

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域

「人間と調和した創造的協働を実現する
知的情報処理システムの構築」

研究課題

「記号創発ロボティクスによる
人間機械コラボレーション基盤創成」

研究終了報告書

研究期間 2015年10月～2021年3月

研究代表者:長井 隆行
(大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)

§ 1. 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究の目標は、人間と機械が調和した協働の基盤となる技術を、「記号創発ロボティクス」のアプローチで確立することである。開発した技術を生活支援サービスロボットに応用し、実践的な場で検証する。記号創発ロボティクスとは、本研究グループが立ち上げた研究領域である。身体を持つロボットが自らの経験を自律的に構造化することで、概念や言語を含む記号が自然に生まれて使われる様子を先端機械学習に基づき実現することを目指す。こうした記号創発ロボティクスの研究を基盤として、従来から人工知能やパターン認識の分野で議論されてきた記号接地問題に構成論的にアプローチで解くことに挑戦する。人によって解釈が異なる記号について、環境や人とのマルチモーダルなインタラクションを通して、その人・集団・環境に合った概念を形成するロボットシステムを開発する。人に合わせたサービスの例として、我が国が抱える超高齢・少子化社会の重要な課題である生活支援サービスを取り上げ、人によって解釈が異なるが故にサービス導入が難しかった問題を解決することをめざした。

この目標を達成するために、本プロジェクトでは「概念班」、「信念班」、「応用班」の3つの班を構成し、それぞれが以下の目標の下で研究を進めた。

- 1) 概念班:ロボットの概念・行動・言語学習の基盤技術
- 2) 信念班:人とロボットがコミュニケーションするために必要な信念の共有技術とそのクラウド化
- 3) 応用班:VR空間におけるコミュニケーションビッグデータ取得方法や開発した技術の評価方法の確立

その結果として、

- 1) 概念班は、階層ベイズモデルや深層生成モデル、再帰型ニューラルネットワークを用いた概念・行動・言語の同時学習手法を開発することに成功した。
- 2) 信念班は、マルチモーダルコミュニケーションを通じた信念の共有技術を開発した。
- 3) 応用班は、サービスロボットの性能を評価するための国際的競技会を設計し、World Robot Summit (WRS)としてこれ開催することに成功した。

最終的にこれらの成果を総合することで、実際の家庭環境において、ロボットが部屋の片付けタスクを人との対話を参照しつつ実現できることを示した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. SLAMと場所概念学習、語彙獲得を統合した革新的オンライン機械学習とその実世界応用

概要: ロボットが稼働する環境を移動しながら画像情報と位置情報と音声情報を統合しながら場所概念と地図を獲得し、さらに語彙獲得を連続音声信号から実現するオンライン機械学習アルゴリズム SpCoSLAM 及びその加速版である SpCoSLAM 2.0 を開発した。これを拡張現実技術を用いた人間機械協調タスクに応用し、デモンストレーションすることで WRS2018 のタスク優勝も果たした。

2. 再帰型神経回路モデルによる言語と行動のグラウンディング学習

概要: 本研究では、記号接地問題という重要課題を題材に、深層学習モデルの一つである再帰結合型神経回路のエンコーダー・デコーダーモデルを、ロボットのマルチモーダル学習に拡張した研究を展開した。具体的には、(1) 多義性を持つ言語指示に対して、実ロボットの身体状態、実環境に応じた適切な動作生成、(2) AND、OR などの抽象的な論理語の理解、(3) 運動と言語の相互変換、さらには (4) 大規模コーパス学習モデルと運動表現の接続などを実現した。

3. 曖昧な発話のマルチモーダル音声言語理解および生活支援ロボットへの応用

概要：生活支援ロボットとの音声対話においては、曖昧性を有するユーザの命令を可能な限り少ないユーザ操作数で理解することが利便性につながる。そこで、日用品を片付けるタスクにおいて、曖昧な指示文を理解するマルチモーダル言語理解手法 MMC-GAN を構築した。既存手法に対する MMC-GAN の特徴は、非効率な生データ生成ではなく、圧縮された表現空間でサンプルを生成する点にある。MMC-GAN の関連論文は、ロボティクス分野最大の国際会議 IEEE/RSJ IROS2018 において論文賞を受賞するとともに、2018 年度人工知能学会において全国大会優秀賞を受賞した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. コミュニケーションと協力の数理と応用についての研究

