



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

2022 年度版

人と AI ロボットの創造的共進化による

サイエンス開拓

原田 香奈子

東京大学 大学院医学系研究科／大学院工学系研究科



研究開発プロジェクト概要

科学者と対等に議論しながら、人では困難な環境（危険な環境、微細な環境、等）におけるサイエンス実験を行う AI ロボットを開発します。科学者と AI ロボットの関わり合い方を自在に変え、共に試行錯誤することで未経験の対象物や環境にも対処します。それにより 2050 年には、サイエンス分野において AI ロボットによる科学原理・解法の発見を実現します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/33_harada.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
谷村 省吾	名古屋大学 大学院情報学研究科	教授
丸山 善宏	オーストラリア国立大学 計算機科学科	上級講師
谷口 忠大	立命館大学 情報理工学部	教授
竹内 一郎	名古屋大学 大学院工学研究科	教授
森 健策	名古屋大学 大学院情報学研究科	教授
岡田 慧	東京大学 大学院情報理工学系研究科	教授
新井 史人	東京大学 大学院工学系研究科	教授
原田 香奈子	東京大学 大学院医学系研究科	准教授
魚住 信之	東北大学 大学院工学研究科	教授
佐藤 良勝	名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所	特任准教授
武部 貴則	東京医科歯科大学 統合研究機構	教授
有澤 美枝子	九州大学 大学院農学研究院	教授

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、ムーンショット目標 3 が掲げるターゲットである「2050 年までに、自然科学の領域において、自ら思考・行動し、自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットシステムを開発する。」「2030 年までに、特定の問題に対して自動的に科学的原理・解法の発見を目指す AI ロボットを開発する。」の実現に取り組む。

具体的には、科学者と対等に議論しながら、人では困難な環境（危険な環境、微細な環境、等）におけるサイエンス実験を行う AI ロボットを開発する。科学者と AI ロボットの関わり合い方を自在に変え、共に試行錯誤することで未経験の対象物や環境にも対処する。それにより 2050 年には、サイエンス分野において AI ロボットによる科学原理・解法の発見を実現する。

プロジェクトのマイルストーン

■ 2030 年までのマイルストーン

科学者の意図や思考をこれまでの活動などから自動的に推定し反映しながら、これまで人間だけではできなかったサイエンス実験を自律的に行う AI ロボットを開発する。

■ 2025 年までのマイルストーン

AI が膨大な実験結果を自動で解釈し、人間では気付くことができないような仮説を科学者に伝えることで科学者が新たな方針を立てることができる等、これまで人間だけではできなかったサイエンス実験を自律的に行う AI ロボットを開発する。

プロジェクト内の研究開発テーマの構成

自律的にサイエンス探求する AI ロボット「AI ロボット科学者」を実現するためには、「人間の科学者の身体能力を超えて実験操作を行うロボット身体」と、「人間の科学者の情報処理能力を超えた処理を行い、具体的な指示がなくても AI ロボットらしいやり方で創意工夫をしながら探求する AI」を開発して統合し、自律的にサイエンス探求を行う必要がある。事前に決められた実験をロボットが自動で大量に行うのではなく、人間の科学者の身体能力や情報処理能力では困難であり、現在の AI ロボット技術でも困難な実験を AI ロボット科学者が自律的に行うことで、これまでとは質の異なる発見を可能にし、人とロボットが共に新しいサイエンス領域を開拓していく。本プロジェクトでは、ライフサイエンス分野における植物や動物を対象とした実験を対象として、AI 分野・ロボット分野の研究者とライフサイエンス分野の科学者が参加する総合知のプロジェクトとして共同研究を推進する。具体的には、まずは AI ロボット科学者の AI とロボット身体を統合しながら開発を進め（研究開発項目 2：次世代 AI ロボット）、その試作を用いて実際のサイエンス探求を行う（研究開発項目 3：サイエンス探求）。また、AI ロボット科学者の AI が知識と技能を体系的に扱うための数理基盤を研究する（研究開発項目 1：融合 AI 理論）。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

■ 研究開発項目 1：融合 AI 理論

概要：人間の知能は、膨大な知識と技能の候補を探索して実世界で試すことで新たな知識や技能を獲得しながら発達する。このプロジェクトでは AI が知識と技能を体系的に扱うための数理基盤を研究する。当該年度は、圏論的融合 AI 手法の研究を進め、また、システムとしての実装に取り組み、提案手法の優位性を標準データセットを用いて定量的に実証し

