



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

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



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は、「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」における「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」を実現するものである。具体的には、柔軟かつ強靱さ(高出力+自己修復能力)を有する身体(ハード)によって、人間を含む実世界に物理的に関わり、複数の複雑タスクにける人間の作業スキルと、自らの身体状態を反映した情緒表現とコミュニケーションを実現するAIを開発する。研究開発プロジェクト実施期間中には、これまでの機械的なロボットではなく、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の設計方法を示し、試作機を用いて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、車椅子への移乗補助、食事介助や口腔ケアといった介護補助、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等を実証評価する。予測 AI によるロボティクスの拡張、逆にロボティクス(身体知)の視点による予測 AI の再設計という相互革新によって、従来ロボット利用が困難であった多様な分野への応用を進める。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

ドライ型スマートロボット試作機である AIREC プリプロトタイプ(Dry-AIREC)により、人とのインタラクションを含む各種動作(ベッド上での上体起こし、靴下の着衣支援など)を実現するとともに、回転型流体アクチュエータによる 18 自由度のロボットシステムや4指流体駆動ロボットハンドを完成させ、重量物持ち上げや多様物体把持等に関する基礎実験を行った。人工循環系による物質供給系については、水中で自己修復可能なハイドロゲル材料を開発し、人工血小板の流路投入に成功した。また、ハイドロゲル皮膚に流路を導入し、液体循環を実現し、各種ゲルへの適用可能性を確認した。伸縮性センサについては、ホースの追加により液体補充を容易化し、デイジーチェーン接続で複数ユニットへの液流を実現した。

ロボットへの AI 技術実装については、深層予測学習の適用により、視覚・力覚を用いた、多指ハンドによる物体ハンドリング、学習済言語モデルの対話による環境認識、視覚を活用した力分布推定に基づくピッキングデモ、AIREC の接触情報を活用した介助動作のフェーズを推定や適切な発話生成、ドラム式洗濯機内の洗濯物取り出しを対象とした AIREC-Basic のタスク獲得基盤の開発・検証など、各種具体的な作業を実現している。

ロボットの介護・看護・医療応用については、薬剤同定システムソフトウェアとロボットのシステム間連携、人に触れて生体情報計測を行う際の AIREC 動作への AI 技術実装、皮膚科における触察動作 5 種を再現可能な 2 指ハンド機構の開発・検証、AIREC が相手の骨格に合わせて手を差し伸べる機能、ベッドを押す機能、さらには入院患者の荷物搬送支援や移動支援を実施する機能の要件定義など、AIREC への技術実装について着実に進めている。

ロボットの社会受容性調査については、実践的課題、法的課題、理論的(原理的)課題の3つの観点からの研究を進め、人との相互作用の観点からの AI ロボットの現状分析、及び実践的方策・原則の作成、決定・責任の主体とその揺らぎについての AI ロボットの観点からの検討、人間の善き生にとっての AI ロボットの条件に関する検討を進めた。

研究開発項目別の主な実施概要を以下に示す。

1) スマートロボットの身体と制御システムの構築

AIREC プリプロトタイプ (Dry-AIREC) のインタラクション研究では、深層予測学習を活用し、適切なインピーダンスパラメータの評価やマルチモーダル対話システムとの統合を進めた。マネキンの上体起こし実験では対話破綻率 20%以内を達成し、靴下の着衣支援を実現した。さらに、モバイル型ヒューマノイドの全身動作フレームワークを提案し、歩行アニメーションをリグ構造へリターゲットイング後、物理シミュレーションで検証し、one-shot で実装した。評価実験では従来手法より人間らしい動作表現を確認した。

ハードウェア開発では、回転型流体アクチュエータによる 18 自由度のロボットシステムを完成させ、非接触シール手法で精度向上と低圧化を達成した。シングル・ダブルベーンモータの活用によりスムーズな関節動作と 10kg の重量物持ち上げが可能となった。また、4指流体駆動ロボットハンドを開発し、計 14 自由度のホースレス設計で小型化と多様な把持を実現した。MRF アクチュエータの開発では耐圧 7MPa・57Nm の出力を達成し、試験で理論値との一致を確認した。これらの成果により、より高度なロボット動作とインタラクションが可能となった。

人工循環系の物質供給では、水中で自己修復可能なハイドロゲル材料を開発し、人工血小板の流路投入に成功した。ハイドロゲル皮膚に流路を導入し、液体循環を実現し、各種ゲルへの適用可能性を確認した。

伸縮性センサでは、PCB を密閉エリア外に配置する金属フレームを設計し、電子機器を液体から分離した。ホースの追加により液体補充を容易化し、デイジーチェーン接続で複数ユニットへの液流を実現した。耐久性向上した伸縮ワイヤーの設計で、安定した CAN 接続を確認した。

