

領域略称名:人工知能と脳科学  
領域番号:4805

令和3年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究(研究領域提案型)」  
に係る研究成果報告書(研究領域)兼  
事後評価報告書

「人工知能と脳科学の対照と融合」

領域設定期間

平成28年度～令和2年度

令和3年6月

領域代表者 沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授・銅谷賢治

## 目 次

### **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	4

### **研究領域全体に係る事項**

3 交付決定額	8
4 研究領域の目的及び概要	9
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6 研究目的の達成度及び主な成果	12
7 研究発表の状況	17
8 研究組織の連携体制	22
9 研究費の使用状況	23
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

**研究組織**

(令和3年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	16H06561 人工知能と脳科学の融合研究 の推進	平成28年度 ～ 令和2年度	銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大 学・神経計算ユニット・ 教授	4
Y00 国	16K21738 人工知能と脳科学の融合研究 の国際ネットワーク形成	平成28年度 ～ 令和2年度	銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大 学・神経計算ユニット・ 教授	5
A01 計	16H06562 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	平成28年度 ～ 令和2年度	松尾 豊	東京大学・大学院工学系 研究科(工学部)・教授	2
A01 計	16H06563 多階層表現学習の数理基盤と 神経機構の解明	平成28年度 ～ 令和2年度	銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大 学・神経計算ユニット・ 教授	1
A01 計	16H06564 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	平成28年度 ～ 令和2年度	田中 啓治 程 康 (H28.12 交替)	国立研究開発法人理化学 研究所・脳科学総合研究 センター・シニアチーム リーダー (国立研究開発法人理化学 研究所・脳科学総合研 究センター・副チームリ ーダー)	1
A02 計	16H06565 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	平成28年度 ～ 令和2年度	森本 淳	株式会社国際電気通信基 礎技術研究所(ATR)・脳 情報通信総合研究所・研 究室長	1
A02 計	16H06566 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	平成28年度 ～ 令和2年度	五味 裕章	日本電信電話株式会社 NTTコミュニケーション 科学基礎研究所・人間情 報研究部・上席特別研究 員	2
A02 計	16H06567 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	平成28年度 ～ 令和2年度	松本 正幸	筑波大学・医学医療系・ 教授	1
A02 計	16H06568 報酬/目的指向行動の神経回 路機構	平成28年度 ～ 令和2年度	疋田 貴俊	大阪大学・蛋白質研究所 高次脳機能学研究室・教 授	3

A03 計	16H06569 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	平成 28 年度 ～ 令和 2 年度	谷口 忠大	立命館大学・情報理工学 部・教授	5
A03 計	16H06570 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	平成 28 年度 ～ 令和 2 年度	中原 裕之	国立研究開発法人理化学 研究所・脳科学総合研究 センター・チームリーダー	1
A03 計	16H06571 前頭前野における情報の抽象 化と演繹的情報創生の神経メ カニズムの研究	平成 28 年度 ～ 令和 2 年度	坂上 雅道	玉川大学・脳科学研究 所・教授	1
A03 計	16H06572 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	平成 28 年度 ～ 令和 2 年度	高橋 英彦	東京医科歯科大学・大学 院医歯学総合研究科・教 授	1
総括班・総括班以外の計画研究 計 13 件 (廃止を含む)					

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)



## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	17H06024 生成系の深層学習を用いた空間／音の認知に関する研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	池上 高志	東京大学・大学院総合文化研究科・教授	1
A01 公	17H06026 単機能の重ね合せにより新機能を創発するマルチファンクショナル深層学習ネットワーク	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	柳井 啓司	電気通信大学・大学院情報理工研究科・教授	1
A01 公	17H06028 神経信号からネットワーク構造を推定し、そこに発現する活動パターンを予測する	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	篠本 滋	京都大学・理学研究科・准教授	1
A01 公	17H06029 神経活動と分子活性が織り成す学習規則の可視化	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	濱口 航介	京都大学・医学研究科・講師	1
A01 公	17H06032 皮質脳波ビッグデータによる革新的人工知能の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	柳澤 琢史	大阪大学・国際医工情報センター・寄附研究部門講師	1
A01 公	17H06033 人工知能と神経基盤の相互参照アプローチによる視覚一価値変換機構の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	近添 淳一	生理学研究所・脳機能計測・支援センター・准教授	1
A01 公	17H06036 大脳皮質局所回路に学ぶ新しいアーキテクチャと学習モデルの構築	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	深井 朋樹	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー	1
A01 公	17H06037 Using Recurrent Neural Networks to Study Neural Computations in Cortical Networks	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	アンドレア ベヌッチ	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー	1
A01 公	17H06041 積層独立成分分析の深化と脳科学応用	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	平山 淳一郎	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員	1
A01 公	17H06027 前頭前野活動の網羅的計測と情報表現解読法の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	宇賀 貴紀	山梨大学・大学院総合研究部・教授	1
A01 公	17H06034 予測の神経基盤：全脳皮質脳波における時空間構造	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	小松 三佐子	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・研究員	1

A02 公	17H06023 感覚予測と報酬予測に基づく 運動学習の計算理論的理解と 脳内基盤の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	井澤 淳	筑波大学・システム情報 系・准教授	1
A02 公	17H06030 行動選択の回路モデル構築の ための前頭前野—大脳基底 核・小脳連関の構築様式の解 明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	井上 謙一	京都大学・霊長類研究 所・助教	1
A02 公	17H06042 並列深層強化学習	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	内部 英治	株式会社国際電気通信基 礎技術研究所 (ATR)・脳 情報通信総合研究所・主 幹研究員	1
A03 公	17H06022 構造学習の脳計算モデル：脳 イメージング実験と大規模W E B 調査による検証	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	鈴木 真介	東北大学・学際科学フロ ンティア研究所・助教	1
A03 公	17H06031 予測符合化モデルと、自律推 論する脳機構との照合	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	小村 豊	京都大学・こころの未来 研究センター・教授	1
A03 公	17H06039 深層学習を用いた精神疾患の 計算論的検査・評価法の開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	山下 祐一	国立研究開発法人国立精 神・神経医療研究センタ ー・神経研究所・疾病研 究第七部室長	1
A03 公	17H06040 分節構造推定による自閉症モ デル霊長類の家族行動解析	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	三村 喬生	国立研究開発法人量子科 学技術研究開発機構・放 射線医学総合研究所 脳 機能イメージング研究 部・研究員	1
A01 公	19H04976 セロトニン神経系の光操作・観 察によるモデルベース的意思 決定の脳内機構解明	令和元年度 ～ 令和 2 年度	大村 優	北海道大学・大学院医学 研究院・講師	1
A01 公	19H04979 自己シミュレーションとホメ オスタシスを基底とする脳の モデル研究	令和元年度 ～ 令和 2 年度	池上 高志	東京大学・大学院総合文 化研究科・教授	1
A01 公	19H04982 視覚心理に基づくテクスチャ 特徴表現と深層特徴表現のマ ッピング	令和元年度 ～ 令和 2 年度	庄野 逸	電気通信大学・大学院情 報理工学研究科・教授	1
A01 公	19H04983 意思決定過程と内部モデルの 相互作用	令和元年度 ～ 令和 2 年度	濱口 航介	京都大学・医学研究科・ 講師	1

A01 公	19H04986 超大規模電気生理学を用いた睡眠中のオフライン学習アルゴリズムの解析	令和元年度 ～ 令和2年度	宮脇 寛行	大阪市立大学・大学院医学研究科 神経生理学教室・助教	1
A01 公	19H04988 多次元の状態・行動空間における意思決定と大脳基底核の情報表現	令和元年度 ～ 令和2年度	鮫島 和行	玉川大学・脳科学研究所・教授	1
A01 公	19H04993 予測の神経基盤：広域皮質脳波における時空間構造	令和元年度 ～ 令和2年度	小松 三佐子	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・研究員	1
A01 公	19H04994 樹状突起計算を統合する新しい回路学習パラダイムの創出	令和元年度 ～ 令和2年度	深井 朋樹	沖縄科学技術大学院大学・神経情報・脳計算ユニット・教授	1
A01 公	19H04995 Learning Perceptual Representations in Biological and Artificial Neural Networks	令和元年度 ～ 令和2年度	ベヌッチ アン ドレア	国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー	1
A01 公	19H04999 高次視覚野の計算理論に基づくワンショット学習モデル	令和元年度 ～ 令和2年度	細谷 晴夫	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)・脳情報通信総合研究所・主任研究員	1
A01 公	19H05000 非線形ダイナミカル表現学習法の開発による脳の理解と予測	令和元年度 ～ 令和2年度	森岡 博史	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・特別研究員	1
A02 公	19H04977 感覚予測と報酬予測を統合するメタ学習機構：計算論的理解と脳内基盤の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	井澤 淳	筑波大学・システム情報系・准教授	1
A02 公	19H04980 ニューラルネットワークによる神経ネットワークの動作原理の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	飯野 雄一	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授	1
A02 公	19H04984 霊長類の前頭前野を巡る「行動選択」神経ネットワークの構築様式	令和元年度 ～ 令和2年度	井上 謙一	京都大学・霊長類研究所・助教	1

A02 公	19H04985 刺激弁別の学習フェーズにおける線条体細胞タイプ特異的な神経活動の可視化	令和元年度 ～ 令和2年度	小林 和人	福島県立医科大学・医学部・教授	1
A02 公	19H04987 行動選択におけるドーパミン神経回路の並列情報処理機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	松本 英之	大阪市立大学・大学院医学研究科・助教	1
A02 公	19H05001 モデルフリーとモデルベースの協同による深層並列強化学習	令和元年度 ～ 令和2年度	内部 英治	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)・脳情報通信総合研究所・主幹研究員	1
A03 公	19H04990 自然言語処理と神経生理計測を融合した言語の神経計算モデルの構築と検証	令和元年度 ～ 令和2年度	大関 洋平	東京大学・大学院総合文化研究科・講師	1
A03 公	19H04996 社会的身体表現による個体間相互作用の生成モデル開発	令和元年度 ～ 令和2年度	三村 喬生	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 脳機能イメージング研究部・研究員	1
A03 公	19H04998 深層学習を用いた安静時機能的MRIからの汎用特徴量抽出	令和元年度 ～ 令和2年度	山下 祐一	国立研究開発法人国立精神・神経医療研究センター、神経研究所 疾病研究第七部、室長	1
公募研究 計 42 件 (廃止を含む)					

