織化する戦略決定ダイナミクスを定式化し、その数理モデルを構築した。具体的には、個々のロボットが個体利得を優先して行動する「個体知能(各個体の利得平均の最大化)」と、群利得を重視して社会的に行動する「群知能(群全体の協調利得の最大化)」を定義した。さらに、利己的行動をとった場合の個体適応度と、協調行動をとった際の群適応度をそれぞれ定式化し、両者の優先度を調整するパラメータを導入して、反応拡散方程式に基づく勾配力学系として表現した。このモデルでは、適応度の変化に応じて各ロボットの行動戦略—すなわち個体利得を重視した利己的行動か、群利得を重視した利他的行動か—の選択確率が変動し、その結果として各ロボットの行動が環境や他ロボットに影響を及ぼす構造となっている。本研究では、この個体知能と群知能のバランスパラメータを変化させながら行動戦略ダイナミクスの推移を再現可能なシミュレータを開発し、ロボット群の振る舞いをシミュレーション解析することに成功した。また、これらの解析結果に基づき、構築した数理モデルの妥当性を検証した。

一方、複数台ロボットによる無限定環境・想定外事象への対応を可能にする動的協働 AI には、各ロボットが単独行動で並行的にタスク処理を行う状態から、必要に応じて、一部の複数のロボットがチームを組織化し、協力してタスク処理を行う状態に推移可能な具体的な枠組みとアルゴリズムが必要になる。本研究では、動的協働 AI 構築のための具体的な小型建設ロボット群システム設計の体系として、**図 19** に示すような、無限定環境・想定外事象に柔軟に対応可能な協働アーキテクチャを提案した。ここには、各ロボットが、単独行動と協力行動の二つのモードを自律的に遷移しながら、協力行動では必要に応じてチームを自己組織することが可能な機能が組み込まれている。具体的には、内部モデルに基づき、要求される機能と自己の機能を照らし合わせ、評価ながら、単独でタスク処理を行うか、他のロボットとチームを組織化し、他のロボットの協力を得ながらタスク処理を行うかの意思決定を行う。また本アーキテクチャは、予測と実際との誤差に基づき、内部モデルを更新・学習をするとともに、異常を検出する機能も想定し、構成されている。

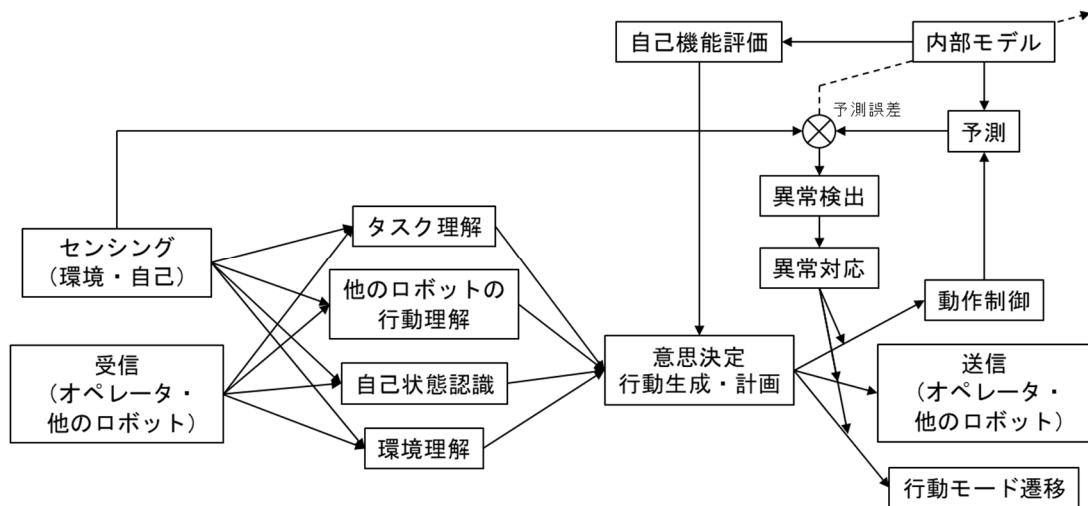


図 19 チーム自己組織化協働アーキテクチャ

研究開発課題 2-2: 動的協働アルゴリズムによる臨機応変なチーム編成の実現

課題推進者: 永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)
 浅間 一 (東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)
 筑紫 彰太 (近畿大学 工学部ロボティクス学科)
 末岡裕一郎 (大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻)
 圓道 和奏 (東京大学 大学院工学系研究科)
 竹囲年延 (成蹊大学 理工学部理工学科)
 橋本 毅 (土木研究所 つくば中央研究所技術推進本部)

実施内容:

東京大学 永谷 PI 及び 浅間らは、複数の小型建設ロボットでの土砂の掘削・運搬作業を対象とし、図 19 のアーキテクチャに基づき、動的協働アルゴリズムによりチーム編成を行いながら与えられたタスクを実行できるシステムの構築を行った。本手法では、各ロボットは、自己の機能表現、評価に基づき、状況に応じて他のロボットとコミュニケーションを行い、臨機応変にチームを編成することが可能である。具体的には、土砂掘削・運搬作業において、ショベルロボット(コーディネータ)とダンプトラックロボット(コオペレータ)間での交渉によるチーム編成手法を構築するとともに、ロボット群の想定される具体的な作業を列挙し、それらのすべて作業効率として計量するためのモデルを構築した。

まず、簡便な 2 次元シミュレーション環境を構築し、複数台のショベルロボットとダンプトラックロボットによる土砂掘削・運搬作業のシミュレーションを行い、ロボット群が必要に応じてチームを組織化し、自律的に協力して作業を遂行できることを確認した。また、ダンプトラックロボットに故障が発生しても、動的にチームを編成し直し、頑健に作業を遂行することが可能であることから、本研究で構築したアルゴリズムが状況に応じたチーム編成において有効であることを検証した。

次に、上記の有用性を示すため、本研究では、CM Labs Simulation 社製の Vortex Studio を用いて、より実際的な土工シミュレーション環境を構築することとした。Vortex Studio は、リアルタイムでの動力学計算が可能な物理エンジンを有しており、土質力学に基づいた土の挙動を再現可能である。また、Vortex Studio のショベル・ダンプトラックを自動制御するため、Robot Operating System 2（以降、ROS 2）を使用した。この結果、タスクに基づき、チーム編成が行われることを確認した。また、土砂山、土砂捨て場の位置、運搬土砂量を変化させた場合においても提案するアルゴリズムが十分に機能することを確認した。さらに、チームの状況変化（ロボットの故障）が生じた場合においても、パフォーマンスに基づき、チームの再編成が行われることを確認した。

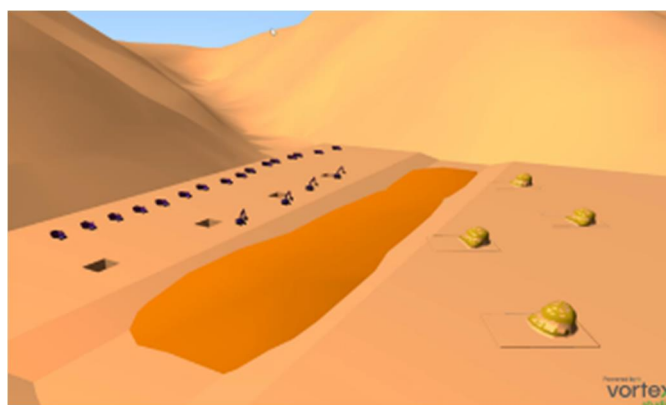


図 20 動的協働 AI を用いた土砂運搬シミュレーション

模型ロボットにおいては、動的協働アルゴリズムの実装に必要な自己位置推定、経路生成、土砂の掘削、積載、運搬などの要素技術を実装した。これらの要素技術を実装した 2 台のバックホウ、6 台のダンプトラックを用いて、室内環境において、初期チーム編成と自律分散的な協働土砂運搬を実現した(図 21 左)。

実建設ロボットにおいても、動的協働アルゴリズムの実装に必要な自己位置推定、経路生成、土砂の掘削、積載、運搬などの要素技術を実装した。これらの要素技術を実装した 1 台のバックホウ、1 台のホイールローダー、4 台のダンプトラックの計 6 台を用いて、屋外環境の九州大学フィールドにて、自律分散的な協働土砂運搬を実現した(図 21 右)。



図 21 複数の模型建設ロボット／実建設ロボットでの土砂運搬

成蹊大学 竹囲 PI グループでは、当該期間を通じて、動的協働 AI ロボット群の構築に向けて、動的協働アルゴリズムによる状況に応じた臨機応変なチーム編成の実機実装のための技術開発を実施した。具体的には、複数のロボットチームでの土砂の運搬作業を対象とし、土砂運搬作業中に、作業の遅延、チーム内で解決できない問題が生じた場合、自己(チーム)機能の学習に基づいて、チーム間をロボットが移動し、状況に応じて協働チームを自律的・適応的に編成する手法であり、その要素技術として、以下の3つのテーマに取り組んだ。

- (1) 建設車両のネットワークロボット化システム
- (2) 複数個のセンサポッドを用いた複数小型建設ロボットの位置姿勢推定技術
- (3) 複数センサポッドによる作業環境の認識手法と作業計画の自動化技術の開発

これらの3つの技術を合わせて、複数センサポッドと実建設ロボット6台を用いた自律土砂運搬作業を複数の実験場で実現し、複数センサポッドと実建設ロボット6台を用いた一人のオペレータによる遠隔土砂運搬作業を九州大学の実験場で行った。ここでは、ホイールローダーとクローラダンプ2台、バックホウとクローラダンプ2台の2チームに分けて、それぞれ2回以上の自動土砂運搬作業を実現した(図 21 右)。

土木研究所 橋本 PI グループでは、開発したオープンプラットフォーム(オープンミドルウェア、統一された信号のルール、シミュレータから構成される)を GitHub (<https://github.com/pwri-opera>)を通じて、各課題推進者へ共有した。ROS のパッケージ、シミュレータのプロジェクトファイル等を扱う各リポジトリには README を整備し、初見の研究者やエンジニアが開発環境を構築してコンパイルし、サンプルプログラムを動作させる手順を明記している。これにより、オープンプラットフォームを今後継続的に発展させ、実用化していく上での基盤が完成したと考える。

研究開発課題 2-3:1 人のオペレータによる複数台ロボット遠隔操作の実現

課題推進者：永谷圭司（東京大学 大学院工学系研究科）
浅間 一（東京大学 国際高等研究所東京カレッジ）
小松 簾（株式会社 Mujin）
竹囲年延（成蹊大学 理工学部理工学科）
橋本毅（土木研究所 つくば中央研究所技術推進本部）

実施内容：

ロボット群にオペレータが意図したタスクを行わせる際、無人化施工のようなロボットごとにオペレータを配置する戦略は、ロボットの台数だけオペレータが必要になるため、現実的でない。ロボットの自律化を推進し、一人のオペレータが、ロボットの自律性に対応できない部分にだけ介入し、ロボット群と連携してタスクを実施する戦略を取らざるを得ない。

東京大学 永谷 PI 及び 浅間らは、一人のオペレータがロボット群に、タスク粒度が大きな目標状態を指示として与え、ロボット群が自律的にタスクをこなし、自律的には解決できない部分をオペレータに問い合わせながら、オペレータとロボット群協調しながら作業を遂行できる手法およびシステムの研究開発をおこなった。特に、令和 5 年度には、研究開発課題 2-1 および 2-2 の研究開発成果と土砂運搬タスクを対象とした遠隔協働操作部の統合を行った。

まず、予測パフォーマンスと実測パフォーマンスを円グラフで表し、さらに納期に間に合うかをわかりやすく表示するために達成予測時間モニタも円グラフで示す。達成予測時間モニタでは、一周が納期となっていて視覚的に現在の予測パフォーマンスで納期に間に合うかどうかをオペレータが判断することができる。また、メッセージパネルにより自律分散的にチームが編成されているのがわかる。インターフェースの左半分は遠隔操作パネルとなっており、スタックしたダンプトラックがオペレータに助けを求めてきた際、自律制御から遠隔操作に切り替えを行い、オペレータが遠隔操作パネルを使って 1 対 1 の遠隔操作しダンプトラックの救助を行うことができる。このように、シミュレーション環境において、オペレータへ助けを求めながら 10 台以上のロボット群による土砂運搬タスクを実現できた。

なお、成蹊大学 竹囲 PI グループ 及び 土木研究所 橋本 PI グループの研究開発成果については、研究開発課題 2-2 と内容が重複するため、ここでは割愛する。

(3) 研究開発項目3:現場を俯瞰するセンサポッドシステム

当該研究開発項目の概要：

Physical 空間で獲得したデータから「重要な」要素を抽出して、動的に Cyber 空間に環境を構築し、その上で環境評価や予測を逐次行う Dynamic Synthesis を実現するため、現場を俯瞰するセンサポッドシステムを開発する。この技術は、センサポッドを構成する技術(センシング技術を含むハードウェア)ならびに、AI によるセンシングデータ解析から構成される。それぞれ、検証試験を行うと共に、これを統合することで、Dynamic Synthesisを実現する。この研究開発項目3の研究開発課題とその構成要素を図 22 に示す。

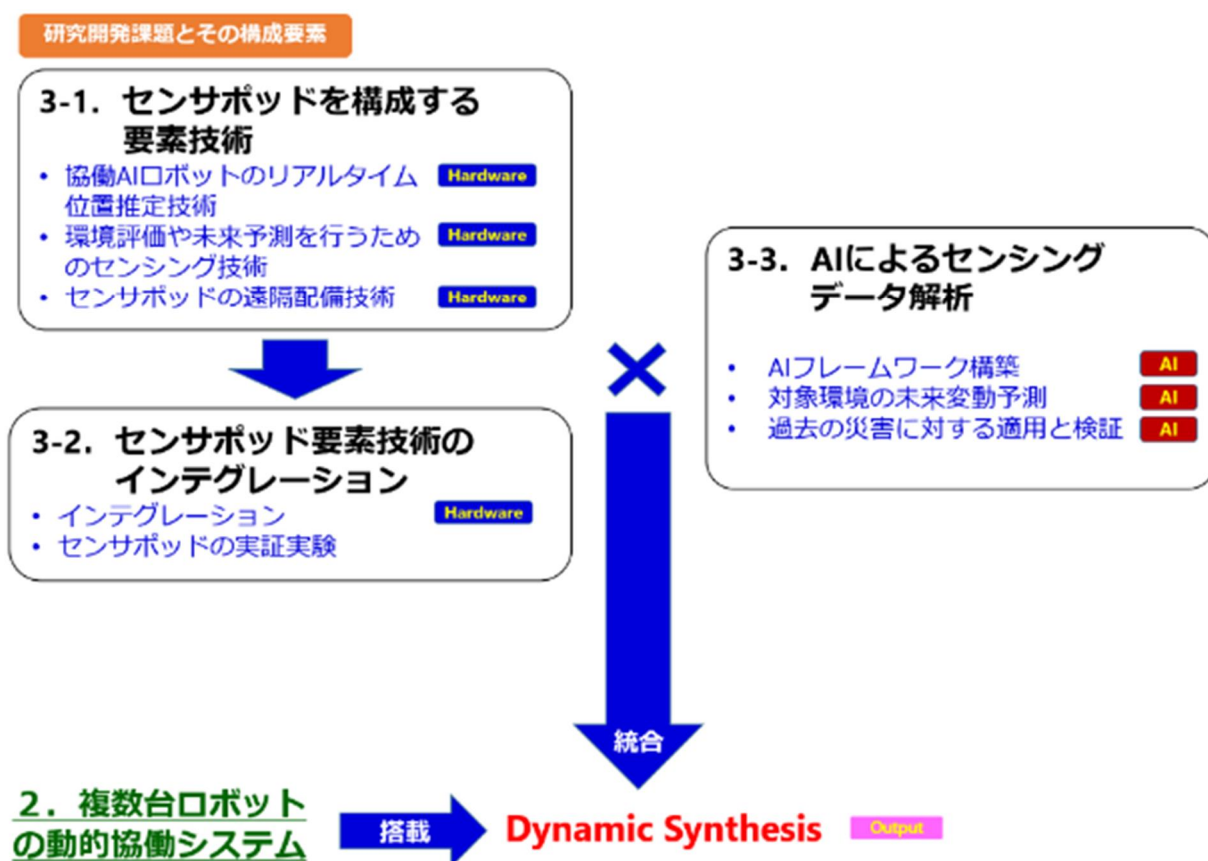


図 22:現場を俯瞰するセンサポッドシステムの研究開発課題とその構成要素

研究開発課題 3-1: センサポッドを構成する要素技術

課題推進者: 倉爪亮 (九州大学 大学院システム情報科学研究所)
向川康博 (奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科)
永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)
島田徹 (国際航業株式会社 公共コンサルタント事業部 国土保全部)

実施内容:

九州大学 倉爪 PI グループでは、当該期間を通じて、(1)協働 AI ロボットのリアルタイム位置推定技術、(2)協働 AI ロボットの走行可能性の予測手法の開発を実施した。

インフラ構築を行う協働ロボットが効率的かつ安全に作業を行うには、自身および他の協働 AI ロボットの位置、周囲の作業者の位置、地形や資材など、ロボットが活動する周囲環境の正確な情報が必要不可欠である。特に、安全かつ効率的な作業の実施には、他の協働ロボットの位置や作業者の位置など移動体のリアルタイム位置情報が必要となる。移動する対象には、自ら識別信号を出し、自己位置を周囲に伝える協力的な移動体もあれば、他のロボットとの協調は考えずに独自に行動する作業者や建設機械、作業ロボットも考えられる。本研究では、離散的に配置された複数のセンサポッドを用い、搭載した LiDAR、全方向カメラの情報を統合し、協働 AI ロボットの位置をリアルタイムで推定する技術を開発することとした。

この技術は、弘前大学が開発した ICP 法を用いた移動建機のリアルタイム位置推定技術を基に、複数のセンサポッドから得られる LiDAR データを統合し、協働 AI ロボットの位置を推定するものである。実験では、協働 AI ロボットを想定した振動ローラを用い、10m の距離を移動する振動ローラの位置推定精度を、振動ローラの前方に置かれたレーザ距離計との比較から検証した。リアルタイム位置推定には 3D LiDAR(RS-LiDAR-M1、RoboSense)を使用した。振動ローラが 10m の距離を 5 往復した際の平均誤差は 0.047～0.050[m]であり、測定した位置誤差が 10cm(最低 20cm)以内に収まった。



図 23:リアルタイム位置推定に使用した 3D LiDAR

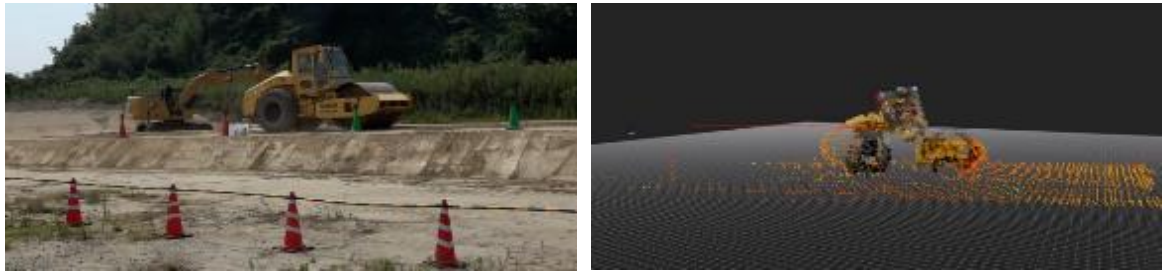


図 24：振動ローラの位置推定実験

協働 AI ロボットによるインフラ構築において、ロボットの走行可能性(トラバースビリティ)など作業環境の事前評価は、協働 AI ロボットによる作業の継続可能性の予測に極めて重要である。本研究では、センサポッドに搭載した振動計や赤外線センサなどの各種センサを用いて、作業地盤の強度や含水比など、協働 AI ロボットの走行可能性の予測に必要な環境評価を行う手法を開発する。

このうち、振動計による地盤強度の推定については、令和 3 年度に振動ローラによる転圧時に生じる地盤振動の振幅や伝播速度に着目して検討を行い、また令和 4～5 年度には振動ローラの転圧時に得る地盤振動の加速度応答に着目した独自手法を開発した。

本研究で開発した手法は、振動ローラの走行経路周囲にセンサポッドに搭載された加速度センサを分散設置し、得られた複数の加速度波形の周波数解析から地盤強度を推定するものである。起振源である振動ローラではなく地盤にセンサを設置することから、測定ノイズが小さく、またセンサの故障も防ぐことができる。また微小振動の位相速度を計測するのではなく、振動ローラにより起振された大振動の加速度応答を計測することから、他の重機も作業している土木現場での適用にも優れている。

提案手法により、地盤強度が推定可能であるかを検証するため、2021 年 9 月にセンサポッド初号機、および 2022 年 9 月にセンサポッド初号改良機、および地盤強度の計測に用いられる FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験機を用いて、九州大学伊都キャンパスの屋外盛土において振動ローラによる締固め実験を行った。実験では、30cm 撒き出した後に転圧を行う工程を 2 回繰り返す、第 1 層で振動ローラが 2 レーン(遠・近レーン)、第 2 層 1 レーンを転圧した際の振動を計測した。その結果、提案手法は、従来手法である振動ローラの加速度応答法に比べて、振動ローラの転圧回数と締固めの程度の間関係を、極めて明確に計測可能であることを確認した。

奈良先端科学技術大学院大学 向川 PI グループでは、遠赤外カメラを用いた熱伝播計測に基づく地盤の含水状態推定について、様々な環境での実験を進めてきた。

まず、温度などの環境を制御しやすい研究室内で予備実験を開始し、正確に計測した水分を染み込ませたスポンジを対象として、含水状態の精度評価を行った。その後、より実際の環境に近づけるために、屋外において、水分量を変えた真砂土を用いて含水状態を推定する実験を実施した。

遠赤外カメラとして、令和 3 年度までは Avio 社製 InfRec R500 を利用した。このカメラは、液晶モニタが付属しており、スタンドアロンで使えるなどの利点があるが、サイズが、

105×121×195mm で、重量が約 1.3kg のため、センサポッドへの組み込みは難しいという問題があった。そこで、令和 4 年度より、遠赤外カメラとして新たに FLIR 社製 Boson 640 を導入した。サイズは、21×21×11mm と小さく、また重量もわずか 7.5g(レンズを除く)である。電源はノート PC から供給できるため、全体としてコンパクトである。IP67 準拠の防塵・防水仕様のため、悪天候時にも利用可能である。また、令和 5 年度からは計測用の PC も IP66 準拠の防塵・防水仕様である Panasonic 製 FZ-40 に変更することで、計測 PC も含めて悪天候時にも利用できるセンサポッドとした。



図 25: 防塵・防水仕様のセンサポッド

このセンサポッドを利用して、前述の密閉容器に入れた真砂土の試料を用いて、屋外にて含水比による温度の経時変化の違いを検証した。令和 3 年度は快晴時に実験を行い、テントを利用することで完全な日向と日陰を作り出し、理想的な条件での温度の経時変化の解析を行った。しかし、そのような理想的な環境となることは稀であり、現実には雲によって日照条件は時々刻々と変化し、また風の影響を受けて土壌表面の温度も変化する。そこで、そのような環境変動要因に対応するため、シーン中に参照物体を配置し、その参照物体の温度変化を基準に環境変動要因を考慮した含水状態推定に取り組んだ。

参照物体としては、下図に示すような金属缶を用いて、表面の放射率が既知となるように黒体スプレーで塗装して利用した。この参照物体の近くに、含水比を 0%から 20%まで 5%ごとに変えた合計5種類の真砂土を配置し、やや雲のある晴れた日の午前 10 時から 11 時半までの温度変化を計測した。その結果、参照物体については、比熱が小さいこともあり、日照や風の影響を強く受け、温度変換が激しいことがわかる。また、含水比が小さいほど、同じく比熱が小さいために、参照物体ほどではないが、参照物体と同様の温度の上下変化があることがわかる。一方、含水比が大きくなるほど、上下変化が小さくなることがわかる。このように、参照物体を利用することで、日照の変化などの大きな環境変動があった場合にも含水比が推定できる見込みであることが明らかとなった。