た。また、技能を対象とした潜在的状態空間についての研究を行い、NewtonianVAE をマルチモーダル・マルチビュー情報へ対応可能できるように拡張した。

■ 研究開発項目 2：次世代 AI ロボット

概要：AI ロボット科学者のロボット身体として前年度までに試作した AI ロボット・プラットフォームの開発を更に進め、ロボット遠隔操作によって微細な対象物に対して複雑なタスクを実現し、AI 学習用のデータ収集を開始した。また、微細な植物細胞や動物細胞、生体組織をハンドリングするマイクロロボットツールを開発してセンサを統合した。AI ロボット科学者の知識 AI としては、自動で文献を収集しシミュレーションと組み合わせて仮説を生成する方法、同定された仮説の信頼性を評価する方法、実験計画法の一つであるベイズ最適化を不確実性を考慮できるように拡張する手法、植物の微細な気孔や根、動物の微細血管などの微細構造を自動で解析する手法などを開発した。AI ロボット科学者の技能 AI としてはロボットの自律化に関する研究を進めた。熟練者を模範した動作からロボットの動作範囲の制約を与え、これを用いてデータ収集と模倣学習を行う手法を開発し、自律的な復帰動作を組み込んだ適応的な制御プログラムが自律的に獲得されることを示した。

■ 研究開発項目 3：サイエンス探求

概要：難環境において、熟練科学者でも現在の AI ロボット技術でも実現できない植物・動物実験を対象として、プロジェクトで開発された AI 技術・ロボット技術を適用し、実際のサイエンス探求へ適用した。主に 3 つの具体例で研究を行っており、文献や化合物データベースから AI が見つけた仮説をロボットで実証して新しい知識を獲得する例として、農薬の代替となるバイオスティミュラントの開発、AI が狙った場所の細胞をロボットを用いて正確に回収する例として植物再生や未知の病気の研究、熟練操作から新しい技能を獲得する例として、マウスなどのライフサイエンス分野の微細対象物へのロボット操作を研究した。科学者が新たな知見を得ることに貢献した例も出てきており、AI ロボット技術の開発をさらに進めることで、実際の科学発見に貢献していく。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

本プロジェクトは分野横断的研究プロジェクトであり、数理分野の研究者、AI・ロボット研究者、科学者が実際のサイエンス探究を例題として共同研究を行いながら、それぞれの研究を発展させるためのマネジメントを行っている。課題推進者らは、技術グルーピングとしての AI グループ、Robot グループ、応用としてのグルーピングである Plant グループ、Animal グループの 4 種類のグループにわかれて（重複参加可能）、Slack などで適宜情報を共有しつつ、1、2 か月に 1 回の定例会議で互いの進捗を把握している。PM と PM 補佐は原則としてすべての定例会議に参加することで全体の進捗を管理している。

アウトリーチとしては、京都で開催されたロボット分野のトップカンファレンスにて、AI ロボット・プラットフォームの展示と遠隔操作のデモンストレーションを実施し、Keynote talk、Big Challenge Forum への参加などのアウトリーチを行った。その他にも各課題推進者による招待講演や中高生を対象とした操作体験なども行い人材育成にも寄与している。

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：融合 AI 理論

研究開発課題 1：サイエンスする知能の数理理論

当該年度実施内容：当該年度は、AI の基本モデルである Attention の数理解造を研究し、物理的な観測によって得られるデータ空間を圏論的に構造化する方法を研究した。その成果として、諸々の物理量の和や積などの演算を圏の射の合成によって記述する物理量の亜代数圏 (algebroid) を構成した。とくに量子力学に現れる物理量は非可換積とヒルベルト空間上の作用という演算構造を持つが、この構造も圏の射の合成則として表現できることを示した。また、物理理論に現れる諸命題は、演繹推論という関係で結ばれるが、諸命題を関係づけて編成する方法として公理化があることを論じた。物理量データの亜代数圏を構成して高次概念の組織化の方法を提供したことにより、和差積の演算ができる物理量に限定した形ではあるが、高次概念形成の方法論を見つけた。

課題推進者：谷村省吾（名古屋大学）

研究開発課題 2：「サイエンス AI ロボティクスに向けた圏論的記号処理の次世代パラダイム」研究

当該年度実施内容：

1. Operad は記号的代数構造を記述するための圏論的概念である。Operad の理論は圏論に基づく抽象数学理論の中でも特に高度なものであるが、当該年度の研究ではこの Operad の記号代数理論を確立統計的構造と融合させて応用することで、これまでの融合 AI 研究をさらに推し進めた。さらに、具体的にシステム実装して検証実験を行うことで、圏論に基づく融合 AI フレームワークのパフォーマンス検証実験を実施した。それにより、圏論に基づかない、他のニューロシンボリック AI 手法などの融合 AI 手法に対する圏論的融合 AI 手法の優位性を標準的なデータセットを用いて定量的に実証することに成功した。
2. 当該年度は、特に、点集合概念に基づく集合論的な表現手法と記号的・代数的表現手法の等価性を示す基本定理の証明を数学的に厳密に与えることに成功した。
3. 量子力学や一部の認知科学・意思決定理論において観察される部分構造論理の構造の研究を実施し、それらのための圏論的意味論に基づくフレームワークを開発した。またその圏論的意味論の基本定理を証明した。研究成果は論文として纏め、圏論における最も伝統的なトップジャーナルにアクセプトされた。
4. 次世代の融合 AI に基づくサイエンス AI ロボットの ELSI について、これまでの研究を基礎としてさらに研究を進めマイルストーンを達成した。研究成果を論文として纏め出版した。さらに、前年度に出版した AI 倫理に関する論文が当該年度に Springer AGI (Artificial General Intelligence) Best Paper Award を受賞した。

