



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

実施状況報告書

2024 年度版

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. 当該年度における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では、被災現場を含む難環境において、想定と異なる状況に対して臨機応変に対応し、作業を継続することが可能な協働 AI ロボットの研究開発を目指している。この目標を実現するため、令和 6 年 3 月までは、「1. 土工を革新する AI ロボットシステム」(ハードウェア)、「2. 複数台ロボットの動的協働システム」(複数台ロボットを制御する AI)、「3. 現場を俯瞰するセンサポッドシステム」(センシング技術と環境を評価する AI)という 3 つの研究開発項目を設定し、これらの研究開発項目を並行して進めると共に、これらの評価を行うための「4. 動的協働 AI ロボット群と Dynamic Synthesis の実証」の研究開発を行った。令和 6 年 4 月以降は、特に自然災害現場の応急復旧技術実現を目指し、開発を進めてきたロボット技術を統合するため、「5. 河道閉塞緊急調査のシステムインテグレーション」、「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」を進めると共に、「7. 河道閉塞対応を支える技術」という研究開発項目を設定し、想定と異なる状況にも臨機応変に対応可能な協働 AI ロボットシステムの実現を目指している。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

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)：

本研究開発項目では、河道閉塞緊急調査を実現するためのシステムの統合を目指している。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)をベースとしたプラットフォームに集約される。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。以下に、令和 6 年度に実施した、本研究開発項目における主要な成果について記す。

まず、河道閉塞環境における遠隔情報収集技術について、国際航業株式会社を中心にシステムインテグレーションを進めた。特に、無人での緊急調査技術の実現を目指し、データ共有基盤 (Cesium をベースとしたプラットフォーム) の構築を行うと共に、実証実験で実用性を確認し、専門家レビューにより有効性と課題を整理した。また、河道閉塞湛水部水位・水深調査用センサについては、東京大学が現場実装を進めた。このセンサについては、令和 5 年度に作成した試作機の課題を踏まえ、水深計測の精度向上、動作安定化、通信改善に取り組み、実運用機を開発し、実験で性能を確認すると共に、データ共有基盤への統合を進めた。また、河道閉塞の閉塞部地形変位調査用センサについては、千葉工大が現場実装を進めた。このセンサについては、配置の最適化、防塵・防水対応、長距離無線通信による変位データ取得、省データ化技術の検討を行い、複数のリフレク

タを用いた効率的な地形監視手法を構築すると共に、実災害を想定したフィールドでその有効性を確認した。さらに、環境評価 AI による河道閉塞崩壊部リスク評価については、東京大学ならびに理化学研究所にて研究開発を進めた。具体的には、東京大学は、河道閉塞部のリスク評価 AI を構築し、VQA と LLM を組み合わせた手法を開発すると共に、限られたデータでも学習可能な仕組みを構築し、遠隔システムへの統合を進めた。一方、理化学研究所は、VQA-LLM ハイブリッドと一体型 MLLM の 2 系列を開発し、長距離視覚入力に対応した学習法を構築した。さらに、専門家 8 名の自由対話から得た知見を逐語録化し、68 件の斜面崩壊画像を対象に四層テンプレートで整理し、学習データとして整備した。この二つの手法を相補的に活用することで、河道閉塞部のリスク評価 AI の信頼性を向上させることが可能となった。以上より、令和 7 年度までに、本研究開発項目の技術が、Technical Readiness Level 5 (TRL5: 想定使用環境でのテスト＝模擬的な環境下において、技術・システムの基本的な機能・性能が実証された状態) を達成する見込みが立った。

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) :

本研究開発項目では、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とを目指している。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 1-3 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。これらの技術をインテグレーションすることで、限られた人数(2~3 人)の監督者(作業員 0 人)のみで運用可能な、無人建設ロボットによる応急復旧作業を実施するシステムの実現が可能となる。以下に、令和 6 年度に実施した、本研究開発項目における主要な成果について記す。

まず、河道閉塞応急復旧作業の実現に向けて、株式会社熊谷組を中心にシステムインテグレーションを進めた。熊谷組は、軟弱地盤に対応した作業路設置・排水ポンプ設置技術を開発し、自動建機を活用した実証を実施した。さらに、他機関の技術と本技術を統合し、応急復旧システムとして評価試験を行い、現場実装に向けた有効性を確認した。また、ヤンマーホールディングス株式会社は、力制御アームの機構について、トーションバー構造を改良し、電動小型建機の高性能化を実現した。さらに、現場対応の新アタッチメントを設計し、センサポッドや排水ホースの固定・設置機能を開発することで、目標として設定した設計を完了した。東北大学は、ドローン投下型の地盤調査デバイスを 2 種開発した。一方は、小型コーン貫入装置により地盤強度を推定するもので、もう一方は、球体加速度計で安定した衝撃計測を行うものである。これらのデバイスの開発と改良を進めることで、投下時の不安定性を解消し、建機進入時の地盤強度判断に有効な地盤強度推定手法を構築した。九州大学の倉爪研究室は、空間・路面・移動体情報を統合する杭型センサポッドを設計・開発し、九大実験場で動作を確認した。また、VR 可視化や協

働 AI ロボットによる設置、長時間駆動用制御基板の開発、振動計測の有効性を確認した。以上より、令和 7 年度までに、本研究開発項目の技術が、TRL5 を達成する見込みが立った。

研究開発項目 7(河道閉塞対応を支える技術)

研究開発項目 5、研究開発項目 6 は、これまでの研究開発成果のシステムインテグレーションを行い、TRL5 を目指すものであるが、更なる臨機応変な対応を可能とする技術開発も、継続して進める必要がある。そこで、研究開発項目 7 では、各研究開発課題に対して TRL4(研究室内での初期テスト=制限された環境下において、技術・システムの基本的な機能・性能が実証された状態)を目指し、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」「建設機械に搭載可能なロボットハンドの研究開発」に関する個別の研究開発を進めることとした。以下に、令和 6 年度に実施した本研究開発項目における主要な成果について記す。