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 28 年度	229,970,000 円	176,900,000 円	53,070,000 円
平成 29 年度	300,560,000 円	231,200,000 円	69,360,000 円
平成 30 年度	300,040,000 円	230,800,000 円	69,240,000 円
令和元年度	306,280,000 円	235,600,000 円	70,680,000 円
令和 2 年度	306,410,000 円	235,700,000 円	70,710,000 円
合計	1,443,260,000 円	1,110,200,000 円	333,060,000 円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

### 1) 研究の学術的背景

近年、インターネットを中心としたいわゆるビッグデータと計算機技術の進歩により、機械学習による人工知能が様々な分野で実用化され、より幅広い分野への適用の期待が高まっている。特に2012年以降、画像認識において、ディープラーニングと呼ばれる脳の視覚野の階層的な処理機構を起源とする学習方式が非常に高い性能を示すことが明らかになり、脳にならった学習方式の可能性に新たな注目が集まっている。

一方脳科学においても、機械学習の一種である強化学習のアルゴリズムがいかに脳で実現されているかという問いから、報酬の予測誤差をドーパミンニューロンが表現する、行動の選択肢の価値を線条体ニューロンが学習するなどの画期的な知見が得られている。またイメージングなどによる大量の実験データを解析する上でも、機械学習アルゴリズムの活用は必須のものとなりつつある。

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。

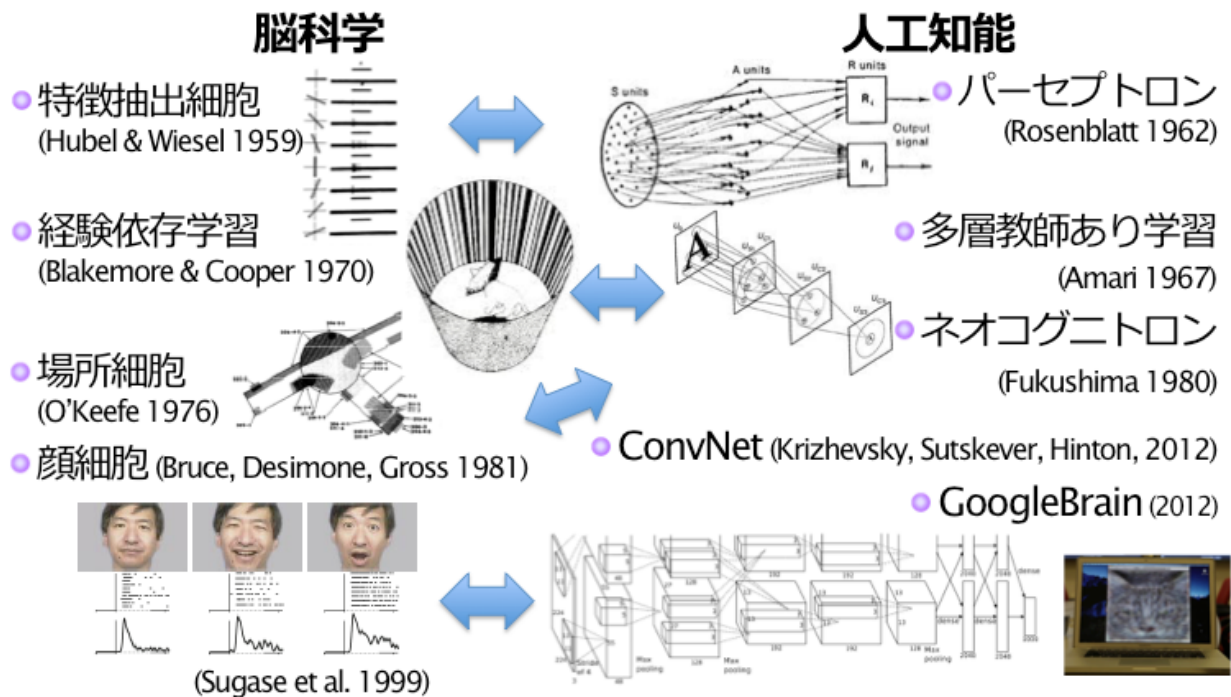


図1: 脳科学と人工知能の共進化

### 2) 研究目的と全体構想

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、人工知能研究と脳科学の新たな展開をめざす。

#### ＜どのような革新的・創造的な学術研究の発展が期待されるのか＞

「脳に学んだ情報処理」や「計算理論に基づく脳研究」という発想のもと、これまでも多くの展開があった。本領域ではその可能性をより系統的に探索し、異分野の知見と手法の融合により急速な展開が可能な研究の推進とともに、長期的には全脳レベルでの学習アーキテクチャーの解明と、そのための学術基盤の形成と人材育成を進め、国際活動支援班も活用し、新たな研究パラダイムを日本から世界に発信することをめざす。

具体的には以下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る。

### **A01: 知覚と予測**

今日パターン認識において高い性能を収めているディープラーニングが、なぜ、どのような条件のもとで働いているかを情報理論的に明らかにするとともに、ディープラーニングにより得られた各層での情報表現をもとに、脳の各領域のニューロンの情報表現の理解をはかる。

大脳感覚皮質の神経回路は階層的なベイズ推定を実現するという仮説を、階層ベイズ推定の様々なアルゴリズムとの対照により検証する。

### **A02: 運動と行動**

今日のロボット技術は進歩したとはいえ、人型ロボットの運動性能は3歳の子供にも劣るレベルであり、そこには何が欠けているのか、脳の運動学習機構との対照により明らかにする。特に、多自由度系で限られたデータから必要十分な内部モデルを学習する脳の仕組みの解明と、それに基づく人型ロボットの学習制御を実現する。

脳の感覚野の学習は外界からの情報に依存した教師なし学習として理解できるのに対して、運動野の学習は自発的に行う運動に必要な情報表現を創生する必要がある、その原理は未だ明らかでない。また、大脳基底核には直接路と間接路の2つの主要な回路があり、その学習を制御するドーパミンにも複数のタイプがあるが、その計算論的な意味は明らかでない。これらについて、学習の理論と脳データを付き合わせることで新たな理解をはかる。

### **A03: 認知と社会性**

人間の認知機能はアナログ的な感覚運動情報をカテゴリ化、分節化することで実現されていると考えられるが、それを実現する理論モデルである二重分節解析に着目し、その脳での実現の可能性を探るとともに、人型ロボットでの見まね学習や意図の推定に適用をはかる。

人間の知的行動、特に社会行動では「脳内シミュレーション」や「心の理論」などが重要な役割を果たしており、その脳内局在はfMRI実験などにより解明が進んでいるが、その神経回路レベルでの表現や学習原理を解明し、統合失調症や自閉症などの疾患の理解と、より自然な人型ロボットや知的エージェントのデザインにつなげる。

### **3) 領域設定期間終了後に期待される成果**

今日、人工知能は半導体、インターネットに続く情報技術の次の主戦場とされ、そこで世界をリードできるかどうかは製造業やサービス業まで含めた国の全産業の浮沈を決めるとまで言われている。

人工知能研究では、確かな数学力とプログラミング技術、さらに柔軟な発想と構想力を持った若い研究者の活躍が成功の鍵であり、それには人材育成から取り組む必要がある。脳科学においても、近年得られる膨大なデータを脳の知覚と行動制御、学習機構の理解につなげるには、知的機能を実現するために必要な計算機構を十分に理解してデータの背後にある構造を見抜く必要がある。それには工学、情報科学のセンスと経験を持つ研究者と脳研究者との深いレベルでの共同作業と、そのための人材育成が必要である。

そこで本領域では、

- 1) 人工知能と脳科学の知見と手法の照合により急速な進展が見込める研究
  - 2) 学習要素の全脳レベルでの統合機構の解明に向けたより基礎的かつ革新的な中長期的研究
  - 3) 人工知能と脳科学の融合領域を切り開く人材育成
- の3つのレベルで具体的な活動を展開する。

これらにより、人工知能と脳科学の融合科学を確立しその人材を育成することで、そこから人の意思決定や感情の特性にねざした人工知能技術の開発や、人の行動原理とその異常を理解する神経経済学、計算精神医学など新たな研究分野の発展に貢献することが期待できる。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### <審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

採択審査にあたり留意事項2点の指摘を受け、以下のように対応を行った。

・本研究領域の目標達成のためには、各計画研究代表者を始めとした参加メンバーによる領域への強いコミットメントが必要である。

参加メンバー間で問題意識を共有し、その解決に向けた協力関係を形成するため、半年ごとの領域会議での議論にとどまらず、採択の直後には湘南で合同合宿を行い、また主催した Gatsby Computational Neuroscience Unit, University College London との合同ワークショップ、神経科学大会シンポジウムや脳と心のメカニズムワークショップ等で世界トップレベルの研究者との刺激的な議論の中で、人工知能と脳科学の融合研究への領域メンバーの強いコミットメントを促進して来た。

・他の研究資金に採択されている計画研究代表者については、本研究計画を着実に遂行できるよう留意すること。

研究の進捗は半年ごとの領域会議で確認し合うとともに、論文発表や学会発表についてニュースレターや web ページでレポートしてもらうことにより、本領域のテーマに沿った研究の展開を推進して来た。

### <中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

中間審査において留意事項3点の指摘を受け、以下のように対応を行った。

・新学術領域として、どのような新たな学問分野が創出されるのか明確でないため、研究領域全体としての方向性や研究目的を再確認するとともに、計画研究組織同士の有機的連携を進めることにより、新学術領域としての成果の創出に期待したい。

「人工知能と脳科学の対照と融合」が目指すべきものとして、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つのテーマを確認した上で、それぞれにおいて新たな進展をもたらすことを重点として、研究者間の議論、連携をさらに進めてきた。

領域会議では各課題の進捗報告にとどまらず、共通する関心に応じたグループ討論を設定し、そこでの議論をもとに共著のレビュー・展望論文の執筆出版を行なった (Doya, Taniguchi, *Curr. Opin. Beh. Sci.* 2019; 松尾, 銅谷, *Brain and Nerve* 2019; 高橋, 山下, 銅谷, *Clinical Neuroscience* 2019)。

