

令和元年度～5年度 文部科学省 科学研究費補助金
新学術領域研究（研究領域提案型）

「身体－脳の機能不全を克服する潜在的適応力の
システム論的理解」

令和元年度 研究成果報告



HYPER-ADAPTABILITY

領域略称名：超適応

領域番号：8102

研究期間：令和元年度～5年度

領域代表者：太田 順（東京大学）

<https://www.hyper-adapt.org/>

目次

領域概要・総括班の活動報告

領域代表 太田 順 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

A班(実験解析班)活動報告

班代表 伊佐 正 (京都大学大学院医学研究科 教授)

A01 研究項目の研究成果報告

研究代表者 伊佐 正 (京都大学大学院医学研究科 教授)

A02 研究項目の研究成果報告

研究代表者 関 和彦 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 部長)

A03 研究項目の研究成果報告

研究代表者 今水 寛 (東京大学大学院人文社会系研究科 教授)

A04 研究項目の研究成果報告

研究代表者 高草木 薫 (旭川医科大学医学部 教授)

B班(数理モデル班)活動報告

班代表 近藤 敏之 (東京農工大学大学院工学研究院 教授)

B01 研究項目の研究成果報告

研究代表者 近藤 敏之 (東京農工大学大学院工学研究院 教授)

B02 研究項目の研究成果報告

研究代表者 小池 康晴 (東京工業大学科学技術創成研究院 教授)

B03 研究項目の研究成果報告

研究代表者 浅間 一 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

B04 研究項目の研究成果報告

研究代表者 太田 順 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

令和元年度活動報告

令和元年度研究業績リスト

メンバーリスト

領域概要と総括班活動

太田 順

東京大学 大学院工学系研究科 人工物工学研究センター

I. 本領域の目的

未だかつてない速度で超高齢化が進む日本では、加齢に伴う運動機能障害や高次脳機能の低下、さらには認知症、意欲の低下、気分の障害、ひいては、極度の身体・脳機能の低下（フレイルティ）などが喫緊の問題となっている。健康な生活を脅かすこれらの多くの深刻な問題の背後には、加齢や障害によって変容する脳-身体システムに、我々自身が上手く「適応」できないという共通の問題が存在している。

人の身体、脳は、例えば「脊髄の損傷で片手が麻痺しても、脳が発達の過程で喪失した同側運動野からの制御を再度活性化して、麻痺した手を通常とは異なる神経経路で制御する(Isa, 2019, Ann Rev Neurosci)」等の高い冗長性を有している。このような事実を踏まえて、我々は「超適応」の解明が上述の「共通の問題」を解決に導くと考えている。これは、従来の身体運動科学が扱ってきた「通常の適応」とは明らかに異なる。

脳機能への障害に対する神経系の超適応原理を脳神経科学とシステム工学の密な連携によってアプローチし、急性/慢性の障害及び疾患やフレイルティの原理を包括的に理解することが本領域の目的である。

II. 本領域の内容

人は急性/慢性障害及び疾患や高齢化に伴うフレイルティの場合に、普段抑制されている神経ネットワークの脱抑制や、進化や発達の過程で喪失していた潜在ネットワークの探索・動員等により、新たな神経ネットワークを作り直す。我々は、この機能代償の過程を「生体構造の再構成」と呼び、超適応を可能にする具体的な神経実体と考える。この再構成された神経ネットワークをうまく活用して運動機能を実現するためには、これを利用して、現状の脳・身体を正しく認知し、適正な運動制御のための新しい制御系を獲得する必要がある。このためには、積極的に意欲をもって、高コストな新規ネットワークを駆動し、認知-予測-予測誤差処理の計算を反復しながら、このネットワークの利用を強化する必要がある。このような新たな制御空間で再び行動を適正化するための学習サイクルを、「行動遂行則の再編成」と呼び、超適応を可能にする神経計算原理と考える。

上記の一連の仮説を検証するためには脳神経科学の知見が必須である。しかしながら実験解析的なボトムアップアプローチのみでは、神経ネットワークのシステムの

挙動により発現する超適応の解明が困難である。そこで本領域では、システム工学の構成論的数理モデル化技術と脳神経科学を融合した学際的アプローチを展開する(図1)。その融合技術基盤として、「ウィルスベクターや光・化学遺伝学的方法論、脳刺激法等の介入脳神経科学手法に、ロボット工学・Virtual Reality技術によって感覚・運動情報を時間・空間的に統制できる実験系を融合することにより、脳活動と機能との因果性の検証を実現する」ロボティック介入脳神経科学法と、「これまでの精緻な脳神経科学研究により得られた各分野の機能に関する知見を組み入れたモデルを構成し、その内部パラメータや領野間の関係をニューラルネットワーク等の柔軟な関数近似器で記述したり、統計的手法によりモデルの構造を推定したりするグレイボックスモデリングを行う」機能推定可能な脳情報デコーディング法という2つの新たな解析法を採用する。



図1 領域の全体構成図

III. 期待される成果と意義

本領域では以下の成果と意義が期待できる。

- 超適応の単なる現象論の記述を超えて、これを発動する神経メカニズムの解明と数理モデル化による「超適応の科学」という学問分野の体系化
- 電気生理・脳イメージング・行動データなどのマルチモーダルな情報を統合して機能を記述できる数理モデル化手法（グレイボックスモデル）の構築
- 構造変化や行動遂行則変化を統合した生存適応原理を説明可能とする理論構築

IV. 班構成

総括班は、研究代表者（太田）、3名の研究分担者（伊佐、近藤、船戸）、15名の研究協力者（関、今水、高草木、小池、浅間、内藤、花川、井澤、筒井、相澤、千葉、矢野、温、安、四津）から構成される。

V. 活動

当領域では、以下の活動を行った。

A. 領域主催の活動

- 第1回総括班会議

日時：2019年7月17日（金）17:00～19:00

場所：東京大学本郷キャンパス

内容：領域の運営方法、会議・シンポジウムの担当、広報や領域内の支援活動等について話し合った。

- 第2回総括班会議

日時：2019年9月20日（金）12:00～13:00

場所：東京大学本郷キャンパス

内容：領域の運営方法、第1回領域会議の開催方法、若手の会の運営方法等について話し合った。

- キックオフシンポジウム

日時：2019年9月20日（金）13:30～16:00

場所：東京大学本郷キャンパス・伊藤謝恩ホール

内容：領域のキックオフシンポジウム・公募説明会を開催した。領域代表（太田）、A班代表（伊佐）、B班代表（近藤）より、各班の目標と計画研究を紹介し、さらに領域代表（太田）より領域の公募概要説明を行った。100名を超える参加者があり、活発な議論が行われた。

- 第1回領域全体会議

日時：2020年3月4日（水）～6日（金）

場所：岩手県岩手郡雫石町

内容：領域代表及び研究項目の研究者より研究報告を行った。

- 第3回総括班会議

日時：2020年3月6日（金）11:30～12:30

場所：岩手県岩手郡雫石町

内容：領域の運営方法、第2回領域全体会議(2020年5月開催予定)の開催方法等について話し合った。

B. 学会活動・広報活動

- 次世代脳プロジェクト冬のシンポジウムにおける広報

日時：2020年12月18日（水）～20日（金）

場所：一橋大学一橋講堂

内容：領域代表（太田）からの領域の説明及びポスターによる領域の広報を行った。

- 第32回自律分散システム・シンポジウム OS

日時：2020年1月25日（土）～26日（日）

場所：芝浦工業大学芝浦キャンパス

内容：計測自動制御学会主催の自律分散システム・シンポジウムにて OS「超適応」を開催した。OSでは3セッションに渡る9件の発表があり、活発な議論が行われた。

C. その他の活動

- 領域ホームページの整備

領域活動の情報公開及び領域内の情報共有のため、領域ホームページを作成した。

URL: <https://www.hyper-adapt.org/>

- 若手の会の設立

若手研究者間の交流と活動支援のために、若手の会を設立した。詳しい活動は後述する。

- 国際コラボレーション制度の確立

領域研究者の国際コラボレーションを促進するため、国際コラボレーション制度を構築した。

VI. 若手の活動

当領域では、安琪氏（東京大学）を委員長として若手の会を組織化し、若手研究者の活動を推進している。以下にその具体的内容を示す。

A. 若手の会キックオフミーティング

2019年11月21日、東京大学本郷キャンパスにて、若手の会のキックオフミーティングを開催した。本会においては今後の若手の会の活動内容が確認され、研究交流会や文献の勉強会、講師を招いての講習会、本新学術領域における重要な文献を収集し、領域内において周知することが確認された。

B. 第1回研究交流会の実施

2020年1月26日、第32回自律分散システム・シンポジウムと併設して、研究交流会を開催した。本研究会には10名の研究者が参加し、各人の研究紹介と、安によって「認知・情動が片麻痺患者のリハビリテーションに与える影響」について発表が行われ、活発な議論が行われた。

C. 第1回勉強会の実施（予定）

2020年03月26-27日、東京大学本郷キャンパスにて、田中宏和著「計算論的神経科学」の勉強会を行う。領域内外の約10名の研究者が参加し、脳神経科学に対するシステム論的アプローチに関して学ぶ予定である。

VII. 今後の予定

次年度の総括班の活動として、2020年5月に（公募班メンバーを加えて）第2回領域全体会議（東京）、2020年7月頃に一般公開シンポジウム、2021年3月に第3回領域全体会議を行う予定である。

A 班・令和元年度活動報告書

研究代表者：伊佐 正

京都大学大学院 医学研究科 神経生物学分野 教授

I. 班の目的

A 班では、主として動物やヒトを対象とする実験を通じて、中枢の損傷後の機能回復や老化、身体変容や困難な学習過程や神経伝達物質の異常などに対する「超適応」の過程に「生体構造の再編成」ないしは「行動遂行則の再編成」がどのように関わるかを明らかにする。

具体的には、A01 班では、主に超適応機構の「生体構造の再構成」の観点から、大規模脳領域での脱抑制が生体構造の再構成による超適応機構の基盤であるという仮説を、げっ歯類、霊長類、ヒトを対象とする実験を融合・発展させて検証する。A02 班では、主として実験動物を対象に、筋骨格構造の変化に伴う脳神経機能の適応様式を調べ、その背景にある原理の解明を行う。A03 班では、身体認知と情動が「超適応」すなわち「身体構造が変わるような困難な状況での運動学習」を促進する神経過程を明らかにする。A04 班では、「加齢や神経変性疾患に伴うドーパミン (DA) やアセチルコリン (ACh) などの神経伝達物質の減少に伴う脳活動ダイナミクスの変容に対して発現される“行動遂行則の変更”が“超適応”を誘発する」という作業仮説を検証する。

II. 班構成

A01 班 「生体構造の再構成による超適応機構の解明と潜在適応力低下防止への挑戦」

研究代表者 伊佐正 (京都大学)

研究分担者 内藤栄一 (情報通信研究機構)

研究分担者 相澤秀紀 (広島大学)

A02 班 「身体変容への超適応の神経機構の解明」

研究代表者 関和彦 (NCNP)

A03 班 「超適応を促す身体認知・情動機構の解明」

研究代表者 今水寛 (東京大学)

研究分担者 筒井健一郎 (東北大学)

A04 班 「神経伝達物質の異常に伴う超適応を誘発する脳活動ダイナミクスの変容」

研究代表者 高草木薫 (旭川医科大学医学部)

研究分担者 花川隆 (京都大学/NCNP)

III. 活動報告

[A01 班] ①日時: 2019/09/06、場所: 京都大学、内容: ボルタメトリー法による脳内モノアミン放出測定について議論。参加者: 伊佐、尾上、山口、相澤。

②日時: 2019/11/09、場所: 日本学術会議、内容: パラアスリートの超適応について議論。参加者: 伊佐、内藤。

[A02 班] ①日時: 2019/12/18、場所: 電気通信大学、内容: サル筋再配置モデルから得られた筋電図データの解析方法やこれまでの解析結果など。参加者: 関、船戸、内田、近藤、矢野、石坪、長沼、土屋

[A03 班] ①日時: 2019/08/02、場所: 東北大学、内容: 実験動物での主体感・意欲を計測する方法について検討。参加者: 筒井、中村、井澤、大畑、今水

②日時 2019/10/21、web 会議。内容: 主体感と意欲の両方を「controllability の認知」として階層的に捉え、これに対してさまざまなレベルで介入を行い、通常の運動学習と困難な運動学習に対する影響を調べる可能性など。参加者: 筒井、中村、井澤、大畑、田中、菊池、今水

③日時: 2019/12/24、web 会議、内容: システムの可制御性に関する構造学習を、意欲や主体感の観点から捉える実験パラダイム構築について検討。参加者: 筒井、中村、井澤、大畑、田中、今水

④日時: 2020/01/17、web 会議、内容: 意思決定と運動学習の間で、可制御性の認知がどのように汎化するかを調べる方針について検討。参加者: 井澤、大畑、今水

[A04 班] ①日時: 2019/07/24、場所: 東京大学。内容: A04-B04 合同会議。立位姿勢制御の数理モデル化に関する検討など。参加者: 高草木、太田、浅間、上西

②日時: 2019/08/09、場所: 東京大学、内容: A04-B04 合同会議。姿勢制御の中枢機構の数理モデル化に関する検討など。参加者: 高草木、太田、上西

③日時: 2019/09/010、場所: 旭川医大、内容: A04-B01 合同会議。Parkinson 病の姿勢異常の中枢機構など。参加者: 高草木、千葉

④日時: 2019/11/21、場所: 東京大学、内容: A04-B04 合同会議。研究代表者と分担者が、今後5年間の研究予定について発表・共同研究の方向性を確認し、総合討論。参加者: 高草木、花川、太田、四津、中島、高橋、吉永、東口、白藤、尾村、上西、石井。

A01 生体構造の再構成による超適応機構の解明 と潜在適応力低下防止への挑戦

伊佐 正

京都大学大学院 医学研究科 神経生物学分野 教授

内藤栄一

情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター 研究マネージャー

相澤秀紀

広島大学大学院 医系科学研究科 教授

Abstract—The Group A01 will try to test the hypothesis that disinhibition across wide brain areas underlies the hyperadaptation process against the neural injuries or frailty. For this purpose, Isa Group works on the recovery after the spinal cord injury in the macaque monkeys, Naito Group works on the neuroimaging during performance of motor tasks in aged people, and Aizawa Group works on the diffuse projection systems such as dopaminergic and serotonergic systems as the possible neural substrate of the global disinhibition in mice.

I. はじめに

A01 班では、主に超適応機構の「生体構造の再構成」の観点から、大規模脳領域での脱抑制が生体構造の再構成による超適応機構の基盤であるという仮説を、我々のこれまでの研究を融合・発展させて検証する。これまでの研究成果は、脳には神経系の広汎な脱抑制機構が存在し、脊髄損傷時には、これを積極的に作動させることで潜在回路を動員して機能回復を図ることができること、この背後にモノアミン汎性修飾系のようなシステムの関与が想定されることを示してきたが、この脱抑制がどのような原理と神経機序で起こるのか、その詳細なメカニズムは依然不明である。一方で、人における知見はこの脱抑制機能が高齢化により劣化し、このことが高齢者における機能回復の難しさに関連していると推測されている。そこで本研究班では、これらの研究成果をもとにこの適応力低下に対する防止策を提案したい。

II. 目的

齧歯類、サル、ヒトの脳研究を通して脱抑制のメカニズムを解明し、高齢者におけるこの機能劣化の証明をもとに、機能改善に有効な戦略を提案することを目的とする。脊髄損傷サルにおける損傷前後の皮質脳波電極を用いた感覚運動関連領域の運動関連活動及び筋電図活動、さらに個々の電極への電気刺激に対する誘発電位応答を長期間にわたり縦断的に記録することで、大規模脳領域で起こる脱抑制のメカニズムを解明する。齧歯類モデルでは、モノアミン汎性修飾系であるドーパミンおよびセロトニ

ン神経系の活動測定及び光刺激実験を行い、大脳における広範な脱抑制機構に関する情報を提供する。ヒトでは、高齢者における慢性的脱抑制状態を機能的磁気共鳴画像装置で捉え、加齢に伴う脱抑制（抑制消失）進行度合などを指標として、機能劣化を効果的に改善できる脳機能トレーニングの有効な要素を提案する。

III. 研究方法

研究代表者の伊佐らは、ニホンザル 1 頭を、到達—精密把持運動課題を行うようにトレーニングした。サルには最低 2 秒以上レバーを押し続けることで、運動していない状態を保った後、サツマイモ片まで手を到達させ、人差し指と親指の腹でサツマイモを把持させた。トレーニング後、両側の一次感覚野、一次運動野、背側運動前野に 18 極の皮質脳波電極を慢性的に埋め込んだ。その後、第 4/5 頸髄間で亜半切を行い、損傷後、到達—精密把持課題を用いて手指の巧緻性の回復過程を 5 か月間記録した。また、運動関連領域と運動ニューロンとの結合性を評価するために、週に 1 回 ECoG の電極を通じて電気刺激を行い、損傷側の前肢に誘発される筋収縮を記録した。研究分担者内藤らは、機能的 MRI を用いて、65-78 歳の右利き健常高齢者 50 名および 20-27 歳の右利き健常若年成人 30 名が、右手の運動錯覚を体験している際の脳活動を計測した。そして同時に彼らの右手指の器用さをペグテストで評価した。

