

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和3年度事後評価用〕

令和3年6月30日現在

機関番号：38005 領域設定期間：平成28年度～令和2年度 領域番号：4805 研究領域名（和文）人工知能と脳科学の対照と融合 研究領域名（英文）Correspondence and Fusion of Artificial Intelligence and Brain Science 領域代表者 銅谷 賢治（DOYA Kenji） 沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授 研究者番号：80188846 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,110,200,000円

研究成果の概要

本領域は、それぞれの研究の高度化のなかで乖離して行った人工知能研究と脳科学研究を再び結びつけ、両者の最新の知見の学び合いから新たな研究ターゲットを探り、そこから新たな学習アルゴリズムの開発や脳機構の解明を導くことを目標に5年間の研究を展開した。

人工知能技術や計算理論により脳機能を解明するという「AIから脳」の方向と、脳科学の知見を次世代の人工知能の設計開発に活かす「脳からAI」という方向の研究に加え、さらに「AI脳融合」の新たな研究コミュニティの形成と人材育成という3つのテーマそれぞれにおいて、研究者間の議論、連携を進め、新たな進展をもたらした。

研究分野：人工知能、脳科学

キーワード：機械学習、深層学習、強化学習、確率的生成モデル、大脳皮質、大脳基底核

1. 研究開始当初の背景

これまで人工知能研究と脳研究は、「電子回路で知能を実現するには脳での実現法にこだわる必要はない」という視点と、「脳のような高度な知能の実現例があるのだから、それに学ばない手はない」という視点から、接近と乖離を繰り返してきた。1980年代後半からの「コネクショニズム」の時代には、人工神経回路網の様々な工学応用が試みられたが、そこから芽生えた機械学習理論は、カーネル法やベイジアンネットといった形で、脳での実現とは離れた形で高度化して行った。しかし近年のディープラーニングの成果は再び両者の接近を促している。

2. 研究の目的

本領域の目的は、それぞれの研究の高度化のなかで乖離して行った人工知能研究と脳科学研究を再び結びつけ、両者の最新の知見の学び合いから新たな研究ターゲットを探り、そこから新たな学習アルゴリズムの開発や脳機構の解明を導くことである。身体や環境、他者の特性を捉える表現学習、予測モデル学習や強化学習などが、人工知能システムではどうすればより確実に効率よく行えるか、ヒトや動物の脳ではいかに実現されているのかを包括的なテーマとして、両分野で先端的な研究を行う研究者を集め、互いの知見を対照しあう中から、人工知能と脳科学の新たな展開をめざし研究を推進した。

3. 研究の方法

A01:知覚と予測、A02:運動と行動、A03:認知と社会性の研究項目を設定し、人工知能と脳科学の先端的な研究者の緊密な議論のもと、それぞれの専門分野の枠を超えた新たな問題設定とその解決に向けた共同作業を進めた。

総括班には以下の委員会を設定し研究活動を推進した。

- 1) 企画実行委員会：年に2～3度の領域会議を開催し、計画研究、公募研究のメンバー間の知識共有をはかり、共同研究を推進した。
- 2) 育成支援委員会：人工知能と脳科学それぞれの先端的な知見とその融合研究を学ぶためのサマースクールを開催した。
- 3) 広報連携委員会：領域の研究活動と成果を幅広く広報するため、webサイトの運営とニューズレターの発行を行った。

国際活動支援班は、総括班と連携し、海外拠点との合同ワークショップの開催、海外先進ラボとの間の研究者の派遣／招聘、最終年の国際シンポジウムの開催を企画実行した。

4. 研究の成果

AI から脳：人工知能技術や計算理論による脳機能の新たな理解

大脳皮質の神経回路機構を動的ベイズ推定の観点から明らかにすることをめざし、新たな理論モデルの提案を行い(Doya, *Curr. Opin. Beh. Sci.* 2021)、その検証のための実験パラダイムを開発した。データ取得と解析はコロナ禍による遅れがあったが、繰越により2021年度中に完了する予定である。