最終年度に主催した International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science では、これらの方向に沿ったセッションを企画し、AI から脳、脳から AI の研究をリードする国内外の研究者による発表と議論をもとにした展望論文を、*Neural Networks* 誌の特集号に出版予定である。

・計画研究 A01(松尾)について、主学会での発表がなく研究の進捗が芳しくないため更なる努力が必要である。

松尾グループでは主要国際学会への論文投稿に注力し、Matsushima et al. *ICLR 2021*, Furuta et al. *ICML 2021*, Marrese-Taylor et al. *AAAI2021*, Iwasawa et al. *IJCAI 2020*, Kawano et al. *ICLR 2020*, Shioya & Matsuo *ICLR 2018*, Toyama & Matsuo *ICLR 2018* など、人工知能、ディープラーニング分野での主要国際学会に多数の論文が採択された。

・計画研究 A03(中原)及び計画研究 A03(坂上)について、研究の進捗に遅れがあり更なる努力が必要である。

中原グループでは、Social value conversion の論文の採択までに時間がかかったが、Fukuda, Ma et al. *Journal of Neuroscience*, 2019 として出版され、それに続く論文も投稿査読中である。

坂上グループでは、サル前頭前野からの細胞種選択的なニューロン活動記録の新たな技術開発に時間を要したが、Tanaka et al. *Nature Communications* 2019 など高インパクト論文の出版を実現し、さらに4本の新たな論文が投稿査読中である。



## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### (1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

当領域では知覚と予測、運動と行動、認知と社会性の3つの項目を設定したが、研究はこれらの枠にとらわれず展開してきた。ここではAIから脳、脳からAI、AI脳融合という3つの視点から成果を総括する。

#### 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。

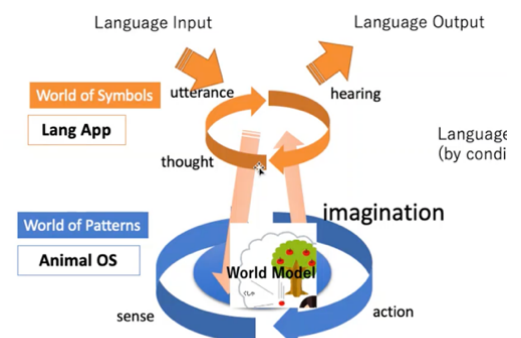
### (2) 本研究領域により得られた具体的な成果(研究項目ごと計画、公募)

#### <A01: 知覚と予測>

ディープラーニングや強化学習をより幅広い課題に活用するためのアルゴリズム開発と、それらの理論に基づく脳機構の解明を進めた。

#### 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

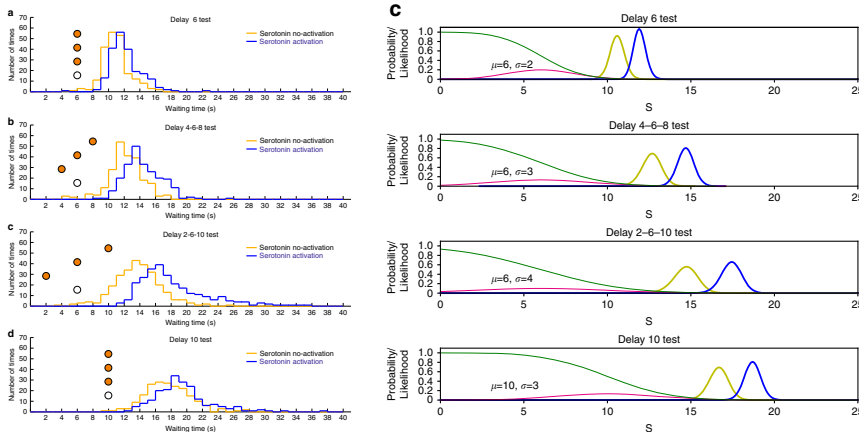
人間の知能は、感覚運動情報を扱う「動物OS」の上で記号処理を行う「言語アプリ」が走るという視点から、記号処理を組み込んだ深層強化学習の研究を進めた。言語アプリは動物OSを呼び出すことにより、視覚、聴覚や身体の動きなどを呼び起こし擬似体験をすることを可能にする。言語の意味を理解するとは、脳内のキャンバスに描くことができることであ



り、それは万能チューリングマシンにおけるテープへの書き込みと同様に、人間の知能に万能性を与える可能性を提起した。

具体的なテーマとして、文章編集の深層学習 (Marrese-Taylor et al. **AAAI** 2021)、効率の良いモデルベース強化学習 (Matsuhima et al. **ICLR** 2021) などが実現された。

### 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



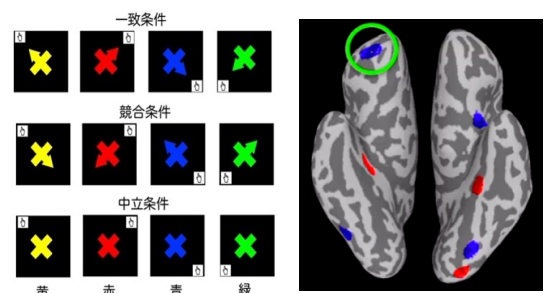
脳におけるベイズ推定の制御機構の解明に向け、マウスの報酬待機行動中のセロトニンニューロン光刺激のデータ解析を進めた。マウスはエサ報酬の待ち時間の分布の内部モデルをもち、待ち続けてもエサが得られなければその試行で報酬が得られる尤度が次第に低下し、報酬の事前確率との掛け算をもとに報酬の事後確率を計算し、それが低下すると待機行動を諦めるという仮説のもと、セロトニン光刺激は報酬の事前確率

を高めると仮定すると、実験データを再現できることを明らかにした (Miyazaki et al. **Nature Communications** 2018)。さらにセロトニン投射末端の光刺激実験により、前頭眼窩野 (OFC) と内側前頭前野 (mPFC) では、異なる種類の内部モデルが機能していることが示唆された (Miyazaki et al. **Science Advances** 2020)。

これらの結果をもとに、セロトニンは行動と学習に使える時間を脳の広範な領野にメッセージとして送るという新たな理論を提起した (Doya et al. **Curr. Opin. Beh. Sci.** 2021)。

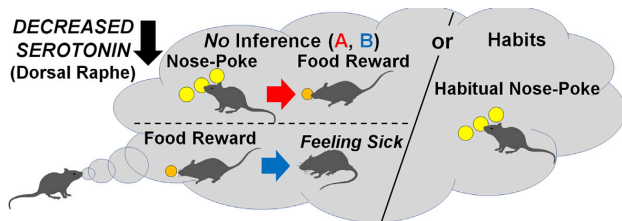
### A01-3 田中啓治：コンフリクトコストに対する調和・不調和情報シーケンス効果の神経基盤の研究

脳におけるトップダウン的予測とボトムアップ的感覚応答のダイナミクスを、刺激と応答の一致性の系列効果課題により調べた。刺激の色に応じた4方向のボタン押しを事前訓練した上で、色刺激に重ねて矢印を提示すると、一致条件試行では反応時間は短くなる。従来の競合モニタリング仮説では、その効果は競合条件の後でのみ弱くなると予測されたが、実験結果は一致条件の後でのみ強くなるというものであった。経頭蓋直流電気刺激 (tDCS) の結果、外側前頭前野が一致条件の連続による予測効果を担うことが明らかになった (Li et al. **Psychophysiology** 2021)。



さらに同課題の fMRI 実験とデコーディング解析により、前頭眼窩野外側部が前試行での反応セットの情報を保持し、次試行における行為選択の認知制御を調節していることが明らかになった。

### A01 公募研究 大村優:セロトニン神経系の光操作・観察によるモデルベース的意思決定の脳内機構解明

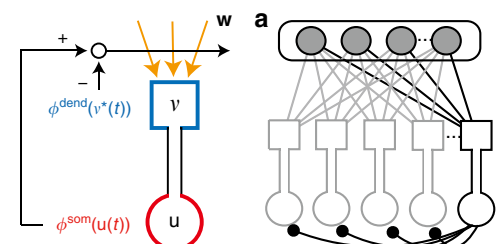


マウスに穴を選んでエサを得る行動を獲得させた後、そのエサは食中毒を起こすことを学習させる。モデルベースの意思決定ができれば穴を選ばなくなるはずだが、そればできないマウスは習慣的に穴を選んでしまう。この課題中に、背側縫線核 (DRN) のセロトニンニューロンを光刺激により抑制すると、習慣的な選択が増加した (Ohmura et al. **Current Biology** 2021)。これは、セロトニンがモデルベースの意思決定を促進することを実験的に証明した初めての結果である。

これは、セロトニンがモデルベースの意思決定を促進することを実験的に証明した初めての結果である。

### A01 公募研究 深井朋樹：樹状突起計算を統合する新しい回路学習パラダイムの創出

大脳皮質の錐体細胞では、細胞体のスパイク応答の樹状突起への逆伝播がシナプス可塑性を起こすという知見をヒントに、樹状突起から細胞体への情報損失を最小化するという原理で学習則を導出した (Asabuki, Fukai, **Nature Communications** 2020)。これによって単一ニューロンで反復する時空間パターンの検出が可能で、また複数ニューロンの相互抑制回路では独立成分分析 (ICA) が実現可能なことを示した。

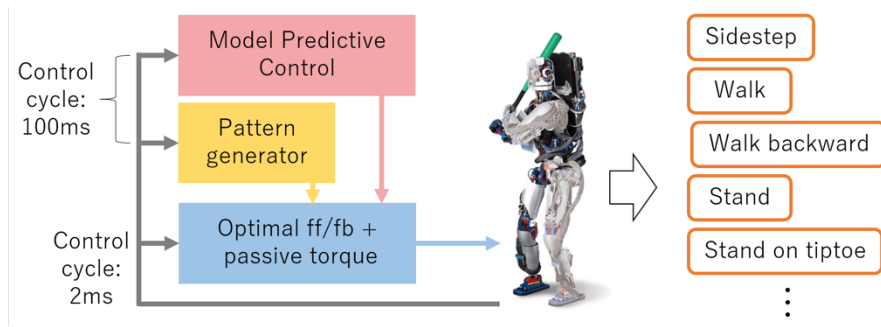




## <A02: 運動と行動>

多様な物理世界での柔軟な運動は現在の AI 技術でも難しいが、それを可能とする階層的、並列的、無意識的な脳情報処理の仕組みを解き明かし、それらの有効性をロボット実験等により示す研究を精力的に進めた。