概要：生活支援、対話、交通、教育、福祉、介護、医療など、共同行為を基盤とする広範な領域において山積する難問を、人工知能と人間の協力により、早期に解決することが強く望まれている。人間と協力できる人工知能を作るために、協力を成立させる認知原理および数理原理を解明するとともに、システムの開発と評価により、これらの原理の応用展開の可能性を明らかにすることを目的とした研究プログラム『協力の理論』を開始した。数理原理として階層的均衡ダイナミクスを提案し、従来用いられていた理論(効用理論、ゲーム理論、マルチエージェント強化学習理論、再帰推論理論など)では解決できていない複数の重要課題に解を与えた。ソフトウェアプラットフォーム RoCoCo の開発を進めており、公開準備中である。

2. クラウド型 VR による身体的社会的インタラクション実験システムの構築

概要：人間とロボット間の社会的インタラクション実験を VR 空間内で効率的に実施する実験フィールドを構築した。これにより、実際のロボットを購入・メンテナンスするコストや、被験者を収集するコストを劇的に削減した。また音声対話・ジェスチャ指示・移動/把持行動など、身体的かつ社会的な行動を大規模に収集することで、データドリブンな行動分析が容易となった。特にコロナ禍の状況では実機を用いたインタラクション実験が困難であるが、このシステムを用いることで、研究者が集まることなく、任意の場所から研究開発を進めることが可能となった。

3. サービスロボットに必要な標準性能評価法の開発

概要：家庭用サービスロボットの実用化では多くの課題があるが、開発の観点からは要求仕様の多様性が大きな問題となっていると考える。本研究の成果を客観的に評価することを目的とし、NIST(アメリカ国立標準技術研究所)、トヨタ自動車と共同で介助犬の訓練法を参考に、サービスロボットに必要な標準性能評価法(STM)の開発を行った。開発した STM は World Robot Summit パートナーロボットチャレンジのルールとして採用され、プロジェクト終了後も国際的ロボット競技会の場で世界中の研究者が標準テストとして利用する。

< 代表的な論文 >

1. Joe Nishihara, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, "Online Algorithm for Robots to Learn Object Concepts and Language Model," IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, vol.9, No.3, pp.255-268, 2017.09

概要：本論文は、ロボットが言語知識と物体のマルチモーダル概念を同時に学ぶためのオンラインアルゴリズムを提案している。ロボットは、新しい物体が示されるたびに、教師なし単語セグメンテーションにより単語を学習し、単語シーケンスから言語モデルを学習する。また、これらの単語列とオブジェクトを観察することによって得られるマルチモーダル情報を結びつけることで、物体の概念を獲得する。このモデルで重要な視点は、単語と物体概念の相互依存性である。提案手法は、この関係に注目することで、正確な言語モデルと物体概念のオンライン同時学習を可能としている。

2. Junpei Zhong, Tetsuya Ogata, Angelo Cangelosi, Chenguang Yang, "Disentanglement in Conceptual

Space during Sensorimotor Interaction,” IET Cognitive Computation and Systems, October 2019.

概要：本研究は、これまでの言語動作変換を実際のロボットに応用するための枠組みとして、動的環境下における音声認識を深層学習モデルで統一的に扱う手法について検討した。特に近年中心となっている CNN Encoder から拡張した CTC-注意モデルを拡張した手法を用い、複数のデータで手法の優位性を確認した。今後は実ロボットでのインタラクション応用を検討していく。

3. Kazuki Miyazawa, Takato Horii, Tatsuya Aoki, Takayuki Nagai, “Integrated Cognitive Architecture for Robot Learning of Action and Language,” Frontiers in Robotics and AI, vol.6, 2019

概要：本論文では、概念・行動・言語を同時に学習するための統合認知フレームワークを提案している。これは、多層マルチモーダル潜在ディリクレ配分法 (mMLDA) を組み込んだマルチモーダルカテゴリゼーションによって実現される。そして、強化学習と mMLDA の統合により、環境の意味理解に基づく行動学習が可能となる。さらに mMLDA は、ベイジアン隠れマルコフモデル (BHMM) を用いた文法学習モデルと組み合わせることで言語学習を可能とし、ロボットが自身の行動を言葉で表現し、ユーザの発話を理解できるようになる。

§ 2. 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「概念班長井」グループ

研究代表者:長井 隆行 (大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)