セロトニンの光遺伝学操作データのモデル解析により、セロトニンが報酬予測の事前確率を制御する(Miyazaki et al. *Nature Communications* 2018, *Science Advances* 2020)、モデルフリーとモデルベースの意思決定のバランスを制御する(Ohmura et al. *Current Biology* 2021)といった新たな発見が得られ、そこからセロトニンの新たな包括的な理論を提案した(Doya et al. *Curr. Opin. Beh. Sci.* 2021)。

これらをはじめ、人工知能の理論やアルゴリズムを生かした脳研究は、両分野の研究者の協働のもと脳機能の新たな理解をもたらした。

脳から AI：脳科学の知見を次世代の人工知能の設計開発に活かす

ヒトや動物の脳の階層並列学習制御機構からのインスピレーションをもとに、階層ロボット制御(Ishihara et al. *IEEE RAL* 2019)、並列強化学習(Wang et al. *Neural Networks* 2021)、逆強化学習(Uchibe, *Neural Processing Letters* 2017; Matsushima et al. *Front. Robotics and AI* 2020)などの開発を進めた。

さらに脳全体を多様な確率生成モデルのネットワークとして捉えて、それを汎用的な人工知能の設計原理とするという構想を打ち出し、それを実装するためのツール Neuro-SERKET を開発、公開した(Taniguchi et al. *New Generation Computing* 2020)。また、ニューロンの樹状突起と細胞体間の信号伝達の数理解析から、単一細胞での時空間パターン学習や、相互抑制回路での独立成分分析など、エネルギー効率の良いデバイス開発につながる信号処理方式を開発した(Asabuki, Fukai, *Nature Communications* 2020)。

これらを含め、ヒトの行動、脳回路、神経細胞のそれぞれのレベルで、脳にならった新たな人工知能にむけた研究成果が得られた。

AI 脳融合：AI と脳科学を融合した研究コミュニティの形成と人材育成

AI と脳科学の融合をテーマとして、Gatsby Joint Workshop、神経科学大会シンポジウム、神経回路学会シンポジウム、脳と心のメカニズムワークショップなど多数のシンポジウムやワークショップを継続的に主催、共催し、融合領域の研究への関心を喚起した。また2017年、2019年には「人工知能と脳科学の対照と融合」サマースクールを主催し、また東大 IRCN とチュートリアルコースを共催するなど、若手の育成にも力を入れた。

2020年10月に開催した **International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science** は両分野の先端を走る研究者を講師に迎え、オンラインながら参加登録者が1,800名以上にのぼる反響を呼び、その成果による *Neural Networks* 誌の特集号には50件以上の論文が投稿され編集作業が進んでいる。

その後領域代表者は ICRL2021 Brain to AI Workshop, NeurIPS 2021 Deep RL Workshop 等にスピーカーとして招待されるなど、AI と脳の融合研究の国際的リーダーとして認知されている。2022年神経科学／神経回路大会では、このコミュニティにより第2回の Artificial Intelligence and Brain Science シンポジウムを準備中である。

