



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

2023 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

東京大学 大学院工学系研究科



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



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、月面や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、「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てきた。2024 年以降は、特に自然災害現場を対象に、開発を進めてきたロボット技術を統合し、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す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1(土工を革新する AI ロボットシステム): 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」と呼ぶ新たな機械の設計指針を体系化し、これに基づいた革新的な土工技術を開発することが本研究開発項目の目標である。令和 5 年度は、令和 4 年度に引き続き、革新的な土工技術のための要素技術に関する研究開発を行った。以下に、本研究開発項目における主要な成果について記す。

「開いた設計」について、大阪大学を中心に体系化を進めた。開いた設計の要は「如何にして環境と身体との相互作用を活かすか」という陰陽制御の考え方であり、陰陽制御系を設計するためには、そのものになってみるという「環世界制御学」の構築が重要であるとの知見が得られた。

革新的な土工作業に関連し、以下の研究開発を行った。大阪大学は、河道閉塞時に排水ホースを遠隔設置可能なロボット「i-Centipot Hose Ammonite」の実証検証機を製作した。東京工業大学は、ツール交換型ハードウェアに搭載可能な、空気圧で動作する「絡みつきグリッパ」を開発した。ヤンマーは、3t の建設ロボットについて、システム信頼性向上を実施すると共に、バケットだけでなく、上記の絡みつきグリッパも搭載可能な機構を開発した。上記のロボットは、九州大学内の屋外ロボット実験フィールド(以下、九州大学フィールド)にて実証実験を行うことで、その有用性を確認した。また、奈良先端科学技術大学院大学は、ドメインランダム化作業学習 AI を用いて、岩石除去作業が可能なショベル型ロボットの制御系を構築した。このロボットは、JAXA が有する屋内実験場「宇宙探査フィールド」(以下 JAXA 探査フィールド)における実験でその有用性を確認した。

革新的なロボット移動技術に関連し、以下の研究開発を行った。大阪大学は、クローラ形状の変更が可能な柔軟双胴クローラ d-FlexCraw の実証検証用機を開発し、九州大学フィールドでの走行実験にて、その有用性を確認した。また、球型多脚移動機構

K3(KyuKyaKu)について、スケールモデルの設計製作、および屋外実験フィールドにおける原理検証を行った。一方、東北大学は、建設機械の土工作業ツールに作用する掘削抵抗力から、地盤強度を推定する手法を開発し、宮城県三本木の屋外フィールドにて、ミニショベルの実機を用いた実験を行うことで、その有用性を確認した。

河道閉塞対応に特化した技術の開発に関連し、熊谷組は、小型建設ロボットの水没対応、軟弱地盤での作業を可能とする軟弱地盤対応マットの開発、およびマット敷設のクローラキャリアダンプの遠隔化改造を行った。また、国際航業ならびに東京大学は、河道閉塞時に配備可能な地形計測および水文観測用の遠隔設置型センシング機器の開発を進めると共に、二瀬ダムならびに浅間山周辺において実証実験を実施することで、その有用性を確認した。

月面着陸拠点構築技術に関連し、慶應義塾大学は、100kgクラスのツール交換型ベースロボットの改良を継続して行うと共に、未知環境における調査戦略手法を構築した。九州工業大学は、ロボットの月面作業において、故障時にロボット自身が故障を検知し、その状況に対応可能なレジリエンス機能に関する研究開発を行った。上述のロボット技術は、JAXA 探査フィールドにて実証実験を行い、有用性を確認した。

研究開発項目 2(複数台ロボットの動的協働システム):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、これによる自律分散型の動的協働システムを開発することが本研究開発項目の目標である。令和 5 年度には、令和 4 年度までに開発した技術を統合し、複数台建設ロボットの協働動作による土砂運搬作業を実現した。以下に、研究開発項目における主要な成果について記す。

東京大学は、令和 4 年度に引き続き、環境ダイナミクスとしての複数台のロボット間のインタラクションを考慮したチーム自己組織化協働ダイナミクスの戦略決定力学系を数理モデルとして定式化を行った。また、シミュレーションを用いて、この自己組織化手法により、環境ダイナミクスに応じたチームとその役割分担、ならびに共働の自己組織化が達成可能であることを確認した。さらに、動的協働アルゴリズムを 8 台の小型模型建設ロボット群に実装し、屋内環境における模擬土砂の自律運搬動作を実現した。

