

領域略称名:人工知能と脳科学
領域番号:4805

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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～平成32年度

平成30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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究の進展状況	8
3. 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	11
4. 主な研究成果(発明及び特許を含む)	12
5. 研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等)	15
6. 研究組織(公募研究を含む)と各研究項目の連携状況	20
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	22
8. 研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む)	23
9. 総括班評価者による評価	24
10. 今後の研究領域の推進方策	26

研究組織

(総：総括班，支：国際活動支援班，計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総	16H06561 人工知能と脳科学の 融合研究の推進	平成28年度 ～ 平成32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 支	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 ～ 平成32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
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 ～ 平成32年度	松尾 豊	東京大学・大学院工学系研究科 (工学部)・特任准教授	3
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 ～ 平成32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 ～ 平成32年度	田中 啓治 (程康：平成28 年12月交替)	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 ～ 平成32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 ～ 平成32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・主幹研究員	2
A02 計	16H06567 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	平成28年度 ～ 平成32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 ～ 平成32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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 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 ～ 平成 32 年度	高橋 英彦	京都大学大学院・医学研究科・准 教授	1
総括・支援・計画研究 計 13 件					
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・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・情報理工・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・理学系・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・医学系研・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・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・准教授	1
A01 公	17H06035 霊長類腹側聴覚 経路の階層的 情報処理と音 環境の関係	平成29年度 ～ 平成30年度 (平成29年7 月辞退)	福島 誠	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	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・脳回路機能理論研究チーム・シニアチームリーダー	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・脳科学総合研究センター・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・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・脳科学総合研究センター・研究員	1
A02 公	17H06027 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	17H06025 大脳一小脳運動 適応多層回路の 解明	平成29年度 ～ 平成30年度 (平成29年7 月辞退)	松崎 政紀	東京大学・医学系研・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)・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WEB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・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・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	量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・研究員	1
公募研究 計 20 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

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ワークといった形で、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。

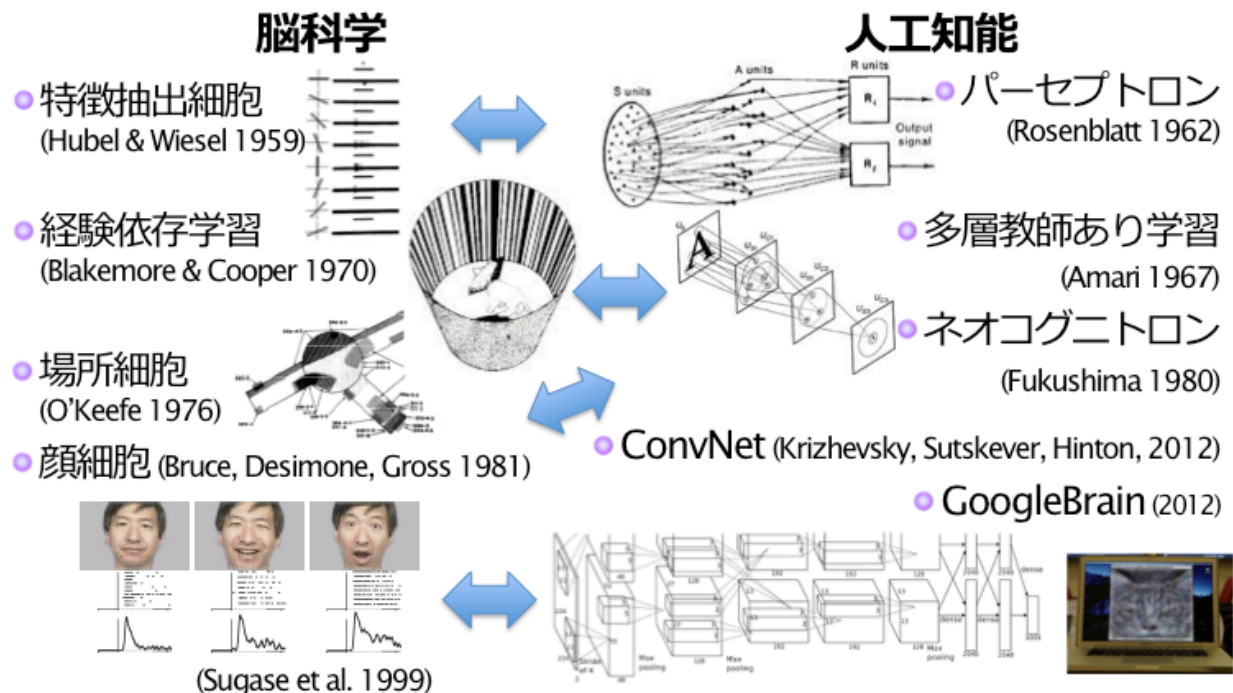


図1: 脳科学と人工知能の共進化

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) 我が国の学術水準の向上・強化への貢献

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。

2. 研究の進展状況 [設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する] (3 ページ以内)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

当領域では前述のように、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と、中長期的な全く新たな研究テーマの開拓をめざし、20 以上の新たな共同研究が展開している (6. 参照)。すでに論文として発表した成果は 4. で詳述し、ここでは各計画研究において新たに開始し進行中の研究について報告する。

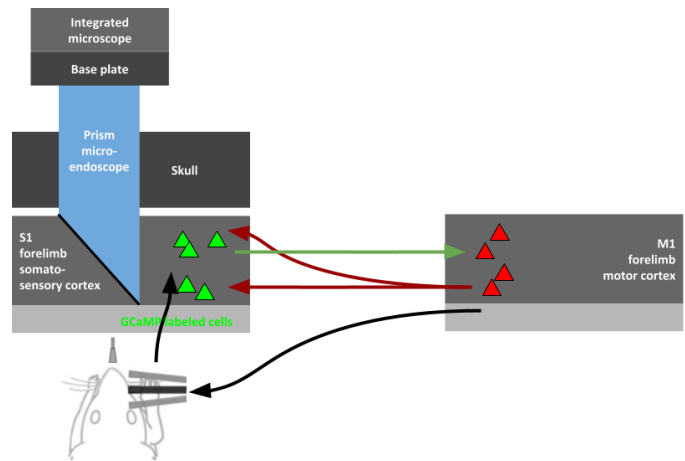
<A01: 知覚と予測>

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

記号処理を組み込んだ深層強化学習の研究を進めた。人間の学習においては状態空間の表現自体が経験の増加とともに洗練されてくる。そこで、状態表現を獲得する手法に関する研究を進めた。具体的には、部分的な観測を扱うニューラルネットワークのモデルとして、人間の視覚的注意を模倣した注意機構(attention mechanism)を持つモデルが提案されている。しかし、これらのモデルでは、注意機構の学習がタスクから定義される外的な報酬信号を用いた強化学習によって行われており、外部からの報酬信号が得られない問題設定下では注意機構の学習を行うことができない。そこで、特定のタスクに依存しない方法で注意機構を学習させ、状態の予測を行う手法を構築する。提案手法のアイデアは、(i) 内的な報酬の利用と(ii) 敵対的学習の二点である。まず、注意機構を用いたニューラルネットワークのモデルである Recurrent Attention Model (RAM) において、タスクから定義され注意機構に与えられていた外的な報酬の代わりに、1 時間ステップ後における観測の予測誤差を注意機構の内的報酬として与える。次に、観測の予測モデルと注意機構を敵対的な学習により訓練する。

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

大脳皮質の回路構造と機能をベイズ推定の視点から理解しようという理論仮説は広く注目を集めているが、その実験的検証はいまだ限られている。本研究では大脳皮質のベイズ推定仮説の検証に向け、それに最も適した行動実験課題と神経活動計測システムのデザインと実装を進めている。頭部を固定したマウスにモーター駆動されるレバーの押し/引き行動を行わせ、レバーの動く方向の感覚識別課題と、レバーの抵抗の変化による予測と感覚フィードバックの不一致課題を実現する。そのもとで一次体性感覚野(S1)に刺入したプリズムレンズにより、皮質の異なる層のニューロンの活動をカルシウムイメージングにより同時計測する。行動実験系は 3D プリンタ等を



を活用してデザインと作成を完了し、脳広域の血流信号のイメージング中の前肢刺激によりターゲットとすべき脳部位の同定を行った。今後、行動課題のトレーニングと神経活動計測を進め、トップダウンの予測による事前確率、ボトムアップの感覚入力による尤度、それらの不一致によるエラー情報とそれらを統合した事後確率が、大脳皮質の異なる層のニューロンによりいかにコードされているかを解析する。

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

自動化とトップダウン制御の効率的なバランスを取った認知制御システムの開発を目指して、教示された規則による反応を、刺激が自動的に引き起こす反応セットが妨害する心理パラダイムを作成した。具体的には、刺激の色が指定する方向のボタン押しを行うように被験者に教示し事前訓練したが、色刺激に重ねた矢印により矢印方向への反応が自然に励起され、条件によって、矢印方向への反応が色指定方向への反応を促通または妨害した (図 2)。一致条件試行の後の試行では、中立条件試行の後の試行よりも反応時間が長い傾向があった。

各被験者の大脳皮質上で 100 ボクセルの関心領域 (ROI) 約 2 万個の活動パターンをマルチボクセルパターン解析で解析した結果、前頭眼窩野外側部の局所領域の活動パターン的一致条件試行と競合条件試行の間の違いが、前試行が中立条件であった場合に比べ、前試行が一致条件であった場合の方が有意に大きくなった。さらに、前試行の影響が前頭眼窩野の活動パターンの差に強く現れる被験者ほど、前試行条件が現試行での反応時間に強い影響を与えた。この結果は、前頭眼窩野外側部が、前試行での反応セットの情報を維持し、これを使って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を示唆する。