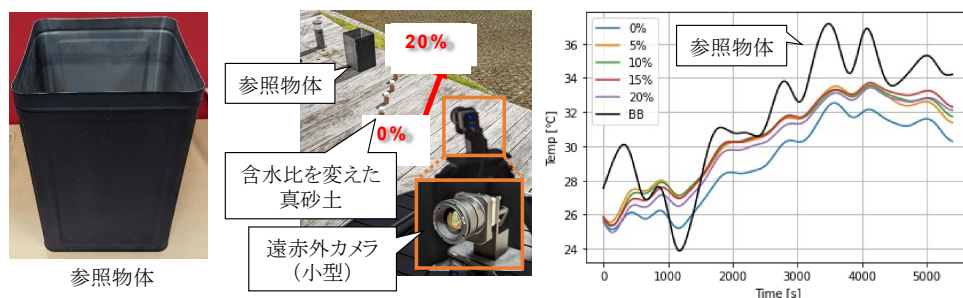


図 26: 参照物体を利用した環境変動要因と真砂土の温度変化の計測

国際航業 島田PIグループ 及び 東京大学 永谷PIグループでは、当該期間を通じて、連携を取りながら、建設ロボットの現場到着に先立ってセンサポッドを①現場縁辺部の広範囲に、②複数を離散的に、③迅速に、空中から遠隔配備する技術の開発を目指し、(1)運搬機の機能要件の検討、(2)遠隔地へのセンサポッド運搬技術の基礎実験、(3)センサポッドの地表固定技術の試作を実施した。加えて、センサポッドの遠隔配備技術について、模擬環境における遠隔配備試験の実施と評価を行った。

センサポッドを最適な観測位置に運搬するためには、ドローンの自己位置精度の向上が必要であり、今年度は、その手法について既存技術の調査を行った。既存の測位方法として、後処理キネマティック測位、RTK 測位、ネットワーク型 RTK 測位、精密単独測位型(みちびき)RTK 測位などが挙げられるが、山間地の測位としては、ネットワーク型 RTK や「みちびき」を活用した RTK が想定される。これらの方法は、衛星補足状況と RTK (LTE) 通信状況により精度が変化するため河道閉塞が発生するような環境で検証が必要となるため、R4 年度に河道閉塞の模擬環境として二瀬ダムにてドローンの衛星捕捉状況を確認する実験を行った。

表 3:センサポッド遠隔配備用の既往要素技術

技術名	ドローン用ウインチ	機器設置適地選定プログラム
概要	ペイロード3～10kgクラスのドローンと合わせてホバリング状態からカメラ等の昇降を可能としたツール。重量は630g	Sfmにより作成された点群データや色彩データを用いて、勾配や凹凸や植生の有無を評価するプログラム。
イメージ		
出典	岡谷鋼機株式会社 カタログ	飛行ロボットで運搬する観測カメラの設置点計画と設置試験 永谷他, 2019

一方、ドローンによるデバイスの運搬では、従来1本のテザーで懸架しているため、水平方向の回転を制御できない。そのため、懸架するデバイスの向きをドローンの方向制御機構を応用し、4枚のプロペラを縦に連ねて回転を調整する機構を試作し、浅間山にて現地検証を行った。

現地では、実際に UAV にて上空 10m程度まで上昇することで懸架し、一定時間ホバリング後、直下の地表に方向を制御しながら三脚を設置する実験を実施した。実験の結果、方向を制御した状態で三脚を地上に設置できることが確認できた。これにより、斜面上にも安定して機材を設置できる技術を獲得した。

研究開発課題 3-2: センサポッド要素技術のインテグレーション

課題推進者: 倉爪亮 (九州大学 大学院システム情報科学研究所)
永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)

実施内容:

九州大学 倉爪 PI グループでは、協働 AI ロボットによる作業に必要な情報を「空間情報」、「路面環境」、「移動体」の 3 つに分類し、それらを収集するセンサポッドの開発を目指している。そこで、360 度カメラ (Ricoh Theta V)、GNSS アンテナ (CORE QZNEO)、LiDAR (Quanergy M8)、3D-LiDAR (Quanergy M8、RoboSense RS-LiDAR-M1)、振動計 (Digiducer、小野測器 DS-5000、NP-7310)、PC、バッテリーをカラーコーン内に内蔵したセンサポッド初号機を設計・製作し、その後、センサポッド初号改良機を製作した (図 27)。



図 27: センサポッド初号改良機 (2種類)

さらにセンサポッドに搭載した複数センサデータを統合し、Cyber 空間に動的に環境を構築する Dynamic Synthesis を実現する具体的なプラットフォームとして、ROS2-TMS for Construction の開発を行った。ROS2-TMS for Construction は、ROS2 をベースに構築され、ROS2 トピックを保存するデータベース (MongoDB)、データベースへの入出力を担う ROS2 ノード (TMS_DB)、オドメトリや地盤強度のデータをデータベースの形式へ変換する ROS2 ノード (TMS_SP、TMS_SD)、ユーザインタフェースノード (TMS_UR) などからなる。これにより、予めドローンなどにより得られた土工環境の静的地形データ、地盤の含水率データ、センサポッドから得られた動的地形データや建設機械の位置データなどのリアルタイムデータなどをデータベースに一元的に格納し、必要に応じて取り出したり、Unity による仮想空間として Meta Quest Pro などの没入感ディスプレイにより可視化できる。図 28 にセンサポッドで計測された 360° 動画像と仮想空間を切り替えて表示している例を示す。



図 28: センサポッドで計測された 360° 動画像と仮想空間の切り替え

研究開発課題 3-3: AI によるセンシングデータ解析

課題推進者: 永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)
岡谷貴之 (理化学研究所 革新知能統合研究センター)
西尾真由子 (筑波大学 システム情報系)

実施内容:

理化学研究所 岡谷 PI のグループでは、本プロジェクトが目標とする自然災害現場等を対象に、そこで行われる様々な作業について、人の意思決定を支援し、かつ自律行動するロボットに対して有用な情報を提供する AI システム、すなわち画像と言語を扱うマルチモーダル AI の開発を目指している。大規模言語モデル(以下 LLM)及びその応用の急速な進展により、マルチモーダル AI の研究開発は大きく発展し、今も継続している。

そこで、当グループでは、当初想定していた研究計画を前倒しで実施することとし、災害現場、特に斜面崩壊の実シーンを対象とするマルチモーダル AI を実現すべく、その研究開発に着手した。解決すべき課題は、災害の視覚的な理解に必要とされる専門知——マルチモーダル専門知——を、いかにしてデジタル化し、マルチモーダル AI の学習に結びつけられるか、である。ゼロからデータを構築する必要がある上、災害現場は事例数も限られるから、データ量を過小とならざるを得ず、問題は輪をかけて難しい。そのため、関連分野のどの研究者も未だ成功していない未踏領域と言える。(現時点で実現されているマルチモーダル AI が持つ知識や能力は、インターネット上に存在する大量データ——AI 構築のために集められたわけではない反面、それゆえに大量にある——を学習することで得られるものに限定されている。)

この課題を克服するため、学習・評価のためのデータセットの構築、モデルの構築及び学習方法の開発、評価方法の開発といった複数の研究項目を設定し、順番に取り組んだ。まずデータセットの構築は、当グループの要請に基づき、当プロジェクトの島田 G 及び全 G が行なった。専門家に依頼し、斜面崩壊の上空撮影画像を見ながら自由に状況を説明してもらい、それをビデオで撮影したものを元に、解説内容を文字起こしし、画像と関連づけられたテキストデータを作り上げた。

モデルは、LLM とわれわれの過去の成果に基づく画像エンコーダを組み合わせた基本構造に、アダプターと呼ばれる少数のパラメータを持つ構造を追加し、そのみを学習対象とすることで、計算効率化と LLM 等の事前学習の内容保持を両立するようにした。また、上述の学習データは画像の枚数にして 100 足らずで、非常に小さく十分とは言えないため、少ない学習データでも良い学習が可能となる学習方法を研究した。具体的には、まず、現在最高の性能を誇る LLM である GPT4 を使って、専門家の説明から書き起こしたテキストを、いくつかの項目に自動分類し、構造化されたデータに変換する。次に構造化されたデータを元に、命令チューニングのためのデータを生成する。この際も GPT4 を用いて言い換え (paraphrasing) などを駆使してデータ量を増やし、モデルの性能向上およびロバスト化を図る方法を考案した。図 29 に、入力画像とそれに対する記述のペアの例を示す。



Disaster Type: "Landslides"
Cause: "Human development that has altered the terrain's natural drainage and caused soil erosion from surrounding slopes."
Observation: [] 5 items
0: "The picture shows a mountainous region where numerous small landslides have occurred"
1: "The landslides appear to have originated from the ridge lines of the valley systems"
2: "The soil from the landslides has flowed into the low-lying areas and created temporary lakes"
3: "It is likely that the area experienced heavy rainfall at the time the picture was taken"
4: "The presence of trees suggests that the slopes have a relatively gentle incline"
Future risk: "The area is likely prone to similar landslides in the future, particularly during heavy rainfall."



Disaster Type: "Landslides, Debris flow"
Cause: "The area has experienced heavy rain, and the slope is steep with exposed sedimentary rocks, which has likely caused the landslides and debris flow."
Observation: [] 5 items
0: "The picture depicts a mountainous slope in a mountainous region of Hiroshima Prefecture, Japan, with clear evidence of landslides and debris flow."
1: "The debris flow has reached the downstream area and is still flowing."
2: "The slope is steep with exposed sedimentary rocks, and there are signs of cracks, which suggests that the area has likely experienced weathering and fracturing."
3: "The vegetation on the slope is sparse, and the surface is covered in loose material, indicating that the soil has likely slid down the slope."
4: "The color of the soil in the debris flow is different from the surrounding soil, suggesting that the sediment contained by the cracks has been transported by the debris flow."
Future risk: "The area is likely to experience similar landslides and debris flows in the future, especially during heavy rainfall, as the slope is steep with exposed sedimentary rocks and cracks that have likely caused the landslides."

図 29:開発したマルチモーダル AI の動作の様子。斜面崩壊が発生した災害現場の画像を入力に、その状況の説明を行う。左が入力画像。右が4項目にわたる現場の説明。

筑波大学 西尾 PI グループでは、協働 AI ロボットがセンサポッド等で得る限定的なデータから作業環境の短中期的な挙動を予測して、全体のタスクを最適化しながら活動できるようにすることを目的として、物理方程式を制約条件に利用して、限定的なデータ取得で、地盤挙動を予測する DNN (Deep Neural Network: ディープニューラルネットワーク) アーキテクチャならびに、その学習方法の構築を実施している。具体的には、Physics Informed Neural Network (以降、PINN) による物理現象の順解析・逆解析アーキテクチャを構築し、地盤災害の河道閉塞天然ダムの変形解析への適用を進めた。

PINN 順解析・逆解析アーキテクチャ構築は、令和 3~令和 4 年度のマイルストーンに沿って実施し予定通り完了した。ここでは、協働 AI ロボットの活動フィールドとなる土工現場で関わる地盤問題のうち地盤圧密沈下を対象として、PINN の基礎的な性質を理解し、構築するアーキテクチャの妥当性を検証した。

検証では、単層飽和粘土地盤の圧密問題(図 30 左)を設定した。この現象の支配方程式は、拡散方程式の形で表される圧密方程式である。10 日間の地表面変位と地表面近傍でのひずみを観測データとして用いるときの 100 日後地盤沈下量の予測(順解析)、圧密方程式の係数で地盤物性値から導出される圧密係数の推定(逆解析)を行った。得られた主要な結果として、10 日間 1 時間毎に取得するデータ(計測ノイズ 10%)を用いて導出した結果を図 30 に示す。

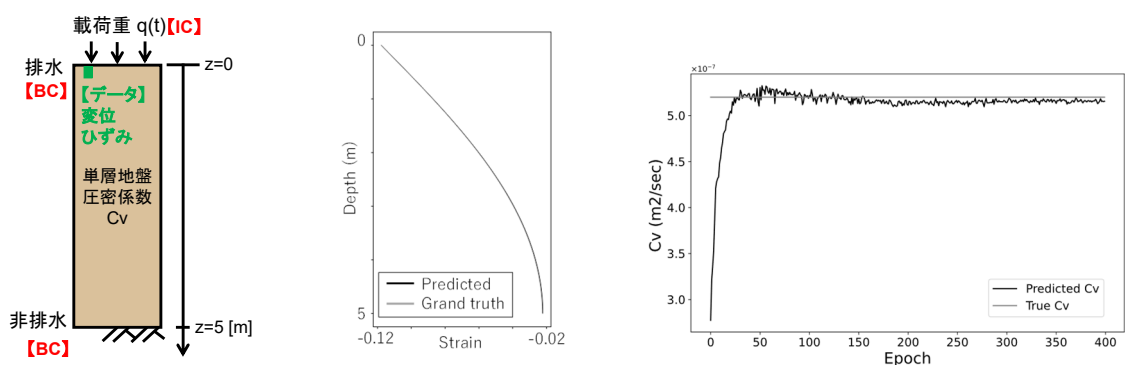


図 30:100 日後ひずみ分布予測結果と圧密係数推定の学習経過

協働 AI ロボットの活動フィールドの 1 つとして考えられている、地盤災害による河道閉塞天然ダム(閉塞部)の地盤変形および崩壊危険性解析を対象として、構築したPINN 順解析・逆解析アーキテクチャの適用を実施した。令和 4 年度までに、実際の河道閉塞現場の情報を基に、天然ダムの「仮想現場モデル」(図 31)を作成し、有限差分法による応力・水連動解析によってダム上流部の溜水位変動による変形解析を可能とした。令和 5 年度末には、天然ダムの水位変動による変位と応力分布の出力を示し、変形や崩壊危険箇所を示すというマイルストーンを達成した。

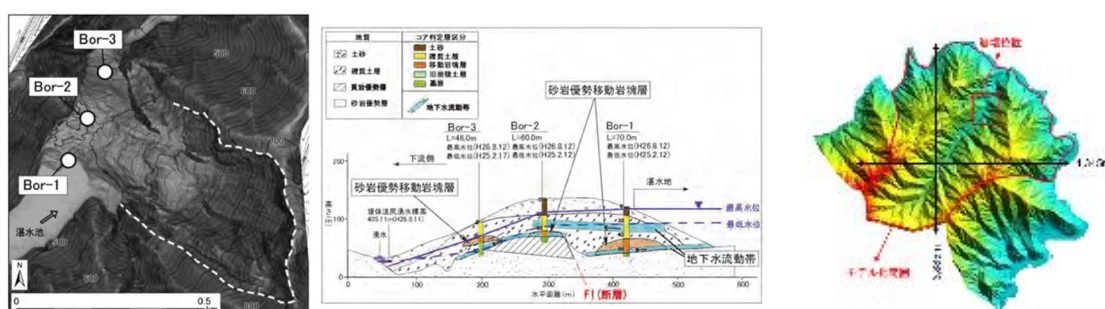


図 31:仮想現場モデルの参考現場である奈良県長殿地区の河道閉塞現場と地形データの可視化

東京大学 永谷 PI 及び 全特任准教授のグループでは、(1)蓄積された土木工学の知見との連携のための取得データの言語化、(2)蓄積された土木工学の知見と取得データの言語化結果の連携による理解・行動方針決定という2つのテーマの研究開発を行ってきた。土木工学の中でも、地上インフラは、橋梁のようなコンクリート・鋼材から災害現場・対応のような土質・水理的な取り組みも含み、その歴史が長く、蓄積されている知見が非常に多いため、これらを活用することは重要である。ただし、これらの知見のほとんどは、人間が扱いやすいように言語化されているため、数値・画像・動画・音響データであるセンシング結果とは単純な連携ができない。そこで、取得データを言語化することで、共通の空間に射影し、相互連携させる概念、要素技術を構築することとした。

河道閉塞現場に関する画像の種別については、河道閉塞現場で発生している現象の中でも、二次的なリスクが高い斜面崩壊について着目した。画像-言語セットの構築では、国際航業 島田 PI と連携し、過去の斜面崩壊の発生現場で得られている画像に対して、地形判読の専門家の知見を反映した文章、すなわち、「画像-言語を組み合わせた AI 学習用のデータセット」の構築を行っている。画像と地形判読の専門家の知見を反映したコメントの例を図 32 に示す。

学習データセット構築の過程で、斜面崩壊の画像からの AI による評価について、以下のような特徴が存在することが確認された。

- 斜面崩壊の現場を撮影した画像は少なく、単純に画像と言語のセットを与えるのみでは恐らく AI は適切に学習されない。
- 斜面崩壊と岩塊・礫・滑落崖の位置など、種々のオブジェクトの位置関係が重要な情報となる。
- 画像からは判断できない専門知情報を導入することが必要である。

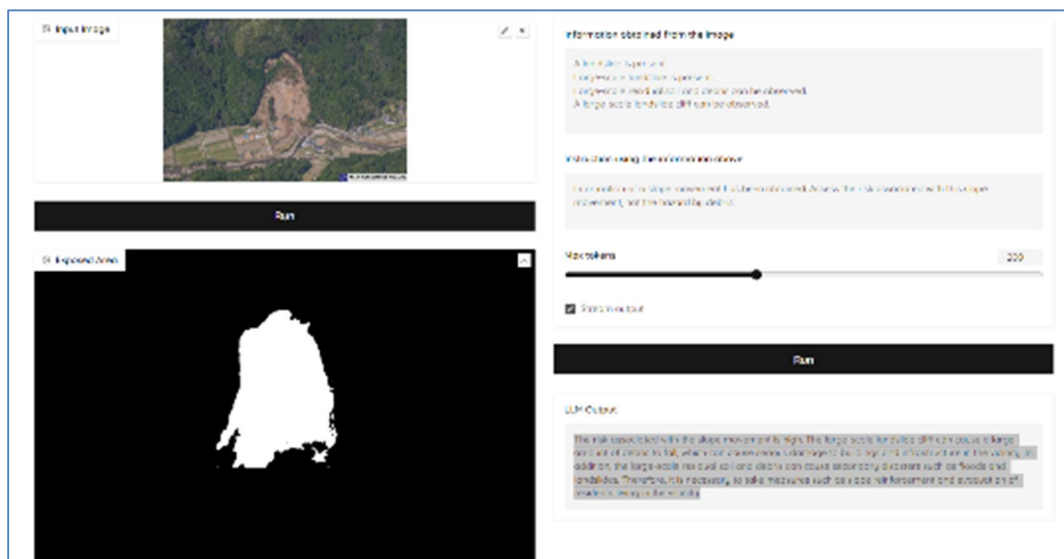


図 33:出力 UI の例

Output として得られている文章は以下のようになった。

”The risk associated with the slope movement is high. The large-scale landslide cliff can cause a large amount of debris to fall, which can cause serious damage to buildings and infrastructure in the vicinity. In addition, the large-scale residual soil and debris can cause secondary disasters such as floods and landslides. Therefore, it is necessary to take measures such as slope reinforcement and evacuation of residents living in the vicinity.”

(4) 研究開発項目4:動的協働 AI ロボット群と Dynamic Synthesis の実証

当該研究開発項目の概要：

動的協働 AI ロボットシステム群と Dynamic Synthesis を構築し、多様な環境に適応したインフラ構築を実現するため、フィールド実験による構築したシステムの評価を行う。そのため、フィールド構築と対象環境における評価方法に関する研究開発を行う。

この研究開発項目 4 の構成を図 34 に示す。



図 34:動的協働 AI ロボット群と Dynamic Synthesis の実証に関する研究開発課題とその構成要素

研究開発課題 4-1:河道閉塞／月面などの模擬環境構築とフィールド評価

課題推進者： 三谷泰浩（九州大学 工学研究院）

上野宗孝（宇宙航空研究開発機構 宇宙探査イノベーションハブ）

実施内容：

九州大学 三谷 PI グループでは、多様なスケール・環境条件に柔軟に対応できるテストフィールドの構築スキームを確立するとともに、各フィールドの環境条件下におけるロボット・施工機械の定量的な性能評価手法を検討し、各種環境条件下における機械性能評価のための統一的な基準を作ることを目指し、以下の2点を実施した。

(1) 多様な実験条件へ機動的に対応可能な実験環境構築体制の確立

(2) 土工におけるロボット重機の評価基準および標準施工モデルに基づいたベンチマークの作成

九州大学伊都キャンパス内に、実スケールの実験に対応可能な屋外実験フィールドを整備した。この実験フィールドを活用した実験は、複数存在するが、その中でも、令和3年度から令和5年度にかけて、複数の屋外実験を、本フィールドにおいて実施した。特に令和4年度においては、約1か月の間に3つの異なる実験を同時並行的に実施することができた。また、令和5年度の7月5日には、**図 35**に示すように、上記複数の研究Gの屋外実験に加えて、東工大の鈴森 PI およびヤンマーの杉浦 PI の研究グループが開発する協働 AI ロボットプロトタイプおよびパワーソフトハンドによる屋外実験も加えた計5つの屋外実験を含む開発成果デモンストレーションを本フィールドで同時に実施した。



図 35: 令和5年度7/5 開発成果デモンストレーションの実施環境

以上の成果から、本実施事項の目的である「多様な実験条件へ機動的に対応可能な実験環境構築体制の確立」を達成できたと言える。

次に、土工におけるロボット重機の評価基準および標準施工モデルに基づいたベンチマークの作成について紹介する。ロボット建機の施工性能を評価するための指標作成にあたって、まず、施工は「作業」で構成されている点に着目し、**図 36**に示すように、既存重機による「土工」に必要な作業を抽出するとともにモデルチャートとして整理した。

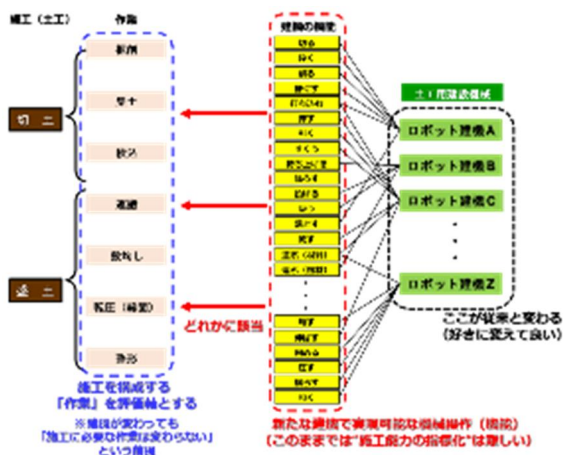


図 36:「土工」の作業のモデルチャート化

これらの「作業」とロボット建機の各種「機能」との対応付けを行い定量化することによって、その総和により「施工」性能の算出が可能となる。また、各施工に必要な「作業」自体は、建設機械が既存のものから新たなロボット建機に移行しても変わらないとの考えから、ロボット建機の「機能」を「作業」に置換することで、既存重機とロボット重機の施工性能を「作業」という同一のドメイン上で統一的に評価・比較することが可能となる。

また、土工の「土砂運搬」に着目し、評価指標が具備すべき要件を要求性能の観点から再整理した。重機のサイクルタイムを用いて時間あたりの処理土量を算出することによって運搬や積込の施工性能については評価できるが、所謂「経費」の部分が評価できない。一方、「経費」の評価は極めて重要であるが、従来の積算基準のように通貨(貨幣価値)に換算してしまうと市場の影響によって評価が変動してしまうため、性能の評価指標としては望ましくない。そこで、建機の「自重」を指標の構成要素に加えることで、間接的ではあるが「経費」の影響を指標へ取り込むこととした。また、「自重」によって、安全面・環境面における優位性(無人化・自律においてメリットが大きいと想定される部分)も評価指標に取り込むことができる。