このように当領域は、AI と脳科学の融合研究の国際的ネットワークの確立と人材育成に大きく貢献した。



5. 主な発表論文等（受賞等を含む）

<雑誌論文および国際会議論文(査読あり)>

- A01-1 松尾豊：ディープラーニングと記号処理の融合による予測性の向上に関する研究
*Furuta H, Matsushima T, Kozuno T, Matsuo Y, Levine S, Nachum O, Shane Gu S (2021) Policy information capacity: Information-theoretic measure for task complexity in deep reinforcement learning. International Conference on Machine Learning (**ICML 2021**).
- *Matsushima T, Kondo N, Iwasawa Y, Nasuno K, Matsuo Y (2020) Modeling task uncertainty for safe meta-imitation learning. **Frontiers in Robotics and AI**, 7, 189.
- A01-2 銅谷賢治：多階層表現学習の数理基盤と神経機構の解明（#研究代表者指導学生）
*Doya K (2021) Canonical cortical circuits and the duality of Bayesian inference and optimal control. **Current Opinion in Behavioral Sciences**, in press.
- *Miyazaki K, Miyazaki KW, Sivori G, Yamanaka A, Tanaka KF, Doya K (2020) Serotonergic projections to the orbitofrontal and medial prefrontal cortices differentially modulate waiting for future rewards. **Science Advances**, 6, eabc7246.
- *Doya K, Taniguchi T (2019) Toward evolutionary and developmental intelligence. **Current Opinion in Behavioral Sciences**, 29, 91-96.
- *Miyazaki K, Miyazaki KW, Yamanaka A, Tokuda T, Tanaka F, Doya K (2018) Reward probability and timing uncertainty alter the effect of dorsal raphe serotonin neurons on patience. **Nature Communications**, 9, 2048.
- A01-3 田中啓治：コンフリクトコストに対する調和・不調和情報シーケンス効果の神経基盤の研究
*Li N, Wang Y, Jing F, Zha R, Wei Z, Yang LZ, Geng X, Tanaka K, *Zhang X (2021) A role of the lateral prefrontal cortex in the congruency sequence effect revealed by transcranial direct current stimulation. **Psychophysiology** 58, 5, e13784.
- A01 知覚と予測 公募研究
*Ohmura Y, Iwami K, Chowdhury S, Sasamori H, Sugiura C, Boučekioua Y, Nishitani N, Yamanaka A, Yoshioka M (2021) Disruption of model-based decision making by silencing of serotonin neurons in the dorsal raphe nucleus. **Current Biology**, 31, 1-9.
- Asabuki T, *Fukai T (2020) Somatodendritic consistency check for temporal feature segmentation. **Nature Communications**, 11, 1554.
- A02-1 森本淳：自己と他者の動作データからの内部モデルの構築と行動則の獲得
Maeda G, Koc O, *Morimoto J (2020) Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control. **Neural Networks** 129, 109-122.
- *Ishihara K, Itoh TD, Morimoto J (2019) Full-body optimal control toward versatile and agile behaviors in a humanoid robot. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 5, 1, 119-126.
- *Morimoto J (2017) Soft humanoid motor learning. **Science Robotics** 2, 13, eaaq0989.
- A02-2 五味裕章：潜在的運動における学習適応メカニズムの解明と計算モデル構築の研究
Ito S, *Gomi H (2019) Visually-updated hand state estimates modulate the proprioceptive reflex independently of motor task requirements. **eLife**, 9.
- Ueda H, Abekawa N, Ito S, *Gomi H (2019) Distinct temporal developments of visual motion and position representations for multi-stream visuomotor coordination. **Scientific Reports** 9.
- A02-3 松本正幸：報酬と注意の情報処理に関与するドーパミン神経回路機構
Yun M, Kawai T, Nejime M, Yamada H, *Matsumoto M (2020) Signal dynamics of midbrain dopamine neurons during economic decision-making in monkeys. **Science Advances**, 6, eaba4962.
- Ogasawara T, Nejime M, *Takada M, *Matsumoto M (2018) Primate nigrostriatal dopamine system regulates saccadic response inhibition. **Neuron**, 100, 1513-1526.
- A02-4 足田貴俊：報酬/目的指向行動の神経回路機構
*Hikida T, Yao S, Macpherson T, Fukakusa A, Morita M, Kimura H, Hirai K, Ando T, Toyoshiba H, Sawa A. (2020) Nucleus accumbens pathways control cell-specific gene expression in the medial prefrontal cortex. **Scientific Reports**, 10, 1, 1838.
- Macpherson T, *Hikida T (2019) The role of basal ganglia neurocircuitry in the pathology of psychiatric disorders. **Psychiatry and Clinical Neurosciences**, 73, 6, 289-301.
- A02 運動と行動 公募研究
*Wang J, Elfving S, Uchibe E (2021) Modular deep reinforcement learning from reward and punishment for robot navigation. **Neural Networks**, 135, 115-126.
- A03-1 谷口忠大：感覚運動と言語をつなぐ二重分節解析の脳内計算過程の理解と応用
*Taniguchi A, Hagiwara Y, Taniguchi T, Inamura T (2020) Spatial concept-based navigation with human speech instructions via probabilistic inference on Bayesian generative model. **Advanced Robotics**, 34, 19, 1213-1228.
- *Taniguchi T, Nakamura T, Suzuki M, Kuniyasu R, Hayashi K, Taniguchi A, Horii T, Nagai T (2020) Neuro-SERKET: development of integrative cognitive system through the composition of deep probabilistic generative models. **New Generation Computing**, 84, 23-48.
- A03-2 中原裕之：脳内他者を生かす意思決定の脳計算プリミティブの解明
Fukuda H, Ma N, Suzuki S, Harasawa N, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, Haruno M, Cheng K, *Nakahara

