



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

一人に一台一生寄り添うスマートロボット

菅野 重樹

早稲田大学 理工学術院

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



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PJは2050年までに「人が違和感を持たない、人と同等以上な身体能力をもち、人生に寄り添って一緒に成長するAIロボット」を実現するため、AIとロボットの相互革新に挑戦した。「スマートロボットの身体と制御システムの構築」、「スマートロボットの知能システムの構築」、「スマートロボットの福祉・医療への展開技術の構築」、「スマートロボットの実用化方策」の4つの研究開発項目を設定し、総勢15名のPIにより研究開発を推進した。計画策定時に設定したPJの5年目マイルストーン「衣服を畳むなどの洗濯補助、キッチンツールを使った攪拌などの調理補助、車椅子への移乗や食事介助といった補助と、人に安心感を与える情緒コミュニケーションを伴った健康モニタリング作業を実施できる、人の循環器系や筋肉などの生体に近づけたスマートロボットを開発する。」については、スマートロボット Dry-AIREC、AIREC-Basicにおいて各種タスクの実行を実現できた。さらに生体に近い身体であるドライ・ウェットロボットの設計・開発に関しては、全ての統合に残された課題があるものの、各要素技術は確立できており、策定した計画を適切に達成できた。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

1) スマートロボットの身体と制御システムの構築

回転式油圧アクチュエータロボット上半身（胴体、アーム、ハンド）については、一次・二次試作機を開発し、30kgの重量物持ち上げや空き缶握り潰しなどのデモを実現した。自己修復システムについては、複数PIの連携により、能動・受動的自己修復技術、傷検知システムを開発し、統合マクロモデル構築による可視化を図った。ウェット型皮膚センサについては、伸縮可能かつ液体格納構造を有する触力覚センサを開発し、ハンド装着によるデモを行った。以上により、特に生体に近い身体であるドライ・ウェットロボットの設計・開発に関しては、全ての統合に残された課題があるものの、各要素技術を確立できた。

人間との接触を伴う動作の実現に関しては、Dry-AIRECによる人支援動作（靴下装着、寝返り、起き上がり）について、会話システムとの統合を行い、大阪・関西万博でデモを行った。

ロボット用ソフトウェアの効率的な開発に寄与するミドルウェア開発については、2025年9月にOMG 3QLeeds TMにおいて、本PJにおけるスマートロボットによる健康モニタリングシステムを事例に含むRoSO(Robotic Service Ontology)1.1 FTF/RoIS(Robot Interaction Service)2.0 FTF(Finalization Task Force)レポートがAB審査にて承認された。

低消費電力AIアクセラレータプロセッサチッププロトタイプ開発については、拡張構成の論理設計やその検証作業を実施し、さらにその論理設計情報から物理設計情報を構築し、これをTSMC28nmで製造した。AIアクセラレータプロセッサチップ用最適化コンパイラ開発については、オープンソースのコンパイラであるClang/LLVMを拡張して、開発AIアクセラレータチップ用のコード生成が可能なコンパイラを開発した。さらに、深層予測学習ライブラリのチューニングの評価も進め、

ハード面、ソフト面の両面からさまざまな取組を進めた。

2) スマートロボットの知能システムの構築

道具使用タスク、柔軟物ハンドリングタスク、調理タスクなどのさまざまな個別タスクに加えて、カップスタッキングを対象とした動作高速化や対話システムとの協調も含めて、精力的に研究開発を推進した。取り組みについては各種メディアでも取り上げられ、アカデミアにおいても多くの受賞実績があった。

商品ハンドリングに関しては、視覚から物体の柔らかさを想起する技術、物体間にかかる力の状態を視覚からの推論手法 (Forcemap)、仮想経験に基づくダイナミクス生成、透明物体の認識技術など、シミュレーションを活用したさまざまな基盤的手法を提案し、さらに商品ハンドリングやグラスピッキングなどの Dry-AIREC への実装による技術検証やデモンストレーションも行った。

数理的アプローチである自由エネルギー原理と能動的推論に基づいたモデル提案に関しては、複数 PI との連携により、Dry-AIREC を用いた体位変換ケアタスクデータを用いた学習・生成・テストを通じて、多次元・多モダリティデータに対して動作する予測誤差最小化プロセスの検証を行った。

対話システムについては、Dry-AIREC による起き上がり支援動作や靴下装着支援動作を対象として、マルチモーダル情報より人間・作業状態を推定し、推定結果に応じた対話を生成する対話システムを構築し、大阪・関西万博にてデモンストレーションを行った。

階層的モーションプランニングに関しては、フレームワーク物理特性を持つ新しい物体に対して操作タスクを一般化できるようにするための、少数ショット学習システムを提案した。その結果、9つの単純な形状と重さの物体の学習により、それを日常の様々な形状の物体に一般化することに成功した。さらに、長期タスクのためのサブタスク予測、動作計画に対しても計画通り研究を進め、研究者交流により早大評価実験室にて Dry-AIREC を用いた物体把持・運搬や起き上がり支援に関する研究を共同で推進した。

転移学習については、Dry-AIREC の簡易モデルである AIREC-Basic を開発し、他ロボットで獲得した物体移動タスクを AIREC-Basic へ転移学習するデモのシミュレーションでの確認や Sim 2 Real での実機動作、さらには大阪・関西万博での AIREC-Basic による家事支援デモ (洗濯物取り出しや畳み) を実施した。

3) スマートロボットの福祉・医療への展開技術の構築

既存ロボットを活用した検診案内の実証実験、与薬システムの構築、各種計測機器情報を他のデータベースとも互換性の高い Semantic Data Modeling(SDM)形式で保存可能な DWH の構築、Dry-AIREC による生体情報 (脈拍) を計測するシステムの構築、Dry-AIREC による超音波検査や口腔ケアの実現、さらには病院の案内・誘導 (寄り添った案内) の院内での実証実験、Dry-AIREC の先導による荷物運搬や車いす自律誘導技術の院内実験など、Dry-AIREC を用いた数多くの実証実験を行った。このように、スマートロボットの医療・看護分野への応用について、実際のデモンス

トレーションを含めて精力的に推進した。

リスクマネジメントについては、案内タスクを対象としたリスク評価、転倒を対象とした SafeML システムによるリスクアセスメントモデルの作成、AIREC に必要なリスクマネジメントの考え方の比較検討などを行い、関連する要素技術開発としては、Dry-AIREC に搭載されたカメラと環境に設置された動線解析システムを用いた受益者の運動機能評価、高齢者の腕の評価に向けた圧縮力・せん断力・硬さ計測法の確立、Dry-AIREC 用超音波プローブ接触力計測モジュールと操作情報収集システムの開発などを実施した。

触診ハンドに関しては、視触診 4 指ハンドやセミウェット型視触覚センサを開発するとともに、皮膚科医師の触診判断を再現可能な AI や傷検知 AI をハンドに開発・実装した。さらに、受動的自己修復材料の開発とロボットスキンへの応用などを実施した。

標準化に関しては、AIREC の介護施設におけるサービスについて ISO13482 サービスロボットの安全性要求事項において特に検討すべき事項のとりまとめ、ロボット学会にて「医療機器を搭載した汎用ロボットに関する研究専門委員会」の立ち上げとガイドライン文書案作成を実施した。

4) スマートロボットの活用化方策

AI 倫理原則の体系的整理や日・米・英 3 カ国約一万人規模の社会受容性調査やインタビュー調査を実施し、さらにスマートロボット開発原則（案）の策定や ERA（倫理的リスクアセスメント）を独自に応用したチェックリストの作成と大阪・関西万博デモへの適用など、PJ のアドバイザーと意見交換を行いながら着実に研究を実施した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

各年度の PJ 全体会議やデモンストレーション開催などに関する PJ 内全体調整、AIREC の産業応用に向けた民間企業との調整、計 5 名の PI 追加による体制強化、プロモーション動画制作、ICRA2024 や大阪・関西万博などへの出展・展示における調整&実施など、体制強化や会議開催、広報活動、海外連携など、適切なプロジェクトマネジメントを実施した。

2. 研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目 1: スマートロボットの身体と制御システムの構築

研究開発課題 1: 人間との接触を伴う作業が可能なロボットシステムの構築

実施内容:

1) Dry-AIREC による人とのインタラクション実験

Dry-AIREC が身体へ接触する介護動作の実験を進め、画像処理による骨格認識に基づく関節角度拡張リハビリ支援動作手法を提案し、人に危害や不安感を与えることなく実現できることを確認した。従来の深層予測学習に加え、関節状態の注意機構を導入することで、寝返り・起き上がり支援動作や靴下の着衣支援動作を実現した。靴下の着衣支援動

作については、大阪万博 2025 においてデモンストレーションを実施した。変分オートエンコーダによる人の動作予測アルゴリズムを開発し、起立支援動作を実現した。

2) 流体駆動上半身システムの試作と評価

直動型油圧アクチュエータによる上半身製作および実験評価を行い、人同等の体格・自由度と人以上の発生力を有する油圧駆動ロボットを実現した。回転型油圧アクチュエータによる上半身製作(1号機、1.5号機、2号機)および実験評価を行った。2号機では、アクチュエータ内部・上半身構造部品内部に流路を通し、アクチュエータ内部にスィベルジョイント機構を追加することで、アクチュエータに接続するホースを全て内蔵し、ホースの緩み等による油漏れを根本的に解決した。その結果、現時点では両腕により 30kg の重量物持ち上げを実現したが、理論上は 80kg 以上の重量物持ち上げが可能な設計になっているため、引き続き改善を図る予定である。回転型油圧アクチュエータによるハンド製作(1号機、2号機、2.5号機)および実験評価を行った。空き缶の握り潰し等のデモを行うとともに、2.5号機では上半身との統合可能とした。MRF 回転型アクチュエータによる2軸アームを開発し、位置制御下で高出力状態と逆可動状態を瞬時に切り替える動作を実現した。

3) 人工循環系による物質供給系の機能の検証

能動的自己修復システムの実現を目指して、各種取組みを実施した。人工血小板の製作では、任意の3D データに基づきマスクレス露光でマイクロ構造の型を製作し、人工血小板(80 μm 程度のカプセル形状のハイドロゲル)を成型するプロセスを開発した。ハイドロゲル内への流路製作では、3D プリンタを用いて造形した流路形状の型を用い、低融点金属を流し込み成型し犠牲層とすることで、ゲルに流路(3D 形状や直径 200 μm の構造等)を導入する手法を確立した。さらに、2自由度の指形状の統合モデルの製作を行い、上記技術と受動的修復ゲル(正宗 PI)、視触覚センサ(岩田 PI)の統合イメージの可視化を行った。

4) 伸縮可能かつ液体格納構造を有する触力覚センサ

スマートロボットの皮膚に装着する触力覚センサとして、ウェット型 Skin センサを開発し、基本性能実験とともに、複数のセンサをチューブでダイジーチェーン接続し、液体が全てのセンサ間で共有・循環できる構造であることも確認した。伸縮に対応可能な機能として、伸縮性を持つ信号ケーブルを開発した。これらの技術を統合することで、伸縮可能かつ液体格納構造を有する触力覚センサを開発し、既存ハンドに実装し、機能検証を行った。

以上の2)、3)、4)により、生体に近い身体であるドライ-ウェットロボットの設計・開発に関して、すべてを統合する所までは行かなかったものの、各要素技術を確立できた。

5) ロボットソフトウェアの標準化

OMG Robotics TF 等の各種会議体を定期的で開催し、最終的には 2025 年 9 月に英国リーズ大学において開催された OMG 3QLeeds TM における各種会議体において、本 PJ におけるスマートロボットによる健康モニタリングシステムを事例に含む RoSO(Robotic Service Ontology)1.1 FTF/RoIS(Robot Interaction Service)2.0 FTF(Finalization Task Force)レポートが AB 審査にて承認された。また、当該健康モニタリングシステムを RoIS/RoSO ベースモデル記述から、PoC 実装を実施した。マルチプラットフォーム対応については、コンテナ連携可能な、ORiN3 と OpenRTMaist の議論を通じて、既存コンテナ技術で、スケーラブルに異種ミドルウェアプラットフォーム/OS 間連携が可能なことを確認した。

課題推進者:菅野重樹(早稲田大学)

研究開発課題 2:スマートロボット用ミドルウェアの構築

実施内容:

研究開発課題 2「スマートロボット用ミドルウェアの構築」では、AIREC と AI(深層予測学習)ライブラリをシームレスに連携させ、ハードウェアとソフトウェアの相互開発を可能にするロボット OS の開発を目標とした。本研究では、ロボットハードウェアに依存せず、深層予測学習を活用したロボットサービスアプリケーションを実行可能にするロボットソフトウェア運用管理フレームワークを開発した。具体的には、研究開発項目 1 で開発された Dry-AIREC を対象とし、研究開発項目 2 で開発された深層予測学習ライブラリ EIPL を統合可能な RT System Integration Framework を開発した。また、研究開発項目 3 との連携として、人とのインタラクションを通じてバイタルデータを計測する健康モニタリングサービスを実現した。この研究開発課題 2 で開発したロボットソフトウェア運用管理フレームワークは、OMG における国際標準規格 RoIS に準拠した汎用的なロボット動作単位でサービスアプリケーションを構成・実行でき、さまざまなサービスやロボットへの適用が可能である。検証として、AIREC 以外の 2 種類のサロ봇に対して開発したフレームワークを運用可能であることを確認し、開発フレームワークの有用性を示した。

課題推進者:大原賢一(名城大学)

研究開発課題 3:スマートロボットの頭脳を実現するコンパイラ協調低消費電力 AI プロセッサの開発

実施内容:

本研究課題はマルチコア構成に基づく AI アクセラレータチップを開発することを目的に、令和 4 年度から開始された。本 AI アクセラレータの各コアはベクトルアクセラレータを持ち、AI 処理に頻出する行列積演算を加速する。本目的を達成するため、本研究課題では、(1)低消費電力 AI アクセラレータプロセッサチッププロトタイプ開発、および(2) AI アクセラレータプロセッサチップ用最適化コンパイラ開発、を進めてきた。

(1)に関しては、まず RISC-V CPU コア・ベクトルアクセラレータコア・データ転送ユニット(DTU)・ローカルメモリから構成される基本コア構成を設計した。さらに設計した基本コアを改良・複数接続し、4 コア構成の AI アクセラレータプロトタイプチップを TSMC 28nm の半導体技術で設計・製造した。チップサイズは 36mm^2 であり、200MHz(電源電圧 0.90V)、150MHz(電源電圧 0.80V)、100MHz(電源電圧 0.70V)の各周波数と電源電圧の組み合わせで動作する。さらに、本チップの評価ボードを開発した。評価ボードは AMD (Xilinx) VCU118 FPGA ボードに接続し、これに搭載されている DRAM や UART(ホスト PC との入出力に使用するインタフェース)を利用する。

(2)に関しては、早稲田大学で開発してきた OSCAR 自動並列化コンパイラをコアとし、これに深層学習推論モデルを入力し C プログラムを生成する TVM、及び OSCAR コンパイラによる並列化コードから開発 AI アクセラレータチップ用実行バイナリを生成するよう改造した Clang/LLVM コンパイラを組み合わせることにより、様々な深層学習推論プログラ

ムを開発 AI アクセラレータチップで実行可能とするコンパイルフローを開発した。予備評価として本コンパイルフローを NEC 製ベクトルマルチコア SX Aurora Tsubasa で評価したところ、本コンパイルフロー無しに対して 31 倍の性能向上が得られることを確認した。さらに、本研究課題でターゲットアプリケーションとしている深層予測学習プログラムの Nvidia Jetson Orin 上で予備的な解析・チューニングを行い、実行時ソフトウェアの設定と適切な演算精度の選択により 2 倍の性能向上が得られることを確認できた。

課題推進者: 木村啓二(早稲田大学)

(2) 研究開発項目2:スマートロボットの知能システムの構築

研究開発課題1:スマートロボットによる環境との柔軟なインタラクションの実現

実施内容:

接触状態が重要であるロボットアームのタスクとして、野菜の皮むきや、汚れの拭き取りなど日常生活で不可欠な”擦り動作”に着目した。ロボットアームの関節角と電流値のそれぞれに異なる時間スケールを適用した神経回路、深層予測学習モデルによる動作生成手法を提案・実装し評価を行った。未知の複雑な階段形状表面に動的に対応した擦り動作が生成されることを確認した。

双腕ロボットを用いたボタン留めを実現するため、ボタンエイドと呼ばれるツールを用いたボタン留めタスクを分析した。タスクを一連のサブタスクに分割して設計し、複数の手法で検討を行い、擬似リハーサル動作を用いた追加学習を行うことで、学習データが含まれていない状況(マーカーのないシャツ)でも、ボタン掛けタスクを実行できることを確認した。

操作中にその状態が変化する対象として Dry-AIREC によるスクランブルエッグ調理を取り上げ、深層予測学習に注意機構を加えたモデルを提案し実験を行った。その結果、コンロの火加減の情報を事前に与えなくとも、卵の焼け具合を視覚と力覚と注意機構を用いて実時間で判断し、適切な調理を行うことが可能となった。

グラフ畳み込みネットワーク(GCN)を用いて、複雑なセンサ配置を持つ多指ハンドの触覚データから測地的な特徴を抽出する制御手法を提案した。本手法により、壊れやすい物体の変形を最小限に抑える動作が実現できることを確認した。加えて把持した物体を、実験者が引っ張ったりするなどの外乱を加えた場合、さらに訓練されていない物体に対しても極めてロバストな把持動作を実現できることを確認した。

物体の形状知覚と動作生成のため、マルチモーダルを積極的に活用する深層学習モデルを構築した。具体的には、画像/力/触覚データを、状況に応じて有機的に組み合わせる手法を提案した。研究対象として天井照明の傘を模した物体の拭き掃除をするロボットを構築し、様な物体形状、さらにオクルージョンが生じるケースでも、接触状態を維持した拭き取り動作が実現できることを確認した。

マルチモーダル情報を扱う奥行きを考慮したモデルによる柔軟物操作の精度向上を目指して、学習の偏りを抑える階層型 RNN に、視差を左右の注意点の位置の違いとして表現するモデルを組み込み、さらにオクルージョンへの対策と触覚情報を追加した動作生成モデルを提案した。Dry-AIREC によるハンガーにスーツを掛けるタスクを実現することで、提案手法の有効性を実証した。

サブタスクを適切に選択して動作を成功させるため、損失関数への制限を課すことで動作の「切り替わり点」で物体とハンドの現在の状態に注目し、加えて動作生成モデルに注意機構を組み込み、サブタスクごとに変化する動作に重要なモダリティに注意を向けることで動作精度を向上させた。約 400 点の 3 軸触覚センサを搭載した多指ロボットハンドと深層予測モデルによる制御方法を用い、人間の繊細な操り動作の一つである触覚を頼りとしたキャップ開け動作をロボットによって実現した。

ロボットの実世界環境(物体)認識は多義的なものであり、人間からの LLM への一方的な指示だけでは十分に対応しきれない、という課題が存在する。本研究ではこの課題に対して、人間と LLM 間での”対話”を通じてタスクに対する情報量を増やし、特に有効な言語情報を抜き出すことで環境認識に活用する手法を提案した。「キッチンの冷蔵庫から牛乳パックを取り出す」タスクを対象に、対話的なプランニングにより、隠れた物体への注意喚起が可能となるなど提案手法の有効性を確認した

複数の指が触れることで触覚センサーの状態が複雑になり、精密で繊細な操作を行うのは技術的に難しい。本研究では、「Vision-Transformer (ViT)」と「Long-Short Term Memory (LSTM)」を活用した予測学習手法を提案した。複数の既学習、未学習の物体を用いた評価実験により、提案手法により物体の硬さや姿勢に応じた柔軟な指の動きが可能になることを確認した。

模倣学習を用いた動作生成モデルが多数提案されているが、動作の速度と精度の両立は難しい。本研究では、高精度予測が可能なモデルでの高周波数推論により、高速高精度な動作を実現した。具体的には、高精度手先位置制御の求められる、カップスタッキングタスクでの検証により、提案手法が物体の位置変化や背景・照明変化などによらず、高精度な動作を教示時の 7 倍速で生成可能であることを確認した。

課題推進者:尾形哲也(早稲田大学)

研究開発課題 2:スマートロボットの経験拡張のための基盤整備と実証

実施内容:

本研究課題では、実環境におけるロボットの認識や動作生成を実現するために、仮想環境で得られる経験をどのように活用するかという観点で研究を進めた。具体的には、1) 人が自らの経験に基づき不完全情報下でも視覚から物体に働く力を予測し作業に応用できる点に着目し、目にしているシーン中の物体に働く力を視覚から予測する技術「Force Map」を開発した。本技術を用いることで周囲に積み重なった物品に大きな外乱を引き起こすことなく、指定した物品を取り出すことが可能となった。2) 動作生成においては、強化学習を用いて非把持による物品操作を学習させる技術を開発した。シミュレーション上でロバストな軌道を生成しておくことで、ゼロショットで実環境における様々な物品の搬送が可能であることを示した。また、同一の枠組みで報酬等の設計を変えると手の上で物品の姿勢を変える、物品を指定の場所へ投げ入れるなどの非把持操作タスクへも展開可能であることを示した。3) ロボットにとって認識困難な対象物の認識にも取り組んだ。特に実画像データから NeRF 技術を用いて生成した 3D シーンに仮想的に形状モデルを配置することで、透明物品に対して距離の教師データを効率的に生成する技術を開発し

た。これを透明物品の距離補完に適用し、食洗機のような複雑なシーンにおいてもロボットが透明物品を把持可能であることを確認した。1)と3)の技術は共通プラットフォームである双腕ロボット AIREC にも搭載し、コンビニ商品ハンドリング及び食洗機から多様な透明物品を取り出す等のデモを実現した。

課題推進者: 堂前幸康(産業技術研究所)

研究開発課題 3: スマートロボットにおける知能に関する数理的アプローチ

実施内容:

本研究では、予測符号化および自由エネルギー原理に基づく理論を、スマートロボットの感覚・運動統合を担う数理モデルとして展開した。具体的には、変分自己符号化器(VAE)と多時間スケール RNN(MTRNN)の階層表現獲得機構を統合した変分ベイズ・リカレントニューラルネットワーク(V-RNN/PV-RNN)を構築し、予測誤差最小化に基づく認知・行動生成のモデル化を実現した。

まず、人工データによる検証では、感覚運動レベルから状態遷移・ルールレベルに至る階層的潜在表現の自律的獲得を確認し、モデル内の Meta-prior(事前分布と予測誤差の重みづけパラメータ)の調整により、柔軟性と一般化性能が制御されることを示した。さらに、外受容・固有感覚を統合したシミュレーションでは、自己生成感覚に対する神経活動の減衰、すなわち「感覚減衰」現象を再現し、脳における予測符号化機構との対応を理論的に示した。

続いて、提案モデルを実ロボット(AIREC)に適用し、体位交換・清拭といった複数タスクを、タスク依存的前処理を設けずに学習可能であることを実証した。RGB 画像、関節角度、トルクなどの高次元多モーダル時系列データから、行為の階層構造と不確実性を同時に学習し、未知データに対しても高精度な再構成・汎化を達成した。これにより、注意機構などタスク依存の調整が必要な付加的な機能を導入せずとも階層的注意に相当する内部表現が自己組織的に生じることが確認された。

さらに、外受容・固有感覚に加え内受容感覚を統合した多感覚階層変分 RNN(MHV-RNN)を提案し、身体内部の不確実性を避ける行動生成やアロスタティックな目標状態の調節を再現した。これらの成果は、予測符号化理論を基盤とする知能アーキテクチャを実機レベルで具現化し、タスク非依存・自律的な認知行動生成の数理的基盤を示したものである。

課題推進者: 山下祐一(国立精神・神経医療研究センター)

研究開発課題 4: 人間と協調するスマートロボットのためのマルチモーダル対話インタラクション基盤

実施内容:

本研究の目的は、人間の状態および作業環境をセンシングするモジュールと、人間の発話を理解するモジュールを統合し、作業文脈を理解しながら適切な対話を実現する対話システムを構築することであった。また、対話破綻の少ない協調作業プロセスに沿った

