



## 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

## 2020年度版

2020年12月～2021年3月

活力ある社会を創る適応自在

AIロボット群

**平田 泰久**

東北大学 大学院工学研究科

 **MOONSHOT**  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



## 研究開発プロジェクト概要

様々な場所に設置され、いつでも、だれでも利用でき、個々のユーザに合わせて形状や機能が変化し適切なサービスを提供する適応自在 AI ロボット群を開発します。2050 年までに、人とロボットとの共生により、すべての人が参画できる活力ある社会の創成を目指します。

[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/34\\_hirata.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/34_hirata.html)

## 課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
稲邑哲也	大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構国立情報学研究所	准教授
温文	東京大学 大学院工学系研究科	特任准教授
山本淳一	慶應義塾大学 文学部	教授
野田智之	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所	主任研究員
多田隈建二郎	東北大学 大学院情報科学研究科	准教授
渡辺哲陽	金沢大学 理工学域	教授
山崎公俊	信州大学 工学部	准教授
木口量夫	九州大学 大学院工学研究院	教授
長谷川泰久	名古屋大学 大学院工学研究科	教授
平田泰久	東北大学 大学院工学研究科	教授
加藤健治	国立長寿医療研究センター 健康長寿支援ロボットセンター	室長
翁岳暄	東北大学 学際科学フロンティア研究所	助教
久保田直行	東京都立大学 システムデザイン学部	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

当該年度は、研究開発項目1の「人・ロボット共進化 AI 研究開発」、研究開発項目2の「適応自在 AI ロボット研究開発」、研究開発項目3の「共進化 AI ロボット群社会実装」を進めるうえで、各研究開発項目の要素技術を明確にするとともに、今後の研究開発方針の策定を行った。特に、研究開発項目2の適応自在 AI ロボット群に、研究開発項目1の STAR Cycle Engine をどのように取り込むか、また、研究開発項目3にて今後構築される実証実験設備をどのように運用するか等、各研究開発項目間での連携体制の明確化を行うために、多くの打ち合わせを行ってきた。

研究開発項目1の「人・ロボット共進化 AI 研究開発」では、特に研究開発課題として、「成功体験マネージャー」、「自己効力感推定器」、「自己効力感向上ナビゲーター」、「アシストプランナー」の研究開発を通して、自己効力感を向上させるロボットのふるまいを導出するために、当該年度では、STAR Cycle Engine を構成する上記要素の基本構成の検討を行った。特に、経験蓄積エコシステムで蓄積されるべきデータについて策定を行い、それらのデータ履歴から成功体験モデルを構築し、最終的に自己効力感をどのように推定するのか、その枠組みの検討を行った。また、今後熟練者のアシストスキルとユーザの自己効力感の関係のモデル化を行い、自己効力感を向上させるために次に取り組むべきタスク／難易度の選定、さらにはロボットのアシストパラメータを設定することが重要であることを確認し、各研究開発課題の明確化を行った。

研究開発項目2の「適応自在 AI ロボット研究開発」では、特に研究開発課題として、「人・環境適応自在ロボット」、「機能性スマートスキン」、「超自由度・多点接触運動アシスト制御」、「身体融合型アシストロボット」、「Cooperation of AI-Robot Enablers」の研究開発を通して、人に柔らかくかつ自然に接触するとともに、支援形態や機能に応じて柔軟に変形する Robotic Nimbus というコンセプトを提案した。そして、そのコンセプトに基づいて開発される Nimbus Holder (人の体幹を優しく支える)、Nimbus Wear (自然な着心地で心身をアシストする)、Nimbus Limbs (第 3, 第 4 の四肢でアシストする) の要素技術を策定し、それらの第 1 次試作を行った。また、それらのロボットを用いて自己効力感を向上させるためにどのような支援を行うかを検証できるシミュレータの開発や、複数台の既存のロボットを改造して協調運用させるフレームワークの検討を行った。

研究開発項目3の「共進化 AI ロボット群社会実装」では、特に研究開発課題として、「共進化型実証実験プラットフォーム構築」、「ELSI に基づく AI ロボット群設計」、「AI ロボット群共進化システムインテグレーション」の研究開発を通して、AI ロボット群の実証実験と社会実装に向けた安全・ELSI に関する標準化とシステムインテグレーションを行うための調査を行った。また、今後他の研究開発項目と連携した開発を進めるために、実験環境の仕様策定を行うとともに、具体的な支援シナリオを検討し、AI ロボットが社会に偏在し、適切な AI ロボットが適切な形態で支援を提供するといった 2050 年の社会像を実現するための開発方針の策定を行った。

## 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:人・ロボット共進化 AI 研究開発

#### 研究開発課題1:成功体験マネージャー

##### 当該年度実施内容:

##### (1) 見守り履歴からの成功体験モデルの構築

成功体験モデルとは、ユーザの主観的な成功体験の記憶・感覚を計算機上で表現可能な形でモデル化したものである。特定のタスクに対し、どのような状態において、どのような動作をすることで、どのような状態になったのか、またその際のユーザの主観的な印象はどのようなものであったのか、という情報を表現するモデルである。そのため、運動を行うユーザを見守る経験蓄積エコシステムで蓄積されるべきデータについて策定を行い、身体運動、心拍数、筋電位、視線、瞳孔径、唾液センサ信号の収集を行うことを決定した。

次に、身体状態の空間や行動空間は非常に複雑で多自由度の空間になり、トップダウンに記述・設計することが困難であるため、経験蓄積エコシステムで得た身体行動データから潜在空間表現を抽出し、その状態空間と行動空間の関係性を確率的グラフィカルモデルを用いて表現することを狙う。具体的には、確率的グラフィカルモデルの一種である GPLVM(Gaussian Process Latent Variable Model)を用いて、身体運動・身体状態の潜在空間を構築し、時系列にそって身体運動パターンがどのように想起されるかを確率的に表現する方針を固めた。

また、ユーザの想起している運動情報を推定するための手段として、注視行動に基づく興味の対象の特定から、過去の運動想起を実現するアプローチを取ることとし、その実験プロトタイプシステムを構築した。このアプローチは、過去の運動を想起している内容と同じ運動を行う人を観察すると、無意識のうちにその人の行動に注意が引きつけられてしまう傾向を応用したもので、注意が向けられている人の運動、注意が向けられている身体部位を計測することで、どのような体験を想起しているかを推定する。実験プロトタイプシステムでは視線計測機能を持つ VR デバイス(ヘッドマウントディスプレイ)で複数の異なる運動を観察し、ユーザの注意の傾向を確率的に抽出可能であることを確認した。このデータを活用して、上記の確率的グラフィカルモデルの構築を行っていく道筋を確立した。

課題推進者:稲邑 哲也(国立情報学研究所)

#### 研究開発課題 2:自己効力感推定器

##### 当該年度実施内容:

本年度は研究項目1「活性化拡散モデルに基づく自己効力感推定器の開発」を開始し、活性化拡散モデルの要素を特定するために、自己効力感の判断に重要な経験要素を抽出する被験者実験に着手した。具体的に図1のように、野田PI(ATR)が行っている歩行補助実験において、自己効力感に関するアンケートを加え、ユーザの歩行能力、パフォーマンス、アシストの特徴、アシストに対する主観的な評価、およびユーザの状態を収集し、多変量解析の手法を用いて、自己効力感に寄与する要素を抽出する計画を立て、共同研究の実施に向けて準備してきた。さらに、同じ手法を用いて、