### 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

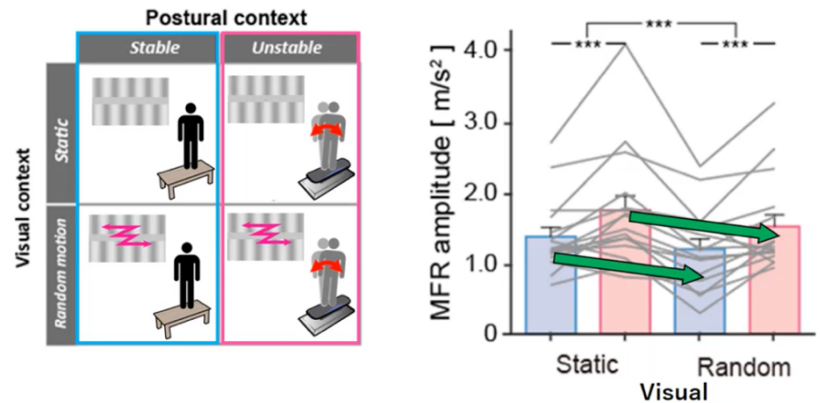


ヒトや動物の多彩な運動機能とその階層的な脳機構にならった制御アーキテクチャを開発し、ヒューマノイドロボット制御による検証を行なった。上位レベルでの行動計画と下位レベルでの運動制御ではフィードバック時間の要請に差があること、またヒトや動物の運動制御ではパターン生成回路と機械インピーダンスが重要な役割

を占めることを参考に、100ms のサイクルで動作するモデルベース予測制御とパターン生成回路に、リアルタイムの受動トルク制御回路を組み合わせたアーキテクチャを開発した (Ishihara et al. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2019)。これにより、前後横への歩行、不整地でのスケートなど 20 以上の行動生成を可能とし、その中の複数の行動をなめらかにつないだ制御を可能なことを示した。

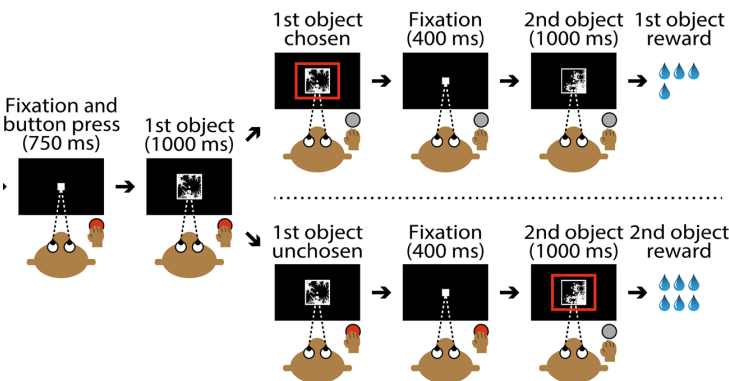
### A02-2 五味裕章：潜在的運動における学習適応メカニズムの解明と計算モデル構築の研究

手先の到達運動中に背景が動くとき手先もそれにつられてシフトするという反射的視覚運動応答 (MFR) において、これはターゲット位置の錯覚によるものか、推定された身体運動を補償するものかという問題が議論されて来た (Ueda et al. *Scientific Reports* 2019)。その仮説検証のため、試行前に背景画像と被験者の足場をそれぞれランダムに動かし、視覚と身体運動の事前分布の MFR への影響を調べる実験を行なった。ベイズ推定モデルでは、MFR がターゲットの錯視によるものであれば視覚の事前分布の分散が大きい時に促進され、身体運動の推定によるものであれば体動の事前分布の分散が大きい時に促進されることが予想されるが、実験結果は後者と支持するものであった。この結果は、神経系の反射的運動制御は、感覚情報の分布や信頼度などの高次の情報に基づくことを示しており、階層制御系の設計に新たな示唆を与えるものである。



### A02-3 松本正幸：報酬と注意の情報処理に関するドーパミン神経回路機構

報酬の予測から行動の選択への変換の脳内過程を明らかにするため、マカクサルに異なる報酬量を予測させる視覚刺激を順に提示し、1つ目を見た直後にそれを確保するか次の刺激を取るか選択させる課題を学習させ、1つ目の刺激提示直後の神経活動を解析した (Yun et al. *Science Advances* 2020)。中脳ドーパミン (DA) 神経核、腹側線条体 (VS)、前頭眼窩野 (OFC) にはそれぞれ報酬予測、行動選



択、さらにその中間的な活動が見られたが、それらの応答のピークは DA ニューロンの方が VS ニューロンよりも早かった。さらに A02 井上により提供された光刺激プローブにより VS へのドーパミン投射末端を刺激すると、報酬予測値が中間的で行動選択が確率的な場合に選択確率が上昇した。これはドーパミンニューロンの活動が行動選択に因果的に関与することを示す新たな結果である。

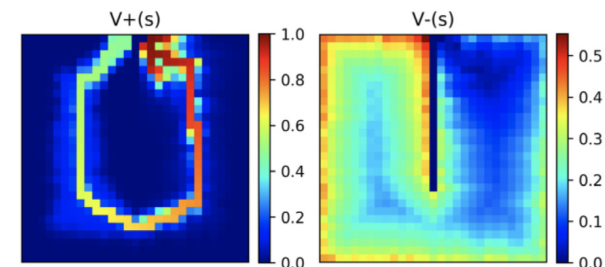
## A02-4 疋田貴俊：報酬/目的指向行動の神経回路機構

大脳基底核の直接経路と間接経路は、線条体で D1 および D2 受容体を持つニューロンにより構成され、それぞれ行動の促進と抑制に関わっていることが遺伝子操作や光刺激実験により示唆されている。しかし D1 受容体-直接経路-Go/D2 受容体-間接経路-NoGo の図式とは矛盾する報告もあり、より詳細なニューロンごとの機能の解析が求められている。

そこで、腹側線条体において D1/D2 受容体を持つニューロン選択的にカルシウムインジケータを発現させ、内視顕微鏡による単一ニューロンレベルの活動記録を行なった。その結果、多くの D1 ニューロンは水報酬とそれを予測させる音刺激に対して活動を増やし、多くの D2 ニューロンは air puff とそれを予測させる音刺激に対して活動を増やしたが、それらと逆の特性を持つものも見られた。

この知見は、直接経路/間接経路内のサブ回路の存在を新たに示唆するものである。

## A02 公募研究 内部英治：並列深層強化学習



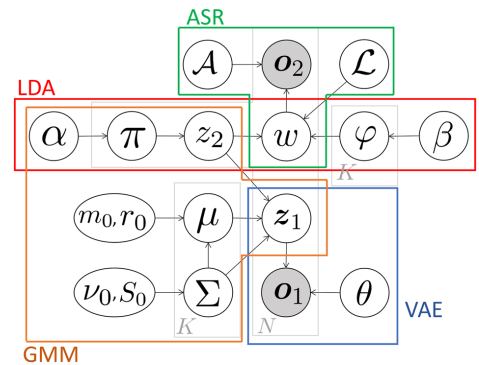
疋田、松本らによる脳の強化学習の研究は、報酬からの学習には大脳基底核直接路が、罰からの学習には大脳基底核間接路や外側手綱核が関与するという並列的な回路構造を示唆している。そこで正の報酬と負の報酬の価値関数を並列に学習し、状況に応じて組み合わせる深層強化学習 Deep MaxPain を定式化し(Wang et al. *Neural Networks* 2021)、ナビゲーション課題で、障害物を安全に避ける行動が学習されることを示した。

## <A03: 認知と社会性>

外界や他者の内部モデルを学習し、それをもとに柔軟な行動と意思決定を行う AI アーキテクチャと脳アーキテクチャの研究を、両分野の協力により同時並行的に推進した。

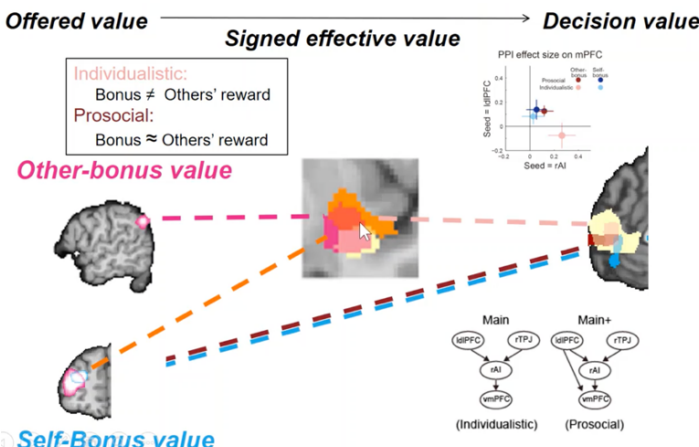
### A03-1 谷口忠大：感覚運動と言語をつなぐ二重分節解析の脳内計算過程の理解と応用

ヒトの言語獲得の過程のモデルとして、視覚、聴覚、触覚、自己運動などのマルチモーダルな情報を統合した教師なし学習により、物体カテゴリー、空間構造、それらをつなぐ言語を確率的生成モデルとして獲得する枠組み SpCoSLAM の開発を進めた(Taniguchi et al. *IROS* 2017, *Advanced Robotics* 2020)。その中で、独立に構成された多様な確率モデルを組み合わせ、さらに全体として学習を進めるための手法の必要性が明らかになった。A01 松尾との共同により、変分オートエンコーダー (VAE) など最近の確率的ニューラルネットモデルを組み込み、確率モデルに基づく統合的な認知アーキテクチャの開発が可能な Neuro-SERKET を開発した(Taniguchi et al. *New Generation Computing* 2020)。



