

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

「神経科学の公理的計算論と工学の構成論の融合による  
人工意識の構築とその実生活空間への実装」

## 研究終了報告書

研究期間 2015年10月～2021年3月

研究代表者: 金井良太  
(株式会社アラヤ 代表取締役)

## § 1. 研究実施の概要

### (1) 実施概要

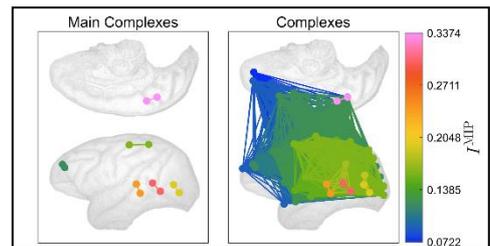
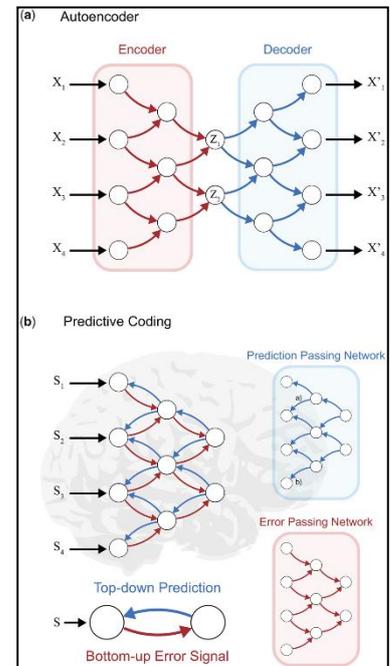
本 CREST プロジェクトでは、主に神経科学と情報理論において研究が進められてきた意識研究を、人工知能技術の応用研究と結びつけることで、次世代の人工知能技術の開発を目指してきた。この目標にむけて次の3つの目的の実現に向けて研究活動を行ってきた。

- 目的① 意識の機能原理を人工知能エージェントへ実装
- 目的② 人工知能エージェントの意識を測る計算理論を確立
- 目的③ 人間の行動を認識する人工知能エージェントの開発

**目的①**では、意識の機能的側面である自発的な行動を人工エージェントに持たせることを目的にした。神経科学における実験データから、生物学的観点から意識を機能的に示す内部モデルによる心的なシミュレーションを実行できる「意識の情報生成理論」を提案した。この理論では、脳内で意識を生成させているプロセスは、反実仮想的な状況も含めた情報の生成過程によって生じている(Kanai et al., 2019)。この仮説は、これまでの神経科学における意識研究の知見であるフィードバックの意識生成への重要性などを統合的に説明し、これまで十分に検討されてこなかった意識の持つ機能的意義に再び脚光をあてた。右図では、本理論の骨子である脳内におけるトップダウンの予測が情報生成に対応し、それが意識の生成に関わることを表す。さらに、本理論は、人工知能システムにも実装可能であり、好奇心等の内発的動機を実現するアーキテクチャとして、意識研究の知見を人工知能研究と結びつける役割を果たした。

**目的②**は、現在唯一人工知能システムについての意識の有無を判別する方法を理論的に提案している統合情報理論に基づき、意識の指標として統合された情報量 $\Phi$ の高速計算アルゴリズムを開発することであった。統合情報理論において、 $\Phi$ は計算量が指数関数的に増えてしまうため、大きなシステム(ノード数が10以上)において計算することは非常に困難であった。そのため、統合情報理論を実神経データや人工知能システムに適用することが実質的に不可能だと考えられていた。この問題に挑戦し、より高速で $\Phi$ の計算が可能となるアルゴリズムを開発した。劣モジュラ性という性質を仮定した上で Queyranne のアルゴリズムを用いることで $\Phi$ の計算に必要な Minimal Information Partition (MIP)の高速計算を実現した。このアルゴリズムにより、これまでは10程度のノード数のシステムの解析しかできなかったものが、100程度のノード数のシステムの解析が可能となった。さらに、MIP以上に計算が困難であると想定されていた「コンプレックス」という意識の座と考えられているネットワークを抽出することにも成功し、サルで計測された神経活動データを対象にコンプレックスの計算に成功した(右図)。これらのアルゴリズムは解析ツールとして、オープンソースとして公開して、神経データや人工知能システムの内部構造の分析に広く利用されることを期待している。

**目的③**は、人間の行動を認識する人工知能エージェントの開発を通して、人間の側が人工知能に意識があるという感覚を抱くようなシステムを開発することである。そのために、段階的な要素技術を川鍋グループと前川グループが分担して開発してきた。これらの成果において、前川グループの室内での人間の行動認識の技術が金井グループの意識機能の研究成果と結びつき、チーム全体での成果として PerCom2020にて発表した。具体的には、ロボットに搭載されたカメラで生活者の動画を撮影し、そこから抽出された骨格的特徴と視覚的特徴に基づいて、人物の活動を認識する課題において、移動ロボットの動きを深層強化学習で制御することで、移動ロボットの認識精度を最大化しつつ、移動に伴うエネルギー消費を最小限に抑えることを実現した。



## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. 統合情報理論の高速計算アルゴリズム開発とツール提供

概要:人工知能システムの中に意識が宿っているかを判定するための有力な理論として統合情報理論が挙げられるが、その理論における評価指標である $\Phi$ が膨大な計算を必要とするため適用が困難であった。この課題を克服するために、本理論における $\Phi$ とコンプレックスの計算ステップについて、高速計算アルゴリズムを開発した。この成果により、これまで10ユニット程度の小規模ネットワークにおいてしか計算ができなかった意識の指標が、数百ユニットのネットワークに適用可能となり、統合情報理論の検証にも、幅広いネットワーク分析にも利用可能なツールとして公開している。

### 2. 意識の機能と人工知能での実装に向けた新理論構築

概要:本プロジェクト開始時においては、トノーニ教授の統合情報理論とフリストン教授の自由エネルギー原理を理論的な支点として研究を計画していたが、意識の機能の観点から、本研究チームによりオリジナルの新理論を構築することができた。その代表が、意識の情報生成理論であるが、さらに情報閉包理論を提案し、自由エネルギー原理と意識の関係を見出す理論的成果を得るに至った。さらに、意識の機能が知能の汎用性とどのように関係しているのかについての仮説も提案し、意識研究と人工知能研究をさらに結びつける研究へと発展している。

### 3. 内発的動機による自律性と自発性のニューラルネットによる実装

概要:我々が提案した「情報生成理論」に基づき、人工知能が自律的に行動を起こす仕組みとして、内部モデルを利用することで内発的動機を実装することを目指してきた。内発的動機をエージェントと環境との間での「情報の流れ」という観点から、統一的に記述する方法を発見し、これまで知られていた好奇心とエンパワメントという2種類の内発的動機をひとつの人工知能エージェントに統一的に実装する方法を提案し、ニューラルネットによって実装することに成功した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. 移動ロボットによる人間の行動認識最適化の方策学習

概要:最終年度に向けてグループ間の連携を深めることを課題としてきたが、金井グループと前川グループでの共同研究の成果として、移動ロボットによって人の行動のモニタリングに深層強化学習を用いる手法を開発し、その研究成果が国際学会 PerCom2020 へ採択された。具体的には、ロボットに搭載されたカメラで生活者の動画を撮影し、そこから抽出された骨格的特徴と視覚的特徴に基づいて、人物の活動を認識する課題において、移動ロボットの動きを深層強化学習で制御することで、移動ロボットの認識精度を最大化しつつ、移動に伴うエネルギー消費を最小限に抑えることを実現した。現在の状態(位置)の質を評価する際に、(i)活動認識出力の信頼度を組み込むこと、(ii)後続の行動の値を推定する際にコストを組み込むこと、(iii)ロボットの移動空間を人を中心とした所定の半径を持つ円の外周に限定することで強化学習を加速させる効果的な行動空間を設計することで、早期の学習収束と高精度な活動認識を実現するための効果的な行動空間・状態空間設計を提案した。

### 2. 生活空間での認識システム及び質問応答システムの構築

概要:構成論的アプローチでは、人間を理解する人工知能システムの構築を目指しており、特に「日常生活での人間の行動の認識」に主眼をおいている。この研究において特に顕著な成果としては、川鍋グループの宮西が、前川グループとの共著でAAAIにて発表した、生活空間での人の行動をマルチセンサデータより自動で認識するシステムである。この研究では、身体の運動を加速度センサの信号から認識し、視野に存在する物体を一人称カメラより認識し、それにどの部屋にいるのかという場所情報を

同時に時系列データとして整理し、推定されている行動・物体・場所の情報より、センサ情報をヒトがいつ・どこで・何をしたというセマンティックな情報に変換することに成功した。さらに、ATRのスマートハウスで取得した日常行動イベントのデータベースを活用して、ユーザの日常生活に関する質問応答システムを構築した。この成果はIJCAI2018にて発表した。日常行動に関する質問への応答は、単語、集合、文、数、時間など様々なタイプがあるため、提案手法ではそのそれぞれに専用のデコーダを準備し、最も適切な回答を選択して出力する。加えて、より簡単なデコーダから優先的に学習していく self-paced learning を導入することにより質問応答の精度が上がることを示した。本研究で構築した質問応答システムは、日常生活での利用を見据えたもので実用への波及効果が期待される。

### 3. センサ技術を用いたコンテキスト認識システム構築

概要：上記成果と同様に、生活空間において人間を理解する人工知能システムを構築するため、前川グループではセンサ技術とパターン認識技術を用いて生活空間でのコンテキスト認識技術を開発している。この研究における特に顕著な成果としては、前川グループが Ubicomp にて発表した、ロボットやヒトが位置している場所の意味的な情報の推定を行う技術である。例えば、音声によるインパルス応答や多種センサの組み合わせにより、オフィスやトイレなどの場所の意味的なラベルを推定することに成功した。この成果に加え、ウェアラブルマルチモーダルデバイスによる行動認識技術を Ubicomp にて、Wi-Fi 電波を用いた屋内オブジェクトの状態推定技術を Ubicomp にて、Wi-Fi 搭載デバイス間の物理的距離を推定する手法を Ubicomp にて、プライバシーに考慮した非拘束な屋内位置推定手法を PerCom2020 にて発表している。

