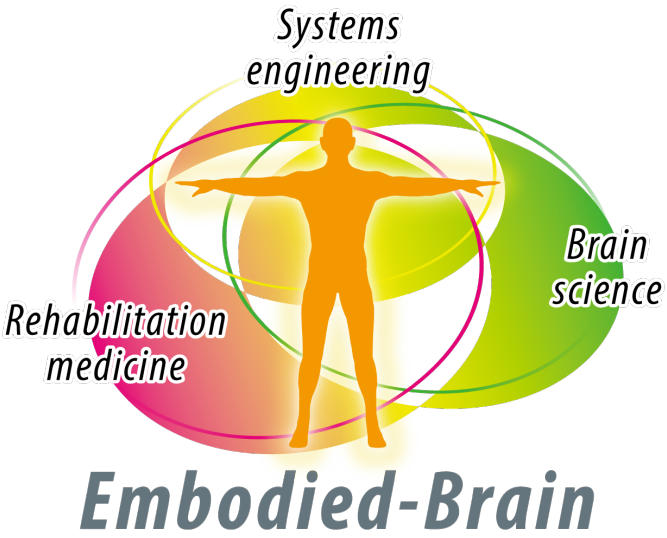
平成 26～30 年度　文部科学省　科学研究費補助金
新学術領域研究（研究領域提案型）

# 「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」

# H27 年度 研究成果報告




領域略称名：身体性システム
領域番号：4603
設定期間：平成 26 年度～平成 30 年度
領域代表者：太田　順（東京大学）

http://embodied-brain.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 人工物工学研究センター　教授）

A 班（脳科学）活動報告

班代表 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）

A01-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者　今水 寛（東京大学 文学部　教授）

A02-1 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）

A02-2 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）

A03-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者　鎌田 恭輔（旭川医科大学 医学部　教授）

A03-2 研究項目の研究成果報告

研究代表者　吉村 奈津江（東京工業大学 精密工学研究所　准教授）

A03-3 研究項目の研究成果報告

研究代表者　中村 公一（京都大学 大学院医学研究科　助教）

A03-4 研究項目の研究成果報告

研究代表者　松本 理器（京都大学 大学院医学研究科　助教授）

A03-5 研究項目の研究成果報告

研究代表者　宮田 麻理子（東京女子医科大学 医学部　教授）

A03-6 研究項目の研究成果報告

研究代表者　吉田 正俊（生理学研究所 認知行動発達研究部門　助教）

A03-7 研究項目の研究成果報告

研究代表者　村田 弓（産業技術総合研究所 人間情報研究部門　研究員）

B 班（システム工学）活動報告

班代表　太田 順（東京大学 人工物工学研究センター　教授）

B01-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者 淺間 一（東京大学 大学院工学系研究科　教授）

B02-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者 太田 順（東京大学 人工物工学研究センター　教授）

B03-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者　舩戸 徹郎（電気通信大学 大学院情報理工学研究科　助教）

B03-2 研究項目の研究成果報告

研究代表者　長谷川 泰久（名古屋大学 大学院工学研究科　教授）

B03-3 研究項目の研究成果報告

研究代表者　細田 耕（大阪大学 大学院基礎工学研究科　教授）

B03-4 研究項目の研究成果報告

研究代表者　谷口 忠大（立命館大学 情報理工学部　准教授）

C 班（リハビリテーション医学）活動報告

班代表　出江 紳一（東北大学 大学院医工学研究科　教授）

C01-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者 出江 紳一（東北大学 大学院医工学研究科　教授）

C02-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者 芳賀 信彦（東京大学 大学院医学系研究科　教授）

C03-1 研究項目の研究成果報告

研究代表者　濱田 雅（東京大学 医学部附属病院　助教）

C03-2 研究項目の研究成果報告

研究代表者　島 圭介（横浜国立大学 大学院工学研究院　准教授）

C03-3 研究項目の研究成果報告

研究代表者　向野 雅彦（藤田保健衛生大学 医学部　講師）

C03-4 研究項目の研究成果報告

研究代表者　森岡 周（畿央大学 健康科学部　教授）

H27 年度活動報告

H27 年度研究業績リスト

メンバーリスト

うす緑の色紙はさむ

うす緑の色紙はさむ

# 領域概要・総括班の活動報告

太田　順
東京大学 人工物工学研究センター

## I. 本領域の目的

本領域では，脳内身体表現（身体の内部表現．運動遂行に関連して様々な感覚入力によって時々刻々と更新される姿勢・身体構造等を表すもの）の神経機構とその長期的変容メカニズムを明らかにし，リハビリテーション介入へと応用することを目的とする．このため，システムの振る舞いを数理モデルとして整合的に記述できるシステム工学を仲立ちとして脳科学とリハビリテーション医学を融合することを試みる（図１）．これにより，運動制御と身体認知を統合的に理解し，真に効果的なリハビリテーション法を確立する「身体性システム科学」なる新たな学問領域の創出を目指す．

本領域では上記目的の達成に向け 11 個の研究項目（A01，A02，A03，B01，B02，B03，C01，C02，C03，X00,Y00）を設ける．研究項目 A01・A02・A03 は，それぞれ身体認知（運動主体感や身体保持感）と運動制御（筋シナジー制御，先行性姿勢制御）の観点から**介入神経科学的手法を用いた**実験をヒト，サル，ラットで展開し，脳内身体表現の神経機構ならびにその変容過程の解明を試みる．**脳情報復号化**やウィルスベクター技術を用いることにより脳内身体表現の変容を反映する脳内身体表現マーカーを探索する．研究項目 B01・B02・B03 は，神経生理学的実験データ，リハビリテーション中の臨床データに基づき，**脳内身体表現の活動**(fast dynamics)**と変容**(slow dynamics)**のダイナミクス**を各々時定数の異なる力学系としてモデル化する．研究項目 C01・C02・C03 は，脳内身体表現マーカーを活用することでリハビリテーション効果の定量化に取り組む．また，脳内身体表現モデルと統合することで**モデルベーストリハビリテーション**を実践し，介入の予後予測を行う．さらに，身体全体の感覚運動機能の適正化のための新しい介入法の開発を目指す．総括班 X00 は領域全体の企画運営と班全体への研究支援活動を行う．国際活動支援班 Y00 は本領域の国際共同研究を促進する．