さらにその実績をもとに、脳全体をマルチモーダルな確率的生成モデルとして捉えることにより、脳の機能モジュールとその間の連携のしくみを明らかにするという研究パラダイムを打ち出した(Taniguchi et al. *arXiv* 2021)。これは脳の機能理解の枠組みであると同時に、汎用的な人工知能ロボットの設計指針を与えるものである。

### 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



ヒトの意思決定において、自己の利益と他者の利益 (social value) がいかに関係するかを定量的に明らかにするため、確率的な報酬の選択課題に加えて、確定的な「ボーナス」報酬が自己、あるいは他者に与えられる課題を新たに開発し、fMRI 実験を行なった(Fukuda, Ma et al. *J. Neuroscience* 2019)。心理生理相互作用 (PPI) および動的因果モデリング (DCM) による解析の結果、他者の利益を自己の利益と同様に好む向社会的 (prosocial) な被験者では、他者の報酬評価に関わる左背外側前頭前野 (dlPFC) から、



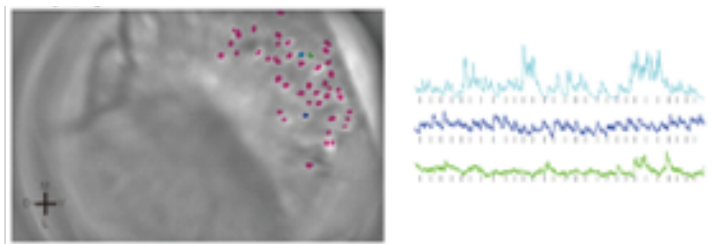
行動選択に関わる腹内側前頭前野 (vmPFC) への機能結合が見られることが明らかになった。

さらに、確率的な報酬のもので他者の行動選択を予測する課題では、他者の行動が確定的に予測できる場合は後帯状回 (RCC) が、不確かな場合には右 dIPFC が、他者の行動予測を自己の行動選択につなぐ役割を果たすことが示唆されている。これらの知見は、他者の内部モデルとそれにもとづく意思決定に関わる計算要素のなす脳回路を具体的に解明すると同時に、社会的知性を持つ人工知能エージェントの設計にも貢献するものである。

### 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

マカクサルサケード課題で、固視点を2秒間固視してから行う高コスト (HC) 条件と、0.5秒だけ固視すれば良い低コスト (LC) 条件で、ドーパミンニューロンの活動を比較した。課題条件を提示するキューに対する応答は LC 条件の方が大きく、報酬の有無を知らせるキューに対する応答は HC 条件の時の方が大きく、さらに HC 条件では学習が促進された (Tanaka et al. **Nature Communications** 2019)。この知見は、困難なゴールに到達した時ほど達成感が強いという経験を、ドーパミンニューロンの応答から裏打ちするものであり、教育やトレーニングのプログラムなど広範な示唆を与えるものである。

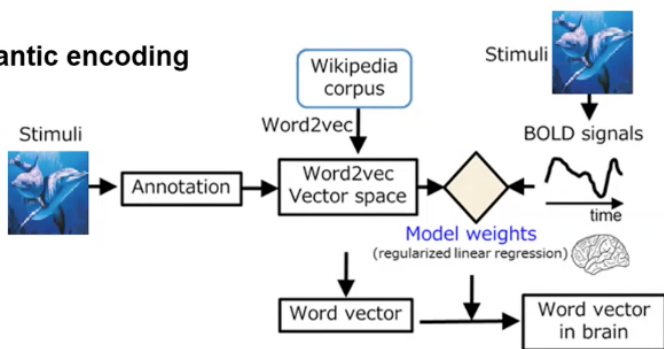
さらに霊長類の神経回路研究の新たな手法を確立するために、DREADD を使った前頭前野-大脳基底核の経路選択的機能遮断法 (A02 小林との共同研究)、大脳皮質の in vivo カルシウムイメージング法 (A02 井上との共同研究) の開発を行い、ともにニホンザルへの適用に成功した。



### 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

統合失調症における脳内意味ネットワークの変容の可能性を探るため、自然動画刺激に対する脳活動を fMRI 計測し、動画の説明文から Word2vec により得た特徴ベクトルにより回帰分析することによりし、被験者の脳内意味ネットワークを推定した。グラフ理論による分析の結果、統合失調症患者の脳内意味ネットワークは、クラスタリング係数、特徴パス長、スモールワールド性が、健常者よりも有意に低く、またこれらの特徴量は妄想症状の強い患者ほど低いこと

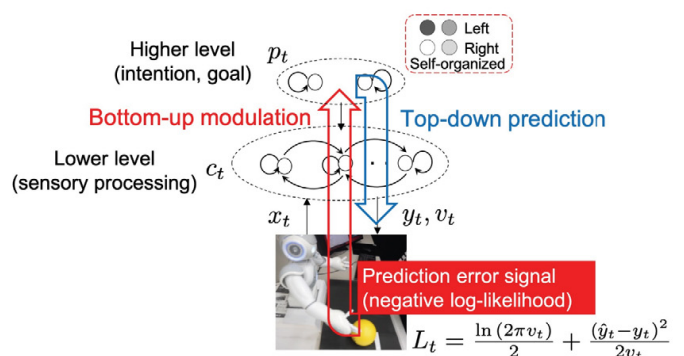
#### Semantic encoding



とわかった。一方で、ネットワークのモジュラリティは患者の方が高かった。このことは統合失調症患者の意味ネットワークは分断が進み、すみやかな情報伝達や状態遷移を可能にするスモールワールド性が損なわれていることを示唆している。

### A03 公募研究 山下 祐一：深層学習を用いた安静時機能的MRIからの汎用特徴量抽出

自閉症などの発達障害では、感覚応答の鈍さと過敏性の両方が見られるが、そのメカニズムは不明である。階層的な回帰ニューラルネットワークによるロボットの行動学習実験で、上位と下位との結合を減弱させると、状況依存的に感覚応答の鈍さと過敏性が現れることが明らかになった (Idei et al. **Neural Networks** 2020)。この結果は、一見矛盾するような発達障害の症状が、長距離の神経結合の障害として統一的に理解できる可能性を示している。



## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況(主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和3年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。)について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者(発表当時、以下同様。)には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

<主な雑誌論文および国際会議論文(すべて査読あり)> (+は equal contribution を表す)

### A01 知覚と予測 計画研究

#### 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

- \*Matsushima T, Furuta H, Matsuo Y, Nachum O, Shane Gu S (2021) Deployment-efficient reinforcement learning via model-based offline optimization. International Conference on Learning Representations (**ICLR 2021**).
- \*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.
- \*Marrese-Taylor E, Reid M, Matsuo Y (2021) Variational inference for learning representations of natural language edits. AAAI Conference on Artificial Intelligence (**AAAI 2021**).
- \*Iwasawa Y, Akuzawa K, Matsuo Y (2020) Stabilizing adversarial invariance induction from divergence minimization perspective. International Joint Conference on Artificial Intelligence (**IJCAI 2020**).

#### 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. (<https://arxiv.org/abs/2106.02785>)
- \*Doya K, Miyazaki KW, Miyazaki K (2020) Serotonergic modulation of cognitive computations. **Current Opinion in Behavioral Sciences**, 38, 116-123.
- Vieillard N, #Kozuno T, Scherrer B, Pietquin O, Munos R, Geist M (2020). Leverage the average: An analysis of regularization in reinforcement learning. Neural Information Processing Systems (**NeurIPS 2020**).
- \*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.
- \*Parmas P, Rasmussen CE, Peters J, Doya K (2018). PIPPS: Flexible model-based policy search robust to the curse of chaos. **ICML 2018**.
- \*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.
- \*Yoshizawa T, Ito M, Doya K (2017) Reward-predictive neural activities in striatal striosome compartments. **eNeuro**, 5, 1, 0367.

#### 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.
- \*Lehky SR, Phan AH, Cichocki A, Tanaka K (2020) Face representations via tensorfaces of various complexities. **Neural Computation** 32, 2, 281-329.
- \*Mansouri FA, Buckley MJ, Fehring DJ, Tanaka K (2019) The role of primate prefrontal cortex in bias and shift between visual dimensions. **Cerebral Cortex** 30, 1, 85-99.

### A01 知覚と予測 公募研究 後期

#### 大村 優：セロトニン神経系の光操作・観察によるモデルベース的意思決定の脳内機構解明

- \*Ohmura Y, Iwami K, Chowdhury S, Sasamori H, Sugiura C, Bouchekioua 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.

#### 池上 高志：自己シミュレーションとホメオスタシスを基底とする脳のモデル研究

- \*Sinapayen L, Masumori A, Ikegami T (2020) Reactive, proactive, and inductive agents: An evolutionary path for biological and artificial spiking networks. **Frontiers in Computational Neuroscience**, 13.

#### 庄野 逸：視覚心理に基づくテクスチャ特徴表現と深層特徴表現のマッピング

- Kawashima T, Shouno H, \*Hino H (2021) Bayesian dynamic mode decomposition with variational matrix factorization. **35th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2021)**.

濱口 航介: 意思決定過程と内部モデルの相互作用

Nishioka T, Hamaguchi K, Yawata S, Hikida T, \*Watanabe D (2020) Chemogenetic suppression of the subthalamic nucleus induces attentional deficits and impulsive action in a five-choice serial reaction time task in mice. **Frontiers in System Neuroscience**, 14, 38.

鮫島 和行: 多次元の状態・行動空間における意思決定と大脳基底核の情報表現

\*Nonomura S, Samejima K (2019) Neuronal representation of object choice in the striatum of the monkey. **Frontiers in Neuroscience**, 13, 1283.

小松 三佐子: 予測の神経基盤: 広域皮質脳波における時空間構造

\*Komatsu M, Ichinohe N (2020) Effects of ketamine administration on auditory information processing in the neocortex of nonhuman primates. **Frontiers in psychiatry**, 11, 826.

深井 朋樹: 樹状突起計算を統合する新しい回路学習パラダイムの創出

Asabuki T, \*Fukai T (2020) Somatodendritic consistency check for temporal feature segmentation. **Nature Communications**, 11, 1554.

\*Haga T, \*Fukai T (2019) Extended temporal association memory by modulations of inhibitory circuits. **Physical Review Letters**, 123, 78101.