#### <代表的な論文>

1. Ryota Kanai, Acer Chang, Yen Yu, Ildelfons Magrans de Abril, Martin Biehl, & Nicholas Guttenberg. “Information Generation as a Functional Basis of Consciousness,” *Neuroscience of Consciousness*, vol. 2019, Issue, 1, niz016, 2019.

概要：本研究では、意識の情報基盤に関する理論として、研究代表者である金井グループにより世界で初となる新理論の提唱を行った。この「意識の情報生成理論」では、脳内で意識を生成させているプロセスは、データの圧縮による特徴量検出ではなく、生成モデルに基づいて、反実仮想的な状況も含めて内部的に生成するプロセスによって生じているという仮説を提案している。この仮説は、これまでの神経科学における意識研究の知見であるフィードバックの意識生成への重要性などを統合的に説明し、これまで十分に検討されてこなかった意識の持つ機能的意義に再び脚光をあてた。

2. Teerawat Kumrai, Joseph Korpela, Takuya Maekawa, Yen Yu, and Ryota Kanai, “Human Activity Recognition with Deep Reinforcement Learning using the Camera of a Mobile Robot,” *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2020)*, pp. 125-134, 2020.

概要：人間の行動を認識する人工知能エージェントの開発を通して、人間の側が人工知能に意識があるという感覚を抱くようなシステムの開発を目指してきた。この目標に向けて、金井グループの深層強化学習の技術と、前川グループの室内での人間の行動認識の技術を統合して実現した。ロボットに搭載されたカメラで生活者の動画を撮影し、そこから抽出された骨格的特徴と視覚的特徴に基づいて、人物の活動を認識する課題において、移動ロボットの動きを深層強化学習で制御することで、移動ロボットの認識精度を最大化しつつ、移動に伴うエネルギー消費を最小限に抑えることを実現した。

3. Taiki Miyanishi, Jun-ichiro Hirayama, Atsunori Kanemura, Motoaki Kawanabe, "Answering Mixed Type Questions about Daily Living Episodes," Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-18), pp.4265-4271, 2018.

概要: ATR のスマートハウスで取得した日常行動イベントのデータベースを活用して、ユーザの日常生活に関する質問応答システムを構築した。日常行動に関する質問への応答は、単語、集合、文、数、時間など様々なタイプがあるため、提案手法ではそのそれぞれに専用のデコーダを準備し、最も適切な回答を選択して出力する。加えて、より簡単なデコーダから優先的に学習していく self-paced learning を導入することにより質問応答の精度が上がることを示した。本研究で構築した質問応答システムは、日常生活での利用を見据えたもので実用への波及効果が期待される。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 金井グループ

研究代表者: 金井 良太 ((株)アラヤ 代表取締役)

研究項目

- ・ 統合情報理論の高速計算アルゴリズムの開発
- ・ 実神経データにおける統合情報量  $\Phi$  の計算
- ・ 内発的動機を持つエージェントの構築
- ・ 意識の情報理論の構築

#### ② 川鍋グループ

主たる共同研究者: 川鍋 一晃 ((株)国際電気通信基礎技術研究所 主幹研究員)

研究項目

- ・ コンテキスト依存の眼球運動計測のための実験
- ・ 日常環境実験データに対する行動・物体・位置のラベル付与
- ・ 自己位置推定・障害物回避機能を備えたモバイルロボットを製作

#### ③ 前川グループ

主たる共同研究者: 前川 卓也 (大阪大学大学院 情報科学研究科、准教授)

研究項目

- ・ Kinect および人が携帯するスマートフォンを用いた行動認識手法の開発
- ・ 屋内位置推定手法を開発
- ・ インパルス応答や磁気センサを用いた屋内位置のセマンティクスを推定する手法を開発

### (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

① 共同研究者: 長井 隆行 (大阪大学基礎工学研究科 教授)

研究項目

- ・ マルチモーダルな情報表現獲得メカニズムに関する研究

② 共同研究者: 大泉 匡史 (東京大学総合文化研究科 准教授)

研究項目

- ・ 統合情報理論の計算アルゴリズム開発と応用

③ 共同研究者: 山田 真希子 (量子科学技術研究開発機構 チームリーダー)

研究項目

・好奇心に関する神経機構の解明

④共同研究者:Rufin VanRullen (フランス CNRS)

研究項目

・グローバルワークスペースの AI 実装

⑤共同研究者:Kristian Sandberg (デンマーク Aarhus University 准教授)

研究項目

・意識に関する大規模脳イメージングネットワーク Skuldnet の構築