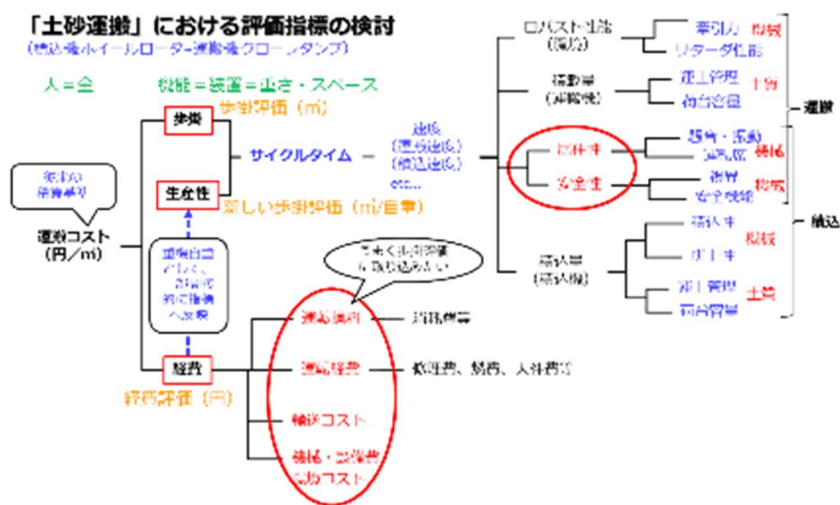


図 37:「土砂運搬」における評価指標が具備すべき要件の整理

JAXA 上野 PI グループでは、評価実験の実施を有効に行うことを目的として、宇宙探査実験フィールドの記録システムの充実を行い、協働 AI ロボットの動作の正確な記録と、それに基づく動作の評価を行うことを可能とするシステムを構築した。今後の評価実験において、このシステムを活用し、必要な開発フィードバックを行うことが可能になる。また、フィールド評価に必要な、評価基準の策定を進めており、今後の評価実験において、適切な判定を行うことが出来るよう、ガイドラインの制定に向けた調査活動を行った。さらに、実験フィールドにおける模擬月面構造を実現するための予備的な調査を進め、クレータ形状を模した地盤を構築した(図 38)。一般的なクレータに見られる、土壤材料の安息角を超えた傾斜構造は、ロボットの動作の評価においても新たな指針を与えるものである。

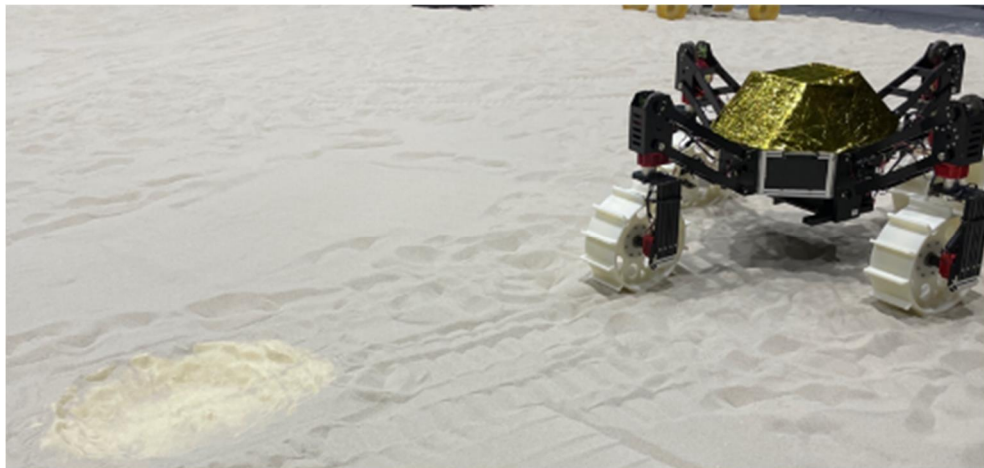


図 38:九州工大の協働 AI ロボットと地盤の特殊形状(図中左下のクレータ)

一方、レジリエンス評価については、現在、以下の考え方で検討を進めてきた。

- ① 評価実験において、獲得目標をプロジェクトメンバーの合意の上に規定すること。
- ② これまでの宇宙機ローバーの評価を調査したが、宇宙環境特有の要素が大きく、また基本的な冗長系に基づく設計思想を前提としている事から、必ずしも今回の評価に馴染むかという点必ずしもそうでは無い。そこで、以下を評価項目の候補とする。
- ③ 評価項目:
 - 3-1. 冗長性設計を前提としない場合の、“不満足”事象への耐性
 - 3-2. リソースに対する、耐性の効率
 - 3-3. 不満足事象(or 想定外事象)のリストアップと出来高の評価

(5) 研究開発項目5:河道閉塞緊急調査のシステムインテグレーション

当該研究開発項目の概要：

概要：河道閉塞緊急調査を実現するためのシステムを構築する。このシステムは、本研究開発プロジェクト前半の研究開発課題 1-5 ならびに研究開発課題 3-1 で開発を進めてきた「ドローン技術をベースとした遠隔情報収集技術」、「ドローンによる遠隔設置による湛水部の水位/水深調査技術」、「ドローンによる遠隔設置による地形変位調査技術」、研究開発課題 3-3 で開発を進めてきた「河道閉塞崩壊部リスク評価」から構成され、これらの技術が CESIUM (Cesium GS, Inc. が提供する 3D 地図プラットフォーム、国土交通省の日本全国の都市デジタルツイン実現プロジェクト PLATEAU に採用) をベースとした情報共有プラットフォームに集約される (図 39)。これを活用することにより、災害対応担当者は、継続的な現場監視が可能となる。

目標：2025 年末、ドローン技術を中心とした河道閉塞環境における各種情報収集技術を統合したシステムを実現する。また、TRL5 の達成を示すため、「河道閉塞の災害対応フロー」に記した河道閉塞対応シナリオの②～④を、模擬河道閉塞環境にて実施する。

- ② 無人機による緊急調査を行い、災害地の詳細な情報を把握すると共に、AI による現場判読を行うことで、災害対応プランを策定。情報は CESIUM 情報共有プラットフォームに集約。
- ③ ドローンによる緊急調査用センサを無人設置し、地形情報ならびに水位情報に関する 1 週間程度の逐次情報取得を実現。情報は CESIUM 情報共有プラットフォームに集約。
- ④ 主に資機材搬入エリアを中心に地盤の緊急調査を実施し、対象環境の地盤強度を把握。情報は CESIUM 情報共有プラットフォームに集約。



図 39: 研究開発項目 5 のシステムインテグレーション

研究開発課題 5-1:河道閉塞環境における遠隔情報収集技術のシステムインテグレーション

課題推進者: 島田徹 (国際航業株式会社)

実施内容:

本研究開発課題では、以下の作業項目を設定した。

- ① 個別の研究開発課題に応じた実証実験箇所の選定・調整・実施
- ② 実証実験における各種計測センサの遠隔配置
(地形計測センサのためのプリズムおよび投下装置の開発を含む)
- ③ 実証実験による課題の抽出・整理
- ④ 実証実験で得られたデータのデータプラットフォーム構築
- ⑤ 土砂災害対策のエキスパートによるレビュー実施

以下に、①, ②, ④について、研究開発の実施結果を順次説明する。

<個別の研究開発課題に応じた実証実験箇所の選定・調整・実施>

令和7年度の研究開発では、以下に示す3地区での実証実験を準備・調整し、実施した。

表 4:本研究開発項目で試験を行ったフィールドの一覧

箇所名 所在地	片蓋川砂防ダム周辺 群馬県碓氷村	寺野地区・河道閉塞箇所 新潟県長岡市	九大・試験フィールド 福岡県糸島市
実施時期	令和7年5月	令和7年5月	令和7年7月
課題 実験項目	<ul style="list-style-type: none"> ● 地形計測センサ(2機)のUAVによる運搬設置 ● 傾斜のある不整地における地形計測センサ(2機)の運搬設置 	<ul style="list-style-type: none"> ● 河道閉塞(支統)箇所における総合試験(運搬・設置) ● 無線通信試験(wifi/LPWA) ● 改良型投下装置の試験 	<ul style="list-style-type: none"> ● 総合試験 ● 地形計測デバイス・運搬設置 ● 水深計測デバイス・運搬設置
現地状況	 <p>砂防ダム周辺は、人工的に形成された多様な斜面がある。また植生が乏しく比較的見通しが良いため、河道閉塞が発生した場合の状況把握に近い模擬環境と言える。</p>	 <p>実際に河道閉塞が発生した箇所であり、実証的なスケール感での総合試験が可能である。 全体に植生に覆われ、センサの運搬設置などの試験には適さないため別途予備実験が必要。</p>	 <p>本プロジェクトのために設置された人工的な試験フィールドであり、他の研究開発項目も含めて実証実験が実施された。</p>
成果	主にセンサ設置の遠隔搬送抽出や三脚型センサの運搬・設置実験を実施し、良好な試験結果が得られた。	機材運搬や無線通信など、実際の災害現場で試験をすることにより、実災害の空間スケールでの性能検証が確認できた。	片蓋川・寺野地区での予備実験では、個別のセンサ毎の実験であったが、総合的な実験を行うことができた。

<実証実験における各種計測センサの遠隔配置>

1) 水位・水深調査用デバイスの遠隔配置(研究開発課題 5-2 と連携)

九大・試験フィールドにおいて実験を実施し、運搬設置動作を確認した。2回の試験を行い、2回目の試験では水深計測センサの動作不良が認められた。センサの運搬はドローンの自律飛行により実施し、自動(遠隔)設置が可能であることを確認した。

2) 地形変異調査用デバイスの遠隔設置実験(研究開発課題 5-4 と連携)

片蓋川試験フィールドにおいて、調査用デバイス(実機)を用いた設置実験を行った。片蓋川フィールドの実験では、実際の災害現場を想定して、約 500mの遠距離を運搬し、ドローンによる自律飛行により、自動(遠隔)で設置ができることを確認した。



図 40:水位・水深調査用デバイスの遠隔配置実験の様子(左:九大・試験フィールド)／地形変異調査用デバイスの遠隔設置実験の様子(中:片蓋川フィールドの実験、右:九大フィールドの実験)

<実証実験で得られたデータのデータプラットフォーム構築>

これまでの災害対応では、救助や復旧にかかる多くの組織(部門)が集まり、情報の集約・共有を行い、これらの情報をもとに意思決定を行うことが多くあり、情報共有のために多くの労力を必要とすることが課題と考えられた。

このような情報の集約・共有といった機能の一部はリモート環境(三次元のサイバー空間で災害状況を再現したプラットフォーム)で実現できると考え、立野地区および九大・試験フィールドの試験結果を用いてシステムを構築した。本研究開発では、水深計測結果、地形計測結果の他に、建設機械進入の可否を判断するための地盤強度試験の結果(研究開発項目 6-3)の調査結果や、環境評価 AI を用いた斜面崩壊の危険度評価の結果などを集約し、共有することが可能であることを確認した。

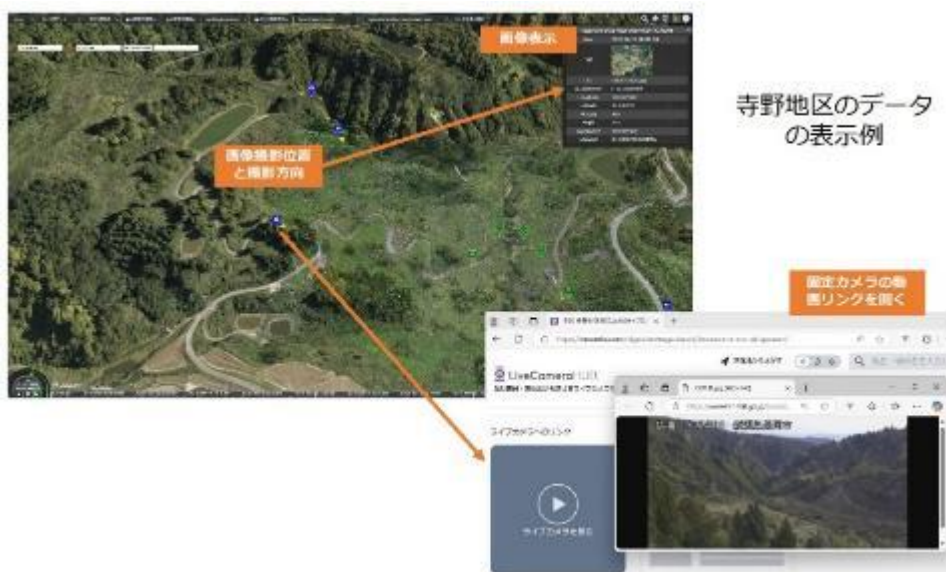


図 41:観測結果を集約・共有するための 3 次元データプラットフォームの構築(立野地区試験フィールドのデータの表示例)

研究開発課題 5-2:河道閉塞湛水部水位・水深調査用センサの現場実装

課題推進者 :永谷圭司／東京大学

実施内容:

プロジェクト後半は、これまでに分かった課題に対する検証や改良を進めるとともに、実運用プロトタイプ機の開発を進めた。また、フィールド試験を実施した。

まず、課題に対する検証と改良は、①水深計測精度の検証、②着水時と水位上昇時の動作の改善、③通信の改善の3つの項目があった。

①水深計測精度の検証

まず、水深計測のための繰出したラインの長さの計算式の再導出を行った。なお、ラインはリールに1層ずつ均一に巻かれているものと仮定する。ここで、リールからなくなったラインの体積と繰出したラインの体積が一致すること、ある瞬間のリール内のラインの最外周の周速度とラインの繰出し速度は一致すること、および、リール回転角度と回転数の関係から、以下の式が成り立つ。これを解くと、リールの回転数 n からラインの長さ x を計算することができる。

$$\frac{\pi}{4}\phi^2(L-x) = \frac{\pi}{4}kW(d^2 - D_1^2)$$

$$\dot{x} = \frac{d}{2}\dot{\theta}$$

$$\theta = 2\pi n$$

次に、この計算式を用いた計測の精度を検証するために実験を行った。この実験は、実際にセンサを水面には浮かべず、地上の室内にて実施した。センサを固定し、センサのリールからラインを1 m ずつ計測しながら繰出した。この時、スケールで直接計測したラインの長さを真値、同時にセンサが計測・計算したリールの回転数、ラインの長さを計測値として記録し、真値と計算値を比較した。詳細は省くが、この結果から計測開始時が最も誤差が大きく、最大で-5%程度の誤差があり、繰出しライン長さが長くなるほど誤差は減少することが分かった。誤差の原因は、計算に用いた式が、ラインが理想的にリールに1層ごとに巻き取られていると仮定しているためである。また、計算に必要なパラメータの計測精度も影響している。特に、巻かれているラインの全長 L は、100 m 巻き取っているものとして計算していたが、実際には 98.43 m で、誤差があることが分かった。

②着水時と水位上昇時の動作の改善

着水時と水位上昇時の動作の改善については、後述の実運用プロトタイプ機の開発に含める形で進めた。まず、できる限りシンプルになるように必要な機能のみを残す形で、プログラムを見直し、不具合を減らした。また、水位上昇時の検知はこれまでフロートスイッチで行っていたが、この他の手段として、浮力によって本体を傾かせ、この傾きを検知する方式を検討し、実装を進めた。

③ 通信の改善

通信についても後述の実運用プロトタイプ機の開発の中で進めた。まず、使用する無線モジュールの見直しを行い、長距離通信を得意とする LoRaWAN 対応の無線モジュールを使用することに決定した。

実運用プロトタイプ機に組み込むのと並行して、実環境に近い屋外環境での通信実験を実施した。実験は、中越地震で実際に河道閉塞が発生した新潟県の芋川流域で実施した。送信側を図 42 に示すように水面近くに設置し、受信機を持って移動して通信可能な距離を調べた。実験の結果、地図上の水平距離で約 787m の距離まで通信できることを確認した。昨年度まで使用していた通信機は現場は異なるが 100m 程度が限界であったため、通信距離は大幅に伸びた。なお、この現場では見通しが利かなくなったため、これ以上遠くでは通信ができなかった。

さらなる検証のため、市街地の見通しが効く場所において、同様の実験を実施した。実験の結果、水平距離で約 2.5 km 離れた場所で通信可能であることを確認した。



図 42:送信機の設置状況と送受信機の位置関係

次に、実運用プロトタイプ機の開発については、これまでの知見をもとに外注を進めた。従来からの主要な改良点としては、前述の通信機やプログラム、水位上昇検知の他に、電源と防水ケースの変更を行うこととした。電源は、小型軽量化、長寿命化、動作可能温度範囲の拡大を狙い、塩化チオニル電池を使用し、これに合わせて回路上の部品の見直しを検討した。また、防水ケースについては、アンテナのグランド確保と放熱性を考え、アルミ製の防水ケースに変更する。以上の内容について開発を進め、動作検証用の基板は完成したが、外注を依頼した業者から開発を遂行できないとの申し出があったため、外注を断念し、完成には至らなかった。

また、センサのデータを集約する親機を開発した。親機は、主に通信モジュール (LoRaWAN, 4G)、ボード PC、バッテリー、防水ボックス、三脚で構成される。センサから LoRaWAN 経由でデータを受け取ると、ボード PC で処理し、ローカルのファイルに保存するとともに、4G の携帯回線経由で Google スプレッドシートにもアップロードするようにした。なお、データの形式は、データ集約システムに複数台のセンサが計測した時系列データを受け渡しできるように、時刻、センサのデバイスID、計測データ、計測位置などを持った形式に設定した。

研究開発課題 5-3:環境評価 AI による河道閉塞崩壊部リスク評価

課題推進者: 永谷圭司 / 東京大学 大学院工学系研究科
岡谷貴之 / 理化学研究所 革新知能統合研究センター

実施内容:

【永谷 PI(全 subPI)分】

プロジェクト後半は、AI システム実現に必要なデータ(検証用・学習用の両方)の構築および災害現場の斜面崩壊リスク評価を行う AI システムの実現について、理化学研究所の岡谷グループと協力して研究開発を実施することを計画した。

まず、斜面崩壊評価を行う AI の構築にあたって課題となるのは学習データの少なさであるため、最初に量が少なくとも質のよい学習データを収集し、そしてその学習データを拡張し増加させる手法について検討を行った。最初のデータ収集においては、専門家(30年以上の経験を持つ地質・土木の専門家 8 名)が斜面崩壊画像を観察し、口頭でコメントする形式を採用した。これらの音声記録をテキスト化し、GPT-3.5 による要約・翻訳を経て、標準形式({Disaster Type: [TXT], Cause: [TXT], Observation: [[TXT], [TXT], [TXT], ...], Future risk: [TXT]})に変換した。このプロセスでは、68 枚の画像に対する専門家の詳細な解釈を取得した。

本手法では、まず VQA を行い、そして LLM を構築するというアプローチを取る。まず VQA 部分では、入力画像に対して 13 の質問(災害タイプ、原因、観察内容など)に回答するようなモデルを構築した。このモデルは MCAN (Modular Co-Attention Network) をベースとし、372 枚の画像(68 枚の元画像に加え、304 枚の追加画像)を使用した。データ拡張技術(クロッピング、フリッピング、回転、色調整、ノイズ付加など)を適用することで、訓練用 2,600 サンプル、検証用 400 サンプルに拡充した。各画像には 13 の質問-回答ペアが関連付けられ、訓練セットは合計 33,800 サンプルとなった。

第 2 段階では、VQA モデルの出力を入力として受け取り、斜面崩壊の詳細な分析と将来リスクの予測を行う LLM を実装した。LLM としては Alpaca 13B (LLaMA-2 のチャット版)を使用し、QLoRA によるパラメータ効率的な微調整を行った。具体的には、VQA モデルの予測結果を構造化し、「この斜面崩壊現場の将来リスクを分析し、その詳細な理由を含めてください」などの指示プロンプトとともに LLM に入力する。LLM はこれらの情報を基に、特に「Future risk」フィールドに焦点を当てた予測を生成する。

VQA-LLM ハイブリッドアプローチの最大の利点は、タスクを分割することにより、画像から直接認識可能な情報の抽出(第 1 段階)と高度な推論プロセス(第 2 段階)を分離できる点にある。これにより、第 1 段階のデータ収集コストを低減できるとともに、最終的な解釈に至るまでの中間ステップが自然言語で表現され、推論プロセスの透明性と解釈可能性が向上する。

表 5 に、GPT-4 に10点満点で正解データと比較させた上での VQA-LLM ハイブリッドモデルの評価結果を示す。また同じ表に理研/東北大の岡谷教授による MLLM の結果

も併記してある。本モデルは特に「将来リスク」カテゴリにおいて優れた性能を示した。Fine-tuning しないほうが高い総合スコアを達成しているが、これは、事前学習済み LLM が構造化された VQA 出力を効果的に処理し解釈できる能力を持っていることを示唆している。専門家による5点満点の評価(表 6: 専門家による正解と解析結果の比較結果(5点満点))でも、微調整なしの VQA-LLM ハイブリッドが特に観察と将来リスクの評価で高いスコアを達成した。

表 5: GPT-4 による正解と解析結果の比較結果(10点満点)

Model	Fine-tuning	GPT-4 Similarity Score				Overall
		Disaster Type	Cause	Observation	Future Risk	
VQA-LLM	✗	7.33	5.83	7.33	8.00	7.12
VQA-LLM	✓	7.33	5.33	7.33	7.67	6.92
MLLM	✗	4.33	4.50	3.67	4.67	4.29
MLLM	✓	7.33	6.83	7.50	7.50	7.29

表 6: 専門家による正解と解析結果の比較結果(5点満点)

Model	Fine-tuning	Expert Evaluation Score				Overall
		Disaster Type	Cause	Observation	Future Risk	
VQA-LLM	✗	3.83	3.00	4.00	4.17	3.75
VQA-LLM	✓	3.83	3.00	3.50	3.17	3.38
MLLM	✗	1.50	3.00	2.67	2.17	2.33
MLLM	✓	4.00	3.50	3.83	3.67	3.75

以下に実際の解析画像とその結果を示す。



災害の種類：土砂崩れまたは斜面崩壊

原因：その他

観測内容：土砂崩れは単一の地点に影響を及ぼし、斜面の上部には森林と住宅地が混在し、下部には主に住宅地が分布する特徴を有しています。付近に川が存在し、川の流れが遮断されています。特斜面には大きな岩、木、垂直の断崖が存在しますが、住宅、道路、橋などの人工構造物の損傷は報告されていません。また、崩落区域内での土のパイプ現象の発生も確認されていません。

今後のリスク:今後の土砂崩れの可能性は高く、特に大きな岩、木、垂直の断崖の存在が要因です。崩落区域内での土壌パイプリングの欠如は、当該地域がさらなる斜面崩壊のリスクにさらされていることを示しています。

また、CESIUM 情報共有プラットフォームへ本システムを統合するため、AWS 上にサーバを構築し、API の整備を行うシステムを構築した。その結果、別チームで構築した CESIUM 情報共有プラットフォームに AI の結果を API 接続で表示できるようになった。これは、データ統合、現場活用の基盤となる技術である。

【岡谷 PI 分】

当初設定した 3 つの項目に基づき、研究開発を進めた。以下に、各項目の内容、成果、進捗について順を追って説明する。なお、開発するマルチモーダル AI のことを、以前の報告書では VLM と呼んでいたが、関連分野における用語の使われ方の変化に従い、ここでは MLLM と呼ぶことにする。

(1) 災害現場のリスク評価可能な MLLM の構造(アーキテクチャ)の研究

2024 年度においては、MLLM の独自アーキテクチャを検討し、数多くの試行錯誤と評価実験を重ねた。その結果、画像から特徴を抽出する画像エンコーダ、抽出された特徴を「視覚トークン」に変換するプロジェクタ(Visual Projector)、および汎用の学習済み LLM から構成される MLLM を開発した。

このアーキテクチャには、斜面崩壊現場のリスク評価という目標を達成するために、以下の工夫を施した。まず、画像エンコーダには視覚的特徴を高精度に抽出するため、CLIP モデルの Vision Transformer (ViT-L/14) を採用した。また、少ないデータで効率的に学習を進めるため、QLoRA を導入し、学習効率の向上を図った。

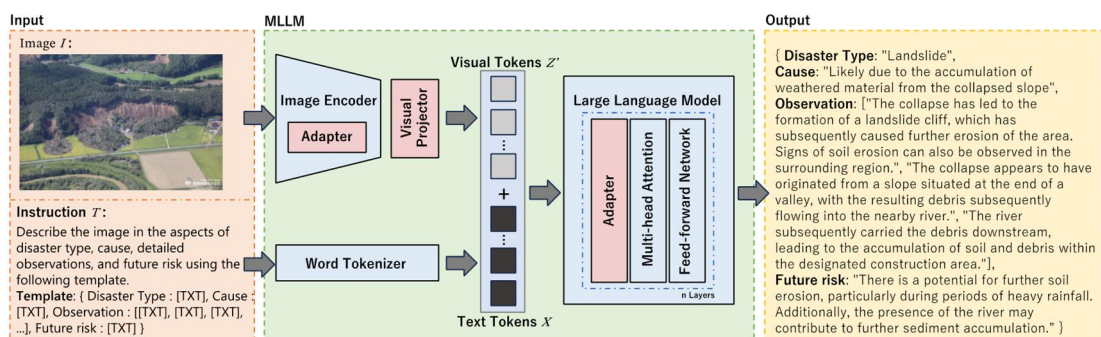


図 43: 開発した VLM (MLLM) の構造と推論の様子

その後、2024 年から 2025 年にかけて、関連分野においてマルチモーダル AI がますます注目を集め、AI 研究の中核に位置づけられるようになり、MLLM のアーキテクチャに関する研究も活発に進展した。こうした動向を踏まえ、独自開発に加えて、LLaVA、Mantis、Qwen-VL などの既存 MLLM を本計画で活用できるかについても検討を行った。