成蹊大学は、上記の動的協働アルゴリズムを 4 台の自動クローラキャリアダンプと自動ホイールローダに実装し、遠隔操縦型の油圧ショベルを加えた 6 台の無人建設機械により、九州大学フィールドにて、自動土砂運搬タスクを実現した。

研究開発項目 3(現場を俯瞰するセンサポッドシステム):Physical 空間で獲得したデータを元に、動的に Cyber 空間に環境情報を構築し、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、環境内に設置して現場を俯瞰することが可能なセンサポッドシステムならびに、センサ情報から環境評価を行う環境評価 AI を開発することが本研究開発項目の目標である。以下に、令和 5 年度の主要な成果について記す。

九州大学は、令和 4 年度に開発した「LiDAR を用いた協働 AI ロボット位置推定技術」

に対する位置推定精度を検証し, 位置誤差 10 cm 以内を達成した. 奈良先端科学技術大学は, 日照や風などの環境要因が時々刻々変化する屋外環境において, 最適な参照物体を用いることで日照や風などの環境要因を補正し, 土壌の含水状態をより高精度に推定できる技術を開発した. さらに, これらの技術を統合し, 動的に Cyber 空間に環境を構築する Dynamic Synthesis のプラットフォーム ROS2-TMS for Construction を構築した. これらの技術は, 九州大学フィールドで行った実証試験において, その有用性を確認した.

また, 取得したセンサ情報を元にした環境評価に関連し, 以下の研究開発を行った. 理化学研究所ならびに東京大学は, 取得した画像データから, 「一体何が起こっているか」ということを本質的に理解するため, Visual Question Answering(VQA)および Large language model (LLM)を活用したモデル構築を行い, 自然災害環境を対象に, このモデルの適用性・有効性を示した. 筑波大学は, 災害現場で求められる挙動予測を目指し, 物理ベース AI(PINN アーキテクチャ)の改良を継続し, その有用性と限界を確認した.

研究開発項目 4(動的協働 AI ロボット群と Dynamic Synthesis の実証): 多様な環境に適応したインフラ構築の実現を目指し, フィールド実験による構築したシステムの評価を行うことが本研究開発項目の目標である. 九州大学は, 土工のひとつである「土砂運搬」に着目し, 施工の構成要素である「作業」を体系的に整理した上で, 「歩掛」に「自重」という新たな視点を取り入れた土砂運搬の評価指標およびその算出式を構築した.

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

令和 4 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 5 名で実施した. 加えて, 主に土木関連の研究開発に関するアドバイザーとして 4 名の内部アドバイザーリーボードを設置し, 研究開発に関する助言を頂いた. 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(9 分野毎に月 1 回ずつ, 各会議はオンラインで 90 分)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, JAXA 探査フィールド, 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, 二瀬ダム)に立ち会い, 確認・指導を行った. さらに, 令和 5 年 7 月に実施したステージゲートにおいて, デモンストレーションならびに PI からの報告会を開催した. 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. プレスリリースについても 3 件を実施することで, 将来的な顧客の開拓を試みた. また, 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, 複数回の打合せとサイトビジットを行った. 国内展示会(建設・測量生産性向上展)にも参加し, 建設ロボットの動向調査を行った. スイス連邦工科大学(ETH)の Prof. Robert Katzschatmann とも意見交換を行い, 令和 6 年度から国際連携を行う方針を固めた. 研究開発課題の方針については, 令和 3 年度初頭に大幅修正を行ったプロジェクトの方針を踏襲した.

令和 5 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 17 件(うち国際が 11 件), 招待講演 1 件(うち国際が 1 件), 口頭発表 26 件, (うち国際が 4 件), ポスター発表が 34 件(国際はなし)となった. また, 知財戦略等については, 令和 5 年度は, 合計 1 件の国内特許出願を行った. 広報ならびにアウトリーチについては, 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, 昨年度より, Youtube チャンネルを開設し, 研究開発紹介 Movie を掲載した.

データマネジメントについては, 令和 5 年度は, 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1: 土工を革新する AI ロボットシステム

研究開発課題1-1: 開いた設計の体系化

当該年度実施内容:

「開いた設計」の要は, 『如何にして環境と身体との相互作用を活かすか』にある. それは「陰陽制御」と言う考え方であり, 実際に陰陽制御系を設計するには, 「そのものになってみる」と言う「環世界制御学」の構築が重要である, との知見が得られた. また, 無限定環境の中で運用する人工物は, 環境と戦ってはいけない. 戦いを挑むと作用反作用の法則によって環境からしっぺ返しを喰らうからである. したがって「柔らかく」しつつも「芯をもつ」ことが重要である. これが「開いた設計」の極意であるとの知見を得た. なお, この「開いた設計の体系化」については, 第 67 回 システム制御情報学会 研究発表講演会にて「立ち往生しない移動体の設計思想に関する一考察」という題目で発表した.