課題推進者：丸山 善宏 (The Australian National University)

研究開発課題 3

次年度から開始する。

研究開発課題 4：潜在構造発見の自律ロボットに向けた融合 AI

当該年度実施内容：

本研究開発課題では（１）潜在構造を発見し活用する融合 AI マニピュレーション技術、（２）潜在構造を活用した能動的探索手法の研究開発に取り組んだ。その中で当該年度においては下記の内容を実施した。

（１）潜在構造を発見し活用する融合 AI マニピュレーション技術

本研究では潜在空間形成にニュートン力学の制約を与える世界モデルである NewtonianVAE をマルチモーダル・マルチビュー情報へ対応可能なように拡張し、外科的縫合タスクにおける刺入・刺出タスクを模したタスクを実現した。NewtonianVAE はニュートン力学の制約を活用することで、非常に少ないサンプルデータから世界モデルを構築できる。刺入・刺出タスクでは刺入点へのリーチングと対象物への貫通、そして針先のピックアップという一連の動作を要求されるがその実現に NewtonianVAE を応用した。

（２）潜在構造を活用した能動的探索手法

深層学習に基づく潜在構造発見手法をさらに発展させ、基礎的な潜在構造を仮定した能動探索手法に関して自由エネルギー原理に基づき定式化した。具体的には世界モデルと予測符号化の考え方を自由エネルギー原理の視点から統一的に俯瞰し、そのロボティクス応用に関して整理を行った。

課題推進者：谷口 忠大（立命館大学）

（２） 研究開発項目 2：次世代 AI ロボット

研究開発課題 1：潜在構造発見の能動的探索 AI

当該年度実施内容：本研究課題は AI・ロボットによるサイエンス探求を目指すとりくみのうち、仮説・設計の自動化を目標とするものであり、目標に向けて課題として「仮説・設計のシステム科学創出」と「実践研究における科学的発見」の 2 つの課題にとりくむ。前者においては、AI による仮説の立案・評価・検証を行う枠組を定式化し、汎用的な方法の開発を行うことを目指した研究を実施する。後者においては、植物研究、動物研究を行うグループの具体的な科学研究課題に共同してとりくみ、AI を活用した仮説・設計の有効性を実証する研究にとりくむ。当該年度は、具体的なとりくみとして下記の研究項目を実施した。

1 つ目の研究実施項目は研究対象に関する潜在構造（仮説）を同定するための方法開発であり、当該年度は、系列マイニングと呼ばれる技術を活用し、離散シンボル表現された系列データから予測に強く影響を与える部分系列を同定する方法を開発した。実証課題であるバイオスティミュラント候補化合物の同定において、化合物を SMILE と呼ばれる系列情報に変換し、SMILE 情報に変換された化合物から、バイオスティミュラント性能の強く影響を与える部分系列の同定を行った。

2 つ目の研究実施項目は AI や機械学習により同定された潜在構造（仮説）の信頼性を定量化するための方法開発であり、当該年度は、深層学習アルゴリズムによって同定された仮説の信頼性を評価する方法を開発した。開発した方法は、幅広いクラスの畳み込みニューラルネットワークに適用でき、内部表現に基づいて選択された仮説の統計的有意性を p 値や信頼区間として表すことができる。この方法により、潜在空間で探索された仮説の信頼性を評価することができるようになる。

3つ目の研究実施項目はAIや機械学習により同定された潜在構造（仮説）の検証を行うための実験計画を行うための方法開発であり、当該年度は、ベイズ最適化と呼ばれるAIを用いた実験計画法を不確実性を考慮できるように拡張した。具体的には、制御可能な設計変数と制御不能な環境変数を入力とするベイズ最適化法を構築し、環境変数が特定の確率分布に応じた不確実性を有している場合、次に試すべき実験パラメータを系統的に決定することができる。

4つ目の研究実施項目はAIによるロボットの制御パラメータの同定を行うための方法を開発し、その有用性をマイクロロボットによる細胞収集タスクで実証することである。当該年度は、一定時間ごとに撮影された細胞画像から、個々の細胞をトラッキングするための技術と、細胞の移動ダイナミクスの推定を行うタスクを行った。パターンマイニングと呼ばれる技術を活用し、影響の大きな複数の要因の組み合わせとして表現される潜在構造をデータから同定する数理情報技術を開発した。