大阪大学では、開いた設計による土工革新を目指し、排水作業機と環境計測手法の改良・開発、柔軟履帯移動機と汎用移動機の制御・設計を行い、現場状況に臨機応変に対応して分離・合体可能な輸送コンテナシステム(BRAINS)と統合した。東京科学大学では、柔軟大出力グリップを応用し、立木へのセンサ固定を実現するパワーソフト技術を開発した。ここでは、遠隔操作によるセンサの取り付け・離脱実験や、柔軟レール上を走行する移動カメラの開発と無線映像伝送に成功し、初動遠隔観測の有効性を確認した。奈良先端科学技術大学院大学は、多様な地盤強度に対応可能な掘削戦略の AI 学習手法を開発した。また、Cyber-physical 環境や土工シミュレータを構築し、ドメインランダム化強化学習による制御方策の有効性を確認し、実環境仕様の策定を行った。成蹊大学は、小型建設機械による作業分散型掘削技術について研究開発を進めた。具体的には、3t クラスのスキッドステアローダ 2 台を用いた「ほぐす」「すくう」機能を分担させる構成を提案し、これらの小型建機の遠隔操作・自動走行機能を開発すると共に、各作業個別に、遠隔化と自動化の実装を実施した。東京大学は、小型建設ロボット群による動的協働技術を開発した。具体的には、Unity 上で 12 台のロボットが自然言語指示に従い作業する環境を構築し、機能記述と自己組織化、異常検知技術を統合して、排水ポンプ設置タスクの自動化に向けたシミュレーション検証を実施した。スイス連邦工科大学は、建設機械に搭載可能なロボットハンドの研究開発を行った。具体的には、ロボットハンドのプロトタイプ P1、P2、P3 の設計、製作、および評価に関する研究開発を進め、実建設機械への搭載試験を通じて有効性と課題の抽出を行った。さらに、上述の技術の評価するための技術として、九州大学の三谷研究室は、河道閉塞対応ロボットの走行・走破性能評価指標と手法を構築した。特に、不整地での実機実験を通じて実用性を確認する手法を提案すると共に、動的協働における指標と環境情報の活用方策を検討した。以上より、各研究開発課題で提案する技術が、令和 7 年度までに、TRL4 を達成する見込みが立った。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

令和 6 年度のプロジェクトマネジメントは、東京大学内において、PM、PM 補佐、事務補佐員らの 4 名で実施した。ただし、PM が令和 6 年 10 月に筑波大学に異動したため、10 月以降は拠点を筑波大学に移動し、東京大学の PM 補佐ならびに事務補佐員と共に、本プロジェクトのマネジメントを実施した。また、昨年度に引き続き、河道閉塞対応に関するアドバイザーとして、筑波大学内田教授に内部アドバイザーリーボードとして参画頂き、研究開発に関する助言を頂いた。なお、PI が参加する会議については、全体で集まるキックオフミーティング、成果報告会の他に、PM が各 PI の研究進捗状況を把握すると共に研究機関間の連携を行うことを目的とした TF 会議(5 分野毎に月 1 回ずつ、各会議はオンラインで 120 分、のべ 51 回。)を実施した。また、PM ならびに PM 補佐は、各 PI が実施するフィールド試験(九州大学フィールド、宮城県三本木フィールド、熊谷組技術研究所フィールド、土木研究所 DX フィールド、芋川河道閉塞フィールド)に立ち会い、各技術の確認や指導を行った。また、研究成果については、主として、論文誌、国際会議、国内会議、シンポジウム等で研究成果の公表を行った。また、昨年度に引き続き、フィンランドの Oulu Univ. (Prof. Rauno Heikkilä)との国際連携を目指し、対面を含む複数回の打合せやサイトビジットを行った。また、国内展示会(CSPI:建設・測量生産性向上展)に参加し、建設ロボットの動向調査を行った。また、スイス連邦工科大学(ETH)の Prof. Robert Katzschmann とは、令和 6 年度から国際連携を開始した。具体的には、ETH には、FS(Feasibility Study、1 年間の研究開発)として研究開発項目 7 に参画してもらい、建設機械(小型油圧ショベル)に搭載を可能とするロボットハンドのプロトタイプの研究開発を進めることとした。

なお、研究開発課題の方針については、令和 6 年度初頭に大幅修正を行った。具体的には、研究開発項目 5～7 を設定し、特に研究開発項目 5、研究開発項目 6 においては、TRL5 を目標としたシステムインテグレーションを中心に、研究開発を進めることとした。これに伴い、参画機関の削減と追加が実施され、現在、13 の研究開発機関により、研究開発が進められている。

アウトリーチに関連し、令和 6 年度の本プロジェクトにおける研究成果については、原著論文が 18 件(うち国際が 16 件)、招待講演 1 件(うち国際が 1 件)、口頭発表 19 件、(うち国際が 5 件)、ポスター発表が 26 件(うち国際が 2 件)となった。また、知財戦略等については、令和 5 年度は、合計 6 件の国内特許出願および 1 件の国際特許出願を行った。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。また、YouTube チャンネルを用いて、研究開発紹介 Movie 等の配信も行っている。

データマネジメントについては、令和 6 年度については、令和 3 年度に公開した土工シミュレータについて継続してアップデートを行い、Github を用いて公開した。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 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