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 1-2: 革新的な土工作業に関する技術

当該年度実施内容:

大阪大学では, 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, 令和 5 年度には, ロボットの原理検証モデルならびに, 実スケールを見越したスケールモデルを開発した. 具体的には「開いた設計」に基づき, 革新的な土工の革新を実現する新しい建機システムとして「i-CentiPot Hose Ammonite」のスケールモデルと「土喰らい」の原理検証モデル, 「自重に頼らない土工作業」としてクローラ型土砂獲得土工機「Antler」の原理検証モデルの設計製作を行った. i-CentiPot Hose Ammonite については九州大学フィールドにて, その他のロボットについては, 大阪大学の屋外実験フィールドならびに屋内

実験場にて原理検証を行い、有用性と限界を確認した。

東京工業大学では、「柔軟かつ大出力の把持機構」に関して、1)パワーソフトロボットアーム及びグリッパを、「アクセス困難領域での作業機構」に関して、2)ワイヤパラレルロボットと3)インパクト駆動ロボットを対象として研究を進めた。パワーソフトグリッパについては、ヤンマーが構築した建設ロボットの先端に搭載し、九州大学フィールドにて、その有用性を確認した。その他のロボットについては、東京工業大学構内の屋外実験フィールドならびに屋内実験場にて動作検証を行い、有用性とその限界を確認した。

ヤンマーでは、3tの建設ロボットについて、これまで個別に開発してきたアームと移動機能を一旦統合し、上期には、東京工業大学のグリッパとのシステム結合を実施し、九州大学フィールドにてデモンストレーションを行った。下期には、このシステムに改良を加え、土木研究所が有するフィールドにて、重量物の揚重アシストならびに、U字溝を力の突き当てを使って並べる作業のデモンストレーションを実施し、精密作業の実行能力を確認した。

奈良先端科学技術大学院大学では、6軸マニピュレータを有する自律移動型ロボットを利用した土工作業実験環境を構築すると共に、ドメインランダム化作業学習AIについて、令和4年度に開発した基盤技術を拡張して、部分観測・複数ロボットに対するAI制御技術をそれぞれ開発し、実ロボットを用いた実験検証を実施した。この技術は、JAXA探査フィールドにて動作試験を実施し、その有用性を確認した。

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 先端科学技術研究科）

杉浦恒（ヤンマー 中央研究所）

研究開発課題1-3:革新的なロボット移動に関する技術

当該年度実施内容：

大阪大学では、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、ロボットの原理検証モデルならびに、実スケールを見越したスケールモデルを開発した。具体的には「開いた設計」に基づき、「革新的な移動機構」として「d-FlexCraw」のスケールモデルと、「K3(KyuKyaKu)」の原理検証モデルの設計製作を行った。d-FlexCrawについては九州大学フィールドにて、K3については大阪大学の屋外実験フィールドならびに屋内実験場にて原理検証を行い、有用性とその限界を確認した。

東京大学では、単クローラの屋内走行実験による解析を進めると共に、難環境走行手法の考案と検証を進めた。具体的には、軟弱かつ障害物が存在する地面におけるクローラ

機構の走行性能を検証した。この実験の中で、適切なタイミングで前進と短い後退を繰り返すことにより、障害物の乗り越え性能が向上することが判明したため、その原理と適用範囲について考察を行った。

東北大学では、地盤条件を拡大して掘削抵抗力のデータを収集するとともに、バケットによる掘削抵抗力データから地盤強度(コーン指数)を推定する手法ならびに、ブレードに作用する地盤反力データから地盤強度(コーン指数)を推定する手法を構築した。さらに屋外フィールドにおいてミニショベル実機を用いて掘削試験を実施し、地盤強度(コーン指数)推定手法の妥当性を検証した。これと並行して、シミュレータを利用し、さらに深層強化学習(DRL)の枠組みを用いた作業機を有する建設ロボットの不整地踏破性能を向上するための、動作生成手法を開発した。