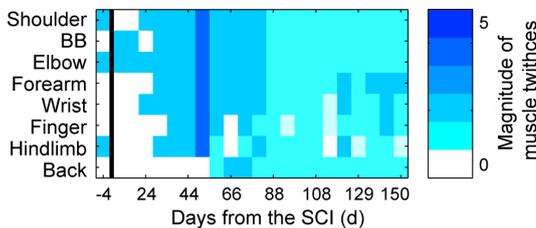
研究分担者相澤は、超適応誘導の基盤と考えられる広範囲脱抑制にドーパミン、セロトニンが関与するかを明らかにするため、これらの細胞外動態の記録法の開発および実験的操作が大脳活動や動物行動に与える影響をマウスを用いて検証した。具体的には、1) ドーパミンやセロトニンの細胞外放出動態を高感度・高速記録する電気化学的手法の開発、2) ドーパミンの薬理学的操作がマウス大脳活動および動物行動に与える影響の検討、3) 頭部固定マウスを用いた光増感色素による局所脳梗塞モデルの開発を行い、光学的脳活動測定と組み合わせるその妥当性の評価を行った。

IV. 研究成果

A. ニホンザル脊髄損傷後の大規模脱抑制 (伊佐)

損傷前は、精密把持の成功率はほぼ 100%であったが、亜半切損傷後 32 日目、スリットを利用した把持の成功率は 41.5%に達し、損傷後 40 日目から成功率が約 90%で飽和した。一方、損傷後の精密把持の成功率は 0%のままです。5 か月間記録しても回復することはなかった。このように亜半切損傷モデルでは、手指の巧緻性は完全に回復しないことが示された。そして、運動関連領域と運動ニューロンとの結合性を調べるために、ECoG 電極を通じて一次感覚野、一次運動野、運動前野に電気刺激を行い、損傷側の前肢の筋収縮を記録した (図 1)。運動前野を刺激した際、損傷前は、肩、肘、後肢で筋収縮が生じた。損傷直後から損傷前には観察されなかった上腕二頭筋で筋収縮が誘発され、1 か月後のスリットを利用した把持ができ始める時には、多くの部位で筋収縮が誘発された。損傷後 80 日以降は、筋収縮の大きさは少し小さくなったが、多くの部位で筋収縮が誘発された。損傷反対側の一次運動野でも同様に、多くの部位で筋収縮が誘発された。損傷反対側の一次感覚野では、筋収縮誘発部位は少なかった。以上の結果から、損傷後の回復過程において、損傷反対側の運動前野と一次運動野を中心に、脳内の抑制が外れる脱抑制が生じることが示唆された。

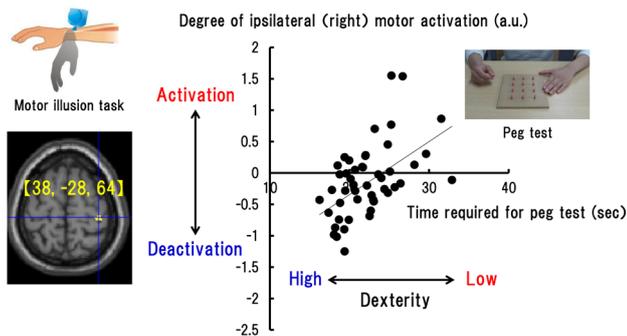
(図 1) 損傷前後の反対側運動前野刺激による筋収縮誘発



B. 高齢者における同側運動野の抑制消失と手の器用さの劣化との関連に関する実験的検証 (内藤)

若年成人では、右手の運動錯覚中に、同側 (右) 運動野手領域の有意な活動抑制を認めた。一方で、高齢者では、概ね同側 (右) 運動野手領域の抑制が减弱しており、むしろ活動が増加している者も存在することがわかった。ペグテストのパフォーマンスと相関を示す脳領域を調査すると、全脳の中でも唯一、同側 (右) 運動野手領域の活動が有意な相関を示した (図 2)。

(図 2) 同側運動野の抑制消失と器用さの劣化との関係

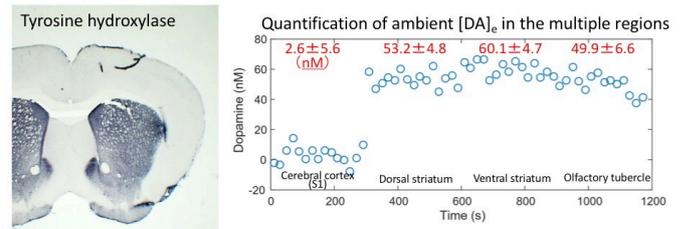


つまり、右手指が器用な (ペグテストに要する時間が短かった) 高齢者では同側運動野の抑制が認められたが、不器用な高齢者では同側運動野の抑制は消失し、むしろ活動が増加していた (図 2)。これらの結果は、高齢者でみられる同側運動野の抑制の消失は、彼らの手指の器用さを妨害し、劣化させている可能性を示唆した。

C. げっ歯類を用いたモノアミンの高感度・高速測定技術の開発とその操作 (相澤)

研究分担者相澤は、超適応誘導時の広範囲脱抑制の基盤へのモノアミン神経系の関与を調べるため、電気化学に基づく細胞外モノアミン濃度の高感度・高速測定技術の開発を行った。具体的には、炭素電極を用いたモノアミンの酸化還元電位における電流測定に先立ち、微小電極への負電位負荷により正荷電したモノアミン伝達物質を電極周囲空間へ集約し、その濃度を測定することで、これまで測定が困難であった定常状態の低濃度モノアミンを複数の脳部位で測定可能とした (Fast scan controlled adsorption voltammetry, FSCAV)。in vitro におけるドーパミン標準液でのキャリブレーションを経て、マウス大脳の各脳領域での経時的測定を行った結果、大脳皮質、線条体、嗅結節などの領域の定常状態における細胞外ドーパミン濃度を測定することに成功した。また、細胞外ドーパミン濃度を上昇させるドーパミン取り込み阻害薬を投与したマウスでは、経時的に上昇する細胞外ドーパミン濃度を観察したことから、薬理学的手法により本開発技術の妥当性が証明された (図 3)。このように細胞外ドーパミン濃度の上昇したマウスでは、自発運動量の増加に加えて不安行動や嗜癖行動、新規環境摂食抑制の増悪がみられ、広範な大脳活動の修飾が示唆された。

(図 3) 多脳領域におけるドーパミン定常放出の高感度測定



V. おわりに

伊佐らは、今年度、1 頭のサルで損傷後には脳内で脱抑制が生じ、それが機能回復に関わることを示唆するデータを得た。来年度は、2 頭目のサルで同様の実験を行い、個体差を調べると共に、各脳領域の活動・結合性が回復過程によってどのように変化していくかを調べていく予定である。内藤らは、来年度は高齢者を 2 群に分け、それぞれ異なる運動トレーニングを数か月間実施し、同側運動野の抑制改善効果を検証しながら、これに伴う手指の器用さの改善の因果性を検証する予定である。相澤らは、今後、今年度開発したモノアミン計測技術をげっ歯類脳梗塞モデルに応用し、神経回路の損傷への超適応過程におけるモノアミン代謝の動態を解析する。

A02 研究項目の研究成果報告

関 和彦

国立精神・神経医療研究センター 神経研究所

Abstract—In the FY2019, we established 1) the method to manipulate selectively the activity of somatosensory primary afferent by optogenetics, 2) the method to evaluate the sensorimotor function in freely behaving monkeys, and 3) the method to assess the activity of spinomuscular- and corticomuscular closed loops in monkeys performing motor task.

I. はじめに

本研究項目では、主に超適応の生体構造の再構成の観点から、急激な筋骨格構造の改変に伴う脳神経機能の適応様式を調べ、その背景にある原理の解明を行う。

II. 目的

本研究項目の具体的な目的はヒトと筋骨格構造が類似しているサルを対象に、筋再配置手術によって急激に身体構造を変化させ、それに対する中枢神経系の適応を神経細胞レベルで神経生理学的に評価することである。

III. 研究成果

本年度は、整形外科医（手の手術を専門）を研究協力者に加えて、筋再配置手術技術の改善に成功した。確立した技術を用いてモデル動物を作出し、3頭の個体を対象に筋活動の長期的変化を観察している。一方、次年度以降、筋活動変化の背景にある神経系の適応の評価にはさらなる技術開発が必要である。今年度はこの技術開発研究を継続した。その具体的な成果を以下に3つ挙げ、それぞれ概要を説明する。

A. 体性感覚神経活動を光遺伝学を用いて操作する技術開発

光遺伝学（光によって活性化するタンパク分子を遺伝子導入技術を用いて特定の神経細胞に発現させ、その神経細胞の活動を光刺激により制御する技術）を用いて、触覚や筋感覚に関わる感覚神経の活動を選択的に活性化させることに成功した。ラットの感覚神経細胞に遺伝子導入を行うため、蛍光タンパク遺伝子を組み込んだアデノ随伴ウイルス（AAV）ベクターを末梢神経（座骨神経）に注入した。AAVはそのタイプに応じて異なった組織や細胞に指向性を持つことが知られているが、今回はAAV6とAAV9を用いた。すると、目的どおり感覚神経細胞に遺伝子導入されていることが確認された（図1）。

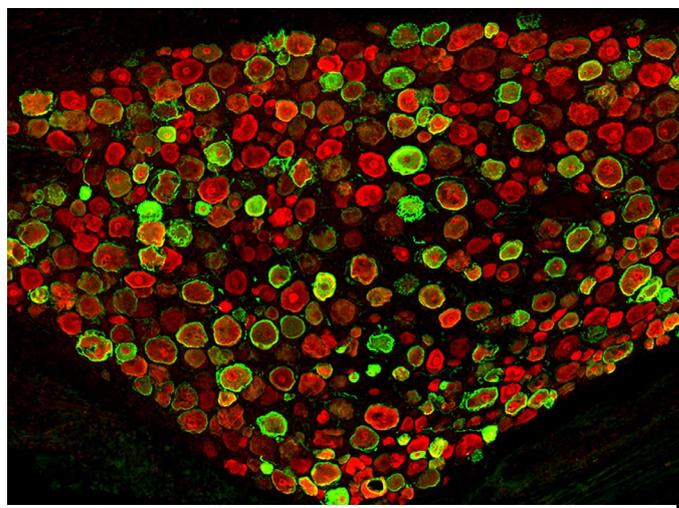


図1. ラット DRG 大型細胞におけるチャンネルロドプシン2（緑）の発現（文献1）。

AAV6 および AAV9 それぞれの指向性を確認した所、AAV6 では小型の感覚神経細胞に指向性を持ち、AAV9 は中型から大型の感覚神経細胞に指向性を持つことが確認された。更に、光刺激によって、電気刺激に相当する神経活動が感覚神経細胞の軸索より記録されました。光刺激に対する感覚神経細胞の応答の特徴から、主に触覚や筋感覚を支配する神経細胞が選択的に刺激されていると考えられた。さらに、誘発された感覚信号は、脊髄内の神経回路を介して運動神経を興奮させることが示されました。つまり、光刺激によって活性化された感覚信号は、運動に関連した感覚を選択的に活性化することが可能であることが証明された。本技術は、筋再配置後の感覚予測誤差の定量に有効になる。(Kubota et al. J. Physiol. 2019).

B. 自由行動下のサルにおける脳情報デコーディング技術の確立と皮質運動ループの機能評価

脳情報デコーディング技術を用いて自由に行動しているサルの脳活動から筋活動情報を解読することに成功しました。ここでは31~32箇所の大脳皮質活動を記録することができるシート状の多電極アレイを用いて、3頭のマーモセットの一次体性感覚野・一次運動

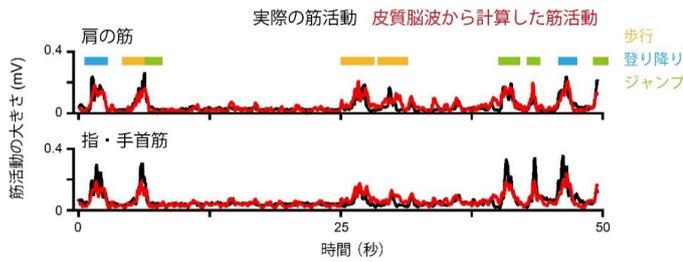


図2. 自由に行動しているときの皮質脳波から筋活動の情報の解読例 (文献2)

野・運動前野を含む感覚運動野より皮質脳波（頭蓋内から記録される脳波）を記録した。また、皮質脳波と同時に、2~4個の腕の筋肉から筋活動を記録した。まず、サルにレバーを繰り返し引かせて、腕だけ動かしたときの皮質脳波と筋活動を記録した。記録を行った感覚運動野は手足の運動に先立って活動し、運動や筋肉の動きに関連した活動パターンを示すことが明らかになった。そこで、その特性を利用し、脳情報デコーディング技術を用いて脳活動パターンから筋活動情報を解読した。まず、一部のデータを用いて、脳活動パターンと筋活動パターンの関係性を表す計算式（デコーダー）を算出する。そして、別の記録データにおける脳活動を、算出されたデコーダーに当てはめて筋活動を計算する。この計算された筋活動が実際の筋活動に近似していた場合、情報解読が成功したことになる。先行研究と同様に、脳情報デコーディング技術を用いてレバー引き運動をしているときの皮質脳波から筋活動を高い精度で算出することに成功した。続いて、飼育ケージ内で自由に動き回っているサルから皮質脳波と筋活動を無線記録し、同様に脳情報デコーディング技術を用いて、自由行動下の皮質脳波からも筋活動の情報を解読することに成功した（図2）。この研究成果を基盤として、さらにサルにカフ電極などを外科的手術で埋め込んで、自由行動下で誘発電位の変化や感覚ゲーティングの評価技術を開発している。この技術は将来的に筋再配置手術に伴う体性感覚機能評価に用いることが可能である。(Umeda et al. Neuroimage, 2019).

C. 運動制御において皮質-筋ループと脊髄-筋ループの有する独自機能

筋再配置手術に伴う感覚予測誤差の経時的な変化を評価する際、皮質および脊髄と末梢受容器・効果器のループは独自に評価する必要がある。つまり各階層間で誤差情報がどのように符号化され伝達されてゆくのかを解明する必要がある。今回は、この脊髄を経由した反射ループと大脳皮質を経由する皮質ループの機能を別々に評価することが可能な実験系を開発し、その検証を行った。マカクサルに精密把持運動を行わせ、その際の局所フィールド電位及び単一神経細胞活動を記録し、それぞれと上

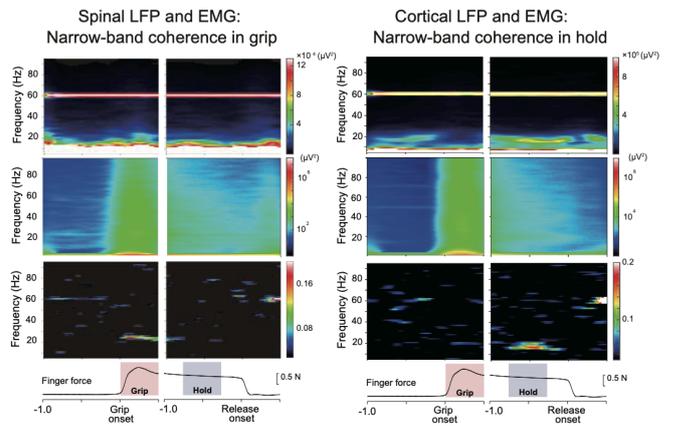


図3. 把握サル把握運動中の局所フィールド電位（上）筋電図（中）及びコヒーレンス（下）のスペクトログラム。脊髄-筋ループ（左）及び皮質-筋ループ（右）（文献3）

肢筋電図とのコヒーレンスが運動中にどのように変化するかを調べた。その結果、両者ともに β 周波数帯域におけるコヒーレンスが顕著であったが、それは脊髄ループと皮質ループにおいて別の行動位相において観察された。つまり、脊髄-筋ループにおいては動的な把握運動の局面、一方皮質-筋ループにおいては静的な局面に顕著な β コヒーレンスの増加を示した（図3）。更にグレンジャー因果性解析の結果、この β コヒーレンスは皮質及び脊髄と筋が両方向性（感覚性・運動性）の関連性を示している事が明らかになった。これらの結果は、運動制御において皮質-筋ループと脊髄-筋ループが独自機能を有している可能性を提案する初めての結果である。従って、同様な把持課題を筋再配置実験において採用する事により身体変化ともなう各ループの動態や情報伝達などを研究することが可能になる。(Oya, Takei et.al. Communication Biology, 2020).

IV. おわりに

上記の他に、B01班及びB02班と継続して議論し、筋再配置手術効果の定量方法やモデル化について検討を重ねてきた。次年度は、今年度と同様に技術開発を継続するとともに、筋再配置手術に対する神経系の可塑性の評価を本格化させる予定である。

REFERENCES

- [1] Kubota S, Sidikejiang W, Kudo M, Inoue KI, Umeda T, Takada M, Seki K. Optogenetic recruitment of spinal reflex pathways from large-diameter primary afferents in non-transgenic rats transduced with AAV9/Channelrhodopsin 2. *J Physiol*.597:5020-5040, 2019.
- [2] Umeda T, Koizumi M, Katakai Y, Saito R, Seki K. Decoding of muscle activity from the sensorimotor cortex in freely behaving monkeys. *NeuroImage* 197: 512-526, 2019.
- [3] Oya T, Takei T, Seki K, Umeda T, Koizumi M, Katakai Y, Saito R, Seki K: Distinct sensorimotor feedback loops for dynamic and static control of primate precision grip. *Communication Biol.* in press.