対話生成を可能とする対話システムを開発し、対話破綻率を 20%以内に抑えることを具体的な目標とした。

本課題では、特に重要性和新規性の高い、ロボットと人が接触を介して協働する介助場面に着目し、起き上がり補助動作中の対話を実現するマルチモーダル対話システムを構築した。AIREC により取得可能な接触情報を含むマルチモーダルな非言語センサ情報に基づき、介助動作のフェーズを推定し、各フェーズにおいて適切なタイミングと内容で発話を生成可能な対話システムを設計・構築・実装した。

本システムは、被介助者の発話内容および介助状態をマルチモーダルセンサ情報から認識するセンシングモジュールと、介助状況の理解に基づいて適切なタイミングで応答を生成する生成モジュールから構成される。

起き上がり動作における介助状態は、0:準備, 1:持ち上げ動作, 2:持ち上げ終了・補助の3段階に分類した。ロボットのトルク, 接触, 関節角度を示すセンサデータに基づき、各状態(フェーズ)を推定する機械学習モデルを構築した。6 試行分の起き上がり動作データを用いて交差検証を行った結果、3 つの状態を 90%の精度で正確に推定できることを確認した。

最後に、応答生成の適切さおよび対話破綻率の評価を実施した。各状態フェーズの組み合わせに対して 20 回ずつ応答を生成し、2 名の評価者によりシステム応答の妥当性を評価した。その結果、各フェーズにおける適切応答率はフェーズ 0 で 0.95, フェーズ 1 で 0.88, フェーズ 2 で 0.95 であった。また、対話破綻率は最も高いフェーズ 2 でも 12%にとどまり、設定目標である 20%以内を達成した。

さらに、本提案枠組みを靴下の着脱介助へ応用したところ、同様に高い精度で動作フェーズ推定が可能であり、対話破綻なく対話を継続できることを確認した。この結果より、本対話システムの介助支援場面における汎用性を示した。なお、靴下着脱支援における対話システムは 大阪・関西万博 2025 にてデモンストレーションを行った。

課題推進者:岡田将吾(北陸先端科学技術大学院大学)

研究開発課題 5: Hierarchical Motion Planning Framework for Realizing Long-horizon Tasks (長期タスクを実現する階層的モーションプランニングフレームワークの提案・実装)

実施内容:

本研究開発課題では、スマートロボットの長期タスクを実現する手法として、階層型 TAMP フレームワークを提案した。このフレームワークでは、上位モジュールが長期行動を個別の短期目標(サブゴール)に分割し、下位モジュールがサブゴールを達成するための全身動作の軌道を計画・実行する。サブゴールは環境変化やコマンド中断に応じて更新し、全身動作の軌道はサブゴールの変化に応じて柔軟に再計画されるものである。

提案フレームワークは、深層学習と最適制御/強化学習の手法から構成されており、深層学習は上位階層における物体認識とサブゴール予測を担い、最適制御または強化学習(RL)は下位階層における軌道計画を担う。当該フレームワークは、(1) 物体認識、(2) サブゴール予測、(3) 動作計画と実行、の3つのモジュールで構成され、このフレームワー

クのユニークで斬新な点は、動的な環境変化のタイミングと高速で信頼性の高い全身のモーション生成を考慮して、いつでもサブゴールを更新できる点である。

提案手法の有効性を示す例として、双腕スマートロボットを用いて、複数種類の物体が入った箱を搬送・積み重ねるタスクを実行した。ロボットは箱の中身を認識し、搬送速度と軌道を調整し、さらに箱の特徴を記憶することで、重い箱や安定した箱を下に、軽い箱や不安定な箱を上積み重ねる順序を考慮する必要があるタスクに成功した。

課題推進者: Sethu Vijayakumar (エジンバラ大学)

研究開発課題 6: 転移学習のためのロボット基盤モデル構築

実施内容:

ロボットのタスク獲得プロセスの効率化を目的とし、環境との柔軟なインタラクションを含む高難度タスク獲得のためのロボット基盤の構築と、異種ロボット間でタスクの学習結果を共有する転移学習の研究、および、獲得タスクの動作を改良する継続学習の研究を実施した。

1点目のロボット基盤の構築では、まず、日常生活タスクを行うために製作された簡易型双腕モバイルマニピュレータ AIREC-Basic を用い、教示データを取得するプロセスで重要となる、直感的な遠隔操作機能を開発した。人は日常生活において、タスクに必要な視線制御や、位置と力を同時に制御する複雑な作業を遂行する。そこで、人の顔の向きを検出してロボットの頭部ステレオカメラの向きを制御する機能や、位置と関節トルクの伝達重みを動的に変更することによる、ロボット・操作装置間の位置・力の自然な伝達機能などを実装し、複雑な動作の遠隔操作と教示データ獲得を容易化した。また、高難度タスクを獲得する学習モデルは、画像・位置・力のマルチモーダル情報の中から動作に影響する重要情報を抽出する必要があるため、各情報のアテンション(注意)を学習する深層予測学習モデルをロボット基盤として実装することにより、衣類のハンドリング等の高難度タスクの獲得を実現した。

2点目の転移学習の研究では、学習環境が揃っている AIREC-Basic を含む数種類のロボットで獲得したタスクを、他のロボットに転移させる原理を検証した。ロボットの種類を PB 層(パラメトリックバイアス層)で獲得し、PB 値(ロボットの種類)に応じて、注意と動作を切替える転移学習モデルを開発し、「ランダムに置かれた日用品を皿の上に移動するタスク」にて実機検証した。

3点目の継続学習の研究では、学習データの高精度化により、より良い動作を継続的に獲得する手法を提案し、実機検証した。実運用では、状況に応じ、成功率の向上や動作速度高速化等、獲得動作の改良が必要となる。そこで、改良したい指標に基づいて新たな教示データを収集し、学習データ・ネットワークの部分更新にて追加学習する手法を提案し、例として、実行結果の評価が高かった動作データの追加学習、および、躍度最小規範に基づき動作速度を 2 倍かつ滑らかにした動作データの追加学習を、衣類のハンドリングタスクに適用し、実機により有用性を確認した。

以上の成果の検証として、ドラム式洗濯機から衣類を取り出すタスクや複数種類の衣

類折畳みタスクのデモ出展を行い、メディア取材、受賞などの反響を得た。特に、大阪・関西万博のムーンショットパークでの衣類折畳みデモでは、12 日間延べ6千回に及ぶ連続動作(成功率 90%)を完遂し、開発技術の信頼性が確認できた。

課題推進者:野口直昭(日立製作所)

(3) 研究開発項目3:スマートロボットの福祉・医療への展開技術の構築

研究開発課題1:福祉・医療現場に導入可能なロボットの設計とシステム構築と実用化

実施内容:

介護、看護、医療(診断・治療)が行われる施設、病院において、働く人や訪れた人たちを支援するスマートロボット AIREC の実現を目指し、5R(正しい;患者, 薬剤, 用量, 用法, 時間)を担保し、与薬・薬管理が可能なシステムとシームレスな健康モニタリングを実現する情報基盤システム、ユニバーサルロボットハンドの開発を行なった。

与薬・薬管理が可能なシステムは、現在の与薬フローや現場のニーズを分析して正しい薬剤・用量・用法・時間を確認できる与薬支援ソフトウェアと、このソフトウェアと連携して正しい患者さんへ正しい薬剤を届けるロボットで構成した。このシステムを用いて介護施設での実証実験を行い、その有用性を検証した。また、薬を渡した後に「きちんと飲んだか」を確認できる機能の開発も行った。

シームレスな健康モニタリングを実現する情報基盤システムは体温や血圧、脈拍などの生体情報や活動量情報をどのメーカーのどんな機種からでも取得し、一元的に管理できるように構築した。介護施設での連続データを取得し、その情報を分析することで体調の急変や転倒などのイベントを予測・検出するサービスアプリケーションとして健康モニタリングシステムを実装した。具体的には、対象者の自動認識と対話、会話内容からの返答生成を行うとともに、AIREC が AI を用いて自然な形で対象者の腕を取り手首に指を当てて脈拍を検知しその情報を元に体調の急変を予測するというフレームワークを構築した。