アシスト機器を使う健常者を対象とした実験を東京大学で行う準備をしてきた。

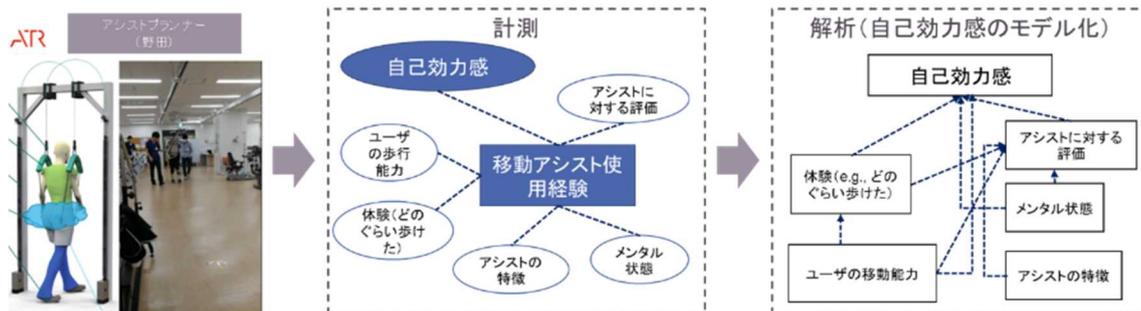


図1 被験者実験を用いて自己効力感に寄与する要素の抽出手法

課題推進者:温文(東京大学)

### 研究開発課題 3: 自己効力感向上ナビゲーター

当該年度実施内容:

運動に疾患のある対象者(協調運動疾患も含む)の生活状況に関する調査を行うため、臨床現場に勤務するセラピストとの連携体制を構築した。運動に疾患のある対象者の生活自立度や自己効力感を高めるためのセラピストの戦略について、文献調査を行った。対象者個人に対する介入効果を検証するためのシングルケース研究デザインの定量手法を構築した。

#### (1) 生活状況調査に向けた連携構築

運動に疾患のある対象者(協調運動疾患も含む)の生活状況に関する調査を行うため、臨床現場に勤務するセラピストとの連携体制を構築した。臨床に従事する作業療法士および理学療法士にプロジェクトの趣旨を説明し、データ収集と研究実施協力体制の構築を進めた。

#### (2) 生活自立度と自己効力感に関する文献調査

運動に疾患のある対象者の生活自立度や自己効力感を高めるためのセラピストの戦略について、文献調査を行った。文献調査では、医療、福祉、保健、教育、療育領域における過去のシングルケース研究を網羅的にレビューした。その結果、自己効力感を向上するためには、対象者への傾聴、適切な行動に対する称賛、適切な環境および目標設定、自己決定の尊重、課題難易度の統制等の要因について考慮する必要があることが示された。また、行動学習を促進するためには、時間遅延法、逆行連鎖法、ポジティブルール、課題難易度調整、プロンプトフェイディング、シェイピング等の技法が有効であることが示された。また、実際の熟達セラピスト、および学生の ADL 支援(離床、座位保持、移乗、着衣、上腕のリハビリテーションなど)のシミュレーション場面での映像として取得し、データベースとした。

#### (3) シングルケース研究デザインにおける統計学的検定力の検討

対象者個人に対する練習効果を検討するためのシングルケース研究デザインについて、ベースライン期のデータ変動と練習期のデータ変化に応じた統計学的検定力をシミュレーションにより検討した。シミュレーションでは誤差を含むデータを生成し、ベイズ推定と並べ替え Brunner-Munzel 検定を用いてベースライン期と練習期のデータを比較した。その結果、ベースライン期の変動係数を入力とし、レベルとスロープの変化率

に応じた有意差の出現確率を推定するロジスティックモデルを作成することができた。また、ベースライン期の変動係数が大きい場合には第 2 種の過誤が一定程度生じることが示唆された。このことより、N of 1 デザインを適用する際には、ベースライン期のデータ変動に応じた統計学的検定力を考慮した上で効果を推定する必要性があるという結果を得た。

課題推進者: 山本淳一(慶應義塾大学)

#### 研究開発課題 4: アシストプランナー

当該年度実施内容:

当該項目では、適応自在 AI ロボット群のふるまいを決める支援パラメータ設定を行い AI ロボット群の適切なふるまいを導くことを目的としており、研究室の実験室だけでなく実証フィールドにおいて移動・離床支援、リハビリ支援を対象タスクとしてアシストプランナーの実証データを集積するための、プラットフォーム実現が鍵となる。将来的には Robotics Nimbus と連携とし、Nimbus を空間内でふわふわと動かすことができるような、しなやかに体幹をさせるアシストプラットフォームを実現する。当該年度の課題推進内容は、「1) アシストプランナーおよび実証プラットフォームの開発の実施」においては、運動支援・移動支援において、体幹を支えるのに十分な出力を有するアクチュエータ要素と体幹への力の伝達部を設計し、「2) フィールド実証のための環境構築およびアシストプランナーの実証の実施」においては、リハビリテーション・介護現場に容易に導入可能にするための、安全に人のフレーム構造を設計し、部分的な試作を通じて、開発したシステムの実証を行なった。

##### (1) アシストプランナーおよび実証プラットフォームの開発の実施

リハビリテーションおよび介護現場で利用されている人の身体を支える免荷システムとして、介護機器・免荷システムでは免荷力を生成するための駆動源として、高減速比のモータもしくはボールねじが用いられることが多い。リハビリテーション現場で使用される免荷装置は、高減速比の電動モータで上部からベルトを巻き取る構造となっている。他に手動でばねを巻き取りバランサー型の装置 (BIODEX 社) や空圧シリンダ (Pneumex 社) などが存在する。いずれも、運動支援・移動支援に用いるためには、①柔軟に荷重量を調整することができない ②上下運動に対する抵抗が大きい ③アクチュエータ自体の重量が大きい という問題があった。

そこで、体幹に駆動力を伝達するためのアクチュエータとして、1000N 以上の抗重力運動のアシスト(免荷)が可能になるように  $\phi 20$  の空気圧人工筋を採用しアクチュエータ要素を設計した。アクチュエータの位置や長さによって駆動させた場合の出力が変化し、適切にアプリケーションに応じて調整できるようにするため、力の伝達はボデーケーブルにより伝達するものとした。これにより、アクチュエータを従来システムに比べて圧倒的に軽量にできるため、免荷装置を移動させたときのイナーシャを低減できるメリットがある。さらに、力制御を行うための、収縮率を計測するためのエンコーダシステムとして、光学式のスケールの設計と試作を行った。このようなアクチュエータの空圧制御と連動して、被験者の Kinematics をセンシングするシステムとして、カメラ画像からスティックフレームを抽出するための画像取得モジュールを構築した。

以上より、抗重力筋の働きによる運動表出に対する運動支援・移動支援が可能でアクチュエータ(最大1000N 以上)と動力伝達機構の基本設計を完了した。従来技術に

比べて3つの課題を解消可能な新規性が高いシステムである点で重要な成果である。

## (2) フィールド実証のための環境構築およびアシストプランナーの実証の実施

移動・離床支援, リハビリ支援が必要な介護現場への導入に向けて、介護現場を模擬した実験環境の整備を行った。抗重力筋による表出する運動をアシストされるユーザが特定の1か所だけでなくある限られた空間内であれば移動可能で移動可能で、抗重力筋の働きによる運動表出に対する運動支援・移動支援を行うためのアシストが可能となるようなフレーム構造の基本設計を実施した。

具体的には、上記のようなアクチュエータの駆動力により、体幹が安全に支えられるフレーム構造を設計した。大梁(X 方向に配置される梁)に対して、小梁(Y 方向に配置される梁)が摺動する構造をとることで、移動式の免荷フレームが構成される。リハビリテーション施設などにおいては、天井にアンカーを打ち、建物の躯体から吊り下げる構造をとることが多いが、導入時点で実証場所に天井に穴をあけるなど大がかりな工事が必要となり、COVID-19 の影響等も鑑みると長期の工事の現実的ではない。そこで、天井に吊り下げるのではなく、天井と床に突っ張る方式で設置するフレーム構造とした。これにより建物の躯体への工事が不要となるため、柔軟かつ迅速に設置、もしくは、移設も可能な構成となる。