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）

研究開発課題 1-4：協働 AI ロボットのプラットフォーム

当該年度実施内容：

ヤンマーでは、3t の建設ロボットについて、これまで個別に開発してきた各機能を統合し、九州大学フィールドにてデモンストレーションを行った。具体的には、令和 4 年度までに動作確認まで行った作業アームとベースを結合し、実験プラットフォームとして使用できるようシステム信頼性向上を実施した。さらに、このプラットフォームに東京工業大学のグリッパを搭載した。

慶應義塾大学では、締結機構による協働作業方式の有用性の確認、ならびに調査戦略手法の有用性の確認を行うため、令和 4 年度に引き続き、月面インフラ構築用小型ロボットプラットフォームの整備を進めた。このロボットにより、JAXA 探査フィールドにおいて整地動作試験を行うと共に、7 月には、公開デモンストレーションを実施した。

土木研究所では、令和4年度に行った、オープンミドルウェアを既存建設機械へ搭載するための情報公開と、実装時の仕様検討結果を基に、既存の建設機械を複数台用いた動作検証を行った。また、令和 4 年度に GitHub 上に公開した「オープンミドルウェアを搭載したシミュレータ」について、プロジェクトで横断的に利用可能にするための機能改善を行った。

課題推進者：

杉浦恒（ヤンマー 中央研究所）
石上玄也（慶應義塾大学 理工学部）
橋本毅（土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム）

研究開発課題 1-5: 河道閉塞対応に必要なシステム

当該年度実施内容：

令和 5 年度のこの研究開発課題では、熊谷組、国際航業株式会社、工学院大学が、密に連携を取りながら、河道閉塞対応に必要となる個別のシステム開発を進めた。

熊谷組は、河道閉塞（天然ダム）に緊急対応する機器の開発に関して、(1)全体システム構成の設計、(2)排水ポンプ設置機器の製作、(3)養生マット敷設、ホースおよび発電機設置機器の製作を行い、排水ポンプ設置システムの構築を進めた。なお、この研究開発は、熊谷組が有する屋外テストフィールドにて検証を行いながら進めることにより、有効な災害対応技術を確立することができた。

国際航業株式会社では、令和5年度、東京大学 永谷 PI と連携して河道閉塞対応に必要なセンシング機器（水位計測センサならびに地形情報取得センサ）の 2 機を製作し、実環境（二瀬ダム）において動作試験を実施した。一方、センサポッドを運搬する機構についても作成・試験を実施し、それぞれの改良点の抽出や課題解決策を検討することで、センシング機器のアップデートを行った。

工学院大学では、河道閉塞災害環境におけるロボットの情報通信インフラを確立するため、長距離通信技術、大容量通信技術、広域小容量の通信技術について、各ロボットシステムやセンサシステムに組み込んで評価実験を行い、各通信技術の有用性やその限界に関する知見を得た。また、長距離通信に必要となる中継無線機の、設置位置の選定や配置技術の開発も合わせて行った。

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）

研究開発課題 1-6: 月面着陸拠点構築に必要なシステム

当該年度実施内容：

この研究開発課題では、慶應義塾大学、九州工業大学、JAXA が、密に連携を取りながら、月面着陸拠点構築に必要となる個別のシステム開発を行った。

慶應義塾大学では、令和4年度に引き続き、調査戦略手法(地形分類・推論を組み合わせた逐次的な情報量最大化経路計画)の研究開発を進めた。また、締結機構による協働作業方式の考案を行った。これらの手法は、1-4で述べた月面インフラ構築用小型ロボットプラットフォームを用いてJAXA探査フィールドにて動作試験を行い、その有用性を確認した。

九州工業大学では、令和4年度までに石上PIグループと共同で設計開発した、月面土工小型ロボットプラットフォームを用いて、機能レジリエンスとして耐駆動系故障の実証実験を屋内砂場フィールド(九工大・JAXA)にて行った。また、ロボット2台によるシステムレジリエンス技術の開発に向けてとして、ロボット(2台目)を新たに開発し、屋内外のフィールド(九工大)にて2台によるケーブル牽引に関するシステムレジリエンスの評価試験を実施した。これらの実験を通じて、機能レジリエンス・システムレジリエンスの有用性を確認した。

JAXAは、月面インフラ構築のための整地工事において、凹地形を埋める際に活用が期待される、現地で膨張可能な「インフレータブル土嚢」の研究開発を行った。この土嚢は、JAXA探査フィールドにて初期膨張実験を行い、その有用性と限界を確認した。