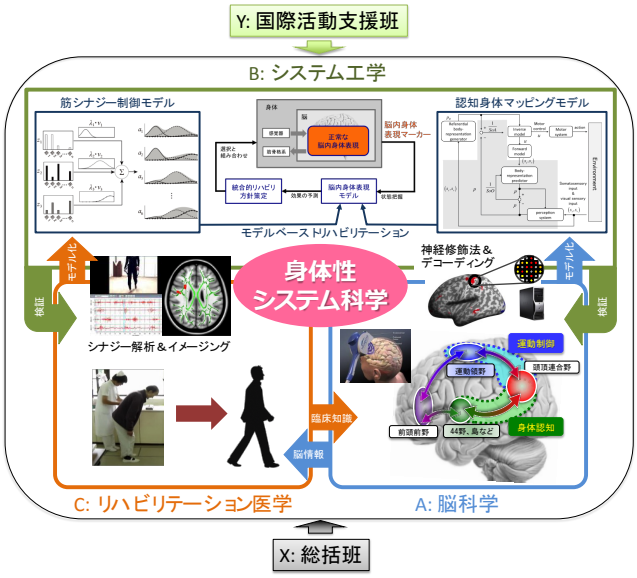



図１　本領域の全体像

## II. 領域全体の活動

以下の活動を行った．

第 1 回身体性システム講演会
日時：2015 年 3 月 19 日(木) 13:30～17:00
場所：同志社大学 京田辺キャンパス
参加人数：30 名
内容：予測制御とフィードバック制御に関する 2 件の発表があり，議論を行った．

第 2 回領域全体会議
日時：2015 年 7 月 4 日(土) 10:00～18:10
場所：杏林大学三鷹キャンパス
参加人数：100 名
内容：領域代表，班代表，公募班研究代表者による研究発表，技術討論会を実施した．

2015 年度第 1 回総括班会議
日時：2015 年 7 月 4 日(土) 12:00～13:00
場所：杏林大学三鷹キャンパス内会議室
出席人数：19 名
内容：領域の運営方法，活動計画について議論した．

第 1 回一般公開シンポジウム
日時：2015 年 10 月 25 日(日) 10:20～18:00
場所：東京大学武田ホール
参加人数：191 名
内容：領域代表（太田），班代表（内藤，出江），各研究項目の研究者（関，今水，横井，芳賀）が一般参加者向けに研究発表を行った．総括班評価者（才藤）による特別講演を開催した．登壇者によるパネルディスカッションを行い，一般参加者から寄せられた質問に回答した．

2015 年度第 2 回総括班会議
日時：2015 年 10 月 25 日(日) 12:00～13:30
場所：東京大学武田ホール内会議室
出席人数：18 名
内容：領域の運営方法，活動計画について議論した．

第 3 回領域全体会議
日時：2016 年 3 月 7 日(月)～9 日(水)
場所：岩手県花巻市
参加人数：約 100 名
内容：領域代表，班代表，公募班研究代表者による研究発表，技術討論会を実施した．

2015 年度第 3 回総括班会議
日時：2016 年 3 月 9 日(水) 12:00～13:00
場所：岩手県花巻市
出席人数：約 20 名
内容：領域の運営方法，活動計画について議論した．

学会活動：国際ワークショップ
(1) IEEE/EMBS EMBC2015 Workshop
日時：2015 年 8 月 25 日(火), 13:30-17:30
場所：ミラノ国際会議場，ミラノ，イタリア
内容：「Embodied-brain Systems Science」と題する WS を行った．発表 10 件（外国人研究者 1 名を招待）
(2) IEEE/RSJ IROS2015 Workshop
日時：2015 年 9 月 28 日(月), 8:30-12:30
場所：ハンブルグ国際会議場，ハンブルグ，ドイツ
内容：「Half-day Workshop on Embodied-brain Systems Science」と題する WS を行った．発表 9 件（外国人研究者 2 名を招待）
(3) スウェーデンにおける研究交流：国際活動支援班
日時：2016 年 2 月 8 日(月)～14 日(日)
場所：Chalmers University of Technology, Karolinska Institute
内容：見学，発表，議論を行った．6 名参加．

学会活動：オーガナイズドセッションとスペシャルイシュー
(1) SICE Annual Conference 2015
日時：2015 年 7 月 28 日(火)
場所：インターコンチネンタルホテル杭州，杭州，中国
内容：「Cognitive Issues in Interactive Robots」と題する OS を行った．発表 6 件
(2) MHS2015
日時：2015 年 11 月 24 日(火)
場所：名古屋大学野依記念館，名古屋
内容：「Embodied-Brain Systems Science」と題する OS を行った．発表 5 件，ポスター6 件
(3) 第 28 回自律分散システム・シンポジウム
日時：2016 年 1 月 21 日(木)
場所：広島大学
内容：「身体性システム」と題する OS を行った．
発表 9 件
(4) 国際雑誌 Neuroscience Research における special issue
号数：Vol. 104 (March 2016)
内容：Special Issue “Body representation in the brain” (Guest Editors: Eiichi Naito, Akira Murata, Jun Ota) を発行した．Review article 14 件．

## III. 班間連携

新学術領域研究における重要な要件として，班間連携がある．以下実績を示す．
・前述の Neuroscience Research における review article 14 件中 6 件が異なる班に所属する共著者によるものであり．連携の進展がうかがわれる．
・歩行リハビリテーション，上肢リハビリテーション，身体意識等様々な分野において研究の連携が進んでいる．