ソフトウェア標準化では、OMG4Q Technical Meeting で RoIS2.0 の語彙記述 RoSO 1.0 を発行し、健康モニタリングの事例を追加した。コンテナ技術で ORiN3 と OpenRTMaist を連携し、ISO22166 情報モデルへ ORiN3.0 をマッピングした。

研究開発項目2の成果である EIPL の活用として、複数物体への対応を考慮に入れた把持動作の実現を行うとともに、研究開発項目3と連携した健康モニタリングサービスの実現を行った。

スマートロボット向けの低消費電力 AI アクセラレータプロセッサチップを開発し、マルチコア化と行列演算の効率化を実施した。データ転送ユニット (DTU) のプログラマブル制御を可能にし、FPGA 上で評価ボードの設計検証・予備評価を統合した。

ソフトウェアツールチェーン開発では、TVM を用いた深層学習モデルの C 変換、OSCAR コンパイラの並列化・メモリ最適化、Clang/LLVM コンパイラのバイナリ生成を進めた。拡張構成チップに対応する機構を TVM と OSCAR コンパイラに実装し、マルチコア同期コードを導入した。また、深層予測学習処理の高速化を目的に組み込み GPU を活用し、AIREC に統合。評価の結果、高性能デスクトップ PC と同等の動作を確認した。

2) スマートロボットの知能システムの構築

既存の人間協働ロボット、およびプロジェクトで開発した最先端の従来技術ベースの人間協調ロボット Dry-AIREC を用いて、複数の基本タスクの動作学習に関する研究を実施した。具体的には視覚・力覚を用いた、柔軟物物体のハンドリング、多指ハンドによる物体ハンドリ

ング、学習済言語モデルの対話による環境認識などを実施した。

AIREC の視覚を活用した力分布推定に基づくピッキングデモを実施し、作業成功率 85% 超を確認した。視覚から力分布を想起するネットワークモデルを更新し、Transformer モデルを導入することで円筒形物体や重なった物品の予測精度が向上した。さらに、非把持タスクに対応する学習モデルを設計し、視覚情報のみから位置・速度・加速度を同時推定する手法を構築し、シミュレーション実験でモデルの一般化性能向上を確認した。

予測符号化・自由エネルギー原理を、スマートロボットの高次元感覚・運動統合およびシンボル情報処理と統合可能な力学系モデルとして定式化した。変分ベイズ・リカレントニューラルネットワーク(V-RNN)モデルを拡張し、多次元・多モダリティデータに対応した予測誤差最小化の一般モデルを提案した。さらに、外受容・固有感覚中心の V-RNN を内受容感覚の予測符号化プロセスを含む形で拡張し、新たな力学系モデルを構築した。

ロボットと人が協働する介助場面で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 の接触情報を活用し、介助動作のフェーズを推定し、適切な発話を生成した。6 試行の交差検証で 90%の精度で 3 状態を正確に推定できることを確認した。

物体特徴認識、サブゴール予測、軌道計画の 3 モジュールで構成される、階層型 TAMP フレームワークを提案し、長期行動を短期目標(サブゴール)に分割し、全身動作の軌道を計画・実行した。移動ベースと双腕を備えたロボットで、箱の搬送・積み重ねタスクを実証した。

AI ロボットのタスク獲得効率化を目指し、高難度タスク獲得の容易化と異種ロボットからの転移学習の研究を実施した。ドラム式洗濯機内の洗濯物取り出しを例に、AIREC-Basic のタスク獲得基盤を開発・検証した。さらに、異種ロボットのブロック操作タスクを転移学習させる基礎検証を行った。

3) スマートロボットの福祉・医療への展開技術の構築

「服薬状況を確認する」機能の開発に向けて、AI を用いた検知手法 1 つを決定しプロトタイプとなるソフトウェア及びハードウェアを開発開始した。薬剤同定システムソフトウェアとロボットのシステム間連携を実施した。

継続して生体情報、活動量の収集を行い、SDM 形式で DWH に保存した。また、収集したデータの管理・活用の仕組みを検討した。スマートロボット AIREC が生体情報を計測する手法の開発を進めた。人に触れて生体情報計測を行う際の AIREC 動作を、AI を用いてより自律的な動作とするための開発を実施した。

ロボットハンドに用いる素材について、水素結合性ユニットを導入した環動高分子ゲルの調製法の確立とその物理的・化学的特性を解明した。自己修復ゲル内への微小マーカ配置手法構築、皮膚内部・表面の水分調整基機構(マイクロ流路)作製を実施した。

福祉・医療現場においてスマートロボット AIREC が支援を行うことを想定し、現場でのデータ収集および解析を実施した。福祉・医療ロボットの品質保証・国際標準化を目的として、前年度に設置した「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」において、スマートロボットが医療機器を操作する場合を想定した安全性に関するガイドライン資料を作成すること、を目的として研究を実施した。