アクチュエータは小梁上に配置し、配管は大梁上を1次圧(元圧)、小梁上で2次圧(制御圧)を生成しエネルギー変換し収縮力ボデーケーブルに伝達する構成とした(図1)。人工筋が軽量で出力が大きいため、頭上のつり下げユニットが従来の移動式免荷ユニットに比べて圧倒的に軽量化でき、素早い上下運動にも追従可能となる。配管やリアルタイム通信、また、ボデーケーブルなどは、適切にフレーム上でケーブルベアリングし、梁とともに摺動させる。フレームが4m×4mの場合にも人の体重を完全に支えることができる。次年度以降に、実験協力場所の選定と研究体制の構築を予定しているが、各梁のサイズは、実証場所に応じて柔軟に変更でき、建物の躯体へのアンカー工事や天井パネルの穴あけが不要である点で実証フィールドへの導入が容易である。

また、StarCycleEngine 班(AI班)で定期ミーティングを開催し、AI開発のための実証データを集積するための実証シナリオを構築し、他PIとの連携体制を構築した。また、2月末に開催された医療と介護の総合展(メディカルジャパン)において、アクチュエータ技術の展示を実施(100名が来場)し、経営層を含む医療従事者・介護従事者に対して、上記の仕様のプラットフォームについてニーズヒアリングを実施した。リハビリ介護現場でのニーズだけでなく、当該技術は工場ものづくり現場でのニーズもあるとのコメントがあり、今後、ものづくり産業の適用用途など波及効果が期待されることが判明した。

以上により、介護現場に導入を想定した1.5m×1.5m以上の範囲で抗重力筋の働きによる運動表出に対して運動支援・移動支援が可能なるフレームの基本設計が完了した。



図1 アシストプランナーの実証プラットフォーム(使用場面のイメージ図)

課題推進者:野田智之(株式会社国際電気通信基礎技術研究所)

## (2) 研究開発項目2:適応自在 AI ロボット研究開発

研究開発課題1:人・環境適応変形ロボット機構

当該年度実施内容:

柔剛切替え機能を有する先端折返し機構要素, 環境・人への結合(吸着)機構要素, 環境・人への形状なじみ機構要素の主要3要素に関して, 本プロジェクトにおけるコア技術に仕立てあげうる基礎原理を考案した.

主要3要素の原理考案・実機的设计試作の実施.

- 柔剛切替え機能を有する先端折返し機構要素
- 環境・人への結合機構要素
- 環境・人への形状なじみ機構要素

コア技術ともつながる基礎原理を考案した. また, この考案した原理に基づいて, 実機的设计・試作を行い, 基本実験により, 考案した原理の基礎的な有効性を確認した. 先端折返し機構要素に関しては, 受動版, 準能動版, 能動版の3種類を構成した.



図1:左から, 先端折返し機構の受動版, 準能動版, 能動版の試作機外観.

また結合要素に関しては, フォースダイオード機構なるものを考案し, 連結した際の柔剛切り替えの究極版としての位置づけとしても, 研究開発を進めている.

課題推進者:多田隈建二郎(東北大学)

## 研究開発課題 2: 機能性スマートスキン

当該年度実施内容:

### (1) 人との優しい接触(摩擦/圧力/湿度)を実現する機能性スマートスキンの実現

下記の機能をもつ機能性スマートスキンを開発することを目指している。

- 接触する身体部位の形状に適応して変形する。
- 接触する身体部位の皮膚弾力に応じた圧力や剛性を与える
- 接触する身体部位の皮膚表面状態に応じた摩擦・湿度・温度を与える

機能性スマートスキンは表面の摩擦・湿度・温度を制御する Smart Texture と身体部位の形状に適した形状と剛性を与える機能性粒子により構成される。令和2年度においては、このうち、Smart texture システムに着目し、表面の摩擦を制御するシステムの開発に取り組んだ。

システムは、コットン等の布からなる人の皮膚と直接接触を担う第一層、微視的ななじみ(数 mm のレンジで人の皮膚形状に即した形状を構成すること)と気体の放出を可能とする第二層、ならびに、表面に液体を放出させるための液体を保持するとともに放出機構を有する第三層から構成されている。全体としては最大 10mm の厚さとなっている。

摩擦制御の肝となるのが液体放出機構である。液体放出機構はベンチュリ効果に基づき、液体を細かい霧状にした上で噴出する機構から構成した。細い流管に液体で湿らせた布地を差し込む機構を構築することで、薄い噴出機構を実現した。この細い流管に圧縮空気を流すことで布地に含まれた液体が噴出され、第一層の布地表面や接触を濡らすことができる。第一層を構成するコットンは一般に摩擦が低い。そこで、噴出液体として表面張力の高い純水を使い、コットンを噴出した純水で濡らすことで、第一層の表面の摩擦を上げることに成功した。なお、本システムは、将来的に、保湿剤などを人の皮膚表面へ放出し、人の皮膚のダメージ減少や改善が実現できる目的への応用を見据えて開発したものである。

上記液体噴出機構に加え、第二層を通じて第一層に乾燥空気を流すシステムを構築した。このシステムを活用することで、第一層の布地表面を乾燥させ、元の低摩擦状態へと元に戻すことができることを確認した。加えて、乾燥空気による空気層が第一層に生じることで、より摩擦を低くすることが出来ることが分かった。摩擦係数は実験結果から 0.2~0.5 以上、と変化させることができることを確認している。

課題推進者: 渡辺哲陽(金沢大学)

## 研究開発課題 3: 超自由度・多点接触運動アシスト制御

当該年度実施内容:

### (1) 物体操作に伴う操作対象のふるまいの正確な計測・予測・状態推定

着衣支援における主な操作対象は布である。ロボットのような自動機械に布のような柔軟物を扱わせるには、センサデータから柔軟物の状態を推定する能力や、柔軟物のふるまいを予測する能力を高度に作りこむ必要がある。しかし、そのような柔軟物の情報を計算機上で表現するには、本来きわめて高次元かつ広範囲の変数空間が必要となる。当該年度の研究活動では、まず、三次元距離画像センサを用いた計測用センサシステムを構築し、キャリブレーションソフトウェアを整備した。そして、それを用

いて着衣中の布の動きを計測可能にした。また、着衣中の衣服の動き情報から布の状態を推定する手法を考案した。図1は手法の全体像である。固定された三次元距離画像センサから得たカラー画像列から、オプティカルフローをベースとした特徴量を抽出し、その特徴の質によって、作業の進捗状況の推定と失敗検知をおこなうことを可能にした。提案手法は、二つの機能をもつ一つの構造にまとめたニューラルネットワークを用いており、類似の目的で提案された既存手法よりも30%程度高い推定精度が得られることを確認した。ここでは、子供サイズのマネキンの腕に長袖の服を通す行動を検証用作業とした。まず、深度画像を入力とした人型ポーズ推定をおこない、袖を通すためのロボットの操作軌道を決定した。その後、着衣動作中のオプティカルフローに基づいた特徴量計算をおこない、その結果から現在着衣がどのフェーズにあるのかを出力させた。この実験での状態推定の成功率は90%であった。この成果により、人の着衣行動の一部がロボットによって支援できる可能性が示された。