## IV. 若手の活動

当領域では，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. 第 2 回身体性システム講演会の企画
2016 年 6 月 25 日～27 日，第 9 回モーターコントロール研究会於京都大学にて，第 2 回身体性システム講演会「新しい身体運動学習理論に向けて」を開催した．領域内外から約 50 名が参加し，活発な議論が行われた．講演者は大内田裕（東北大学），小川健二（北海道大学）矢野史朗（東京農工大学）の 3 名であった．
B. 第 3 回身体性システム講演会の企画
2016 年 8 月 21 日，東京大学本郷キャンパスにて，第 3 回身体性システム講演会「モデルベースド歩行支援技術から機能回復へ」を開催した．姿勢・歩行運動制御のモデル化とそのリハビリテーションへの応用に関して，活発な議論が行われた．講演者は舩戸 徹郎（電気通信大学），門根 秀樹（筑波大学）林部 充宏（フランス国立情報学自動制御研究所）の 3 名であった．

## V. 今後の予定

H28 年度は以下のアクティビティ等を行う予定である．
(1) 2016 年 5 月 8 日～9 日．1st International Symposium on Embodied-Brain Systems Science (EmboSS 2016)を東京で開催．http://embodied-brain.org/conf/
(2) 2016 年 7 月，国際会議（IAS-14）での OS
(3) 2016 年 8 月，国際会議（EMBC2016）での WS
(4) 2016 年 10 月，国際会議（IROS2016）での WS
(5) 2017 年 3 月，第 4 回領域全体会議の開催
(6) 2017 年 3 月，雑誌「計測と制御」における特集号

うす緑の色紙はさむ

うす緑の色紙はさむ

# A 班(脳科学)の活動報告

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

## I. 脳班の目的

A 班(脳科学班)では、脳内身体表現の神経実態の解明と脳内身体表現マーカーの提案を行うことを目的とする。脳内身体表現と身体認知および運動制御との因果性を明らかにするため、身体意識（運動主体感と身体保持感）、協調的筋活動（シナジー）制御、予期的姿勢・歩行制御の問題を対象にした介入神経科学的実験を展開する。ヒトおよびサルなどの動物を対象とし、仮想現実課題による身体認知の操作、感覚系への物理的介入による筋骨格状態の操作、訓練によるサルの歩行様式の操作（２足歩行化）などに対する脳内身体表現の変容過程について電気生理学的手法や脳機能画像法などの手法を用いて明らかにする。さらに、脳情報復号化（デコーディング）技術を導入して行動変化を予測可能な脳活動を同定し、これを脳内身体表現マーカーの候補として、B 班でのモデル構築や C 班のリハビリ原理の解明に役立てることを目的とする。本年度から公募班がプロジェクトに加わり、計画班が保有していない技術を導入し、計画班だけでは手薄な脳内身体表現の解明を、共同で行う体制を整えた。

## II. 班構成

上記の目的を達成するため、以下の班構成をとった。

研究項目 A01　脳内身体表現の変容を促す神経機構
研究代表者　今水寛(ATR)
研究分担者　村田哲(近大)、大木紫(杏林大)、前田貴記(慶応大)
連携研究者　9 名
ヒトおよびサルなどの動物を対象とし、仮想現実課題による身体認知の操作を通して、身体意識（運動主体感と身体保持感）に関する脳内身体表現の神経実態を解明する。

研究項目 A02-01　身体変化への脳適応機構の解明
研究代表者　関和彦(NCNP)
研究分担者　内藤栄一(NICT)、筧慎治(東京都神経研)
連携研究者　15 名
ヒトおよびサルなどの動物を対象とし、感覚系への物理的介入による筋骨格状態の操作を通して、協調的筋活動（シナジー）制御に関する脳内身体表現の神経実態を解明する。

研究項目 A02-02　姿勢-歩行戦略の変更に伴う脳適応機構の解明
研究代表者　高草木薫(旭川医大)
研究分担者　中溝克己(近大)
連携研究者　3 名
サルなどの動物を対象とし、訓練による歩行様式の操作（２足歩行化）などに対する脳内身体表現の変容過程について電気生理学的手法を用いて、脳内身体表現の神経実態を解明する。

研究項目 A03-1 ハイブリッド技術とリアルタイム処理による機能ダイナミクスの解明
研究代表者　鎌田 恭輔（旭川医大）
ヒトの脳活動を ECoG で計測し、デコーディング技術等を用いて運動機能再建に役立てる。

研究項目 A03-2 脳波を用いた手首運動に係る脳内身体表現の学理とその可視化
研究代表者　吉村 奈津江（東京工）
連携研究者　1 名
ヒトの手首運動に関わる脳活動を脳波で計測し、脳波信号源を推定し、筋活動を再構成。この筋活動信号でパワーアシストロボットなどを直観的に制御する技術を構築する。

研究項目 A03-3 慢性ドーパミン欠乏による大脳基底核の脳内身体表現変容とその制御
研究代表者　中村 公一（京都大）
連携研究者　2 名
大脳基底核由来の視床核(VA,VM)から $\beta$ 振動を記録し、これがパーキンソン病の脳内身体表現マーカーであることを示し、これを制御する。

研究項目 A03-4 脳内身体表現の直接記録・刺激介入を用いた神経機構と変容の解明
研究代表者　松本利器（京都大）
連携研究者　5 名
ヒトの前頭−頭頂ネットワークに着目し、脳活動を ECoG で計測し、身体認知および運動制御(把握運動・パントマイムなど)の機能解明と治療による長期的変容を評価する。