AIREC のリスク評価の見直しを行い、新たなリスク源として支援対象者の身体・認知機能、

環境情報の情報量、他システムへの依存性を検討した。従来のリスク管理では「意図した使用」を前提としていたが、AIREC 活用時には支援対象者の身体機能の変化や認知機能の未発達・低下がリスク要因となる。さらに、環境情報が不足すると支援動作の評価が困難になり、他システムの性能が不足する場合もリスクとなる。これらを踏まえ、AIREC の状態評価技術や連携システムの性能評価技術が必要であることが明らかになった。

AIREC への搭載を見据えた視触察ハンドおよび超触診機能について、皮膚科における触察動作 5 種を再現可能な 2 指ハンド機構の開発・検証、セミウェット視触覚センサやウェット視触覚センサの原理検証を行った。

皮膚科医師の触診判断を再現可能な AI 触診システムについて、開発した 2 指ロボットハンドを用いて、視触覚センサを活用した触診 AI 構築を試行するとともに、触診に必要な柔らかさや温度を設定可能な触診ファントムを試作し、皮膚科における触察の再現条件を検証した。

“寄り添った”案内の実現に向けた現場調査研究を実施し、どのような寄り添い方による支援でロボットの現場親和性が高まるかを検討した。この調査研究に基づき、AIREC が相手の骨格に合わせて手を差し伸べる機能、ベッドを押す機能、さらには入院患者の荷物搬送支援や移動支援を実施する機能の要件定義を実施した。

AIREC の超音波プローブシステムを高度化し、今後開発を予定している他の専用ハンドモジュールと使い分けを迅速にできるように仕組みを確立するために超音波プローブハンドモジュールと取り付け機構の設計を実施した。

自己修復材料開発では、poly(N-acryloyl-nipecotamide) (PNANAm) ゲルを用いて、温度変化による受動的自己修復能の評価、流路を有する PNANAm ゲルのロボットスキンへの応用、および PNANAm ゲル製モデルフィンガーの作製を実施した。

4) スマートロボットの実用化方策

倫理的・法的・社会的な課題(ELSI)の視点から世界に通用する AI ロボットの社会実装を実現するための要件を検討し、これを AIREC に反映すべく、今年度は、(1)実践的課題の取り組みとして、人との相互作用の観点からの AI ロボットの現状分析、及び実践的方策・原則の作成と AIREC への反映に向けた研究、(2)法的課題の取り組みとして、決定・責任の主体とその揺らぎについての AI ロボットの観点からの研究、(3)理論的(原理的)課題の取り組みとして、人間の善き生にとっての AI ロボットの条件についての研究を進めた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

プロジェクト全体会議やデモンストレーションの実施、国際会議でのブースデモ実施、AIREC の産業応用に向けた民間企業との調整、研究成果プロモーション動画制作など、体制強化や会議開催、広報活動など、必要なプロジェクトマネジメントを潤滑に推進した。

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: 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

当該年度実施内容:

AIREC プリプロトタイプ(Dry-AIREC)の人とのインタラクション実験については、昨年

度につき、研究開発項目 2 と連携し、深層予測学習を活用した Dry-AIREC による人とのインタラクション研究を進めた。体位変換動作における適切なインピーダンスパラメータを評価し、マルチモーダル対話システムとの統合を図った。マネキンの上体起こしを行い、対話破綻率 20%以内での実施を確認し、深層予測学習により靴下の着衣支援を実現した。さらに、モバイル型ヒューマノイドに人間の動作データを活用し、全身動作を実現するフレームワークを提案した。歩行アニメーションをロボットのリグ構造へリターゲットティングし、物理シミュレーションで検証後、one-shot で実装した。評価実験では、従来手法より人間らしい動作表現を主観評価で確認した。

回転型流体アクチュエータによる 18 自由度のロボットシステムのハードウェア開発を完了した。非接触シール手法で精度向上と低圧化を実現し、エンコーダ内蔵の一体構造で小型化を図った。シングル・ダブルベーンモータを適宜活用し、動作試験でスムーズな関節動作と 10kg の重量物持ち上げを確認した。

4指流体駆動ロボットハンドを開発した。各指に2自由度、連動関節1自由度、親指に追加1自由度を持ち、計14自由度で構成されるものである。ホースレス設計で小型化を実現し、拇指対向性を備えた多様な把持が可能である。動作実験でスムーズな動作と高い把持力を確認し、高出力性と小型化の両立が有用であることを示した。

MRF アクチュエータを開発し、複数の連通流路を設けることで、高出力トルクを維持しつつ逆可動トルクを低減した。設計結果は耐圧 7MPa で 57Nm の出力を達成した。さらに、試験で理論値と一致する性能を確認し、設計手法の有用性を示した。