また、AIREC が人に触れる際に不快感を与えないような、人肌に近い湿潤度や伸展性をもつロボットスキンの開発や、AI を用いて AIREC が清拭と点滴バッグ交換を行う動作の実装を行った。

課題推進者:村垣善浩(神戸大学)

研究開発課題 2:福祉・医療ロボット設計と福祉・医療応用の品質保証・国際標準化

実施内容:

福祉・医療用途に使用される AIREC を対象に、現場データに基づく設計と福祉・医療応用における品質保証・国際標準化を目指し研究を実施した。まず現場検証に向けて、介護老人保健施設「遊」の共有スペースに 3D LiDAR やカメラを設置し、介護者・被介護者の動線・動作データを取得できる環境を整備した。ビデオ解析により、非接触支援、弱い接触支援、力を伴う接触支援という支援パターンを整理した。そして、具体的な接触支援として、AIREC による仰臥位から側臥位への体位変換支援を実施した。RGB-D センサから得られる体格パラメータに基づく被介護者モデルと体位変換軌跡モデルを構築し、

実際の介護施設において、高齢者に対する体位変換軌跡との比較評価を実施した。また、提案した軌跡を Dry-AIREC へ実装した。AIREC 搭載時には、RGB-D/魚眼カメラ情報を統合した軌跡推定と、膝を先行して回転させることで必要な押し上げ力を低減する動作シーケンスを設計した。複数種類のマネキンと健常者を対象とした体位変換実験を実施した。

標準化に関しては、サービスロボット、福祉機器、医療機器、AI に関する既存の ISO/IEC/JIS 規格を整理し、AIREC が「介護施設において手を引いた案内」を行うシナリオに対して、ISO13482 における動力故障時のリスク、転倒・横転、接触時の摩擦・せん断、高齢者特有の脆弱性、誤動作や認知の問題など、重点的に検討すべき項目を抽出した。その結果、接触支援・高齢者を対象とすること・医療機器操作を伴うことの三点が、現行標準では十分に扱われていない重要論点であることが明らかとなった。これを受け、超音波画像診断ロボットを典型例として「医療機器を搭載した汎用ロボット」に関する研究専門委員会をロボット学会内に立ち上げ、法規制や医療機器該当性、などを整理した提言文書の作成を進めた。

課題推進者:小林英津子(東京大学)

研究開発課題 3:福祉・医療ロボット設計と福祉・医療応用のリスクマネジメント

実施内容:

新たなタスクの獲得を伴うスマートロボット AIREC 向けリスクマネジメントシステムについて、支援対象者の身体構造・身体機能・認知機能のレベル、他システムへの依存度のレベルの観点でバックキャストを実施した。従来のリスクマネジメントにおいては意図した使用を前提とした評価が中心となっているが、様々な支援を行うスマートロボット AIREC においては、支援対象者の身体構造の変化、身体機能の低下、認知機能の未発達・低下等がリスクとなり、意図した使用ができない状況を想定する必要がある。また、従来のリスクマネジメントは、残存リスクを事前に評価し、受益者の同意を得ることで使用可能になるのに対し、スマートロボット AIREC の運用にあたっては、オンサイト・リアルタイムでリスクアセスメントを実施し、その場で合意形成しながら、支援を行う動的なリスクマネジメントが必要となる。加えて、介護老人保健施設での検証を通じて、介護・看護領域の一部タスクでは、スマートロボット AIREC が実施しようとする動作と支援対象者の状態の評価を両立できないケースが存在することが確認された。このことからスマートロボット AIREC とは独立した、対象者の状況評価を行うシステムの構築が必要である。このような状況において、スマートロボット AIREC は環境に構築されたシステム群と連携しながら目的の機能を実現することとなり、他システムへの依存性を考慮したリスクマネジメントが必要となる。以上により、これまで開発を行ってきた支援対象者のアセスメント技術に加え、スマートロボット AIREC の活動領域において外部からスマートロボット AIREC 自体の状態評価を行う技術、スマートロボット AIREC が連携するシステムが目的の機能を実現するための性能を満たしているかどうかを評価する技術が必要であることが明らかとなった。

具体的な支援実施にあたっては、支援対象者のアセスメントが必要となる。そのため、支援対象者との接触時に、対象に加わる力や対象の硬さ、対象の生体情報を計測する

手法の研究を実施した。フレキシブルな表面を持つ変位センサと小型 3 軸力センサを組み合わせたセンサによる計測手法を提案し、各種指標の計測原理確認を実施した。また、スマートロボット AIREC に搭載されたカメラと環境に設置されたセンサからの支援対象者の運動機能評価を行うシステムを構築し、スマートロボット AIREC による対象者アセスメント実施に向けた基盤構築を行った。

また、スマートロボット AIREC での超音波プローブ操作による超音波画像撮像に向けた研究を行った。超音波プローブ走査時にプローブに加わる力計測用センサモジュールを開発し、超音波撮像手技に関連する情報を収集するシステムを構築した。

課題推進者: 桑名健太(東京電機大学)

研究開発課題 4: 福祉・医療現場に導入可能なロボットハンドシステムの構築と実用化

実施内容:

本研究課題では、医療福祉現場への導入を見据え、自己修復性を有し視覚および体性感覚が取得可能なロボットスキンを実現した。触診が特に有用な診療科を調査し、皮膚科が重視されることを突き止め、皮膚科の視診・触診への要求を満たすロボットハンドを開発した。また、疾患重症度の判定に利用される触診判断として重要度が高く、患部の柔らかさや表面特徴を識別可能な触診 AI システムを構築して評価した。

ロボットスキンは自己修復性を有するハイドロゲルを基材とし、力と温度が取得可能なマーカを配したセンサ皮膚を小型の光学センサで測定する構造であり、ロボットハンドに搭載される。さらに、ハンドが接触する身体部の柔らかさや体温を取得する視触覚センサを実現した。これにより、摩耗等により皮膚中の傷が検出される場合に修復システムにより継続使用可能となる。

皮膚科では視診と触診が重視され、皮膚科記載学の表現として柔らかさ5段階「軟、弾性軟、弾性硬、軟骨様硬、骨様硬」、表面特徴3種類「緊張性、波動性、もろさ」、および熱感などがカルテに記載される。医師の触診手技から5種類の触診動作「押す、つまむ、さする、ゆらす、こねる」を分析し、「押す、つまむ」動作について再現可能なロボットハンドを開発した。このハンドは指先に力と加速度、温度センサと振動子が搭載された双触指構成と、視触覚センサが搭載された双触拇指構成の4指で構成される。ロボットハンドの双触指構成を用いて、柔らかさと表面特徴を判別可能な触診 AI を開発し、皮膚科医師らが触診でベンチマークとして利用する材質を調査して評価した。力、加速度と振動伝搬情報とを併せて 98.6%の精度で判別できることを示した。研究成果は大学見本市 2025 に出展し広報を行った。

課題推進者: 岩田浩康(早稲田大学)

研究開発課題 5: 福祉・医療現場に導入可能なスマートロボットの機能強化と実装評価

実施内容:

医療・看護・介護分野における作業支援、およびタスクシフトを目的として、スマートロボット AIREC の人とインタラクション機能、およびその現場実装評価を実施した。これらを

2 テーマに大別すると、1つは施設案内・検査説明の機能実装、もう1つは食事介助・口腔ケア・清拭・エコー操作・器械出しを可能とする AIREC のためのユニバーサルロボットハンドの開発である。人の感覚や技能を拡張しつつ、安全で柔軟な作業支援を実現することを目指し研究開発を実施した。

施設案内・検査説明機能については、対話・SLAM・個人認識・自動充電などの機能を実装した。病院を模擬した空間での案内実験を行い、案内精度や安全性を検証し、クリニックで患者に対し人間ドックの誘導検査案内による現場導入を実施した。また、電動車椅子や電動カート(AGV)との連携を通じて、患者搬送や荷物運搬支援など、病院業務への統合を図った。さらに、“寄り添う案内”機能を実現するため、骨格認識による手の差し出し支援や、進行方向を示すインジケータの実装など、ヒューマンインタラクションの質向上を重視しヒューマノイドロボットとして現場親和性を高めると同時に高度化を図った。