課題推進者：竹内 一郎（名古屋大学）

研究開発課題2：事前知識に基づく観察・解釈AI

当該年度実施内容：

1. 事前知識情報を用いた複数の微細構造（動物の頭部血管とヒト血管、植物気孔や根細胞など）の自動認識と計測手法の開発を目指し、動物頭部血管とヒト血管の解剖構造の高精度抽出、抽出血管特徴の解析（オルガノイド解剖を含む）、植物解剖構造（気孔、根細胞などの微細構造）の認識と計測手法の開発を行い、クラニアルウィンドウから観察される微細血管構造と免疫細胞、植物共焦点顕微鏡画像から根の細胞構造、顕微鏡画像から気孔領域の形状情報の自動抽出と精度向上、イメージスキャナーで取得した画像から根の主根と側根の長さを自動測定するソフトウェアの実現を達成した。前年度と比較してより高い精度での微細構造認識が可能となった。

2. 植物根細胞の認識、気孔構造の認識と事前知識への転換に関する手法の開発を進めた。共焦点顕微鏡画像から抽出した植物根細胞の位置やサイズと事前に取得された情報（撮影条件など）を用いて、細胞の動きの速度推定が可能であった。根の自動測定については、根の領域の抽出結果と事前に取得された知識を利用して、主根と側根の判定や長さ解析に関する研究を進めた。個々の画像から根の成長状況を解析し、撮影日付などの情報を考慮して、根の成長状況を把握することができた。

3. 自然言語処理を用いてサイエンス論文を解析する手法の開発を進めた。まず、生物分野の論文を対象に論文の質の自動推定システムを構築した。具体的には、直近の論文の引用情報を活用することで、発表されてから1年経過していない論文の質を高精度に評価するモデルを構築した。次に、バイオスティミュラント候補のシミュレーション結果を論文の概要から推定するモデルを開発した。ある時点で論文の概要から有望な候補であると推定された化合物についてさらにシミュレーションを行い、その結果を基に推定モデルの更新を実施することで、より有望な候補を推薦するシステムを構築した。また、改変培地に関する文献から培地条件を抽出する研究を進めた。サーベイ論文でまとめられている培地

条件を手掛かりとして、サーベイ対象の文献から培地条件を抽出する枠組み、および、大規模言語モデル（LLM）を用いて文献から zero-shot または few-shot 学習により培地条件を抽出する枠組みの検討を行った。

4. AI ロボットの経験を人へフィードバックする技術については、非常に初歩的な段階であるが、AI ロボットの経験を取得する手法の開発を進めた。血管の解剖情報、細胞の形状情報に関する知識を獲得し、累積された経験を人へ伝える初期的検討を行った。また、植物根の共焦点顕微鏡画像からの個々の細胞の形状情報や位置情報の抽出結果と追跡結果に基づいて、植物細胞に関する知識を取得する手法の開発を進め、抽出したこれらの知識をロボットへと伝える方法の初期的検討を行った。

課題推進者：森 健策（名古屋大学）

研究開発課題3：融合 AI によるマニピュレーションタスク戦略の獲得と生成

当該年度実施内容：

1. 当該年度は、複雑な双腕操作の模倣学習手法として、技能が必要とされる標準タスクであるペグトランファーを対象として研究を行った。タスクの解析からペグを操作するツールに重なる仮想的な 1 軸の直動関節を設け、制約をかけながら逆運動を解くことで、作業空間を模したボックスへの挿入点に負荷をかけずに動作するようにした。さらに、最初に熟練者の模範となる動作から奥行き方向に対する最小値最大値制約を生成し、これを用いてデータ収集と模倣学習を行った。これにより、ペグの位置がずれるなど想定外の状況でも、自律的な復帰動作を組み込んだ適応的なロボットの制御プログラムが自律的に獲得され、高い精度のペグトランファーが可能であることを示した。

2. マウスを用い、クラニアルウィンドウ法でのマウス頭蓋骨ドリリングを遂行可能な認識行動ロボットシステムを開発した。マウスは個体差や部位差が大きいため、その影響を受けにくい振動認識を用いた。ドリリングの軌道の微小区間ごとに貫通を認識し、その区間のドリリングを停止することで部位差にも対処することで脳表面にダメージを与えずにドリリングを完遂する手法を構築した。頭蓋骨を模擬したタスクにて開発した手法の有効性を確認し、マウスを用いた実験に着手した。（他の研究室で処置された後のマウスを再利用して予備実験を行っており倫理的な問題はない。）