人工循環系による物質供給系については、水中で自己修復可能なハイドロゲル材料を開発した。人工血小板の流路投入に成功し、今後は歩留まり向上と傷口への接着を目指す。ハイドロゲル皮膚の開発で流路を導入し、液体循環を実現した。各種ゲルへの適用可能性を確認し、層流特性も実証した。

伸縮性センサについては、wSkin 構造の課題を解決するため、PCB を密閉エリア外に配置する金属フレームを設計した。電子機器を液体から分離し、乾燥状態を維持可能である。さらに、センサーモジュールにホースを追加し、液体補充の容易化を図った。デイジーチェーン接続で複数ユニットへの液流を実現した。また、伸縮ワイヤーの新設計で耐久性向上し、安定した CAN 接続をハンドへの実装を含めて確認した。

ソフトウェアの標準化については、2024 年 12 月の OMG4Q Technical Meeting にて、RoIS2.0 の語彙記述のための RoSO 1.0 を発行し、健康モニタリングを事例とした $\beta 1$ 文書 Annex C.5 を掲載した。ロボットサービスの環境・ものとのインタラクションを含む RoIS Extension RFI も発行した。コンテナ技術を活用し、ORiN3 と OpenRTMaist の連携を確認し、ISO TC299/WG6 の ISO22166 情報モデルに ORiN3.0 をマッピングした。目標 3 と1の連携では、RoIS/RoSO ベースの健康モニタリングモデルを作成し PoC 実装を実施した。

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

当該年度実施内容:

これまで進めてきたロボットソフトウェア運用・管理フレームワークである RT System Integration Framework の改良を進めた。研究開発項目2の成果である EIPL の活用としては、複数物体への対応を考慮に入れた把持動作の実現を行うとともに、研究開発項目3と連携した健康モニタリングサービスの実現を行った。特に、目標1との連携成果として、OMG(Object Management Group)仕様である RoIS への適合をすすめ、AIREC を用いて、世界初の RoIS2.0 に対応したサービスを実装し、検証を行った。

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

当該年度実施内容:

スマートロボット向けの低消費電力 AI アクセラレータプロセッサチップの開発を進めた。従来の基本構成を拡張し、マルチコア化を実施し、さらに行列演算を効率化し、データ転送ユニット(DTU)のプログラマブル制御を可能にした。設計した拡張構成に基づき、実チップの製造を行い、その評価ボードを FPGA 上で設計検証・予備評価環境と統合して開発・製造した。

同時に、AI アクセラレータを制御するソフトウェアツールチェーンの開発も継続した。TVM を用いた深層学習モデルの C プログラム変換、OSCAR コンパイラによる並列化・メモリ最適化、Clang/LLVM コンパイラによる実行バイナリ生成を進めた。特に、拡張構成チップの行列演算効率化に対応する機構を TVM と OSCAR コンパイラに実装し、マルチコア間の同期コード生成を導入した。また、TVM の拡張により、OSCAR コンパイラでのメモリアクセス解析を容易にした。

さらに、深層予測学習処理の高速化を目指し、試験的に組み込み GPU を活用して AIREC へ統合した。評価の結果、高性能デスクトップ PC と同等の動作を達成できたことを確認した。

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

当該年度実施内容:

既存の人間協働ロボット、およびプロジェクトで開発した最先端の従来技術ベースの人間協調ロボット Dry-AIREC を用いて、複数の基本タスクの動作学習に関する研究を実施した。具体的には視覚・力覚を用いた、柔軟物物体のハンドリング、多指ハンドによる物体ハンドリング、学習済言語モデルの対話による環境認識などを実施した。

(1)動作の高速化

1 回の推論で複数ステップ先まで高精度に予測できるマルチステップ予測モデルを構築し、それを高周波数(高い時間分解能)で実行することにより、動作の高速化と精度向上

の両立を図った。提案モデルは、物体位置の認識や高精度予測を支える機構を備えており、速度・精度・ロバスト性(頑健性)のバランスが取れた動作生成を実現している。実際に、高精度な手先位置制御が求められる実験タスクにおいて、物体の位置変化や背景・照明の違いといった外乱に強く、教示(デモ)時の約 7 倍の速度で動作を生成できることを確認した。

(2) LLM のロボット対話利用

LLM の「予測修正能力」を活かし、物体認識の段階にもその機能を拡張することを試みた。具体的には、ユーザとの対話を通じて得られた追加情報を活用し、それをもとに物体認識モデルの出力を柔軟に修正できる枠組みを構築した。これにより、曖昧な指示や誤解を含む対話にも対応しつつ、よりの確な物体認識が可能となる。複数の対話と物体検出を組み合わせた実験により、提案手法の有効性を確認した。