A03 研究項目の研究成果報告

今水 寛

東京大学大学院人文社会系研究科

本研究項目では、超適応の観点から「身体認知や意欲などの正の情動が、運動学習を促進する」という仮説を検証、そのメカニズムを解明する。今年度の主な成果として、1) 身体認知の一種である「運動主体感」（自身が運動を引き起こしているという感覚）が運動学習に与えることを行動実験で示した、2) 運動主体感の基礎となる操作性の認知に関して、その神経基盤を fMRI で明らかにした、3) サルにおいて意欲を評価あるいは操作しながら運動学習の過程を研究するための行動パラダイムを確立した、などが挙げられる。

I. はじめに

従来の神経科学や心理学における運動学習研究では、運動誤差や報酬予測誤差といった、外部からのフィードバック情報が学習にどのように役立てられるかを調べてきた。しかし、近年、学習者の内部状態、すなわち、意欲などの情動や身体認知が、運動学習に影響を与えることが注目されるようになった。例えば、意欲の高低が脊髄損傷後の運動機能回復を左右すること、運動学習の過程で運動主体感が強くなること、などが指摘されている。しかし、意欲や身体認知が運動学習に影響を与える理論的な枠組みや、神経生理学的なメカニズムは未解明である。その解明は、意欲や身体認知をコントロールすることで、困難な状況でも、効率良く運動学習を進められる技術の開発に繋がると期待される。

II. 目的

本研究項目の目的は、1) 意欲や身体認知が、困難な運動学習を促進するメカニズムの解明、2) 意欲や身体認知への操作介入を通して、運動学習を促進する技術の開発である。これらの研究を通して「超適応」のメカニズムを理解するとともに、「超適応」を誘導・促進する技術の基礎を構築することを目指す。

III. 研究成果

A. 運動主体感と運動学習への行動学的アプローチ

1) 運動主体感が運動学習に与える影響：研究代表者らのグループ（田中大、今水寛）は、B03 項目の井澤淳と共同で、運動主体感の基礎となる「運動の自己帰属」が、運動学習を促進することを行動実験で示した。具体的には、実験参加者はペンタブレット上でペンを動かし、真上に置かれたディスプレイ上のカーソルを操作した。参加者は、スタート位置から 15 cm 右のターゲットにカーソルを移動させた（図 1）。運動中にカーソルは提示さ

れず、ペン先が右へ 15 cm 動いた時点で、カーソルを提示した（運動のフィードバック）。このとき、カーソルはペン先の位置から、縦方向に -2, 0, +2 cm のいずれかの「ずれ」を加えて提示した（図 1 左）。参加者には、「フィードバックは自分の運動を反映していたと思ったか（自己）／思わなかったか（非自己）」を答えてもらい、運動の自己帰属を試行ごとに調べた。結果として、フィードバックのずれは、次の試行のペンの動きに影響を与えることが確認できた。すなわち、-2 cm ずれたとき、次の試行では、ペン先は反対のプラス方向に逸脱し、+2 cm ずれたとき、マイナス方向に逸脱する傾向が見られた（図 1 右）。さらに、自己と判断した次の試行では、非自己と判断したときよりも、直前のずれに応じたペンの逸脱は大きくなることが解った。逸脱の大きさは、試行間の学習率と見なすことができる。この結果は、運動主体感の基礎となる運動の自他帰属が、運動学習に影響を与えることを示唆した[1]。

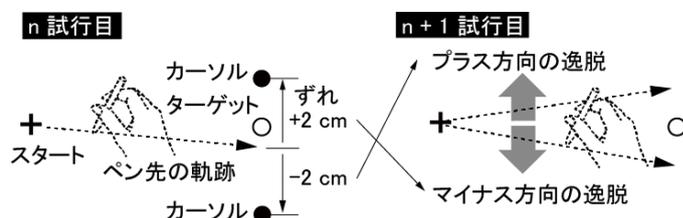


図1 運動フィードバックの「ずれ」と、次の試行の逸脱

2) 運動とその結果を結びつけるメカニズム：運動主体感を客観的に測る指標として、運動とその結果の時間間隔が、どれくらい短く感じられたかを調べる方法がある（Intentional Binding）。これに関して、行為とその結果が連続するとき、心理的な時間は全体として短くなるが、局所的には長くなることを明らかにし、複数の時間指標が関与することを示した[2]。

B. 運動主体感（運動の自他帰属）の神経基盤

研究代表者らのグループ（大畑龍、浅井智久、今水寛）は、運動中のヒト fMRI 脳活動パターンから運動の自他帰属をデコーディングする技術を開発し、その成果が論文として受理された。本項目での基礎技術を確立した[3]。

C. 運動主体感（操作性の認知）の神経基盤

研究代表者らのグループ（大畑龍、今水寛）は、B03 項目の温文、浅間一と共同で、運動主体感の構成要素である操作性の認知に関して、対象物の操作性が増加すると

きと減少するときの脳活動を計測，その違いを調べた。実験参加者は，fMRI 装置内で，ジョイスティックを操作して，画面に提示されるカーソルを動かした。このとき，予め記録しておいた他者のジョイスティックの動きを，参加者の動きに混入することで，カーソルの操作性を変化させた。運動途中で操作性が増加する条件と，減少する条件を設けて，脳活動を比較した。その結果，1) 操作性が増加するときは，前頭前野背外側部と小脳外側部で活動の増加が見られ (図 2A)，2) 減少するときには，島皮質に活動の低下が見られた (図 2B)。操作性の増加と減少の認知には，異なるメカニズムが関与すると考えられる。今後，脳刺激などで，運動主体感を増減させ，運動学習に影響を与える場合，増加と減少では，介入領域を変える必要があることを示唆していた[4]。

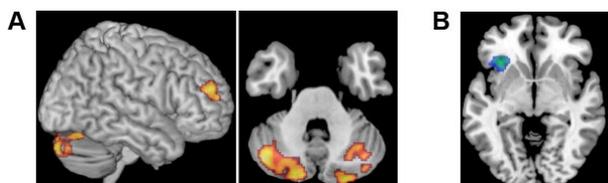


図2 操作性の増加(A)と減少(B)に関連する脳活動

D. サルにおいて意欲の要因を評価あるいは操作しながら運動学習を研究するための行動パラダイムの開発

研究分担者の筒井 (東北大学) らのグループは，サルにおいて意欲を評価あるいは操作しながら運動学習の過程を研究するための行動パラダイムの確立を目指した。本来は手指運動の巧緻性を評価する課題である Brinkman Board 課題を応用し，課題のパフォーマンスにおける意欲と手の巧緻性の要因を分離して評価することを試みた。(図 3A: 課題遂行中のニホンザル)

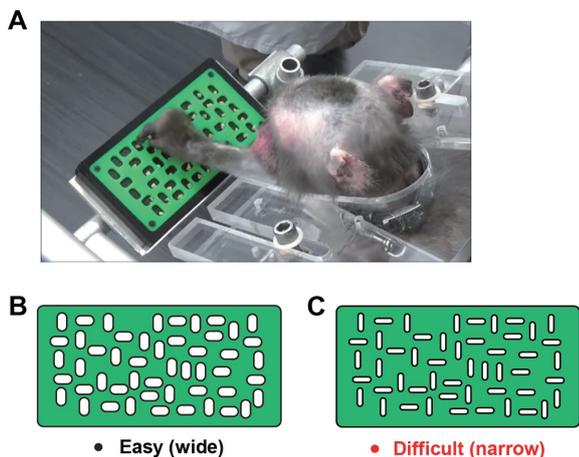


図3 変型 Brinkman Board 課題

Brinkman Board 課題は，盤に規則的に並んだ縦長および横長の溝のそれぞれに食物の小片を入れ，手でそれを摘み取らせる課題である。本研究では，溝に入れる食物としてはサツマイモの小片を用い，通常よりも溝の幅を

広くした盤 (図 3B)，および，狭くした盤 (図 3C) を使い，課題の難易度の違う条件を設けた。2 頭のニホンザルを被検体として，空腹の度合いが異なる複数の条件で，盤 1 枚を 1 セッションとして，サルが自ら停止するまで課題を遂行させた。起床からエサを一切与えず，空腹度を高い状態にした場合では，2 頭とも，難しい条件では 10 セッション，易しい条件では 15~20 セッションほどを遂行した。課題遂行前にある程度サツマイモを食べさせて，サツマイモに対する空腹度を中程度とした場合では，易しい条件のセッション数には変化はなかったが，難しい条件では 5 セッション以下しか遂行しなかった。さらに，課題遂行前に大量のサツマイモを食べさせた，感覚特異的満腹度の高い状態では，難・易いずれの条件でも課題を遂行しなかった。また，高い空腹度，中程度の空腹度の条件で，1 セッションの所要時間には違いがなかった。これらの結果より，変型 Brinkman Board 課題では，自らすすんで遂行するセッション数が意欲の指標，1 セッションを完遂するのにかかる時間が運動機能の指標となり，意欲と運動機能を分離して同時に評価することが可能なことが示された。また，これらのサルの行動特性として，意欲が低下したときには，難しい課題に対するエフォートのコストが特異的に増加し，易しい課題に対するエフォートのコストには変化がないという，意欲とエフォートコストの間に非線形的な関係があることも明らかになった。

IV. おわりに

本年度は，運動主体感と運動学習の関係を調べる行動実験パラダイムの開発，運動主体感の構成要素である操作性認知の神経基盤の解明に関して進展がみられた。また，意欲に関して，サルにおいて意欲を評価あるいは操作しながら運動学習の過程を研究するための行動パラダイムを確立することができた。以上のような研究成果の他にも，研究代表者・分担者のグループは，B03 項目の井澤淳も交え，操作性の認知が運動学習に与える影響を，ヒトとサルで調べるための議論を積み重ねている。次年度以降は，ヒトとサルで共通する実験パラダイムの構築を行う予定である

REFERENCES

- [1] 田中大, 井澤 淳, 今水 寛 (2019) 誤差の原因帰属の主観的判断が運動学習に与える影響. 第 13 回 Motor Control 研究会, 東京大学農学部弥生講堂 (東京都文京区弥生), 第 13 回 Motor Control 研究会抄録集, p. 63
- [2] Imaizumi, S., Tanno, Y., and Imamizu, H. (2019) Harmonization of resting-state functional MRI data across multiple imaging sites via the separation of site differences into sampling bias and measurement bias. *Consciousness and Cognition*, 73, e102768.
- [3] Ohata, R., Asai, T., Kadota, H., Shigemasu, H., Ogawa, K., and Imamizu H. Sense of agency beyond sensorimotor process: Decoding self-other action attribution in the human brain. *Cerebral Cortex*, in press.
- [4] Imamizu, H., Wen, W., Ohata, R., Tanaka, M., Yamashita, A., and Asama, H. (2019) Response to gaining and losing control in human brain. The 83rd Annual Convention of the Japanese Psychological Association.

A04. 神経伝達物質の異常に伴う超適応を誘発する脳活動ダイナミクスの変容

高草木薫¹・花川隆²

¹旭川医科大学・生理学講座神経機能分野

²京都大学 大学院 医学研究科/国立精神・神経医療研究センター (NCNP)

Abstract— The present research project (A04) is designed to test the hypothesis that the alteration of neural dynamics following abnormal DA or ACh neurotransmissions may lead to the change of “rule of the conduct” as an underlying mechanism of “hyper-adaptation”. For this purpose, we employed both basic animal studies and clinical human studies in elder person. In this first year, we established methods of both studies. Takakusaki and colleagues established methods for evaluating optimal postural control in multitask voluntary movements (from gaze fixation in quite standing to postural preparation and forelimb reaching) in cats. This experimental system will be also applied to the model animals with damages in DA and ACh so that roles of these neurotransmitters in the alteration of optimal postural control during voluntary movements can be elucidated. Hanakawa and colleagues used a simultaneous EEG-fMRI for evaluating a dynamic profile of functional connectivity between distinct neural networks. They also started to examine neuromelanin MRI and DA transporter (DAT) SPECT for evaluation of dopamine systems. These studies will clarify relationship across cognitive functions, neural network dynamics and neurotransmitters underlying the generation of hyper-adaptation.

I. はじめに

加齢によって脳と身体に様々な変化が生じる。脳内のドパミン (DA) やアセチルコリン (ACh) 等の神経伝達物質も例外ではない。高次脳機能や運動機能が障害されるパーキンソン病 (PD) やアルツハイマー病 (AD) の患者数は加齢に伴い増加し、各々、DA と ACh の減少が関与すると考えられている。DA トランスポーター (DAT) -SPECT によると、DA 細胞は毎年 1-2% ずつ減少する。DA 低下は大脳基底核-皮質多重回路の機能を低下させるため、運動機能と認知機能は障害される [1]。また、大脳皮質の ACh が減少すると、AD の鍵分子である β アミロイド (β) が蓄積する。 β は AD 発症の 10-20 年前から蓄積し、ポジトロン断層像 (PET) 検査では正常な認知機能の高齢者でも 30% にその蓄積が検出される [2]。高齢者の脳機能に影響を与える要因は多数あると想定される。しかし、DA, ACh, β などの強力な因子が PD や AD と関連する可能性を考慮すると、これらの因子と高次脳機能や運動機能を高齢者の各個人において適切に評価することが必要である。

そこで、A04 項目では、上記神経伝達物質や関連分子の動態変化に伴う脳活動ダイナミクスの変容メカニズムを解析することによって、これらの因子がヒトや動物の適応機能の発現や、高齢者における適応則の変容 (超適応) にどのように関与するかを解明することを目標とした。

II. 目的

上記の目標を果たすため、本研究では、モデル動物を用いた基礎実験とヒトにおける臨床研究を展開する。

高草木グループ (研究代表者; 旭川医大) は動物実験を担当する。ACh 系や DA 系を急性あるいは慢性的に障害した疾病モデルネコを作成し、マルチタスク遂行時の姿勢制御を解析する。そして、正常時、ならびに、ACh 系や DA 系の障害時において、随意運動を遂行する際の“最適姿勢制御則”を見出し、その背景に存在する神経機構の同定を目指す。具体的には、様々な境下において、「標的の注視・静止立位から標的への前肢リーチング」の「マルチタスク随意運動」を学習したネコの DA 系と ACh 系を薬理的・分子-光遺伝学的手法で変調させ、タスク時における注意立位維持と前肢リーチングに先行する準備姿勢を解析する。さらに、これらのプロセスに関与すると想定される前頭-頭頂ネットワークと皮質からの運動性下行路 [3-4] の活動を電気生理学的手法と神経解剖学的手法によって解析する。

花川グループ (研究分担者; 京都大学/NCNP) は臨床研究を遂行する。2019-2023 年の 5 年間の研究期間において、現在構築中の健常高齢者、認知症、PD を対象とした PADNI コホート (<https://padni.org/>) のデータを活用しつつ、DA 低下や β 蓄積の有無を確認した高齢者を対象に、脳波-fMRI の同時計測を行う。これにより、加齢に伴うヒトの脳活動ならびに脳の各領域の結合ダイナミクスの変化と、認知機能を中心とする脳活動変化を統合的に計測し、数理モデル構築のためのデータ提供を目指す。またこれらの研究と並行して、DA 低下、脳活動・結合ダイナミクスの計測法の信頼性向上のための基礎研究 (Neuromelanin MRI [5] や DA transporter (DAT) -SPECT) を行う。

III. 研究成果

本年度の具体的な成果は以下の 3 点である。以下、それぞれの概要を説明する。

A. モデル動物によるマルチタスク実験システムの構築

研究代表者 (高草木) らのグループは、四肢で立位姿勢を維持するネコが認知-運動連関を必要とする「注意立位姿勢維持～最適姿勢制御 (予期的姿勢調節)～前肢リーチング動作」から成るマルチタスクを実現する実験モデル動物 (ネコ) を作成し、その姿勢制御を評価する解析を確立した (Fig. 1)。各肢に生じる床反力から圧力中心 (Center of vertical pressure;

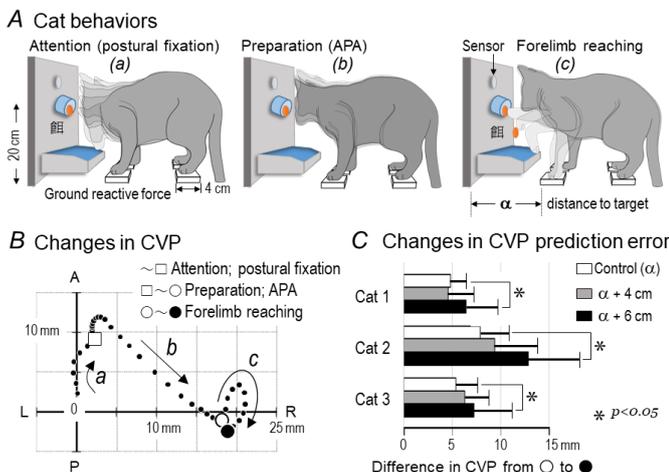


Fig. 1. Forelimb reaching task in the cat

A; ネコの姿勢維持-前肢リーチング. B; 圧力中心の変化, ~□は静止姿勢(a)に至る CVP 変化, □~○は姿勢の最適化(b)に至る CVP 変化, ○~●はリーチング動作時の CVP 変化. C; 標的とネコの距離を control から 4 cm, 6 cm と増加させると, 姿勢の予測誤差が増加した(3 cats). 各 40 試行を実施. Bar は標準偏差. * 統計的有意 ($p < 0.05$).