3. 前年度に先行して公開したシミュレーション環境を継続的に更新し、適応的ロボット制御プログラム、認識行動インテグレーションにおいて活用した。

4. 当該年度は、多様なリンク・関節構成が可能なモジュラーロボットの設計最適化法の研究を行った。具体的には、関節を全てピッチ方向に回転する 1 軸関節として表現し、各ジョイント座標系に対する子リンクの方向ベクトル、リンク長さ、親ジョイント座標系から見た回転行列、26 通りのアタッチメントの接続方向をパラメータとし、指定した位置姿勢の到達精度と関節トルク値のそれぞれの評価値を同時に最小化する手法を研究した。最小化手法は多目的ブラックボックス最適化である Tree-Structured Parzen Estimator を用い、小さな必要トルクで所望の動作を実現可能なロボット身体が自動構築されることを確認した。

5. 2 台のロボットの分離合体実験を行い、そこにおける共通ミドルウェアの構成法を集

中制御型、分散制御型のそれぞれの得失を検討し、集中型であれば既存のシステムで適応可能なことを示した。また、分散型の場合における方式について、センサモジュールなど身体記述が必要なアクチュエーションを持たない場合にはコネクションレス通信で対応できることを示した。

課題推進者：岡田 慧（東京大学）

研究開発課題4：サイエンス探求マイクロロボットツール

当該年度実施内容：

1. サイエンス探求マイクロロボットツールの共通技術

機能性マイクロロボットツールに関連した技術調査、ロボットツールのコンセプトの具現化、構想の実証可能性の追求を行った。リコンフィギュラブル構造を実現するために、脱着可能な単位機構をもとに、パラレルリンク、RCM や多軸駆動のなど、複合的な機能が実現できるプラットフォーム:Modular-Robotic Extender (MREx) を実現した。MREx は、様々な実験環境において、ロボットがダイナミックに構造を変化しながら、所望のマニピュレーション性能を On-demand で構築できるものである。また、この機構の弾性ヒンジ領域には、生体模倣ジョイントを使用し、弾性ジョイントでありながらヒンジ角範囲、靱性、応答性能に優れることを示した。また、これらの機構に剛性可変性能を付与するため、温度応答性形状記憶ポリマの微細化実装の評価に取り組んだ。形状記憶ポリマは、ガラス転移点においてその剛性を急峻に変化させることができ、柔軟微小構造体の関節剛性や把持機構に適用できる。高密度実装のための加工方法として、ホットプレス/熱インプリント整形技術と、伸長可能な電極材料を実装し、電熱駆動可能であることを示した。また、微小な生体標本をロボットを用いて高精度に取り扱うための力センサとして、水晶を用いた水晶振動式力センサを開発して実装し、特性評価をすすめた。特に水晶センサの基礎特性のうち、検出下限における静的負荷評価における負荷履歴依存性を解消し、True-6 digit の水晶振動子を用いた力センサを実現した。また、ロボット応用にむけた高速サンプリングのための位相同期ループ式 FM 復調技術を導入し、kHz オーダのサンプリング性能を実現した。また、超高解像度マルチスケール光造形の基盤技術を確立し、AI ロボットの要求に応じたマイクロツールとして、MEMS と 3DPrinter の融合技術であるセンサ統合型マイクロピペットツールを実現した。事例として、Lab-on-Oocyte 用の細胞吸引検出デバイスを作製し、動作の実証評価を行った。

2. バイオスティミュラントの評価系のためのサイエンス探求マイクロロボットツール

植物に環境耐性を与え、健全な成長を促す化合物である新規バイオスティミュラントの探索を行うために必要なマイクロロボットツールについて、システム構築、プロトタイプ評価を進めた。顕微鏡下に設置した高精度双腕マイクロマニピュレータにボルテージクランプ用の電極つきガラスキャピラリツールを実装して実験の自動化を実証した。動作の自動化を行うにあたり、キャピラリ刺入における細胞の挙動分析を行い、画像によるイメージデータと QCR 力覚センサの信号、双方が利用可能なプラットフォームを設計した。さらに、顕微鏡の 2 次元情報と接触検知を組み合わせ、位置決め精度 2 nm のマニピュレータやカメラ、作業対象の位置関係を 3 次元的に対応付ける手法を開発した。これにより、卵

母細胞に対して科学者の手技によるばらつきを抑制しながら、画一的に鉛直 45 °C の方向からキャピラリを刺入することが可能となり、正確性、スループットを大きく向上させることが可能となった。また、力センサの出力検出性能を評価し、3.3083 μ N/Hz の感度を得た。さらに、圧電素子駆動の微小液量制御式ポンプを用いて、分解能 0.02 pL の薬液吐出を実証し、提案手法の実現可能性を実証した。

3. 植物の好適培地の評価系のためのサイエンス探求マイクロロボットツール

植物再生力の研究を目的として、単一プロトプラストの自動分取を実現した。共焦点/明視野共存の顕微鏡プラットフォームにおいて、圧電素子駆動の微小液量制御式ポンプを含む単一細胞分取ツールを実装し、位置決めを行うための座標変換、オートフォーカス技術を導入することで、所望の位置にピペットがアクセスし、細胞を自動で吸引できるプラットフォームを実現した。シロイヌナズナなどの植物の根に酵素処理を行い、細胞壁を溶解し、遊離したプロトプラストを回収するデモンストレーションを行った。プロトプラストは自動検出、追尾を行い、空間上の位置情報を保存しながら、特定の細胞を回収することに成功した。