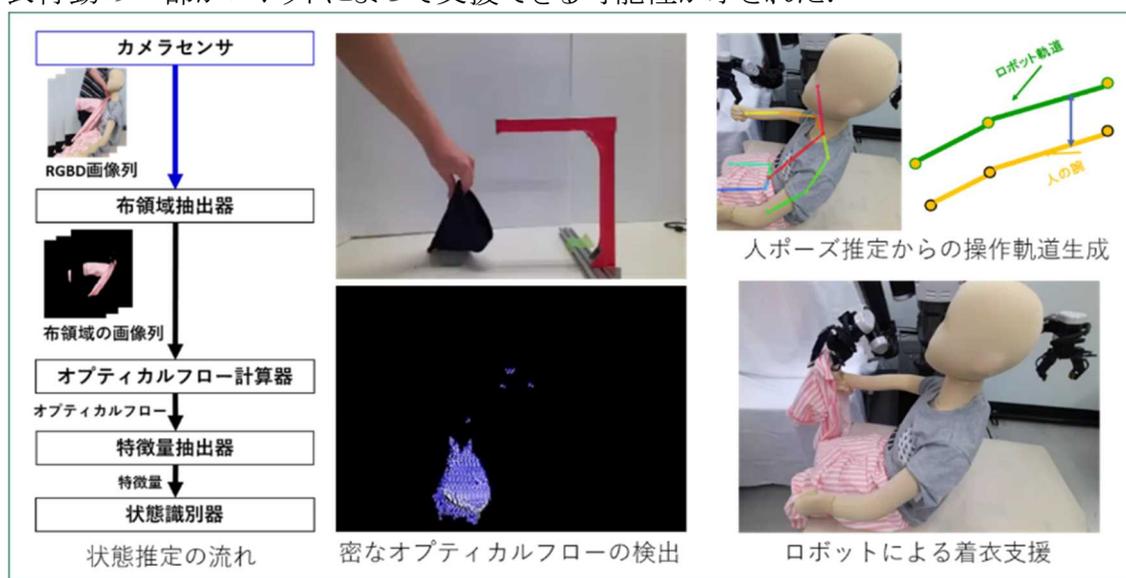


図1 布状態推定手法の全体像

## (2) 多点接触ロボットの構成検討とシミュレーション

柔軟物は無限の形状状態を持つが、そのような物体を操作して所望の状態にした場合、有限個の接触部位によってそれを達成することは十分可能である。しかし、そのための解は無限に存在しうるため、現実的な時間で実現可能な解を見つけることは未解決の課題である。本項目では、そのための戦略の立て方を研究した。pEM\*D net (probabilistic Encode-Manipulate-Decode Network)を利用した布の形状予測モジュールを実装し、着衣のような複雑な柔軟物操作に適用するための検討をおこなった。一方で、複数のエンドエフェクタを持ち、それらの根本が同一であるマニピュレータ構成を想定し、それによる作業支援の可能性を検討した。具体的には、人腕程度のマニピュレータの中間リンクに長さ数十cmの小型多関節アームが取り付けられるものとして、着衣や物取り、ドア開けなどの作業が支援できるかどうかを検討した。また、そのようなロボットの動きをシミュレートするためのプログラムを実装し、様々な支援動作を計算機上で検討するための基盤を整えた。さらに、小型多関節アームを実際に制作して、人の腕を支える作業の実現に向けた準備を整えた。図2は、左側が設計制作した小型多関節アームとその取り付け状態を示している。右側は、人の腕の支持をシミュレートしている様子である。

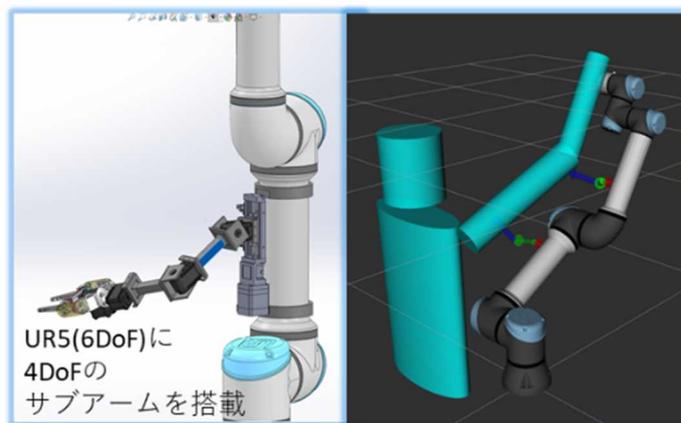


図2 多点接触マニピュレーションの検討

課題推進者: 山崎公俊 (信州大学)

#### 研究開発課題 4: 身体融合型アシストロボット

当該年度実施内容:

##### (1) 身体外部からの刺激による身体内部筋肉動作制御および人工感覚生成の実施

研究項目1では、筋電信号等の生体信号を用いてユーザの動作意思を推定し、ユーザの思い通りの動作を生成する身体融合型アシストロボットを開発する。本ロボットでは、ユーザの身体外部から刺激を加えることにより、ユーザの身体内部の筋肉動作を制御する技術および人工的に運動感覚を生成する技術を開発した。項目1のロボットのイメージを図1に示す。

令和2年度(3ヶ月)では、研究項目1「身体外部からの刺激による身体内部筋肉動作制御および人工感覚生成」を開始し、身体外部からの刺激により身体内部筋肉動作を制御し、人工感覚を生成するロボットシステムのプロトタイプを設計した。具体的には、外部から刺激を加える振動刺激装置と制御手法の検討とそのプロトタイプ的设计を行った。

上肢の上腕二頭筋と上腕三頭筋に人工感覚を生成するために設計・製作したロボットシステムのプロトタイプ(振動刺激装置)を上腕に装着した図を図2に示す。また、設計・製作したプロトタイプを用いて人工感覚生成実験を行った様子を図3に示す。

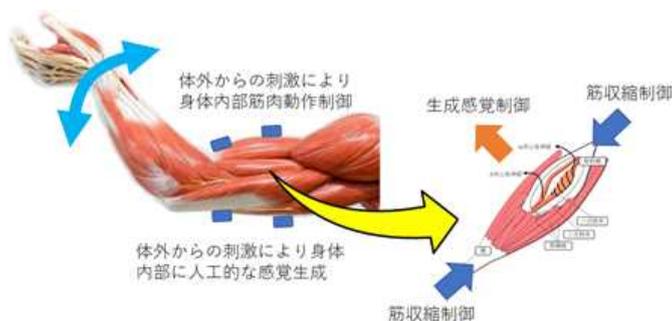


図1 項目1のロボットイメージ



図2 上腕に装着したプロトタイプ

人の筋に振動刺激を加えると緊張性振動反射(TVR: Tonic Vibration Reflex)と運動錯覚が生じるが、人工感覚を生成するためには運動錯覚のみを抽出する必要がある。本研究により、振幅 1mm で初期接触力 4N の条件下では、周波数 60Hz の振動刺激を加える

ことにより、上腕二頭筋と上腕三頭筋において運動錯覚が支配的になることを複数の被験者で確認した。また、上腕二頭筋と上腕三頭筋に交互に周波数 60Hz の振動刺激を加えることにより、肘関節の伸展と屈曲の感覚を生成できることを実験により証明できた。肘関節の人工屈伸感覚生成実験の結果を図 4 に示す。実験では左腕のみ振動刺激を与え、左腕で感じている肘関節角度を右腕で表現している。振動刺激を加えた左腕の肘関節は動いていないことから緊張性振動反射が発生していないことが分かり、右腕で示した左腕で感じた肘関節動作が振動刺激を加える筋を変えることにより変化しており、肘関節における人工感覚が制御できていることが分かる。