研究項目 A03-5 感覚神経損傷による脳内身体表現の変容動態の可視化と制御

研究代表者　宮田 麻理子（東京女子医科大）

連携研究者　3名

ラットの感覚神経損傷による脳内身体表現の変容動態の可視化し、この制御を行う。

研究項目 A03-6 サル半側空間無視モデルにおける身体と空間

研究代表者　吉田 正俊（生理研）
連携研究者　1名
サル半側空間無視モデルにおける身体と空間の表象に関して、腹側注意経路に着目した脳内身体表現を解析する。

研究項目 A03-7 脳卒中後の把握機能回復をもたらす脳内身体表現の変化：サルモデルによる解明
研究代表者　村田 弓（産総研; AIST）
連携研究者　4名
ヒトの脳卒中の主原因である内包損傷をサルモデルでおこし、この時の機能回復や機能代償のメカニズムを探る。

## III. 活動報告

A 班全体会議
日時：平成 28 年 1 月 21 日-22 日
場所：近畿大学会館・5F ホール（〒542-0073 大阪市中央区日本橋 1 丁目 8-17）
内容：A 班を中心とするメンバーおよび B、C 班の研究者 27 名が一堂に会し、会合を行った。主な目的は公募班と計画班の連携の確認であり、公募班の吉村(東工大)、村田(産総研)、中村(京大)、松本(京大)、吉田(生理研)が研究の進捗状況を説明し、連携を議論した。計画班からは、1 日目に、村田(近畿大)、高草木(旭川医大)がそれぞれ、「遠心性コピーと脳内身体表現」および「網様体による姿勢と歩行の筋シナジー制御」についての講演を行った。2 日目には、関(国立精神・神経センター)が「脳内身体表現と筋シナジー」セッションをオーガナイズし、若手研究者である平島(NICT)、大屋(国立精神・神経センター)が研究の現状と予定を報告した。さらに、中陳(近畿大)、若手研究者である廣瀬(NICT)、C02 班四津(東大)、東郷(ATR)が筋シナジー制御に関するそれぞれの取り組みと B および C 班との連携の現状を説明し、参加者全員で情報を共有した。

## おわりに

本年度の具体的研究成果は、各研究項目の報告で詳細に報告している。今年度の主な成果を上げると、A01 項目(今水グループ)は、視覚運動変換学習に関する Fast と Slow dynamics の脳内身体表現の変容過程の可視化に、世界で初めて成功した。身体認知に関しては、A02 項目(内藤グループ)は、ヒトの身体像の形成には、上縦束第 3 ブランチで結合される、右半球下前頭-頭頂ネットワークが主要な役割を果たすことを示し、従来のヒト神経科学で無視されることの多かったヒトの大脳皮質右半球の機能を明らかにする、などの成果があった。A02-B02-C02 は連携して、筋シナジーの状態を患者にフィードバックする新しいリハビリテーション法の開発、A01 は C01 と共同で、アバター制御を通して患者の脳内身体表現に介入する新しいリハビリテーションの開発を行っており、来年度の成果が大いに期待できる。

# A01-1 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

***Abstract*—本研究項目では，脳内身体表現の知覚的側面として身体意識を主に扱う．その神経基盤を明らかにし，身体意識が脳内身体表現を変容させる過程を調べ，身体意識を介入・操作する手法を開発する．今年度は，脳内身体表現の変容過程，身体意識のデコーディング，身体保持感のオンライン脳波計測パラダイムの開発，新たな電気生理実験パラダイムの開発，統合失調症患者における身体意識の変容の原因について進展が見られた．**

## I. はじめに

身体意識とは「自身が運動している」という運動主体感と，「これが自身の身体である」という身体保持感を意味する．本研究項目では，脳内身体表現の知覚的側面として，身体意識を主に研究する．

## II. 目的

本研究項目では，脳内身体表現の知覚的側面として，身体意識の神経基盤を明らかにする．さらに，身体意識が脳内身体表現を長期的に変容させる過程を明らかにし，脳内身体表現を適切に誘導する手法を探索し，乖離した脳と身体の関係を適切に誘導・修復する手法の開発を目指す．この目的に対して，健常者や統合失調症患者を対象とした行動実験と脳活動計測，脳情報の復号化（デコーディング），サルを対象とした電気生理実験で横断的なアプローチを行う．

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に４つ挙げ，それぞれ概要を説明する．

### *A. 脳内身体表現の変容過程と主体感のデコーディング*

研究代表者らのグループは，ひとつの実験パラダイムで統一的に解明されることがなかった，脳内身体表現のファーストダイナミクスとスローダイナミクスの神経基盤を，ひとつのパラダイムにおいて明らかにした．また，身体意識のデコーディングに着手した．

１）ファーストダイナミクスとスローダイナミクスの神経基盤：fMRI 装置で脳活動を計測しながら，人間の被験者にジョイスティックを操作する課題を学習してもらった．被験者の行動を数理モデルで解析することで，運動記憶におけるファーストダイナミクスとスローダイナミクスの時間変化を推定した．その結果をもとに，脳活動解析を行い，ファーストダイナミクスの神経基盤は，前頭–頭頂ネットワークにあり，スローダイナミクスの神経基盤は頭頂の限局された部分と小脳にあることをつきとめた[1]．特にファーストダイナミクスの神経基盤である前頭–頭頂のネットワークは、身体意識にも関連すると考えられている。

２）身体意識のデコーディング：デコーディングの手法を用いて，脳内身体表現（身体意識）のマーカーを開発することに着手した．具体的には，運動主体感の基盤となる，運動の自他帰属をデコードすることに成功した．被験者が fMRI 内でジョイスティックを操作するとき，他の人の操作を様々な割合で混入させ，被験者の主観的な自他帰属を変化させた．このとき，被験者の主観評価を，前頭-頭頂ネットワーク内の脳活動から統計的に有意なレベルで予測することができた．今回開発したデコード方法は、身体意識の客観指標となるマーカーのひとつとして利用できる．デコーディングの成果をとりまとめ中であるが，この実験に関連する心理実験の成果を複数の論文として発表した[2, 3].