4. 動物細胞の評価系のためのサイエンス探求マイクロロボットツール

微小组織分取ツールを作製し、オルガノイドから組織分取を行った。分取ツールは、ピエゾ振動子で高周波振動を励起し、粘弾性組織を用意に貫通できる機能を付与した。また、前述の細胞吸引と同様のピエゾポンプを転用し、定量の組織分取を達成した。

課題推進者：新井 史人（東京大学）

研究開発課題5：サイエンス探求 AI ロボットシステム

当該年度実施内容：

（1）サイエンス探求 AI ロボット・プラットフォームの開発

前年度までに試作したマルチアームを搭載した AI ロボット・プラットフォームの開発を進め、実際のタスクに関するデータ収集を開始した。熟練科学者にとっても困難であり、かつ、これまでのロボットでは自動化できないタスクの例として、特性のばらつきが大きい対象物であるマウスに対するロボットによるドリリングタスクの自動化に取り組んだ。（他の研究室で処置された後のマウスを再利用して予備実験を行っており倫理的な問題はない。）具体的には、画像のみを用いて、ドリリングタスクの完成度を自動で部位ごとに把握し、その結果に応じてロボット先端の位置を自動で制御する手法を開発した。また、他の研究者との連携や制御手法の開発を容易にするためのシミュレータの開発を行い、開発環境を GitHub で公開した (<https://aiscienceplatform.github.io/>)。また、微細かつ器用なタスクの例として、ペグトランスファーを対象としたタスクをシミュレーション環境に取り込んだ。これにより、ロボット実機の使用前に新しい制御手法を評価する環境を整えることができた。

（2）人と AI ロボット協働の研究

ロボットを専門としない操作者がロボットを操作する場合は、設計側が想定しない入力を行うことがあり、対象物の損傷やロボットの破損につながることが多い。特に微細なタスクを対象としたロボットの遠隔操作では、視野が非常に狭小であるため、ロボット同士お

よびロボットと対象物の衝突回避の実装とその安全性の評価が重要となる。当該年度は、これまでに手術ロボットを対象として開発してきた自動衝突回避を実装し、研究者以外が安全に操作できる環境を整えた。京都で開催されたロボット分野の国際学会 IROS2022 に AI ロボット・プラットフォームの操作部を持ち込んで展示し、来場者が東京に設置したロボットを操作するデモンストレーションを実施した。プラットフォームの開発と遠隔操作についてはプレスリリース (<https://www.u-tokyo.ac.jp/content/400199419.pdf>) を行った。

課題推進者：原田 香奈子（東京大学）

（３）研究開発項目３：サイエンス探求

研究開発課題１：Lab-on-Oocytes によるバイオスティミュラント開発

当該年度実施内容：

1. AI ロボットによる遺伝子導入支援を行い、イオン輸送体の卵母細胞膜の発現を行った。AI ロボットツールを用いることにより、人でも扱いの難しい卵母細胞に対して、先端を鋭利にしたピペットを穿孔して RNA 溶液を注入することが可能になりつつある。さらに、卵母細胞膜に２箇所ガラス電極を穿孔するための位置決めを共同研究者と行っている。この操作は、人が顕微鏡下で行う操作であり、相当の熟練を要する。ロボットの精緻な操作により迅速かつ確実性の高い操作を行うための改良をすすめている。
2. 前年度に新規合成した有機化合物のイオン輸送体阻害活性を検討している。共同研究者が開発した AI と科学者の連携により、候補となる有機化合物が予測され、提供された。これらの中からイオン輸送体の阻害、活性化の効果のある化合物の同定をすすめた。
3. 輸送体を標的とするバイオスティミュラントの開発

植物輸送体阻害剤・活性化剤の植物における効果を測定するために、共同研究者と画像処理 AI の開発を行った。科学者が気孔開度を測定する場合は測定回数および得られる実験数に限りがあるが、今回構築された AI 画像処理方法は、データ処理の速度は飛躍的であり、実験結果もすぐに反映できる。また、科学者の目視では計算できない評価パラメータに関しても、画像処理 AI により計算可能となった。

4. 候補化合物においてアブシジン酸（ABA）と同等の気孔閉鎖誘導性能効果を示す化合物の評価を実施中である。
5. カテキン類の中でカテキンガレートとガロカテキンガレートが植物病原性抵抗性と関係する flg22 が誘導する気孔閉鎖を優位に阻害することがわかった。気孔閉鎖阻害活性を示す化合物の探索も行っている。
6. カテキンガレートとガロカテキンガレートは植物の乾燥耐性を誘導する ABA の反応を優位に阻害して、植物の乾燥耐性を阻害した。目的とする植物の生育を妨害する雑草の生育を環境負荷の少ない緑茶成分で抑制する可能性が示された。現在、乾燥耐性を誘導する化合物の探索をすすめている。