ユニバーサルロボットハンドの開発では、高伸展性・自己修復性を有する水素結合型高分子を用いた柔軟素材を設計し、破断しても再接着することで自己修復能を有した材料となるロボットスキンや触覚センサとして応用した。これにより、人との接触を安全に行いつつ、体温・圧力・皮膚形状などの生体情報をモニタリングできる機構を構築した。また、超音波プローブ制御用ハンドを開発し、AIREC のインピーダンス制御、および画像フィードバックによる力制御とを統合し超音波診断操作を実装した。これにより AIREC が超音波プローブを把持し、臨床の検査動作と同環境下でクリアな画像を取得可能であることを確認した。さらに、プローブ脱着や安全機構を備えたハンドモジュール設計を進め、実用化を見据えた改良を行っている。

さらに、医療、介護、介護分野の真のペインに着目し、AIREC の導入により現場の負担を軽減するだけでなく、さらなる新たな社会的価値を生む AIREC の機能開発を実施した。このように、材料開発といった基礎的研究から現場実装評価に至る応用開発まで幅広く実施した。

課題推進者: 正宗 賢(東京女子医科大学)

(4) 研究開発項目4:スマートロボットの実用化方策

研究開発課題1:ELSI の視点からの AI ロボットのニーズおよび社会受容性の国際評価

実施内容:

本研究は AI ロボットの ELSI(Ethical, Legal, and Social Implications/Issues)に取り組み、AI ロボットの社会受容に向けた研究開発のための倫理的・法的・社会的基盤の構築を目的とした。まず AI ロボットの社会的受容に関する 1 万人規模の国際比較を予備的調査として行った。世界に通用する AI ロボットの社会実装を実現するための要件に関する定量的・定性的調査を通じて得られた知見を踏まえ、「スマートロボット開発原則案」を策定した。上記の知見に基づき、本研究開発項目は以下の三つの課題に取り組んだ。

第一に実践的課題では、AI ロボットの社会実装における具体的なユースケース(特に AIREC の利用場面)を倫理的・法的・社会的観点から分析し、倫理リスクアセスメント(Ethical Risk Assessment:ERA)を作成した。ERA では物理的・心理的・プライバシー・環境等のリスクを体系的に抽出し、AIREC の設計に資する知見を提示した。

第二に法的課題では、AI ロボットの社会受容を進めるに当たっての従来の法制度が抱える課題と AI ロボットを開発・利用する際の自律・責任の主体の再検討を行った。欧州・米国・日本等の AI 規制の国際比較を行い、開発・利用に求められる国際コンセンサスを確認し、AI ロボットの適切な法規制及びガイドラインのあり方を示すとともに、法規制やガイドラインを踏まえた技術への実装の方向性を提示した。

第三に理論的(原理的)課題では、AI ロボットと人間の関係について、人文社会科学的観点から考察した。自律性と創造性の観点から道徳的行為者性に着目し、AI ロボットの倫理的地位と社会的役割を理論的に検討し、AIREC のような暮らしに寄り添う AI ロボットの倫理的デザインの指針を考察した。

一万人規模の定性的・定量的調査に基づくスマートロボット開発原則の策定及び上記三課題を通じて得られた研究成果は国際学会やケンブリッジ大学及び国連におけるアウトリーチの他、国内学会等で発表した。発表を通じたフィードバックにより得られた知見を AIREC の開発及びデモンストレーションに反映させるために、工学系チーム・研究開発項目 1~3 と合同でスマートロボット開発原則と ERA に基づく、各リスクレベルに応じた対応策とチェックリストを作成した。さらに 2025 年大阪・関西万博では、展示された AIREC のデモンストレーションのヒアリング調査を行い、AI ロボットの社会受容に向けて心理的リスクに関する知見を拡充させチェックリストを発展させた。

課題推進者:高橋利枝(早稲田大学)

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

①進捗状況の把握

○ 代表機関のPM支援体制チーム

本プロジェクトは早稲田大学次世代ロボット研究機構が受入窓口となったが、早稲田大学では大型予算を受け入れた際の研究支援組織として実務経験が豊富なスタッフが揃っている研究戦略部門が設置されており、その部門と機構とが協働し、予算管理、研究実施場所の管理、人事などの事務処理を行い、さらに本プロジェクトの研究マネジメント支援や事務的支援を専従で行うPM支援室を設置することにより、PMを補佐する体制を構築した。PM支援室では、年度評価等に係る各種会議体開催や大阪・関西万博を始めとする各種展示会等でのデモンストレーション実施、予算管理、PJ全体の報告書のとりまとめ、HP更新、パンフレット制作、プロモーション動画制作など、潤滑なPJ運営を行った。

また、PJ参画機関の共同実験実施場所として、令和3年10月に早稲田大学120-5号館1Fに一般住居を模擬した評価実験室を、また令和4年10月には、早稲田大学120-5号館3Fに病院、カフェを模擬した評価実験室を設置した。現在もこの評価実験室を活用して各種ロボット実験を行っており、令和5年7月12日の中間評価報告会や令和7年7月19日のPJ全体会議などのロボットデモンストレーションは、この評価実験室を活用して実施した。

○ 重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)や研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)

各年度においてPIの研究進捗状況を把握するためのPJ全体会議を開催し、さらに中間成果報告会やPJの最終デモンストレーションを含むR7年度PJ全体会議などを開催した。また、研究開発項目3においては、月2回程度の定例会議(原則オンライン開催)を行っており、その会議に参加することにより進捗状況の把握やPMサイドからの情報提供を行い、適切な情報共有に努めた。以下に中間成果報告会とR7年度PJ全体会議会の詳細を述べる。

1) 中間成果報告会&デモンストレーション

令和5年7月12日(水)に、早稲田大学121号館地下会議室、120-5号館評価実験室(1F、3F)において、中間成果報告会&デモンストレーションを開催した。報告会は対面とオンライン併用の形態にて、各PIからPMにこれまでの研究成果に関して報告する形で開催した。さらに、評価実験室にて各種デモンストレーションを実施した。参加者はPJ関係者以外に、PD、SPD、AD、外部評価者、JST(外部参加者数約20名)であった。

2)R7年度PJ全体会議

令和7年7月19日(土)に、早稲田大学120-5号館121会議室において、R7年度PJ全体会議を開催した。会議はオンライン併用の形態にて、各PIからPMおよび

PD、SPD、AD、さらには外部評価専門家に対して R6 年度から R7 年度にかけての研究進捗状況などを報告し、併せて以下のデモンストレーションを行う形態にて実施した。(参加者数約 50 名)。

- ・ AIREC-Basic による家事支援 (洗濯物取り出し、床上の衣類をピックアップ & 双腕での畳み動作)
- ・ Dry-AIREC による会話付き靴下装着 (+立ち上がり) 支援
- ・ シミュレータでの学習による対話的高速物品運搬
- ・ Dry-AIREC による起き上がり・寝返り介助動作
- ・ Dry-AIREC による生体情報取得
- ・ 与薬システム動画
- ・ Dry-AIREC による超音波診断 (AIREC に超音波プローブを持たせる動画紹介を含む)
- ・ 触診ハンド
- ・ 自己修復システム
- ・ ロボットハンドスキン
- ・ 伸縮可能かつ液体格納構造を有する触力覚センサ
- ・ 油圧・MRF ロボットシステム

②研究開発プロジェクトの展開

○研究開発体制における予算調整等による競争と協働

令和 4 年度以降の予算について、高橋 SPM の予算を令和 3 年度の実績額に基づくものに減額し、研究資金の効率的運用を図った。また、令和 5 年度の研究予算については、菅野 PM、尾形 SPM、村垣 SPM、正宗 PI、高橋 SPM の予算を当初の計画額から効率化し、ロボットへの AI 実装を加速するための Dry-AIREC 3 台、遠隔操縦装置 2 台の加速予算配分に対応した。さらに、中間評価結果を踏まえた JST との協議により、令和 5 年末において菅野 PM、尾形 SPM、正宗 PI 予算が増額された。令和 6 年度の研究予算については、新規 3 名の PI 参加に係る予算捻出のため、主に菅野 PI、尾形 PI、高橋 PI の予算を当初の計画額から大きく効率化した。さらに、プロジェクト強化プランの申請により、村垣 SPM、正宗 PI、岡田 PI の予算増額、ソフトウェアの標準化に係る取組に関して、菅野 PM の予算増額を行った。令和 7 年度については、令和 7 年 7 月開催に開催した PJ 全体会議デモンストレーションのため、自己修復技術の可視化 (菅野 PM、正宗 PI、岩田 PI)、触診ハンドの完成度向上 (岩田 PI)、生体情報取得デモの加速 (大原 PI) のため、予算が増額された。