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)

(2) 研究開発項目2:複数台ロボットの動的協働システム

研究開発課題 2-1:動的協働 AI の体系化

当該年度実施内容：

本研究開発課題では、動的協働AIロボット群の構築に向けて、動的協働AIの体系化を行うことを目指している。令和5年度は、令和4年度に引き続き、環境ダイナミクスとしての複数台のロボット間のインタラクションを考慮したチーム自己組織化協働ダイナミクスの戦略決定力学系を数理モデルとして定式化を行った。また、定式化された体系に基づき開発したアルゴリズムによって、環境ダイナミクスに応じてチームとその役割分担、共働の自己組織化が達成可能であることをシミュレーションで確認した。

課題推進者：

永谷圭司(東京大学 大学院工学系研究科)

担当：浅間一(東京大学 大学院工学系研究科)

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

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、東京大学、成蹊大学、土木研究所が、密に連携を取りながら、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を目指した要素技術の研究開発を行った。

東京大学では、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を行う。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、各チームリーダーの掘削ロボットが協議を行い、状況に応じてチームを自律的に編成し直す手法を構築する。令和 5 年度に実施した課題と実施内容は、以下のとおりである。

(2-2-1) オープン自己組織化によるチームの改編

令和 4 年度に引き続き、状況に応じて、複数のロボットチーム間をロボットが出入りする動的協働アルゴリズムを改良すると共に、複数台の油圧ショベルとダンプトラックによる土砂運搬作業に適用した。

(2-2-2) 動的協働 AI を用いた土砂運搬シミュレーションとアルゴリズムへのフィードバック
構築した動的協働アルゴリズムの有用性を確認するため、複数台建設ロボットの挙動を確認することが可能な三次元シミュレーション環境を構築した。また、このシミュレーション環境において 20 台のロボット群による土砂運搬タスクを実現した。

(2-2-3) 未知性の高い実環境における提案手法の評価・改善

令和 4 年度に引き続き、複数台の模型ロボット（模型油圧ショベルならびに模型ダンプトラック）の製作ならびに改良を行い、8 台の模型ロボットによる土砂運搬作業を実現した。

成蹊大学では、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、作業の遅延や故障など、チーム内で問題が生じた場合に、各チームリーダーの掘削ロボットが協議を行い、状況に応じてチームを自律的に編成し直す手法を開発した。また、実環境における動作試験により、その有用性を確認した。また、様々な実環境でデモンストレーションを実施するため、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同時位置姿勢推定技術、建設ロボットの自律走行制御技術、および、複数センサポッドによる作業環境の認識手法の検証を、複数の屋外環境で実施した。

土木研究所は、研究開発課題 1-4 に記載した通り、オープンソースのミドルウェアを既存建設機械へ搭載するための情報公開を行うことで、複数台の模型ロボット、ならびに複数台の 3t クラスの建設ロボットによる土砂運搬作業を実現するため、各ロボットの制御システム構築に貢献した。

課題推進者:

永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)

担当: 深間一(東京大学 大学院工学系研究科)

竹田年延 (成蹊大学 理工学部理工学科)

橋本 賀 (土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム)

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

当該年度実施内容:

東京大学では、未知性が高く、ロボットの自律行動ではタスクの達成が難しい環境においても、1人のオペレータとの協働操作により問題解決する手法の実現を目指した要素技術の研究開発を行った。令和5年度に実施した課題と実施内容は、以下のとおりである。

(2-3-1) タスク粒度を考慮したロボット群操作手法の構築

オペレータによる介入方法、およびロボット群における介入への対応アルゴリズムの構築に取り組んだ。

(2-3-2) 相補的・協調的なタスク遂行のための協働手法の構築

「タスク粒度」についての推定方法と表現方法の提案を行った。

(2-3-3) 未知性の高い実環境における提案手法の評価・改善

(2-2-3)に記した通り、複数台の模型ロボット(模型油圧ショベルならびに模型ダンプトラック)の製作ならびに改良を行った。

課題推進者:

永谷圭司 (東京大学 大学院工学系研究科)

担当: 深間一(東京大学 大学院工学系研究科)

(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

研究開発課題 3-1: センサポッドを構成する要素技術

当該年度実施内容:

九州大学では、河道閉塞環境にて動作を行う建設ロボットに必要な、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ことを目指している。令和5年度は、この目的の達成に向け、令和4年度に開発したセンサポッド初号改良機を用いて移動体のリアルタイム位置推定技術の精度検証を行い、三次元 LiDAR を用いたロボットの位置推定について誤差 10cm 以下を達成した。さらに、軟弱地盤における建設ロボットの走行可能性の予測手法について、振動センサを用いた地盤強度の推定手法の精度検証を行い、

地盤予測の信頼性が従来手法に比べて 5 割以上向上することを確認した。

奈良先端科学技術大学では、センサポッドに搭載するセンサの一つとして、赤外カメラを用いた対象地盤の含水率推定手法の開発を進めてきた。令和5年度は、最適な参照物体を用いることで日照や風などの環境要因を補正し、地盤の含水状態を、より高精度に推定できる技術を開発した。さらに、この技術を利用し、実フィールドにて含水状態推定実験を実施し、提案手法の有用性と限界を確認した。

国際航業株式会社は、研究開発課題 1-5 に記載した通り、東京大学 永谷 PI と連携して河道閉塞対応に必要なセンシング機器（水位計測センサならびに地形情報取得センサ）を製作し、実環境（二瀬ダム）において動作試験を実施した。一方、センサポッドを運搬する機構についても作成・試験を実施し、それぞれの改良点の抽出や課題解決策を検討することで、センシング機器のアップデートを行った。

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）

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）

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）

永谷圭司（東京大学 大学院工学系研究科）

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

当該年度実施内容：

九州大学では、「センサポッド要素技術のインテグレーション」を担当しており、災害現場における建設ロボットの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ことを目指している。令和 5 年度には、令和 4 年度までに開発したセンサポッド初号機、センサポッド初号改良機をもとに、本体を小型化、モジュール化したセンサポッド実証機の開発を行った。加えて、センサポッドに搭載した複数センサデータを統合し、動的に Cyber 空間に環境を構築する Dynamic Synthesis のプラットフォームを構築し、サイバー空間とフィジカル空間を自由に行き来しながら土工現場の状況を VR ゴーグルで確認するデモンストレーションを行った。

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）

研究開発課題 3-3: AI によるセンシングデータ解析

当該年度実施内容：

理化学研究所では、AI によるセンシングデータ解析を構成する「環境評価のための AI フ

「フレームワーク構築」を担当している。令和5年度には、本研究が対象とするマルチモーダルAIの研究開発が、関連分野において予想を超えるペースで進んだため、その状況を踏まえ、計画書に記載した当初計画を修正しつつ研究を行った。具体的には、専用設計によるマルチモーダルAIモデルと、最近主流となりつつあるLLMをベースとするVLMについて、研究を行った。AIが実行するタスクとしては、データの入手性やタスクの性質の違いを踏まえ、当該プロジェクトが目標とする「斜面崩壊リスク評価タスク」の他、従来から本研究グループが行なっている「橋梁点検タスク」も併せて研究対象とした。さらに、環境評価その他の推論において、外部知識を取り込んでその性能を向上することが可能なAIの構築方法や学習方法を研究した。

東京大学では、理化学研究所が開発したAIフレームワークを過去の災害に対して適用し、その妥当性を検証するため、令和5年度は、地上インフラ構造物ならびに自然災害環境を対象に、土木工学分野における取得データの言語化で人間と同等の性能を実現できていることを確認した。また、観察された複数の現象から、一体何が起こっているかということを本質的に理解するため、Visual Question Answering(VQA)を活用したモデル構築を行い、地上インフラ構造物を対象に、このモデルの適用性・有効性を示した。

筑波大学では、前年度までに構築していたPhysics-informed Neural Networks (PINN)アーキテクチャを用いて、地盤災害現場で求められる数値解析での挙動予測について物理ベースAIの導入を検討した。また、センサポッドで得るデータからのデータ同化について、基礎検証を実施し、その有用性と限界について確認した。

課題推進者：

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）

永谷圭司（東京大学 大学院工学系研究科）

担当：全 邦釤（東京大学 大学院工学系研究科）

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

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

当該年度実施内容：

九州大学では、ロボット技術の評価を行うための屋外実験フィールドの構築と評価方法の確立を目指し、各研究ユニットの実験計画を包括的かつアドホックに調整可能な体制を構築し、多様なスケール・環境条件を備えた屋外実験フィールドを構築するとともに、土工におけるロボット重機の新しい評価基準を確立し、ロボット重機と既存重機の性能比較・評価に利用可能な標準施工モデルベンチマークを作成することを目的としている。令和5年度は、(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、ならびに(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を実施した。