課題推進者：魚住 信之（東北大学）

研究開発課題 2：植物 1 細胞遺伝子発現アトラスの構築

当該年度実施内容：

過去の文献から効率的に植物組織培養条件に関する情報を自動抽出するツールの開発に着手した。植物の自動形態解析ツールのひとつとして AI による根の自動測長ツールを開発した。マイクロロボットツールを搭載する顕微鏡システムの構築を行っており、狙った単一細胞を連続的に採種することに成功した。

課題推進者：佐藤 良勝（名古屋大学）

研究開発課題 3：In toto bio-simulator、AI ロボット技術を活用した難環境における理化学実験による概念実証

当該年度実施内容：

難環境理化学実験として、ヒト iPS 細胞から作製したオルガノイドをマウスのクラニアルウィンドウ内に移植し、マウスからの血液灌流が担保された状態で、オルガノイドやヒト血管の障害・病変検出が可能な実験動物モデルを対象とした。これまでに、ヒトでの発症機序が不明、かつ臨床的に重要な異なる二つの血管内皮障害関連疾患に対して、*in toto* ヒトモデルの構築に成功した。さらに、AI 分野の課題推進者との共同研究を通じて、血管内で起こる血流や免疫細胞のダイナミクスを定量化し、画像解析パイプラインを構築し、新規知見を創出した。AI ロボット分野の課題推進者らと共同研究により、マウスのクラニアルウィンドウの作製を遠隔で可能とするための概念実証実験を進めた。ドリリング等の微細操作について、熟練者の手技を設計側へフィードバックし、遠隔操作によってロボット処置が可能であることを実証した。

課題推進者：武部 貴則（東京医科歯科大学）

研究開発課題 4：物イオン輸送体を標的とするバイオスティミュラント候補物質の開発、AI 技術を活用したバイオスティミュラント候補物質の開発

当該年度実施内容：

ZINC データベース中の 980 万種の市販化合物の中から、AI 分子設計でイオンチャネル阻害候補化合物として絞り込まれた候補化合物について検討した。分子量 400 前後の候補化合物について分子骨格を比較すると、AI 選出化合物の多くが、3 環性共通骨格を有することが分かった。本年度は本骨格について合成し、評価は共同研究を行う課題推進者が実施した。

電気生理学的解析手法は、植物のイオンチャネル阻害効果に加えて、動物では海馬スライス標本を利用する神経回路の機能解析などに利用される。そのため、AI が算出した化合物群を、植物のイオンチャネル阻害剤に加えて動物の脳機能解析に利用する試みは、精度の高い AI 分子設計構築のために有効であると考えた。当該年度は urea 骨格を共通骨格として、植物のイオンチャネル阻害と動物の脳機能を比較するための *in vitro* 評価結果と物理化学的指標を提供して、AI 分子設計のための指標とした。

課題推進者：有澤 美枝子（九州大学）

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

代表機関の PM 支援チームとして、新たに PM 補佐(研究開発担当)を配置した。重要事項の伝達を迅速に行うため、各大学の課題推進者及びプロジェクト参加者との連絡は Slack とメールを併用し、オンラインや対面での打ち合わせを行いながら運営している。

本プロジェクトは分野横断的研究プロジェクトであり、数理分野の研究者、AI・ロボット研究者、科学者が実際のサイエンス探究を例題として共同研究を行いながら、それぞれの研究を発展させるためのマネジメントを行っている。各大学の課題推進者は、技術グルーピングとしての AI グループ、Robot グループ、応用としてのグルーピングである Plant グループ、Animal グループの 4 種類のグループに分けられ(重複参加可能)、Slack などで適宜情報を共有しつつ、1、2 か月に 1 回の定例会議で互いの進捗を把握している。PM と PM 補佐は原則としてすべての定例会議に参加することで全体の進捗を管理している。

(2) 研究開発プロジェクトの展開

研究開発項目 1:融合 AI 理論の研究開発課題 3 について課題推進者を決定した。次年度から研究開始する。これにより、AI ロボット科学者の実現に必要な主要要素技術が揃った形となった。課題推進者同士の共同研究をさらに加速し、技術として統合していく。

(3) 研究成果の展開

科学者が実際にサイエンス探求のために行う実際の実験タスクを対象に AI やロボット実機を開発する方針としており、技術の発展とサイエンスへの貢献を両立しながら研究を進めている。これまで全て人間が行っていたタスクに対して、AI やロボットを新規に開発するところから研究を開始する必要があるため、時間を要するが、一部では新しい発見に寄与した事例も出てきている。