CVP)を算出し, 重心を反映する姿勢制御のパラメータとした. ネコは前方パネルの餌を目がけて前肢でリーチングする (Fig. 1A). その際, 前肢挙上直前(○)とリーチング終了時(●)の CVP 座標は近接しており (Fig. 1B), 各ネコにおいて至適な餌と前肢の距離 (図 1Ac “ α ”) では, 両座標に統計的有意差は無かった. これは, 前肢挙上時の準備姿勢(○)は, リーチング動作終了時の実姿勢(●)を既にコードしていることを示しており, 両者の差は, 「姿勢の予測誤差」であると考えられる. さらに, リーチングの距離を増加させると (Fig. 1C), 姿勢の予測誤差 (○●間の距離) は増加することから, この姿勢の予測制御には自己身体と標的の空間座標の認知情報に基づく高次脳機能によって実現されると考えられる. さらに, ムシモールの微量注入によって皮質運動関連領野 (312 野, 4-6 野) や頭頂葉 (5-7 野) の活動を低下させると, 一連の姿勢調節能が変化することから, 姿勢の予測制御が前頭-頭頂ネットワークの機能によって実現されると考えられる [6].

B. 脳活動・結合ダイナミクス計測法の開発

研究分担者の花川 (京都大学/NCNP) らのグループは, 今後の高齢者への応用を睨み, 脳波-fMRI の同時計測を利用した脳活動・結合ダイナミクス計測法の開発を行った. fMRI の独立成分解析 (ICA) によりデフォルトモードネットワーク (DMN) や前頭頭頂ネットワーク (FPN) を抽出し, fMRI 信号のネットワーク間の相関 (FC) を, 時間窓を区切って検討したところ, 領域間 FC がダイナミックに変動することが裏付けられた (Fig. 2). 現在 fMRI データと EEG データの統合による各脳領域の結合ダイナミクスの解析法開発に取り組んでいる.

C. DA イメージング法の開発と検証

花川らのグループは, 高齢者や PD 患者で測定してきた DAT SPECT に加えて, 近年 DA 産生能の評価が可能な MRI 技術として注目されている neuromelanin MRI [5] の検討を開始した (Fig. 3). ただし, MRI 画像のコントラストが, どの程度

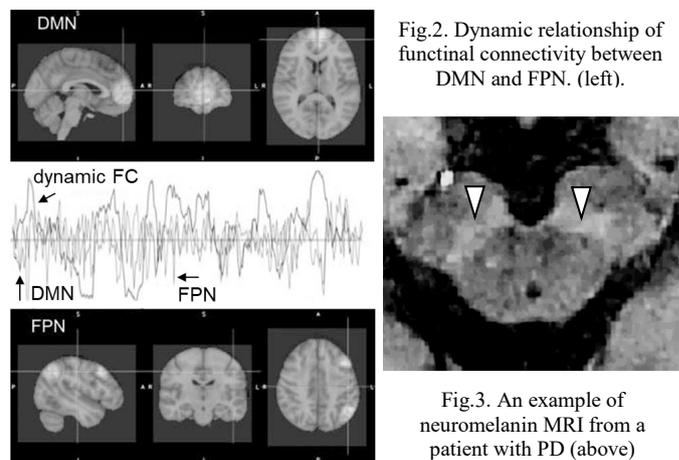


Fig. 2. Dynamic relationship of functional connectivity between DMN and FPN. (left).

Fig. 3. An example of neuromelanin MRI from a patient with PD (above)

neuromelanin や DA 産生能を反映しているのか未だ議論の余地が残されている. 従って, 顕微鏡を用いた組織学的検討を併用しながら, エビデンスを蓄積しつつ, 研究を進めることとする. 本年度は, そのための環境整備も実施した.

IV. おわりに

本年度, 高草木らのグループは, 実験動物 (ネコ) がマルチタスク遂行時に誘発される最適姿勢制御と姿勢の予測誤差を, それぞれ, 計測・評価するための実験手法を確立した. また, 同タスクを安定して遂行する実験動物のトレーニングを実施した. 次年度以降は, 薬理学的手法や光-分子遺伝学的研究手法と神経生理学的解析手法を組み合わせ, 最適姿勢制御を実現させる大脳皮質機構や運動性下行路の同定, 並びに, DA-ACh 系の機能的役割について解析を進める予定である.

本年度, 花川らのグループは, は, 脳活動・結合ダイナミクス計測法の開発を行った. 本手法と DA イメージングについての基礎的検討を重ねつつ, 研究期間内にこれらの技術を PADNI コホートに応用する予定である. また, PADNI コホートでは DAT-SPECT を用いて線条体 DA 低下を検出する予定であるが, 今後, 新たな症例を追加することを想定し, 黒質 DA 産生を反映すると言われる neuromelanin MRI の基礎的検討も合わせて行う.

REFERENCES

- [1] T. Hanakawa, A.M. Goldfine, M. Hallett. "A common function of basal ganglia-cortical circuits subserving speed in both motor and cognitive domains" *eNeuro* 4(6), 2017, e0200-17.
- [2] Jansen WJ et al. "Prevalence of cerebral amyloid pathology in persons without dementia: a meta-analysis" *JAMA* 313(19), 2015, 1924-3.
- [3] Takakusaki K. "Functional neuroanatomy for posture and gait control". *J Mov Disord* 10 (1), 2017, 1-17.
- [4] Takakusaki K, Takahashi M, Obara K, Chiba R. "Neural substrates involved in the control of posture". *Adv Robot* 2017, 31 (1-2), 2-23.
- [5] Sulzer D et al. "Neuromelanin detection by magnetic resonance imaging (MRI) and its promise as a biomarker for Parkinson's disease" *NPJ Parkinsons Dis* 2018, 4:11
- [6] Takahashi M, Nakajima T, Miyagishi S, Chiba R, Obara K, Takakusaki K. "Roles of the parietal cortex in postural adjustments that accompany forelimb reaching in the cat". *Abstract of 42th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, pp 258.

B班（システム工学）の活動報告

近藤 敏之

東京農工大学大学院工学研究院

t_kondo@cc.tuat.ac.jp

I. 目的

システム工学班では、構成論的数理モデル化による超適応現象の理解を目指している。本領域研究の推進において、システム工学班が果たすべき具体的役割としては、以下3点が挙げられる (Fig. 1)。

- 数理モデル構築による理解の促進
- 因果関係の解明を狙った介入技術・戦略の開発
- 新たな実験仮説の提案

現象を数理モデル化するためには、神経生理学・心理物理学実験のデータから推察される仮説をもとに数式を立ててモデル化するホワイトボックスモデル、ニューラルネットなどの関数近似器でモデルを表現し、そのパラメータを機械学習アルゴリズムによって最適チューニングするブラックボックスモデル、ならびにその両方を組み合わせたグレイボックスモデルがある。特に本領域では、神経生理学的知見を積極的に組み込んだグレイボックスモデルにより、機能推定可能な脳情報デコーディング技術を開発する。

超適応現象の理解に向けて重要なことは、因果関係の解明に取り組むことである。そのための方法論として、本領域では、ロボティック介入脳神経科学法を提案している。その実現には、実験条件を統制するための適切な介入技術・戦略を工学的に開発し、システム工学研究者も神経生理学実験に積極的に参画することが重要である。ロボティック介入脳神経科学法の実例としては、機能推定可能な脳情報デコーディングの結果に基づいて脳の特定部位を刺激することや、ロボットを用いた感覚・運動への介入などが考えられる。したがって、この目的のためにもモデルが必要となる。

また、モデルを構築する目的として、実験していない条件下のふるまいを予測することが挙げられる。したがって、構築したモデルに基づいてシミュレーションを行い、その結果に基づいて新たな実験仮説を提案することも、システム工学班に期待される役割のひとつである。

II. 班構成

上述の目的を達するため、B班では計画研究として以下の4つの研究項目を設定した。

研究項目 **B01** 生体構造の再構成に関わる潜在回路に基づく超適応メカニズムのモデル化

研究代表者 近藤 敏之 (農工大)

研究分担者 千葉 龍介 (旭川医大), 矢野 史朗 (農工大)

研究協力者 2名

研究概要: 人やサル脳の活動・筋活動・行動などの長期マルチモーダルデータの背後にある生体構造を定量化するモデル化手法を提案するとともに、高齢者に見られる機能的抑制の減退メカニズムをモデル化し、生体構造の再構成を促進する運動課題の開発に取り組む。

研究項目 **B02** 身体変容への超適応のモデル化

研究代表者 小池 康晴 (東工大)

研究分担者 船戸 徹郎 (電通大)

研究協力者 5名

研究概要: 筋再配置に伴って生じる生体構造の再構成の学習機序を、人を対象とする仮想手術実験ならびに筋骨格モデルを用いた解析によって解明する。

研究項目 **B03** 認知・情動に着目した超適応現象のシステム論的理解と実現

研究代表者 浅間 一 (東大)

研究分担者 井澤 淳 (筑波大), 温 文 (東大), 安琪 (東大)

研究概要: 認知や情動が行動適応、運動学習に及ぼす影響をシステム論的に明らかにし、それをもとに有効なりハビリ手法を提案することを目指す。

研究項目 **B04** 姿勢制御における神経伝達物質の作用を考慮した超適応モデリング

研究代表者 太田 順 (東大)

研究分担者 四津 有人 (茨城県医大)

研究協力者 5名

研究概要: パーキンソン病患者にみられるマルチタスク下の姿勢制御機能の低下を、神経伝達物質のダイナミクスに関するミクロレベルから、行動変容のマクロレベルまでを階層的にモデル化し、治療戦略を提案することを目指す。

III. 活動報告

本年度は、班として以下の活動を行った。各研究項目の具体的な研究成果は、各項目の報告書を参照されたい。

- 2019年9月13日 B01-B02-A02 項目会議 (NCNP)
- 2019年9月27日 B03-B04 項目会議 (茨城県立医療大学)

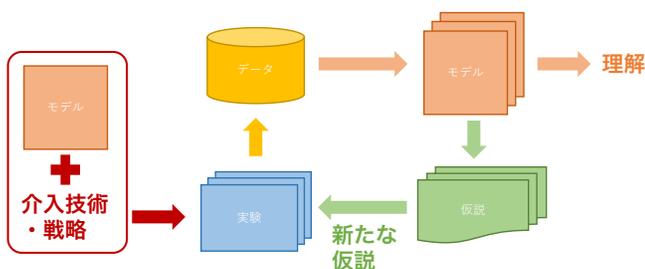


Fig. 1. Roles of systems engineering group.

- 2019年11月21日 B04-A04 項目合同会議（東京大学）
- 2019年12月18日 B01-B02-A02 項目合同会議（電気通信大学）
- 2020年1月25-26日 計測自動制御学会 自律分散システム・シンポジウム 超適応オーガナイズドセッション（芝浦工業大学），発表件数9件

IV. 今後の予定

2020年度は第1期の公募班が合流する。早期にB班会議を開催して共通理解を深めるとともに，脳神経科学班とのさらなる連携・共同研究テーマの立ち上げに取り組む。

B01-1 研究項目の研究成果報告

近藤 敏之

東京農工大学大学院工学研究院

t_kondo@cc.tuat.ac.jp

Abstract—To understand the adaptability mechanism of a large-scale and complex network system such as the brain, constructive approach is indispensable, where a phenomenon can be modeled with the minimum degrees of freedom, and behavior of the model is verified by computer simulations. This research project aims to realize systems modeling of hyper-adaptability mechanism with functional "dis-inhibition" observed in the impaired brain, especially from the viewpoint of reconstruction of neural structure.

I. はじめに

障害等による急速な身体の変化や高齢化に伴うゆっくりとした身体の変化に対し、我々の脳は、普段は抑制されている神経ネットワークの脱抑制(dis-inhibition)や、発達過程で使用されなかった潜在ネットワークを動員することによって新たな神経ネットワークを再構築し、適応していると考えられる。我々は脳が示すこのような適応力を超適応(hyper-adaptability)と呼ぶ。数多の脳神経科学的研究の知見が、超適応が我々の脳内で生じていることを示している。解析的なアプローチのみでは、神経ネットワークのシステムの挙動により発現する超適応のメカニズム解明は困難であると考えられる。そこで本領域では、システム工学の構成論的数理モデル化技術と脳神経科学的知見を融合した学際的研究を展開する。

II. 目的

本研究項目では、主に生体構造の再構成の観点から、広汎な脱抑制による脳の超適応機構をモデル化することに取り組む。脳のように大規模かつ複雑なネットワークシステムの適応過程を明らかにするためには、現象を必要最小限の自由度で記述・モデル化するアプローチが有用である。我々は観測データの背後にある低次元構造を抽出する統計的研究手法と、計算機シミュレーションによりモデルの挙動を検証する構成論的研究手法を軸に、生理学的理解の深化を目指す。

本項目では、(1) A01・A02 項目から提供されるサルや人の脳活動・筋活動・行動などの長期マルチモーダルデータに確率的潜在変数モデルを適用することで、データの背後にある生理学的構造を解釈・可視化することを試みる(Fig. 1)。また、皮質脳波から脳内の広汎な脱抑制構造の長期的変容を定量化するため、脳波と筋電図を統合した同時解析手法を確立する。(2) 若年者と高齢者で様相が異なる機能的抑制の減退メカニズムを解明するため、運動・認知間リソース配分などの臨床医学に基づく知見に加え、リソース制限や抑制強度などの未知パラメータを仮設することで脳内ネットワークのグレイボックスモデルを構成する(Fig. 2)。この脳内ネットワークモデルと筋骨格系モデルを統合して姿勢制御シミュレータを B04 項目と協調して

構築する。人を対象とした姿勢制御実験の結果と比較することで、モデルの未知パラメータを推定する。(3) VR・ロボット技術を用いて脳と身体の関係性を任意に変更可能な実験系を構築し、これを用いて健常若年者、高齢者を対象とした協調運動学習実験を行い、生体構造の再構成を促進する運動課題を A01 と共同して開発する。これらの結果を総合することで、障害・疾患からの回復過程における生体構造の再構成を推定する超適応モデルを実現し、効果的な治療・訓練のための知見を得ることを目的とする。

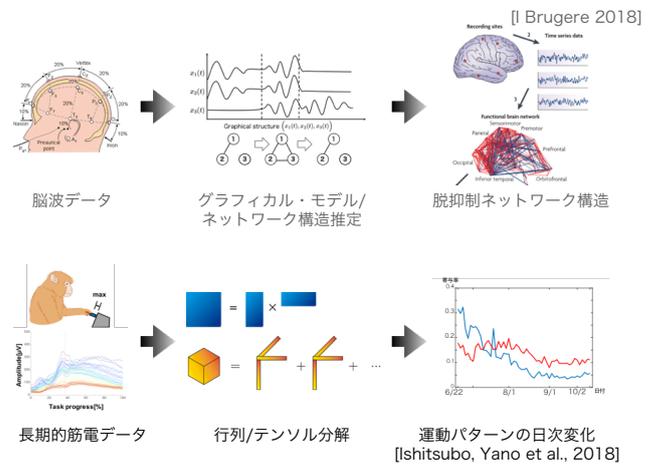


Fig. 1. Statistical modeling approach.

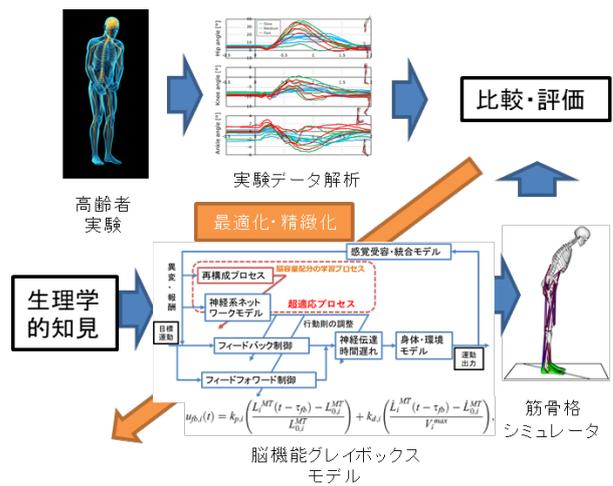


Fig. 2. Constructive modeling approach.