アンドレア ベヌッチ: Learning perceptual representations in biological and artificial neural networks

Lyamzin D, \*Benucci A (2019) The mouse posterior parietal cortex: Anatomy and functions. **Neuroscience Research**, 140, 14-22.

細谷 晴夫: 高次視覚野の計算理論に基づくワンショット学習モデル

\*Hosoya H (2019) Group-based learning of disentangled representations with generalizability for novel contents. **Proc of 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2019)**.

森岡 博史: 非線形ダイナミカル表現学習法の開発による脳の理解と予測

Morioka H, Calhoun V, \*Hyvärinen A (2020) Nonlinear ICA of fMRI reveals primitive temporal structures linked to rest, task, and behavioral traits. **NeuroImage**, 218, 116989.

#### A01 予測と知覚 公募研究 前期

池上 高志: 生成系の深層学習を用いた空間/音の認知に関する研究

\*Masumori A, Sinapayen L, Maruyama N, Mita T, Bakkum D, Frey U, Takahashi H, Ikegami T (2018) Autonomous regulation of self and non-self by stimulation avoidance in embodied neural networks. **ALIFE 2018**, 1, 163-170.

\*Sinapayen L, Ikegami T (2017) Online fitting of computational cost to environmental complexity: Predictive coding with the  $\epsilon$ -network. **14th European Conference on Artificial Life (ECAL2017)**, 1, 380-387.

柳井 啓司: 単機能の重ね合せにより新機能を創発するマルチファンクショナル深層学習ネットワーク

\*Ege T, Ando Y, Tanno R, Shimoda W, Yanai K (2019) Image-based estimation of real food size for accurate food calorie estimation. **IEEE International Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval**.

篠本 滋: 神経信号からネットワーク構造を推定し、そこに発現する活動パターンを予測する

Onaga T, Shinomoto S (2016) Emergence of event cascades in inhomogeneous networks. **Scientific Reports**, 6, 33321.

\*Mochizuki Y, et al. Shinomoto S (2016) Similarity in neuronal firing regimes across mammalian species. **Journal of Neuroscience**, 36, 5736-5747.

柳澤 琢史: 皮質脳波ビッグデータによる革新的人工知能の開発

Fukuma R, \*Yanagisawa T, Tanaka M, Yoshida F, Hosomi K, Oshino S, Tani N, Kishima H (2018) Real-time neurofeedback to modulate  $\beta$ -band power in the subthalamic nucleus in Parkinson's disease patients. **eNeuro**, 5, 6, 0246-18.

深井 朋樹: 大脳皮質局所回路に学ぶ新しいアーキテクチャと学習モデルの構築

\*Fung CCA, \*Fukai T (2019) Discrete-attractor-like tracking in continuous attractor neural networks. **Physical Review Letters**, 122, 018102.

Kurikawa T, Haga T, Handa T, Harukuni R, \*Fukai T (2018) Neuronal stability in medial frontal cortex sets individual variability in decision-making. **Nature Neuroscience**, 21, 1764-1773.

\*Haga T, \*Fukai T (2018) Dendritic processing of spontaneous neuronal sequences for single-trial learning. **Scientific Reports**, 8, 15166.

アンドレア ベヌッチ: Using Recurrent Neural Networks to Study Neural Computations in Cortical Networks

Aoki R, Tsubota T, Goya Y, \*Benucci A (2017) An automated platform for high-throughput mouse behavior and physiology with voluntary head-fixation. **Nature Communications**, 8, 1, 1196.

平山 淳一郎: 積層独立成分分析の深化と脳科学応用

\*Takagi Y, Hirayama J, Tanaka S (2019) State-unspecific patterns of whole-brain functional connectivity from resting and multiple task states predict stable individual traits. **NeuroImage**, 201, 116036.

小松 三佐子: 予測の神経基盤: 全脳皮質脳波における時空間構造

\* Komatsu M, Sugano E, Tomita H, \*Fujii N (2017) A chronically implantable bidirectional neural interface for non-human primates. **Frontiers in Neuroscience**, 11, 514.

## A02 運動と行動 計画研究

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

\*Furukawa J, Morimoto J (2021) Composing an assistive control strategy based on linear bellman combination from estimated user's motor Goal. **IEEE Robotics and Automation Letters** 6, 2, 1051 - 1058.

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.

\*Ugurlu B, Forni P, Doppmann C, Sariyiliz E, Morimoto J (2019) Stable control of force, position, and stiffness for robot joints powered via pneumatic muscles. **IEEE Trans. on Industrial Informatics** 15, 12, 6270-6279.

\*Ishihara K, Morimoto J (2018) An optimal control strategy for hybrid actuator systems: application to an artificial muscle with electric motor assist. **Neural Networks** 99, 99-100.

\*Morimoto J (2017) Soft humanoid motor learning. **Science Robotics** 2, 13, eaaq0989.

\*Gaspar T, Nemeč B, Morimoto J, Ude A (2017) Skill learning and action recognition by arc-length dynamic movement primitives. **Robotics and Autonomous Systems**, 100, 225-235.

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

\*Takamuku S, Ohta H, Kanai C, Hamilton AF de C, Gomi H (2021) Seeing motion of controlled object improves grip timing in adults with autism spectrum condition: evidence for use of inverse dynamics in motor control. 2021. **Experimental Brain Research**, 239.

\*De Havas J, Ito S, Gomi H (2020) On stopping voluntary muscle relaxations and contractions: evidence for shared control mechanisms and muscle state-specific active breaking. **Journal of Neuroscience.**, 40, 31.

Ito S, \*Gomi H (2019) Visually-updated hand state estimates modulate the proprioceptive reflex independently of motor task requirements. **eLife**, 9.

\*Takamuku S, Gomi H (2019) Better grip force control by attending to the controlled object: Evidence for direct force estimation from visual motion. **Scientific Reports** 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

Wang Y, Toyoshima O, Kunimatsu J, Yamada H, \*Matsumoto M (2021) Tonic firing mode of midbrain dopamine neurons continuously tracks reward values changing moment-by-moment. **eLife**, 10, e63166.

\*Yamada H, Imaizumi Y, Matsumoto M (2021) Neural population dynamics underlying expected value computation. **Journal of Neuroscience**, 41, 1684-1698.

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.

Macpherson T, Mizoguchi H, Yamanaka A, \*Hikida T (2019) Preproenkephalin-expressing ventral pallidal neurons control inhibitory avoidance learning. **Neurochemistry International**, 126, 44518.

Macpherson T, \*Hikida T (2018) Nucleus accumbens dopamine D1-receptor-expressing neurons control the acquisition of sign-tracking to conditioned cues in mice. **Frontiers in Neuroscience**, 12, 418.

A02 運動と行動 公募研究 後期

井澤 淳：感覚予測と報酬予測を統合するメタ学習機構：計算論的理解と脳内基盤の解明

Kita K, Osu R, Hosoda C, Honda M, Hanakawa T, \*Izawa J (2019) Neuroanatomical basis of individuality in muscle tuning function: neural correlates of muscle tuning. **Frontiers in Behavioral Neuroscience** 13, 28.

飯野 雄一：ニューラルネットワークによる神経ネットワークの動作原理の解明

Sato H, Kunitomo H, Fei X, Hashimoto K, \*Iino Y (2021) Glutamate signaling from a single sensory neuron mediates experience-dependent bidirectional behavior in *Caenorhabditis elegans*. **Cell Reports**, 35, 8, 109177.

Jang MS, Toyoshima Y, Tomioka M, Kunitomo H, \*Iino Y (2019) Multiple sensory neurons mediate starvation-dependent aversive navigation in *Caenorhabditis elegans*. **Proc Natl Acad Sci U S A**, 116, 37, 18673-18683.

井上 謙一：霊長類の前頭前野を巡る「行動選択」神経ネットワークの構築様式



\*Ninomiya T, Inoue K, Hoshi E, Takada M (2019) Layer specificity of inputs from supplementary motor area and dorsal premotor cortex to primary motor cortex in macaque monkeys. **Scientific Reports**, 9, 18230.

小林 和人：刺激弁別の学習フェーズにおける線条体細胞タイプ特異的な神経活動の可視化

Kikuta S, Iguchi Y, Kakizaki T, Kobayashi K, Yanagawa Y, Takada M, Osanai M. (2019) Store-operated calcium channels are involved in spontaneous slow calcium oscillations in striatal neurons. **Frontiers in Cellular Neuroscience-Cellular Neurophysiology**, 13, 547, 44205.

松本 英之：行動選択におけるドーパミン神経回路の並列情報処理機構の解明

Tsutsui-Kimura I, Matsumoto H, Akita K, Yamada MM, Uchida N, \*Watabe-Uchida M (2020) Distinct temporal difference error signals in dopamine axons in three regions of the striatum in a decision-making task. **eLife**, 9, e62390.

内部 英治：モデルフリーとモデルベースの協同による深層並列強化学習

\*Wang J, Elfving S, Uchibe E (2021) Modular deep reinforcement learning from reward and punishment for robot navigation. **Neural Networks**, 135, 115-126.

## A02 運動と行動 公募研究 前期

井澤 淳：感覚予測と報酬予測に基づく運動学習の計算理論的理解と脳内基盤の解明

Lee K, Oh Y, Izawa J, Schweighofer N (2018) Sensory prediction errors, not performance errors, update memories in visuomotor adaptation. **Scientific Reports**, 8, 16483.

井上 謙一：行動選択の回路モデル構築のための前頭前野—大脳基底核・小脳連関の構築様式の解明

Inoue K, Ishida H, \*Takada M (2018) Multisynaptic projections from the amygdala to the ventral premotor cortex in macaque monkeys: Anatomical substrate for feeding behavior. **Frontiers in Neuroanatomy**, 12, 3.

内部 英治：並列深層強化学習

\*Uchibe E (2018) Cooperative and competitive reinforcement and imitation learning for a mixture of heterogeneous learning modules. **Frontiers in Neurobotics**, 12.

\*Uchibe E (2017) Model-free deep inverse reinforcement learning by logistic regression. **Neural Processing Letters**, 47, 891-905.

## A03 認知と社会性 計画研究

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

\*Ikutani Y, Kubo T, Nishida S, Hata H, Matsumoto K, Ikeda K, Nishimoto S (2021) Expert programmers have fine-tuned cortical representations of source code. **eNeuro**, 8, 1.