### *B. 身体保持感に関わる脳内身体表現とその性質の解明*

研究分担者の大木紫（杏林大学）らのグループは，身体保持感に関わる脳基盤を解明するための実験を行った．まず，身体保持感に関わる脳活動を特定するため，課題の開発を行った．このため用いたのは，ラバーハンド錯覚と呼ばれる手法である（Botvinick & Cohen, 1998）．しかし，1)異なる刺激（同期 vs. 非同期刺激等）を用いず身体保持感のみを変化させる，2)差異をオンラインで検出する，等の問題を解決するため，従来の方法の改良を行った. すなわち，被験者の隠された手と眼前の人工手を同時に 2 回ブラシで撫で，その後人工手の位置で触覚を感じた（触覚移動）かを答えさせた．触覚移動の有無の頻度を同程度にするため，人工手の位置を系統的に変化させた．その結果，短時間の刺激でも触覚移動が観察されること，同期刺激で人工手の位置が一定であっても，異なる主観が生じることがわかった．現在 64 チャンネル脳波計を用いて，人工手への触覚移動を反映する脳活動を調べている[4].

また，B01 項目とは，手の CG を操作することにより身体保持感と運動主体感を発生させ,この時生じる固有感覚ドリフト（実際の手の位置が CG の位置の方向にずれて感じる）の詳細を検討した．この結果，身体保持感は主に指の位置判断に影響を与えるが、随意運動を行うと肘の判断にも影響を与えることが証明された。この結果は，脳内身体表現を効率的に変化させるためには、随意運動，もしくは運動コマンドが重要であることを示す[5]．更に，C01 項目と共同で，非接触型ジェスチャー入力システム（Kinect, Microsoft）と 3D ヘッドマウントディスプレー

を用いた没入型仮想現実システム SIGVerse (C01 班開発)の改良と臨床応用の検討を行った[6]．現在のところ，より被験者が没入できるため，被験者の体格を考慮した補正が行えるよう改良を行い，健常被験者で固有感覚ドリフトが起こることを証明した.今後は， C01 班と共同し、東北大学病院での臨床応用を目指す予定である.

### *C. サルを対象とした電気生理実験による脳内身体表現の解明*

研究分担者の村田哲（近畿大学）らのグループは，自己の身体の状態を符号化する脳内身体表現の神経基盤を明らかにするために、サルの頭頂葉のニューロン活動の随伴発射による影響を調べることを目標にしている。随伴発射は遠心性コピーとも呼ばれ、運動の表出に関わる領域からの信号のコピーであり、感覚系へ送られ感覚フィードバックと統合されるとともに感覚情報に何らかの影響をあたえることが知られている。これが、自己身体意識や身体図式の生成にも関与していると考えられている.今年度の研究は、この随伴発射の頭頂葉への入力を調べるために、体性感覚野において感覚抑制の現象を捉える[7, 8]ことを目的とした。そこで、Blakemore らの自己くすぐりの実験装置を再現し、サルの体性感覚野から自己くすぐりの最中のニューロン活動を記録中である。

### *D. 統合失調症患者における運動主体感の変容メカニズムの解明*

研究分担者の前田貴記（慶應義塾大学）らのグループは,統合失調症患者にも適応可能な，運動主体感の計測方法（Keio method）を開発してきた．今年度は，特に統合失調症患者を対象に，行動実験と脳活動計測を行い，運動主体感に異常をもたらすメカニズムと脳内基盤の解明が進展した．具体的には,

１）Keio method について特許出願を行った[9].

２）Keio method を改変したタスクを用いて、統合失調症では、運動主体感の成立機構のモデルである Forward model において、prediction signal（efference copy and corollary discharge）が 50msec 遅延していることで、運動主体感に異常を来していることを実証し、近年、統合失調症の病態仮説として注目されている disconnection 仮説を支持する結果を得た[10].

３）統合失調症患者に対する脳活動計測を行い、運動主体感に関連の強い領域である下頭頂小葉(inferior parietal lobe: IPL), 島皮質(insula), 後帯状皮質(後帯状皮質: posterior cingulate cortex), 楔前部(precuneus)に活動異常がみられ、かつ、IPL の一部である縁上回と尾状核の connectivity が左側において低下していることを見いだした.

４）Keio Method の“行動”データをもとに、ロボットに行動データを入力し、運動主体感を再現させることで、ニューラルネットワークを構築した. また，統合失調症の病態研究の一つとしてワーキングメモリー異常のシミュレーションを行った[11].

５）B01 班と共同で、身体性システムについて、スローダイナミクスの視点から検討した[12].

## IV. おわりに

今年度は，身体意識の神経基盤の解明に大きな進歩が見られた．具体的には，fMRI 脳活動と計算モデルの組み合わせによる，スローダイナミクス・ファーストダイナミクスの神経基盤の解明，運動の自他帰属のデコーディングの成功，統合失調症患者における運動主体感の変容が運動予測における 50 msec の遅れに原因があることをつきとめた．また，このような検討を行う過程で，身体意識の理解も深まり，複数の総説が出版されている[13, 14]．次の段階につながる，身体保持感のオンライン脳波計測パラダイムの開発，サルを対象とした新たな電気生理実験のパラダイムにおいても，課題設定や実験準備が着々と進められている．これらの成果を，脳活動計測の結果と統合することにより，身体意識の確かな神経基盤を明らかにし，最終目的である身体意識への介入と誘導・修復する方法の開発へと繋げて行きたいを行い.

## REFERENCES


[1] S. Kim, K. Ogawa, J. Lv, N. Schweighofer, H. Imamizu, “Neural Substrates Related to Motor Memory with Multiple Timescales in Sensorimotor Adaptation.” PLoS Biology, 13(12), e1002312, 2015.