(3) 触覚センサを搭載した多指ロボットハンドによる把持物体形状抽出

触覚センサを搭載した多指ロボットハンドを用いて物体を把持し、その触覚情報から物体の 3 次元形状を正確に再構成する手法を提案した。物体の再構成には、ニューラルネットワークに基づく連続的 3 次元形状表現手法「DeepSDF」を採用しており、本研究ではその学習のために、ロボットハンドの触覚センサから得られる情報を効率的かつ効果的に処理するデータ処理手法を新たに設計した。提案手法により、ロボットが対象物をしっかりと把持した状態で得られた触覚データを用いて DeepSDF モデルを学習することで、対象物の形状を高精度に 3 次元再構成できることを実験的に示した。

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

当該年度実施内容:

AIREC に搭載した視覚からの力の分布推定に基づく複数商品のピッキングに関するデモンストレーションを実施し、ピッキングの作業成功率が 85%を超えることを確認した。視覚から力分布を想起する手法のネットワークモデルを更新し、新たに Transformer モデルベースのアーキテクチャに改良を行い、複雑な接触面形状(円筒状物体)や、複数物品が重なるシーンでの予測の質的向上を確認した。さらに、非把持タスク(ロボットが持ったトレイに載せた物体をロボット自体が把持することなく運搬・操作するタスク)を視覚から得られる情報のみから位置・速度・加速度を同時に推定する学習モデルを設計した。シミュレーション上での実験結果では、非把持タスクのモデル一般化性能が向上することを確認した。

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

当該年度実施内容:

予測符号化・自由エネルギー原理の理論を、スマートロボットにおけるリアルタイムでの高次元感覚・運動統合、シンボル情報処理との統合が可能な力学系モデルとして定式化を進めた。当該年度は、前年度までに実装・評価を行ってきた変分ベイズ・リカレントニ

ューラルネットワーク(V-RNN)モデルを、多次元・多モダリティデータにおいて、リアルタイムでの予測誤差最小化プロセスとして動作可能な一般モデルの提案と理論的検討を行った。また、これまで外受容感覚・固有感覚を中心に扱ってきた実装モデル(V-RNN)を拡張し、内受容感覚の予測符号化プロセスを含む、力学系モデルとして定式化を試みた。

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

当該年度実施内容:

ロボットと人が接触を介して協働する介助場面における、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 によって取得される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する対話システムを設計・実装した。提案システムを用いて 6 試行分の起き上がり動作データに基づいて交差検証を行った結果、90%の精度で 3 つの状態を正確に推定できることを確認した。

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)

当該年度実施内容:

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、階層型 TAMP フレームワークを提案した。提案したフレームワークは、(1)物体特徴認識、(2)サブゴール予測、(3)軌道計画と実行の3つのモジュールで構成される。提案手法の有効性を実証するために、移動ベースと双腕を備えた全身ロボットを用いて、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。

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

当該年度実施内容:

本プロジェクトで開発しているスマートロボット AIREC、すなわち AI ロボットのタスク獲得プロセスの効率化を実現するロボット基盤の構築を目指し、高難度タスク獲得の容易化に関する研究と、新規タスクの獲得を、そのタスクを学習済みの他のロボット(異種ロボット)から転移学習する研究を実施した。具体的には、ドラム式洗濯機内の洗濯物を取り出すタスクを例に、当該年度に本プロジェクトで製作された簡易型の双腕モバイルマニピュレ

ータ AIREC-Basic による高難度タスク獲得基盤の開発・検証と、市販の異種構造(ハンド・センサが異なる等)のロボットが獲得したブロック操作タスクを転移学習にて AIREC-Basic に獲得させる手法の基礎検証(原理確認)を実施した。

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

当該年度実施内容:

(1)5R(正しい;患者、薬剤、用量、用法、時間)を担保し、与薬・薬管理が可能なインテリジェントカートの開発

「服薬状況を確認する」機能の開発に向けて、AI を用いた検知手法 1 つを決定しプロトタイプとなるソフトウェア及びハードウェアを開発開始した。薬剤同定システムソフトウェアとロボットのシステム間連携を実施した。

(2)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の開発

継続して生体情報、活動量の収集を行い、SDM 形式で DWH に保存した。また、収集したデータの管理・活用の仕組みを検討した。スマートロボット AIREC が生体情報を計測する手法の開発を進めた。人に触れて生体情報計測を行う際の AIREC 動作を、AI を用いてより自律的な動作とするための開発を実施した。

(3) (3) 食事介助・口腔ケア・清拭・エコー操作・器械出しが可能なユニバーサルロボットハンドの開発

ロボットハンドに用いる素材について、水素結合性ユニットを導入した環動高分子ゲルの調製法の確立とその物理的・化学的特性を解明した。自己修復ゲル内への微小マーカ配置手法構築、皮膚内部・表面の水分調整基機構(マイクロ流路)作製を実施した。

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

当該年度実施内容:

今年度は、1)福祉・医療現場においてスマートロボット AIREC が支援を行うことを想定し、現場でのデータ収集および解析を実施すること、2)福祉・医療ロボットの品質保証・国際標準化を目指して、前年度に設置した「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」において、スマートロボットが医療機器を操作する場合を想定した安全性に関するガイドライン資料を作成すること、を目的として研究を実施した。

(1)データ収集と解析については、早稲田大学デモルームにおいて非接触支援に関するデータを収集した。また、接触支援に関するデータ収集としては、介護施設において

仰臥位から側臥位への体位変換データを取得した。前年度に開発した、被介護者の体形変化にも対応可能な体位変換軌跡モデルを改良し、さらに体位変換時の骨格の軌跡情報に加えて、接触力の計測も行った。

(2) 生活支援・介護ロボットの品質保証および国際標準化に関しては、昨年度ロボット学会にて立ち上げた「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」において、超音波診断装置を操作するロボットの分類を行い、提案文書に記載する項目案を作成した。また、上記ロボット学会の専門委員会とは別に、超音波(医療機器)を搭載した汎用ロボットの在り方を検討するため、「ヘルスケア向け汎用ロボット技術検討委員会」を本プロジェクト内部に設置し、外部有識者との意見交換を行った。

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

当該年度実施内容:

当該年度は、これまでのリスク評価で検討してきた新たなリスク源として、支援対象者の身体構造・身体機能・認知機能のレベル、環境情報の情報量のレベル、他システムへの依存性のレベルの観点でリスクリストの見直しを行った。従来のリスクマネジメントにおいては、「意図した使用」がなされることが前提となっている一方、様々な支援を行うスマートロボット AIREC の活用においては、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、例えば「子供が注意を聞かずに触ってしまう」等がリスクとなりうる。環境情報の情報量レベルの観点では、例えば「AIREC による体操お手本動作中に体操実施者がカメラの死角に入り、支援対象者の状況を判断できない」等、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といったリスクがあげられる。そのため、体操の例においては、AIREC がお手本動作をしている際に、対象者の状況評価を行う別システムを構築する必要がある。このような状況を想定すると、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、例えば「連携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ない」等、他システムへの依存性がリスク源となりうる。これらを鑑みると、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、AIREC の活動領域において外部から AIREC 自体の状態評価を行う技術、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。

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

当該年度実施内容:

- 1) AIREC への搭載を見据えた視触察ハンドおよび超触診機能および、搭載を見据えた視触覚センサの研究開発を継続
- a) 皮膚科における触察動作 5 種(「押す」「つまむ」「さする」「こねる」「ゆらす」)を再現可能な 2 指ハンド機構の開発と検証

- b) セミウェット視触覚センサの原理検証(自己治癒ゲルを適用し、力取得能や温度取得能を検証)
- c) ウェット視触覚センサの原理検証のため、視触覚センサと自己治癒ゲルや材料供給型自己治癒システムとの統合を試行

2) 皮膚科医師の触診判断を再現可能な AI 触診システムの開発を継続し、原理検証を実施

- a) 1)で開発した2指ロボットハンドを用いて視触覚センサを活用した触診 AI 構築を試行
5 種触察の1つの「押す」以外の最低1つの動作について触察判断が可能なドライセンサ向け触診 AI の原理検証を実施
- b) 触診に必要な柔らかさや温度を設定可能な触診ファントムの試作を継続し、皮膚科における触察の再現条件を検証

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
当該年度実施内容:

(1) 検査・施設案内が可能なスマートロボット AIREC の開発

スマートロボット AIREC を活用し、病院における人とのインタラクション機能の開発強化を実施した。具体的には“寄り添った”案内の実現に向けた現場調査研究を実施し、どのような寄り添い方による支援でロボットの現場親和性が高まるかを検討した。この調査研究に基づき、AIREC が相手の骨格に合わせて手を差し伸べる機能、ベッドを押す機能、さらには入院患者の荷物搬送支援や移動支援を実施する機能の要件定義を実施した。

(2) 食事介助・口腔ケア・清拭・エコー操作・器械出しが可能なユニバーサルロボットハンドの開発

スマートロボット AIREC による超音波診断に向けて、前年度に構築した AIREC の超音波プローブシステムを高度化し、今後開発を予定している他の専用ハンドモジュールと使い分けを迅速にできるように仕組みを確立するために超音波プローブハンドモジュールと取り付け機構の設計を実施した。具体的には均等な力で固定できる絞り羽根状構造が特徴の取り付け機構を考案した。

自己修復材料開発では、poly(N-acryloyl-nipecotamide)(PNANAm)ゲルを用いて、温度変化による受動的自己修復能の評価、流路を有する PNANAm ゲルのロボットスキンへの応用、および PNANAm ゲル製モデルフィンガーの作製を実施した。