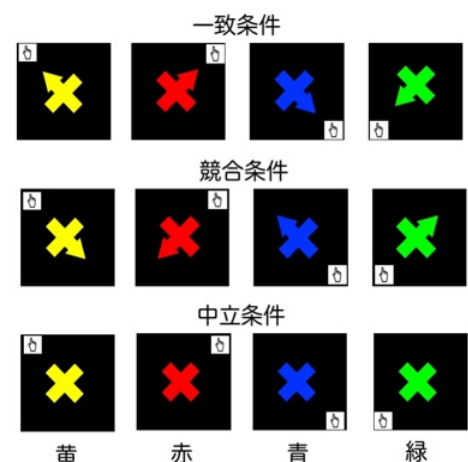
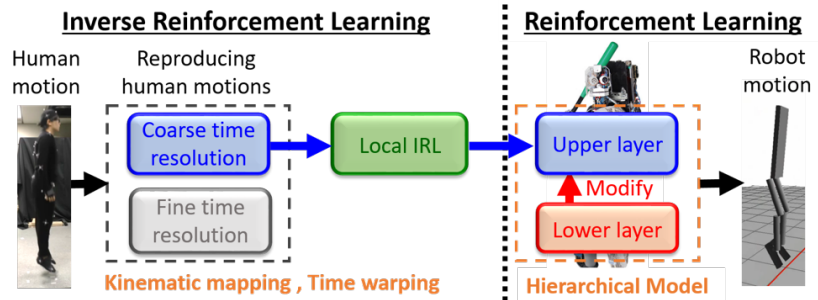


図2 色一方向反応(教示した規則)と矢印方向反応(自然に起こる)の関係についての3条件。小さい指マークで色が指定する反応方向を示す。

<A02: 運動と行動>

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

逆強化学習の枠組みを基礎としたヒト動作データからの内部目的関数モデルの推定とそれを用いたヒューマノイドロボットモデルの動作生成を行った。複数の動作についてヒトの動作データをモーションキャプチャシステムにより取得し、そのデータに基づいて内部目的関数モデルを導出した。ヒューマノイドロボットモデルの階層構造に対応した逆強化学習

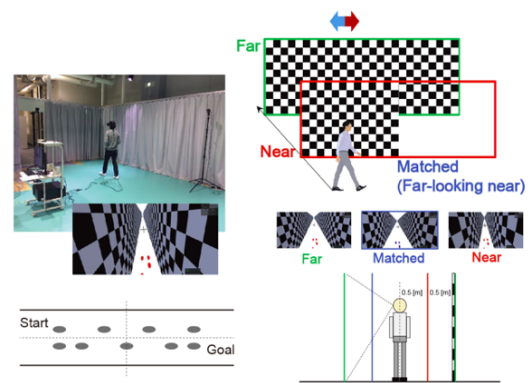


手法を提案し、推定した内部目的関数をオンラインでの動作生成にシームレスに応用可能とした（図参照）。

また、A03-1 谷口らと共同で二重分節解析を他者動作の解析に応用するための検討を進めた。具体的には、現在一つの動作目的に対して逆強化学習の枠組みを適用しているのに対して、一連のヒトの動作から複数の動作目的の分節構造をデータから解析するための方法論の開発を推進している。

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

感覚情報の予測過程と誤差の帰属過程という視点から潜在的情報処理メカニズムを調べる問題に対して、(1) 視覚情報が歩行制御に与える影響や、(2) 視覚フィードバック変容に対する体性感覚反射の変化について検討した。(1) では、オブティクフローに基づく無意識的な歩行速度の調節は、周辺対象の距離変化に対しロバストであるが、視覚情報の奥行き手がかり依存であることが新たに示された。(2) では、新奇の視覚フィードバックを与えた運動における長潜時の伸張反射変化を調べた結果、従来は視覚入力とは切り離されて考えられていた体性感覚反射応答が有意に減弱することが明らかになり、比較的短潜時の反射生成においても、体性感覚・視覚を融合した高度な予測・誤差帰属の情報処理・調整機構の存在が示唆された。

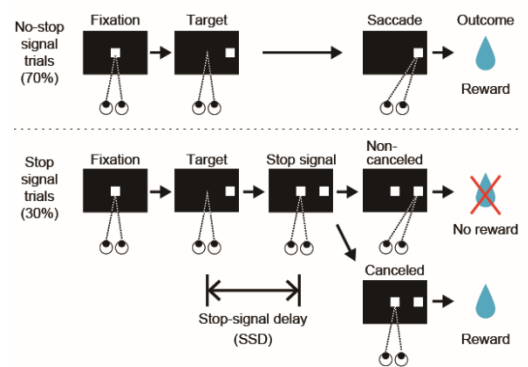


さらに潜在的感觉運動情報処理の電気生理的な解明を試みる研究として、運動タスク課題下での電気生理実験をおこなう環境の整備やサルの到達腕運動トレーニングを行うとともに、視覚運動解析に関わる MT/MST 野の不活化破壊実験結果の再解析などを行なった。

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

行動抑制に関わるドーパミンの salience 信号の役割を解析することを目的に、行動抑制課題遂行中のサルのドーパミンニューロンおよび背外側線条体から神経活動を記録した。サルが行動を抑制するように指示されたタイミングで、多数のドーパミンニューロンと背外側線条体ニューロンの神経活動が上昇することが観察された。特に、サルが行動の抑制に成功したときはこれらの神経活動の上昇幅は大きく、失敗した特はその上昇幅は有意に低下していた。また、行動抑制時に神経活動の上昇が見られたドーパミンニューロンは、黒質緻密部の背外側に集中しており、ドーパミンの salience 信号と行動抑制との関係が推察される。

サルが行なう行動抑制課題



次に、背外側線条体に伝達されるドーパミン信号と行動抑制との因果関係を解析するため、背外側線条体にドーパミン拮抗薬を注入したところ、サルの行動抑制の能力が有意に低下した。以上の結果から、黒質緻密部の背外側から背外側線条体に伝達されるドーパミンの salience 信号が、行動抑制の実行に重要な役割を果たすことが推察される。

A02-4 疋田貴俊：報酬/目的指向行動の神経回路機構

研究代表者が作製したヒト変異型 DISC1 トランスジェニックマウスを精神疾患遺伝モデルマウスとし、社会的孤立ストレスを思春期に与えることで、成年期の報酬場所学習行動の障害と、海馬場所細胞の報酬関連活動の消失を見いだしている。一方、精神疾患の早期診断につなげるために、ストレス負荷なしでみられる異常行動をスクリーニングしたところ、図形識別課題の成績低下と忌避学習の障害を見いだした。これらの異常報酬行動は側坐核の間接路遮断でみられることから、DISC1 マウスの側坐核の間接路を Designer Receptor Exclusively Activated by Designer Drugs (DREADD) 法で刺激を行うと、これらの行動を正常化できた。現在、他の精神疾患モデルマウスの報酬行動を調べ、各精神疾患特異的な報酬行動の障害の同定を試みている。

<A03: 認知と社会性>

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

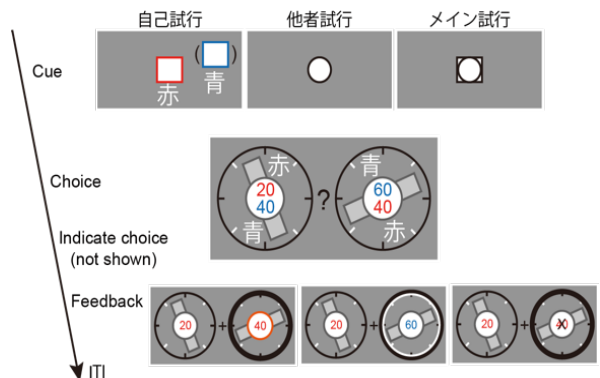
二重分節解析の脳内計算過程を明らかにするために、言語理解と脳活動のデータ取得の実験環境構築を行った。また動的カテゴリ形成に関して、概念の流動性について行動実験を行って検証した。同じ対象を異なる表記によって適用される概念・知識が異なるか行動実験を用いて検証した。その結果、使用頻度の低い表記方法は使用頻度の高い表記方法に比べより具体性の高い特性が想起されることが分かった。

さらに統合失調症患者における脳内計算過程の疾患の解明に関して共同研究を進める上での基礎的調査をA03 高橋と共にを行った。臨床の知見、見解と、確率的統計モデルに基づく他者モデルやコミュニケーションの理解を対照し融合することで、これまで全く異なる次元で捉えられていた幻聴と動的カテゴリ形成、他者モデルを統一して説明しうる作業仮説を得るに至った。

また、認知実験から文理解時に発生する知覚運動シミュレーションの性質を検討し、文の時制と文で記述された行為の速度に関係があることから、概念は身体と連動し、シミュレーションされている可能性を示した。これらをもとに、fMRIによる脳活動計測実験の予備実験を行った。