これらの MLLM の多くは、膨大なデータを用いて多様なマルチモーダルタスクを大規模に学習しており、その結果、一般的なタスクにおける性能が従来に比べて大幅に向上している。しかし、こうした学習を手元で再現するのはコスト的に現実的ではないため、本計画では既存モデルの微調整による活用を試みた。その結果、大幅な精度向上を達成できた。

(2) MLLM の学習・推論方法の研究

MLLM の学習方法について多角的に検討し、分野の最新成果を取り入れた結果、以下のような手法を採用した。独自開発した MLLM は、画像エンコーダと大規模言語モデル (LLM) から構成されている。画像エンコーダには、Web 上の 400 万件以上の画像・テキストペアで学習されたモデルを使用し、その学習には視覚指示チューニング (Visual Instruction Tuning) を用いた。具体的には、画像とそれに対応するプロンプト、および推論過程で生成されたトークンを入力とし、次のトークンを予測する。この学習では、画像エンコーダと LLM 本体の大部分のパラメータを凍結し、追加したアダプターモジュールおよびプロジェクトのパラメータのみを更新する。これにより、トレーニング効率を高めつつ、基盤モデルの性能を最大限に引き出すことを目指した。また、QLoRA を用いて、視覚情報とテキスト情報の一部パラメータのみを効率的に更新する最適化も行った。

一方、既存の MLLM の学習においては、指示チューニングに加えて、CoT (Chain of Thought) を強化学習で学習する手法を採用した。本研究では、Qwen-2.5-VL-Instruct を基盤とし、後述のデータを用いて学習を行った。

学習過程では、モデル出力を評価する「報酬設計」を工夫した。具体的には、以下の 4 つのスコアを組み合わせた。

- ① 形式報酬: 出力において指定されたタグ (例: <think> や <answer>) が正しく使われているかを評価する。
- ② 精度報酬: モデルの出力が専門家の模範解答とどの程度一致するかをスコア化する。
- ③ 専門表現スコア: 専門用語や技術的表現が適切に使われているかを評価する。
- ④ 情報完全性スコア: 必要な情報が漏れなく含まれているかを判定する。

さらに、誤った情報や過剰な自信表現を避けるため、誤情報やあいまいな出力には減点する仕組みも導入した。こうした報酬設計により、非専門家にも信頼性の高い出力が得られるよう調整している。なお、当初計画に含まれていた RAG (Retrieval-Augmented Generation) についても検討を行ったが、安定的な性能向上には至らなかった。

(3) 斜面崩壊現場を対象とした学習データの構造設計と構築

学習および評価のために、以下の 4 種類のデータセットを構築した。

1 つ目は、国内の地滑り災害に関する 68 枚の画像に対し、2 名の専門家による口述解説を記録したものである。専門家は、災害の原因や観察された特徴、今後のリスクについて自由形式で話し、その音声を音声認識システムでテキストに変換した。得られたテキストは質問応答形式や説明文形式に整理された。この作業は全 G と国際航業 G が共同で実施し、岡谷 G では日本語テキストを GPT-3.5 で英訳し、さらに GPT-4 を用いて AI 学習に適した形式に整形した。整形データは、「災害の種類」「原因」「観察結果」「未来のリスク」の 4 要素から構成される。加えて、GPT-3.5 による言い換え (paraphrasing) でデータを拡張し、136 件のサンプルを得た。そのうち 124 件を学習用、12 件を評価用とした。

2 つ目は、国際航業チームから提供された、149 枚の地滑り災害画像と短いキャプション

のデータである。これらを基に MLLM で 742 件の質問と回答のペアを生成し学習に利用した。

3 つ目は、地滑りなどの生じていない山岳地帯の画像であり、ウェブから適当なキーワードを用いてダウンロードしたものである。これらはテスト用にのみ用いる。

4 つ目は、学術論文からの画像とキャプションのペアである。「landslide」や「earthquake」などのキーワードを使って数万本の論文を検索し、MLLM でふさわしいペアを抽出した。上記のペアに基づき、MLLM を用いて Q&A を合成した。結果として、約 1.2 万本の論文から 20,736 件の Q&A を生成した。これらは、他のデータセットとあわせて、MLLM の学習に用いた。

下図は、開発した MLLM による画像分析の結果の一例を示したものである。

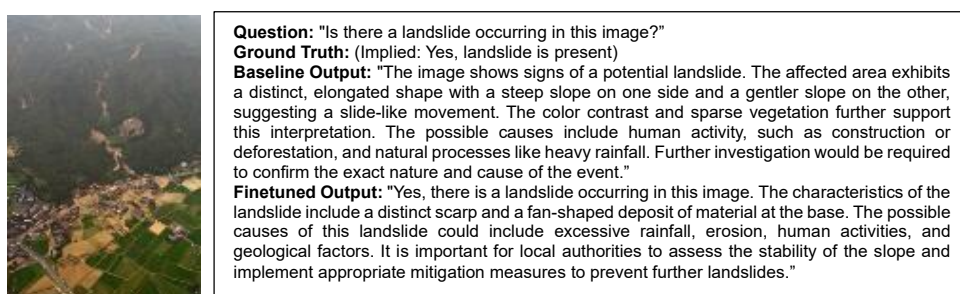


図 44: 実行例。左: 入力画像。右: MLLM の出力。

開発した MLLM の精度評価は、モデルの生成回答と専門家の正解例との一致度を 1 点から 10 点の整数スケールで採点する方式を採用している。評価にはテスト用 Q&A 画像 6 枚、キャプション生成のための画像 8 枚、非災害画像 10 枚の計 24 枚のサンプルを用意し、各サンプルでは〈think〉タグ内の推論過程と〈answer〉タグ内の最終回答を取得して LLM が専門家に代わって評価を行う。評価時には出力内容を参照回答と照合し、事実誤りや情報漏れの有無を確認したうえで、完全一致なら 10 点、部分的な不足や表現の一貫性欠如があれば 5~9 点、重大な誤りや無関係情報が含まれる場合は 1~4 点の基準でスコアを付与した。その後、全サンプルのスコアを集計してモデルごとの平均値を算出し、ベースモデルと微調整モデルの精度差を定量的に評価した。下表に示すように、開発した強化学習ベースの手法はベースラインや従来の指示学習を大幅に上回るスコア 8.15 を達成し、その有効性が確認できた。

表 7: GPT-4 を用いた正解との類似度評価結果 (10段階スコア)

評価データおよび項目	ベースライン	指示学習	強化学習
専門家詳細データ (Q&A 形式)	7.6	7.52	7.88
専門家詳細データ (キャプション)	7.17	7.43	8.00
専門家簡易データ	6.51	6.20	7.93
非災害画像	9.8	9.40	8.80
平均スコア	7.77	7.63	8.15

研究開発課題 5-4: (河道閉塞閉塞部地形変位調査用センサの現場実装)

課題推進者：藤井 浩光（千葉工業大学）

実施内容：

河道閉塞対応の現場においては、現場の地形変位に関する情報を継続的に取得する必要がある。その実現のため本研究開発課題では、以下の 3 つの大きな要求事項を設定している。

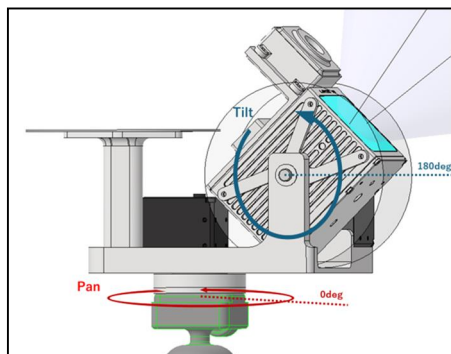
- (A) 災害発生直後の屋外環境におけるシステムの継続的な稼働
- (B) 起伏変化の激しい環境における網羅的な広域地形計測
- (C) 遠隔地における地形変位データの定期的な獲得

(A)に関しては、ドローンで運搬したセンサシステムは屋外である河道閉塞の現場に設置されるため、強風や雨天時にも故障せず継続的に稼働するための防塵・防水の対応が最低限必須となる。令和6年度は、国際保護規格 (IP:International Protection 規格) で定められる防水等級 IPX4 以上の性能を実現するために、主要な機器および筐体などの保護部品に関しては、要求する防水性を備えた製品 (表 8)を選定し統合した。

表 8: 選定した主要機器と防塵・防水等級

機器	製品名	防塵・防水等級
地形計測用3次元 LiDAR	Livox AVIA	IP67
姿勢制御用サーボモータ	Dynamixel XW540-T140-R	IP68
GNSSアンテナ	ANN-MB1-00	IP67
地磁気センサ	WitMotion HWT905-RS485	IP67

また、複数のセンサシステムを相互補完的に配置することで地形計測における死角を解消するため、これらの機器を組み込んだセンサシステムを開発した。さらに、令和7年度、災害対応用のセンサシステムとしての仕様を検討し、特に河道閉塞対応の現場にドローンで運搬し設置するためのセンサシステム吊り下げ用のジグを開発した。具体的には、① 地上設置の際にドローンから速やかに離脱可能な機構、および ② 離脱後にセンサシステムの計測を妨げない展開機構を有する懸架用インターフェースを開発した。



(a) 設計図面



(b) 実機

図 45: 試作機

(B)に関しては、起伏に激しい地形が想定される河道閉塞の現場では、監視対象となる地形を隈なく可能な限り広範囲で効率良く計測する必要がある。本研究課題では監視対象である現場の地形に応じて複数のセンサを適切に配置するための適地配置法の構築を目標としており、特に当該年度は以下の2つの課題を達成した。

1. 指定した監視対象領域に対して、複数のセンサが互いの視野の死角を補完し、カバー率を最大化するセンサ配置計画
2. ドローンによる設置における位置ずれやセンサの位置と監視対象の距離に起因する計測の疎密を均一化するセンサ配置計画

令和7年度には、提案する適地配置法を実際の河道閉塞現場を想定した環境で検証した。具体的には、2004年に発生した新潟県中越地震で大規模な河道閉塞が生じた新潟県長岡市芋川流域や、砂防ダムが築かれ起伏のある広大な地形が観測可能な群馬県浅間山片蓋川の砂防堰堤などで2台以上のセンサを用いた計測実験を行った。以上のように、広域地形計測に関するマイルストーンを達成した。

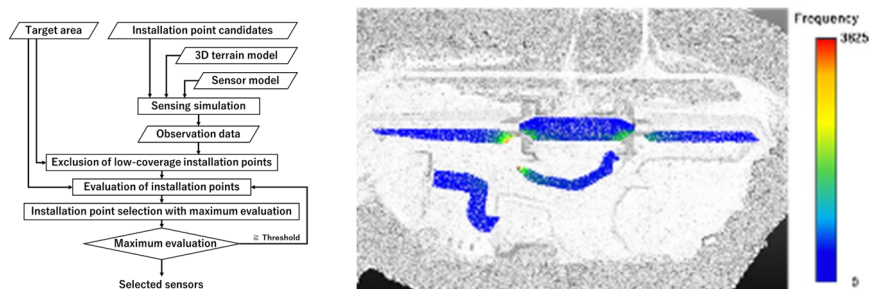


図 46: 当該年度に構築した配置計画アルゴリズム(左)と最適化結果(右)

(C)に関しては、センサシステムにより計測した地形変位データは、安全な遠隔地にいる災害対応の担当者や技術者に提供される必要がある。しかし、3次元の地形データは一般に容量が膨大となるため、その伝送には5Gなどの高速通信網が必要とされるが、災害発生直後との現場でそれらのネットワークを敷設する暇はない。そこで、膨大な容量の地形データを長距離無線通信に載せて送信するために、高反射素材を用いたランドマーク(リフレクタ)を用いた省データ化のための方法論を構築した。具体的にはリフレクタを監視対象とし、その周囲の地形データのみを抽出することでデータ量を削減した。また、長距離小容量通信用の通信機器を製作した。通信用の無線モジュールには公称250 kbps (IEEE802.15.4)のモノワイヤレス製 TWELITE RED を用いた。2004年の新潟県中越地震で実際に河道閉塞が発生した新潟県長岡市芋川で通信実験を行った。実験は、見通しの良い約650 m～750 mの複数の地点において実施し、いずれも地形データの通信が可能であることを確認した。実測は異なる容量の地形データを用いて行い、10分間あたり約0.6 MB(約3万点)の地形データの送信に成功し、LPWA(Low Power Wide Area)無線環境下での通信により地形データを長距離伝送可能であることを確認した。令和7年度には、現場に散布したリフレクタの変位およびリフレクタ周囲の地形などの小容量データについて、遠隔地にある基地局への伝送を実現し、CESIUM 情報共有プラットフォームへと集約するためのデータ形式などのソフトウェアインターフェイスを策定し実装した。

(6) 研究開発項目6:河道閉塞応急復旧作業のシステムインテグレーション

当該研究開発項目の概要：

河道閉塞応急復旧作業を実現するためのシステムを構築する。このシステムでは、本研究開発プロジェクト前半の研究開発課題 1-3 で開発を進めてきた「建設機械の現場進入判断を目的とした地盤調査技術」、研究開発課題 1-5 で開発を進めてきた「河道閉塞環境における応急復旧作業技術（軟弱地盤対応マット、排水ポンプ設置）」、研究開発課題 1-1 で開発を進めてきた「河道閉塞対応基盤技術の現場適応を可能とする高精度作業技術（ホース固定のための作業）」、ならびに、研究開発課題 3-1 で開発を進めてきた「河道閉塞環境における応急復旧作業を支援するセンサポッド技術」から構成される（図 47）。これらの技術をインテグレーションすることで、現場には限られた人数（2～3人）の監督者（作業員0人）による、無人建設ロボットが危険エリアに進入して応急復旧作業を実施するシステムの実現が可能となる。

目標：2025年末、小型建設ロボットを中心とした河道閉塞環境における応急復旧作業技術を統合したシステムを実現する。また、TRL5の達成を示すため、「河道閉塞の災害対応フロー」に記した河道閉塞対応シナリオの⑥～⑦を、模擬河道閉塞環境にて実施する。

⑥ 応急復旧作業の準備（地盤の広域詳細調査／作業路の設置／センサポッドの設置）を遠隔から実行。

⑦ 排水ポンプの設置ならびに排水動作を遠隔より実行。

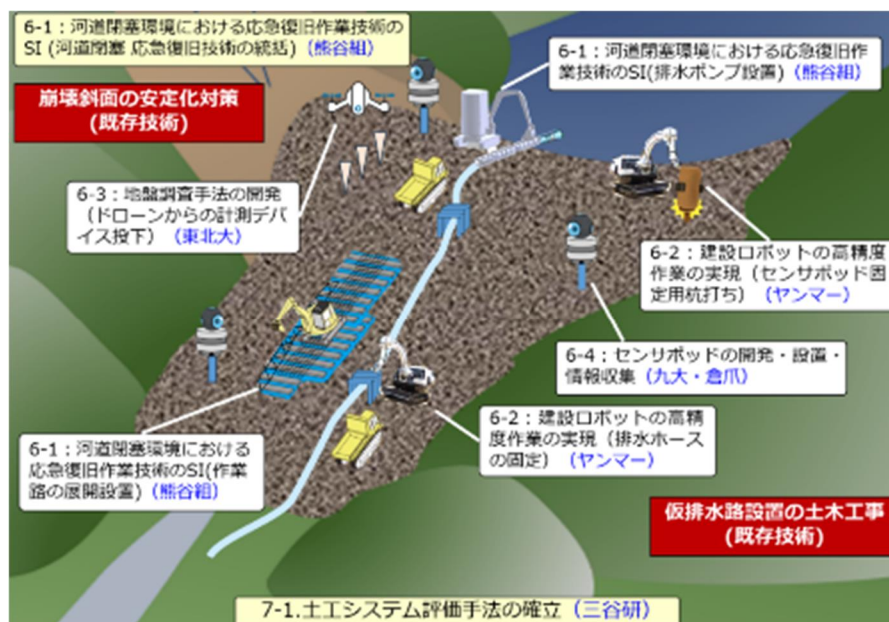


図 47:研究開発項目 6 のシステムインテグレーション

研究開発課題 6-1:河道閉塞環境における応急復旧作業技術のシステムインテグレーション

課題推進者:北原成郎 (株式会社熊谷組)

実施内容:

本研究は、研究開発項目 6「河道閉塞応急復旧作業のシステムインテグレーション」内の研究開発課題「6-1. 河道閉塞環境における応急復旧作業技術のシステムインテグレーション」を担当している。具体的な研究課題は、「河道閉塞用作業機構の開発」である。

本研究開発課題では、軟弱地盤における軽量素材を用いた作業路の構築および展開設置、小型建設ロボットによる排水ポンプの設置技術、小型建設ロボットの遠隔操作支援システム(マシンガイダンス)、VR ゴーグルによる小型建設ロボットの可視化インターフェースの研究開発を行う。これらの技術を、研究開発項目 6 において他機関が研究開発を行うセンサポッドの遠隔設置や排水ホースの固定、現場進入判断を目的とした地盤調査手法などの技術とシステム統合を行い、統合シナリオ実験を実施した。

具体的には、研究開発課題 1-5 で研究開発を進めてきた、軟弱地盤における軽量素材を用いた作業路の展開設置技術の開発ならびに、油圧ショベルによる排水ポンプの設置技術の研究開発を継続し、これらの技術を現場実装すると共に、研究開発項目 6 において他機関が研究開発を行う各技術と統合した河道閉塞応急復旧システムを構築した。このため、令和 7 年度は、作業路用のマットのシート材と芯材の選定による強度向上と軽量化、自動走行クローラダンプによる資機材運搬および設置(図 48)、建設機械の遠隔操作による作業路展開設置(図 49)、連結型排水ポンプの設置フレームの軽量化と連結効率化、連結型排水ポンプ設置フレームによる排水ポンプの設置および排水(図 50)を実施した。軽量素材の運搬および展開設置技術の開発、および排水ポンプの設置技術の開発については、両システムを統合したテストフィールドでの評価試験を令和 7 年 3 月、6 月に実施し、動作確認および改良を行った。7 月の九州大学のフィールド実験では、設置した操作室より作業路用マット敷設および連結型排水ポンプ設置フレームを活用し、ロータリーフォーク搭載の油圧ショベル一台と自動走行クローラダンプ 2 台による排水ポンプの設置を統合シナリオ実験として実施した。

さらに、小型建設ロボットの遠隔操作支援システムでは、無理な作業による機械の転倒を防ぐため、マシンガイダンスにより油圧ショベルの姿勢を把握し、危険な作業を未然に防いだ(図 51)。ロータリーフォークのマシンガイダンスについては事例が無いため、IMU とロータリーエンコーダの 2 パターンを試行し、精度良く連動したロータリーエンコーダによる方法を採用した。土板上下の表現のために 1 台の IMU を設置した。履帯は水中に沈むことも想定しているため、耐圧・耐水容器へ IMU を格納した。また、作業の効率化を図るため、オペレータが油圧ショベルで作業をしながら、クローラダンプの走行を自動化して、並行作業を実施した。さらに、VR ゴーグルによる小型建設ロボットの可視化インターフェースの開発のため、遠隔操作室からの油圧ショベルとクローラダンプの操作を仮想空間で再現した。これは、九州大学の Unity 環境で構築されている。そのネットワーク情報を確認し、建設機械に搭載されている GPS 受信機のネットワーク設定を九州大学で利用するネットワークセグメントに変更して対応をした。これらにより、以下の目標を達成した。

- ① コーン指数 200～300kN/m² の軟弱地盤において、提案手法の作業路の設置により、建設ロボットが走行可能(もしくは作業可能)なことを確認。
- ② 建設ロボットにより、河道閉塞模擬環境において、500L/min 以上の性能を有する排水ポンプならびに 50m の排水ホースをセンサポッド等の映像に基づく遠隔から設置。作業は、1 台の排水ポンプ・排水ホースの組につき 2 時間以内に実施。
- ③ 作業路用資材、水中ポンプおよびポンプ設置フレームなどの資機材は、出発エリアから作業エリアまで建設ロボットの自律走行による運搬を実施。



図 48: 自動走行クローラダンプによる資機材運搬および設置



図 49: 油圧ショベルの遠隔操作による作業路展開設置



図 50: 連結型排水ポンプ設置フレームによる排水ポンプの設置および排水

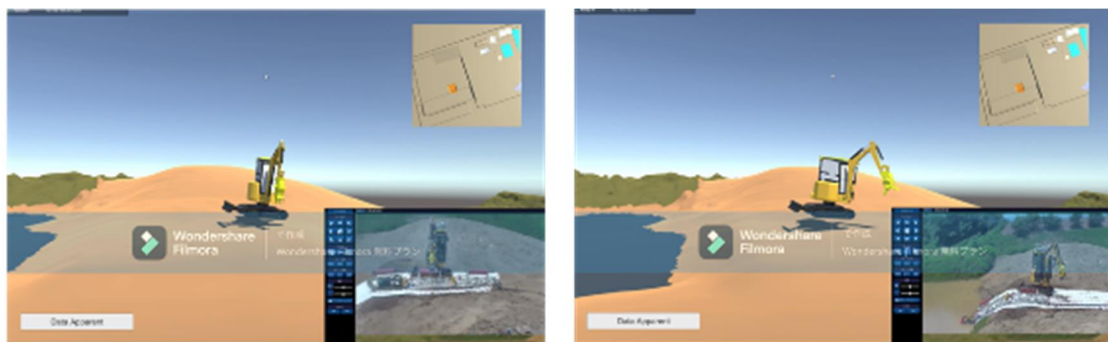


図 51: マシンガイダンスによる油圧ショベルの姿勢の把握

研究開発課題 6-2:河道閉塞対応基盤技術の現場適応を可能とする高精度作業機の研究開発
 課題推進者:杉浦恒 (ヤンマーホールディングス株式会社 技術本部)

実施内容:

[1]作業アームの力制御の改良

バケット軸搭載用 SEA の CAFE への搭載および現場で使用するための検証

[2] センサポッド/排水ホース固定用アタッチメントの設計、固定・設置機能開発

九州大学倉爪グループおよび熊谷組との連携。デモを実施

[3]その他社会実装に向けての取り組み

[4]作業アームの力制御の改良

2024 年度に開発したトーションバー型 SEA を CAFE に搭載し、現場利用に向けた検証を実施した。従来のコイルスプリング型 SEA に比べ、小型化と高剛性化を実現している(図 52)。本年度は実機搭載と性能検証を行い、目標値である制御性能を満たすとともに、追加実験による特性評価も行った。

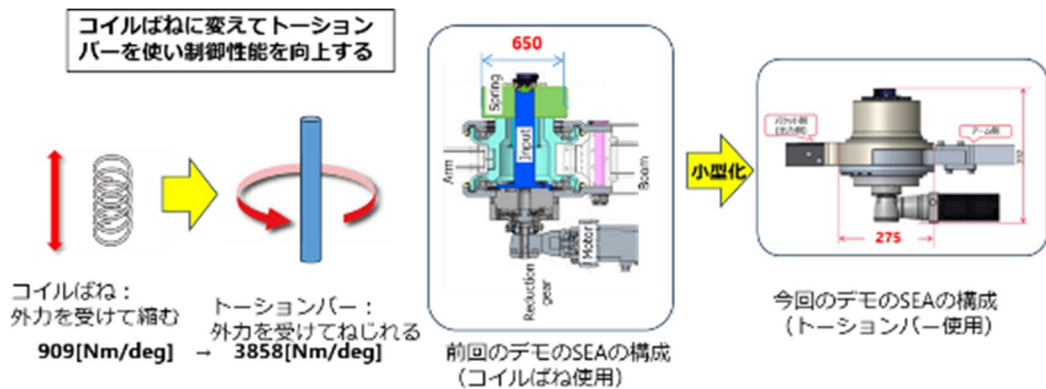


図 52:SEA の改良。コイルばねからトーションバーへの変更

本システムはダンパ機構を備えていないため、共振周波数付近での振動抑制が重要となる。一般に剛性を高めると制御帯域は拡大し制御性能は向上するが、共振周波数も上昇するため、その影響を考慮する必要がある。本システムではサーボの制御周期が約 200Hz であることから、トーションバーおよび負荷側(バケット側)の共振周波数を約 90Hz に設定し、制御可能範囲に収めた。この結果、バケット先端に衝撃が加わっても共振は発生しなかった。また、位置追従性能はステップ応答試験により確認し、無負荷時の時定数は 14msec と産業用ロボット同等の応答性を示した。また、停止位置ばらつきやヒステリシスも小さく、優れた線形性を有する。衝撃試験では、先端衝撃力 2000Nm まで安定動作を確認し、位置制御精度・トルク制御精度ともに目標値(また従来のアーム、ブーム関節に加え、バケット関節に改良した SEA を搭載し、次に説明する[2]の作業を行った。