III. 研究成果

A. 長期マルチモーダルデータへの確率的潜在変数モデルの適用

研究分担者の矢野（東京農工大学）のグループは、脳活動・筋活動の同時計測によるマルチモーダル時系列データから、それらの協調的活動をネットワーク構造推定する統計手法の構築を直近の目標としている。超適応により普段使用しない脳活動領域へと活動がシフトする前後のネットワーク構造の時間変化を推定し、予測することを目指す。

本年度は、従来の身体運動データ分析であるシナジー分析を発展させた手法を2つ提案し [1], [2], 人工データおよび実データで評価を行った。1つ目の手法 [1] では、数ヶ月にわたり定期的に計測した同一種類の運動中の筋活動時系列データを対象とし (Fig. 1 左下), 運動訓練の反復に伴って生じる筋活動の長期的適応の過程を分析、予測することを目的とした。本手法は、従来の筋シナジー分析で時間基底と呼ばれる従来のものと同様の基底ベクトルが得られるという先行手法の発展的手法となる。加えて日々の訓練に伴って変容していく時間基底の用いられ方が推定できるため、運動学習や適応の効果を定量化し、予測する用途が可能である。

2つ目の手法 [2] では、異なる筋を協調的に制御する挙動が、観測された多次元時系列データの相互相関に現れるという着想のもと筋シナジー分析を発展させた手法である。複数の時間基底の協調的使用の推定問題を Gaussian graphical model の構造推定問題として定式化し、モーションキャプチャデータに適用することで異なる運動のネットワーク構造を抽出した。

B. 脳内ネットワークモデルと筋骨格系モデルの統合

研究分担者の千葉（旭川医科大学）のグループは、若年者と高齢者の脳内ネットワークの相違をモデルによって推定するべく、立位姿勢維持タスクと計算認知課題の二重タスクに着目している。若年者と高齢者の二重タスクにおける結果の相違をもたらす要因を筋骨格系身体モデルを用いた姿勢制御シミュレータのパラメータの相違によって推定することを当面の目標としている。

本年度は上記の目標に向け、二重課題における姿勢制御の変化を説明するべく実験系の構築とシミュレータの改良を行った。実験系の構築には二重課題の効果が表面化しやすい立位課題と認知課題の設計が必須である。そこで予備実験を行った結果、立位姿勢は通常の開脚立位姿勢に加え、より大きな動揺を示す閉脚立位課題も採用することとなった。また、認知課題は与えられた3桁の整数から7ずつ減算する計算課題が動揺および筋活動に変化を及ぼし妥当であることが分かった。この予備実験を受け、閉脚立位を表現可能である姿勢制御シミュレータの改良を行った。ここにおいて筋骨格系身体モデルを用いた筋緊張の制御を含む神経系制御モデル [3] を適用することにより、二重タスクが「筋緊張」に及ぼす影響を調査可能とした。

上記の実験系とシミュレータを用いて B04 研究項目と共同で若年健常者を被験者に実験を行い、二重タスク時に開脚立位での重心動揺が減る結果を得て、制御系パラメータの変化の可能性を示唆した。並行して両立位を提案シミュレータによりパラメータの変化を推定した結果、開脚時は筋緊張の低下が閉脚立位時の姿勢動揺の変化をもたらす可

能性を示し、また閉脚時は筋緊張が低下できない可能性を示した。これにより、筋緊張低下をもたらす認知課題が姿勢の変容を説明することをモデルにて確認した。

C. VR・ロボット技術を用いた運動学習実験

研究代表者の近藤（東京農工大学）のグループは、環境変化への適応力 (adaptability) を高める運動課題を探索するため、VR 技術と触覚呈示ロボット技術を組み合わせた到達運動課題を考案して運動学習実験を行い、学習後の被験者の運動記憶ならびに汎化能力と学習条件 (ロボットによる運動支援の大きさと課題難易度を調整) の関係を運動成績により評価することを試みた。実験の結果、ロボットによる運動支援が学習者の運動技能と合わせて変化する技能レベル整合 (skill-level matching) アルゴリズムにより訓練を行うことで、学習者の適応力を高めることが期待できることを示唆する結果を得た (未発表)。両手間/二者協調運動課題による運動学習実験 [4] では、左右手間の協調もしくは二者が力触覚による相互作用を通じて協調運動を実現する際の戦略を状態遷移モデルを構成して解析した。実験の結果、単独被験者の両手間協調運動をベースラインとした場合、二者協調運動下では、互いの運動意図を探るための原始言語に相当する状態遷移が有意に増加することが確認された。

また、運動課題下の脳活動データから運動状態をデコーディングする研究にも取り組んだ [5]。ディスプレイ上で等速円運動する視覚ターゲットをマウス操作に連動するトレーサーで追跡する運動課題下で脳波を計測し、脳波チャンネル間の機能的結合の動的変化を解析することで、3種類の実験条件 (運動のみ、視覚刺激の観察のみ、視覚追跡運動) 下でそれぞれ異なる特徴量を同定した。

IV. おわりに

本年度は、統計的モデルと構成論的モデルの両面から、基礎となるモデル構築の方法論について検討した。また、学習者の適応力を高める運動課題の探索に着手した。来年度は、引き続きモデル構築の方法論を深化させるとともに、脳神経科学班から皮質脳波、筋電図などの神経生理学データの提供を受け、モデル化に取り組む予定である。また、適応力を高める運動課題と脳活動データの同時解析を行うことで、フレイル状態にある高齢者の脳に脱抑制を伴う構造再構成を誘導する運動課題を引き続き探索する。

REFERENCES

- [1] S. Yano, A novel matrix decomposition method for analyzing Daily motor learning process of Macaque monkey, Workshop on Neuro-Robotics 2019.
- [2] 酒井洸輔, 矢野史朗, 近藤敏之, 身体周期運動の Mocap データの低次元化とグラフ構造の抽出, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会
- [3] K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki and J. Ota, Investigation of the effect of tonus on the change in postural control strategy using musculoskeletal simulation. *Gait & Posture*, 76, 298-304, 2020.
- [4] N. Thorne, J. J. Honisch, T. Kondo, S. Nasuto and Y. Hayashi, Temporal Structure in Haptic Signaling Under a Cooperative Task, *Frontiers in Human Neuroscience*, Volume 13, 372, 2019.
- [5] N. T. M. Phuong, X. Li, Y. Hayashi, S. Yano and T. Kondo, Estimation of brain dynamics under visuomotor task using functional connectivity analysis based on graph theory, *Proc. the 19th annual IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE 2019)*, Athens, Greece, 2019.

B02 研究項目の研究結果報告

小池 康晴*, 船戸 徹郎†

* 東京工業大学 科学技術創成研究院,

† 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

Abstract—本年度の具体的な成果は、大きく分けて次の3項目である。1. 筋電図を効率的に計測するために、アレイ状に電極を配置した筋電図計測装置を用いて筋活動を計測し、同時に計測した力や動きの関係を筋骨格系モデルを用いて推定を行った。2. A02 班の筋再配置実験の前後の筋シナジーを解析し、数理モデルによる検証を行なった。筋シナジーのゆっくりとした変化と時間パターンの速い適応が、実験で見られた時間パターンの変化を生じた可能性を示唆する結果が得られた。3. 脳波により運動の直前の運動計画段階で、運動の特徴が再現できること、また、その情報が運動の方向や距離であり、ターゲットの位置そのものではないことを示唆する結果が得られた。

I. はじめに

本研究では、主に超適応機構の生体構造の再構成の観点から、身体変容に伴う運動の再獲得メカニズムのモデル化研究を行う。筋再配置による身体変容に対して、神経系は制御系の最適化と学習を繰り返すことで運動の適応を行うが、人や動物の実験から、神経系の変化の過程で神経系が持つモジュール構造：筋シナジーの再構成（生体構造の再構成による超適応）を伴う不連続的な変化を生じる例が報告されている。このような構造の再構成は身体と環境との相互作用を最適化及び学習する過程で自動的に行われると予想される。一方で、従来行われていた最適化や学習によるシステム工学的なアプローチにおいて、このような不連続な構造の再構成に注目し、そのメカニズムに迫る研究はほとんど行われていなかった。

II. 目的

本研究では、主に超適応機構の生体構造の再構成の観点から、身体変容に伴う運動の再獲得メカニズムのモデル化の研究を行う。筋再配置による身体変容に対して、神経系は制御系の最適化と学習を繰り返すことで運動の適応を行う。人や動物の実験から、このような神経系の変化の過程で筋シナジーの再構成（生体構造の再構成による超適応）を伴う不連続的な変化を生じる例が報告されている。構造の再構成は身体と環境との相互作用を最適化及び学習する過程で自動的に行われると予想される。この過程をモデル化するために、1) 仮想手術による人の長期的身体変容の影響を調べる実験系の構築、2) 脳活動と筋活動のデコーディング手法の構築、3) 筋再配置による身体変容を数理的に再現する筋骨格系モデルの構築を行う。これらのモデル研究を通して、生体構造の再構成を伴う超適応過程のメカニズムを明らかにする。

さらに、人の身体変容に伴う運動機能の変化を **Virtual Reality** を用いて仮想的に実現する実験系の構築と、力学シミュレーション環境の構築を行う。これにより、長期/短期の身体変容に伴う生体情報を得る実験系と、身体変容の力学過程を扱う情報処理環境を整備し、身体変容後の生体情報の変化のメカニズムに迫るためのシステムを確立する。

III. 研究結果

本年度の具体的な成果を以下に3つ挙げ概要を説明する。

A. 「仮想手術」による人の身体変容実験の実現

人の筋活動と手先の力の関係をモデル化し、実験参加者が発生した力の方向と、画面上で実現される力の方向を変化させることで身体変容を仮想的に実現する「仮想手術」実験環境を構築する。このためには、実験参加者の発生した筋活動を適切に計測する必要がある。筋肉の解剖学的な場所の情報を用いずに、電極を素早く設置することができれば、将来リハビリテーションなどで、患者に同じ手法を適用することが容易になる。このため、アレイ状に電極を配置した筋電図計測装置を用いて、96チャンネルの電極から得られた筋活動と同時に計測した力や動きの関係を筋骨格系モデルを用いて計算を行った。また、従来の様に解剖学的な情報を基に、筋の直上に配置した電極により計測した筋活動からの推定と比較を行った。その結果、アレイ状に電極を配置した場合には、表層の筋活動だけでなく、深部の筋活動も計測することが可能となり、トルクや位置の推定精度が向上した [1], [2]。

B. サルの筋再配置後のシナジー変化の数理モデル

A02 班の筋再配置実験では、サルのレバー操作課題において、指の伸筋 (EDC: 総指伸筋) と屈筋 (FDS: 浅指屈筋) を交差的に再配置し、再配置前後の筋電を計測した。計測した筋電に対して筋シナジー解析を行い、再配置後4ヶ月間に渡る筋シナジーの変化を、再配置前の筋シナジーとの相関を基に調べた (Fig. 1AB, Synergy 1 が主に屈筋群の活動, Synergy 3 が伸筋群の活動)。その結果、筋再配置前の筋シナジーの時間パターンに比べて「筋再配置後に時間パターンが変化し、しばらくした後に元のパターンへと変化する」ことを示した (Fig. 1B, 詳しくは A02 班報告書を参照)。B02 班では、このような現象が生じる要因として、筋シナジー (筋間の協調構造) と筋シナジーの時間パターンの間の変化速度の違いが関わっているのではないかと考え、数理モデルによる検証を行った。

筋シナジーが筋再配置後に2ヶ月程度の期間をかけてゆっくりと変化し、その変化の間、動作が達成できるように時間パターンが生成されたとする。つまり「筋シナジーがゆっくり変化し、それにあわせて時間パターンが速く適応できる」状況を考える。この時、筋シナジーのゆっくり変化にあわせて、時間パターンがどのような変化を生じるのかを考える。

タスクの達成のためには、動作自身が変化をすることも考えられるが、ここでは、簡単のために生成されるべき動作は筋再配置前と筋再配置後で同じとし、筋再配置前のトルクが筋再配置後で達成できるように時間パターンを生成

することを考える。 j 番目の関節の関節トルク τ_j は、 i 番目の筋肉の筋活動 m_i^j の τ_j への寄与率 a_i^j による重み付き和として、下記のように表される。

$$\tau_j = a_1^j m_1^j + a_2^j m_2^j + \dots + a_n^j m_n^j \quad (1)$$

また、筋電は筋シナジーによって構成されるとする。筋シナジー W 、筋シナジーの時間パターン H とすると、

$$[m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n] = \sum WH \quad (2)$$

となる。

ここで、腱再配置を関節トルクに対する寄与率の変化で考える。すなわち、1 番目と 2 番目の筋の再配置を以下のように表す。

$$a_2^{j+} = a_1^j, a_1^{j+} = a_2^j \quad (3)$$

時間パターン H は、腱再配置によって変化したトルクと、腱再配置前のトルクが等しくなるような最適化によって決定すると考える。すなわち、以下の評価関数を最小化するように選ばれる。

$$J = \sum (a^+ W^+ H^+ - a W H)^2 \quad (4)$$

これにより、筋シナジー W^+ の各値に対して、最適な時間パターン H^+ がそれぞれ一対決定する。筋シナジー W^+ を徐々に変化させた時に、時間パターン H^+ がどのような変化をたどるか調べた。

筋再配置実験では、サルのレバー操作中の指まわりの筋電位を 13 点において計測しており、そのうち EDC(総指伸筋)と FDS(浅指屈筋)を入れ替える手術を行っている。すなわち、モデルの解析において $n = 13$ であり、このうち EDC と FDS の寄与率 a^j を入れ替える。簡単のために、関節数は $1(j = 1$ のみ)とし、各筋のトルクへの寄与率 a^j は、 $ECR=0.5$, $ECU=1$, $EDC=1$, $ED23=1$, その他の筋=0 と設定した。

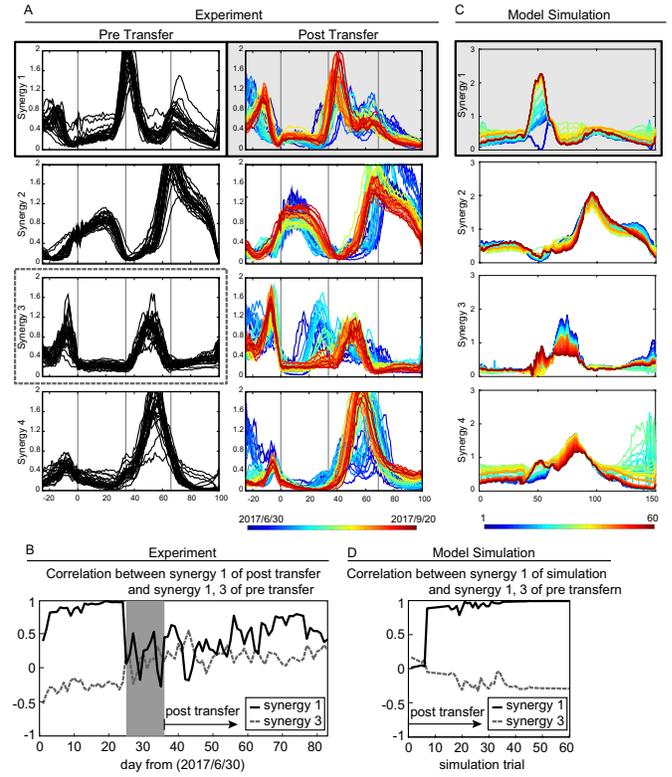
筋を再配置、すなわち寄与率 a を入れ替えた後、筋シナジーにおける EDC と FDS の大きさを 60 段階に渡って徐々に入れ替え、各筋シナジーに対応する時間パターンを最適化によって求めた所、Fig. 1C のようになった。さらに、再配置前との時間パターンの相関を計算したところ、Fig. 1D のようになった。時間パターンは初期段階 (a の入れ替え後、筋シナジー変化なし)においては、再配置前との相関が低く、異なるパターンとなっていたが、筋シナジーの変化に従って、徐々に再配置前のパターンとの相関が上昇する様子が見られた。

現在のところ極度にシンプルなモデルを用いた検討ではあったが、実験と同様の現象が見られており、仮定した通り、筋シナジーのゆっくりとした変化と時間パターンの速い適応が、実験で見られた時間パターンの変化を生じた可能性を示唆する結果が得られた。

C. 脳情報デコーディングによる再構成則過程の解明

仮想手術と筋再配置実験で得られた動作-筋電-脳波の活動情報を元に、身体変容後の運動再獲得がどのような過程で行われたかを明らかにする。生体情報の特徴の中で、特に複数の筋活動間の協調構造である筋シナジーに着目し、筋シナジーの構造の変化の過程を調べることで、生体構造の

Fig. 1. Temporal coefficient of synergies in tendon transfer experiment and in simulation. A,C: temporal coefficients of synergies in pre and post tendon transfer(A) and those of simulation(C). B,D: correlation coefficient of synergies in the experiment (B) and simulation (D)



再構成則を明らかにする。これらの情報が脳のどこでいつ計算されているかを確認するために、複数のターゲットにリーチングを行うときの運動計画時の脳活動から、運動の方向、距離、ターゲットの位置が推定できるかを確認した。その結果、運動の方向や距離は全ての実験参加者から高い精度で推定することができなかった [3]。

IV. おわりに

本年度は、A02 班との協力の下、A02 班で実際に計測されたデータを説明するモデルの構築を始めた。シンプルなモデルではあるが、動物実験を再現する結果が得られた。来年度以降は、精度を向上させ身体変容への超適応のモデル化を進める。

REFERENCES

- [1] S. Stapornchaisit, Y. Kim, A. Takagi, N. Yoshimura, and Y. Koike, "Finger angle estimation from array EMG system using linear regression model with independent component analysis," *Frontiers in Neurobotics*, 2019.
- [2] Y. Koike, T. Kawase, H. Kambara, N. Schweighofer, and N. Yoshimura, "Muscle Synergy Analysis for Rehabilitation," *Examines in Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 2, no. 5, pp. 1–20, 2020.
- [3] H. Kim, N. Yoshimura, and Y. Koike, "Characteristics of Kinematic Parameters in Decoding Intended Reaching Movements Using Electroencephalography (EEG)," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 13, no. November, pp. 1–13, 2019.