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

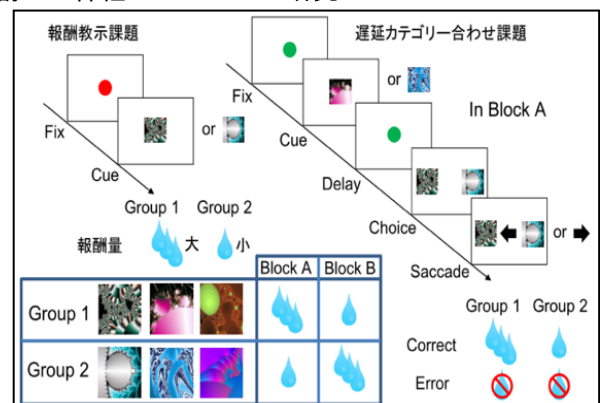
本研究のねらいは、これまで得られた「通常の（自己報酬にかかわる）価値意思決定」と「他者の価値意思決定のシミュレーションと予測」の知見をもとに、「他者の予測を活用することが必要な自己報酬の価値意思決定」の脳計算を調べることである。課題では、この3つを自己試行、他者試行、メイン試行で調べた（図参照）。これにより「脳内他者を用いた他者予測」と「その予測を用いた適切な意思決定」の脳計算を、fMRI計測と意思決定モデルをもとに解析した。これにより、意思決定（行動選択）の主変数を脳計算として、行動と脳活動の両方のデータを参照し、その脳計算の検討および神経基盤の解明を進めた。その結果、「他者予測」の脳活動とそれを生かした「自己意思決定」の脳活動が近傍の脳部位で実現していることが明らかになった。



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

推論実験のための課題の開発、その課題を使ったサルでの訓練、ニューロン活動記録の準備を行った。本研究では、推移的推論はカテゴリ推論がベースになっていると仮定している。カテゴリ推論はその刺激メンバーの間に等価性が成り立つことが前提となる。課題は視覚刺激を使った遅延見本合わせ課題で、A→BかつB→C、ならばA→Cを予測できるかどうか調べるものである（推移的推論）。また、B→Aの関係をA→Bの学習から推測できるかどうか調べる（対称性推論）。

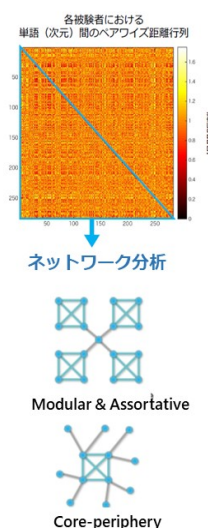
現在2頭のサルにこの課題を訓練し、遅延見本合わせ課題が遂行できるようになり、現在、対称性と推移性に関する行動実験を進めている。



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

概念形成障害の神経基盤の理解に向け、統合失調症患者 14名と健常者 17名を対象として、自然動画刺激下における脳活動を fMRI を用いて計測した。動画をアノテーションして得られた文章を Bag-of-Words モデルによりベクトル化し、fMRI データを出力として正則化線形回帰によりモデルを推定し、各単語の脳内意味表象ベクトルを計算した。グラフ理論に基づくネットワーク分析を行い、患者と健常者における脳内意味ネットワーク構造を定量的に評価し、精神症状・認知機能との関連を調べた。

ネットワーク分析において、統合失調症患者では健常者よりも Assortativity, Modularity が低く、カテゴリ内およびカテゴリ間の接続不全、上位・下位概念といった抽象度の混雑が示唆された。一方、患者において Node Coreness は高く、ある上位概念の下に本来は他のカテゴリの下位概念になるべきものが繋がるなどの意味構造の解体が示唆された。このように統合失調症患者では、健常者で見られる整然とした脳内カテゴリ構造が失われ、さらに、その解体の程度が高いほど、意欲減退などの陰性症状が重度で、生活技能や社会機能が低かった。



3. 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（2 ページ以内）

審査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、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

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、またロンドン、屯内（韓国）、パリで合同ワークショップを行うなど、国内、世界のトップレベルの研究者も交えた刺激的な議論の中で、人工知能と脳科学の融合研究へ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。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題(公募研究を含む)により得られた研究成果(発明及び特許を含む)について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限ること**とします。

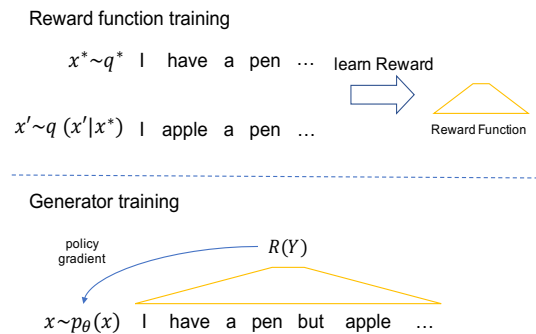
以下の成果は、査読付き国際学会または学術論文誌に発表されたものである。

<A01: 知覚と予測>

Toyama J, Iwasawa Y, Nakayama K, Matsuo Y (2018) Expert-based reward function training: the novel method to train sequence generators. International Conference of Learning Representation (ICLR 2018) Workshop.

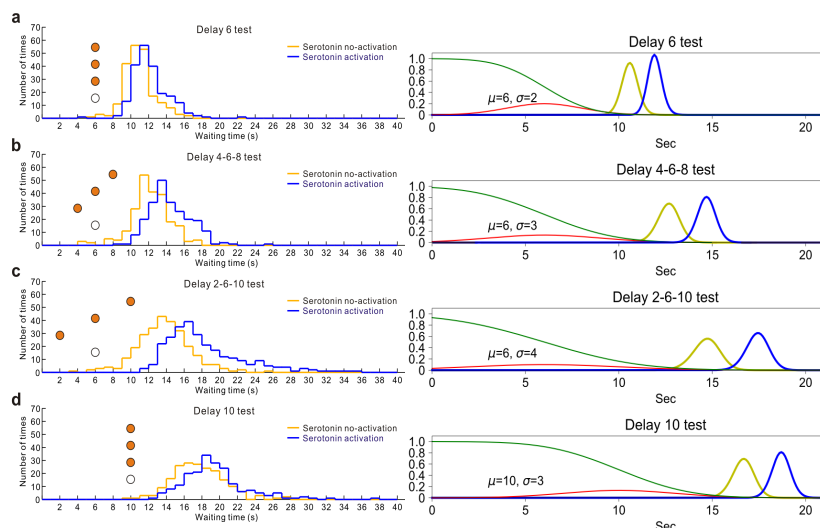
文章(ソース文)から画像を生成し、それを別の言語での文章(ターゲット文)に変換するニューラル機械翻訳(NMT)の前段階として、単語列の生成モデルの学習の改善を試みた。

これまでGenerative adversarial network (GAN)と強化学習の組み合わせが用いられてきたが、エキスパートによる系列とネットワークが生成した系列の類似度をもとに新たな報酬関数を設定することにより、敵対的な学習を行わなくとも高い性能が得られることを明らかにした。



◎ ▲ Miyazaki K, Miyazaki KW, Yamanaka A, Tokuda T, Tanaka KF, Doya K (2018) Reward probability and timing uncertainty alter the effect of dorsal raphe serotonin neurons on patience. *Nature Communications*, 9:2048.

セロトニン強化学習における遅延報酬の割引率を制御するという仮説にもとづき、報酬待機課題中のマウスの背側縫線核のセロトニンニューロンを光遺伝学手法により刺激する実験を行った。セロトニン刺激は報酬待機行動を促進したが、それは報酬確率が高いときに限られ、さらに報酬獲得のタイミングが不確かなときほど効果が高いという新たな知見が得られた。これは従来のモデルフリー強化学習の枠組みでは説明することができないため、マウスは報酬提示時間の確率的モデルを持ち、そのセッションでの報酬の事前確率をもとにベイズ推定により報酬の有無を判断するという新たなモデルを提示した。シミュレーションにより、セロトニンニューロンの刺激は報酬の事前確率を高めるとすると実験データを再現することができた。この結果は、セロトニンが報酬獲得の確信度の制御に関わることを示唆している。



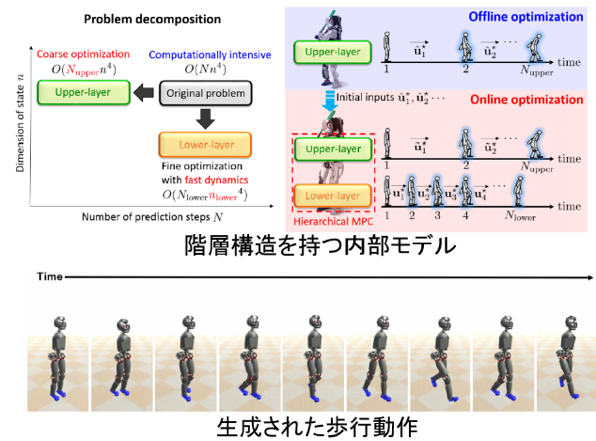
Kass RE, Amari S, Arai K, Brown EN, Diekmann CO, Diesmann M, Doiron B, Eden U, Fairhall A, Fiddyment GM, Fukai T, Grun S, Harrison MT, Helias M, Nakahara H, Teramae J, Thomas PJ, Reimers M, Rodu J, Rotstein HG, Shea-Brown E, Shimazaki H, Shinomoto S, Yu BM, Kramer MA (2018) Computational neuroscience: Mathematical and statistical perspectives. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 5, 183-214.