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、発災後1週間程度の緊急調査技術(地形情報の収集・湛水位の変化計測・河道閉塞部および周辺斜面の地形変化計測・河道閉塞部の地形判読による危険度判定)を現地への人員の立ち入り無しに実現することを目指すと共に、データプラットフォームを用いた情報共有の実現を目指している。令和6年度には、河道閉塞発生地点上流の湛水位変化の計測技術や河道閉塞周辺の地形変化を把握するセンサ、現地にて得られたデータを共有するシステムなどの開発を他の研究開発機関と連携して実施し、観測機器(水深計測・地形計測)の自律動作による運搬設置の実証実験を実施した。また、情報共有データプラットフォームをクラウド上に設置し、ブラウザ経由で関係者がアクセス可能な状態となるシステムを構築した。さらに、本研究開発では、複数のフィールドで実施した実証実験により、提案システムの実現性・実用性を確認し、更なる課題抽出に取り組んだ。加えて、これらの個別開発成果の連携や有効性を確認するため、複数の土砂災害対策エキスパート(過去の災害の実務担当など)によるレビューを実施した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者: 島田徹 (国際航業株式会社)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、ドローンを用いた遠隔配備による湛水部への水位計測センサの配備ならびに、長距離無線通信による継続的な情報取得が可能なシステムの構築と実現場への適用を目指している。令和6年度には、プロジェクト前半の要素研究開発のフェーズで構築した水深計測デバイスの機能検証用試作機で得た知見をベースに、実運用プロトタイプ機の研究開発を行った。具体的には、令和5年度までに、水深と精度の関係が未検証、着水時と水位上昇時の挙動に工夫が必要、水面付近の通信環境が想像以上に悪いといった知見や問題点が得られたため、①計測部分についてハードウェアとソフトウェアの両面から改良を加え、特に水深が深い(数十メートル単位)場合について精度を確認、②着水時と水位上昇時のソフトウェアについて見直しを行い、安定した動作が可能かを確認、③電波シミュレーションの結果を参考にアンテナ配置を見直し、通信状況が改善するかを確認、の3つの主要な項目の対応を行った。また、屋内および屋外の試験環境においてフィールド実験を行うことで、製作した実運用機の性能評価(水位計測ならびに長距離無線通信)を実施した。屋内の結果、ライン長さの真値が32.0mの際、ラインの推定長さは31.16mとなり、この深度において十分な性能が出ていることが判明した。なお、水位変動については、相対計測となるため、目標の10cmと比較し十分な精度において計測可能である。一方、無線通信については、フィールド試験を実施し、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で、従来は 100 m 程度であった通信距離が、水平距離で最大 787m の距離まで通信できることを確認した。この距離の通信が可能となれば、その地点に中継基地を設置することで、2km 以上の通信が達成可能となる。さらに、取得データを関係者へ共有するためのプラットフォーム(Cesium の利用を想定)に、取得した水深データを統合する実装を進めた。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:全 邦釘 (東京大学 大学院工学系研究科)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、ドローンを用いて取得した画像情報より、AI を用いて対象とする河道閉塞崩壊部の崩壊リスク評価(生じ得る二次災害と、その生じやすさを定性的に出力)を行うシステムを構築し、これを遠隔情報収集システムに統合することを目指している。令和 6 年度は、東京大学では、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、および災害現場のリスク評価を行う AI システムの実現について岡谷グループと分担して行い、斜面崩壊ハザードの分析に特化した VQA (Visual Question Answering) モデルと LLM (Large Language Model) を組み合わせたハイブリッドアプローチを開発した。また、専門家の知識を効率的に AI システムに転移させ、限られたデータからでも効果的に学習する方法を検討した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。(東京大学 全PI)

また、理化学研究所は、災害現場のリスク評価可能な VLM の構造(アーキテクチャ)の研究として、画像特徴を段階的に言語へ引き渡す VQA-LLM ハイブリッドと、画像トークンを直接言語モデルへ取り込む一体型 MLLM の二系列を開発した。また、同 VLM の学習・推論方法の研究では、画像とテキストを連結したプロンプトを次トークン予測の原理に基づいて学習させ、画像を複数枚連結した長距離依存にも対応できるよう視覚トークンの最大長を拡張した。また、斜面崩壊現場を対象とした学習データの構造設計を構築し、日本各地の斜面崩壊画像 68 枚を対象に、30 年以上の現場経験を有する専門家 8 名が自由対話で語った知見を逐語録化し、「災害種別・原因・観察事項・将来リスク」という四層テンプレートに整形した。「マルチモーダル AI の構築」については、上述の通り、斜面崩壊画像から将来リスクを含む状況判断を行う VLM(視覚言語モデル)を構築した。「性能向上のための改良方策の決定」については、二段階でアプローチを策定した。第一に、関連分野の最新学術論文を大量に収集・整理し、そこから抽出した定義・因果関係・計測指標などを知識グラフ化して追加訓練データとして組み込む「知識拡張パイプライン」を検討した。第二に、多段階 CoT (Chain-of-Thought) 推論による高精度化を図るため、推論過程をステップごとに明示させる生成フローを検討した。現在、国際航業グループの協力のもと、崩壊メカニズムの因果連鎖を逐語的に記述した専用データセット(画像・説明文・思考ステップの三層構造)を構築中であり、千例程度のデータを整備する計画である。完成後は、①教師あり CoT 学習 → ②価値関数を用いない軽量 RL 微調整 → ③知識検索を併用した推論、という三段階で性能を段階的に向上させる道筋を定

めた。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。(理化学研究所 岡谷PI)

課題推進者:

全邦釘 (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)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、河道閉塞対応の現場において、現場の地形変位に関する情報を継続的に取得する地形変位調査用センサシステムの開発を目指している。令和6年度には、河道閉塞現場におけるセンサ群の適切な配置計画を行い、各設置場所から計測した地形の変位情報を、長距離無線通信により継続的に取得可能なシステムとして構築すると共に、これを遠隔情報収集システムに統合した。また、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で継続的な計測を実現するための防塵・防水のための試作を行った。さらに、網羅的な広域地形計測を実現するため、ドローンを用いたセンサ設置における配置決定法の構築に取り組み、監視対象となる地形に応じて、視野における死角や転倒や故障などによる欠損に対する頑健性を考慮したセンサ配置手法を提案した。このシステムを、河道閉塞の現場を想定した2種類の地形(埼玉県秩父市二瀬ダム、および群馬県嬲恋村片蓋川砂防堰堤)の計3箇所で検証し、それぞれ設定した監視対象領域に対して約90%以上をカバー可能なセンサ配置を計画した。また、遠隔地における地形変位データの定期的な獲得として、センサシステムにより計測した地形変位データを長距離無線通信に載せて送信するための省データ化の方法論の構築に取り組み、高反射素材を用いたランドマーク(リフレクタ)を用いた計測データの低容量化および長距離無線通信による地形監視技術を開発した。その上で、監視対象エリアに散布した複数のリフレクタを基準とする注目領域の地形データのみを取捨選択し、任意の空間解像度で再サンプリングした上で伝送することで、省容量化したデータを遠隔地に電送する方法論を提案し、当該災害現場を想定したフィールドで性能を確認した。具体的には、長距離小容量通信用の通信機器を製作し、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の通信実験において、約700 m~900 mの見通しの良い環境において、実測で約9 kbpsでの伝送を達成した。これは、例えば約0.3MBの地形点群の場合には、約5分で送信可能である。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:藤井 浩光 (千葉工業大学)

(2) 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

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、軟弱地盤における作業路の構築、軽量素材を用いた作業路の展開設置、小型建設ロボットによる排水ポンプの設置技術の研究開発を行い、この技術を、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うことを目指している。令和6年度には、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、水中バックホウ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。特に、自動走行クローラダンプによる資機材運搬と遠隔操作バックホウにより、作業路展開設置と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システムの研究開発を実施した。これらの技術は、令和 6 年 11 月に個別の評価試験を実施すると共に、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 1 月に実施し、その有用性を確認した。

マイルストーンに対しては、令和 6 年度は、熊谷組技術研究所のテストフィールドにおいて、小型建設ロボットによる作業路構築および排水ポンプ設置システムの統合評価試験を実施した。また、同所において、コーン指数 200 程度の模擬軟弱地盤環境を構築し、軟弱地盤対応マットの敷設および通常建設ロボットによる走行試験を実施し、軟弱地盤上の走行を実現した。さらに、同所において、30kg の排水ポンプの水中設置ならびに 20m の排水ホース設置試験を実施し、作業路構築から排水ポンプ稼働まで 2 時間 17 分で完了した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:北原成郎 (株式会社熊谷組 土木事業本部)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、河道閉塞災害現場において、応急復旧のための遠隔制御や自律動作を用いた高精度な作業を実現可能な作業機の開発を目指している。令和5年度までに、力制御機構を有する作業アームに関して、ベースとの結合と動作確認が完了しているため、令和6年度には、新たに追加要求されたセンサポッドと排水ホースの固定用治具を現場で設置動作を実現できるように、力制御機構を改良した。まず、これまで使用していたコイルバネは、バネがやわらかく、制御の位置決め性能が低いという問題があったため、

今年度は、コイルバネに変えてトーションバーを用いた構造に変更した。トーションバーを用いることで、制御性能を高めるだけでなく、小型化軽量化も可能となり、バケット軸のような先端に取り付けても、負荷が少なくかつ作業性も向上した。ベンチにおける計測によりマイルストーンを達成したことを確認した。次に、センサポッド、排水ホースを固定、および固定するための治具を扱うアタッチメントを新規に設計し、実験を行った。これにより、マイルストーンである、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:設計完了を達成した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:杉浦恒（ヤンマーホールディングス株式会社 中央研究所）

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

当該年度実施内容:

本研究開発では、建設機械が河道閉塞現場に進入可能か否かを判断するため、ドローンから被災地の地盤にデバイスを投下させ、地盤との相互作用をモニタリングすることにより、建設機械が被災現場に進入可能かどうかを判断するシステムの実現を目指している。令和6年度には、①ドローンで搬送できる小型コーン貫入装置および、②加速度計内蔵のステンレス製球体の2つのデバイスを設計・作製し、試験を行った。まず、コーン指数が 200kN/m^2 の時に自重で10 cm貫入する小型コーン貫入装置を開発し、地盤のコーン指数を判断する手法を検討した。フィールド試験では、緩詰め地盤と中詰め・密詰め地盤に対してのコーンの貫入量を計測し、80%の精度で判断できた。しかし、ドローンからの投下ではコーンが斜めに倒れることが多く、貫入が非常に不安定であることが分かった。そこで、改良した小型コーン貫入装置を設計した。これは、3軸加速度計を内蔵する球体をドローンから地表面に投下し、球体が地表面に衝突する際の衝撃加速度を、 x 、 y 、 z 軸方向の合成衝撃加速度から算出するものである。これにより、姿勢の影響は受けずに安定した計測が可能となった。真砂土(砂質土)に対しては、コーン指数 200kN/m^2 以上の範囲では、 $\pm 40\%$ の精度でコーン指数を推定できることが分かった。一方、粘土地盤に対しては、今後より多くのデータを収集できれば、粘土地盤に対する近似式を求めることができると推察されるが、現時点でも計算式を用いれば、ほぼ $\pm 50\%$ の精度でコーン指数を推定可能であると考えられる。すなわち、 $\pm 50\%$ の精度でコーン指数を推定するという今年度のマイルストーンは、ほぼ達成出来たと考えている。