B03 研究項目の研究成果報告

浅間 一

東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻

本研究項目では身体認知・情動が超適応の獲得の過程に与える影響を解明し、身体制御の変化を定量的に予測可能な数理モデルを構築し、検証することを目的とする。さらに、数理モデルに基づいて、身体認知・情動を介して、超適応機能を促すモデルベースの介入手法の提案と検証を行う。本年度の主な成果として、1) 身体意識の生起と喪失に異なるメカニズムを発見した、2) 脳卒中や脳梗塞の後に運動機能が低下した片麻痺患者の回復過程における適応プロセスを調査した、3) 身体意識が運動学習に与える影響を検討した。

I. はじめに

B03 項目は身体認知・情動といった認知的な側面に注目し、新たな介入手法が身体認知・情動を介して、超適応機能を動員する過程をシステム論的理解し、超適応を実現するための介入手法を提案することを目指す。超適応過程を定量的に測定し、数理モデルを構築するため、意味推定が可能な脳情報デコーディング技術を開発し、身体認知・情動を定量的に測定する手法を確立する。さらに、モデルベースの介入手法を検証するために、ロボット介入脳神経科学プラットフォームの開発を行う。具体的に、片麻痺や脳性麻痺の患者において、超適応過程の定量化測定とモデル化を行う。超適応の数理モデルに基づき、モデルベースの介入手法を提案し、検証する。

II. 目的

本研究項目の具体的な目的は、図1に示されるように、介入または長期的な運動学習において、生体の身体認知・情動、および身体運動の再編成過程を定量的に測定し、予測が可能な数理モデルを構築し、モデルベースの最適な介入手法を提案し、検討する。

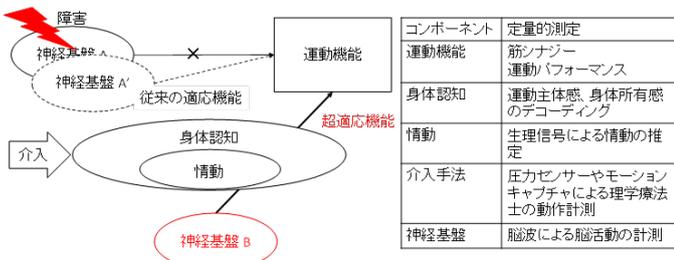


図1 身体認知・情動を介した超適応機能の過程、および超適応機能の過程を定量化測定する手法

III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に3つ挙げ、それぞれ概要を説明する。

A. 運動主体感の生起メカニズムと神経基盤の解明

研究代表者らのグループ（浅間，温）は、運動主体感の生起メカニズムについて、従来のコンパレータモデルと独立した別に、フィードバックと行動の統計的規則性の検出が重要な役割を果たすことを発見し、運動主体感の生起メカニズムを説明するモデルを提案した[1]。具体的に、実験参加者は3つのドットから自分が最もコントロールできるドットを1つ選ぶ課題を行った。3つのドットのうちの2つは完全に他人がコントロールしていたが、ターゲットであったドットは他者の運動を混ぜ、または一定な角度変換を行った。その結果、他者の運動を60%混ぜた場合は、90度の角度変換を行った場合と同程度の予測誤差を生み出し、運動制御の課題のパフォーマンスにおいて差がなかったにもかかわらず、他人の運動を混ぜた場合よりも、90度の角度変換を行った場合、コントロールできるドットの検出率が有意に高かった。前者において、規則性検出のプロセスが妨害されたのに対して、後者では妨害されなかったからと考えられる。運動主体感の生起には、従来の説に提唱されてきた予測誤差による処理のほか、規則性検出という統計的に計算プロセスの役割も重要であることが分かった（図2）

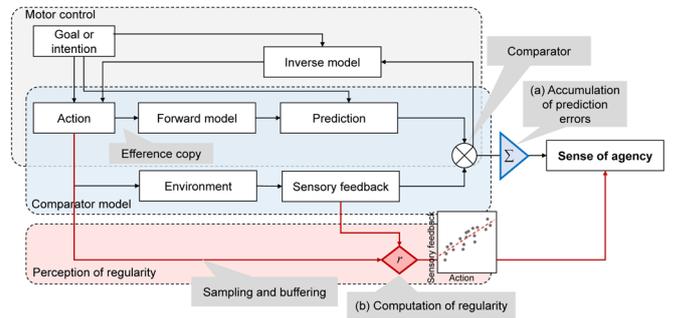


図2 規則性検出プロセスを配慮した運動主体感の生起モデル[1]

また、研究代表者らのグループ（浅間，温）はA03グループ（今水，大畑）と共同で、運動主体感の生起と喪失に関して異なる脳内神経基盤が存在するという仮説を検証した。その結果、運動主体感の生起において、前頭

前野背外側部と小脳外側部で活動の増加が見られたのに対して、運動主体感の低下において、島皮質に活動の低下が見られた[2].

B. 片麻痺患者の運動障害の評価

研究分担者の安琪（東京大学）らのグループでは、脳卒中や脳梗塞の後に運動機能が低下した片麻痺患者の回復過程における適応プロセスを調査した[3]. その中でも日常生活において重要な起立動作に着目し、運動障害の程度が異なる患者間において筋シナジーがどのように異なるのか調べた。まず森之宮病院にて入院中の片麻痺患者 33 名に対して、Fugl-meyer Assessment の下肢スコアに基づいて運動障害の中度な群（FMA \geq 20）と重度な群（FMA $<$ 20）に分類した。その中で、計測実験によって得られた起立動作中の筋活動から 4 つの筋シナジーを抽出し、時間的な特徴量に基づいて運動障害の異なる 2 群に分類するモデルをランダムフォレストによって構築した。その結果として、筋シナジーの特徴量を用いることで 84.5%の精度で運動障害の違いを判別できることが分かった。その中でも特に、運動障害が中度な群は重度な群に比べて、椅子からの離床に寄与する筋シナジーの活動の開始時間やピーク時間、終了時間が有意に早くなっていることが分かった。このことから片麻痺患者の起立動作において、筋シナジーの活動タイミングを指標として、運動回復の過程および適応プロセスを推定できるということが示唆された。今後の研究においては、情動や認知がリハビリテーションにおける運動回復に対してどのように影響を与えるのか調査していく。

C. 学習の残効の知覚が学習スピードに与える影響

研究分担者の井澤（筑波大学）ならびに四津（茨城県立医療大学）らのグループは、超適応の理論的背景を調べる目的で、脳が運動学習スピードを適応的に変化させる機構において、学習の効果に対する認識が与える影響を調べた。効率的なリハビリテーションプログラムの立案のためには科学的根拠の継続的な蓄積が求められる。運動学習の脳内メカニズムを明らかにし、運動学習機能を促進する要因や低下を防ぐ方法を提供することでリハビリテーションにとって有用な知見となる。これまで運動学習メカニズムとして、①教師あり学習、②強化学習、③教師なし学習を中心に研究が行われてきた。また、これらの運動学習メカニズムは単独で行われるのではなく、並列関係を持って行われることを感覚運動学習と呼んでいる。本研究では、感覚運動学習における教師あり学習の学習率の調整メカニズム（超適応）の理論的背景を明らかにすることを目的とした。右利き健常成人 20 名を対象とし、自由運動環境群と軌道制限環境群にそれぞれ 10 名ずつ割り当てた。運動課題はロボットマニピュラタムを用いた上肢の到達運動とし、被験者は 10 cm 前方に提示されるターゲットに向かって到達運動を行う。全 130 試行を行い、その内 10 セットの誤差感度測定試行を用意した。誤差感度測定試行では左向きの力場をレバーに

加え、力場環境の前後での力の変化を測定することで誤差感度を算出した。本研究における測定スケジュールの統計的性質からは誤差感度は変化しないことが予測された。誤差感度は、群と誤差感度測定試行の間に交互作用が認められ($p = 0.015$)、誤差感度測定試行を前後半に分けて検定を行った結果、自由運動環境群は誤差感度測定試行を重ねると誤差感度が低下し($p = 0.001$)、軌道制限環境群は低下しなかった($p = 0.53$) (図 3)。

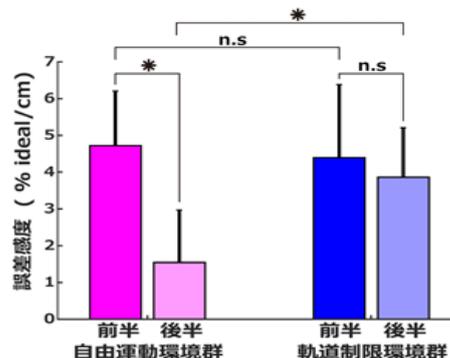


図 3 各条件における誤差感度

以上より、記憶の更新に伴って、自己生成した誤差の知覚によって運動学習の学習率の調整が行われることを示した。これは学習率の調整（超適応）にとって誤差を嫌悪するメカニズムが重要な役割を担っていることを示唆している。

IV. おわりに

B03 項目では本年度において、身体意識の生起メカニズム及びその脳内基盤を検討し、片麻痺患者の運動障害の定量的評価を行い、さらに、運動環境が運動誤差の感度に与える影響を実験的に検討した。次年度では、情動が身体意識の生起、運動学習に与える影響をさらに検証し、モデル化を行い、片麻痺患者におけるリハビリ手法の提案を行う。

REFERENCES

- [1] W. Wen and P. Haggard, "Prediction error and regularity detection underlie two dissociable mechanisms for computing the sense of agency," *Cognition*, vol. 195, p. 104074, 2020.
- [2] W. Wen, R. Ohata, M. Tanaka, A. Yamashita, H. Asama, and H. Imamizu, "Two dissociable processes for detecting gaining and losing control in human brain," in *The 23rd Annual Meeting of Association for the Scientific Study of Consciousness (ASSC23)*, 2019.
- [3] N. Yang *et al.*, "Temporal features of muscle synergies in sit-to-stand motion reflect the motor impairment of post-stroke patients," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2019, vol. 27, no. 10, pp. 2118–2127.

B04 研究項目の研究成果報告

太田 順 (東京大学 大学院工学系研究科 人工物工学研究センター)
四津 有人 (茨城県立医療大学 医科学センター)

I. はじめに

本研究項目では、主に超適応機構の行動遂行則の再編成の観点から、以下の仮説の検証を目指している。「ドーパミン (Dopamine; DA) 等、神経変性疾患等において減少する神経伝達物質が、脳領域の活動量・神経回路間の結合強度を調節し、マルチタスク機能を制御する。」ここで、マルチタスク機能とは、複数の作業を円滑に同時並行的に実行する機能を意味する。その達成のため、姿勢制御における神経伝達物質の役割を考慮した数理モデル構築を行う。以下の3項目に取り組んでいる。1) 神経伝達物質の姿勢制御における役割の検証。パーキンソン病などの神経変性疾患患者では、マルチタスクの遂行に必要な機能が障害され、その背景には神経細胞の変性や神経伝達物質の異常が存在すると考えられている。そこでパーキンソン病で変化する神経伝達物質に着目し、マルチタスクの遂行における神経伝達物質の役割を検証する。2) 姿勢制御における神経伝達物質の役割を考慮したマルチタスク表現モデルの開発。神経伝達物質というミクロな情報と、その情報処理後の結果として現れる行動-生理反応というマクロな情報の統合を目指す。「マルチタスクの数理モデル」を開発する。3) 構築した数理モデルの検証。生体より得られたデータを用いて構築した「マルチタスクの数理モデル」の検証を行う。

本研究項目は、研究代表者(太田)、研究分担者(四津)と5名の研究協力者(白藤, 上西, 尾村, 石井, 濱田)から構成されている。

II. 研究成果と今後の計画

A. 計算機モデル上での姿勢異常の表現

太田らは、A04 計画班の高草木、B01 計画班の千葉(旭川医科大学)らと共同で、姿勢制御における神経伝達物質の役割を考慮した数理モデル構築を行っている。

本年度は、神経変性疾患のひとつであるパーキンソン病患者に特有の姿勢異常を、計算機モデル上で表現することを目指した。パーキンソン病患者の特徴として、姿勢異常と筋緊張の増加が挙げられる。筋緊張を考慮した神経系姿勢制御モデルを用いてこれらの異常を表現し、パーキンソン患者の姿勢制御異常の解明の手掛かりとするものである。パーキンソン病患者は、首下がり等、頸部に特徴的な姿勢異常を見せることがある。これを表現するため、既存の下肢に重きを置いていた筋骨格モデルに頸部の関節自由度と筋肉を追加し、19の関節自由度と94の筋を持つ筋骨格モデルを構築した。またパーキンソン

ン病では、筋緊張が過剰に増加することが知られている。そこで、筋緊張を調節する機能を持つ網様体脊髄路をモデル化した神経系姿勢制御モデルを用いて、構築した筋骨格モデルを制御した。通常の直立姿勢とパーキンソン病患者の異常姿勢とを目標姿勢として神経系姿勢制御モデルに与え、それぞれの姿勢条件で制御パラメータを最適化によって計算した。その結果、直立姿勢と異常姿勢のいずれでも、筋骨格モデルの立位を維持することに成功した。目的としていたパーキンソン病患者特有の姿勢異常を計算機モデル上で表現することができた[1]。直立姿勢・異常姿勢それぞれを可能とするような筋緊張を網羅的に探索した結果を比較したところ、異常姿勢ではより大きな筋緊張が必要であることが分かった (Fig. 1)。異常姿勢を呈するパーキンソン病患者は、筋緊張の増加がみられることから、シミュレートされた異常姿勢における筋緊張の増加は妥当であるといえる。さらに身体各部位における筋緊張を計算したところ、特に足首部において筋緊張の増加が見られた (Fig. 2)。健常者は外乱に対し、感覚によるフィードバックゲインと足首の剛性を協調させて姿勢制御を行うことが報告されている。パーキンソン病患者は異常姿勢を取ることによって、足首の剛性が無自覚に増加し、外乱に対してフィードバックゲインと協調して変化させることができないということが姿勢制御障害を引き起こす一因ではないかと考えられる。今後は神経系制御モデルに、身体を垂直に保つ機能を持つ前庭脊髄路を導入し、姿勢異常と姿勢制御異常との関係の解明を目指す。また、実際にヒトを対象とした実験を行い、構築した数理モデルの検証を目指す。

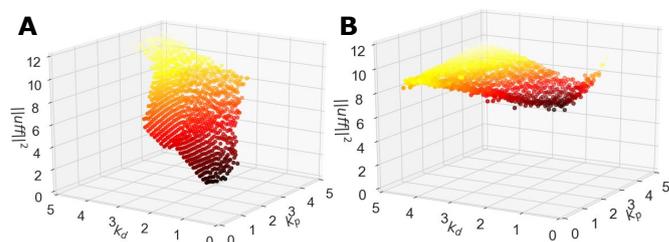


Fig. 1 立位を維持可能な筋緊張の大きさ。(A) 直立姿勢。(B) 異常姿勢。縦軸の値が大きいほど筋緊張が大きいことを示す。

この他に、筋骨格シミュレーションとヒトを対象とした実験を通して、立位時の筋緊張が、外からの力に対する反応にどのような影響を及ぼすか調査した。筋緊張の亢進が、足関節の動きを中心とした立位姿勢の維持につながる可能性がシミュレーションにより示唆された[2]。このシミュレーション結果はヒトの実験結果ともよく一

致し[3], 立位姿勢の維持における筋緊張の重要性を示す成果が得られた。

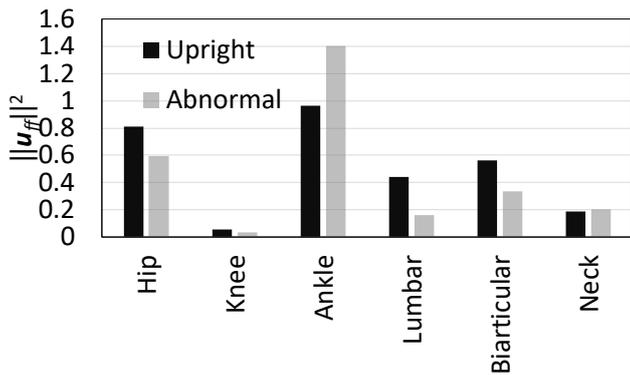


Fig.2 シミュレートされた各筋群の筋緊張。値が大きいほど筋緊張が大きいことを示す。黒が直立姿勢、灰が異常姿勢である。

B. マルチタスク下の姿勢制御における神経伝達物質の役割の検証

四津らは、マルチタスク下の姿勢制御における神経伝達物質の役割を検証している。本年度は、a) 姿勢課題と認知課題を用いたマルチタスクの設計を行い、b) 設計したマルチタスク中の運動学・生理学的反応を計測するシステムを構築した。c) 構築したシステムを用い、健常者およびパーキンソン病患者で計測を開始した。

a) 姿勢課題と認知課題を用いたマルチタスクの設計

健常高齢者やパーキンソン病患者でも遂行可能な課題とするため、姿勢課題は 30 秒間の静止立位を採用した。認知課題は、Granacher らの先行研究を参考に与えられた数字から 7 を引き続ける計算課題を採用した[4,5]。同一被験者が複数回課題を行う際の学習効果による認知負荷量の低下を避けるため、開始の数字は 300~900 の間でランダムに選択された。計算を発声させることによる重心動揺への影響を避けるため、回答は課題終了後に聴取する[6]。

b) タスク中の運動学・生理学的反応を計測するシステムの構築

計測する運動学的データとして、身体各部位の位置データおよび center of pressure の軌跡を計測する。生理学的データとして各筋の表面筋電図を計測する。身体部位の計測には頭部 (国際 10-20 法による Cz), 外後頭隆起, 第 7 頸椎棘突起, 肩峰 (左右), 剣状突起, 上前腸骨棘 (左右), 大転子 (左右), 膝関節 (左右), 外果 (左右), 踵 (左右), 第 5 中足趾節関節 (左右) にマーカーを貼付し、前方および側方よりビデオカメラにて撮影した。Center of pressure の計測には重心動揺計 (アニマ, 東京) を用い、サンプリングレートは 20Hz とし

た。表面筋電図は頸部傍脊柱筋, 胸鎖乳突筋, 腰部傍脊柱筋, 大殿筋, 大腿直筋, 半腱様筋, 前脛骨筋, ヒラメ筋の筋電位 (全て左右) を計測した。筋電位の計測には、ワイヤレス EMG システム (Delsys, Tokyo, Japan) を用いた。

c) 健常者およびパーキンソン病患者での計測

静止立位のみ→静止立位+計算課題→静止立位のみ の 3 トライアルで計測し、マルチタスクの影響を検証する。静止立位のみを再度行うのは、立位に対する学習効果を検証するためである。今回まずは若年健常者およびパーキンソン病患者を対象に、計測を行い安全に計測できることを確認した。パーキンソン病患者では、神経伝達物質の影響を検証するために、レボドパ製剤内服前 (最終内服から 12 時間以上経過) および投与後 (内服後 45 分以上経過した時点) の 2 ポイントで計測した。今後は、高齢健常者を計測し、パーキンソン病患者のサンプルサイズを増やしていき、解析を行う予定である。

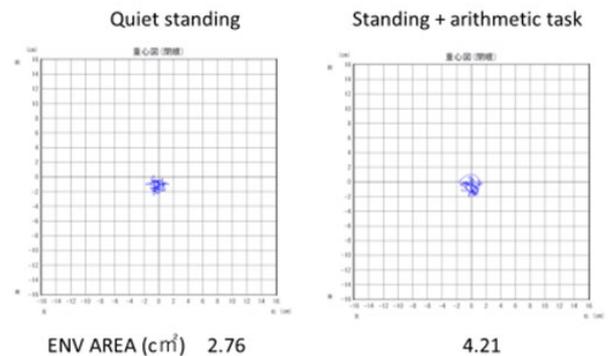


Fig.3 健常者の足圧中心の軌跡の一例

REFERENCES

- [1] 尾村, 上西, 千葉, 高草木, 太田: パーキンソン病の姿勢制御モデル構築のための計算機モデルにおける姿勢異常の表現, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, HA7, 2020.
- [2] K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota: Investigation of the effect of tonus on the change in postural control strategy using musculoskeletal simulation. *Gait & Posture*, 76, 298-304, 2020.
- [3] 上西, 千葉, 高草木, 太田: 床面水平外乱時の筋緊張が姿勢制御戦略に及ぼす影響, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, HA6, 2020.
- [4] Granacher U, Bridenbaugh SA, Muehlbauer T, Wehrle A, Kressig RW. "Age-related effects on postural control under multi-task conditions," *Gerontology*. Vol. 57, pp. 247-255, 2011.
- [5] Wild LB, de Lima DB, Balardin JB, Rizzi L, Giacobbo BL, Oliveira HB, de Lima Argimon II, Peyré-Tartaruga LA, Rieder CR, Bromberg E. "Characterization of cognitive and motor performance during dual-tasking in healthy older adults and patients with Parkinson's disease," *J Neurol*. Vol. 260, pp. 580-589, 2013.
- [6] Dault MC, Yardley L, Frank JS. "Does articulation contribute to modifications of postural control during dual-task paradigms?," *Brain Res Cogn Brain Res*. Vol. 16, pp. 434-440, 2003.