脳科学の発展に伴い、計算脳科学さらには情報統計科学・機械学習・人工知能の数理との融合がますます大切になりつつある。本論文はその融合をめざす日米の研究者のネットワークでの議論をもとに、動的な神経活動を把握するための点過程の統計数理を中心に、さらには神経細胞集団活動からベイズ理論や強化学習のマクロな数理までの展開をまとめた論文である。

<A02: 運動と行動>

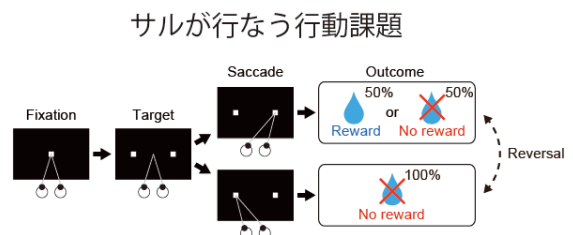
◎ ▲ *Ishihara K, Morimoto J, (2018) An optimal control strategy for hybrid actuator systems: application to an artificial muscle with electric motor assist, **Neural Networks**, 99, 92-100.

ヒューマノイドロボットモデルの動学的階層構造を導出し、階層ごとに異なるモデル予測の時間的な長さおよび、異なる制御周期を導入することにより、多自由度のヒューマノイドモデルにおいても実時間での運動制御出力の導出が可能であることを示した(右図参照)。また、本運動学習手法の実ロボットへの応用に向けた実環境での検証として、アクチュエータ制御への実装を完了した。

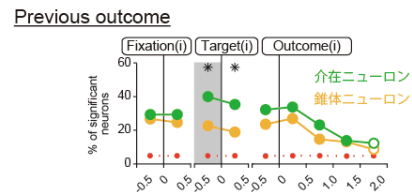


▲ Kawai T, Yamada H, Sato N, Takada M, *Matsumoto M (2018) Preferential Representation of Past Outcome Information and Future Choice Behavior by Putative Inhibitory Interneurons Rather Than Putative Pyramidal Neurons in the Primate Dorsal Anterior Cingulate Cortex. **Cerebral Cortex**.

最適な行動を選択するためには、過去にその行動の結果として何が生じたのかを記憶し、その情報に基づいて次の行動を選択する必要がある。このような過去の報酬情報に基づいた意思決定には、ドーパミンニューロンから報酬情報を受ける取る前部帯状皮質が重要な役割を果たすことが知られている。たとえば、前部帯状皮質には過去の報酬情報を保持するニューロンや、次にどの行動を選択するのかをコードするニューロンが存在する。本研究では、このような前部帯状皮質の機能を実現する神経回路を明らかにすることを目的に、その投射が前部帯状皮質内に限られる介在ニューロンと、前部帯状皮質の外に投射を送る錐体ニューロンが、それぞれどのような情報をコードしているのかを解析した。サルが過去の報酬情報を基に行動を選択する課題をおこなっているとき、前部帯状皮質の介在ニューロンと錐体ニューロンから神経活動を記録すると、より多くの介在ニューロンが過去の報酬情報や次の試行でサルがどのような行動を選択するのかの情報をコードしていた。報酬や行動選択に関わる情報は、背外側前頭前野や運動前野などに伝達されて動物の意思決定を実現すると推測できるため、前部帯状皮質の外に投射しない介在ニューロンの方がこれらの情報をコードしていたことは大きな驚きであるが、一つの可能性として、前部帯状皮質内に報酬情報を行動選択に関わる信号に変換する仕組みがあるのではないかと推測される。



各情報をコードする前部帯状皮質ニューロンの比率



▲ 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**.

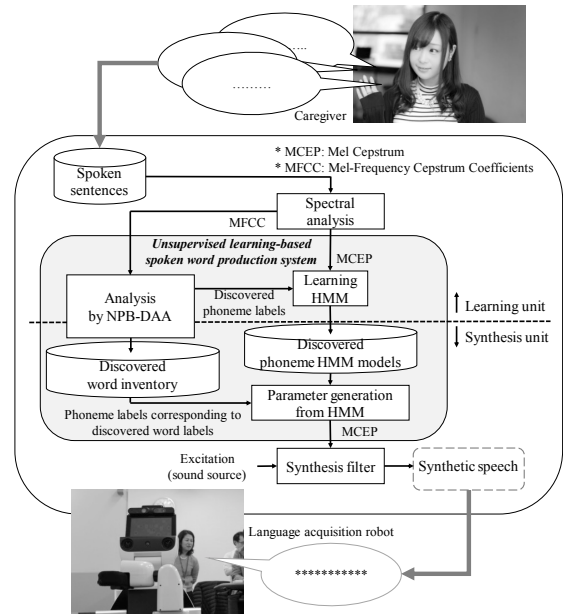
報酬/目的指向行動の神経機構を調べるために、タッチスクリーン学習装置を用いたマウスに対する報酬学習課題を確立した。本研究では、側坐核、背側線条体内側部、背側線条体外側部のそれぞれに、大脳基底核神経回路の直接路あるいは間接路に特異的な可逆的神経伝達法(RNB法)を適用した。タッチスクリーンに表示されるキュー(CS)と報酬を関連づけさせる報酬学習課題を行うと、CSにアプローチをする sign-tracking 行動が学習と共に増加したが、この増加は側坐核の直接路遮断により特異的に消失した。さらに、図形識別学習課題において RNB 法の影響を調べると、側坐核の直接路遮断(D-RNB)が学習初期に影響を与えるものの学習遅延がなかったが、間接路遮断(I-RNB)によって学習期間全体の有意な成績低下が生じた。これらから、報酬/目的指向行動において、側坐核の直接路と間接路が異なる役割を担っていることを示した。



<A03: 認知と社会性>

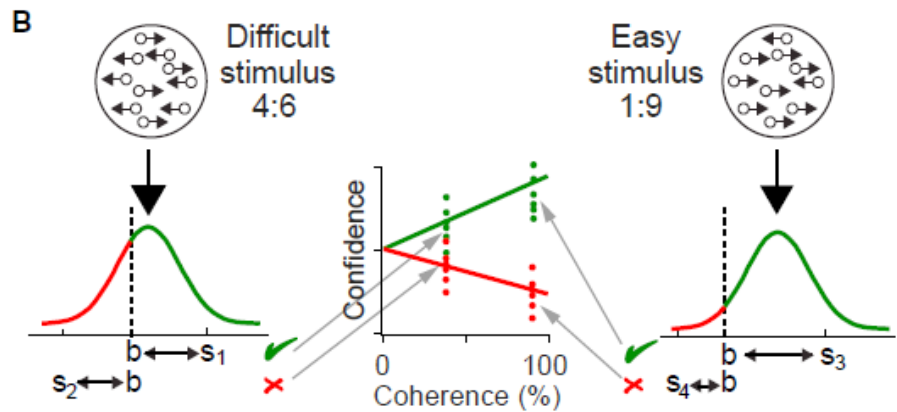
▲Y. Miyuki, Y. Hagiwara, *T. Taniguchi (2017)
 Unsupervised learning for spoken word production based on simultaneous word and phoneme discovery without transcribed data. IEEE International Conference on Development and Learning and the International Conference on Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2017).

人間によるラベル付きデータを要さず、完全に音声データのみからの教師なし学習により、音素と語彙を獲得し音声合成を行うことの出来るシステムを筆者らが提案したノンパラメトリックベイズ二重分節解析器に基づいて構築した。従来の音声合成は大量の書き文字の人手によるアノテーションデータと、音声データを必要とした。しかし、これは人間の脳の発達プロセスのモデルとして考えると妥当ではない。そこで、音声データのみから音素と語彙を獲得し、それらを音声合成出来る手法を開発した。日本語母音を元に構成された音声データに対して適用し、被験者実験を行ったところ、十分に判別可能な音声合成結果を得ることが出来た。



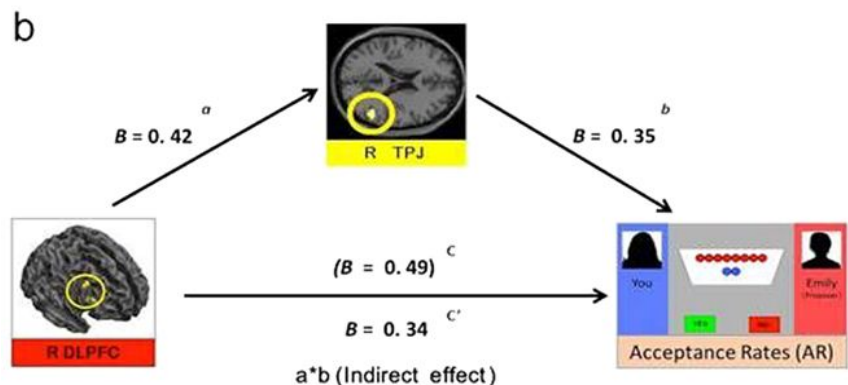
▲Lak A, Nomoto K, Keramati M, Sakagami M, Kepecs A (2017) Midbrain dopamine neurons signal belief in choice accuracy during a perceptual decision. *Current Biology*, 27, 6, 821-832.

中脳のドーパミンニューロンは、報酬経験に基づき、報酬予測誤差情報を計算していると考えられてきた。我々は、信号検出理論に基づく理論モデルの構築（図参照：b、判断基準；緑、正反応；赤、誤反応）により、報酬予測誤差情報が主観化された場合、どのように confidence を反映するかを理論的に予測した。実際にランダムドット動き弁別課題を使った実験を行った結果、サルドーパミンニューロンは、報酬予測誤差だけでなく、刺激知覚の confidence も反映することを見出した。



▲Tei S, Fujino J, Kawada R, Jankowski KF, Kauppi JP, van den Bos W, Abe N, Sugihara G, Miyata J, Murai T, *Takahashi H. 7(1):6415 (2017).