課題推進者:高橋弘（東北大学 大学院環境科学研究科）

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

当該年度実施内容:

本研究開発では、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、それらの情報を収集し、情報をインテグレートすることで河道閉塞環境の状況を正確に把握可能な、環境設置型センサポッドの設計、

開発を目指している。令和 6 年度は、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 ロボットによる、2 ないし 4 台のセンサポッド設置の実施を目標に、必要な設置技術や運搬機器についての検討、設計、開発と動作検証実験を行った。さらにバッテリーによる長時間駆動の実現のために、杭内部にバッテリーを 6 つ搭載し、それらを順次切り替えながら使用するための専用制御基板を開発し、実際に杭型センサポッドに搭載して動作確認実験を行った。具体的には、環境設置型センサポッド（杭型センサポッド）の設計製作を行い、九大実験フィールドにおいて基本動作を確認した。また、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ェースによる監視実験を行った。具体的には、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、この情報を VR ゴーグルで確認した。カメラ画像は正常に約 6Hz で受信し、リアルタイムで監視が可能であることを確認した。また杭型センサポッドの位置情報について、GNSS の SLAS を用いて取得する試験を実施した。ここでは、みちびきの SLAS を利用したため、1 m 以下の位置精度を達成した。さらに、遠隔操縦される協働ロボット（ヤンマー）によるセンサポッドの設置のために、協働ロボットに搭載するセンサポッド運搬台の設計、製作を行うとともに、協働ロボットによるセンサポッドの運搬実験、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貫入実験を行った。加えて、バッテリーによる長時間駆動の実現のため、杭内部に搭載した複数のバッテリーを順次切り替えながら使用するための専用制御基板を開発し、実際に杭型センサポッドに搭載して動作確認実験を行った。これにより、杭型センサポッドの駆動時間は 10 時間となった。最後に、6 軸加速度計・ジャイロセンサによる振動計測実験を行った。設置方法が同じであれば、杭型センサポッドに搭載したジャイロセンサでも同様の CCV 値（地面の固さを示す）が得られることを確認した。以上より、当該年度のマイルストーンを、ほぼ達成したと考えられる。

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院）

(3) 研究開発項目 7:河道閉塞対応を支える技術

研究開発課題 7-1：土エシステムの評価手法の確立

当該年度実施内容：

本研究開発では、河道閉塞対応を実施するロボット建機が備えるべき走行・走破性能の評価指標を検討し、その評価手法を構築すること、ならびに構築した評価手法を用いた実機によるフィールド実験を実施し、その実用性を確認すること、さらに、河道閉塞対応を念頭に置いた動的協働の行動策定に、どのように評価指標を活用できるか、その方策を検討することを目的として研究開発を進めている。これらの目的に対し、令和6年度は、以下に記す(1)～(3)を実施した。

(1)「走行」および「走破」性能を評価可能な評価基準および標準施工モデルの作成

研究開発計画に則り、河道閉塞現場の実態およびその対応内容の調査を実施し、河道閉

塞時にロボット建機が対応すべき作業や現場環境を整理した。事例として、新潟県中越地震における長岡市東竹沢地区、九州北部豪雨における大分県小野地区の事例を調査した。そして河道閉塞対応時のプロセスを留意し、ロボット建機が担うべき作業内容に対応した現場環境条件を設計した。さらに、昨年度までに構築した標準施工モデルおよび評価基準を「土砂運搬」を例に、過酷な環境下における評価も考慮し拡張した。

(2)「走行」および「走破」性能評価のためのフィールド実験の実施

河道閉塞の事例から定義した環境条件に則した実験フィールドにおいて、不整地・悪路におけるロボット建機の「走行」および「走破」を主眼としたフィールド実験を実施した。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、その性能差(施工性能)を構築した評価手法により評価可能であることを確認した。

(3) 動的協働における評価指標および環境情報の活用方策(案)の作成

河道閉塞現場で想定される復旧作業内容からその作業を担うロボット建機が対処すべき現場環境条件を検討した。各タスクの組み合わせから小型ロボット建機群の最適な動的協働(河道閉塞復旧対応シナリオ)を検討し、復旧作業計画を策定した。

以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:三谷泰浩(九州大学 工学研究院)

研究開発課題 7-2 : 開いた設計による土工革新

当該年度実施内容:

本研究開発では、環境に対して柔軟に適応するロボットシステムの実現を目指し、研究開発を進めている。令和6年度には、作業機として「Ammonite」および「d-FlexCraw(移動機と兼用)」を試作し、移動機として「MEGA」および同じく「d-FlexCraw(作業機と兼用)」を開発した。また、輸送・合体を担うコンテナ「BRAINS」を2台開発し、複数台の作業機・移動機間での合体・分離が可能なシステムを試作した。これにより、当該マイルストーンに掲げた複数機種間の合体・分離機構のインテグレーションを達成した。移動機「d-FlexCraw」は最大28度の傾斜を踏破可能であることを実験的に実証した。また、最大0.2mの凹凸を含む屋外の未整備地形においても安定した走行が可能であることを確認し、難環境における走行性能を実証した。さらに、「開いた設計に基づく革新的土工様式」としてのシステムインテグレーションを提案した。ポイントは、様々な革新的移動機と様々な革新的作業機がそれぞれ別々のコンテナに収容されており、それらをセントラルベース(安全な場所)から前線基地に運搬し、現場で至適に組み合わせて、その場その場で必要な土工機を構成する、という方式全体が革新的土工様式になっている、という点である。このシステムを構築すると共に、模擬環境において、動作試験を実施し、その有用性を確認した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:大須賀公一(大阪大学大学院工学研究科)