JAXA は、本プロジェクトで進める研究開発と、宇宙探査イノベーションハブで進めている共同研究のフレームワークのシナジーを最大化することを目的とし、レジエンスの観点における月面探査ロボットの評価指標を提案した。また、JAXA 探査フィールドの地形について、ロボットの評価に適した形状を準備した。

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）

3. 当該年度の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

代表機関の PM を支援する体制としては、国際航業株式会社より PM 補佐を獲得すると共に、事務補佐員 2 名、大学事務より 1 名の担当者をサポートとしてつけた。研究の進捗状況の把握については、サイトビジットならびに、月に一度の課題推進者個別会議(TF 会議:90 分ごと 9 分野)を実施した。なお、令和 5 年度は、7 月のステージゲート用の実験を行うため、研究開発成果のインテグレーションを進めるための会議(Individual Theme Meeting:ITM)を複数回実施した。

研究開発プロジェクトの展開

令和 5 年度は、各研究機関が構築してきた要素技術を部分的に統合することを目的とし、複数の研究機関が協働して研究開発を進める体制を取った。具体的には、ヤンマー製建設ロボットへの東工大製ソフトグリッパの搭載や、東大、成蹊大、土木研の協働による、「3t の建設ロボット 6 台の協働による土砂運搬タスク」、東大と理化学研究所の協働による「斜面崩壊リスク評価を実現する AI」の研究開発である。

ステージゲート後には、令和 6 年度から開始する要素技術のシステムインテグレーションについて、特に「災害対応」にフォーカスした研究開発体制の組み直しを行った。

国際連携については、令和 6 年 1 月に実施したヨーロッパ研究者との国際連携に関する会議において、スイス連邦工科大学(ETH)の Prof. Robert Katzschmann と意見交換を行い、令和 6 年度から国際連携を行う方針を固めた。具体的には、ETH が有するハンドの技術を建設ロボットに適用し、災害地において、柔軟な動作による様々なタスクの実現を目指す。

(2) 研究成果の展開

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、令和5年度には、積極的にプレスリリースを行うことで、将来的な顧客の開拓を試みた。プレスリリースリストを以下に記す。

R5/7/6 小型協働作業ロボットによる月面インフラ構築に向けた実証実験の公開

R5/8/23 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の公開実証実験」の公開

R5/11/20 遠隔施工等実演会:力制御機能を有する次世代作業機

(3) 広報、アウトリーチ

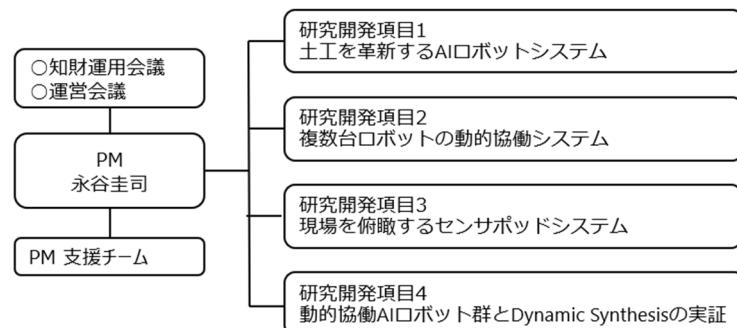
代表機関の支援を受けつつ、ホームページを活用した研究進捗報告、ホームページの更新、リーフレット等による広報といったアウトリーチ活動を、積極的に行つた。

(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運営した。また、個人情報を含むデータについては、取り扱いに十分注意した。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図