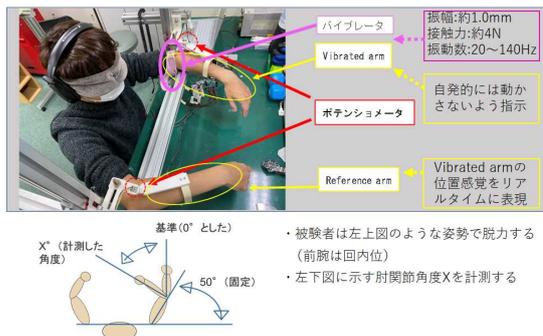


図 3 人工感覚生成実験

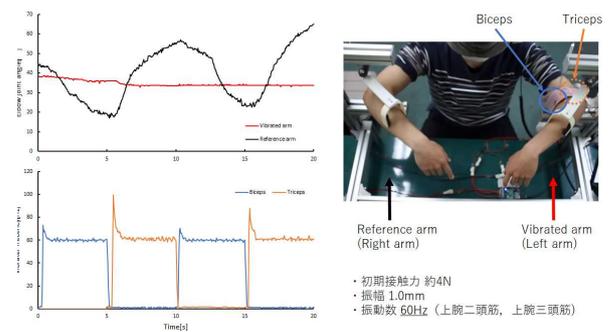


図 4 実験結果

上述の通り、当該年度の研究開発計画は全て達成することができた。また、適応自在 AI ロボットの Nimbus Limbs の内、下肢の Nimbus Limb のプロトタイプ案も考えた。プロトタイプ案を用いてロボット歩行器にしたものを図 5 に示す。

課題推進者:木口量夫(九州大学)



図 5 下肢 Nimbus Limb プロトタイプ案を用いたロボット歩行器

研究開発課題5:スマートアシストウェア  
令和3年度より実施

研究開発課題 6:適応自在 Limbs

当該年度実施内容:

(a) ウェアラブル歩行・作業支援リムの設計仕様の検討・決定

上肢作業用の第1段目リムの中に、第2段目のリムを収納できる中空構造とし、必要に応じて第2段目のリムが、第1段目のリム先端から伸張する。また、リムの長さとして、背中から手関節までの距離 700~800mm であるので、それを上回る長さとしている。リムに必要な自由度として、環境との衝突を避けるように経路点を満たしながら、装着者の腕を支えるのに9自由度必要である。また、第2リムにて別の物体を操作する為に6自由度は必要であるので、第1段目と第2段目を合計して15自由度が必要となる。

歩行支援用リムの長さとして、直立姿勢において腰から床までの距離が約 1,000mm

であるので、階段などの歩行を考慮して、それを上まわる長さとした。リムに必要な自由度として、環境との衝突を避けるように経路点を満たしながら、装着者の身体を支えるのに9自由度必要である。

これらの検討に基づいてウェアラブル歩行・作業支援リムの設計仕様を決定した。

(b) 設計の基礎データの準備

上記の仕様を満たすためのリンク構造を設計するために図1に示す中空作業支援用リムの試作を行った。4リンクモデルを基本構造とし、電動直動アクチュエータにて駆動した。製作したリムの可動範囲と先端剛性を図2と図3に示す。実際に得られたリム先端発生力、リム先端可動範囲、リム先端剛性から、作業支援用および歩行支援用のリムの仕様を検討した。その結果、作業用支援には、十分な発生力と剛性を有しており、歩行支援用には、十分な可動範囲を有していることを確認した。



図1 中空作業支援用試作リム

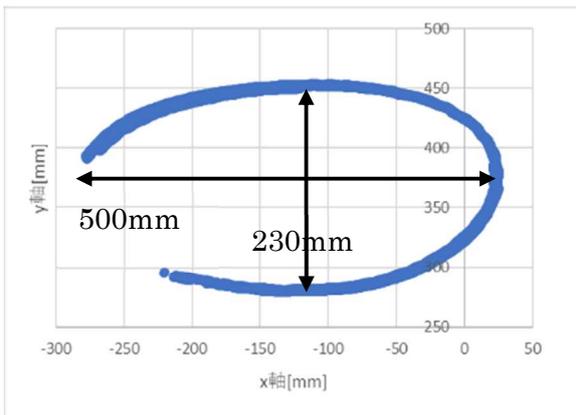


図2 作業支援用リム先端軌道

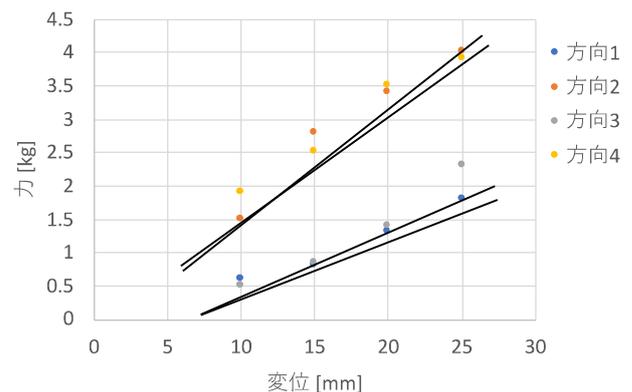


図3 作業支援用リム先端剛性係数

(c) 必要なセンサ・制御系, アクチュエータ選定

リンク先端位置の計測には、3次元計測センサを用いて計測する。

制御系としては、制御 OS には ROS を使い、アクチュエータに搭載されたセンサーからの変位情報と、3次元計測センサーにより検出された目標位置とリム先端の位置誤差を用いて、フィードバック制御によりリム先端を目標位置へ到達させる。

アクチュエータとして、上肢支援用リムには電動アクチュエータ、下肢支援用リムには空気圧と油圧のハイブリッドを用いることとした。

課題推進者:長谷川泰久(名古屋大学)

研究開発課題 7: Cooperation of AI-Robot Enablers

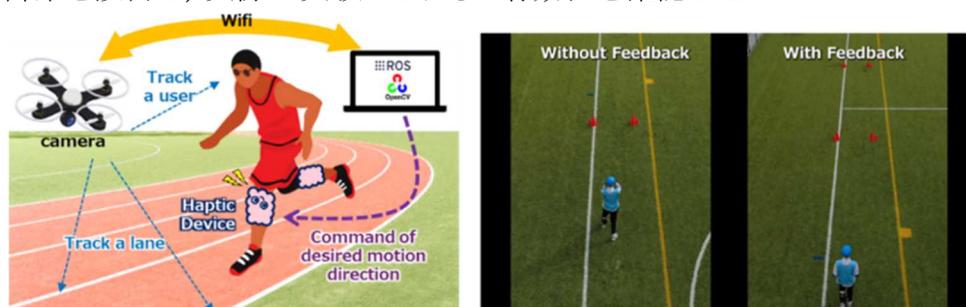
## 当該年度実施内容:

従来、人間支援ロボットの研究は数多く行われているが、その多くはロボットが単独で動作し、あらかじめ決められた運動に対応した支援を行うものがほとんどである。これは、人間支援ロボットが企業や大学等で個別に開発され、それぞれが個別で動作することを前提としているためである。そこで当該年度では、このような問題を解決するために、複数のロボットが連携・協調することができるフレームワークを構築することを目指し、その開発環境整備を行った。はじめに今後開発するロボットを共通した OS で制御するために、各種ロボットに ROS (Robot Operating System)を導入することを決定した。そして、現在市販されている車いす型ロボットや歩行器型ロボットに ROS を導入するとともに、環境認識センサ等を追加することで、未知環境において自動的に地図を作成し、その中で協調的に目的地まで自動で移動するナビゲーション技術を構築した。本研究開発では、特に異なる形式のロボットであっても容易にナビゲーション機能を実装することを可能とする、ROS を用いた Universal Navigation Repository の構築を行い、今後開発される AI ロボットのミドルウェアとするための基盤技術を開発した。本研究開発では、2台の車いす型ロボットと1台の歩行器型ロボットを協調動作させることに成功した。