表 9)を達成した。また従来のアーム、ブーム関節に加え、バケット関節に改良した SEA を搭載し、次に説明する[2]の作業を行った。

表 9:目標値と達成状況

	目標値	実績
位置制御精度	±0.5[deg]	1.0 [deg] (peak to peak) 0.03866[deg] (peak to peak)
力精度	±35.0[Nm]	70[Nm] (peak to peak) 70[Nm] (peak to peak)

[2] センサポッド/排水ホース固定用アタッチメントの設計、固定・設置機能開発

九州大学倉爪グループのセンサポッド設置、熊谷組の排水ホース固定用杭打ちを遠隔で実施可能とするアタッチメントを開発し、CAFE に搭載して動作デモを実施した(図 53)。杭やセンサポッドは収納カセットから自動取り出し可能であり、設置時は反力を計測しながら 2500Nm 程度まで挿入を行った。また、位置・姿勢データを ROS2 ネット経由で送信し、倉爪グループのデジタルツインに統合表示した(図 54)。



図 53:CAFE に搭載したアタッチメントによりセンサポッドを挿入する様子



図 54:九州大学倉爪グループのセンサポッドのデジタルツイン上での統合

[3]その他社会実装に向けての取り組み

開発したトーションバー型 SEA は小型軽量化により土木分野以外での利用も期待できる。そこで持ち運び可能な SEA 性能を体験可能なデモ機を製作し、様々な展示会での実演を通じてニーズ調査を行った(図 55)。



図 55: ニーズ把握のための SEA デモ機

研究開発課題 6-3: (建設機械の現場進入判断を目的とした地盤調査手法の開発)

課題推進者: 高橋弘 (東北大学 大学院環境科学研究科)

実施内容:

本プロジェクトでは、加速度センサ内蔵の球体を用いて、球体が地盤表面に衝突する際の衝撃加速度データを収集した。供試地盤としては、真砂土を用いた砂質土地盤と真砂土に粘土を混合した粘性土地盤に対して計測を行った。なお、真砂土と粘土の混合比は、乾燥質量比で6:1とした。

(1) 宮城県大崎市三本木での地盤強度計測試験

試験は、(株)佐藤工務店が宮城県大崎市三本木に所有する重機フィールドをお借りして行った。2m×2m×0.2mの正方形の穴を3か所用意し、その中に真砂土および真砂土と粘土の混合物を投入し、締固めの程度を様々に変化させながら強度の異なる供試地盤を作成した。供試地盤は基本的に平坦としたが、地滑り現場を模擬するため、傾斜20度の緩詰め傾斜地盤も作成した。コーン指数 q_c と合成衝撃加速度 a の関係を示す。合成衝撃速度 a は、 x, y, z 軸方向それぞれの衝撃加速度 a_x, a_y, a_z を求め、次式から算出した値である。

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

図中の青●印は、砂質土地盤に対する結果を示しており、茶色●印は、粘土地盤に対する結果を示している。様々な条件で供試地盤を作成したが、砂質土と粘土はそれぞれ1つの曲線近傍に分布していることが分かる。本データから、砂質土地盤および粘土地盤に対して、それぞれ以下の近似式を得ることができた。

$$q_c = 10.1a^{1.63} \quad \text{砂質土} \quad (2)$$

$$q_c = 3.79a^{1.80} \quad \text{粘土} \quad (3)$$

図 56 にコーン指数の実測値と式(2)および式(3)から求められる推定値の比較を示す。図に示されるように、砂質土および粘土ともに±40%の範囲内にデータが分布していることが分かる。緑の網掛け部分は「200kN/m²以上か以下か」を正しく判断できた領域になる。全38点の試験結果中、34点がこの領域内に入っており、判断精度は89%であった。従って、災害現場での土質が砂質土であるか粘土であるか区別できれば、本手法を用いて衝撃加速度を取得し、式(2)あるいは式(3)から地盤強度を推定することが可能であると考えられる。

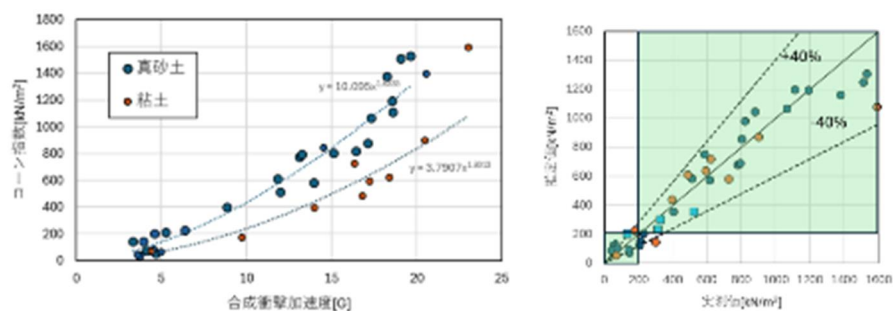


図 56: コーン指数と合成衝撃加速度の関係(左)とコーン指数の実測値と推定値の比較

(2) 模擬河道閉塞現場における地盤強度計測

令和7年7月の成果発表デモに先立ち、九州大学キャンパス内に造成された模擬河道閉塞現場において、事前に現場全体の地盤強度計測を試みた。初めに地形形状計測用ドローンでエリア全体を撮影し、オルソ画像を作成した。この画像を基に、5m 間隔で計測点を設定し、ドローンの飛行経路を計画した。RTK 対応のドローン(DJI 社製 T10)にこの飛行計画を入力し、設定した座標点に飛行させ、その地点でドローンを手動でホバリングさせ、球体を投下し、衝撃加速度を記録した。本現場の土質は真砂土であったため、式(2)を用いて合成衝撃加速度からコーン指数を求め、図示した結果が図 57 である。コーン指数が 200 kN/m^2 以下を赤色で、 $200 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ を茶色で、 $300 \sim 400 \text{ kN/m}^2$ を黄色で、 $400 \sim 600 \text{ kN/m}^2$ を緑色で、 600 kN/m^2 以上を青色で表示している。つまり暖色系が強い領域ほど軟弱であり、寒色系が強い領域ほど地盤が固いことを意味している。図 57 には 170 点のデータが表示されているが、これらは概ね 5m 間隔の離散データであるため、計測領域内を 1m メッシュに区切り、このメッシュ内のコーン指数を 170 点の離散データから内挿し、コンター図として表示した。地滑り領域(図では下側)は暖色系が強く、下流側(図では上側)では寒色系が強いことが分かる。一部、下流部分にも赤色あるいは茶色の領域が見られるが、これは事前計測の前日に雨が降り、水はけの悪い箇所が残っていたためである。図 57 に示すように、 $50\text{m} \times 50\text{m}$ エリア全体の地盤強度マップを作成し得たことは、本計測手法は、実際の災害現場でも十分に適用可能であると考察される。

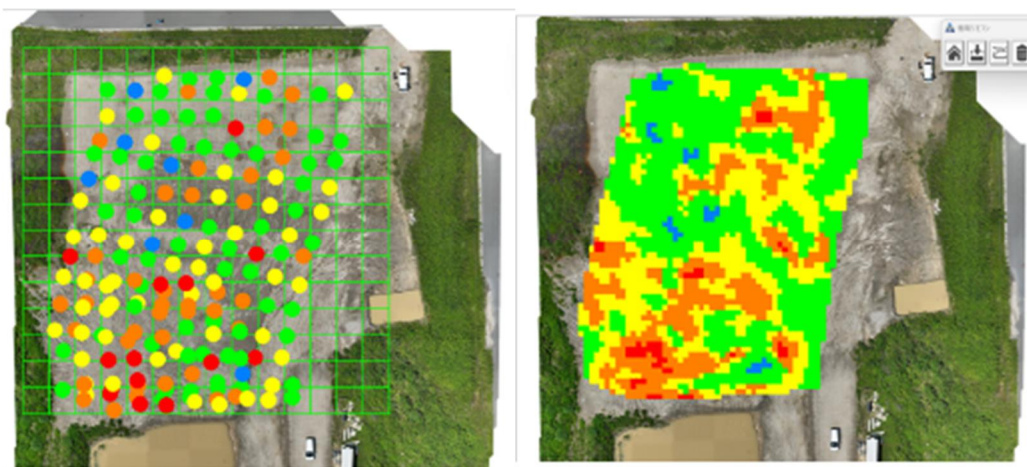


図 57: 九州大学キャンパス内に造成された模擬河道閉塞現場における地盤強度計測結果(左)と模擬河道閉塞現場全体における地盤強度コンター図

(3) 山形県庄内町板敷地内の地滑り・河道閉塞現場での計測

2024年7月25日の豪雨により、山形県庄内町板敷において地滑りが発生し、地区内を流れる小さな立谷沢川で小規模な河道閉塞が発生した。現在は、立谷沢川下流部分では土砂撤去などの工事が行われているが、上流部分はまだ手付かずの状態、斜面から流出した土砂が堆積している状態なので、この現場に本手法を適用し、流出土砂の地盤強度計測試験を実施した。

加速度センサ内蔵の球体を吊り下げたドローンを①の地点からさらに下流の平地から発進させ、上空約 10m でドローンをホバリングさせ、球体を地盤上に投下して衝撃加速度を

センサ内に記録するとともに、実際にコーン貫入試験を現場で行い、コーン指数の真値を計測した。

図 58 にコーン指数と合成衝撃加速度の関係を示す。図中の緑の■印は、2024 年度、①の地点で計測した結果であり、青の●印は、2025 年度の計測結果を示している。いずれも、真砂土を用いて三本木フィールドで行った試験結果とほぼ一致していることが分かる。また、庄内町の災害現場で計測した値を確認した結果、実際の災害現場でも±40%の精度でコーン指数を計測できることが分かった。つまり、実際の災害現場でも本手法を用いることにより、現場に人が立ち入ることなく、安全に地盤強度を計測できることが確認された。

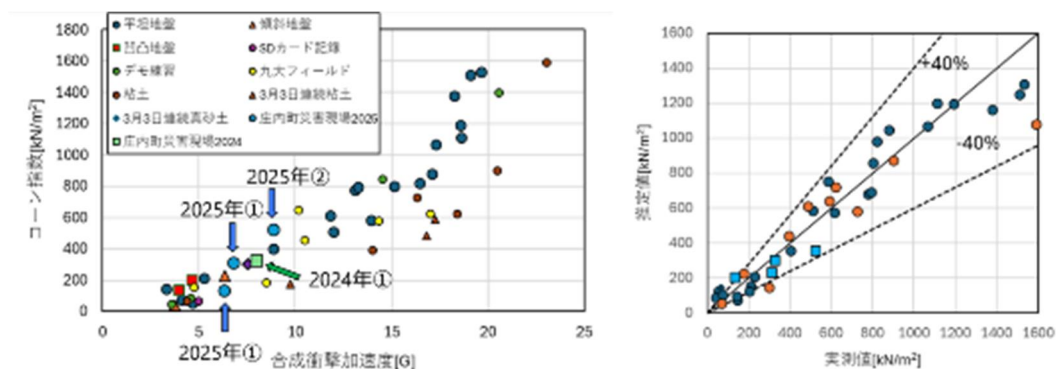


図 58: コーン指数と合成衝撃加速度の関係(左)とコーン指数の実測値と推定値の比較

(4) 地盤強度データと CESIUM 情報共有プラットフォームとの統合

CESIUM 情報共有プラットフォーム上に、取得した地盤強度データ(コーン指数)を表示した結果を図 59 に示す。これにより、取得した地盤強度データ(コーン指数)を統合することができた。

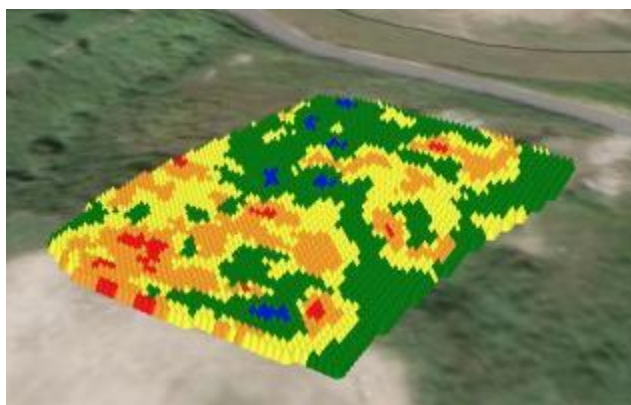


図 59: 取得した地盤強度データ(コーン指数)を CESIUM 情報共有プラットフォームに統合した結果表示

研究開発課題 6-4:河道閉塞環境における応急復旧作業を支援するセンサポッドの開発

課題推進者: 倉爪亮 (九州大学 大学院システム情報科学研究所)

実施内容:

機械やロボットに搭載したセンサのみで、フィールドにおける環境情報を漏れなく把握し、状況を俯瞰することは困難である。そこで、本研究開発課題では、動作に必要な環境認識や環境評価を行うための情報を取得するセンサポッドを構築する。

本研究開発課題は、上記目的の達成に向け、研究開発課題 3-2.「センサポッド要素技術のインテグレーション」において開発したセンサポッド初号機、初号改良機、およびセンサポッド実証機におけるカメラ技術、振動センサ、低消費電力ボード PC、高精度 GNSS 基板などのコア技術を活用し、周囲 360° 環境の状況をリアルタイムで把握するための全周カメラや高精度 GNSS 受信機、IMU、無線機器を搭載した、環境設置型センサポッド (通称:杭型センサポッド)を設計、開発した。また、遠隔操縦される協働 AI ロボットにより、4 台のセンサポッドの設置を実現した。

研究開発課題 3-2.「センサポッド要素技術のインテグレーション」において開発したセンサポッド初号改良機 (通称:センサポッド)、センサポッド実証機 (通称:プチセンサポッド)、および新たに研究開発課題 6-4「河道閉塞環境における応急復旧作業を支援するセンサポッドの開発」にて開発した環境設置型センサポッド (通称:杭型センサポッド)を図 60 に示す。



図 60: センサポッド初号改良機、実証機、環境設置型センサポッド

環境設置型センサポッド (通称:杭型センサポッド)

以下、杭型センサポッドに搭載されるカメラや振動計測センサ、GNSS アンテナ、およびこれらを制御する制御用マイコンやバッテリーについて述べる。

制御用マイコンとして、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 SPRESENSE メインボードを採用した。本プロセッサには、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。杭型センサポッドでは、搭載する 2 台のカメラを制御するため、2 台の SPRESENSE を使用している。通信は、SPRESENSE メインボードに Wi-Fi モジュール (IDY、iS110B) を接続した Wi-Fi による無線通信、あるいは有線イーサネットアドオンボード (SSCI-080750、スイッチサイエンス) に様々なネットワーク機器を接続した通信が可

能である。後述するシステムでは、図 61 に示すように、自作ボードでメインボードと接続したイーサネットアドオンボードと、メッシュネットワークである Rajant Cardinal BreadCrumb を、スイッチングハブ(LAN-GIGAP301、サンワサプライ)で接続した無線通信システムを利用した。なお、Rajant メッシュネットワークのモジュール以外にも、LTE/5G 携帯回線モジュールなど様々なネットワークにも対応可能である。

さらに、災害復旧時の現場の監視のため、220° HDR カメラ(インタニヤ、HDR VR 220 カメラ)を杭型センサポッドの両側に 2 つ搭載した。センサポッド実証機では図 60 のように上側に 1 台の 220° カメラを搭載していたが、両側に搭載することにより、真下も含めた全方向の監視を可能としている。

研究開発課題 3-1 で実施した、地盤の固さを計測するための振動計測センサとして、6 軸加速度計・ジャイロセンサ (BMI270・データ出力 12.5Hz~1.6kHz) の Addon ボード (fooping-tech) を搭載した。ここでは、このうち加速度計のみを用い、振動計測センサとして 1 台の SPRESENSE と接続されている。

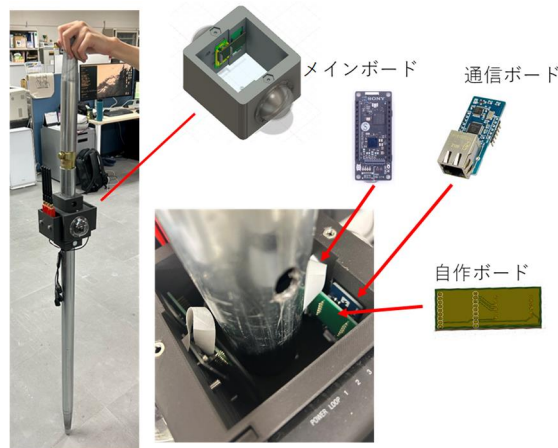


図 61: 杭型センサポッドと内部構成

施工現場における杭型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)受信機を使用した。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、サブメートル級の高精度測位が可能である。バッテリー(4800mAh, GH-BTCAN48, ニトリ)は、杭の中に 6 つ(最大 7 つ)搭載可能である。Wi-Fi モジュールによる Wi-Fi 通信を利用する場合、28000mAh (4800mAh x 6)で約 57 時間(1 日 8 時間駆動で 7.2 日間)の長期運用が可能である。なお、メッシュネットワーク(Rajant)を用いた場合、設計上の駆動予想時間 9.6 時間である。

図 61 に示した杭型センサポッドは、スイッチングハブや Rajant メッシュネットワーク無線機器が外置きのため、防水防塵機能は有していない。そこで新たに、すべての機器を内部に格納した改良型杭型センサポッドを開発した。なお、杭型センサポッド(改良型)では、みちびき(QZSS)用アンテナを新たに外付けすることで、GNSS 測位の安定性を図っている。この新型杭型センサポッドを 4 台製作した。

杭型センサポッドから取得したカメラ画像を用いて、VR ゴーグルによる可視化インターフ

ケースにより、没入感高く監視を行った。実験は、九州大学の伊都キャンパス内の土木施工現場を模した実験場において実施した。杭型センサポッドから取得する 2 つの 270° HDR 画像を 360° カメラ映像に変換した結果を図 62 に示す。カメラ画像については、高解像度(640x480)は 1Hz、中解像度(320x240)は 3Hz で 360 度画像を送信し、リアルタイムで 360 度画像を用いた監視が可能であることを確認した。また搭載した GNSS 受信機、IMU、Rajant メッシュネットワーク無線機器についても、正常動作を確認した。

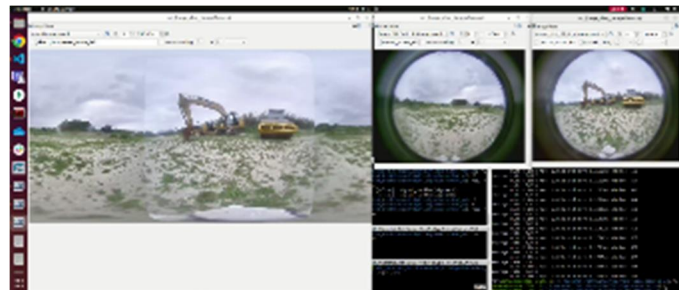


図 62:360°画像の例

さらに、遠隔操縦される協働 AI ロボット(ヤンマー)によりセンサポッドの設置するために、協働ロボットの把持部およびセンサポッド運搬台を製作し、杭型センサポッドの運搬、および協働 AI ロボットのマニピュレータを用いた地面への設置実験を行った。図 63 に突入作業の様子を示す。杭型センサポッドの設置にかかる時間は 60~100s/本であり、移動も含めて 1 時間以内に 4 台のセンサポッドが設置可能であることを確認した。



図 63:地面への突入実験

さらに、Cyber-Physical System プラットフォームおよび Cesium 情報共有プラットフォームに接続して、河道閉塞環境の状況をリアルタイムで可視化し、メッシュネットワークによる応急復旧現場の広域遠隔監視により、建設機械による応急復旧作業を支援する杭型センサポッドの実証実験を実施した。河道閉塞時の応急復旧作業について、図 64 に作業時の VR 画像を示す。



図 64:河道閉塞環境の可視化(上段)と Cyber-Physical System での VR 表示(下段)

地盤強度の検出

分散設置されたセンサポッドで地面の振動を測定し、地盤の強度を推定する手法について、より地盤の状態の安定した場所(玉石重機・第2機材センター)にて検証実験を行った。実験の様子を図 65 に、得られた地盤強度推定値を九州大学実験場で得られた結果との比較とともに図に示す。実験の結果、九州大学実験場での結果と同様に、地盤強度を示す CCV の値が振動源に対してドーナツ状になる傾向を確認した。



図 65: 地盤強度計測実験(玉石重機・第2機材センター)

また、これまでのセンサポッドで使用していた振動センサ(MVP-RF8)と、今回新たに使用した振動センサ(BMI270)を用いて、地盤強度計測の比較実験を行った。実験は、2種類の振動センサを地面、および杭に設置し、地盤強度の指標である CCV 値を計測した。実験の結果、杭に設置したセンサから得られる CCV 値は地面に設置した場合よりも小さい値がえられるものの、MVP-RF8 を用いた場合、地面固定(平均 2.10)と杭固定(平均 1.02)では 2.06 倍の差があるのに対し、杭固定の MVP-RF8(平均 1.02)と BMI270(平均 1.13)では 1.11 倍(10.7%)の差となり、これは固定方法の差に比べて十分に小さい。これより、杭型センサポッドに搭載した BMI270 でも CCV 値の計測が可能であると考えられる。

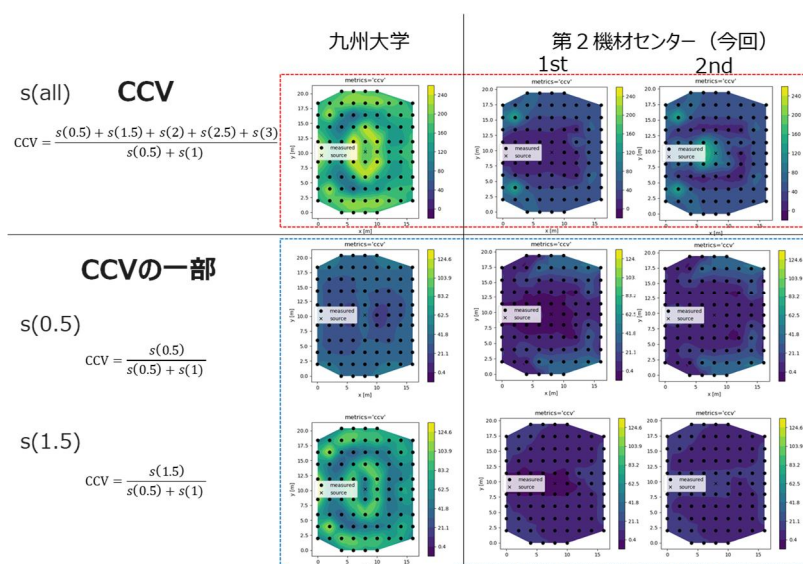


図 66: 地盤強度計測実験の結果

(7) 研究開発項目7:河道閉塞対応を支える技術

当該研究開発項目の概要：

概要：研究開発項目2で開発を進めてきた「動的協働技術」、研究開発課題1-2で開発を進めてきた「センサ固定を目的としたパワーソフト技術」「作業機と移動機が合体・分離する輸送コンテナ」「地盤強度を考慮したバックホウの掘削動作生成」に加えて、新たに「ほぐしと集土の機能分散による掘削技術」の研究開発を進める。