○研究開発プログラム計画の実現のため、研究開発プロジェクト全体の再構築

令和 4 年度より、計算コストや省エネ性能向上を実現し、より実用的なロボットに仕上げることを目指して、AI 用の低消費電力チップ開発に関する研究開発に関する課題推進者として、早大木村教授に参画いただいた。さらに、医療用ハンドに関する研究開発加速として、早大岩田教授に参画いただいた。加えて、令和 4 年 9 月の村垣 SPM の神戸大学への異動に伴い、村垣 SPM の担当研究開発課題を分割

し、東京女子医科大学の正宗教授に課題推進者として参画いただいた。

令和6年度より、特に研究開発項目3のAI研究を加速するため、北陸先端科学技術大学院大学の岡田将吾准教授、エジンバラ大学の Sethu Vijayakumar 教授、日立製作所の野口直昭プロジェクトマネージャーをPIとして参画いただくことにし、研究計画や予算の調整等を行った。このように、必要に応じて研究開発体制を強化し、国際連携や民間企業参画による社会実装を加速すべく、目標達成を目指した体制整備に取り組んだ。

○世界中から研究者の英知を結集するための国際連携に関する取組み

1) エジンバラ大学、アランチューリングインスティテュート（英国）

AIREC プロジェクトのAI研究に関する国際連携先として、令和6年度からエジンバラ大学の Sethu Vijayakumar 教授にPIとして参画いただいた。早大出身の研究員が先方に研究滞在し、さらにはエジンバラ大学からは研究滞在のため数名の研究者を受け入れたり、AI研究加速のみならず、AIRECの海外実証活用などを見据えて協働を行った。

2) ミュンヘン工科大学（ドイツ）

同じくAI研究に関する連携先として、ミュンヘン工科大学のゴードン チェン教授と研究交流を行っており、菅野PIの所の学生が長期研究滞在を行った。

3) ケンブリッジ大学（英国）、スタンフォード大学（米国）

高橋SPMのELSI研究に関して、継続的に情報交換を行っている。

4) IROS 2022

2022/10/23-27に開催されたIROS2022において、ムーンショット目標3に関するフォーラム（Big Challenge Forum）を尾形SPMが中心となって開催した。デモブースを併設し、目標3の4つのPJのデモンストレーションを他のPMと協議しながら実施した。



IROS2022におけるブースデモの様子

5) ICRA2024 におけるデモ展示・ワークショップ開催

2024/5/13-5/17 にパシフィコ横浜にて開催された ICRA2024 において、Dry-AIREC や日立製作所が開発した AIREC 簡易モデルのデモ展示を実施した。デモ内容は Dry-AIREC による卵調理、机拭き、AIREC 簡易モデルによるドア通過、洗濯物回収などを実施した。さらに、5/18 のワークショップ Cooking Robotics: Perception and motion planning を関係者と共に開催し、関連研究者との議論を行った。



早稲田大学ブース(Dry-AIREC による清掃、調理)



日立製作所ブース(Dry-AIREC による洗濯物取り込み、AIREC-Basic によるドア抜け)

○研究開発の加速や社会実装に向けた ELSI/数理科学等に関する取組み

ELSI に関しては、友枝 AD 等の外部有識者と連携を密にしながら進めた。また、2024 年 9 月 3 日には、第 42 回日本ロボット学会学術講演会のオープンフォーラム (OF12: 人と AI ロボットの共生社会を目指して: ムーンショット目標 3 における倫理的・法的・社会的課題への対応) にて、高橋 SPM チームの板倉弁護士、桑名 PI が話題提供を行った。

数理科学については、山下 PI が担当している「スマートロボットにおける AI に関する数理的アプローチ」において、深層強化学習、予測符号化などの理論を背景として、尾形 SPM が提案している予測学習系及び情動モデルなどの研究を行った。特にベイジ的な定式化と複雑系 (力学系) の視点からの定式化を融合することを目指して進めた。また、数理科学分科会に尾形 SPM が参加し、適宜菅野 PJ における数理科学関係の取組等の情報提供を行った。さらに、「数理科学課題のためのワークショップ」

にて、尾形 SPM が数理科学的課題の可能性に関する話題提供を行った。

ソフトウェアの標準化については、早大の招聘研究員として活動している水川真芝浦工業大学名誉教授が主体となって、OMG ローカル会議や ORiN 協議会を開催し、標準化提案や RoIS (Robot Interaction Service) 拡張やシステムモデル作成、ムーンショット目標 1-目標 3 連携などについて、精力的に進めた。最終的には 2025 年 9 月に英国リーズ大学において開催された OMG 3QLeeds TM における各種会議体において、本 PJ におけるスマートロボットによる健康モニタリングを事例に含む RoSO (Robotic Service Ontology) 1.1 FTF/RoIS (Robot Interaction Service) 2.0 FTF (Finalization Task Force) レポートが AB 審査にて承認された。

(1) 研究成果の展開

○ 研究開発プロジェクトにおける知財

ロボット皮膚等に応用可能なハイドロゲル等に関する特許出願 2 件（正宗 PI）、温度応答性ハイドロゲルに関する特許出願 1 件（菅野 PI）、超音波撮像支援システムに関する特許出願 1 件（桑名 PI）を行った。

○ 事業化戦略

本格的な産業界との連携・橋渡しはこれからであるが、尾形 SPM と継続的に連携を行っていた（株）日立製作所が令和 6 年度から PI（コネクティブオートメーションイノベーションセンター、野口直昭プロジェクトマネージャー）として本 PJ に参加した。Dry-AIREC の簡易モデルである AIREC-Basic を開発し、家事作業を中心としたさまざまなタスクを対象に動作生成 AI の研究を尾形 SPM と共同で実施している。また、早大ではロボットマニピュレーション技術の産業応用（自動車ハーネスのハンドリング作業など）に関する民間資金による共同研究を開始しており、昨年度からは双腕マニピュレータを対象に研究を実施している。さらに、平時利用と災害時利用の両面を見据えたフェーズフリーロボットの研究開発に関して、企業 2 社と共同研究を実施予定である。このような本 PJ 成果を活用した産学連携に関して着々と進めている。

○ 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応（試作品頒布、実機デモや展示会への出展等）

1) 「大学見本市～イノベーション・ジャパン」出展

令和 5 年 8 月に東京ビッグサイトにて開催された「大学見本市 2023～イノベーション・ジャパン」に Dry-AIREC を出展し、基本動作デモや来場者との触れ合うデモなどを実演するとともに、AI 技術を適用した各種実験動画などを紹介した。さらに令和 7 年 8 月に開催された大学見本市 2025 には岩田 PI の視触覚センサ等を出展した。

2) 「2023 国際ロボット展」出展

令和 5 年 11 月 29 日～12 月 2 日に東京ビッグサイトにて開催された「2023 国際ロボット展」に Dry-AIREC を出展し、AI 技術を適用した柔軟物ハンドリングなどのデモを実施した。

3) 「JST 主催 ムーンショット目標3 公開シンポジウム 2025」 出展

令和7年3月9日(金)に日本科学未来館で開催された表記シンポジウムにおいて、Dry-AIREC の柔らかさ体験、靴下着衣支援、超音波検査、商品ハンドリング、AIREC-Basic による柔軟物取り出しに関するデモンストレーションを行った。

4) 「大阪・関西万博」 出展

大阪万博 2025 のフューチャー・ライフ・ヴィレッジにおいて、令和7年8月6日から約2週間に渡って、Dry-AIREC の柔らかさ体験、Dry-AIREC による靴下着衣支援・超音波検査、AIREC-Basic による洗濯機からの洗濯物取り出し・操縦体験のデモを実施した。来場者は約1,400名/日であり、体験を含めてスマートロボットとの共生社会の一端を感じていただけた。