ROS を用いた Universal Navigation Repository の構築

また、視覚障がい者のスポーツ支援システムを構築することを想定した複数ロボット協調システムを開発した。本研究開発では、Nimbus Wear 要素技術となり得るウェアラブル型の振動提示デバイスを用いることにより、人に目標の運動方向を提示する技術を開発した。また、ドローンを用いて人に追従しながら上空を飛行し、同時にグラウンドに描かれた線の検出や人の位置をリアルタイムで計測する技術を開発した。そして、ウェアラブル型振動提示デバイスとドローンを ROS を介して協調制御することで、アイマスクを装着した人(視覚障がい者を想定)がグラウンドに描かれた直線に沿って走行するための制御系を設計し、実際の実験によりその有効性を確認した。



ROS を介した Nimbus Wear 要素技術とドローンの協調

課題推進者:平田泰久(東北大学)

### (3) 研究開発項目 3:共進化 AI ロボット群社会実装

#### 研究開発課題1:共進化型実証実験プラットフォーム構築

当該年度実施内容:

##### 項目 1:高齢者の在宅/施設環境を模擬したモデルルームの環境設計

適応自在 AI ロボット群の社会実装を進めるうえで、開発された適応自在 AI ロボット群を介護施設や家庭生活に導入する前に、使用者の安全が確保された環境下で、効率的に PDCA サイクルを回すための実証実験プラットフォームの構築が必須である。当該年度は、高齢者の離床、移動、着衣支援を目的とする適応自在 AI ロボット群のプロタイプを想定し、例えばベッドや車椅子からの転落や閉所や暗所での移動に伴う転倒といったリスクを回避し、使用者の安全を確保するための環境整備とともに、適応自在 AI ロボット群を効率的に効果検証するための環境調整に関する検討を進めた。

##### 1. 天井レールを用いた使用者の転倒転落防止システムに関する検討

適応自在 AI ロボット群の実証実験に向けたモデルルーム(室内・屋外環境を併設する)内において、使用者の移動空間に天井レールを敷いてハーネスを付けることで、転倒・転落を感知して自動的にブレーキをかける(ゆるやかに転倒する)環境構築に関する検討を行った。

##### 2. 使用者の生活環境や AI ロボットの仕様にマッチングできる柔軟な環境調整

適応自在 AI ロボット群の実証実験においては、使用者の生活環境や、ロボットの仕様に合わせて、柔軟に環境調整を行う必要がある。当該年度では、それを実現するため、1) トイレ、浴室、寝室の広さの環境調整を可能にする、2) 段差や壁の取り付け・取り外しを可能にする、3) フロアや床材の調整を可能にする、といった環境調整のための因子を抽出した。

##### 3. VR プロジェクターを用いた屋外仮想現実環境の構築

適応自在 AI ロボット群の使用においては、屋内に留まらず、玄関から外に出る際のスロープ、悪路、階段、道路といった場面が想定される。したがって、それらを模擬するため、VR プロジェクターを用いた屋外仮想現実環境(例えば、横断歩道や横断歩道を待つ車両を屋外環境室の壁面に 360 度投影する等)に関する提案を行った。

##### 項目 2: PDCA フレームワークによる実証実験プラットフォームの提案

当該年度では、モデルルームにおける適応自在 AI ロボット群の効果検証のための PDCA フレームワークを活用した実証実験プラットフォームの提案を行った。特に、適応自在 AI ロボット群の使用対象者/使用場面の選定に関する検討を進めた。モデルルームにおける実証実験は 2023 年度に予定しているが、その段階では、適応自在 AI ロボット群の機能が限定的であることが予想される。したがって、効果検証に先立ち、使用者の日常生活活動の能力に併せた適切な課題設定を行うことが望ましい。そこで、現在ハードウェア班が検討を進めている「ベッドから立ち上がって、トイレまで移動して排泄する」という一連の生活動作の流れ(離床・移乗・移動・排泄)を抽出して、その動作を 22 に分類し、Rasch 分析を用いて動作間の難易度を間隔尺度化する試みを行った。この間隔尺度化された難易度マップを活用することで、対象とする生活動作の難易度を知り、難易度の順に従い適切な課題設定を実現できる可能性がある。

次年度は、対象者の身体機能や認知機能を判定するためのシナリオ作成に向けて、ICF(国際生活機能分類)の項目に対する網羅性を検討する。その際には、ICFの項目数が膨大であるため、簡略化する試みが必要とされる。さらに、作成したシナリオを基に、どのような計測手法を用いて評価するかの検討が必要である。引き続き、これらの検討事項を基に、対象者ニーズと適応自在AIロボット群の技術シーズ間をマッチングするための課題設定とシナリオ作成を検討し、PDCAフレームワーク活用型実証実験プラットフォームの構築に繋げていきたい。

課題推進者:加藤健治(国立長寿医療研究センター)

## 研究開発課題 2:ELSIに基づくAIロボット群設計

当該年度実施内容:

### (1)Implementing Shared Data Management

Value-Sensitive Design (VSD) is a method in technology design, that takes stakeholder values into account in a structured and comprehensive way. It covers the conceptual phase for identifying values between different stakeholders, the empirical phase on the evaluation of the values through socio-cultural norms and converted into design requirements, and the technical phase on analyzing the technical limitations and capabilities of the technology itself and how they support or limit the achievement of the stakeholder values. This analysis is not conducted once but repeated throughout the design process in order to fully assess the impact of any changes and to assure that any new stakeholders, values, design requirements or technical limitations are discussed through the prism of all three phases, until all phases align. The benefit of VSD over other design approaches is the inherent consideration of all stakeholders' values/requirements and the requirement of iteration-until-alignment, that provides all stakeholders more chances to have their opinions considered during the design process (and sometimes into the usage lifespan of the product).

In this academic year, we used VSD to setup the initial process for HRI empirical experiments on data management, which includes (1) Survey on living lab concept and implementation, and (2) Design a HRI experiment on embodiment and privacy. First of all, the concept of living lab in this study is not only to consider the construction of a testing field for risk evaluation. It will be used as a regulatory sandbox for HRI. In other words, how can we use it for quality control and problem shooting to data protection laws and regulations is the focus. Our initial step is to design mobile robots which can collect several different types of sensing data for legal validation purpose. We chose two Turtlebot 3 Burger with additional stereo camera, 360 camera, and wire controller. The objective for legal validation of mobile robots shall be able to achieve tasks such as shared object detection/location, privacy-enhanced remote communication, privacy-enhanced remote control, and privacy-enhancing object tracking. Second, we

use VSD to design a HRI experiment on embodiment and privacy. Through the analysis of VSD, we surveyed seven methods that can be used to evaluate embodiment and privacy. They are (a) Identify stakeholders - primary user, (secondary user), third parties, regulators, designers (roboticists and experts from other relevant fields), (b) Identify all intended contexts for use (i.e.) Use data from use-case analysis, (c) Identify the goals and values important to each of the stakeholders, identify value dams (conflicting values; values that some stakeholders strongly protest). (d) Identify risk-mitigation and value-balancing approaches (based on values, norms), (e) Develop prototype, (f) Conduct context-relevant testing, (g) Evaluate acceptance, accuracy and impacts. Based on above survey outcome, we used them to design two different HRI experiment scenarios on embodiment and privacy.