H (2019) Computing social value conversion in the human brain. **Journal of Neuroscience**, 39, 26, 5153-5172.

*Sugiyama M, Tsuda K, Nakahara H (2020) Sample space truncation on Boltzmann machines. **NeurIPS 2020 Workshop: Deep Learning through Information Geometry**

A03-3 坂上雅道：前頭前野における情報の抽象化と演繹的創生の神経メカニズムの研究

*Tanaka S, O'Doherty JP, Sakagami M (2019). The cost of obtaining rewards enhances the reward prediction error signal of midbrain dopamine neurons. **Nature Communications**, 10, 3674.

*Lak A, Nomoto K, Keramati M, Sakagami M, Kepecs A (2017). Midbrain dopamine neurons signal belief in choice accuracy during a perceptual decision. **Current Biology**, 10.1016/j.cub.2017.02.026.

A03-4 高橋英彦：精神疾患における思考の障害の神経基盤の解明と支援法の開発

Yoshihara Y, ..., *Takahashi H. (2020) Overlapping but asymmetrical relationships between schizophrenia and autism revealed by brain connectivity. **Schizophrenia Bulletin**, 46, 1210-8.

Tei S, Kauppi JP, Jankowski KF, Fujino J, Monti RP, Tohka J, Abe N, Murai T, *Takahashi H, Hari R. (2020) Brain and behavioral alterations in subjects with social anxiety dominated by empathic embarrassment. **Proc Natl Acad Sci U S A**, 117, 4385-4391.

A03 認知と社会性 公募研究

Idei H, Murata S, Yamashita Y*, Ogata T* (2021) Paradoxical sensory reactivity induced by functional disconnection in a robot model of neurodevelopmental disorder. **Neural Networks**, 138, 150-163.

<招待講演>

Doya K (2020) What can we further learn from the brain for AI. **Neuroscience 2020**. (Special Lecture)

Morimoto J (2019) Motor learning algorithms. **Skolkovo Robotics 2019**. (Keynote)

Taniguchi T (2020) Symbol emergence in robotics: Integrative probabilistic generative models for developmental human-robot communication in the real-world environment. **IEEE Ubiquitous Robots 2020**. (Keynote)

Takahashi H (2019) Neuroimaging of gambling disorder. **International Behavioral Addiction Forum**. (Keynote)

Doya K (2018) Neural circuit for mental simulation. **Computational and Systems Neuroscience 2019**. (Plenary)

<受賞>

Doya K: Outstanding Achievement Award, Asia-Pacific Neural Network Society, 2019.

銅谷賢治：日本神経回路学会 学術賞, 2019

高橋英彦：日本アルコール・アディクション医学会 柳田知司賞, 2019.

Doya K: Donald O. Hebb award, International Neural Network Society, 2018

鈴木真介：科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞, 2017.

松本正幸：日本学術振興会賞, 2016.

五味裕章：電子情報通信学会 フェロー, 2016.

ホームページ等

新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」: <http://www.brain-ai.jp/jp/>

International Symposium on AI and Brain Science. <http://www.brain-ai.jp/symposium2020/>