[2] T. Asai, Feedback control of one's own action: self-other sensory attribution in motor control. Consciousness and Cognition, 38, 118-129, 2015.

[3] S. Imaizumi. & T. Asai, Dissociation of agency and body ownership following visuomotor temporal recalibration. Frontiers in Integrative Neuroscience 9, 35, 2015.

[4] 畝中智志，渋谷賢，大木 紫: 仮想現実下における仮想手の操作が身体性自己意識および脳活動に与える影響, 第 7 回多感覚研究会, 東京女子大学, 2015 年 11 月 7-8 日

[5] S. Hamasaki, Q. An, W. Wen, Y. Tamura, H. Yamakawa, A. Yamashita, H. Asama, S. Shibuya, Y. Ohki: Evaluating Effect of Sense of Ownership and Sense of Agency on Body Representation Change of Human Upper Limb, 26th 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2015), Nagoya, Japan, 2015 年 11 月 24 日

[6] Y. Oouchida, T. Sudo, T. Inamura, N. Tanaka, Y. Ohki, S. Izumi: Maladaptive change of body representation in the brain after damage to central or peripheral nervous system, Neurosci Res, in press.

[7] Murata A, Wen W, Asama H The body and objects represented in the ventral stream of the parieto-premotor network. Neurosci Res. in press

[8] 村田　哲　感覚の基礎知識 触覚　Clinical Neuroscience 33(5) 523-526 2015

[9] 特願 2015-245979

[10] A. Koreki, T. Maeda, H. Fukushima, S. Umeda, K. Takahata, T. Okimura, M. Funayama, S. Iwashita, M. Mimura, M. Kato, Behavioral evidence of delayed prediction signals during agency attribution in patients with schizophrenia. Psychiatry Research 230, 78-83, 2015

[11] T. Okimura, S. Tanaka, T. Maeda, M. Kato, M. Mimura Simulation of the capacity and precision of working memory in the hypodopaminergic state: rerevance to Schizophrenia, Neuroscience 295, 80-89, 2015.

[12] S, Yano, T. Maeda, T. Kondo, Slow dynamics perspectives on the Embodied-Brain Systems Science, Neuroscience Research (in press)

[13] J. Izawa, T. Asai, H. Imamizu, (2015). Computational motor control as a window to understanding schizophrenia. Neuroscience Research. in press.

[14] 前田貴記：“自我の”精神病理学から考える統合失調症. 臨床精神医学 44(5)701-706,2015

# A02-1 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 FY2015, we established 1) Tendon-transferred primate model and its primary evaluation, 2) *Relationship between the two modes of the cerebellar output and cerebellar ataxia, and 3)* body representations associated with hand/finger movements and neuronal substrates associated with formation of human body schema and body image**

## I. はじめに

研究項目 A02-01 では関（代表者）内藤・筧（分担者）及び 13 名の連携研究者というメンバーで構成される。国立精神・神経医療研究センター、情報通信研究機構、東京都医学総合研究所という我が国を代表する神経科学の研究拠点をベースに項目内、班内及び領域内連関を確立して筋シナジー制御器の状態を反映する脳内身体表現マーカーの確立をめざす。

## II. 目的

本研究項目の具体的な目的は筋シナジー生成器及び制御器の脳内神経基盤を明らかにし、身体の筋骨格構造の変化や体性感覚の遮断に対する上記神経機構の可塑性(slow dynamics)を実験的に明らかにする事である。

## 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. 脳内身体表現変化の slow and fast dynamics を評価するための霊長類モデルの確立*

筋肉や骨格系の構造は生後様々な変化をするが、その変化に関わらず同じ行動を行うことができるのは生物の大きな特徴だと言える。さらに事故などで四肢の一部が失われた場合も、義足や義手の適用によって事故前に近い運動が可能な場合さえある。これらの例は、筋骨格系構造の変化が、行動制御の中枢である脳神経系に伝えられ、筋骨格系の変化に合わせてその機能や構造が適応的に変化し、それによって変化後の四肢が制御されていると考えられる。しかし、この適応的変化の生物学的実態はほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、中枢神経系に身体に関する多様な情報が集約された表象がなされていると想定し（脳内身体表現）、それらが筋骨格系の構造変化に対応する形で変化することによって行動適応が実現しているという仮説を検証する。本年度はその仮説検証のための動物モデルの作成を行った。

具体的には、ヒトと筋骨格構造の近似したマカクサルを用い、複数の把握課題を連続して行うように行動訓練を施した。それらの運動パフォーマンスは把握装置に設置した各種センサー及びサルの上肢筋に埋め込んだ筋電図電極で記録した。運動パフォーマンスが安定してきた段階で、手指支配筋の一つの腱を手首支配筋の一つの腱に付け替える手術を行い、付け替えを行った筋が①手指支配筋の活動特徴を維持し続けるか、②手首支配筋が持っていた活動パタンを新規に獲得するか、または③全く新たな筋活動パタンを獲得するか、について検討した。

現在までの結果では、手術 1 日後から②を示唆する行動変化が起こり(fast dynamics)、それらは術後数週間に渡って連続的に変化した後、定常状態になった(slow dynamics)。これらの予備的な結果は当モデルが脳内身体表現の可塑性の変化に適していることを示していた。