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

当該年度実施内容：

(1) 実践的課題

基礎的チェックリストを、AIREC スマートロボット倫理基本方針に基づき、ヒューマンファースト、責任ある開発、安全性、権利保護など 8 項目で構成し、これを基に、具体的な導入場面に即した ERA およびチェックリストを展開した。今年度は、AIREC の将来ビジョンを踏まえ、「介護」「コンビニ」「家事(調理、洗濯)」を主な導入場面として選定した。第1段階は AI ロボット全般に適用可能な基礎的チェックリスト、第2段階は導入場面ごとの詳細項目で構成されるものである。

(2) 法的課題

AI・ロボットが他の AI・ロボットやさまざまなモノ、さらに人とネットワークを通じて接続・連携する時代における自律の揺らぎを示すととともに、自律の再建の方向性を示すための理論分析の枠組みの構築を試みた。具体的には、AI ネットワーク社会において個人を平等な主体として配慮・尊重するためには、人間による判断と AI・ロボットによる判断を適切に組み合わせることにより個人の特性をきめ細やかに把握する必要があることを示した。さらに、人々が誰でも脆弱性を抱えた存在であることを認識し、文脈に応じてさまざまな脆弱性から個人を保護し、個人の自律的な意思決定の環境を実現することが必要であることを示した。

(3) 理論的(原理的)課題

AI ロボットと人間の理論的異同、及び近未来にふさわしい AI ロボットと人間の関係性についての考え方として、道徳的行為者性に着目し、自律性と創造性の観点から考察した。具体的には、AI ロボット ELSI の重要論点の一つである技術的人工物の道徳的行為者性について、基礎情報学の階層的自律コミュニケーション・システム(HACS)モデルに基づき、人間と機械の創造性の観点からのシステム論的差異、および理論的自律性と実践的自律性の概念的区別を援用することで、社会システムに組み込まれた技術的人工物(とくに AIREC のような人の暮らしに寄り添う AI ロボット)のデザインをめぐる問題提起と解決の指針を提示した。

課題推進者:高橋利枝(早稲田大学)

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

PM 支援:

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るが、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てい

る。令和6年度も引き続きこの体制で PM を支援し、プロジェクト全体会議等の各種会議体やデモンストレーションの開催、予算管理、PJ 全体の報告書のとりまとめなど、潤滑な PJ 運営を行った。

運営会議・進捗管理：

下記のような会議体開催により、各 PI の成果報告や PJ 全体の研究進捗状況の把握などを行った。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。

1)R6 年度 PJ 内研究成果報告会

令和6年 10 月 29 日(火)に、早稲田大学 121 号館地下会議室において、R6 年度研究成果報告会を開催した。会議はオンライン併用の形態にて、各 PI から PM に対して R6 年度研究進捗状況や最終評価デモ計画などを報告する形態にて実施した。会議後には PJ 全体会議で予定しているデモの一部を実施した。(JST からの3名を含む参加者数約 40 名)。

2)R6 年度 PJ 全体会議

令和6年 11 月 7 日(木)に、早稲田大学 120-5 号館 121 会議室において、R6 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 に対して R6 年度研究進捗状況や最終評価デモ計画などを報告し、Dry-AIREC や回転型油圧ロボットなど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)。

競争・協働：

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、民間企業参画により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でいる。

また、昨年度ムーンショット目標3の PM 追加公募で採択された理研大武美保子 PM とは、菅野 PM、尾形 SPM などとの研究ディスカッションを適宜行った。残念ながら大武PJは令和5年度で終了となったが、研究成果まとめなどのため、一部の取り組みについては令和6年度も協働を行った。

研究資金の効率的運用：

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 PI、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 PI の予算増額を行った。

(2) 研究成果の展開

知財・事業:

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 PI 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)として参加することになった。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 PI と共同で実施している。また、これまで早大と NDA を締結し共同研究に関する議論を進めていた矢崎総業(株)と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)に関する共同研究を開始しており、今年度は双腕マニピュレータを対象に研究を実施している。本 PJ との関連が深くなった段階で、プロジェクト参画についても検討予定である。このような産学連携に関して着々と進めている。

さらに、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。

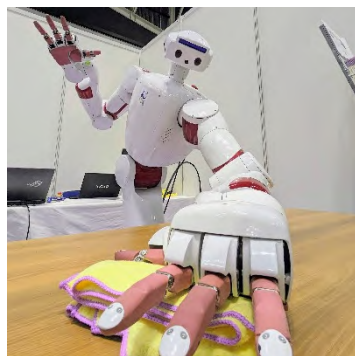
調査:

高橋 SPM の取組において、過去に実施した AI ロボットに関する日米欧の国際調査結果について、その分析を進めている。

展示:

・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)

・「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。

国際連携:

A)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するなど、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ている。