健常者を対象に知覚・認知・意思決定の柔軟性に関わる神経基盤を、fMRI を用いて明らかにした。知覚・認知・意思決定といった様々なレベルのドメインの柔軟性に共通して右側頭-頭頂接合部が関連していることを見出した。今後、柔軟性の欠如があると想定される精神疾患において同部位の機能異常との関連を調べていく予定である。



5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2)発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

<査読付き国際会議または学術誌発表論文> 著者名+は “equal contribution” を示す

<A01 知覚と予測>

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

Shioya H, Iwasawa Y, Matsuo Y (2018) Extending Robust Adversarial Reinforcement Learning Considering Adaptation and Diversity. Proc. International Conference of Learning Representation (ICLR18) Workshop

Toyama J, Iwasawa Y, Nakayama K, Matsuo Y (2018) Expert-based reward function training: the novel method to train sequence generators. Proc. International Conference of Learning Representation (ICLR18) Workshop

Ohsawa S, Akuzawa K, Matsushima T, Bezerra G, wasawa Y, Kajino H, Takenaka S, Matsuo Y (2018) Neuron as an Agent. Proc. International Conference of Learning Representation (ICLR18) Workshop

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

▲ *Elfwing S, Uchibe E, Doya K (2018) Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning. Neural Networks, doi:10.1016/j.neunet.2017.12.012 (reviewed)

◎ ▲ *Magrans de Abril I, Yoshimoto J, Doya K (2018) Connectivity inference from neural recording data: Challenges, mathematical bases and research directions. Neural Networks, 102, 120-137. (reviewed)

▲ Parmas P, Rasmussen CE, Peters J, Doya K (2018) PIPPS: Flexible model-Based policy search robust to the curse of chaos. International Conference on Machine Learning (ICML 2018).

◎ ▲ Miyazaki K, Miyazaki KW, Yamanaka A, Tokuda T, Tanaka KF, 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 (2018) Reward-predictive neural activities in striatal striosome compartments. eNeuro, 5, 1, 0367. (reviewed)

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

Cheng K (2018) Exploration of human visual cortex using high spatial resolution functional magnetic resonance imaging. NeuroImage, 164, 43199. (reviewed)

Cheng K (2016) What we have learned about human primary visual cortex from high resolution functional magnetic resonance imaging. Magn Reson Med Sci, 15, 1, 43110. (reviewed)

◎ Wan X, Cheng K, and *Tanaka K (2016) The neural system of postdecision evaluation in rostral frontal cortex during problem-solving tasks. eNeuro, 3, 42759. (reviewed)

公募研究

A01 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

* Ikegami T, Mototake Y, Kobori S, Oka M, Hashimoto Y (2017) Life as an emergent phenomenon: studies from a large-scale boid simulation and web data. Phil.Roy.Soc (reviewed)

* Kojima H, Froese T, Oka M, Iizuka H, Ikegami T (2017) A Sensorimotor Signature of the Transition to Conscious Social Perception: Co-regulation of Active and Passive Touch. Frontiers in Psychology (reviewed)

* Sinapayen L, Masumori A, Ikegami T (2017) Learning by stimulation avoidance: A principle to control spiking neural networks dynamics. PLoS ONE (reviewed)

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

A01 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

▲ Takumi Ege and Keiji Yanai (2017) Image-Based Food Calorie Estimation Using Knowledge on Food Categories, Ingredients and Cooking Directions. ACM Multimedia Thematic Workshops on Understanding. (reviewed)

Yanai K (2017) Unseen Style Transfer Based on a Conditional Fast Style Transfer Network. International Conference on Learning Representation Workshop Track (ICLR WS). (reviewed)

A01 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

▲ Fujita K, Shinomoto S, Rocha LEC (2017) Correlations and forecast of death tolls in the Syrian conflict. Scientific Reports, 7, 15737. (reviewed)

▲ Furukawa M, Shinomoto S (2017) Inferring objects from a multitude of oscillations. Neural Computing and Applications, 43108, (reviewed)

A01 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

- ◎ Hashimoto H, Hasegawa Y, Araki T, Sugata H, Yanagisawa T, Yorifuji S, Hirata M. (2017) Non-invasive detection of language-related prefrontal high gamma band activity with beamforming MEG. *Scientific Reports*, 7, 1, 14262. (reviewed)
- ◎ Nakanishi Y*, Yanagisawa T*, Shin D, Kambara H, Yoshimura N, Tanaka M, Fukuma R, Kishima H, Hirata M, Koike Y (2017) Mapping ECoG channel contributions to trajectory and muscle activity prediction in human sensorimotor cortex. *Scientific Reports*, 7, 1, 45486. (reviewed)
- A01 Andrea Benucci : 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. (reviewed)
- A01 平山淳一郎 : 積層独立成分分析の深化と脳科学応用
▲ *Ogawa T, Moriya H, Yamada T, Kawanabe M, Hirayama J (2017) Prediction of resting state fMRI signatures from EEG signal: a study of EEG-fMRI simultaneous recording. *Real-time Functional Imaging and Neurofeedback Conference (rtFIN2017)*, Nara, Japan (reviewed)
- A01 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
◎ Choi M, *Tani J (2018) Predictive coding for dynamic visual processing: development of functional hierarchy in a multiple spatio-temporal scales RNN model. *Neural Computation*, 30, 1, 237-270. (reviewed)
▲ *Komatsu M, Sugano E, Tomita H, *Fujii N (2017) A Chronically Implantable Bidirectional Neural Interface for Non-human Primates. *Frontiers in neuroscience*, 11, 514. (reviewed)
- <A02 運動と行動>
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
◎ ▲ *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, 92-100. (reviewed)
◎ ▲ *Morimoto J (2017) Soft humanoid motor learning. *Soft humanoid motor learning*, 2, eaaq0989. (reviewed)
▲ * Hamaya M, Matsubara T, Noda T, Teramae T, Morimoto J (2017) Learning assistive strategies for exoskeleton robots from user-robot physical interaction. *Pattern Recognition Letters*, 99, 67-76. (reviewed)
▲ *Furukawa J, Noda T, Teramae T, Morimoto J (2017) Human movement modeling to detect bio-signal sensor failures for myoelectric assistive robot control. *IEEE Transaction on Robotics*, 33, 4, 846-857. (reviewed)
▲ *Rok Pahic, Andrej Gams, Ales Ude, Morimoto J (2018) Deep Encoder-Decoder Networks for Mapping Raw Images to Movement Primitives. *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2018)*. (reviewed)
▲ *Hamaya M, Matsubara T, Noda T, Teramae T, Morimoto J (2017) Learning task-parametrized assistive strategies for exoskeleton robots by multi-task reinforcement learning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2017)*. (reviewed)
- 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
J De Havas, Ito S, Haggard P, Gomi H (2018) Low gain servo control during the Kohnstamm phenomenon reveals dissociation between low-level control mechanisms for involuntary versus voluntary arm movements. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 12, 113. (reviewed, in press)
Takamuku S, Paul A. G. Forbes, Antonia F. de C. Hamilton, Gomi H (2018) Typical use of inverse dynamics in perceiving motion in autistic adults: Exploring computational principles of perception and action. *Autism Research*. (in press)
- A02-3 松本正幸 : 報酬と注意の情報処理に關与するドーパミン神経回路機構
▲ Takashi Kawai Hiroshi Yamada Nobuya Sato Masahiko Takada *Masayuki Matsumoto (2018) Preferential Representation of Past Outcome Information and Future Choice Behavior by Putative Inhibitory Interneurons Rather Than Putative Pyramidal Neurons in the Primate Dorsal Anterior Cingulate Cortex. *Cerebral Cortex*, rapid online publication. (reviewed)
- A02-4 疋田貴俊 : 報酬/目的指向行動の神経回路機構
▲ *疋田貴俊 (2017) 神経回路から精神疾患病態へ。 *日本生物学的精神医学会誌*, 28, 3, 132-134. (invited)
▲ *Hayashi Y, Yawata S, Funabiki K, Hikida T (2017) In vivo calcium imaging from dentate granule cells with wide-field fluorescence microscopy. *PLoS ONE*, 12, 7, e0180452. (reviewed)
▲ Kitanishi T+, Ito HT+, Hayashi Y+, Shinohara Y+, *Mizuseki K+, *Hikida T+ (2017) Network mechanisms of hippocampal laterality, place coding and goal-directed navigation. *J Physiol Sci*, 67, 2, 247-258. (reviewed)
▲ Morita M, Wang Y, Sasaoka T, Okada K, Niwa M, Sawa A, *Hikida T (2016) Dopamine D2L receptor is required for visual discrimination and reversal learning. *Molecular Neuropsychiatry*, 2, 3, 124-132. (reviewed)
- 公募研究
A02 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
▲ Ishida H+, Inoue K+, *Takada M (2018) Multisynaptic projections from the amygdala to the ventral premotor cortex in macaque monkeys: Anatomical substrate for feeding behavior. *Front Neuroanat.*, 12, 3. (reviewed)
*Galvan A, Stauffer WR, Ackerson L, El-Shamayleh Y, Inoue K, Ohayon S, Schmid M (2017) Nonhuman primate optogenetics: Recent advances and future directions. *J Neurosci.*, 37, 10894-10903. (reviewed)
- A02 内部 英治 : 並列深層強化学習
Uchibe E (2017) Model-Free Deep Inverse Reinforcement Learning by Logistic Regression. *Neural Processing Letters*. (reviewed)
▲ Uchibe E* (2018) Efficient Sample Reuse in Policy Search by Multiple Importance Sampling. *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*. (reviewed)

▲ *Stefan Elfwing, Uchibe E, Doya K (2018) Online Meta-Learning by Parallel Algorithm Competition. Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. (reviewed)