### *B. 小脳内部モデルの出力生成メカニズムと小脳性運動障害の関係*

研究分担者の筧（都医学研）らのグループは，小脳における状態予測の障害と，小脳性運動障害の関係を解明した．小脳は大脳との間に大脳小脳連関ループを形成し，随意運動に必須の役割を果たす．運動野で生成された運動指令は脊髄と同時に橋核経由で小脳にも送られる．小脳はその遠心性コピー入力と感覚入力で次の状態を予測し，運動野に送り返す[5,6]．運動野は，この予測に基づき次の運動指令を生成する．この様な再帰的過程により，スムーズな運動が行われる．昨年度，小脳出力が脱抑制で興奮する「indirect モード」と，抑制される「direct モード」の 2 つのモードを持ち（図 1），前者は登上線維入力の増加、後者は同入力の減少により選択（学習）されることを明らかにした(Ishikawa et al. PLoS ONE, 2014)．2 つのモードは小脳運動学習の最小単位であり，逆に小脳性運動障害は，2 要素の機能不全として説明出来るはずである．そこで本年度は，2 つのモードと臨床的な小脳症候学の関係について検討した．実は小脳性運動障害を記述する臨床用語は，100 年前から混乱してきた．例えば「現象」を表す測定過大・運動分解，偶発的運動，運動開始の遅れ等の用語と，「概念」を表す反復拮抗運動不能，協働収縮不能，時間測定異常，筋緊張低下等の用語（岩田誠 2013）のような，レベルの異なる記述が併用されてきたところに，その一端がうかがえる．そこで我々は 2 つのモードの障害の観点から，全ての小脳障害を整理した（図 1）[7]．その結果，運動開始の遅れと筋緊張低下は間接モードの障害で，偶発的運動と運動分

解は直接モードの障害で，それ以外の反復拮運動不能，協働収縮不能等々はその組合せで，全ての小脳性運動障害を二元的に説明出来ることが明らかになった[8]．その結果，小脳性運動障害の長年の混乱を収拾し，脳内身体表現の予測という観点から再定義する基盤が整った．

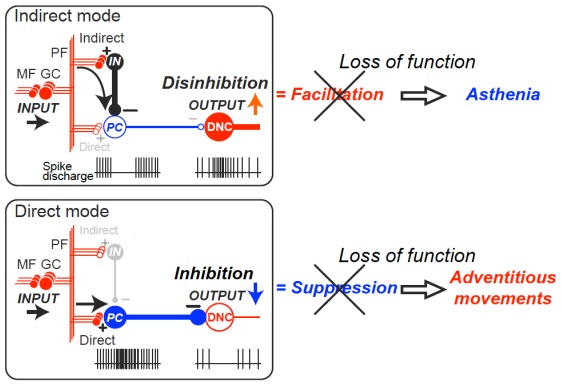



図１　小脳歯状核(DNC)出力の 2 モードの障害による症状 *Asthenia*: 筋緊張低下, *Adventitious mov.*: 偶発的運動

*C.* fMRI デコーディングによる手指の脳内身体表現の解明と身体図式と身体像形成に関わる脳内神経機序

研究分担者の内藤（情報通信研究機構）らのグループは、昨年度、iSLR という新しい fMRI デコーディング法を開発した(Hirose et al. 2015)。この方法は、従来法の問題点を改善し、人差し指と中指など従来の脳機能マッピングでは分離することが難しかった微細な脳内身体表現を分離して同定することを可能にした。このようなデコーディング法を用いて、本年度は、運動準備に関わるヒトの高次運動領野の脳活動から、その後実行される手指運動の種類を判別することに成功した[1]。多くの先行研究が、運動準備には、運動領野および前頭-頭頂ネットワークが関与することを示してきたが、本研究は、運動の種類を判別できるより具体的な運動プログラムの内容に関する情報は、前頭-頭頂ネットワークの活動ではなく、手と反対側の補足運動野・背側運動前野に主に表現されている可能性を示した。また、現在、C02 班と連携して、iSLR 法を用いた、音楽家ジストニア患者の手指脳内表現の変容の解明を行っており、第一次運動野や体性感覚野で見られる指表現の異常な重複が患者の maladaptive な脳内身体表現の実態であることを解明しつつある。来年度より iSLR 法を用いた筋シナジーの脳内表現の解明を本格化する予定であるが、これに先行して今年度は、解析的に同定できてしまう筋シナジー様パターンの問題点を指摘した[2]。身体認知に関しては、筋肉の筋紡錘センサーを振動刺激することで人間が体験できる、四肢の運動錯覚現象(姿勢変化知覚)を用い、人間が自己の身体像変化を知覚する場合には、右半球の上縦束第 3 ブランチで結合された前頭(44 野)-頭頂(PF 野)ネットワークの活動が本質的であることを明確に示した[3]。また、運動錯覚を用いた一連の MRI 研究の成果を整理し、筋紡錘からの情報を受け取り、効率的に運動指令に変換できる運動領野の活動は、人間の身体図式の形成に関与し、自己の姿勢変化の知覚量を反映する前述の右半球上縦束第 3 ブランチ前頭-頭頂ネットワークの活動は、身体像の形成に本質的に関与することを示し[4]、身体図式と身体像の脳内神経機序の実体を示唆した。

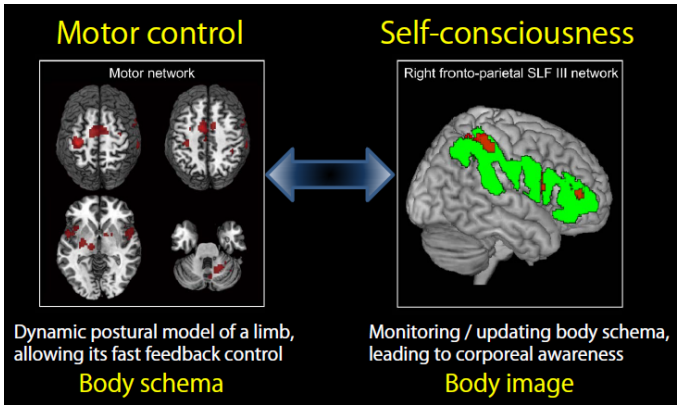



図２　運動錯覚中の脳活動　運動領野活動(左)は身体図式の形成に、右半球上縦束第 3 ブランチ前頭-頭頂ネットワークの活動(右)は身体像形成に関与すると推測される。文献 4 より改変

## IV. おわりに

今年度は３拠点において、それぞれのが目標とする研究が本格的に開始され、一部は既に論文化がなされた。また、拠点間の共同研究も本格化している点で評価できる。

## REFERENCES


[1] Yaguchi H, Takei T, Kowalski D, Suzuki T, Mabuchi K, and Seki K (2015): Modulation of spinal motor output by initial arm postures in anesthetized Monkeys. J.Neurosci., 35(17): 6937-6945

[2] I. Nambu, N. Hagura, S. Hirose, Y. Wada, M. Kawato, E. Naito “Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: an fMRI multi-voxel pattern analysis,” European Journal of Neuroscience 42(10), pp. 2851-2859, 2015.