B)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。

C)ケンブリッジ大学(英国)、スタンフォード大学(米国)

高橋 PI の ELSI 研究に関して、継続的に情報交換を行っている。

(3)広報、アウトリーチ

A) ホームページ更新

AIREC プロジェクトのホームページ(<https://airec-waseda.jp/>)を随時更新している。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。

B) パンフレット更新

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

アップデートなど、随時更新している。

C) 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。

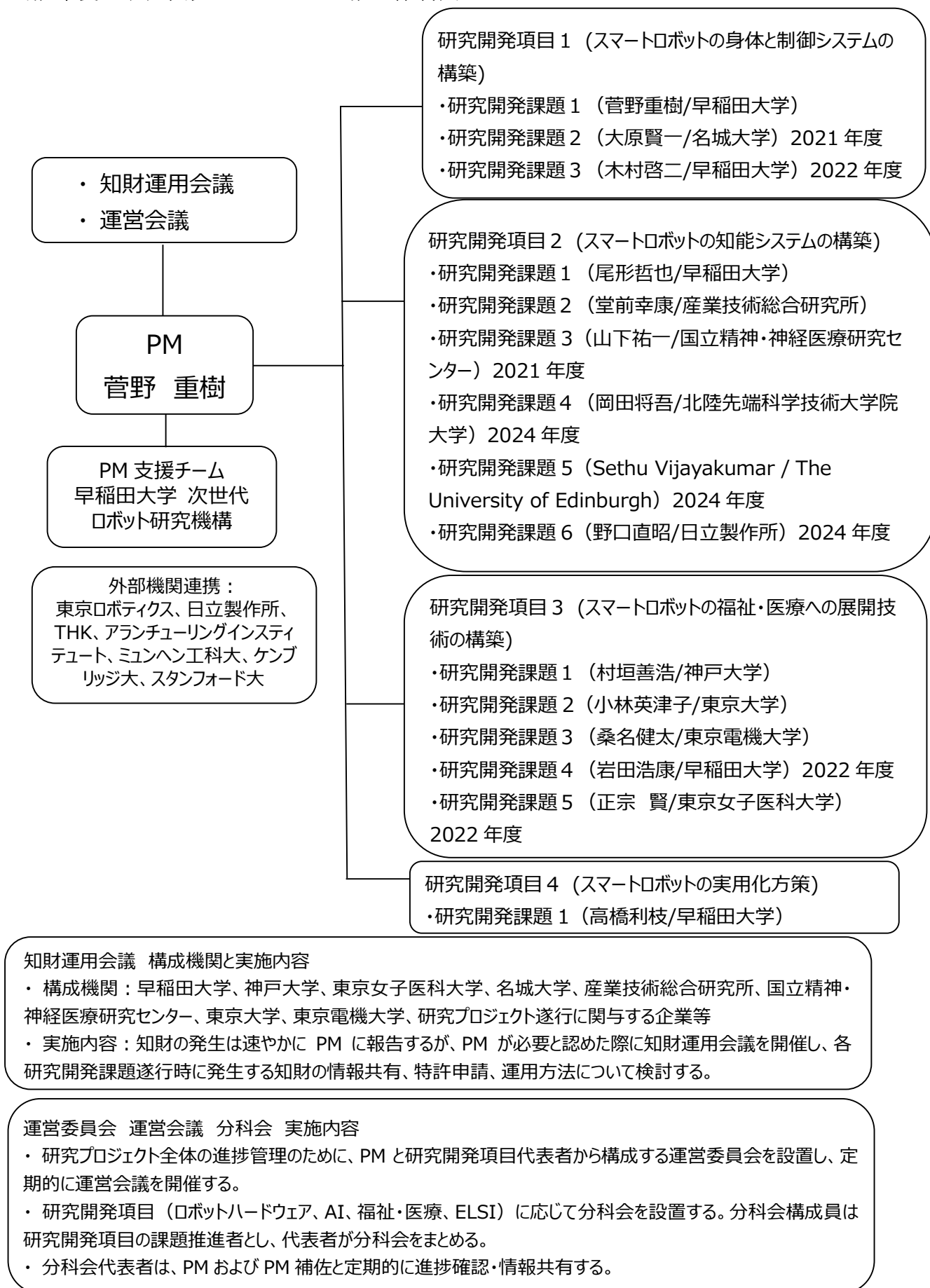
(4) データマネジメントに関する取り組み

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。さらに、日立製作所が開発した AIREC-Basic が複数台今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. 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	3	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	3	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	27	21	48
口頭発表	34	29	63
ポスター発表	21	10	31
合計	82	60	142

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	31	31
(うち、査読有)	0	30	30

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	3	4	7
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	3	4	7

受賞件数		
国内	国際	総数
2	1	3

プレスリリース件数
0

報道件数
26

ワークショップ等、アウトリーチ件数
19