A02 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

◎ Fujiwara Y, Jongho Lee, Ishikawa T, Kakei S, *Izawa J (2017) Diverse coordinate frames on sensorimotor areas in visuomotor transformation. Scientific reports, 7, 1, 14950. (reviewed)

Tanno T, Horie K, Izawa J, Morita, M (2017) Robustness of selective desensitization percepton against irrelevant and partially relevant features in pattern classification. International Conference on Neural Information Processing, (ICONIP2017) 520-529. (reviewed)

<A03 知覚と予測>

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

▲ *HaiLong Liu, Taniguchi T, Takenaka K, Bando T (2018) Defect-repairable latent feature extraction of driving behavior via a deep sparse autoencoder. sensors, [journal] 18, 2, 608. (reviewed, DOI:10.3390/s18020608)

▲ *Taniguchi A, Taniguchi T, Inamura T (2017) Unsupervised Spatial Lexical Acquisition by Updating a Language Model with Place Clues. Robotics and Autonomous Systems, 99, 166-180. (reviewed, DOI: 10.1016/j.robot.2017.10.013)

▲ * Tada Y, Hagiwara Y, Taniguchi T (2017) Comparative Study of Feature Extraction Methods for Direct Word Discovery with NPB-DAA from Natural Speech Signals. IEEE International Conference on Development and Learning and the International Conference on Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob). (reviewed)

▲ *Yuusuke Miyuki, Hagiwara Y, Taniguchi T (2017) Unsupervised Learning for Spoken Word Production based on Simultaneous Word and Phoneme Discovery without Transcribed Data. IEEE International Conference on Development and Learning and the International Conference on Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob). (reviewed)

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

◎ 中原裕之 (2017) 社会知性を実現する脳計算システムの解明： 人工知能の実現に向けて. 人工知能学会誌, 32, 6, 863-872. (reviewed)

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

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

Yamagishi T*, Li Y, Fermin A, Kanai R, Takagishi H, Matsumoto Y, Kiyonari T, Sakagami M (2017) Behavioural differences and neural substrates of altruistic and spiteful punishment. Scientific Reports, 7, 1, 14654. (reviewed)

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. Proceedings of National Academy of Sciences U.S.A, 114, 24, 6394-6399. (reviewed)

▲ Lak A, Nomoto K, Keramati M, Sakagami M, Kepecs A* (2017) Midrain dopamine neurons signal belief in choice accuracy during a perceptual decision. Current Biology, 27, 6, 821-832. (reviewed)

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

▲ Fujino J, Tei S, Jankowski KF, Kawada R, Murai T, *Takahashi H. (2017) Role of spontaneous brain activity in explicit and implicit aspects of cognitive flexibility under socially conflicting situations: a resting-state fmri study using fractional amplitude of low-frequency fluctuations. Neuroscience, 367, 60-71. (reviewed)

▲ Fujimoto A, Tsurumi K, Kawada R, Murao T, Takeuchi H, Murai T, *Takahashi H. (2017) Deficit of state-dependent risk attitude modulation in gambling disorder. Transl Psychiatry. (reviewed)

▲ Fujino J, Tei S, Hashimoto RI, Itahashi T, Ohta H, Kanai C, Okada R, Kubota M, Nakamura M, Kato N, *Takahashi H. (2017) Attitudes toward risk and ambiguity in patients with autism spectrum disorder. Mol Autism, 8, 45. (reviewed)

▲ Tei S, Fujino J, Kawada R, Jankowski KF, Kauppi JP, van den Bos W, Abe N, Sugihara G, Miyata J, Murai T, *Takahashi H. (2017) Collaborative roles of temporoparietal junction and dorsolateral prefrontal cortex in different types of behavioural flexibility. Sci Rep, 7, 1, 6415. (reviewed)

▲ Takeuchi H, Tsurumi K, Murao T, Takemura A, Kawada R, Urayama SI, Aso T, Sugihara GI, Miyata J, Murai T, *Takahashi H. (2017) Common and differential brain abnormalities in gambling disorder subtypes based on risk attitude. Addict Behav., 69, 48-54. (reviewed)

公募研究

A03 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, 12, 1780-1786. (reviewed)

◎ *Christopher A Hill, Suzuki S, Rafael Polania, Marius Moisa, John P O'Doherty, Christian C Ruff (2017) A causal account of the brain network computations underlying strategic social behavior. Nature Neuroscience, 20, 8, 1142-1149. (reviewed)

A03 小村 豊： 予測符合化モデルと、自律推論する脳機構との照合

◎ 野口真生、藤本蒼, *小村豊 (2018) メタ認知からみた意識の生物学. 人工知能学会誌, 33, 4, in press. (invited)

A03 山下 祐一： 深層学習を用いた精神疾患の計算論的検査・評価法の開発

◎ ▲ * Katahira K, Yamashita Y (2017) A theoretical framework for evaluating psychiatric research strategies. Computational Psychiatry, 1, 184-207. (reviewed)

A03 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. *J Neurosci Methods*, 286, 102-103. (reviewed)

<書籍>

Tanaka K, Mark J. Buckley, Farshad A. Mansouri (2017) Functional division among prefrontal cortical areas in an analog of Wisconsin Card Sorting Test. Prefrontal cortex as an executive, emotional and social brain, (ed.) Watanabe M, Springer, pp. 17-38, Springer. (Book chapter)

<招待講演等>

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

松尾豊 (2018) たゆたうシンボル. 公開シンポジウム「深層学習の先にあるもの—記号推論との融合を目指して」. 東京大学.

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

Doya K (2018) Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation. Canonical Computation in Brains and Machines Symposium, New York University, USA, 2018.3.18. (invited)

Doya K (2018) Neural circuits for reinforcement learning and mental simulation. Brain and AI Symposium Korea, Gold Hall and Ruby Hall, Dunnae, South Korea, 2018.1.30. (invited)

Doya K (2017) What can we further learn from the brain?. 24th International Conference on Neural Information Processing ICONIP2017, Guangzhou, China, 2017.11.16. (invited)

Doya K (2017) Neural mechanisms of reinforcement learning and mental simulation. Workshop on "Human & Machine Learning" Beijing Institute of Technology, China, 2017.8.16-18. (invited)

Doya K (2017) What should we further learn from the brain?. Brain-AI Workshop, NYU Shanghai, Shanghai, China, 2017.7.7. (invited)

Doya K (2017) What should we further learn from the brain?. Korean AI Flagship Project Workshop, Kyungpook National University, Daegu, Korea, 2017.7.3 (invited)

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

Tanaka K (2017) Object recognition in inferotemporal cortex: from visual features to semantics. Asian-Pacific Conference on Vision (APCV), Tainan, Taiwan (基調講演, invited)

Tanaka K (2017) Object recognition in inferotemporal cortex: from visual features to semantics. 2017 Qufu Vision Science Conference, Qufu, China (基調講演, invited)

Tanaka K (2016) Brain mechanisms of intuitive problem solving in experts. The 19th Annual Meeting of the Korean Society for Brain and Neural Science, KINTEX, Seoul, Korea. (シンポジウム)

公募研究

Benucci A. (2017) Sensory Representation Plasticity Driven by Single Neurons in the Mouse Cortex. San Francisco, CA (Invited talk)

Fukai T (2018) Sequence learning through reverse replay and preplay in hippocampal circuit models. (conference) Barcelona, Spain (invited)

Asabuki T, Hiratani N, Fukai T (2017) Chunking by mutual supervision in reservoir computing. Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2017), Moscow-St. Petersburg, Russia (invited)

Chikazoe J (2017) Integrated Taste Type Representations in Human Insula. 2017 Yonsei Univ-Korea Univ-NIPS Symposium. Yonsei University, Seoul, Korea

Yanagisawa T, Fukuma R, Seymour B, Hosomi K, Kishima K, Shimizu T, Yokoi H, Hirata M, Yoshimine T, Kamitani Y, Saitoh Y (2017) Magnetoencephalographic-based brain-machine interface robotic hand for controlling sensorimotor cortical plasticity and phantom limb pain. ECCN, Budapest, Hungary. (invited)

Shinomoto S (2017) Emergence of cascades in the linear and nonlinear Hawkes processes. Brain Dynamics and Statistics: Simulation versus Data, Banff, Canada. (invited)

Shinomoto S (2017) Inferring the source of fluctuation in neuronal activity. CRCNS 2017, Providence, USA. (invited)

Ikegami T (2017) The future of AI in the arts. Japan Foundation Sydney. (invited)

Ikegami T (2017) Passive touch, stimulus avoidance, and the android "Alter". Int'l Society for Theoretical Psychology, (invited)

Uka T (2017) Neural mechanism of flexible sensory decision making. The 12th Biennial Conference of Chinese Neuroscience Society. (invited)

<A02 運動と行動>

A02-4 疋田貴俊 : 報酬/目的指向行動の神経回路機構

*Hikida T (2017) Basal ganglia network mechanisms in cognitive learning. 12th International Symposium of the Institute Network –Driving Next-Generation Medicine. Tokyo, Japan. (invited)

Macpherson T, *Hikida T (2017) Nucleus accumbens dopamine D1-receptor-expressing neurons control incentive salience to reward-predictive cues. IBNS2017, Hiroshima, Japan. (invited)

公募研究

▲*Uchibe E (2017) Deep inverse reinforcement learning, The Third International Workshop on Intrinsically Motivated Open-ended learning. Italy. (invited)