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

当該年度実施内容：

本研究開発課題では、河道閉塞災害現場にて活用が期待される、柔軟かつ大出力の把持機構に関する技術開発を目指している。令和6年度は、前年度までに開発した「柔軟かつ大出力の把持機構」を応用して、フィールドにおける立木等に、その太さや形に適応しながらカメラやセンサを固定し、主に復旧作業に入るまでの河川閉塞発生初期段階における遠隔情報収集を可能とする「センサ固定を目的としたパワーソフト技術」の研究開発を進め、CAFE ロボットを用いた模擬取付実験を行い、実証的な実験研究を行った。ソフトグリッパについては、前年度までに開発してきたソフトグリッパのコイルバネのばね定数と外周ホースの長さを最適化することにより、様々な把持力や巻き付け能力を実現するソフトグリッパの設計指針を提案した。また、実験により、円柱への巻き付けによって、一つのグリッパで 800N 以上のグリップ力を示すことができた。一方、CAFE アームによる模擬立木へのセンサ設置遠隔操作については、旋回カメラ、バッテリー、電磁弁、無線装置、着脱装置、などが一体になったセンサ群を搭載したソフトグリッパを開発し、これを YanmarCARE の先端へとりつけ、模擬立ち木への遠隔取り付け実験を行った。さらに、着脱装置を開発し、遠隔操作により、立ち木への取り付け作業を実現すると共に、取り付け後には物理的に完全に離脱することができることを実証した。移動カメラの開発と映像伝送については、台形断面を持つ柔軟レールを開発し、ここにかみ合う車輪をモータで駆動することにより、柔軟レール上を遠隔操作により自由に旋回移動できるカメラを開発した。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。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者：鈴森康一（東京科学大学）

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

当該年度実施内容：

本研究開発では、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の実現を目指している。令和6年度は、(1)Cyber-physical 掘削作業実験環境の構築および(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の 2 つの課題について取り組み、ドメインランダム化強化学習による掘削作業戦略の獲得方法を確認し、土工シミュレータへの適用を通じて、その有効性や課題などを明らかにした。また、学習用シミュレーション環境の構築に関して、issac-gym 環境をベースに油圧ショベルによる掘削タスクの学習用シミュレーション環境を開発した。検証用シミュレーション環境の構築に関しては、Opera-sim 環境をベースに油圧ショベルによる掘削タスクの検証用シミュレーション環境を開発した。建設ロボットを用いた実機掘削作業環境の仕様策定については、12t 油圧ショベルを用いて実環境での溝掘削環境の仕様策定を行った。ドメインランダム化強化学習による掘削作業戦略学習の枠組み開発に関して、ドメインランダム強化学習による溝掘削作業戦略学習の枠組みを開発した。土工シミュレータへの適用と評価については、開発した DRRL の枠組みを簡易土工シミュレータによる障害物除去タスクに適用

した結果、提案した DRRL の枠組みでは、DR がない従来手法に比較して、コントローラ比で 1.5 倍以上の効率が達成できることを確認した。また、同様に今年度開発した油圧ショベルを用いた土木シミュレータ上でも、DR なしでは制御方策を獲得することもできず、DR ありでは制御方策を獲得できることを確認した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:松原崇充 (奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、複数小型建設機械を用いた作業分散型掘削技術の確立を目指した研究開発を行っている。具体的には、掘削(=ほぐし+すくい)の機能分散による、3t クラスのスキッドステアローダをベースとした 2 台の小型建設ロボットを用いた掘削技術の確立し、実機を用いたフィールド試験を行うことで、この技術の有用性を確かめる。令和6年度には、まず、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った。スキッドステアローダは、複数種類の専用作業用アタッチメント(「ほぐす」と「すくい」)を既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これを採用し、無線LANが届く距離(数十m)の範囲内で、その機械が遠隔ならびに自動で走行できるシステムを開発した。ほぐし作業については、作業器チラー(硬い地盤をほぐす)の回転およびその姿勢と上下方向アームの姿勢を制御するシステムを開発した。このシステムを用いて、大型の振動ローラで3回ほど締め固められた地盤に対し、20 メートル程度、深さ 10cm、幅 1.8m、走行速度 30cm/sec のほぐし作業を実現した。また、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機体を目指し、切土掘削アタッチメントを用いた土砂掘削試験を行い地面の強度に対する掘削パフォーマンス評価を実施した。

土砂のすくい動作については、作業器をバケットに変更した上で、上記の技術を用いて、自動すくい取り積み下ろし制御システムを開発し、動作の評価を行った。なお、すくった土砂は、クローラダンプの荷台に積み下ろすため、スキッドステアローダは前進しながら土砂をすくうために、クローラダンプについても、GNSSの位置推定を利用した自動走行システムを開発した。また、クローラダンプの位置をスキッドステアローダ追従するシステムも開発した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:竹岡年延 (成蹊大学 理工学部理工学科)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、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、複数小型建設ロボットによる動的協働技術の実現を目指して

いる。特に、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、12 台以上の建設ロボットに対し、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することを目標としている。令和6年度には、動力学シミュレーション環境として Unity を用い、異なる能力を持つ 12 台の小型建設ロボットが連携して作業可能な環境を構築した。また、自然言語によるオペレータと群ロボットのコミュニケーション手法の構築として、オペレータが自然言語を用いてロボット群に指示を出すため、LLaMA を活用した自然言語理解モジュールを開発した。シミュレーション環境内で 6 台のロボットに対して、「排水ポンプを特定位置に設置」などの指示を与え、ロボットがこれらの指示を正確に解釈・実行できることを実証した。さらに、機能記述手法を利用した自己組織化の構築として、ロボットが自らの機能を認識・記述するための機能記述言語を開発し、各ロボットが自身の機能およびそれに関連する知識に基づいて、オペレータからの指示を段階的に分解し、協調的にタスクネットワークを構築・実行する自己組織化アルゴリズムを構築した。加えて、異常検知手法の構築と検証として、ロボット自身の行動予測精度を利用した異常検知システムを開発した。ロボットはタスク実行中に予測精度を記録し、その精度低下を異常とみなすことで自己検知を行う。具体的には、ダンプカー模型の走行経路上に水たまりを設置し、スタック状態を検知するデモ環境を検討した。以上より、当該年度のマイルストーンを達成したと考えられる。