「動的協働技術」とは、同一環境において複数のタスクが共存する中で、複数の建設ロボットが協働するための技術である。これまで、研究開発項目2で進めてきた動的協働技術を一般化し、これを研究開発項目6で構築する排水ポンプ設置タスクを実現するシステムに適用することで、将来的に、この設置タスク実現の自律性ならびに頑健性が大きく向上することが期待できる。「センサ固定を目的としたパワーソフト技術」は、現場に存在する立木やインフラを活用し、高所にセンサデバイスを設置する技術である。この技術が実現することで、河道閉塞を含む自然災害において、研究開発項目6では扱っていないセンシングデバイスの高所設置を、容易に行うことができるようになるため、災害地の高所からの継続的なモニタリングを迅速に行うことが可能となる。「作業機と移動機が合体・分離する輸送コンテナ」は、無限定な環境において、状況の変化に臨機応変に対応する機械の実現を目指したシステムである。研究開発項目6で進めているシステムでは、現状で、想定を超える状況に対応する能力を有していないが、ここで開発する作業機構と移動機構を組み合わせる技術が実現することで、対応可能な状況が大きく広がると共に、作業機構と移動機構を分離した状態での空輸が可能となるため、合体した建設ロボットの最大重量を倍に上げることが可能となる。これにより、河道閉塞対応に代表される災害対応システム全般のロバスト性が向上することが期待できる。なお、この期間は、スケールモデルを用いた本システムの Proof of Concept を実施する。「地盤強度を考慮したバックホウの掘削動作生成」は、掘削動作から得られる情報から地盤強度推定を行い、その地盤にあった掘削動作を生成する技術である。これにより、河道閉塞対応における仮排水路の土工事を実施する際の自動化技術が大きく進むと期待できる。「ほぐしと集土の機能分散による掘削技術」は、これまで油圧ショベル1台で実施してきた掘削動作に対し、複数の小型建設ロボットの協働動作によって掘削を実現するものである。これにより、大型油圧ショベルが運搬できない河道閉塞環境における仮排水路の土工事が可能となると期待できる。上記の技術に加え、システムの評価を行うための評価手法の確立も、本研究開発項目の中で実施する。

目標：2025 年末、河道閉塞対応を支える技術について、個別実証を行い、TRL4 の達成を検証する。具体的には、

- ・ 12 台の動的協働 AI ロボットに対し、4 つ以上の作業が混在するタスクにおいて動的協働をシミュレーション環境で実現
- ・ 20t の掘削機+運搬機と同等の土砂運搬作業を合計重量が等価な複数小型建機で実現
- ・ 作業機と移動機が合体・分離する輸送コンテナを用いた土工を、スケールモデルを用いて実現
- ・ 強度が異なる地盤の掘削においてベテランオペレータに対し同等効率の掘削動作を実現
- ・ パワーソフト技術を用いた高所のセンサ設置の実現
- ・ フレキシブルなハンドリング機能を備えた建設ロボット用ロボットハンドの実現

を目指す。

さらに、研究開発項目 6 で実施するシステムインテグレーションを含め、上記の 6 技術の評価を行うための「構築したロボット技術の評価に関する研究」を並行して行う。

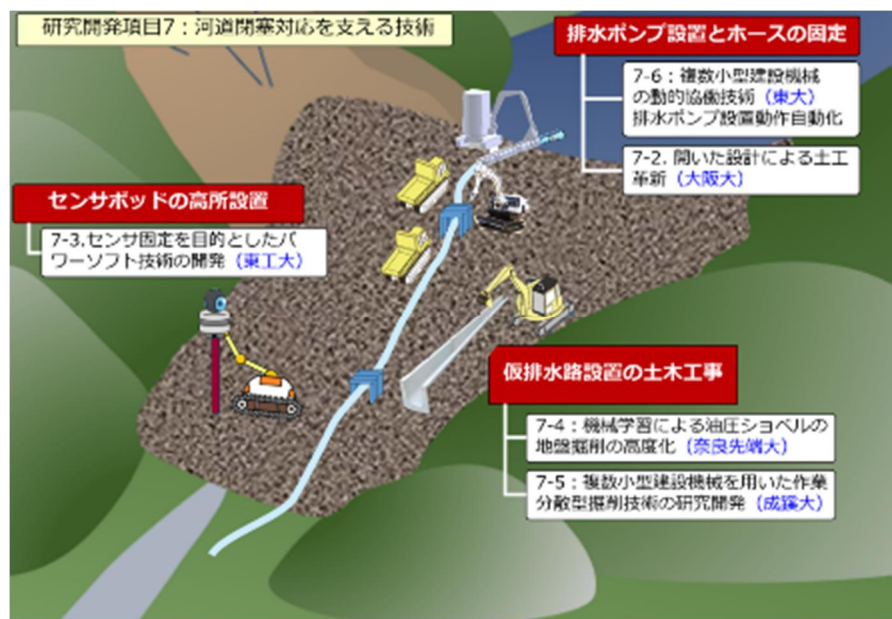


図 67: 研究開発項目 7 の河道閉塞対応を支える技術の適用分野

研究開発課題 7-1: 土工システムの評価手法の確立

課題推進者: 三谷泰浩 (九州大学 工学研究院)

実施内容:

まず、河道閉塞現場において重機が対処すべき環境条件を明確にするために、過去に発生した河道閉塞の事例を調査した。対象とした事例は新潟県中越地震(2004)で発生した東竹沢における河道閉塞と、平成29年7月九州北部豪雨(2017)で発生した小野地区における河道閉塞である。以下に、東竹沢地区の河道閉塞の調査結果を記す。

東竹沢地区の河道閉塞は地震による高速地すべりによるものであり、地すべり崩壊物はその表層状態を大きく乱さず河道を塞いだのが特徴的である(図 68)。発災後、湛水部の水位上昇に対しポンプ排水と緊急排水路の掘削による対応を行っていた。その後、掘削中の緊急排水路の流末が洗堀し始め崩壊が進むおそれがあった。湛水部の水位は依然として上昇を続けていたため掘削を中止し、排水ポンプの増設により天然ダムの上流を回避した事例である。排水ポンプの設置にあたっては、河道閉塞部の湛水部付近において重機作業が必要であり、軟弱地盤における作業が要となっていた。



図 68: 東竹沢地区における災害概要(左)と復旧工事(右)

事例調査のとおり、河道閉塞現場では発災の状況に応じて異なる環境場が構築されており、河道閉塞による被害拡大を防ぐための対応も複数のアプローチがある。そこで、河道閉塞部の標準的な地形、復旧工事中に重機が対処する環境条件を検討した。河道閉塞現場には湛水部の水位上昇に対応しなければならない一方で、崩壊斜面の二次的な崩壊にも注意する必要がある。この現場状況を実験環境として再現するため、崩壊の想定位置に対して危険エリアと比較的安全エリアを設けた。また、地盤表層の状態は倒木や礫などを含む不整地な状態であるものとした。このような環境条件のもと、2025年度7月の統合実験に向けて、各研究機関とともに河道閉塞対応シナリオを精査し、ロボット建機の作業内容に応じた現場環境条件を設計した(図 69)。

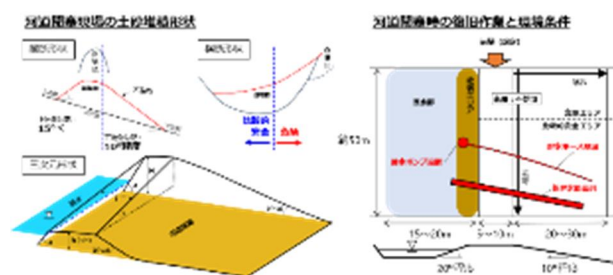


図 69: 河道閉塞現場の環境条件とロボット建機が対応すべき作業内容

河道閉塞現場で復旧作業を行うロボット建機は不整地・悪路を走行可能な性能を具備していることが肝要である。そこで、復旧作業の施工評価、作業を担うロボット建機の性能評価の前提として、不整地・悪路におけるロボット建機の「走行」および「走破」を主眼とした移動性能評価実験を実施した。小型ロボット建機として3トンクラスのバックホウを実験対象とし、2種類の地盤状態(通常・軟弱)における建機の移動性能を、移動速度により定量的に評価した。その結果、地盤状態および地形の凹凸(傾斜角、等)に応じて移動速度が変化する結果が得られ、施工評価においては対象地盤における移動速度・移動時間を考慮することで、「走行」「走破」を取り込めることを確認した。

移動性能に関する検討を踏まえ、これまで構築してきた標準施工モデルおよび評価基準を、「土砂運搬」を例に、過酷な環境下での適用も考慮して拡張した。作業実施に必要な移動時間(環境条件に応じた移動速度から算出、統合実験では計測)を評価指標に組み込むことで、河道閉塞現場の過酷な環境下においても、対象作業の施工性能を本評価方法により定量的に評価することが可能となった。

拡張した本評価方法を用いて、2025年7月に実施した統合実験の結果について、定量的な評価の検討を進めている。対象作業は「熊谷組によるポンプ排水作業」と「成蹊大学による溝掘削作業」であり、本報告では後者の評価内容の進捗について述べる。

統合実験の評価に先立ち、事前実験で実施した小型建機3台による「溝掘削作業」の施工評価を実施した(図70)。「溝掘削作業」では、各建機に「ほぐし」「積込」「運搬」の役割を割り当て、作業を繰り返すことで溝掘削を行う計画とした。所要時間の記録および施工土量の計測結果に基づき、「積込性能」および「運搬性能」については定量的な評価が可能であることを確認した。

一方、「ほぐし性能」については、ほぐし量に対する所要時間を明確に整理できなかつたため、別途追加実験を実施し、評価を行う必要がある。また、本検討は土砂運搬1回分の一連の動作を対象とした評価結果であるため、作業サイクルを長期的に繰り返した場合の施工性能の評価についても、今後改めて検討を行う予定である。

以上のように、構築した評価方法・評価指標により、複数台の建機による協調作業についても定量的な評価が可能であることを確認した。



図 70: 小型建機3台による「溝掘削作業」の施工評価

研究開発課題 7-2:開いた設計による土工革新

課題推進者: 大須賀公一 (大阪工業大学)

実施内容:

大阪工業大学 大須賀 PI グループでは、「研究開発課題 7-2:開いた設計による土工革新」の考え方にに基づき、今年度は主に以下の4つのテーマを実施した。

1. 「Base containeR with open design Adaptive Integration System (BRAINS)」を中心とした土工の革新技術開発および BRAINS コンテナの製作
2. BRAINS 移動機の開発と評価
3. BRAINS 作業機の開発と評価
4. その他要素技術の開発

以下に、BRAINS を中心に、プロジェクトで実施してきた内容を記載する。

1. 「Base containeR with open design Adaptive Integration System (BRAINS)」を中心とした土工の革新技術開発および BRAINS コンテナの製作

無限定環境における土工を革新するには、「開いた設計」の考え方にに基づき、現場で決定される要求に柔軟に対応できる土工システムが必要である。そこで本開発課題では、時々刻々と変化する現場要求に応じて、作業機と移動機を柔軟に合体・分離できる輸送コンテナ BRAINS (Base containeR with open design Adaptive Integration System) を提案した(図 71 左)。本課題では、「開いた設計」による土工システム全体の革新を目指し、今年度はその中核となる BRAINS を製作した。さらに BRAINS を用い、複数の上半身作業機と下半身移動機の合体・分離を九州大学屋外実験フィールドで実現し、2025年7月の屋外デモで一連の作業を披露した(図 71 右)。



図 71: BRAINS 2号機、3号機とそれらを用いた九州大学屋外フィールド実験デモの様子

2. BRAINS 移動機の開発と評価

本年度は、前年までに開発していた柔軟履帯移動機「d-FlexCraw」と汎用履帯型移動機に対し、定量評価のための各種状態量計測機能を実装した。さらに、それらを用いた制御機能の実装と屋内外での走行試験による定量評価を行った。屋内走行試験では標準人工芝を敷設し、平面および斜面走行試験を実施した。結果、d-FlexCraw は 30 度の斜面を走行可能であり、さらに斜面に障害物がある条件下でも、積極的な姿勢制御を行わずに汎用履帯型移動機より穏やかな姿勢変化で乗り越え可能であることが確認された。



図 72: 斜面や 20cm 程度の凹凸(礫)を含む屋外環境における d-FlexCraw 走行試験の様子

また、九州大学・三谷研究室との共同により屋外走行試験を実施した。その結果、約 200mm の凹凸を含む屋外荒地 10m 区間を 1 分程度で走破可能であることを示した。これらの実験結果から、d-FlexCraw は Z 軸方向の柔軟性により、積極的な制御なしでも姿勢変化を最小限に抑えつつ走破できることが確認された(図 72)。

3. BRAINS 作業機の開発と評価

BRAINS で使用可能な作業機のスケールモデルを 2 種類開発した。ここでは、新たに運搬用の上半身作業機「dFC-Carrier」を製作するとともに、前年度まで開発していた排水用ホース敷設機「i-Centipot hose Ammonite」にポンプ揚水機能を追加した改良版を開発し、九州大学屋外実験フィールドにてスケールモデル実験を行った。「dFC-Carrier」は、BRAINS 運用の想定シナリオにおいて、履帯型汎用移動機を用いて移動機や資材を運搬・発進できる上半身作業機である。屋外実験では、実際に d-FlexCraw を簡易型「dFC-Carrier」で運搬・発進させ、提案していたコンセプトの実現可能性を示した。また、電動昇降機能を備えた改良型「dFC-Carrier」も開発中であり、2025 年 11 月に大阪工業大学で実施予定のプレスデモにて公開する。さらに、「i-Centipot hose Ammonite」によるホース敷設機の揚水機能検証では、現行のエアダクト用ホースに揚水ポンプを接続し、九州大学屋外フィールドにて池から水を揚水し、10 分程度で 10m のホースを通して排水可能であることを示した(図 73)。



図 73: 排水用ホース敷設機「i-Centipot hose Ammonite」によるホース敷設、揚水、排水

4. その他要素技術開発

今年度は、地盤の軟弱度や障害物の有無といった物理情報を組み合わせて取得する地形情報システムの開発を進めた。現時点で、d-FlexCraw の履帯形状、張力、デッドレコニング情報が取得可能となっており、さらに移動機全般で各軸の姿勢情報を取得可能な装置も開発済みである。また、これらの情報を取得しながら、d-FlexCraw の単履帯版である FMT を走行させることで、走行経路の推定が可能であることを確認した。

研究開発課題 7-3: センサ固定を目的としたパワーソフト技術の開発

課題推進者: 鈴木康一 (東京科学大学 工学院)

実施内容:

ソフトグリップを用いたカメラやセンサを固定に関する研究の実施

発災早い段階において、現場の立ち木等にカメラ等のセンサを取り付け、これを用いた連続的な情報収集は極めて重要である。このような観点から令和6年度、ソフトグリップの軽量、耐環境、形状適応、大きな力、といった特徴に注目し、ソフトグリップを用いたカメラやセンサを固定に関する研究を実施した。(なお、令和6年度末をもって、本プロジェクトは終了となった。)

台形断面を持つ柔軟レールを開発し、ソフトグリップ表面に設置した。この台形断面にかみ合う車輪を開発し、これをモータで駆動することにより、柔軟レール上を自由に旋回移動できるカメラを開発した。これにより画像の連続無線転送、ならびにカメラ移動の無線遠隔操縦が可能となった。

映像の連続転送実験も行った。動作時間はフレームレートや解像度の設定、ならびに通信環境にもよるが、640x480 解像度で通信環境が良好な場合、1FPS では約5日以上連続、30FPS では3日以上連続で、映像を転送し続けることができる。これを Yanmar CAFE 先端にとりつけ、模擬立ち木への遠隔取り付け実験に成功した。

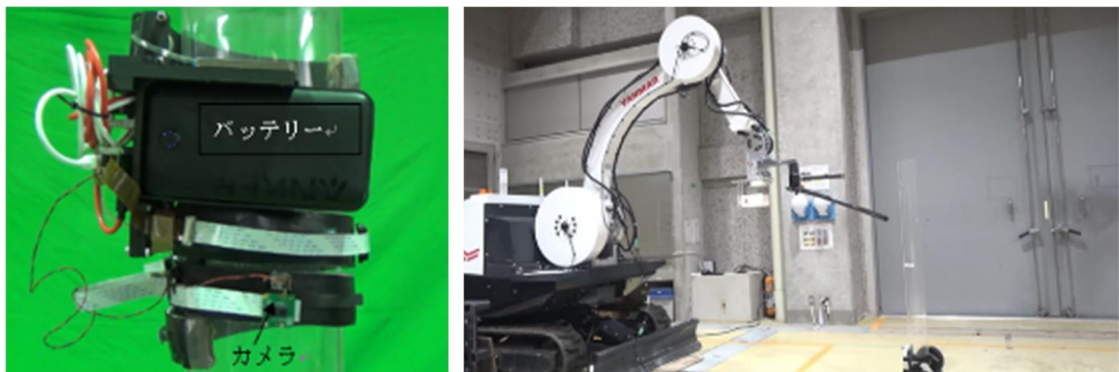


図 74: ソフトグリップ上に搭載した移動カメラと遠隔取り付け実証実験

研究開発課題 7-4: (機械学習による油圧ショベルの地盤掘削の高度化)

課題推進者: 松原崇充 (奈良先端科学技術大学院大学)

実施内容:

河道閉塞などの緊急復旧作業には、油圧ショベルで地盤を掘る地盤掘削技術が必要かつ重要である。地盤の未知性および多様性に臨機応変に対応するためには、データ駆動型の機械学習アプローチが有望であると考えられる。ただし、実際の環境でショベルと土砂の相互作用データを集めるのは時間・費用面で現実的ではない。他方、実環境の代わり物理シミュレータを使う場合、実際の環境を精度よく再現するために多数のパラメータを適切に調整する必要がある。しかし、そのような調整を自動化する技術は確立されていない。さらに、一般にシミュレーションの忠実度(シミュレーションが現実世界をどれだけ正確に再現できるかを示す尺度)を向上させると、計算速度が低下するため、実環境を再現する高忠実シミュレーションにより多様なデータを収集し、ベテランオペレータのように地盤強度に応じて柔軟な掘削動作を学習することは困難である。そこで、本研究開発課題では、これらの問題を解決し、実環境およびシミュレーションで収集されたデータを用いて、多様な地盤強度に応じた適切な掘削動作を獲得可能な AI 技術を開発し、実環境における地盤掘削の自動化を実現することとした。以下に、本研究開発課題で実施した内容を記す。

(1) Cyber-physical 掘削作業実験環境の構築

学習用シミュレーション環境構築:

Nvidia 製の IsaacGym 環境上において、土質やロボットダイナミクス、センサなどのモデルパラメータを多様に変化させるドメインランダム化機能を活用し、GPU による環境並列化計算に対応した学習用シミュレーション環境を構築した。土工作业ロボットとして使用予定の日立建機製の油圧ショベル(運転整備重量 12 トン)である ZX120 モデルを実装した。また、土砂の表現粒度を変更可能にする機能を実装し、計算資源に応じて表現粒度を調整することで計算速度を最適化することができる。さらに、河道閉塞環境での応急復旧シナリオにおける「仮水路の溝掘削タスク」を実行するため、様々なサイズの岩石や倒木を実装し、それらとの物理的な接触や摩擦モデルも実装した。実証実験タスクとして、河道閉塞現場において、建設ロボットによる自動掘削の妨げとなる土中に埋まった倒木を見立てた鋼鉄パイプの自動除去を選定した。その実現に向けて、深度カメラ・油圧ショベル・パイプ・土砂で構成される、パイプ除去可能な自動掘削 AI の開発環境を構築した。

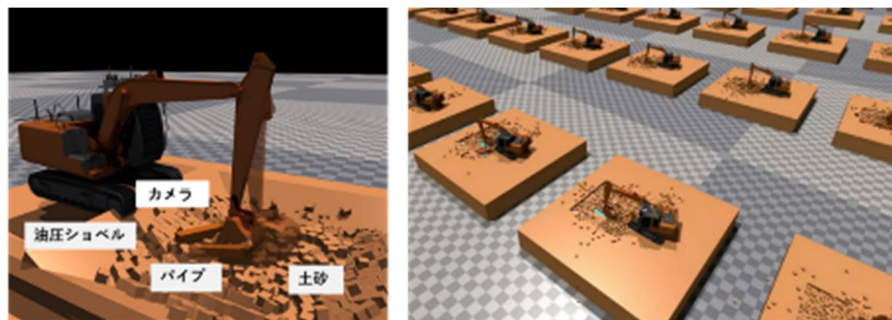


図 75: 倒木を除去可能な自動掘削 AI 学習用シミュレーション環境

検証用シミュレーション環境構築:

学習用シミュレーション環境を用いたドメインランダム化強化学習によって獲得された掘削作業戦略を評価するため、ベースとなるプラットフォームとして OperaSim-PhysX を採用し、様々な地盤強度に対応した掘削作業のシミュレーションが可能な環境を構築した。学習用シミュレーション環境と同様に、建機として ZX120 モデルを実装した。その他、岩石や倒木のモデルや物理的相互作用モデルや摩擦モデルも独自に実装した。

実機掘削作業環境構築:

学習用シミュレーション環境とドメインランダム化強化学習によって得られた掘削作業戦略の有効性を実環境で評価するため、日立建機製の油圧ショベル ZX120 を使用した「仮水路の溝掘削タスク」の実験環境の仕様を検討した。さらに、検討した仕様に従い、その構築作業を完遂した。まず、遠隔操作を実現するため、外部 PC からの指令を受ける ROS インターフェースを実装し、ショベルの前方に取り付けた RGB-D センサから取得したデータを基に、建機前方の土砂形状を認識し、岩石や倒木の物体検出を行うための深層学習モデル(YOLOv4)を導入した。また、簡易的な軌道追従タスクを実行し、その結果より油圧アクチュエータの遅れ時間の同定を行った。これらの特性は学習用シミュレータに反映することで reality gap を低減する。

実証実験タスクとして、河道閉塞現場において、建設ロボットによる自動掘削の妨げとなる土中に埋まった倒木を見立てた鋼鉄パイプの自動除去を選定したため、その実施に必要な鋼鉄パイプの Yolo-v4 による認識 AI の開発、パイプ前方の地面形状の観測画像生成法、パラメータ化された掘削軌道の生成器をそれぞれ実装した。

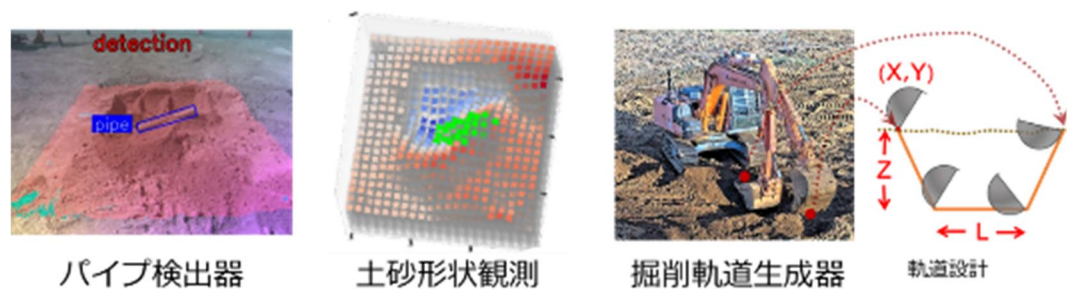


図 76:パイプ除去可能な自動掘削 AI の実機実験に要する機能の実装

(2) 多様な地盤強度に対応可能な掘削作業戦略の学習手法の開発

掘削作業のためのドメインランダム化強化学習の開発:

掘削作業戦略学習の基盤となるドメインランダム化強化学習を、シミュレーション内のパラメータをランダムに変更しつつ、報酬最大化を目指して試行錯誤する形で実装した。前年度に開発した循環方策蒸留技術を活用し、学習環境を構築する際のシミュレーション時間を短縮するために、新たな技術を開発した。具体的には、複雑なシミュレーションにおいて、表現の粒度、計算速度、精度の間に存在するトレードオフに着目し、学習用シミュレーションに実装された可変パラメータである粒度パラメータを活用した。これにより、粗

い粒度で学習した行動戦略を、より細かい粒度の環境における方策の初期値および正則化に使用し、最細粒度環境において有効な行動戦略を、計算時間を大幅に短縮しながら同等の性能で実現することを目指した。この新しい強化学習の枠組みは、「Progressive-Resolution Policy Distillation (PRPD)」と名付けた。

簡易的な岩石除去タスクについて、シミュレーション上で習得された作業戦略を、実環境に転移可能な形で獲得することに成功した。シミュレーション間での転移(sim-to-sim)およびシミュレーションから実環境への転移(sim-to-real)の実験を実施し、PRPD による計算時間短縮効果を検証した。その結果、計算時間を 1/7 に短縮しつつ、最細粒度環境における行動戦略の有効性を維持できることが確認された。さらに、低解像度で固定した従来手法と比べて、提案手法は掘削効率を 1.5 倍以上向上させることができた。