2019 年度活動報告リスト

1. 日時：2019/6/5
名称：SoS 研究会
場所：東大本郷 14 号館 330 号室
内容：研究の進捗・結果を報告し，議論を行った
2. 日時：2019/7/2
名称：A03 項目研究打ち合わせ
場所：東北大学大学院生命科学研究科筒井研究室
内容：実験動物における主体感・意欲を計測する方法について検討した
3. 日時：2019/7/22
名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ
場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室
内容：操作性の増加・減少を認知するメカニズムを fMRI で調べる実験についての議論
4. 日時：2019/8/25
名称：第 13 回 Motor Control 研究会シンポジウム「運動主体感の神経基盤～新学術領域・身体性システムの成果から」
場所：東京大学農学部弥生講堂
内容：新学術領域・身体性システムにおける運動主体感研究の概要をまとめ，超適応における今後の展開について議論した
5. 日時：2019/9/6
名称：A01 項目研究打ち合わせ
場所：京都大学医学部神経生物学
内容：研究成果の報告および共同実験を実施した
6. 日時：2019/9/11
名称：日本心理学会第 83 回大会 シンポジウム 「The role of sense of agency in explorative and exploitative actions」
場所：立命館大学 大阪いばらきキャンパス
内容：外部世界の探索と利用における運動主体感の役割について，最新の研究成果を紹介するとともに，新学術領域・超適応での展開と公募説明会について紹介した
7. 日時：2019/9/13
名称：サルの腱再配置の解析打合せ
場所：国立精神・神経医療研究センター
内容：サルの腱再配置の解析打合せ

8. 日時：2019/9/19
名称：B01 項目研究打ち合せ
場所：農工大 10 号館 405 室
内容：研究の進捗確認と今後の方針について議論した
9. 日時：2019/9/20
名称：キックオフシンポジウム・公募説明会
場所：東京大学本郷キャンパス伊藤謝恩ホール
内容：領域の研究についての説明と公募の説明を行った
10. 日時：2019/9/20
名称：B01-B04 項目連携研究打ち合わせ
場所：東京大学本郷キャンパス伊藤謝恩ホール
内容：研究の進め方について議論した
11. 日時：2019/9/20
名称：A03 項目研究打ち合わせ
場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室
内容：海外研究者との共同研究内容に関する打ち合わせ
12. 日時：2019/9/24
名称：SoS 研究会
場所：東大本郷 14 号館 330 号室
内容：研究の進捗・結果を報告し、議論を行った
13. 日時：2019/9/24
名称：姿勢制御実験と研究に関する打ち合わせ
場所：東京大学本郷工学部 2 号館 235 室
内容：実験のセットアップを行い、プロトコルについて議論した
14. 日時：2019/9/26
名称：B04 項目研究打ち合わせ
場所：茨城県立医療大学四津教員室
内容：研究の進め方について議論した
15. 日時：2019/9/26
名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ
場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室
内容：操作性の知覚に関する fMRI 実験打ち合わせ
16. 日時：2019/9/27
名称：B03-B04 項目連携研究打ち合わせ

場所：茨城県立医療大学附属病院カンファレンスルーム 4

内容：共同研究の具体的な進め方について議論した

17. 日時：2019/9/30 -10/4

名称：姿勢制御における筋緊張の関連性を調査するための実験

場所：東京大学本郷工学部 2 号館 235 室

内容：姿勢制御における筋緊張の関連性を調査するための実験を行った

18. 日時：2019/10/4

名称：B01-B04 項目連携研究打ち合わせ

場所：茨城県立医療大学

内容：研究の進め方と実験プロトコルについて議論した

19. 日時：2019/10/7

名称：A03 項目研究打ち合わせ

場所：東大本郷法文 2 号館 2128 室

内容：動物の身体保持感を計測・モデル化・電気生理実験した論文の紹介と、今後の研究方針に関する議論

20. 日時：2019/10/21

名称：A03 項目研究打ち合わせ

場所：東大本郷法文 2 号館 4 階会議室

内容：サルとヒトに共通の実験課題とモデル化の対象に関する議論

21. 日時：2019/10/31

名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ

場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室

内容：操作性の知覚におけるカテゴリー化を行動実験で捉える研究の打ち合わせ

22. 日時：2019/11/12

名称：A03 項目研究打ち合わせ

場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室

内容：海外研究者との共同研究内容に関する打ち合わせ

23. 日時：2019/11/14

名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ

場所：web 会議（東大本郷法文 2 号館 2128 室—東北大学筒井研究室—筑波大学井澤研究室）

内容：Controllability の認知をヒトとサルで多角的に捉えるための議論

24. 日時：2019/11/21

名称：A04-B04 項目合同会議

場所：東大本郷 1 4 号館 7 1 3 室

研究の進捗確認と検討課題について議論した

25. 日時：2019/11/26
名称：A03 項目研究打ち合わせ
場所：東大本郷法文 2 号館 2121 室
内容：運動主体感にバイアスを与える研究に関する議論
26. 日時：2019/11/27
名称：SoS 研究会
場所：東大本郷 14 号館 330 号室
内容：研究の進捗・結果を報告し、議論を行った
27. 日時：2019/12/12
名称：姿勢制御実験セットアップ
場所：茨城県立医療大学
内容：研究のセットアップを行い、プロトコルについて議論した
28. 日時：2020/12/13
名称：姿勢制御実験セットアップ
場所：茨城県立医療大学
内容：研究のセットアップを行い、プロトコルについて議論した
29. 日時：2019/12/18
名称：姿勢制御実験(B04)
場所：茨城県立医療大学
内容：姿勢動揺に関する実験を行った
30. 日時：2019/12/18
名称：B03 班会議
場所：東大本郷工 14 号館 713 室
内容：B03 班の研究計画と進捗確認
31. 日時：2019/12/18
名称：サルの腱再配置の解析打合せ
場所：電気通信大学西 2 号館 2 2 1 室
内容：サルの腱再配置に関わる解析・モデル化・シミュレーションについて打合せを行った
32. 日時：2019/12/20
名称：姿勢制御実験
場所：茨城県立医療大学
内容：姿勢動揺に関する実験を行った

33. 日時：2019/12/24
名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ
場所：web 会議（東大本郷法文 2 号館 2128 室－東北大学筒井研究室－筑波大学井澤研究室）
内容：システムの制御性に関する構造学習を意欲や主体感の観点から捉える実験パラダイムを検討した
34. 日時：2020/1/8
名称：姿勢制御実験
場所：茨城県立医療大学
内容：姿勢動揺に関する実験を行った
35. 日時：2020/1/17
名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ
場所：web 会議（東大本郷法文 2 号館 2121 室－筑波大学井澤研究室）
内容：可制御性の汎化による超適応についての議論
36. 日時：2020/1/21
名称：B03 班会議
場所：東大本郷工 14 号館 713 室
内容：研究計画と進捗確認
37. 日時：2020/1/27
名称：A03・B03 項目研究打ち合わせ
場所：東大本郷法文 2 号館 2128 室
内容：運動の方略探索と記憶の脳内メカニズムに関するデータの検討
38. 日時：2020/2/3
名称：03 項目（A B 共同）研究打ち合わせ
場所：筑波大学 3M404
内容：解析方法に関する議論

2019 年度研究業績リスト

学術論文 (英文誌)

1. H. Oshima, S. Aoi, T. Funato, N. Tsujiuchi, and K. Tsuchiya, Variant and Invariant Spatiotemporal Structures in Kinematic Coordination to Regulate Speed During Walking and Running, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 13, 63, 2019
2. B. N. Tran, Y. Shiro, and T. Kondo, Coordination of human movements resulting in motor strategies exploited by skilled players during a throwing task, *PLoS ONE*, 14, 10, e0223837, 2019
3. N. Thorne, J. J. Honisch, T. Kondo, S. Nasuto and Y. Hayashi, Temporal Structure in Haptic Signaling Under a Cooperative Task, *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 372, 2019
4. T. Morita, M. Asada, and E. Naito, Developmental changes in task-induced brain deactivation in humans revealed by a motor task, *Developmental Neurobiology*, 79, 6, 536-558, 2019
5. S. Uehara, N. Mizuguchi, S. Hirose, S. Yamamoto, and E. Naito, Involvement of human left frontoparietal cortices in task-switching between two sequences of skilled finger movements, *Brain Research*, 1722, 146365, 2019
6. T. Morita, M. Asada, and E. Naito, Right-hemispheric dominance in self-body recognition is altered in left-handed individuals, *Neuroscience*, 425, 68-89, 2019
7. Nozaki K, Ito H, Ohgidani M, Yamawaki Y, Sahin EH, Kitajima T, Katsumata S, Yamawaki S, Kato TA, Aizawa H., Antidepressant effect of the translocator protein antagonist ONO-2952 on mouse behaviors under chronic social defeat stress., *Neuropharmacology*, 162, 107835, 2019
8. Suzuki M, Onoe K, Sawada M, Takahashi N, Higo N, Murata Y, Tsukada YH, Isa T, Onoe H, Nishimura Y, The ventral striatum is a key node of cortical reorganization required for functional recovery of finger dexterity after spinal cord injury in monkeys, *Cerebral Cortex*, pii: bhz307, 2019
9. Ishida A, Kobayashi K, Ueda Y, Shimizu T, Taijiri N, Isa T, Hida H, Dynamic interaction between cortico-brainstem pathways during training-induced recovery in stroke model rats., *Journal of Neuroscience*, 39, 37, 7306-7320, 2019
10. Umeda T, Isa T, Nishimura Y, Somatosensory cortex receives information about motor output., *Science Advances*, 5, 7, eaaw5388, 2019
11. Isa T, Dexterous hand movements and their recovery after central nervous system injury., *Annual Review of Neuroscience*, 42, 315, 2019

12. Isa T, Mitsuhashi M, Yamaguchi R, Alternative routes for recovery of hand functions after corticospinal tract injury in primates and rodents., *Current Opinion in Neurology*, 32, 6, 836, 2019
13. K. Kaminishi, R. Chiba, K. Takakusaki, and J. Ota, Investigation of the effect of tonus on the change in postural control strategy using musculoskeletal simulation, *Gait & Posture*, 76, 298-304, 2020
14. W. Wen, Does delay in feedback diminish sense of agency? A review, *Consciousness and Cognition*, 73, 102759, 2019
15. W. Wen, and P. Haggard, Prediction error and regularity detection underlie two dissociable mechanisms for computing the sense of agency, *Cognition*, 195, 104074, 2020
16. M. Toeda, S. Aoi, S. Fujiki, T. Funato, K. Tsuchiya, D. Yanagihara, Gait Generation and Its Energy Efficiency Based on Rat Neuromusculoskeletal Model, *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1337, 2020
17. N. Yang Q. An, H. Kogami, H. Yamakawa, Y. Tamura, K. Takahashi, M. Kinomoto, H. Yamasaki, M. Itkonen, F. Aanajjar, S. Shimoda, N. Hattori, T. Fujii, H. Otomune, I. Miyai, A. Yamashita, H. Asama, Temporal Features of Muscle Synergies in Sit-to-stand Motion Reflect the Motor Impairment of Post-Stroke Patients, *IEEE Transaction on Neural System and Rehabilitation Engineering*, 27, 10, 2118-2127, 2019
18. N. Yang, Q. An, H. Kogami, K. Yoshida, H. Yamakawa, Y. Tamura, S. Shimoda, H. Yamasaki, M. Sonoo, M. Itkonen, F. Alnajjar, N. Hattori, M. Kinomoto, K. Takahashi, T. Fujii, H. Otomune, I. Miyai, A. Yamashita, H. Asama, Temporal muscle synergy features estimate effects of short-term rehabilitation in sit-to-stand of post-stroke patients, *IEEE Robotics and Automation Letters*, , 2020
19. R. Ohata, T. Asai, H. Kadota, H. Shigemasu, K. Ogawa, and H. Imamizu, Sense of agency beyond sensorimotor process: Decoding self-other action attribution in the human brain, *Cerebral Cortex*, , in press
20. Y. Koike, T. Kawase, H. Kambara, N. Schwighofery, N. Yoshimura, Muscle Synergy Analysis for Rehabilitaion, *Examines in Physical Medicine and Rehabilitation*, 2, 5, 1-2, 2020
21. D. Tamura, S. Aoi, T. Funato, S. Fujiki, K. Senda, K. Tsuchiya, Contribution of Phase Resetting to Adaptive Rhythm Control in Human Walking Based on the Phase Response Curves of a Neuromusculoskeletal Model, *Frontiers in Neuroscience*, 14, 17, 2020
22. Nozu T, Miyagishi S, Nozu R, Takakusaki K, Okumura T, Butyrate inhibits visceral allodynia and colonic hyperpermeability in rat models of irritable bowel syndrome. *Scientific Reports*, 19, 1, 19603, 2019

1. Shouhei Shirafuji, Kaito Tsunetomo, and Jun Ota, Correlation Analysis between Functional Rocker Transition and Walking Gait, 1st IFAC Workshop on Robot Control (IFAC WROCO 2019), Daejeon, Korea, 2019
2. Nguyen Thi Mai Phuong, Xinzhe Li, Yoshikatsu Hayashi, Shiro Yano and Toshiyuki Kondo, Estimation of brain dynamics under visuomotor task using functional connectivity analysis based on graph theory, The 19th annual IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE 2019), Athens, Greece, 2019
3. Seki K, Gain control of spinal proprioceptive reflex in awake, behaving monkeys, Society for Neuroscience 2019, Chicago, USA, 2019
4. Daisuke Ishii, Kiyoshige Ishibashi, Yuki Kaku, Hiroshi Yuine, Satoshi Yamamoto, Arito Yozu, Yutaka Kohno, Afferent pathway to the ipsilateral somatosensory cortex in human, Chicago, USA, 2019
5. H. Kogami, Q. An, H. Yamakawa, N. Yang, S. Shimoda, M. Kinomoto, N. Hattori, K. Takahashi, T. Fujii, H. Otomune, I. Miyai, S. Ishiguro, T. Saigusa, Y. Nozaki, H. Maruyama, A. Yamashita, H. Asama, Assistive Chair to Support Hip Rising of Elderly People Improves Body Movement of Sit-to-Stand Motion, 1st Workshop on Robot Control, Daejeon, Korea, 2019
6. Y.Koike, Motor Learning and Control Mechanism of the Brain, 2019 Workshop on Brain-inspired Artificial Intelligence, Shanghai, China, 2019
7. Wen Wen, Ryu Ohata, Masaru Tanaka, Atsushi Yamashita, Hajime Asama, and Hiroshi Imamizu, Two dissociable processes for detecting gaining and losing control in human brain, The 23rd Annual Meeting of Association for the Scientific Study of Consciousness (ASSC23), London, Canada, 2019
8. Kei Aoyagi, Wen Wen, Qi An, Shunsuke Hamasaki, Hiroshi Yamakawa, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, Improvement of Sense of Agency During Upper-Limb Movement for Motor Rehabilitation Using Virtual Reality, The 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2019), Berlin, Germany, 2019
9. Takakusaki K, Takahashi M, Nakajima T, Chiba R, Obara K, Multi-faced functions of the reticulospinal systems involved in motor control in relation to behavioral states of animals, Society for Neuroscience 2019, Chicago, USA, 2019