研究項目

- ・ クラウド上に展開された階層ベイズによる概念の階層構造獲得モデルの創出

②「概念班谷口」グループ

主たる共同研究者:谷口 忠大 (立命館大学情報理工学部 教授)

研究項目

- ・ 空間・言語統合モデルの階層的知識獲得基盤創成

③「概念班尾形」グループ

主たる共同研究者:尾形 哲也 (早稲田大学理工学術院 教授)

研究項目

- ・ 深層学習モデルおよび再起結合型神経回路モデルによるロボットの運動感覚、言語の自己組織化・統合学習

④「信念班岩橋」グループ

主たる共同研究者:岩橋 直人 (岡山県立大学情報工学部 教授)

研究項目

- ・ クラウドを用いた階層的相互信念モデルの創出と利活用

⑤「信念班杉浦」グループ

主たる共同研究者:杉浦 孔明 (慶應義塾大学大学院理工学研究科 准教授)

研究項目

- ・ ヒト・モノ・コト知識の統合解析に基づく IoT コミュニケーション基盤の構築

⑥「応用班稲邑」グループ

主たる共同研究者:稲邑 哲也 (国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系 准教授)

研究項目

- ・ 概念獲得に向けた大規模長時間のマルチモーダル対話を可能とするクラウド型 VR プラットフォームの構築

⑦「応用班岡田」グループ

主たる共同研究者:岡田 浩之 (玉川大学工学部 教授)

研究項目

- ・ 人とのコラボレーションを通して家庭内タスクを実現するサービスロボットの構築およびロボカップ@ホーム競技に参加することによる成果の実践的評価

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国内研究者に関しては、本領域の山口チーム、金井チーム、長井志江チームと共同プロジェクトを推進するなど、着実にネットワークを広げている。また、ワークショップや OS を多数開催しており、本研究プロジェクトに関連するコミュニティが大幅に拡充している。中間報告後では、共生インタラクション領域の塩見チームと国際会議におけるワークショップを共同開催するなど、連携を深めている。

一方、国外研究者との連携も広がっている。ヨーロッパ、アジア、アフリカの研究者との11名での記号創発に関する国際共著論文が IEEE の当該分野の主たる雑誌に採択された。当該分野の中心的会議である IEEE ICDL-Epirob 2018 を誘致 (General Chair 尾形、Program Chair 谷口、Publication Chair 稲邑)、機械学習のロボット応用であるロボット学習に関するトップ会議 CoRL2019 を日本に誘致 (General Co-Chair 長井、Program Chair 杉浦、Local Chair 谷口、Sponsor Chair 岡田・稲邑) するなど、着実に国外研究者に向けてのビジビリティを高めており、世界から見た拠点に成長しつつある。国際ワークショップを数多く開催し、国際共著論文も数多く出版している。

こうした中で、特に認知ロボティクスの展開として、ミュンヘン工科大学の Gordon Cheng 教授、マンチェスター大学の Angelo Cangelosi 教授、イタリア工科大学の Giulio Sandini 教授、John Hopkins 大学の渡部准教授などとの共同研究がスタートしている。VR 空間におけるユーザと知能ロボットのインタラクション行動の収集プラットフォームの世界的共通基盤の構築と広報に努めており、Gordon Cheng 教授と共同研究を推進しつつ、毎年国際ワークショップを開催している。

また、企業との関係も本プロジェクトを契機に深まっている。長井は、パナソニック、TOYOTA、DNP との共同研究を推進し、中間報告後は川崎重工との共同研究を開始した。谷口はクロスアポイントメント契約により産業界内部に入り込み、全く新しい連携のスタイルを模索している。年十回を超える産業界向けの講演をこなすことで、一部有名企業のみならず草の根での連携づくりを行っている。これにより新たに受託研究や共同研究などを受け、CREST のプロジェクトのアウトリーチは確実に進展している。尾形は、日立、エクサウィザーズ、アバターインなどとの展開につなげつつある。岩橋は、岡山 IoT 推進ラボなど、岡山県産業振興財団の事業に対して、技術アドバイス、講演などを通して貢献している。杉浦は、大手自動車会社2社や大手電機メーカーを含む産業界との連携を積極的に推進している。国内の大学・研究機関へのソフトウェアライセンスを行っている。

さらに、本プロジェクトのもう一つの重要なネットワークは、競技会に関するものである。特に World Robot Summit は国内外から多くの研究チームが参加する。岡田が中心となって、参加者を中心としたコミュニティを作り、今後の連携を目指している。