倒木に見立てた鋼鉄パイプを除去可能な自動掘削 AI の学習フレームワークの開発:

掘削対象に埋設された障害物(倒木に見立てた鋼鉄パイプ)を自動的に除去する掘削作業 AI の開発に取り組んだ。自然災害による河道閉塞現場では、倒木等が地中に埋まっている可能性が高く、従来の遠隔操縦では効率的な対応が難しいという課題があった。そこで、障害物を含む多様な土砂環境を生成可能な物理シミュレータを構築し、現実データを用いず仮想空間での Sim-to-Real 強化学習により自動掘削 AI を獲得した。特に、AI によるパイプ位置検出、パイプへの外力、パイプのサイズ、土砂粒子間の摩擦、ロボットの行動ブレ、の5つの要素にドメインランダム化を適用した。獲得されたポリシーは、地中のパイプの状態や画像認識の不確実性に対応しつつ、パイプの向きを変える、落とし穴を作るなど複数の戦略を柔軟に選択・実行する点で高いロバスト性を示した。

定量評価では、長さ 1.0m、1.5m、2.0m の異なるパイプに対し、それぞれ 3 回中 3 回の成功率で除去作業を達成した。また、2025 年 8 月に土木研究所で実施した公開実験では、地中から一部が露出した状態のパイプを対象に、油圧ショベルによる自動除去動作のデモンストレーションを行った。

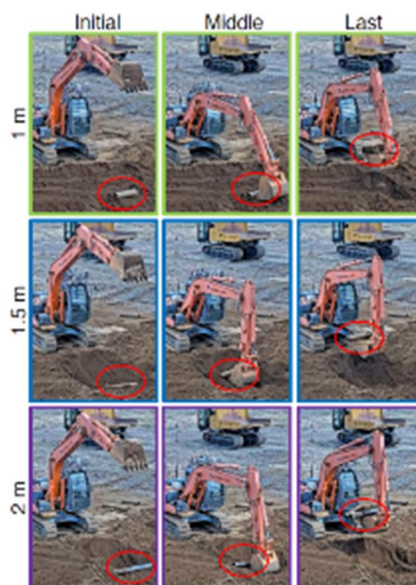


図 77: 油圧ショベルによるパイプ除去実験

研究開発課題 7-5: 複数小型建設機械を用いた作業分散型掘削技術の研究開発

課題推進者: 竹田年延 (成蹊大学 理工学部理工学科)

実施内容:

本研究開発課題では、通常、10tクラス以上のバックホウが 1 台で実施する掘削動作を、2 台の小型建設ロボットによる「ほぐし」と「すくい」の機能に分散することで、河道閉塞等のアクセス困難な災害現場に有用な、大重量の掘削機械を伴わない土工の実現を目指し、研究開発を進めてきた。

まず、「ほぐし」については、土砂と岩石が混在する環境に対しても汎用的に投入することが可能な、小型建設ロボット用作業アタッチメントを構築し、地面の強度に応じたほぐし作業を実現する。次に、「すくい」については、ほぐした地面を効率的にすくい取ることが可能なバケット形状の小型建設ロボット用アタッチメントを構築し、すくい作業を実現する。さらに、この 2 台が土砂運搬用のクローラキャリアダンプと連携することで、掘削動作を実現する。12t 油圧ショベルで行った通常の掘削作業における掘削効率(動かした土砂重量を時間で割ったもの)と比較し、3t の小型建設ロボット 2 台(合計 6t)で行った掘削作業の効率を、その同等以上にすることが、本研究開発課題の目標である。12t 油圧ショベルは 1 台、スキッドステアローダーは 3t×2台、ということから、半分の重量で同等以上の効率を目指し、研究開発を進めてきた。以下に、本研究開発課題で実施した内容を記す。

小型建設機械(スキッドステアローダー)の遠隔化および自動化 (令和 6 年 4 月～令和 7 年 3 月)

1台の小型建設機器を用いて、「ほぐす」作業と「すくい」作業を別々に、遠隔化および自動化を行う。スキッドステアローダーは、複数種類の専用作業用アタッチメント(「ほぐす」と「すくい」)を製品として入手可能であり、さらに付け替えが容易に行えるため、小型建設機械としてスキッドステアローダーを採用した。



図 78: 小型重機(スキッドステアローダー 3t)

準備した小型重機を遠隔、及び自動で走行できるシステムを開発した。エンジン回転数や走行レバー、作業用レバーなどの変位量を、疑似的に電気信号として与える専用回路を開発・製作した。この他に、パトライトや遠隔で停止・起動できる電気・電子システムを開発した。加えて、これらの制御基板に、エンジンの始動・停止を含めた走行制御命令を出力するマイコン及び PC との接続システム、GPS やジャイロセンサをしようした位置推定システムの開発を行った。これらにより、スキッドステアローダーの走行の遠隔・自動化が可能となった。市販のスキッドステアローダーを従来のロボットシステム化することができた。

切土掘削アタッチメントを用いた土砂掘削試験を行い「ほぐす」作業 (令和6年4月～令和7年3月)

この小型重機用に提供されている一般的な作業用アタッチメントは、土砂掘削用と岩石破砕用のアタッチメントは異なるため、地盤の状態によりアタッチメントの付け替えが必要となる。本プロジェクトでは、土砂と岩石が混在する環境に対して汎用的に投入できる作業器(アタッチメント)を目指すこととした。

まず、一般的には柔らかい地盤や試料のほぐしに用いられる作業器(チラー)を、ある程度硬い砂と岩石が混在する土壌に適用する。回転する時にチラー刃が土壌から受ける負荷が油圧モータの負荷より大きくなると、チラーを回転させる油圧モータが止まる。とくに岩石が混在する環境に対して負荷が大きくなると考える。そこで、よりほぐしやすくするために、チラーの刃の一部を直線型の平板に変更した。

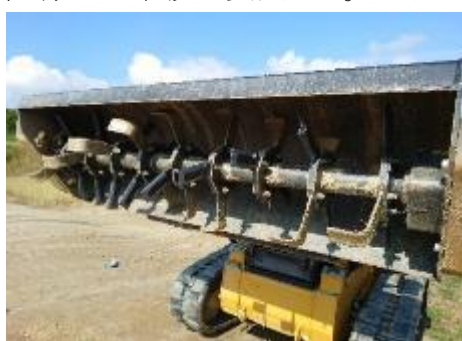


図 79: 平板形状の刃とかぎ型の刃を装着したチラー

作業効率を高めるための切土掘削アタッチメントの開発(令和7年4月～令和7年11月)

切土は「ほぐす」作業に相当し、掘削は「すくい」作業に相当する。販売されている従来の切土掘削アタッチメントは、基本的に柔らかい地盤が対象である。当初の計画段階では、上記(2)の実験結果をフィードバックして、いくつかの地面強度に対しても効率的に作業できる切土掘削アタッチメントの構造や形状について研究開発を行う計画であった。

しかしながら、上記(2)のほぐし作業に用いた、地盤からの抵抗が最も小さくなると考えられる平板にした場合においても、小型建設機械を走行させながら、硬い地盤をほぐす場合は、地盤からの反力が大きく、油圧システムが止まってしまう現象が発生した。作業効率を高めるためには、油圧システムが止まらない範囲で地盤に押し付け力を加えながら、地盤をほぐすことが重要であることが分かった。

そこで、小型建設機械が地盤に対して常に適度な力で押し付けられるように、アーム角度の位置制御ベースのアドミタンス制御(力制御)を実装した。そのためには、アームが地盤から受けている力を計測する必要がある。アーム部の前面にひずみゲージセンサを張り付けて、そのセンサデータをリアルタイムに USB 経由で取得できるアンプ基板とそのためのソフトウェアを新たに開発した。メーカー純正品のアンプよりもセンサバイアスのドリフトが小さいうえに、メーカー純正では対応していなかった Linux システム上で、リアルタイムにセンサデータを取得できることが、新たに開発したセンサインターフェースの大きな特徴である。押し付けている力とアームのひずみ量との相関関係を求めた結果、ひずみ量と押し付け力には、大きな相関があることが分かった。

複数台の小型建設機械を用いた掘削技術の研究開発

(令和7年4月～令和7年11月)

令和5年度までに開発したクローラダンプ1台と令和6及び7年度に開発したスキッドステアローダー2台を、連携することで、溝掘削における一連の動作を試験する。溝掘削の作業を、これまでに上記で述べた、ほぐす作業とすくい作業、加えて、積み込み作業に分割した。そして、先のそれぞれの作業を、小型建設機械とクローラダンプで独立に担当することにより、効率的な複数小型建設機械による掘削技術の研究開発を行った。

3台の小型建設機械による溝掘削を行うため、先頭車両に地盤をほぐす機能(チラー器)を持つスキッドステアローダー、その後ろに、クローラダンプ、そして、土砂をすくうマルチバケット持つスキッドステアローダーを、順に一列に並べて移動させる。先に地面をほぐし、その地面を後ろから移動してくるスキッドステアがすくって、クローラダンプの荷台に積み込む(

図 80)。これらの1連の作業を連続して繰り返すことにより溝掘削を行った。

先頭のほぐし作業を担当するスキッドステアは、進行の開始と停止、進行方向、チラー回転の開始と停止は、スマートフォンを介した遠隔操作により行った。列真ん中のクローラダンプはスマートフォンを介した遠隔操作により走行制御を行った。列最後のスキッドステアローダーによるほぐされた土砂のすくい取り・積み込み作業は、走行とアーム及びバケット制御の全てを上記の技術を用いて自動制御した。なお走行に関しては、真ん中のクローラダンプのGNSSの位置・姿勢を便りに、最後尾のスキッドステアローダーがクローラダンプに追従する機能を開発した。

また、確実に繰り返しすくい取り・積み込むために、一度のすくい取り動作によって、土砂を深く掘りすぎない、または、量をすくい取りすぎないことを防ぐ制御方法を開発した。地面の凹凸、および、土砂の硬さや柔らかさが異なるため、常に同じすくい取り動作では繰り返し確実に、作業を行うことは非常に困難であった。特に、車体前方で土砂を掘りすぎてしまうと、その掘った面の上を走行するために、車体姿勢の変化が大きくなり、土砂の積み込み作業時に車体が大きくゆれて、クローラダンプへの衝突が起きる。また、バケットが深く地面にささる場合、もしくは、多くの土砂をすくう場合は、スタックしてしまう。そこで、すくい取り動作の自動化について、上述のアドミタンス制御(力制御)により、一定負荷がアームにかかるると、アームすくい取り動作を終わらせる方法を開発した。

実証実験では、おおよそ長さ20mにわたって、10回程度連続で、スキッドステアローダーとクローラダンプと連携させて一連のほぐし/すくい作業による掘削動作、加えて、途中でクローラダンプの土砂捨てを挟んだ、3台の小型建設機械を用いた掘削を実現した。



図 80: マルチバケットを持つスキッドステアローダーによる一連の掘削とクローラダンプ荷台

への積み込み動作。(左)掬い取り、(中)荷台への接近、(右)積み込み動作

研究開発課題 7-6: 複数小型建設機械の動的協働技術の確立

課題推進者: 永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)
浅間 一 (東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)
ルイ笠原 純ユネス (東京大学 大学院工学系研究科)
筑紫 彰太 (近畿大学 工学部ロボティクス学科)
末岡裕一郎 (大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻)
王 永東 (東京大学 大学院工学系研究科)
肖 潤沢 (東京大学 大学院工学系研究科)

実施内容:

河道閉塞環境に代表される、無限定環境における応急復旧作業技術の自動化を進めるためには、複数小型建設ロボットによる動的協働技術が必要となる。そこで、本研究開発課題では、この技術を排水ポンプ設置タスクに適用する技術開発を目指し、複数の作業が混在するタスクにおいて、動的協働をシミュレーション環境で実現することを目標とする。具体的には、自然言語を介したオペレータと群ロボット間のコミュニケーションシステムの開発、ロボットの機能記述手法の開発及びそれを活用した自己組織化、そして複数ロボットの協調による異常検知技術の研究開発を進めることとした。これにより、ロボットは、オペレータからの自然言語指示を理解し、各々の特定機能を認識して全体の目標を効率的に達成し、さらには群全体で異常を検知することが可能となり、複雑な環境下での作業効率の向上を図る。以下に、本研究開発課題で実施した研究開発を記す。

1 動力学シミュレータの構築

本研究項目では、自然言語によるオペレータと群ロボットとのコミュニケーション手法、ロボットの機能記述手法の開発とそれを利用した自己組織手法、複数台ロボットの協調による異常検知、を検証するため、具体的な検証シナリオの策定、動力学シミュレータの構築を行った。具体的な検証シナリオの策定については、河道閉塞災害を対象として、物資運搬用の飛行ロボット、物資運搬用、作業用の建設ロボットを用いて、排水ポンプ、排水ホースの積載、運搬、設置などのタスクを行い、上流から下流への排水作業を自律分散的に行う検証シナリオを策定した。

動力学シミュレータの構築について、自律施工技術基盤 OPERA のシミュレータ(以降、OPERA シミュレータ)を用いて、開発するアルゴリズムを検証可能な環境を構築した(図 81)。OPERA シミュレータの飛行ロボット、建設ロボットを自律制御するため、Robot Operating System 2 (以降、ROS 2)を使用して、ROS 2 から OPERA シミュレータに、飛行ロボット、建設ロボットの速度、角速度、各関節角度などの指令値を、OPERA シミュレータから ROS2 に、飛行ロボット、建設ロボットの位置、関節角度などの状態を送信する構成とした。また、実機での運用を想定して、各ロボット間は疎な無線ネットワークで通信可能なシステム構成とした。

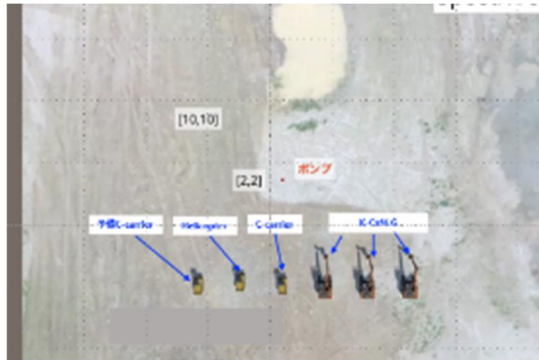


図 81:OPERA シミュレータによるアルゴリズム検証用動力学シミュレーション環境

II 自然言語によるオペレータと群ロボットとのコミュニケーション手法

本研究項目では、オペレータが自然言語を用いて群ロボットを制御するためのコミュニケーション手法の開発を行った。具体的には、自然言語による指示や現場からの異常情報を解釈し、ロボットの動作計画に反映する Dependency-Aware Robot Task (DART)フレームワークを構築した。

DART フレームワークは、以下の 3 つのモジュールから構成される:

- ・ センサモジュール:現場からの画像情報を取得し、2次元俯瞰図に変換する
- ・ インターフェースモジュール:オペレータとロボット間の対話を管理し、依存関係を考慮したタスク分解を行う
- ・ ROS モジュール:分解されたタスクを実際のロボット動作に変換する

本研究では、特に、IV 複数台ロボットの協調による異常検知および III ロボットの機能記述手法を利用した自己組織手法との統合・拡張を行った。現場で異常が検出されると、その情報がまず DART フレームワークに送信され、オペレータとの自然言語による対話を通じて異常内容と影響範囲を同定する。その後、異常対応タスクが III の自己組織手法に引き渡され、ロボット群による自律分散的なタスク再分配と実行が行われる。この連携により、オペレータは複数台のロボットと円滑にコミュニケーションを取りながら、動的な環境変化や予期せぬ事象に対応可能であることが明らかになった。

III ロボットの機能記述手法の開発とそれを利用した自己組織手法の構築

本研究項目では、II 自然言語によるオペレータと群ロボットとのコミュニケーション手法および IV 複数台ロボットの協調による異常検知と連携させるとともに、自然言語および大規模言語モデル(LLM)に基づく新たな機能記述手法を開発した。図 82 に示すように、本研究項目のロボットの機能記述手法の開発では、自然言語および大規模言語モデル(LLM)に基づく新たな機能記述手法を開発した。本手法において、各ロボットは自身の機能に関する情報を自然言語で記述し、言語モデルの論理的推論能力と理解力を活用して、自身の機能および能力範囲を認識する。これにより、後続のタスク分解や入札マッチングに必要な準備条件を満たすことが可能となる。

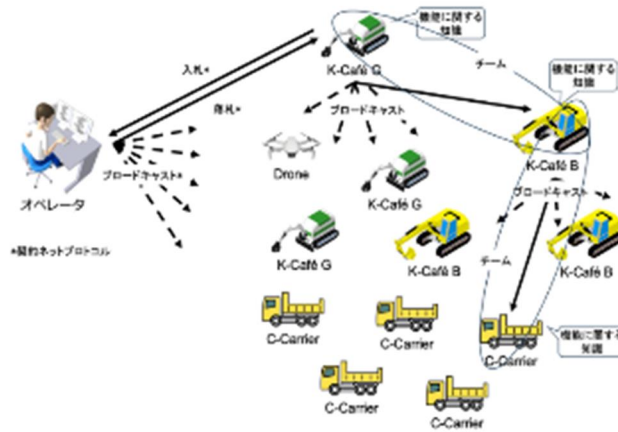


図 82: システムの構成と作業計画・チーム組織化・タスク割当の流れ

図 82 に示すように、本研究項目の機能記述手法を用いた自己組織手法の構築では、河道閉塞災害のような無限定な環境において、大規模言語モデル (LLM) と自然言語による機能記述に基づき、自律分散的にタスクの分解、分配、協力を実現する複数異種ロボットの自己組織手法を構築した。この手法において、各ロボットは自らの機能情報と関連知識を活用し、LLM によるタスク内容、機能、関連知識、環境情報の理解を通じて、人間の管理者または他のロボットから委託されたタスクを詳細なサブタスクに分解する。分解したサブタスクのうち、自己機能で処理可能な部分は計画・実行、処理が困難な部分は他のロボットとコミュニケーションを図り、入札や契約によって適切なロボットに分配する。タスクを分配されたロボットも同様の手法でサブタスクをさらに分解・分配し、すべてのサブタスクが実行可能なロボットに割り当てられるまでこの過程を繰り返す。最終的に、ロボット群は各サブタスクの依存関係に従って順次タスクを遂行し、最終目標の達成に至る。

以上の機能記述手法および自己組織手法を活用した結果、**エラー！参照元が見つかりません**。に示すように、シミュレーション環境において、以下 3 つの条件における河道閉塞環境にて、13 台のロボット (Drone: 1 台、C-Carrier: 5 台、K-CAFE G: 3 台、K-CAFE B: 4 台) で 4 種類以上の作業 (①河道閉塞環境の画像計測・マップ生成、②搬入経路の確認・土地の造成、③排水ポンプの搬送、④排水ホースの搬送・設置、⑤排水ポンプと排水ホースの接続、⑥異常検出と対応依頼、⑦異常への対応の 7 作業) が混在する排水ポンプ・ホース設置作業の動作計画を立案し、オペレータと連携して実行することが達

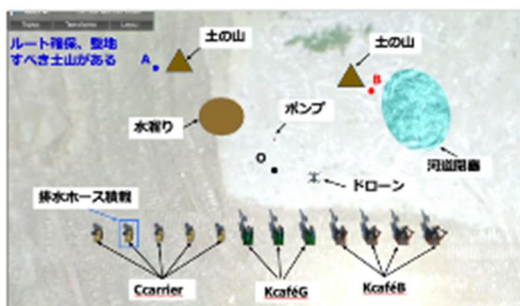


図 84: シミュレーション環境

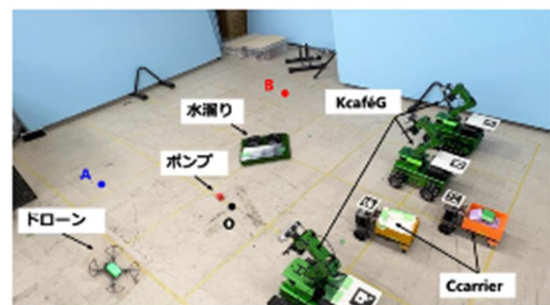


図 83: 模型実験環境

成できた。

また、屋内の河道閉塞の模擬環境において、図 83 に示すように、6 台 (Drone: 1 台、C-Carrier: 2 台、K-CAFE G: 3 台) の模型建設ロボットを用い、③排水ポンプの搬送、④排水ホースの搬送・設置、⑤排水ポンプと排水ホースの接続、⑥異常検出と対応依頼、⑦異常への対応の 4 作業を混在させ、設置作業を実現できた。

IV 複数台ロボットの協調による異常検知

本研究では複数台ロボットの協調による異常検知手法の開発に取り組んだ。開発したシステムではプランナーがタスクプランを初めに生成する。そのプランの実行中に異常が発生した場合、プランの見直しが必要となるため、はじめに、時間に基づいた異常検知手法を提案した。シミュレータと模型建機で評価実験を行った結果、提案手法の有効性が示された。

研究開発課題 7-7: フレキシブルなハンドリング機能を備えた建設ロボット用
ロボットハンドの研究開発

課題推進者: Prof. Robert Katzschmann (ETH Zurich)

実施内容:

1. Outline of this R&D proposal

In this project, we research and develop a superhuman-scale robotic hand that can be mounted on construction robots to help address river blockages. We focus on the design, production, and evaluation of Prototype 1~ 4 of the robotic hand. Additionally, in collaboration with Kumagai Gumi, we mount the prototypes on construction robots to conduct field experiments in realistic scenarios to determine the effectiveness and identify any issues with the hand.

(1) Develop a 1st giant hand prototype P1 (2024/09 – 2024/10)

Based on our existing human-sized, fully articulated, robotic hand, we have developed, fabricated, and tested the first giant (35cm long) hand prototype P1 with 25kg loads using electric motors. Different hand poses were tested, including power and precision grasps and medium and large wraps. The results were analyzed to determine improvements for further prototypes.

(2) Optimized and reinforced 2nd hand prototype P2 of 50cm long (2024/11 – 2024/12)

we used the data from the previous P1 tests to develop a larger, stronger and sturdier hand prototype P2 that can hold 50kg. It was designed to be roughly 2x size of a human hand. This was tested in the lab and was used as the basis for designing the P3 hand which will be tested in the field.

(3) More durable and integrated 3rd hand prototype P3 of 50 cm long (2025/01 – 2025/03)

P3 was the same scale as P2 with further reinforcements and design optimizations to increase robustness and force output. In March 2025 it was integrated onto an excavator (CAT 303), in collaboration with Kumagai Gumi of Japan, which was modified to be remotely controlled. We have tested various tasks simulating river blockage situations, such as picking up water buckets, wood logs, hoses, and mock dirt bags. We demonstrated its potential to remotely conduct disaster response tasks that previously required humans on site, and identified improvements needed for the next prototype version.

(4) Stronger and larger P4 hand prototype (2025/04 – 2025/06)

Based on previous field test results, optimization and improvements were implemented to strengthen the hand even further so that it can grasp vertically loads up to 100kg. Both electric motor and hydraulic piston (at 5MPa) actuations were implemented and tested. The hand has four fingers with abduction and will be a three times scale up of human hand.

(5) Refined controls to improve P4 dexterity (2025/07 – 2025/08)

We have implemented better controls, improved feedback signals, and clearer interfaces to improve the usability and dexterity of the P4 hand prototype to achieve more advanced demonstrations based on heavier, complex, or fragile objects.

Ultimately, the goal is to develop a Flexible Hand capable of grasping irregularly shaped objects, such as drainage pumps weighing approximately 50 to 100 kg, rocks, and driftwood. To verify this functionality, a grasping test using the Flexible Hand mounted on a construction robot was conducted in August once again in collaboration with Kumagai Gumi to confirm its effectiveness.