課題推進者:全邦釘(東京大学 大学院工学系研究科) 担当: 浅間一(東京大学 国際高等研究所 東京カレッジ)

研究開発課題 7-7 : A robot hand with flexible handling for use with construction robots

当該年度実施内容:

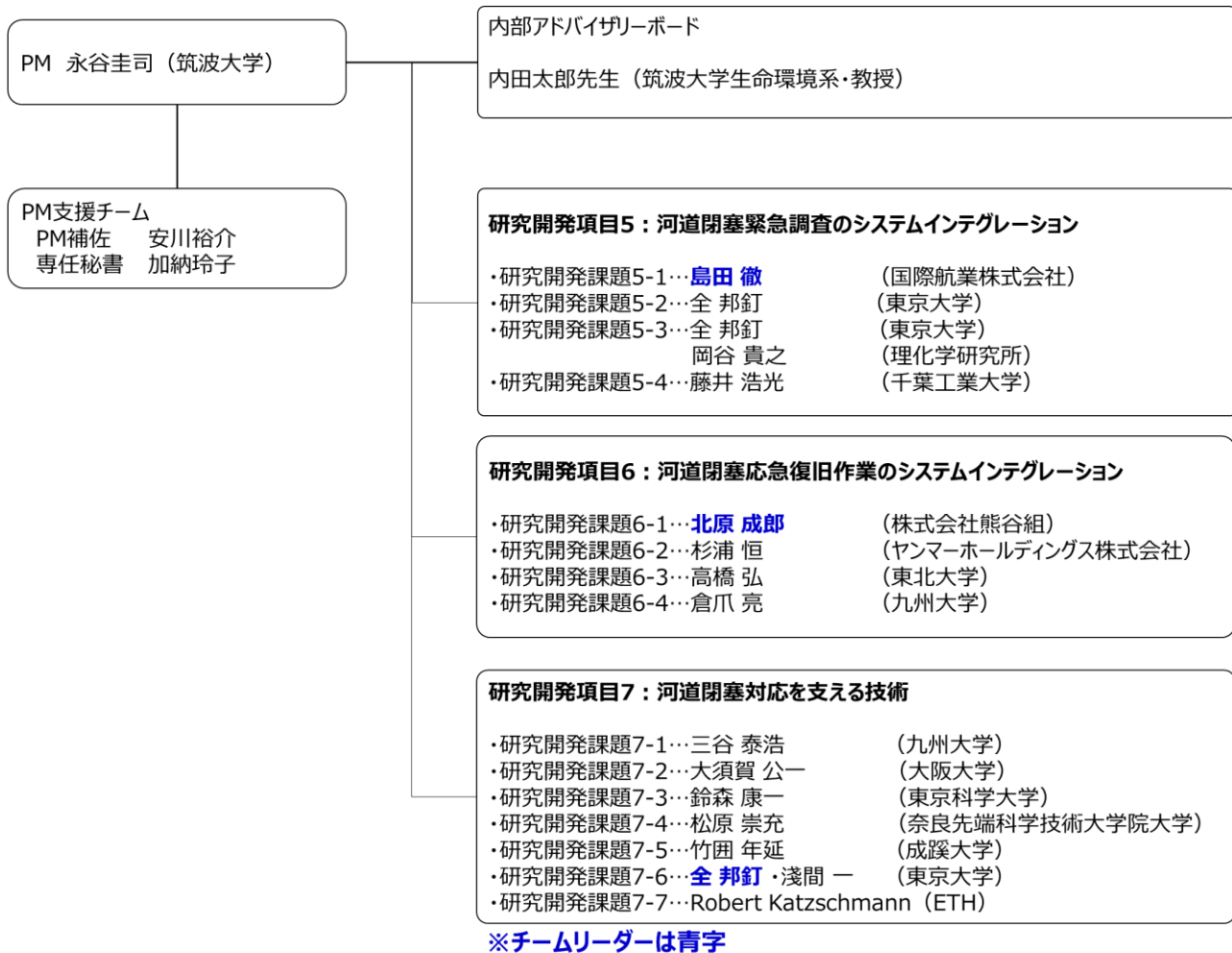
本研究開発課題では、建設機械に搭載可能なロボットハンドの研究開発を行い、河道閉塞の応急復旧への活用を目的としている。令和6年度は、ロボットハンドのプロトタイプ P1、P2、P3 の設計、製作、および評価を中心に進め、実機への搭載試験を通じて有効性と課題の抽出を行った。まず、腱用ロープやネジなどの構成部品を選定し、当研究室で開発してきた SRL 標準ロボットハンドを 2 倍にスケールアップして設計した。この設計に基づき、FDM 方式の 3D プリンタを用いて PLA 素材で P1 を製作した。P1 は全長 44cm で 3 本指を有し、最大 20kg の荷重下で基本的な運動機能を確認した。しかしながら、腱の配線やスプールへの接続に関する課題が明らかとなった。これらの課題を解消するため、令和 6 年 11 月には MCP 関節および腱システムの全面的な再設計を実施し、摩擦の低減、機械的テコ比の向上、および腱の負担軽減を図った。その結果を反映して製作した P2 では、MuJoCo シミュレーションにより腱ルートの妥当性を検証し、新設計の親指も追加した。P2 は全長 60cm で、手動操作により 26kg までの荷重に耐えることを確認した。しかし、高荷重時には一部構造に塑性変形が見られたため、構造強化を実施した。令和 7 年 1 月には、大型ギアや金属製部材を導入し、強化スプールを備えた P3 を製作した。P3 は近位指節