全体：



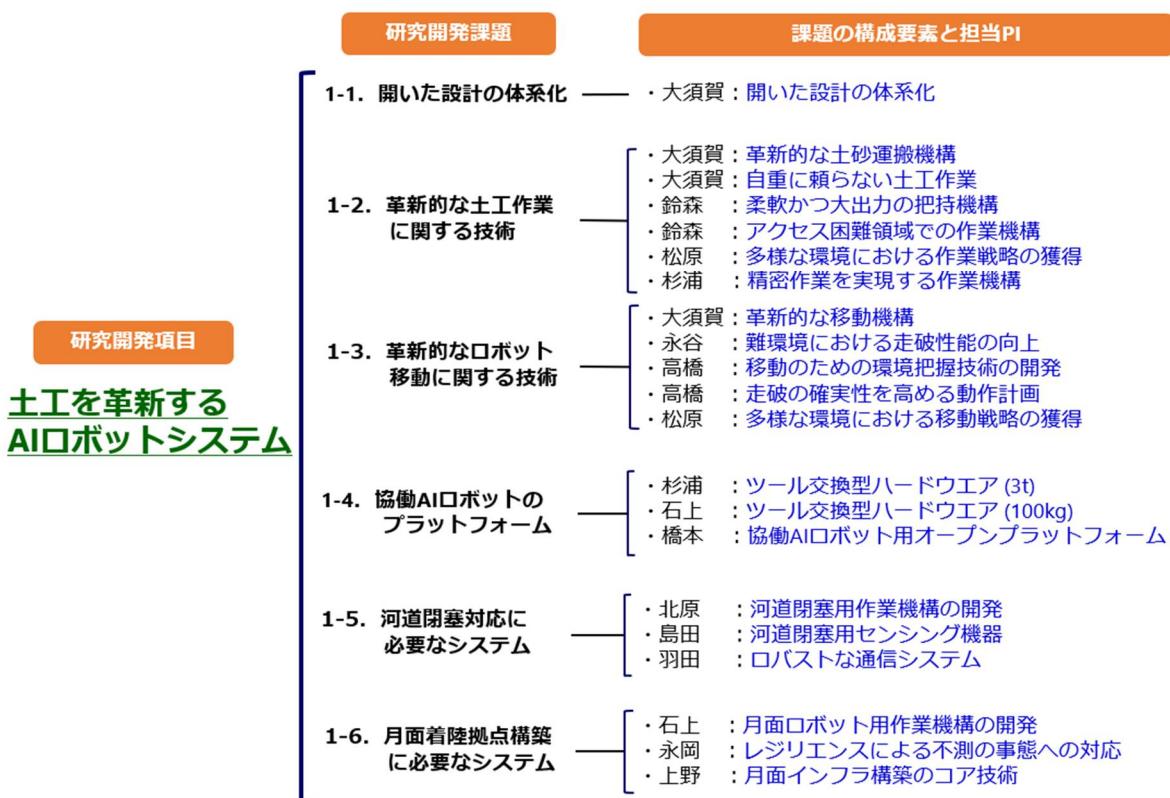
知財運用会議 構成機関と実施内容

- 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：



| 研究開発項目 | 研究開発課題 | 課題の構成要素と担当PI |
|---|--------------------------------|---|
| 複数台ロボットの動的協働システム | | |
| | 2-1.動的協働AIの体系化 | ・淺間：動的協働AIの体系化 |
| | 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 | <ul style="list-style-type: none"> ・淺間：オープン自己組織化によるチームの改編 ・淺間：動的協働AIを用いた土砂運搬シミュレーションとアルゴリズムへのフィードバック ・永谷：模型群ロボットによる実証とアルゴリズムへのフィードバック ・竹田：複数台建設ロボットの自律制御とアルゴリズムへのフィードバック ・橋本：協働AIロボット用オープンプラットフォーム |
| | 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 | <ul style="list-style-type: none"> ・淺間：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 ・淺間：1人のオペレータによる土砂運搬シミュレーションとアルゴリズムへのフィードバック ・永谷：模型群ロボットによる実証とアルゴリズムへのフィードバック ・竹田：複数台建設ロボットの遠隔制御とアルゴリズムへのフィードバック ・橋本：協働AIロボット用オープンプラットフォーム |
| 現場を俯瞰するセンサポッドシステム | | |
| | 3-1. センサポッドを構成する要素技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・倉爪：協働AIロボットのリアルタイム位置推定技術 ・倉爪／向川：環境評価や未来予測を行うためのセンシング技術 ・島田／永谷：センサポッドの遠隔配備技術 |
| | 3-2. センサポッド要素技術のインテグレーション | <ul style="list-style-type: none"> ・倉爪：インテグレーション ・永谷：センサポッドの実証実験 |
| | 3-3. AIによるセンシングデータ解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・岡谷：環境評価のためのAIフレームワーク構築 ・西尾：対象環境の未来変動予測 ・全：過去の災害に対する適用と検証 |
| 動的協働AIロボット群とDynamic Synthesisの実証 | | |
| | 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 | <ul style="list-style-type: none"> ・三谷：フィールドの構築と評価方法の確立 ・JAXA：模擬月面フィールドでの評価方法の確立 ・熊谷組：模擬河道閉塞環境の構築 |

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 |