腕関節の柔らかさ体験



靴下装着支援



超音波診断



衣服畳み



操縦体験

大阪・関西万博 フューチャー・ライフ・ヴィレッジでのデモ展示の様子
(展示期間：2025/8/6-11、8/13-8/18)

(2) 広報、アウトリーチ

1) ホームページ作成・更新

AIREC プロジェクトのホームページ (<https://airec-waseda.jp/>) を作成し、随時更新している。ニュースにおいて各種講演会や AIREC 試作機のデモ動画、ロゴマーク制作、プロモーション動画などの新着情報を掲載し、プロジェクト成果などを発信している。また、研究成果情報(論文、口頭発表等)についても研究カテゴリー別に整理

し、情報については定期的に更新している。

2) パンフレット作成・更新

AIREC プロジェクトのパンフレットを作成し、見学者等へのアピールに活用している。上記の HP 同様、R6 年度からの 3 名の新規 PI 参画などの研究体制の変更、図・写真のアップデートなど、随時更新している。

3) ロゴマーク制作

AIREC プロジェクトのロゴマーク、ロゴ動画を作成（以下参照）し、プレゼンテーション等で活用している。



4) プロモーション動画制作・活用

AIREC プロジェクトで取り組んでいる研究開発の将来イメージを訴求するため、2030 年以降の具体的な AIREC 活用イメージ（家事、介護、医療）を 3D の CG により表現するプロモーション動画を制作しており、各種プレゼンテーションでの使用、HP への掲載等を行い、アウトリーチ活動で活用している。

5) 研究成果プロモーション動画制作

PJ 開始以降 4 年目までの代表的研究成果について、ロボットのデモンストレーションや PM、SPM のインタビュー、研究成果の社会実装イメージ訴求のためのドラマパートなどを含む研究成果プロモーション動画を制作した。いくつかのバージョンについて HP への掲載等を行い、アウトリーチ活動で活用中である。

6) 市民公開講座

2022/6/11(土)に開催された CARS2022 市民公開講座(主催:CARS2022、日本学術会議、JST)において、福田 PD、菅野 PM、平田 PM、原田 PM によるムーンショット目標 3 の研究紹介とパネルディスカッションを、東京女子医大のメンバーを中心に企画・実施した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

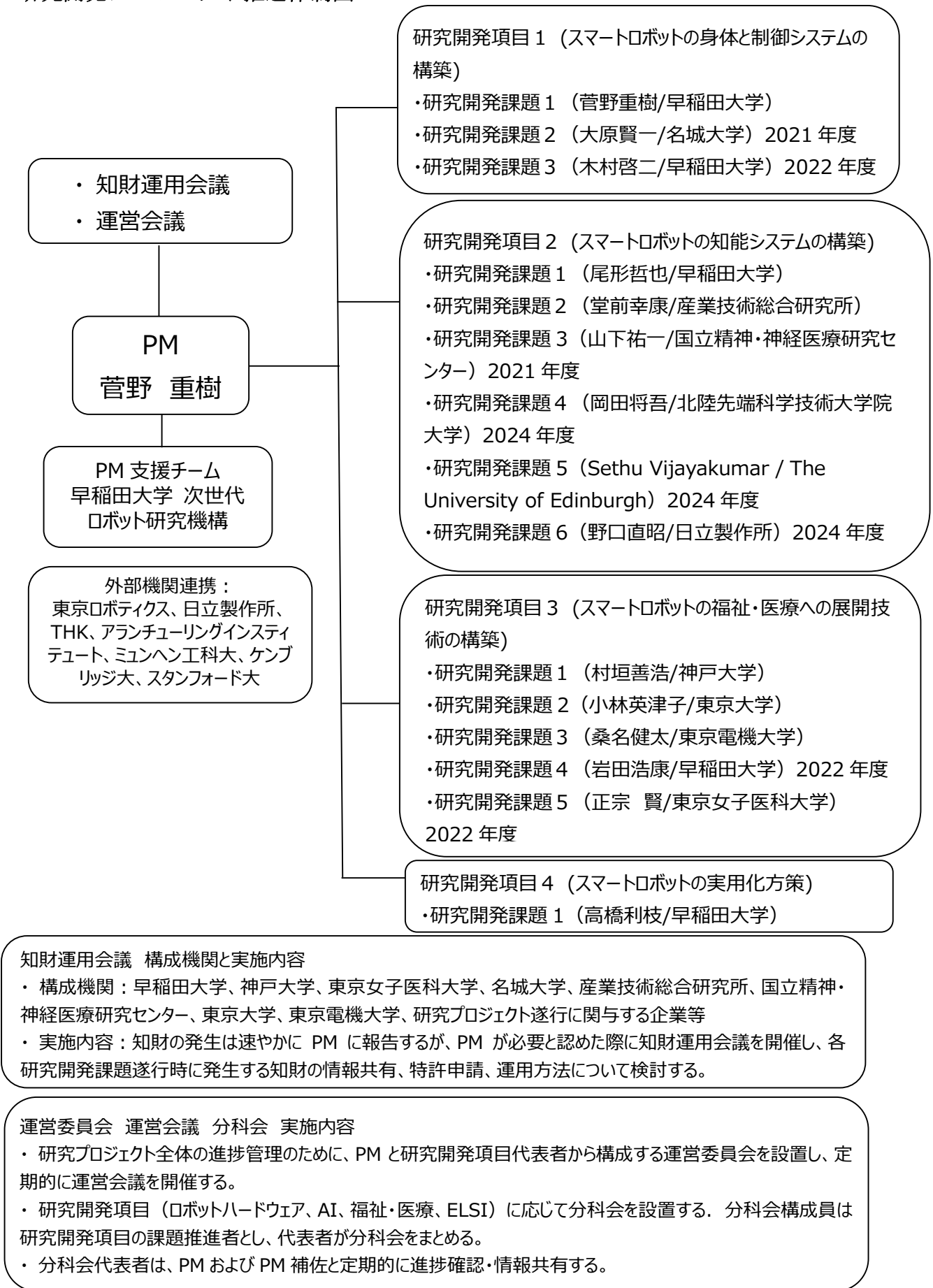
プロトタイプロボットの Dry-AIREC 第 1 号機が 3 台、第 2 号機が 1 台、第 3 号機が 3 台稼働しており、早大内に設置した評価実験室（一般住居、病院、カフェを模擬）、産総研のコンビニ環境、東京女子医大、神戸大において、AI 技術実装による各種実験を実施している。また、令和 7 年度からは Dry-AIREC のハンド部グリッパバージョンが名城大に納品され、生体情報取得などに関する各種実験を実施している。さらに、

日立製作所が開発した AIREC-Basic が複数台令和6年度から稼働しており、このように各種作業（家事、介護、医療等）に関する実験が本格化しつつあるが、現在は個別のデータ収集に留まっている。今後はクラウド上で組織化、構造化された各種データを研究者間で迅速に情報共有すると共に、セキュアな環境下で保管・管理を行う予定である。なお、上記のような AIREC 学習用データ及び学習済みモデル、ロボット制御プログラム、社会受容性評価調査データ、については、現在は非共有・公開であるが、今後共有・公開を図る予定である。

さらに2023年6月28日から深層予測学習のオープンソースソフトウェア（OSS）である EIPL（Embodied Intelligence with Deep Predictive Learning）を公開している。動作教示や前処理のノウハウを含め、データセット、ソースコード、学習済み重みを含んでいる。今後、ムーンショット開発モデルを順次公開する予定である。

加えて、ROS1, OpenRTM などのロボット用ミドルウェアの運用・管理を支援するミドルウェア連携フレームワークについても、MIT ライセンスとして公開している。

4. 研究開発プロジェクト推進体制図



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	8	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	8	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	158	94	252
口頭発表	109	98	207
ポスター発表	68	33	101
合計	335	225	560

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	2	118	120
(うち、査読有)	1	116	117

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	18	8	26
書籍	5	1	6
その他	0	0	0
合計	23	9	32

受賞件数		
国内	国際	総数
19	10	29

プレスリリース件数
2

報道件数
113

ワークショップ等、アウトリーチ件数
49