\*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.

\*Taniguchi T, Ugur E, Hoffmann M, Jamone L, Nagai T, Rosman B, Matsuka T, Iwahashi N, Oztop E, Piater J, Wörgötter F (2019) Symbol emergence in cognitive developmental systems: a survey. **IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems**, 11, 4, 494-516.

Nakashima R, Ozaki R, \*Taniguchi T (2019) Unsupervised phoneme and word discovery from multiple speakers using double articulation analyzer and neural network with parametric bias. **Frontiers in Robotics and AI**, 6, 92.

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

\*Sugiyama M, Tsuda K, Nakahara H (2020) Sample space truncation on boltzmann machines. **NeurIPS 2020 Workshop: Deep Learning through Information Geometry**, 1-9.

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.

\*Yamagishi T, Matsumoto Y, Kiyonari T, Takagishi H, Li Y, Kanai R, Sakagami M (2017). Response time in economic games reflects different types of decision conflict for prosocial and proself individuals. **Proc Natl Acad Sci U S A**, 114, 6394-6399.

\*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.

\*Fan H, Pan X, Wang R, Sakagami M (2017). Differences in reward processing between putative cell types in primate prefrontal cortex. **PLoS One**, 12, e0189771.

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

- \*Koizumi A, Hori T, Maniscalco B, Hayase M, Mishima R, Kawashima T, Miyata J, Aso T, Lau H, Takahashi H, Amano K. (2020) Atypical spatial frequency dependence of visual metacognition among schizophrenia patients. **NeuroImage Clinical**, 27, 102296.
- 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.
- Tei S, Fujino J, Itahashi T, Aoki Y, Ohta H, Kubota M, Hashimoto RI, Nakamura M, Kato N, \*Takahashi H (2019) Egocentric biases and atypical generosity in autistic individuals. **Autism Research**, 12, 1598-1608.
- Takeuchi H, Tsurumi K, Murao T, Mizuta H, Murai T, \*Takahashi H (2018) Amygdala volume is associated with risky probability cognition in gambling disorder. **Addiction Biology**, 24, 802-810.

### A03 認知と社会性 公募研究 後期

大関 洋平: 自然言語処理と神経生理計測を融合した言語の神経計算モデルの構築と検証

- \*Oseki Y, Marantz A (2020) Modeling human morphological competence. **Frontiers in Psychology**, 11, 513740.

三村 喬生: 社会的身体表現による個体間相互作用の生成モデル開発

- Mimura K, et al. (2019) Abnormal axon guidance signals and reduced interhemispheric connection via anterior commissure in neonates of marmoset ASD model. **NeuroImage**, 195, 243-251.

山下 祐一: 深層学習を用いた安静時機能的MRIからの汎用特徴量抽出

- 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.

### A03 認知と社会性 公募研究 前期

鈴木 真介: 構造学習の脳計算モデル: 脳イメージング実験と大規模 WEB 調査による検証

- \*Suzuki S, Logan Cross, John P. O'Doherty (2017) Elucidating the underlying components of food valuation in the human orbitofrontal cortex. **Nature Neuroscience**, 20, 1780-1786.

山下 祐一: 深層学習を用いた精神疾患の計算論的検査・評価法の開発

- Idei H, Murata S, Chen Y, Yamashita Y, Tani J, \*Ogata T (2018) A Neurorobotics simulation of autistic behavior induced by unusual sensory precision. **Computational Psychiatry**, 2, 164-182.

三村 喬生: 分節構造推定による自閉症モデル霊長類の家族行動解析

- Abe H, Tani T, Mashiko H, Kitamura N, Miyakawa N, Mimura K, Sakai K, Suzuki W, Kurotani T, Mizukami H, Watakabe A, Yamamori T, \*Ichinohe N (2017) 3D reconstruction of brain section images for creating axonal projection maps in marmosets. **Journal of Neuroscience Methods**, 286, 102-103.

### <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)

### <ホームページ>

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/>

### <主催シンポジウム>

International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science. 2020/10/10-12. Online.

(<http://www.brain-ai.jp/symposium2020/>)

脳と心のメカニズム第 20 回冬のワークショップ: Brain and Artificial Intelligence. 2020/1/8-10, Rusutsu Resort.

UCL-Gatsby-NTT-AIBS Joint Workshop. 2018/10/22-23, OIST Seaside House.

Korean AI Flagship Project Joint Workshop. 2018/1/29-30, Willy Hilly Park, Korea.

第 27 回日本神経回路学会 新学術領域シンポジウム: 人工知能と脳科学. 2017/9/20. 北九州国際会議場.

第 40 回日本神経科学大会企画シンポジウム: Artificial Intelligence and Brain Science. 2017/7/23. 幕張メッセ.

Gatsby-Kakenhi Joint Workshop on Artificial Intelligence and Brain Science. 2017/5/11-12, London.

### <一般向けアウトリーチ活動>

銅谷賢治: 人工知能は脳から何を学べるか. 第 26 回脳の世紀シンポジウム「AI と脳」. 2018/9/12. 東京.

谷口忠大: 実環境に適応する統合的認知機能の形成に向けて～記号創発ロボティクス～. 第 41 回日本神経科学大会 産学連携シンポジウム『人工知能と脳科学の共進化が創る未来』. 2018/7/26. 神戸.

春休み高校生理科教室 2018「脳科学と人工知能」. 2018/3/19. 玉川大学.

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

下の表に示すように、領域内ではAIの理論モデルやデータ解析手法、脳計測と操作の実験技術など多様な共同研究が3つの項目を超えて幅広く行われた。これらの共同研究は、Policy information capacity (Furuta et al. ICML 2021), セロトニンとモデルベース意思決定(Ohmura et al. *Current Biology* 2021), Neuro-SERKET (Taniguchi et al. *New Generation Computing* 2019)など多くの成果につながっている。

また共同研究の過程は、実験系の研究室メンバーが機械学習手法を学ぶ、理論系の研究室メンバーが生の実験データを解析するなど、融合分野の人材育成において有意義なものであった。

A01	松尾豊	A01	銅谷賢治	深層強化学習アルゴリズムの開発と解析
A01	銅谷賢治	A01	池上高志	内発的報酬の計算モデル
A01	銅谷賢治	A01	大村優	マウス行動のモデルベース解析
A01	銅谷賢治	A02	内部英治	深層強化学習・逆強化学習に関するアルゴリズム開発
A01	銅谷賢治	A03	高橋英彦	統合失調症患者の行動データ解析
A01	A. Benucci	A01	濱口航介	2光子顕微鏡画像からの細胞セグメンテーション
A01	小松三佐子	A03	山下祐一	マーモセット ECoG データの計算モデルベース解析
A01	近添淳一	A01	柳澤啄史	表象類似度解析を用いた ECoG データの時系列解析
A01	平山淳一郎	A01	近添淳一	脳局所情報からの全脳情報の解読
A01	柳井啓司	A02	井上謙一	AI を利用した神経回路トレーシング法
A01	柳澤啄史	A03	小林一郎(谷口)	皮質脳波による画像意味推定
A01	深井朋樹	A03	大関洋平	言語の時系列解析の神経メカニズム
A02	森本淳	A03	谷口忠大	動作の分節化と模倣学習
A02	森本淳	A03	高橋英彦	精神疾患の脳活動解析への人工知能技術の応用
A02	五味裕章	A01	銅谷賢治	ベイジアン感覚モデルによる仮説検証
A02	松本正幸	A02	井上謙一	マカクザルに適用可能な光遺伝学技術の開発
A02	松本正幸	A02	井澤淳	意思決定の強化学習モデルと脳内基盤
A02	疋田貴俊	A01	濱口航介	神経活動データ解析
A02	疋田貴俊	A02	井上謙一	直接路と間接路の機能解剖的解析
A02	疋田貴俊	A03	山下佑一	マウス行動の計算論的解析
A02	井上謙一	A01	銅谷, 柳井, 庄野	神経細胞分布の自動解析技術の開発
A02	井上謙一	A03	三村喬生	霊長類における化学遺伝学技術の開発
A03	谷口忠大	A01	池上高志	記憶を有するニューラルネットによる記号接地
A03	谷口忠大	A01	鈴木雅大(松尾)	Neuro-SERKET: 深層学習を活用した統合的生成モデル
A03	谷口忠大	A01,03	鈴木, 銅谷, 坂上	確率的生成モデルによる全脳認知アーキテクチャー
A03	中原裕之	A02	松本 正幸	価値の学習と意思決定の神経メカニズム
A03	坂上 雅道	A02	小林和人	DREADD 実験のためのウイルス供給
A03	坂上雅道	A02	井上謙一	霊長類での微小内視鏡を用いたカルシウムイメージング
A03	高橋英彦	A03	谷口忠大	統合失調症の思考障害の計算モデル
A03	高橋英彦	A03	山下祐一	深層学習を用いた精神疾患の計算論的検査・評価法
A03	三村喬生	A03	谷口忠大	マーモセットの社会行動分節解析
A03	三村喬生	A01	小松三佐子	情動生成の皮質内メカニズム
A03	鈴木真介	A03	山下祐一	強化学習と精神疾患傾向: 大規模 WEB 調査による検証

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等(本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など)の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究(総括班・国際活動支援班を含む。)がある場合は、その内容を記述すること。

計画研究予算の最大の要素は、研究推進の主力となるポスドク研究者人件費であった。

初年度には、A02 森本は、学習アルゴリズム検証のためのロボットマニピュレータを導入し、A02-2 五味は、ヒトの動作を解析するためのモーションキャプチャシステムを導入した。また A01 銅谷、A02 疋田は、マウスの脳イメージングのための顕微鏡システムを導入し、その後の研究に活用した。

A01 田中、A01 中原は、ヒト脳活動計測のための MRI 装置の利用料と被験者謝金を支出した。

コロナ禍によるキャンパス閉鎖などのため、多くの研究室で実験の中断を余儀なくされたため、複数の課題が R3 年度に予算繰越しをして研究を完了する予定である。

総括班では、人工知能と脳科学サマースクールのため学生と講師の国内旅費、また研究室間の若手研究者の派遣のために旅費を支給した。を活用した。ニュースレター発行、web サイト運営、領域事務局の人件費に予算を活用した。