Ishida H, Inoue K, Hoshi E, Takada M (2017) Cells of origin of multisynaptic projections from amygdala to ventral premotor cortex in macaques. (Sicily, Italy)

<A03 知覚と予測>

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 T (2017) Symbol emergence in robotics: Representation learning for real-world communication and collaboration. International Field Robotics Forum 2017. (invited)

*Taniguchi T (2017) Semantic segmentation of driving behavior data: Double articulation analyzer and its application. The 4th Workshop on Naturalistic Driving Data Analytics, IEEE Intelligent Vehicle 2017 (IV). (invited)

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

Nakahara H. (2017) Reinforcement learning with environmental structures and mind of others. The 11th International Conference on Cognitive Science (ICCS 2017). (invited talk)

Nakahara H. (2017) Neural computations underlying social decision-making. The Seventh International Symposium on "Biology of Decision Making", SBDM2017. (invited talk)

中原裕之 (2017) 意思決定と社会知性: その脳計算理解に向けて. 第18回京都大学・情報学シンポジウム, 京都大学, 京都府. (招待講演)

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

Sakagami M (2017) Categorical coding of stimulus and inference of the value in the monkey lateral prefrontal cortex. Max Planck Institute, Germany. (invited)

Sakagami M (2018) Decoding the value related signal represented in multiple areas of the prefrontal cortex using ECoG electrodes. AI & Brain Science Symposium, Dunnae, Korea. (invited)

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

Takahashi H (2017) Altered decision-making as endophenotypes to bridge the gap between phenomenology and neurobiology. 44th Naito Conference 北海道. (invited)

公募研究

Mimura K, Nakagaki K, Ichinohe N (2017) Disturbed Vocal Communication in Common Marmoset Family with an Autism-Model Child. 24th International "Stress and Behavior" Conference, St. Petersburg, Russia. (invited)

山下 祐一 (2017) 認知(障害)原理を検証する神経回路モデルの開発と評価. 日本発達神経科学学会第6回学術集会, 情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター, 大阪府 (invited)

Nikkuni A, Komura Y* (2017) Self-evaluation in vision in monkeys and humans. ICCS. (invited)

Suzuki S (2018) Value computation in the human brain: its basis and contagious nature. Neuroeconomics Seminar, University of Zurich. (invited)

<Web ページ>

「人工知能と脳科学」領域 web ページ: <http://www.brain-ai.jp/>

<主催／共催シンポジウム>

脳と心のメカニズム第18回冬のワークショップ (2018.1.9-11 ルスツリゾート, 北海道)

次世代脳プロジェクト2017年冬のシンポジウム「4領域合同若手シンポジウム」(2017.12.20 一橋講堂)

第27回 日本神経回路学会全国大会企画シンポジウム (2017.9.20 北九州国際会議場, 福岡県)

新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」若手サマースクール (2017.8.2-4, 理化学研究所 BSI)

第40回日本神経科学大会シンポジウム (2017.7.23 幕張メッセ, 千葉県)

ISSA サマースクール2017 (2017.5.22-6/2 脳情報通信融合研究センター (CiNet), 大阪府)

脳と心のメカニズム第17回冬のワークショップ (2017.1.11-13 ルスツリゾート, 北海道)

International Symposium on Biology of Decision Making (SBDM2018) (2018.5.21-23, Paris, France)

SBDM2018 satellite workshop: Neuroscience, Artificial Intelligence and Robotics. (2018.5.24 Paris, France)

Workshop between Korea AI flagship project and Japan Brain AI project (2018.1/29 Dunnae, Korea)

SBDM2017 (2017.5.14-16 Neurocampus, Bordeaux, France)

Gatsby-Kakenhi Joint Workshop on AI and Neuroscience (2017.5.11-12 Gatsby Computational Neuroscience Unit, London)

<アウトリーチ活動・報道発表>

<A01 知覚と予測>

松尾豊 (2018) 「ディープラーニング」の最前線と今後の展望. 第2回 AI・人工知能 EXPO. 東京ビッグサイト.

銅谷賢治 (2017) 「脳内シミュレーション」の神経回路を可視化する. 新適塾「脳はおもしろい」第18回会合, 千里ライフサイエンス振興財団, 大阪, 2017.9.19.

近添淳一 (2017) ころを視る. 岡崎市翔南中学校. 出前授業

柳澤 琢史: (2017/5/26) サイエンスBOX 研究進む「ニューロフィードバック」読売新聞

<A02 運動と行動>

▲ 森本淳 (2018) ヒューマノイドロボットのための人工知能. 脳科学と人工知能「高校生理科教室」.

*疋田貴俊 (2017) 脳で働くタンパク質, 脳を調べるタンパク質. 大阪大学リサーチクラウドカフェ, 一般向け講演会

<A03 知覚と予測>

中原裕之 (2016) 脳を語ろう, 過去・現在・未来 ~脳とこころ~, サイエンス・カフェ, 理学研究所

小村豊 (2017) 迷う私と悟る脳. 世界脳週間講演会, 世界脳週間講演会

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

<研究組織>

A01: 知覚と予測、A02: 運動と行動、A03: 認知と社会性の各研究項目において、人工知能と脳科学の接点での研究実績のある上図下線のメンバーをサブリーダーとして、連携と共同研究の推進をはかってきた。

総括班には、企画実行委員会、育成支援委員会、広報連携委員会を設置し、それぞれ上図下線のメンバーを委員長として活動を推進してきた。

A01: 知覚と予測

松尾(東大) 銅谷(OIST) 田中(理研) + 公募研究11課題

A02: 運動と行動

森本(ATR) 五味(NTT) 松本(筑波) 疋田(京大) + 公募研究3課題

A03: 認知と社会性

谷口(立命館) 中原(理研) 坂上(玉川) 高橋(京大) + 公募研究4課題

X00: 総括班

企画実行委員会: 坂上 五味 疋田
育成支援委員会: 中原 森本 松本 程
広報連携委員会: 谷口 松尾 高橋

Y00: 国際活動支援班

海外拠点ワークショップ
研究者派遣／招聘
国際シンポジウム

<連携状況>

A02-1 森本は、A02-3 松本らが神経科学の観点から明らかにしてきた大脳基底核の持つ行動抑制の機能を運動学習に応用するための検討を共同で進めた。また、A03-4 高橋らと脳活動イメージングデータからの人工知能技術に基づく脳情報抽出法を共同で開発した。

A03-4 疋田は、A02 公募の井上班と分子生物学的ツールを共有し、直接路と間接路のそれぞれと、大脳皮質/小脳との神経解剖学的連関を解析している。A02 公募の内部班とは、本知見を基に議論し(第27回神経回路学会シンポジウム)、直接路と間接路の機能を加えた学習プログラムによる最適学習を示し(投稿中)、さらに最適学習における並列回路の有用性を議論している。A02 計画の森本班、松本班とは、直接路と間接路の並列回路アルゴリズムによるロボティクスへの応用を進めている。

その他、以下の表に示すように、多くの領域内共同研究が進行している。

A01-2	銅谷賢治	A02-1	森本淳	モデルベース強化学習の人型ロボットでの検証
A01-2	銅谷賢治	A02	内部英治	逆強化学習、深層強化学習とメタ学習
A01-3	田中啓治	A03-2	中原裕之	fMRI課題デザインと解析
A02-3	松本正幸	A03-2	中原裕之	価値の学習と意思決定の神経メカニズム：理論とサル電気生理実験の融合研究
A02-3	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
A02-4	疋田貴俊	A02	井上謙一	直接路と間接路の機能解剖的解析
A03-1	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
A03-1	谷口忠大	A03-4	高橋英彦	統合失調症の人工知能モデル
A03-1	谷口忠大	A02-1	森本淳	動作の分節化と模倣学習
A03-4	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・評価法の開発
A03-4	高橋英彦	A02-1	森本淳	精神疾患の脳活動解析への人工知能技術の応用で共同研究
A01	Andrea Benucci	A01	濱口航介	二光子顕微鏡画像からの細胞セグメンテーション
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	近添淳一	A01	平山淳一郎	脳局所情報からの全脳情報の解読
A01	柳澤啄史	A03-1	小林一郎	皮質脳波による画像意味推定
A02	井上謙一	A01	銅谷賢治 柳井啓司	神経細胞分布の自動解析技術の開発
A02	井上謙一	A02	松本 正幸	霊長類におけるドーパミン細胞の光操作技術の開発
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
A02	井澤淳	A02-3	松本正幸	意思決定の強化学習モデルと脳内表現
A02	井澤淳	A03-1	谷口忠大	マーモセットの社会行動分節解析
A02	井澤淳	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

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

2017年5月に意識の起源に関して脳科学から人工知能にわたる世界的な講師を招き ISSA サマースクールを大阪大学 CiNet にて開催した。

2017年8月には、国内のトップレベルの講師陣を揃え人工知能と脳科学サマースクールを理研にて開催した。

計画研究、公募研究の参画者は、以下のように多数の賞を受賞し、その活躍が認知されている。

Makoto Hayase, Yasuo Mori, Tomotaka Miki, Toshiya Murai, Hidehiko Takahashi (2017) Neural basis of impaired strategic reasoning in schizophrenia. 13th NeuroPsychoEconomics Conference, Antwerp, Belgium. (Poster Award)

松本正幸 (2016) 日本学術振興会賞

松本正幸 (2017) つくば奨励賞. 茨城県科学技術振興財団

柳澤琢史 (2017) 異能 vation ジェネレーションアワード企業特別賞. 総務省

柳澤琢史 (2017) バイオインダストリー奨励賞. バイオインダストリー協会

Takufumi Yanagisawa (2017) BCI award. BCI conference

Takufumi Yanagisawa (2017) 中谷賞奨励賞. 中谷医工計測技術振興財団

小林 亮太 (2017) CCS 研究会 奨励賞.