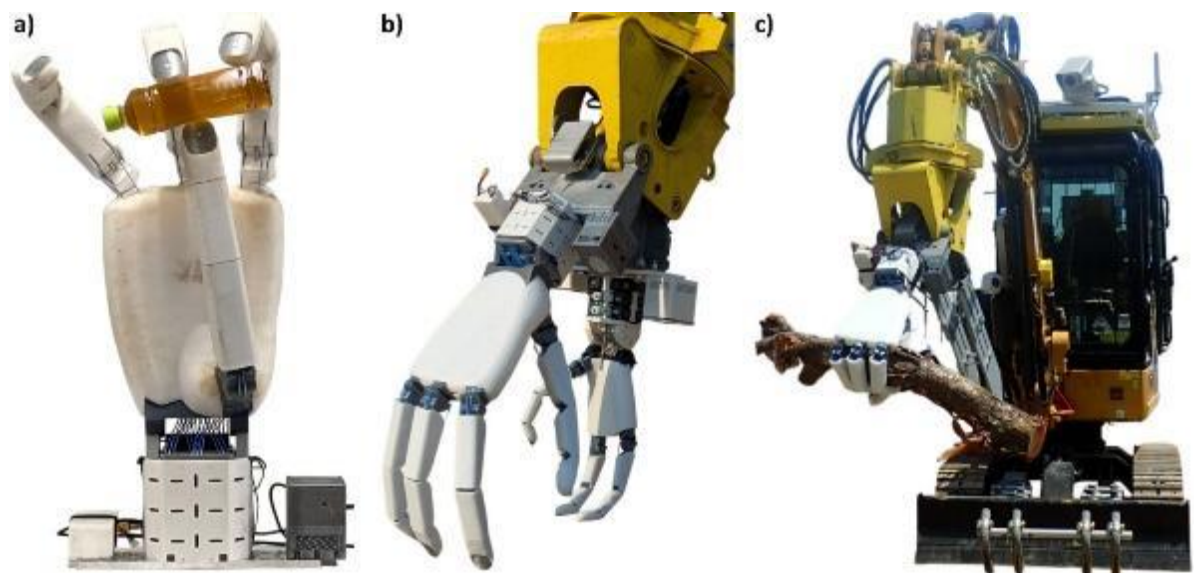


Figure 1: a) The P4 hand prototype is powered by a Lipo battery and controlled by a raspberry Pi 5 equipped with a UPS. The hand footprint is small and b) it can be integrated on an excavator gripper support along with the smaller P3 prototype. c) The P4 hand is capable of grasping big and heavy objects like thick branches.

Overall, the final hand prototype P4 performed well during field tests and was able to grasp several objects proposed by the collaborators. A public demonstration was conducted on August 7, 2025 and was widely reported in the Japanese media.

One important limitation for grasping with dexterity objects laying on the ground is the separated and rough control of the excavator. Coupling both the motion of the hand and the excavator would drastically improve grasp performance and would avoid incidents such as crashing the hand on the ground. In particular, dexterous grasps require the coordinated movement of the hand, the wrist and the arm which are currently separated. Nevertheless, the current results are promising and provide strong motivation to continue the development of the hand and the excavator with a deeper integration and coupling of both motion systems.

3. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

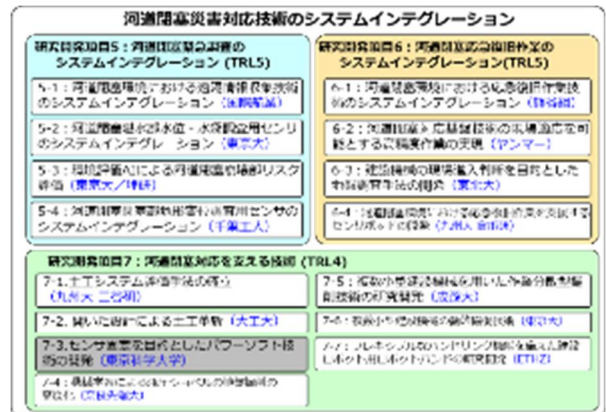
本プロジェクトの代表機関は、2024年10月にPMの永谷が筑波大学に異動したため、2024年9月まで東京大学、2024年10月以降は筑波大学が担当した。なお、代表機関のPM支援チームとして、2024年3月までは、PM-Sub（金崎裕之）、専任秘書（加納玲子）、2024年4月以降は、PM-Sub（安川裕介）、専任秘書（加納玲子）が担当した。

プロジェクト全体で行う会議としては、各年度にキックオフミーティングおよび成果報告会を実施した。また、重要事項の連絡や調整のために、必要に応じて運営会議も随時開催した。

各課題推進者の進捗の把握については、プロジェクト開始以降、月に一度のタスクフォース会議（TF会議）にて行ってきた。タスクフォースとは、研究開発項目とは独立に、研究内容の近い、または、研究を実施する場所に応じたグループであり、ひとりの課題推進者は、1つ以上のタスクフォースに属する。各課題推進者は、メインに属するTF会議にて30分程度の進捗報告を実施し、進捗状況を確認すると共に、質疑応答を行う。これにより、異なる分野間の議論が深まり、課題推進者間の連携を強化することができた。各会議は、基本はオンラインで実施したが、参加できなかった研究者も、会議の内容は録画を確認することが可能であり、議事録もWebの内部ページで共有することで、密な情報共有を行うことができた。また、PMのサイトビジットについては、各研究開発機関の構築するシステムのフィールド試験にあわせて行った。

研究開発プロジェクトの展開

本プロジェクトでは、2023年のステージゲート評価の結果を受けて、自然災害対応と月面基地建設の両面で進めていた研究開発体制を、自然災害対応に一本化するという大幅な方向転換と、研究体制の再構築を行った。これに伴い、2023年末には、複数の研究機関の研究開発を終了し、新たに2つの研究機関を採用した。下図の左に2023年度までの研究開発体制、右に2024年度以降の体制を示す。



国際連携の面では、建設機械の自動化に関して、フィンランドのオウル大学（Prof. Heikkilä）およびスイスのETH（Prof. Hutter）の研究グループと研究交流や意見交換を続けてきた。さらに2024年度からは、スイスのETH（Prof. Katzschmann）の研究グループをFS（Feasibility Study）のPIとして迎え、1年間、本プロジェクトに参画いただき、革新的な土工作業の実現に取り組んだ。この取り組みでは、人の約3倍の大きさを持つロボットハンドを油圧ショベルの先端に装着し、その有用性の確認と今後の課題の抽出を行った。

ELSIへの取り組みとしては、2024年5月27日および8月20日に開催されたELSI研究会に参加し、本プロジェクトにおける課題や対応方針について議論を行った。その結果、河道閉塞災害対応においては、「通常の河道閉塞現場には被害者は不在であり、現場が危険なため建機操縦者は立ち入らない」という前提に基づき、ELSI上の特段の課題は生じないとの結論に至った。

(2) 研究成果の展開

本プロジェクトで開発した技術は、その技術の成熟度度合い（Technical Readiness Level：TRL）を考慮し、TRL5をクリアしたものについてユーザヒアリングを行い、プロジェクト終了後に、今後の研究成果の展開の検討を進めている。

河道閉塞環境における遠隔情報収集技術

国際航業が中心となって進めてきた河道閉塞環境の調査技術については、モデル現場（芋川）などで実証実験を行い、有用性が確認されたことから、TRL6をクリアできたと判断している。この技術については、国土交通省、ユーザ企業、および災害対応経験者へのヒアリングを通じて、今後の展開に関する検討を進めた。安価かつ軽量な水深計については高い評価を得ているものの、量産型の製作費の目処が立っておらず、今後の検討課題となっている。また、遠隔設置型のレーザ距離センサについても高評価を得ているが、必要な技術として「定点画像情報」が重要であるとの指摘があり、今後は国際航業と藤井准教授の連携のもと、継続的に研究開発を進めていく予定である。環境評価AIによる河道閉塞崩壊部のリスク評価技術については、熟練者の減少が進む中、今後必須となる技術と考えられるが、その評価結果が「安全宣言」と受け取られる可能性があるため、運用にあたっては慎重な対応が求められるとのコメントを頂いた。これらの技術はいずれも、今後しばらくは国際航業が主体的に保有・運用し、社会実装に向けた取り組みを継続していく予定である。

河道閉塞環境における応急復旧作業技術

熊谷組が中心となり進めてきた河道閉塞環境の応急復旧技術は、遠隔操縦型の複数小型建設ロボットによる排水ホースの無人設置システムである。本システムを用いて、九州大学に設置した模擬現場にて実証実験を実施し、有用性が確認されたことから、TRL5をクリアできたと判断している。この中の、熊谷組が開発した小型半水中バックホウは、実環境におけるその活用を進めるため、筑波大学との共同研究を引き続き実施していく予定である。

上記以外の技術については、TRL5 には至っていないものが多いものの、今後、各研究開発機関において研究開発を継続し、社会実装を目指す予定である。

さらに、PM である永谷は、2026 年 2 月に筑波大学を中心として発足予定の「ロボット技術によるフィールド課題解決コンソーシアム」において、対象とする社会課題の一つとして自然災害対応を位置づけている。本プロジェクトで開発された要素技術についても、同コンソーシアム内での活用を検討する予定である。

(3) 広報、アウトリーチ

研究成果の広報については、基本的には、プロジェクトの Webpage を構築し、情報発信を行ってきた。ここでは、現在までの研究成果に関し、視察の結果やフィールド試験結果の概要について、お知らせ欄で報告を行った。引き続き、Webpage を用いた広報を行う予定である。

また、これまでに、以下の特別講演や招待講演において、プロジェクトの紹介を行った。

- ・ 第 4 回 建設・測量生産性向上展 (CSPI-EXPO) (会期：2022 年 5 月 25～27 日、幕張メッセ) で講演した「建設ロボットによる建設業の生産性向上に向けて～できていること・期待されること～」
- ・ 災害現場や建設現場に活用されるロボット技術と今後の展望 (2020/12/2 関東技術事務所 セレモニー 特別講演)
- ・ Robotics for Disaster Response (2021/3/24 First Japan-Chile Symposium in Field Robotics 招待講演)
- ・ 自動施工に必要な技術とムーンショット CAFE Project の紹介 (2021/6/16 UC-Tec 技術研究組合総会 特別講演)
- ・ 動的環境に臨機応変に適應する建設ロボットのための開いた設計 (2021/9/7 土木学会研究討論会 招待講演)
- ・ 開かれた環境における言語・物理を活用した環境評価技術 (2021/9/11 第 39 回日本ロボット学会学術講演会 オープンフォーラム 招待講演)
- ・ 「開いた設計」によるインフラ構築／災害対応ロボット技術の開発 (2021/11/17 第 2 回 AI・データサイエンスシンポジウム 土木学会 基調講演)
- ・ 多様な環境に適應するフィールドロボットシステムの実現に向けて (2022/3/17 第 27 回 ロボティクスシンポジウム 招待講演)
- ・ 建設ロボットによる建設業の生産性向上に向けて～できていること・期待されること～ (2022 年 5 月 25～27 日 第 4 回 建設・測量生産性向上展 (CSPI-EXPO) 招待講演)

- Toward Realization of Field Robot Systems to adapt to Diverse Environments for innovation of infrastructure construction (2022/5/27 International Conference on Robotics and Automation WS - Toward AI-embedded robots in 2050)
- 建設分野の生産性向上ならびに災害対応を目指したロボット技術の現在と未来 (2022/6/14 土木研究所 新技術セミナー)
- "Open Design" concept for Field Robot Systems to adapt to Diverse Environments and to construct infrastructure (2022/6/29 ERF'2022 Workshop, Earth and beyond: sustainable living - sustainable life)
- 2050 年に向けて日本ロボット学会の進むべき道 (2022/09/05 第 40 回日本ロボット学会学術講演会 RSJ 創立 40 年記念行事 シンポジウム 招待講演)
- 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 (2022/09/09 第 40 回日本ロボット学会学術講演会 オープンフォーラム 招待講演)
- Introduction to CAFE Project (Collaborative AI Field robot Everywhere) (2022/09/23 Japan-Europe Workshop 招待講演)
- 建設ロボットによる建設業の生産性向上ならびに自然災害対応 ～できていること・これから期待されること～ (2022/11/29 建設施工と建設機械シンポジウム 特別講演)
- 土工施工と舗装の自動化(2023/01/24 第 100 回アスファルトゼミナール特別講演)
- フィールドロボティクス分野における産学連携事例の紹介 (2023/2/17 埼玉県 第 4 回 ロボティクスセミナー 招待講演)
- 土木工事の革新的技術研究開発センターと SIP に関する話題提供 (2023/10/25 地域建設業 新未来研究会)
- Innovations in Earthworks: A 3-Year Progress Report on Collaborative AI Robots for Adapting to Diverse Environments and Innovating Infrastructure Construction (2024/1/25 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics)
- Towards SWARM automation in infrastructure construction (2024/3/30 EU Robotics Forum, Autonomous Swarm for Infra Construction)
- Collaborative AI robots for adaptation of diverse environments and innovation of infrastructure construction (2024/05/13 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2024) Workshop on Field Robotics)
- Implementing Automated Construction...What's Missing? (2024/10/8 第 2 2 回建設ロボットシンポジウム 日韓建設ロボット研究討論会)
- Robotics for inspection (2025/05/19 IEEE International Conference on Robotics and Automation)

また、日本ロボット学会学術講演会では、オープンフォーラムを実施し、他のプロジェクトと共に、永谷からプロジェクトの紹介、全 PI から環境評価技術に関する紹介を行った。SICE システムインテグレーション部門講演会では、毎年、「ムーンショット型研究開発（目標3）：自ら学習・行動し人と共生する AI ロボット」という OS を永谷が設置した。

新聞や報道のアウトリーチについては、以下が挙げられる。

- ・ 本プロジェクトの概要（2021年9月7日 建設通信新聞1面）
- ・ 建設ロボットによる建設業の生産性向上に向けて～できていること・期待されること～（第4回 建設・測量生産性向上展（CSPI-EXPO）Web 記事、会期：2022年5月25～27日、幕張メッセ）
- ・ 東大 永谷氏が語る建機自動化で「できていること・期待されること」標準プラットフォームの重要性（2022年9月27日 BUILT スマートコンストラクション）
- ・ フィールド公開実験（2023年7月6日以降、NHK ニュース7を始め、テレビニュース、7月7日の新聞朝刊、Web 新聞多数：全19社）
- ・ 複数台建設ロボットの動的協働システムによる自動土砂運搬作業公開実証実験（2023年8月24日以降、FNN プライムオンライン、新聞複数社）
- ・ 力制御機能を有する次世代作業機（2023年11月 ヤンマーホールディングス プレスリリース）
- ・ ミニショベルによる地盤掘削時の抵抗力を用いた地盤強度推定（2023年11月 東北大学 プレスリリース）
- ・ 採石場での自動土砂運搬作業（2024年3月 成蹊大学）
- ・ 臨機応変に組み替えられる革新的災害対応システム（2024年5月 大阪大学）
- ・ 経営ひと言／東京大学・永谷圭司特任教授「破綻させない」（2023/09/19 日刊建設工業新聞）
- ・ 砕石を自動運搬…ホイールローダーに後付け装置で自律化（2024/03/26 日刊工業新聞）
- ・ ムーンショット型研究開発（目標3）「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」プロジェクトの紹介(2025/01 日本ロボット工業会 機関誌「ロボット」)
- ・ AI ロボが災害現場で応急復旧-CAFÉ プロジェクト- (2025/06/27 建設通信新聞)
- ・ 土砂が川を塞いだ現場でドローンやロボットを活用する実証実験(2025/7/10 NHK ロクいち！福岡、福岡 NEWS)

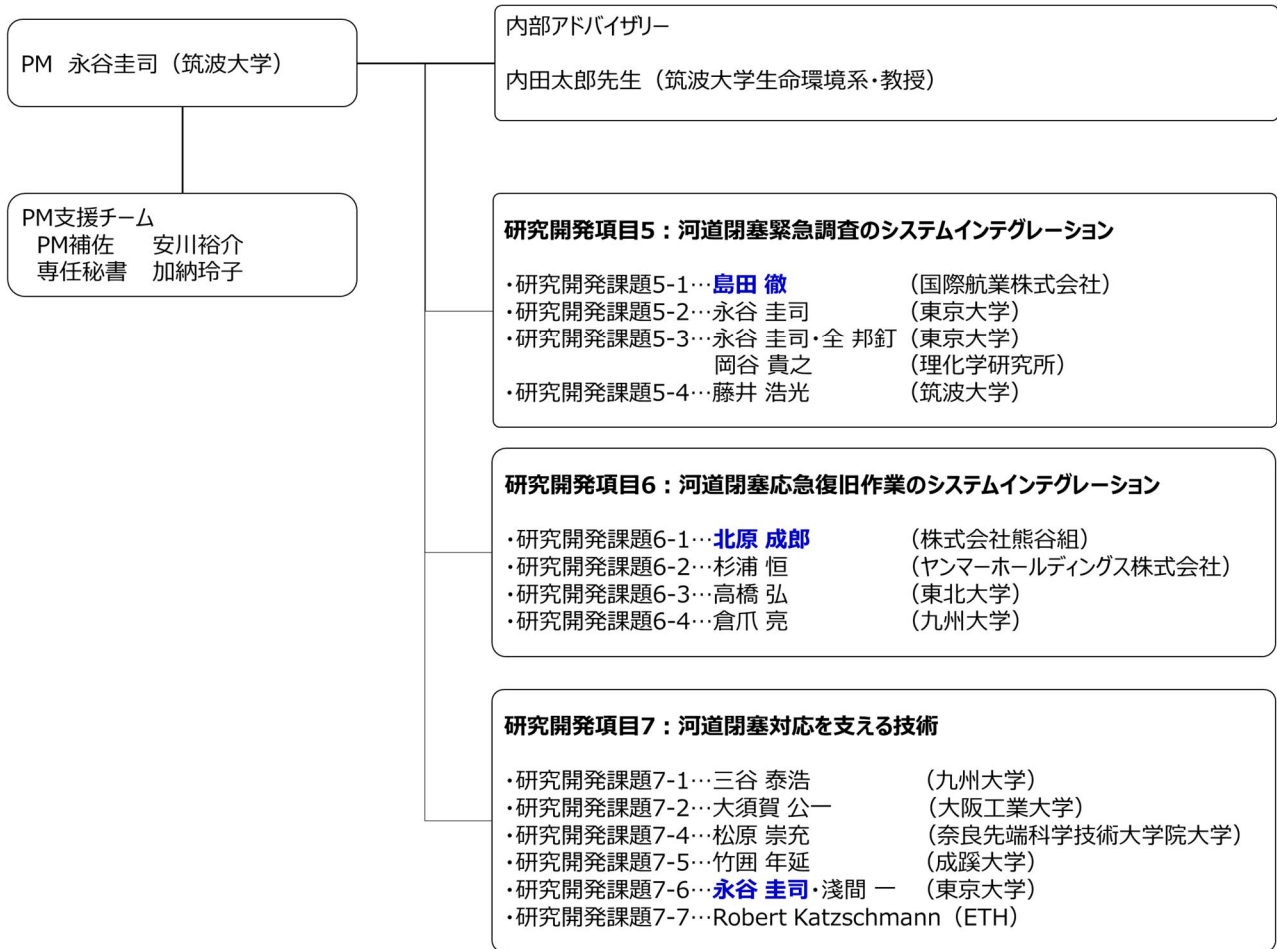
- ・ 河道閉塞を遠隔工事…筑波大学など開発、ロボットシステムの機能 (2025/7/11 日刊工業新聞、Yahoo ニュース)
- ・ 河道閉塞対応ロボシステム応急復旧動作を確認/九大キャンパスで実証実験/実現可能な技術から現場導入 (2025/7/14 建設通信新聞)
- ・ ドローンや小型建機で河道閉塞を応急復旧、無人化施工の公開実験 (2025/7/25 日経クロステック)

また、本プロジェクトの成果の紹介冊子 (1500 部) を作成し、2025 年建設ロボットシンポジウムならびに、SICE SI2025 で配布を行った。

(4) データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトでは、ソフトウェアならびに取得したデータで公開可能なものについては、基本的にオープンにする方針で研究開発を進めてきた。特に、CESIUM を利用した Cloud 型の情報提示システムは、その運用が行われている間は、災害情報を必要とする機関に提供を行う予定である。ただし、プロジェクトが終了した後に、これをどのように維持するかは、今後の課題となる。

4. 研究開発プロジェクト推進体制図（2025年11月30日現在）



※チームリーダーは青字

知財運用会議

- ・特になし

運営会議 実施内容

- 4/12/2021 ムーンショット CAFE プロジェクトキックオフミーティング
PM 挨拶(プロジェクトのおさらい、プロジェクトマネジメント、各タスクフォース(TF)の説明等)、及び8つのTFリーダー挨拶
- 9/6/2021 プロジェクト運営会議
建設ロボット構築時/実験時の安全に関する取り決めについて
- 10/29/2021 プロジェクト課題推進者会議
各課題推進者による令和3年度における研究開発の進捗報告と、今後の研究開発の指針に関する議論
- 4/1/2022 令和4年度ムーンショット CAFE プロジェクトキックオフミーティング
PM 挨拶(基本理念、プロジェクトの方向性について、各タスクフォース(TF)会議について等)、内規について等
- 6/29/2022 Moonshot 目標3 永谷プロジェクト 令和4年度中間報告会

永谷プロジェクト 研究開発報告(研究開発方針の見直しについて、マイルストーンの再設定、2023 年に達成すべき要素技術と現在の進捗の説明(令和 4 年度 6 月時点まで)、ステージゲートへ向けて)、発表内容に対する PD 及び AD からのコメント

6. 10/21/2022 Moonshot 目標 3 令和 4 年度 永谷プロジェクト会議
各課題推進者による令和 4 年度における研究開発の進捗報告と、今後の研究開発の指針に関する議論
7. 10/22/2022 Moonshot 目標 3 令和 4 年度 永谷プロジェクト課題推進者会議
各課題推進者による令和 4 年度における研究開発の進捗報告と、今後の研究開発の指針に関する議論
8. 4/3/2023 令和 5 年度ムーンショット CAFE プロジェクトキックオフミーティング
PM 挨拶、TF 会議について、スケジュールの話/7 月デモの話、安全/リスクアセスメントの話、その他の連絡事項/注意事項
9. 4/21/2023 オウル大学・東京大学・土木研究所ワークショップ
土木研究所フィールドにて、建設機械による自律走行システムのデモ実施、新(あたりし)技術推進本部長からの挨拶、オウル大学 SWARM プロジェクトの概要紹介、ムーンショットの研究概要紹介、PWRI の研究概要紹介
10. 2023/7/4-5 研究成果デモンストレーションおよびプロジェクト課題推進者会議
九大実験フィールドにて、開発成果デモンストレーション実施、九州大学伊都キャンパス附属環境工学研究教育センターにて、プロジェクト課題推進者会議実施
11. 7/6/2023 研究成果デモンストレーション
JAXA 相模原キャンパス宇宙探査実験棟にて、開発成果デモンストレーション実施
12. 10/6/2023 研究成果デモンストレーション
・国立研究開発法人土木研究所 つくば中央研究所 屋外実験フィールドおよび ICHARM 棟講堂(ICHARM 棟 1 階)にて、開発成果デモンストレーション(複数台自律建設ロボットによる動的協働土砂運搬作業の実証実験)見学会とディスカッション実施
13. 12/13/2023 Moonshot 目標 3 令和 5 年度 永谷プロジェクト課題推進者会議
各課題推進者による令和 5 年度における研究開発の進捗報告と、今後の研究開発の指針に関する議論
14. 2024/2/5-11 プロジェクト運営会議
千葉工業大学 藤井浩光准教授の課題推進者就任合意
15. 8/23/2024 プロジェクト運営会議
東京大学 全邦釘准教授ならびに、ETH Prof. Robert Katzschmann の課題推進者就任合意
16. 11/6/2024 Moonshot 目標 3 令和 6 年度 永谷プロジェクト課題推進者会議および建設ロボット見学会
各課題推進者による令和 6 年度における研究開発の進捗報告と、今後の研究開発の指針に関する議論
17. 2025/7/8-9 永谷プロジェクト 開発成果デモンストレーション/プロジェクト会議
九大実験フィールドにて、開発成果デモンストレーション実施、九州大学伊都キャンパス附属環境工学研究教育センターにて、プロジェクト会議実施
18. 11/28/2025 永谷プロジェクト課題推進者会議(最終回)
各課題推進者による研究開発報告と、今後の課題や展望等の議論

5. 研究開発プロジェクト成果

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	13	2	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	13	2	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	15	6	21
口頭発表	88	18	106
ポスター発表	124	5	129
合計	227	29	256

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	10	49	59
(うち、査読有)	5	49	54

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	4	0	4
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	4	0	4

受賞件数			
国内	国際	総数	
0	3	3	

プレスリリース件数
8

報道件数
72

ワークショップ等、アウトリーチ件数
10

以上