にて 40kg の荷重を持ち上げることに成功した。2 月からは制御ソフトウェアとインターフェースの開発を開始し、モーションキャプチャ手袋と Wi-Fi ルータを用いた遠隔操作システムを構築した。制御系は Arduino および UPS と連携し、リポバッテリー駆動のモータコントローラへ信号を伝達する構成とした。令和 7 年 3 月には熊谷組の試験場において実地試験を実施し、P3 を油圧ショベルに搭載して 1～33kg の各種物体(枝のある木材、不定形の石、プラスチックパイプ、バケツ、柔らかいホース、模擬土嚢)の把持試験を行った。P3 は、ここに記した物体を全て把持し、とくに取手付き物体に対して高い性能を示した。以上より、当該年度のマイルストーンを、ほぼ達成したと考えられる。

課題推進者： Prof. ETH Robert Katzschmann (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich)

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図

全体：



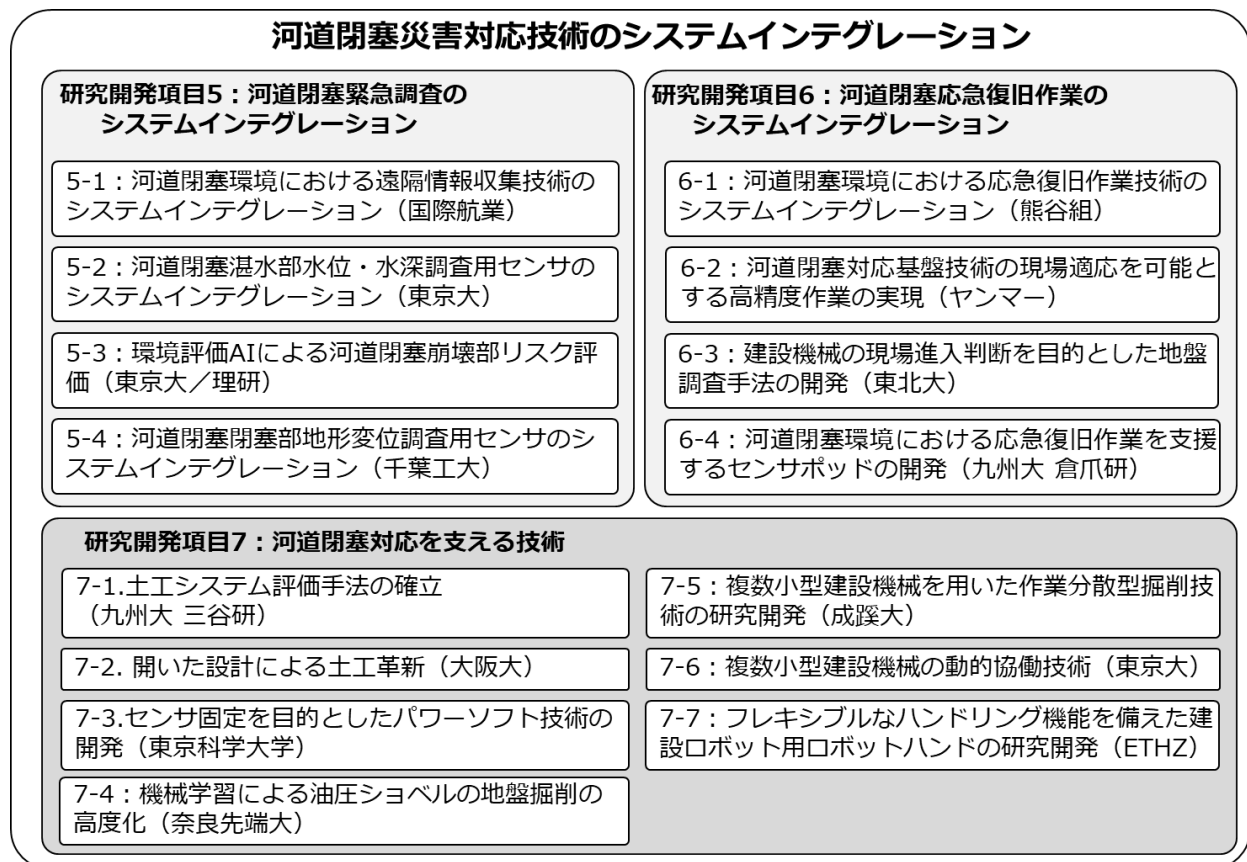
知財運用会議 構成機関と実施内容

- 構成機関：全研究開発機関
- 実施内容：知財の発生は速やかに PM に報告するが、PM が必要と認めた際には知財運用会議を開催し、各研究開発課題遂行時に発生する知財の情報共有、特許申請、運用方法について検討する。

運営会議 実施内容

- 研究プロジェクト全体の進捗管理のために、PM と課題推進者からなる運営委員会を設置し、定期的に運営会議を開催する。
- 研究開発課題（ロボットハードウェア、AI、インフラ構築）に応じて分科会を設置する。

各研究開発項目の体制：



5. 当該年度の成果データ集計

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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	0	1	1
口頭発表	22	4	26
ポスター発表	34	0	34
合計	56	5	61

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	6	11	17
(うち、査読有)	1	11	12

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

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
3

報道件数
34

ワークショップ等、アウトリーチ件数
4