丹野良介, 會下拓実, 柳井啓司 (2018) AR DeepCalorieCam: AR 表示型食事カロリー量推定システム.

第10回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2018) 優秀インタラクティブ賞.

丹野良介, 泉裕貴, 柳井啓司 (2017) ConvDeconvNet の効率的モバイル実装による 画像変換・物体検出・領域分割リアルタイム iOS アプリ群, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) MIRU デモ発表賞.

Ryosuke Tanno, Keiji Yanai (2017) Unseen Style Transfer Network, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) MIRU インタラクティブ発表賞.

鈴木真介 (2017) 平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

研究を着実に推進するため各計画研究に専任のポストドクを1名以上採用できる研究費を配分しており、人件費が予算の最大の割合を占める。

また各研究課題の特性に応じて、以下のように設備・装置の導入を行った。

A01-1 松尾：ソフト開発用 PC

A01-2 銅谷：Inscopix 社製内視鏡顕微鏡

A01-3 田中：MRI 使用料

A02-1 森本：倒立振子ロボット車体、ハンド

A02-2 五味：モーションキャプチャシステム、神経活動記録システム

A02-3 松本：ボルタンメトリーシステム

A02-4 疋田：Inscopix 社製内視鏡顕微鏡

A03-1 谷口：GPU マシン

A03-2 中原：MRI 解析用 PC+ソフト

A03-3 坂上：OmniPlex 社製神経活動記録システム、Doric 社製内視鏡顕微鏡

A03-4 高橋：MRI 解析用 PC

＜総括班研究課題の活動状況＞

総括班は以下のような活動を行い、そのための旅費、謝金、Web サイト作成費、ニュースレター作成費、事務スタッフ人件費等を支出した。

1) 企画実行委員会

領域会議を4回にわたり開催し、課題間での連携について議論を深めた。

H28年8月に湘南国際村センターで「人工知能と脳科学」合同ワークショップ、H28年9月に東京大学でキックオフシンポジウム、H29年5月にロンドンでGatsby Computational Neuroscience Unitとの合同ワークショップを開催するなど、人工知能と脳科学を融合する研究の現状と今後について議論を行った。

2) 育成支援委員会

H29年5月にCiNetにてISSAサマースクール、H29年8月には理研で「人工知能と脳科学の対象と融合」サマースクールを開催した。また若手研究者の研究課題間共同研究のための派遣の支援を行った。

3) 広報連携委員会

Web サイト (<http://www.brain-ai.jp>) を立ち上げ、ニュースレターを年2回のペースで3号発行した。

9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

大森隆司（玉川大学教授・日本神経回路学会会長）

本領域の目的は「現状点では乖離した人工知能と脳科学を結びつけ、新たなターゲットや学習アルゴリズムの開拓と脳の解明を導くこと」とある。

実際、研究成果を見ると3つの班のそれぞれの分野で「脳に学んだ情報処理」と「計算理論に基づく脳研究」の研究の進展がみられる。具体的には、例えば文章翻訳、言語概念獲得、脳内推論機構、ロボット制御、脳内学習機構、神経統計理論、など幅広い分野で研究の進展があり、研究業績も数(計画班・公募班の合計で平均3.4件/人)と質(Nature4件)の両面で高いレベルにある。97件の招待講演、16件の主催シンポジウムもこれを裏打ちする。個々の研究業績については「優れている」というレベルにある。

本領域の目的の一つである研究者育成に関しては、レベルの高いサマースクールを2件行っており、組織的に行っていることが見て取れる。しかし、研究者の育成と一般に対するアウトリーチの間にある、若手研究者の数を下支えする大学生レベルの育成については、数を増やす点でより有効な方法の検討が必要であるように感じる。

領域全体の研究組織は標準的な班構成であり、計画班では国内の人工知能分野の研究者不足を反映して人工知能側がやや不足し、それを若手の公募班で補う形でバランスを取っている。その中で領域全体では27件の共同研究(うち14件は班をまたぐ)が進行していることは、本領域の趣旨にあっており評価できる。ただ、現段階では関係者の技術補完による協力の段階が多く、分野をまたいだ融合的な共同研究は端緒の段階で、残りの期間に期待する。

全体的な視点として、本領域は「人工知能と脳科学の対照と融合を通じた、全脳レベルでの学習要素の統合による基礎的かつ革新的な研究分野の開拓」という長期ビジョンを掲げている。方向性としては全く正しい。しかしそれを実現するための戦略的な方策については、サマースクールと共同研究の推進以上のものが報告書からは見て取れない。革新的な研究分野を生み出す材料として、人工知能と脳科学は何を対照とし、何を融合するか。その結果としての脳情報処理のアーキテクチャをどう描くのか。それを現時点で期待するのは無理であることは十分に承知しているか、この領域の本質的な進展のために領域全体としての議論を期待する。

個別の研究や論文を超えて、領域としてのコンセンサスを目指してほしい、それが日本におけるこの分野の研究コミュニティのオリジナリティであり、世界に通用する新概念の元となるであろう。

北澤茂（大阪大学教授・日本神経科学学会理事、2020年大会長）

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。この目的に沿って、A01: 知覚と予測、A02: 運動と行動、A03: 認知と社会性のサブテーマが設定されていて、それぞれの中で「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」を進めることが計画の骨子である。これらの目的と計画は、今や人工知能の規模と水準がヒトの脳や能力のレベルに接近して(一部は超えて)いるので、極めて現実的で意義が深いものである。以下、(1) 研究成果、(2) 人工知能研究と脳科学研究の相互作用、の2点に絞ってコメントする。

(1) 研究成果 それぞれの項目で注目すべき優れた研究成果が生まれている。

A01: 知覚と予測、では銅谷班が報酬待機課題中のマウスの背側縫線核のセロトニンニューロンを光遺伝学手法により刺激することで、画期的な事実を発見した(Miyazaki et al., Nat Commun, 2018)。セロトニン刺激は報酬待機行動を促進したが、それは報酬確率が高いときに限られ、さらに報酬獲得のタイミングが不確かなときほど効果が高いことが明らかになったのだ。これは従来のモデルフリー強化学習の枠組みでは説明することができない。マウスは報酬提示時間の確率的モデルを持つこと、つまり報酬の事前確率をもとにベイズ推定を行っている可能性を示唆している。理論的予測と緻密な実験による予測を裏切る結果が、さらに高い段階で統一され止揚を遂げた見事な成果である。

A02: 運動と行動、では森本班がモデルベース強化学習の弱点(多自由度ロボットの長時間制御には使えない)を克服する成果を上げた。ヒト型ロボットモデルを階層化して、低レベルでは短期の予測と短い周期での制御を、高レベルでは長期の予測と長い時間周期の制御を行うように組織的な分業体制を整えたところ、多自由度のヒト型ロボットもモデルベース強化学習で長時間制御できることが明らかになった。生体でも脊髄の反射回路から、大脳皮質のループまで、類似の階層性があることは想

定されてきたが、想定の域を出ない。このようなロボティクスの成果を使って定量的な予測の元の実験を行えば、項目 A01 で生まれたような予想外の相乗効果も生まれるものと期待できる。

A03: 認知と社会性、では谷口班が従来の深層学習の限界を破る成果を上げた。人間によるラベル付きデータを使わずに、音声データだけからの教師無し学習で音素と語彙を獲得できることを示したのだ。ヒトの言語獲得はもちろんラベル付きデータを使っていない。その意味で、ヒトの言語獲得過程のモデルともなりうる画期的な成果だと言えるだろう。この谷口班の成果に呼応するような実験を考えて実行すれば、極めて独創性の高い成果が生まれるのではなかろうか。

以上の研究を始めとする独創的で優れた成果が多数ある一方で、比較的既視感のある研究内容も並んでいる。短期評価のサイクルの中ではリスクを取りにくいことは理解できるものの、志の高い研究を行うことが、新学術領域の精鋭には求められていると思う。

(2) 人工知能研究と脳科学研究の相互作用

この点に関しては、6. にリストされているように、すでに 22 件の具体的な共同研究が進行していて、全体として評価できる。その中には、「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」っていることがわかる魅力的な共同研究が含まれている。しかし、比較的単純な技術の貸し借りに留まる連携も混在している。また、共同研究にあまり熱心ではない計画班があることもわかる。

今後、それぞれの項目で鍵となる成果を中心として、知的好奇心に基づいた真の相互作用が次々と生み出されることを期待したい。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

これまでの2年間で、多数の融合研究を含む研究成果が挙がってきた。またロンドン、屯内、パリなどでの国際合同ワークショップ等により、人工知能と脳科学の融合をめざす世界各国の研究者とのネットワークを広げるとともに、サマースクールの開催などによりこの融合領域の若手の育成にも貢献することができた。

今後、領域内外での共同研究を新たな成果につなげるとともに、単に技術協力にとどまらず、脳の柔軟な学習の基盤であるモジュール性と構成性 (compositionality) の計算理論と神経回路機構の解明に向け、全く新たな研究のデザインを模索していきたい。

前期の公募研究は脳科学に人工知能や機械学習技術を取り入れるという提案が多かったが、後期では人工知能の側から脳科学の知見を取り入れる、ないしは共通の未解決の問題に取り組むという方向の研究提案を促すべく広報を行う予定である。