Finally, as to our milestones, survey on living lab concept has been completed. The implementation we finished the initial part of design two mobile robots for legal validation, the latter part of conducting the legal validation shall be realized in the next academic year. In terms of the second milestone, we had completed a survey on seven methods from VSD to evaluate embodiment and privacy. Then we designed two HRI experiment scenarios on embodiment and privacy. The experiments will be conducted when our testing facility be finished in June 2021.

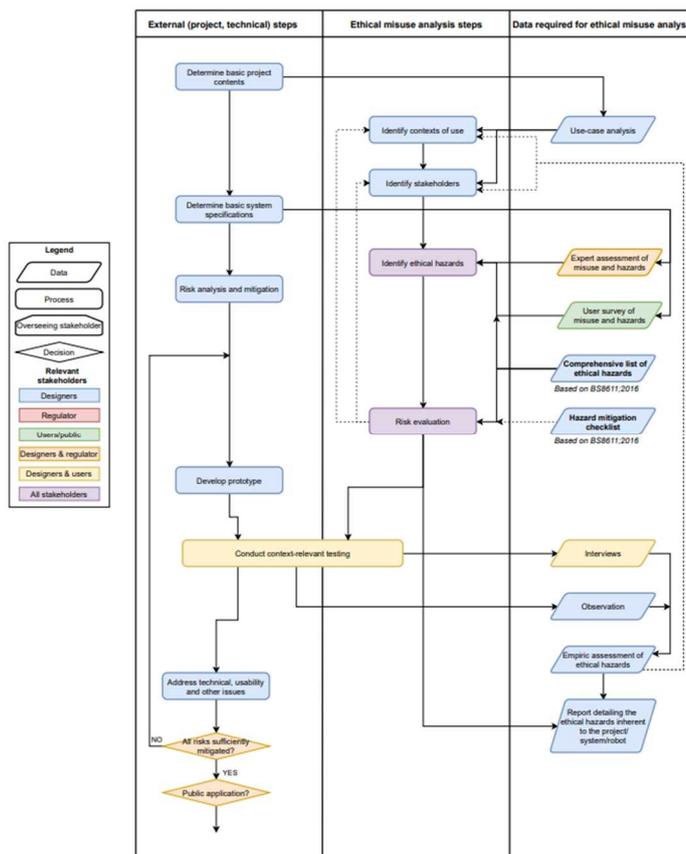
## (2) International Standardization

In terms of the standardization, I will seek a strategic collaboration with IEEE Standards Association (IEEE-SA) on creating a study group, which is a prerequisite of establishing the formal working group for standardization. On 2021 March 22nd, we had an online meeting with the IEEE-SA program manager Mrs. Christy Bahn on our willingness to create an international AI Ethics standard. With her instruction, we had successfully submitted our application to IEEE-SA. Now we are waiting their approval for the creation of our study group.

Additionally, we had surveyed current key AI Ethics related standards, which covers BS 8611: 2016, ISO 9241-11: 2018, ISO TR 23482-1: 2020, ISO TR 23482-2: 2019, JIS Y1001: 2019. From these standards, we summarized key issues which relate to our project. These issues are: Loss of Trust, Deception, Privacy and Confidentiality, Cultural Disrespect, Overreliance on robot, Misuse, Robot Overreliance on Operator, Environmental Hazards, Informed Consent, Informed Command, Unpredictable Self-learning Behavior, Infringement of Human Dignity, Discrimination. In order to verify the usability of applying these concepts into ethical evaluation, we chose the issue of Misuse and applied VSD method to propose an analytical framework for the ethical evaluation to robots.

The ethical hazard of Misuse refers to (1) The users or third parties can not cause unethical behavior through modification of the robot, and (2) The robot notifies the user or other relevant parties of unethical modification. Based on VSD, the flowchart below is

the analytical framework we propose for the ethical evaluation to robot misuse. The flowchart uses a swim lane diagram layout divided into three lanes. The lanes are: 1. External (project, technical) steps - this lane describes steps in the robotics project that are not directly related to the ethical risk and misuse assessment and is meant to provide context to the steps in the other lanes and to show the source of certain data. 2. Ethical misuse analysis steps - details the proposed steps necessary for conducting an ethical hazards/misuse analysis on a robotics project. 3. Data required for ethical misuse analysis - details the data (and data interconnections) required for conducting the ethical hazards/misuse analysis.



An analytical framework for the ethical evaluation to robot misuse

課題推進者: 翁岳暄 (東北大学)

研究開発課題3: AI ロボット群安全評価基準策定

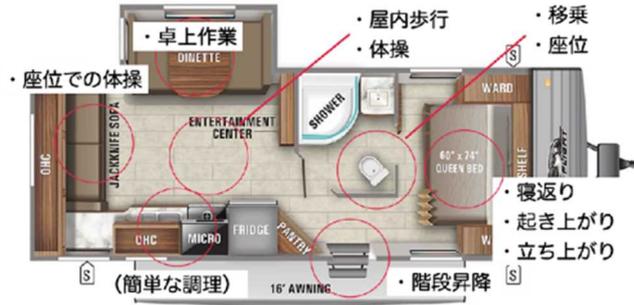
令和3年度より実施

研究開発課題 4: AI ロボット群共進化システムインテグレーション

当該年度実施内容:

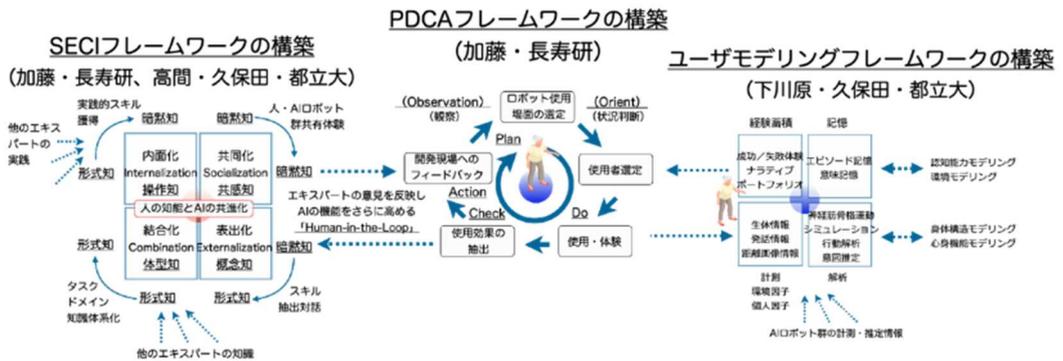
### 【研究項目1】「経験蓄積エコシステムの開発」

個々のユーザーの経験を記述し、蓄積していくためには、物理的身体性と経験的身体性に合わせた行動の記述を行う必要があり、本年度は、日常生活行動のログを取得するためのリビングラボの基本設計を行った。具体的には、キャンピングトレーラを用いたリビングラボの構築(下図)を目標に、多くのリビングラボの実証実験シナリオと類似した計測が行えるセンサの配置や計測手法に関する検討を行った。特に、基本動作のICFステージングの計測結果とStar Cycle Engine 班で推定される自己効力感との相関に関する比較などが行えることを重視した設計を検討した。また、今後、要支援高齢者を対象とした実証実験を行っていくため、手先の動作や作業を計測・推定するための学習アルゴリズムを構築し、予備実験を行った。