コロナ禍により国内でも研究者の相互派遣は R2 年度はほとんど不可能になったが、延期になったものは予算繰越しにより R3 年度に実施予定である。

国際活動支援班予算は、Gatsby Computational Neuroscience Unit, University College London との合同ワークショップ、神経科学大会シンポジウム、脳と心のメカニズムワークショップでの AI と脳科学のテーマでの領域主催のセッションのための旅費、また海外との研究者の派遣招聘に活用した。

最終年度の International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science は、コロナ禍によりオンライン開催となり、予定していた海外招聘旅費が不要となったが、シンポジウムでの議論をもとにした Neural Networks 誌の特集号を出版予定であり、繰越し予算を領域メンバーによる論文の Open Access 費用として活用予定である。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

応募時には「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択した。当領域の5年間の活動は、AIから脳、脳からAI、AI脳融合のそれぞれの方向で、幅広いインパクトを広げてきた。

**AIから脳**：脳科学に統計的機械学習などのAI手法を導入することは世界的には大きな流れになっているが、日本ではそのような取組は遅れがちであった。当領域では、AIと脳科学の先端的な研究者と各ラボの若手メンバーが定常的に交流を持つ中で、神経画像処理へのディープラーニングの応用、高次元神経活動データのデコーディングや低次元特徴量の抽出、行動データの強化学習モデル解析、感覚データのベイズモデル解析などが広く使われるようになった。その結果を論文や学会などで積極的に発信することにより、日本の脳科学におけるAIアプローチの導入を大きく促進した。

**脳からAI**：人工知能分野では、ディープラーニングは単に便利なブラックボックスとして活用するという立場の技術者が大半であったが、当領域の公募説明会や主催、共催のシンポジウムには、産業界を含む多数の技術者、研究者の参加があり「脳から学ぶべきことはディープラーニングの他にもある」という当領域のメッセージは広く伝わった。

また、松尾は日本ディープラーニング協会(<https://www.jdla.org>)の設立を主導し、ソフトバンクの社外取締役に招かれ、谷口はパナソニックのテクノロジー本部客員総括主幹技師にクロスアポイントされるなど、脳にならったAIへの産業界の関心を喚起し、社会応用への取り組みを進めている。

**AI脳融合**：2020年10月に開催したInternational Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science (<http://www.brain-ai.jp/symposium2020/>)には1,800名以上の参加登録があり、その半数以上は海外からのものであり、当領域の取組は世界的に注目を集めた。

そこでの5つのセッション

- Deep Learning and Reinforcement Learning
- World Model Learning and Inference
- Metacognition and Metalearning
- AI for Neuroscience and Neuromorphic Technologies
- Social Impact and Neuro-AI Ethics

での世界的な研究者の講演と議論にもとづく展望論文を核としたNeural Networks誌の特集号は、世界中から50件以上の投稿を集め、融合領域の研究推進に貢献している。

さらに領域メンバーは、IJCAI, IROS, ICLR, NeurIPSなどの国際会議で、AIと脳に関するワークショップを企画したり招待講演を行う形で、AI脳融合研究の世界的なコミュニティを牽引している。

このように、ともすると専門化により乖離する傾向にあった人工知能と脳科学を最接近させ、そこから革新的・創造的な学術研究の発展を促すという当領域のねらいは新たな研究潮流として定着し、本報告書で報告したように当領域メンバーによるものを含め、新たな研究成果を多数生み出しつつある。





## ● 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和3年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

人工知能と脳科学の融合領域の若手の育成に向け、総括班育成支援委員会を中心に以下のチュートリア企画を主催、共催した。

### 主催企画

「人工知能と脳科学の対照と融合」第1回若手サマースクール. 2017/8/2-4. 理化学研究所

[http://www.brain-ai.jp/jp/summer\\_school2017/](http://www.brain-ai.jp/jp/summer_school2017/)

参加者 30 名、講師 10 名

「人工知能と脳科学の対照と融合」第2回若手サマースクール. 2019/7/31-8/2. 理化学研究所

[http://www.brain-ai.jp/jp/summer\\_school2019/](http://www.brain-ai.jp/jp/summer_school2019/)

参加者 30 名、講師 10 名

### 共催企画

Initiative for a Synthesis in Studies of Awareness (ISSA) Summer School. 2017/5/22-6/2,

CiNet, Osaka University. <https://groups.oist.jp/issa>

IRCN 神経科学コンピューテーションコース. 2019/3/21-24. 東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構

[https://ircn.jp/neuro\\_inspired](https://ircn.jp/neuro_inspired)

また総括班育成支援委員会および国際活動支援班では、学生やポスドク研究者を国内・海外の共同研究先との間での派遣招聘するプログラムを実施した。

- 海外派遣 5 件
- 海外招聘 9 件
- 国内派遣招聘 5 件
- サマースクール参加者旅費 第1回 25 件、第2回 25 件

海外派遣は、DeepMind, Google Brain などの研究者との国際会議共著論文の採択につながり(Paramas et al. ICML 2018, Viellard, Kozuno et al. NeurIPS 2020, Furuta et al. ICML 2021)、若手研究者のキャリア形成にも大きく役立った。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 1. 大森 隆司（玉川大学教授）

本研究領域は、(1)脳科学へのAI技術の適用、(2)脳科学の知見からのAIの新概念の構築への貢献、(3)脳科学とAIの融合研究を推進する研究者の育成、という3つの目標があった。

- (1) 脳科学へのAI技術の適用については、AIのデータ分析の理論や手法は脳科学分野で従来は困難であった課題を解決する有力な道具となり、本研究領域においても多くの共同研究が実施されている。その成果は、動的ベイズ推定の概念の導入や大脳皮質における大規模神経回路の振る舞いを説明する確率モデルの検討など、新たな理論モデルの開発という形で表れつつある。まさに、新学術領域の構築の一つの表れと理解できる。
- (2) 脳科学からAIへの貢献については、従来よりAIの発展の多くは人や動物の知的行動からのヒントによる開発目標の設定という形であり、特定の知見が直接にAIの新技术につながるものではない。その意味で、本研究領域においても脳の総体的な姿の理解はAI研究者の研究の方向性に大きな影響を与えており、階層ロボット制御、並列強化学習、逆強化学習などの個別の研究成果だけでなく、Deep Learningと記号処理の融合や脳を確率生成モデルのネットワークと考えるSERKETなど、汎用的なAIの設計原理につながる新しい概念の開発に寄与している。その成果が具体的な姿を取るのはまだ時間がかかると思われるが、本研究領域の意義が大いに発揮された成果と考えられる。
- (3) 脳科学とAIの融合研究は必然的に求められるものではあるが、自動的に実現されるものではなく、本研究領域のように意図的に推進して研究者を育成しなければ定着しない。そこで重要なのは、若手の研究者がこの分野を目指すことであるが、それには脳科学およびAIの両分野のトップレベルの研究者が研究を行う姿を若手に見せることが、効果的である。その意図により2020年度に行われた世界的に著名な研究者と日本の研究者の協働による国際シンポジウム、Neural Networks特集号などにより、AIと脳科学を融合する国際的なネットワークの形成に成功した。この分野での今後の若手研究者の活躍が期待できる。

### 2. 北澤 茂（大阪大学大学院・生命機能研究科・教授）

本領域は、人工知能研究と脳科学研究を結び付けて、新たな学習アルゴリズムを開発して脳機能の解明を目指す意欲的な融合領域として発足した。A01「知覚と予測」班はパターン認識で成功を収めた人工神経回路がなぜ成功したのかを情報理論に立脚して理論的に解明し、さらに大脳皮質が階層ベイズ推定を行っているという仮説を検証することを目標として掲げた。A02「運動と行動」班は多自由度系で限られたデータから必要十分な内部モデルを学習する脳の仕組みの解明と、それに基づく人型ロボットの学習制御を実現すること、を目標とした。A03「認知と社会性」班は認知機能を支える分節化の機構を解明して、ヒト型ロボットでの見まね学習や意図の推定に適用を計ることを目標とした。さらに領域全体として、人工知能と脳科学の融合領域を切り開く人材を育成すること、を目標として掲げた。

5年間の研究を通じて、A01班はベイズ推定の重要な要素である事前確率がセロトニン神経の活動に依存していることを明らかにするとともに、前頭眼窩野と内側前頭前野に異なる内部モデルが機能していることを明らかにした(Nat Commun 2018, Sci Advances 2020)。大脳皮質の錐体細胞で樹状突起から細胞体への情報損失を最小化するという原理で学習則を導出した公募深井班の研究成果(Nat Commun 2020)も注目に値する。

A02班はヒトや動物の多彩な運動機能とその階層的な脳機構にならった制御アーキテクチャを開発し、ヒューマノイドロボット制御による検証を行なった。新規に開発したアーキテクチャを用いて、前後横への歩行、不整地でのスケートなど20以上の行動生成を可能とし、その中の複数の行動をなめらかにつないだ制御を可能なことを示した。

A03班は言語獲得過程のモデル化を通じて、ヒトの脳を多様な確率的生成モデルのネットワークとしてとらえ汎用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。以上の通り、各研究項目とも、当初掲げた目標を達成する見事な成果を挙げたと評価できる。

人工知能と脳科学の融合領域の人材育成に関しては、若手のサマースクールを4回にわたって開催し、さらに若手研究者を海外に派遣するプログラムを実施した。その結果、DeepMind, Google Brain などの研究者との国際会議共著論文が採択され若手研究者のキャリア形成に大きく役立った。また、2020年に開催した国際シンポジウムには全世界から1,800名以上の参加登録があり、それを契機とした特集論文誌には世界から50件以上の投稿が集まった。さらにIJCAI, ICLR, NeurIPSなど人工知能分野のトップレベルの国際会議でもAIと脳に関するワークショップが当領域のメンバーを交えた形で継続的に開催されている。つまり融合領域の人材育成と国際化にも十分以上の貢献をしたと言えるだろう。

以上の通り、本領域は乖離する傾向にあった人工知能と脳科学を再び融合し、そこから革新的・創造的な学術研究の発展を促すことに成功した。本領域が育んだ学術的な成果と人材によって、今後も新たな研究成果が多数生み出されることだろう。