国内会議 講演・口頭発表

1. 関和彦, 協調運動の神経制御メカニズムとその可塑性, 新学術領域 身体性システム 第3回公開シンポジウム, 東京大学, 2019
2. 船戸徹郎, 脳卒中回復評価法の大規模データ解析と展望, 新学術領域 身体性システム 第3回公開シンポジウム, 東京大学, 2019
3. 船戸徹郎, 姿勢制御の力学と小脳障害の影響評価, 第1回小脳リハビリテーション研究会, 畿央大学, 2019
4. Imamizu, H., Wen, W., Ohata, R., Tanaka, M., Yamashita, A., and Asama, H., Response to gaining and losing control in human brain, 日本心理学会第83回大会 公募シンポジウム 38 「The role of sense of agency in explorative and exploitative actions」, 立命館大学 大阪いばらきキャンパス (大阪府茨木市岩倉町), 2019
5. 今水 寛, 運動主体感の成立に関わる脳のネットワーク, 日本心理学会第83回大会 公募シンポジウム 63 「融合社会脳研究—自己の主体性を考える」, 立命館大学 大阪いばらきキャンパス (大阪府茨木市岩倉町), 2019
6. 田中 大, 井澤 淳, 今水 寛, 誤差の原因帰属の主観的判断が運動学習に与える影響, 第13回 Motor Control 研究会, 東京大学農学部弥生講堂 (東京都文京区弥生), 2019
7. 今水 寛, 短期と長期の運動記憶, 東京大学 知の創造的摩擦プロジェクト 第15回講演会「脳科学×心理学」, 東京大学駒場キャンパス 11号館 1106 教室 (東京都目黒区駒場), 2019
8. 今水 寛, 認知機能と脳のネットワーク, 第23回東京大学文学部常呂公開講座, 常呂町公民館大講堂 (北海道北見市常呂町), 2019
9. 内藤栄一, 身体認知と運動制御の脳内神経基盤を発達、特殊化、損傷、機能回復の観点から考える, 京都府理学療法士会 生涯学習部講演会, 京都市 (橘大学), 2019
10. 内藤栄一, 身体運動が創発する脳の発達、特殊化と機能改善, 第27回脳の世紀シンポジウム 運動/スポーツと脳, 東京 (有楽町), 2019
11. 内藤栄一, 脳を知り、脳を活かす -脳内身体表現の理解と応用-, NICT 研究講演会, 東京都 (小金井市), 2019
12. 内藤栄一, 脳内身体表現と運動制御のシステム, 第37回日本感覚統合学会姫路大会, 姫路市 (姫路独協大学), 2019
13. 内藤栄一, 一流サッカー選手とブラインドサッカー選手の脳から考える神経系の適応と超適応, 日本学術会議公開シンポジウム「スポーツと脳科学」, 東京都 (日本学術会議講堂), 2019
14. 内藤栄一, 脳を知り、脳を活かす -脳内身体表現の理解と応用-, 九州 ICT セミナー2019, 博多市 (博多バスターミナルビル9F), 2019
15. 太田順, 超適応への道のり, 計測自動制御学会 第32回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦

工業大学芝浦キャンパス, 2020

16. 上西 康平, 千葉 龍介, 高草木 薫, 太田 順, 床面水平外乱時の筋緊張が姿勢制御戦略に及ぼす影響, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦工業大学芝浦キャンパス, 2020
17. 四津有人, 石井大典, 金澤淳史, 松下明, 河野 豊, パーキンソン病の静止立位中の重心動揺: 服薬前後の変動と日差変動, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦工業大学芝浦キャンパス, 2020
18. 尾村 優一郎, 上西 康平, 千葉 龍介, 高草木 薫, 太田 順, パーキンソン病の姿勢制御モデル構築のための計算機モデルにおける姿勢異常の表現, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦工業大学芝浦キャンパス, 2020
19. 安琪, 山川博司, 楊濤嘉, 湖上碩樹, 吉田和憲, 山下淳, 石黒周, 下田真吾, 山崎弘嗣, 園尾萌香, F.ALNAJJAR, 木野本誠, 服部憲明, 高橋幸治, 藤井崇典, 乙宗宏範, 宮井一郎, 浅間一, 片麻痺患者の起立動作における縦手すりにかかる力の解析, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2019, 千葉大学, 2019
20. 安琪, 山川博司, 楊濤嘉, 湖上碩樹, 吉田和憲, 山下淳, 石黒周, 下田真吾, 山崎弘嗣, 園尾萌香, F.ALNAJJAR, 木野本誠, 服部憲明, 高橋幸治, 藤井崇典, 乙宗宏範, 宮井一郎, 浅間一, 片麻痺患者の起立動作における手すりにかかる力を用いた筋シナジーの推定, 第 37 回日本ロボット学会・学術講演会, 早稲田大学, 2019
21. 堀内 雄暉, 船戸 徹郎, 板東 杏太, 東口 大樹, 花川 隆, 柳原 大, 青井 伸也, 土屋 和雄, 微少な傾斜外乱に対する脊髄小脳変性症患者の姿勢応答, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2019, 千葉大学, 2019
22. 温 文, 統合失調症における Sense of Agency の神経生理学, 第 115 回日本精神神経学会学術総会一般シンポジウム「統合失調症の Sense of Agency 研究: 精神病理学-計算論的精神医学-神経科学の連繫」, 新潟コンベンションセンター, 2019
23. Wen Wen, Active sensing of control, 日本心理学会第 83 回大会 公募シンポジウム 38 「The role of sense of agency in explorative and exploitative actions」, 立命館大学 大阪いばらきキャンパス (大阪府茨木市岩倉町), 2019
24. 三ツ木 知愛, 船戸 徹郎, 小松 拓実, 酒井 隆太郎, 鴻巣 暁, 柳原 大, 歩行の予期的動作の解明のためのラットの VR 実験環境の構築, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦工業大学芝浦キャンパス, 2020
25. 藤田 章寛, 鴻巣 暁, 船戸 徹郎, 柳原 大, 予測可能な傾斜外乱に対するラットの姿勢動作学習の解析, 第 32 回自律分散システム・シンポジウム, 芝浦工業大学芝浦キャンパス, 2020
26. 高草木薫, パーキンソン病の姿勢と歩行, 函館パーキンソン病セミナー, 函館医師会館, 2019
27. 高草木薫, パーキンソン病の姿勢と歩行, パーキンソン病セミナー in 浜松, 浜松ホテルオークラ, 2019

28. 高草木薫, 脚橋被蓋核に作用する神経伝達物質と睡眠-覚醒, 札幌医大生理学研究会, 札幌医科大学, 2019
29. 高草木薫, 姿勢と歩行から観た運動障害の病態理解, 大阪理学療法士会生涯学習, 大阪理学療法会館, 2019
30. 高草木薫, Neurotransmitter profiles of spinal interneurons that mediate generalized motor inhibition by the reticulospinal tract, 日本神経学会, 新潟, 2019
31. 太田順, 高草木薫, 新学術領域 超適応説明会, 日本神経学会, 新潟, 2019
32. 高橋未来, 宮岸沙織, 中島敏, 千葉龍介, 小原和宏, 高草木薫, ネコの前肢リーチング時における予測姿勢制御, 日本神経学会, 新潟, 2019
33. 高草木薫, 小児の学習障害と運動障害, 生理学研究所共同研究, 札幌, 2019
34. 高草木薫, 高橋未来, 中島敏, 千葉龍介, 網様体脊髓路と脊髓内神経回路, 大脳基底核研究会, 米子, 2019
35. 高草木薫, 脳幹内のコリン系-セロトニン系と姿勢筋シナジー, 生理学学会・北海道地方会, 旭川, 2019
36. 高草木薫, セラピストに必要な神経生理学, 大山リハビリテーション研修会, 大山, 2019
37. 高草木薫, PT・OT・ST が学んでおきたい脳生理学の基礎知識, クオラリハビリテーション病院脳生理研修会, 鹿児島, 2019
38. 高草木薫, 運動麻痺のリハビリテーション, 札幌病院リハビリテーション講演会, 小樽, 2019
39. 高橋未来, 宮岸沙織, 福山秀青, 中島敏, 千葉龍介, 小原和宏, 高草木薫, ネコの前肢リーチング動作に伴う姿勢制御の時空間的定量化, 次世代脳冬のシンポジウム, 東京 (学士会館), 2019
40. 高草木薫, 脳幹のモノアミンと歩行と睡眠, 脳幹アミンの会, 東京 (小児神経学クリニック), 2020
41. 今水 寛, 操作感の脳科学, 東京大学オープンイノベーションフォーラム「ロボティクスの新展開」, ベルサール八重洲 (東京都中央区八重洲), 2020

受賞

1. 内田直輝, 第 13 回 Motor Control 研究会 若手研究奨励賞, 2019
2. 高橋未来, 宮岸沙織, 福山秀青, 中島敏, 千葉龍介, 小原和宏, 高草木薫, 2019 次世代脳冬のシンポジウム 若手研究者ポスター優秀賞, 2019

報道発表

1. 2019年8月27日、「脳の機能分化「抑制」が重要」という内藤栄一の研究が日刊工業新聞（23面）で紹介された。
2. 2019年5月15日、内藤栄一がEテレ「又吉直樹のへウレーカ！」に出演し、脳の運動制御を解説。
3. 2019年5月9日、高草木薫がNHK-BSプレミアム「偉人達の健康診断「源義経 バランス感覚は身を助ける」」に出演し、運動感覚の重要性を解説した。

メンバーリスト

総括班 X00 身体-脳の機能不全を克服する潜在的適応力のシステム論的理解の総括研究

研究代表者	太田 順	(東京大学大学院工学系研究科 教授)
研究分担者	伊佐 正	(京都大学大学院医学研究科 教授)
研究分担者	近藤 敏之	(東京農工大学大学院工学研究院 教授)
研究分担者	船戸 徹郎	(電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授)
研究協力者	内藤 栄一	(情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター 研究マネージャー)
研究協力者	相澤 秀紀	(広島大学大学院医系科学研究科 教授)
研究協力者	関 和彦	(国立精神・神経医療研究センター神経研究所 部長)
研究協力者	今水 寛	(東京大学大学院人文社会系研究科 教授)
研究協力者	筒井 健一郎	(東北大学大学院生命科学研究所 教授)
研究協力者	高草木 薫	(旭川医科大学医学部 教授)
研究協力者	花川 隆	(国立精神・神経医療研究センター先進脳画像研究部 部長)
研究協力者	千葉 龍介	(旭川医科大学医学部 准教授)
研究協力者	矢野 史朗	(東京農工大学大学院工学研究院 助教)
研究協力者	小池 康晴	(東京工業大学科学技術創成研究院 教授)
研究協力者	浅間 一	(東京大学大学院工学系研究科 教授)
研究協力者	井澤 淳	(筑波大学システム情報系 准教授)
研究協力者	温 文	(東京大学大学院工学系研究科 特任准教授)
研究協力者	安 琪	(東京大学大学院工学系研究科 助教)
研究協力者	四津 有人	(茨城県立医療大学医科学センター 准教授)

研究項目 A01 生体構造の再構成による超適応機構の解明と潜在適応力低下防止への挑戦

研究代表者	伊佐 正	(京都大学大学院医学研究科 教授)
研究分担者	内藤 栄一	(情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター 研究マネージャー)
研究分担者	相澤 秀紀	(広島大学大学院医系科学研究科 教授)
研究協力者	尾上 浩隆	(京都大学大学院医学研究科 特定教授)
研究協力者	武井 智彦	(京都大学白眉センター 特定准教授)
研究協力者	山口 玲欧奈	(京都大学高等研究院ヒト生物学高等研究拠点 特定助教)
研究協力者	山本 勇祐	(京都大学大学院生命科学研究所 博士課程学生)
研究協力者	川崎 敏生	(京都大学大学院医学研究科 博士課程学生)
研究協力者	上野 里子	(京都大学大学院医学研究科 博士課程学生)
研究協力者	三橋 賢大	(京都大学大学院医学研究科 博士課程学生)
研究協力者	守田 知代	(大阪大学先導的学際研究機構 特任准教授)
研究協力者	廣瀬 智士	(情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター 研究員)
研究協力者	木村 和夏	(情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター 研究員)

研究協力者 松股 美穂 (広島大学大学院医系科学研究科 助教)
研究協力者 Deepa Kamath Kasaragod (広島大学大学院医系科学研究科 助教)

研究項目 A02 身体変容への超適応の神経機構の解明

研究代表者 関 和彦 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 部長)
研究協力者 大屋 知徹 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 室長)
研究協力者 梅田 達也 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 室長)
研究協力者 Roland Phillipp (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 研究員)
研究協力者 Amit Yaron (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 研究員)
研究協力者 窪田 慎治 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 研究員)
研究協力者 小杉 亮人 (国立精神・神経医療研究センター神経研究所 研究員)
研究協力者 原 友紀 (筑波大学医学医療系整形外科 講師)

研究項目 A03 超適応を促す身体認知・情動機構の解明

研究代表者 今水 寛 (東京大学大学院人文社会系研究科 教授)
研究分担者 筒井 健一郎 (東北大学大学院生命科学研究科 教授)
研究協力者 大畑 龍 (東京大学大学院人文社会系研究科 研究員)
研究協力者 弘光 健太郎 (東京大学大学院人文社会系研究科 研究員)
研究協力者 浅井 智久 (国際電気通信基礎技術研究所認知機構研究所 研究員)
研究協力者 門田 宏 (高知工科大学総合研究所脳コミュニケーション研究センター准教授)
研究協力者 今泉 修 (お茶の水女子大学人間発達教育科学研究科 助教)
研究協力者 中村 晋也 (東北大学大学院生命科学研究科 助教)
研究協力者 大原 慎也 (東北大学大学院生命科学研究科 助教)
研究協力者 細川 貴之 (川崎医療福祉大学医療技術学部 准教授)

研究項目 A04 神経伝達物質の異常に伴う超適応を誘発する脳活動ダイナミクスの変容

研究代表者 高草木 薫 (旭川医科大学医学部 教授)
研究分担者 花川 隆 (国立精神・神経医療研究センター先進脳画像研究部 部長)
研究協力者 野口 智弘 (旭川医科大学生理学講座 講師)
研究協力者 中島 敏 (旭川医科大学生理学講座 助教)
研究協力者 高橋 未来 (旭川医科大学生理学講座 客員助教)
研究協力者 福山 秀青 (旭川医科大学脳神経外科学講座 助教)
研究協力者 奥村 利勝 (旭川医科大学内科学講座 消化器 教授)
研究協力者 野津 司 (旭川医科大学教育センター 教授)
研究協力者 松本 成史 (旭川医科大学教育研究推進センター 教授)
研究協力者 笹島 仁 (旭川医科大学教育研究推進センター 講師)
研究協力者 宮園 貞治 (旭川医科大学教育研究推進センター 講師)
研究協力者 吉永 健二 (国立精神・神経医療研究センター先進脳画像研究部 研究員)

研究協力者 東口 大樹 (国立精神・神経医療研究センター先進脳画像研究部 研究員)
研究協力者 松島 斗真 (東京農工大学生命工学科 学部生)

研究項目 B01 生体構造の再構成に関わる潜在回路に基づく超適応メカニズムのモデル化

研究代表者 近藤 敏之 (東京農工大学大学院工学研究院 教授)
研究分担者 千葉 龍介 (旭川医科大学医学部 准教授)
研究分担者 矢野 史朗 (東京農工大学大学院工学研究院 助教)
研究協力者 伊藤 宏司 (東京工業大学 名誉教授)
研究協力者 林 叔克 (レディング大学 准教授)

研究項目 B02 身体変容への超適応のモデル化

研究代表者 小池 康晴 (東京工業大学科学技術創成研究院 教授)
研究分担者 船戸 徹郎 (電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授)
研究協力者 吉村 奈津江 (東京工業大学科学技術創成研究院 准教授)
研究協力者 柳原 大 (東京大学大学院総合文化研究科 教授)
研究協力者 青井 伸也 (京都大学大学院工学研究科 講師)
研究協力者 土屋 和雄 (京都大学大学院工学研究科 名誉教授)
研究協力者 藤木 聡一郎 (獨協医科大学医学部 助教)

研究項目 B03 認知・情動に着目した超適応現象のシステム論的理解と実現

研究代表者 浅間 一 (東京大学大学院工学系研究科 教授)
研究分担者 井澤 淳 (筑波大学システム情報系 准教授)
研究分担者 温 文 (東京大学大学院工学系研究科 特任准教授)
研究分担者 安琪 (東京大学大学院工学系研究科 助教)
研究協力者 矢野 雅文 (東北大学 名誉教授)
研究協力者 山下 淳 (東京大学大学院工学系研究科 准教授)
研究協力者 濱田 裕幸 (文京学院大学保健医療技術学部 助手)
研究協力者 楊 凜嘉 (東京大学大学院工学研究科 博士課程学生)

研究項目 B04 姿勢制御における神経伝達物質の作用を考慮した超適応モデリング

研究代表者 太田 順 (東京大学大学院工学系研究科 教授)
研究分担者 四津 有人 (茨城県立医療大学医科学センター 准教授)
研究協力者 白藤 翔平 (東京大学大学院工学系研究科 助教)
研究協力者 上西 康平 (東京大学大学院工学系研究科 特任研究員)
研究協力者 尾村 優一郎 (東京大学大学院工学系研究科 修士課程学生)
研究協力者 石井 大典 (茨城県立医療大学医科学センター 助教)
研究協力者 濱田 裕幸 (文京学院大学保健医療技術学部 助手)