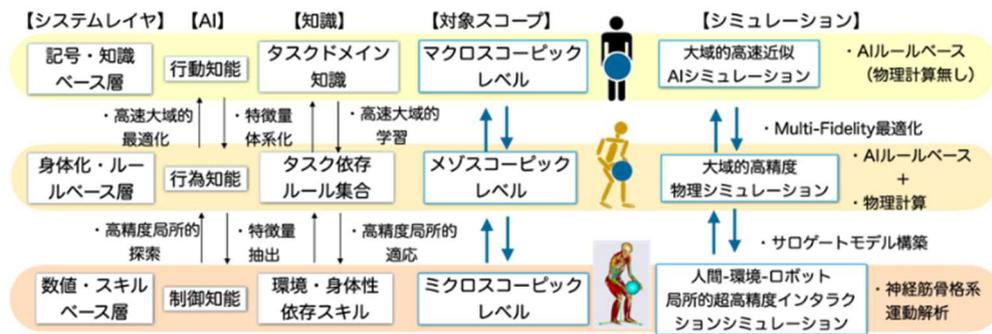
### 【研究項目2】「共進化型ソーシャルビッグデータプラットフォーム構築」

共進化型ソーシャルビッグデータプラットフォームでは、経験蓄積エコシステムで計測されるデータに基づくユーザーモデリングフレームワークと対になる形で、ソーシャルビッグデータ解析を行い、SECI フレームワークの構築と知識として体系化するためのプラットフォーム設計指針(下図)の検討を行った。特に、ICF に関する情報を活用することにより、理学療法士や作業療法士との知識共有などを前提とした上で、「実空間時系列情報」を組み込んだ知識埋め込み型の学習を行うために、Knowledge Graph Embedding を用いた方法論に関する検討を行った。



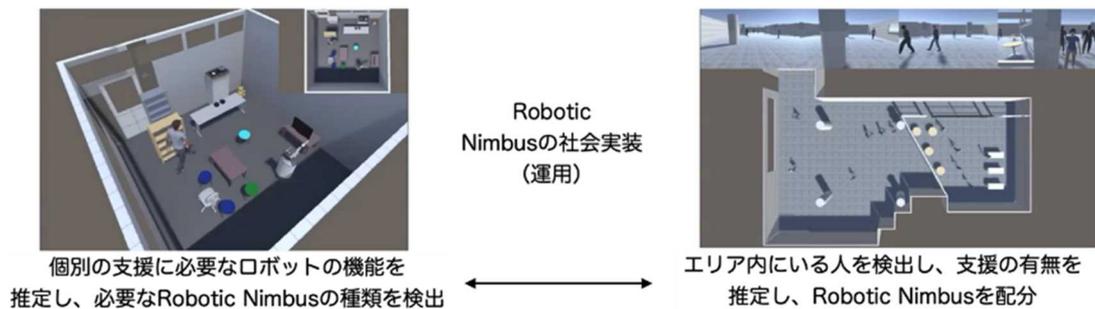
### 【研究項目3】「共進化型多目的マルチタスク最適化・学習」

共進化型多目的マルチタスク最適化・学習を行うためには、最適化の観点からタスクの定義を行う必要があり、今年度は開発方針について策定した。具体的には、最適化と学習を循環的に実現するための枠組み(下図)に関する検討を行い、必要とされる学習と最適化に関する研究の方向性について策定した。特に、マクロ、メゾ、ミクروسコーピックな観点から、最適化や学習の粒度や精度に関する検討を行い、multi-fidelity 最適化を行うためのフレームワークと、神経筋骨格系の運動解析を深層学習で置き換えるためのサロゲートモデルの設計に関する方針などを検討した。



#### 【研究項目4】「共進化型システムインテグレーションプラットフォーム」

共進化型システムインテグレーションプラットフォームを構築するためには、ハードウェアとソフトウェアの観点から開発環境の統一化と共有化に関する指針策定を行った。具体的には、上述の共進化型多目的マルチタスク最適化・学習に必要なシミュレーション技術、様々なセンサ情報を包括的に扱うための方法論について、検討した。また、Robotic Nimbus の社会実装を想定したシステムの運用を検討するための簡易シミュレータ(下図)を構築するとともに、実証実験シナリオを設計・具現化するための設計支援システム(シナリオエディタ)とシナリオを仮想的にシミュレーションするためのフレームワークに関する基本設計について検討した。



課題推進者:久保田直行(東京都立大学)

### 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

##### 進捗状況の把握

PM のマネジメント活動を支援するために、学術研究員および技術補佐員2名からなる研究推進室をPM直下に構築し、事務部門や東北大学 URA センターや本部事務機構研究推進部と連携してPMの効果的・効率的なマネジメント活動実施を強力に支援する体制構築を行った。

重要事項の連絡調整やプロジェクト全体としての進捗の共有、意見交換のために、PMを議長とした本研究開発プロジェクトの運営会議の構成員を決定するとともに、運営会議の前段階として構成員間の情報共有を行うためにキックオフミーティングを開催した。各研究開発項目での定期ミーティングとともに、項目をまたいだ情報共有のためのオンラインミーティングを積極的に開催し、各課題推進者の研究進捗状況を確認するとともにプロジェクト内の意見交換・情報共有を推進し、課題推進者間の積極的な協働を促した。また、本年度参加した課題推進者へのサイトビジット・個別面談を実施することで、PMによる課題推進者の研究開発状況の把握と課題推進者間の融合を図り、本研究開発プロジェクトの円滑な実施管

理とつなげた。

オンラインツールを活用することで、PM と課題推進者、課題推進者間の闊達な意見交換・情報共有を促進するとともに、各研究開発項目において現在どのような議論・研究が行われているのか、PM からも各構成員からも可視化される仕組みを整えた。

#### 研究開発プロジェクトの展開

当該年度は研究開発開始段階であるが、今後の研究開発の進展に伴い、研究の中止も含めた体制の再構築を行うことや大幅な方向転換等のあることを課題推進者に通知した。また、新規研究テーマが挙げた場合には、運営委員会の審議を経て課題推進者が追加される可能性があることも通知し、成果や進捗状況に応じて柔軟に変化する研究体制であることを明確化した。

#### (2) 研究成果の展開

本プロジェクトについては産官学の多くの観点からの意見・知見が必要であるため、開発企業や関係省庁等、自治体などのステークホルダーを巻き込んだ研究推進コンソーシアムの組織に向けて、コンソーシアム設立準備と参加者の選定に向けた調査を実施した。

介護施設を利用した実証実験に向けて、実験計画を策定するための関係機関と協議を進めた。候補となる施設や複数の介護ロボット開発企業等へ本研究開発プロジェクトの説明と事前協議を進め、実証実験と本研究開発プロジェクトの推進のための協力体制構築を行った。

#### (3) 広報、アウトリーチ

プロジェクト開始に合わせて研究開発プログラムの概要および最新の研究成果・研究開発状況を公開する Web を日本語・英語両方で整備し、公開した。本研究開発プロジェクトの社会像周知と分野融合を促進するため、PM/課題推進者ともに招待講演やアウトリーチ活動においてムーンショット研究開発プロジェクトに関する積極的な周知を行った。

3 月 27, 28 日に開催された「ムーンショット目標1&目標3 キックオフシンポジウム」及び「ムーンショット目標1&目標3 国際シンポジウム」において、構想を紹介した。

#### (4) データマネジメントに関する取り組み

研究データマネジメント計画を策定するとともに、研究成果の随時公開と利活用推進により、成果を社会還元する仕組みを検討した。

#### 4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



#### 知財運用会議 構成機関と実施内容

議長：PM

構成員：PD・技術主幹/JST，研究推進者および所属機関の知財管理部門責任者等

内容：本研究開発プロジェクトにかかる知的財産権の運用について議論するため、必要に応じて開催を検討

#### 運営会議 構成機関と実施内容

議長：PM

構成員：PD・技術主幹およびアドバイザー/JST，研究推進者・所属機関，外部有識者等

内容：本研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項についての連絡・調整

## 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	0	1	1
口頭発表	0	0	0
(うち、査読有)	0	0	0
ポスター発表	0	0	0
合計	0	1	1

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	1	1
(うち、査読有)	0	1	1

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
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
2