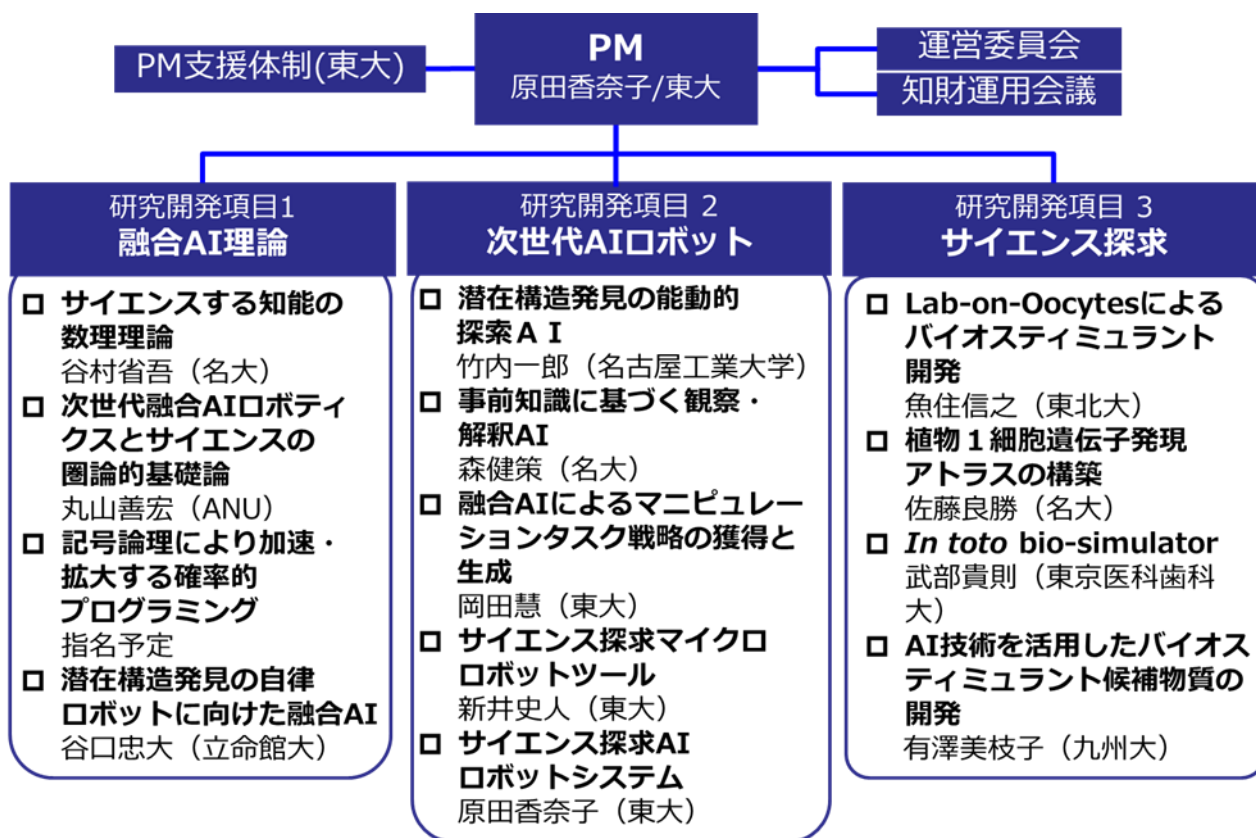
(4) 広報、アウトリーチ

京都で開催されたロボット分野のトップカンファレンス IROS2022 にて、AI ロボット・プラットフォームの展示と遠隔操作のデモンストレーションを実施し、プレスリリースを多くの来場者が操作を体験した。本件は東京大学からプレスリリースされた。また、PM が Keynote talk を行い、プロジェクトの Big Challenge Forum でも課題推進者の谷口が発表を行うことで、世界のロボット研究者に向けたアウトリーチを行った。その他にも各課題推進者による招待講演でプロジェクトを紹介するなど、積極的なアウトリーチを行っている。また、AI ロボット・プラットフォームの試作機が設置されている東京大学では、地方都市の中学生や高校生を対象としたロボット操作体験なども行っており、次世代人材育成にも寄与している。

(4) データマネジメントに関する取り組み

基本的にソフトウェアは GitHub などを通じて一般公開している。今後、要素技術の製品化に関わる部分については TLO とも相談の上、適切に管理する。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



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

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	2	3	5
口頭発表	5	12	17
ポスター発表	6	0	6
合計	13	15	28

原著論文数 (※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	1	16	17
(うち、査読有)	1	16	17

その他著作物数 (総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	4	2	6
書籍	0	0	0
その他	2	0	2
合計	6	2	8

受賞件数		
国内	国際	総数
2	3	5

プレスリリース件数
3

報道件数
4

ワークショップ等、アウトリーチ件数
16