[3] M. Hirashima, T. Oya. “How does the brain solve muscle redundancy? Filling the gap between optimization and muscle synergy hypotheses”, Neuroscience Research, 2015 Dec 24. pii: S0168-0102(15)00299-0. doi: 10.1016/j.neures.2015.12.008. [Epub ahead of print].

[4] K. Amemiya, E. Naito “Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement,” Cortex (in press), 2016.

[5] E. Naito, T. Morita, K. Amemiya “Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness,” Neuroscience Research 2015 Nov 10. pii: S0168-0102(15)00264-3. doi: 10.1016/j.neures.2015.10.013. [Epub ahead of print].

[6] S. Tomatsu, T. Ishikawa, Y. Tsunoda, J. Lee, D.S. Hoffman, S. Kakei “Information processing in the hemisphere of the cerebellar cortex for control of wrist movement”, *J Neurophysiol* 115(1):255-70, 2016.

[7] T. Ishikawa, S. Tomatsu, J. Izawa, S. Kakei “The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models?” *Neurosci Res*, doi: 10.1016/j.neures.2015.12.003, 2015.

[8] T. Ishikawa, S. Kakei, H. Mitoma “Overlooked Holmes’ clinical signs: reevaluation by recent physiological findings” *Cerebellum Ataxias*, doi: 10.1186/s40673-015-0033-z. eCollection 2015.

# A02-2 研究項目の研究成果報告

高草木 薫（研究代表者）
旭川医科大学医学部・脳機能医工学研究センター

***要旨*—随意運動の発動と遂行に随伴する予期的姿勢調節には感覚系と運動系の機能統合が必要である．本課題では，予期的姿勢調節を可能にする大脳皮質および皮質下機構の解明を目指す．本年度（H27）年度は，ヒトの起立—歩行タスクにおける神経生理学的解析と，実験動物における姿勢と歩行制御に関わる運動-行動学的解析・神経生理学的解析を実施した．その結果，① ヒトの歩行開始動作に先行する予期的姿勢調節は，身体と空間認知情報に基づく運動プログラムによって生成される Feed-forward 型の姿勢制御であること，② サルの 4 足から 2 足への姿勢変換時において，運動プログラムの生成に関与する補足運動野ニューロン活動は，姿勢維持筋である体幹部伸筋群ならびに下肢筋の活動に関連した特異的活動を有していたこと，さらに，③ ネコの起立姿勢維持に関与する網様体脊髄路ニューロン群が，橋-延髄網様体腹側部に存在していたなどが明らかとなった．これらの研究成績は，補足運動野-腹側網様体脊髄路投射系の機能が，予期的姿勢調節のプロセスに関与するという作業仮説の必要条件を満たすと考えられる．**

## I. はじめに

転倒・転落事故の急増は通常の生活空間のみならず医療施設においても深刻な問題である．特に高齢者における転倒・転落事故は筋骨格系の脆弱化のみならず高次脳機能の低下に起因すると考えられている [1]．従って，高次脳機能と姿勢—歩行機能との関係を解明すること，そして，高齢者の高次脳機能と運動機能の再建を図ることは本国のみならず先進国における可及的課題である．

しかし，姿勢維持や歩行機能が如何なる高次脳機能によって実現されているのか？という本質的問題に関する知見は世界的にも極めて少ない．これは，ヒトや一部の霊長類においてのみ 2 足での起立と歩行が可能であることに起因する．この問題を克服するため，我々はヒトと実験動物において，起立と歩行に関連した共通の動作特性を抽出し，その背景に存在する経機構を実験動物において解明する研究戦略を選択した．その共通動作特性が予期的姿勢調節（Anticipatory postural adjustment）である [2]．この姿勢調節は意図する行為（随意運動）が遂行されるように最適な姿勢をその行為に先行して提供する仕組みであり，その時空間変化はヒト（2 足）とネコ（4 足）において共通することが明らかになっている [2]．

そこで平成 27 年度の研究では，APA のメカニズムに関する以下の研究計画を実施した．(1) ヒトの予期的姿勢調節が高次脳機能よって生成される運動プログラムに基づく Feed-forward 型の姿勢制御であることを検証する．(2) サルの皮質運動領野において運動プログラムの生成に関与する補足運動野（supplementary motor area; SMA）の神経細胞活動を歩行姿勢の変化との対応において解析・評価する．(3) ネコの脳幹網様体において補足運動野からの線維投射が存在する領域が姿勢維持機能に関与するか否かを評価する．

## II. 研究成果

### 1. ヒトの予期的姿勢調節

図 1 は，歩き出し動作の際に誘発される APA の記録である．被験者（A）は床反力計の上に起立し，任意の歩幅で歩きだす．図 1B は，30cm, 50 cm, 70 cm の歩幅で左足から歩き出した際の床反力の変化である．何れの場合でも，踵が床から離れる以前（100 ms 程度）に床反力の増加が観察される．この増加が APA を反映する．また，歩幅が増加するに伴い加重の増加が認められる．即ち，APA は目的動作を適切に遂行するための運動プログラムに基づく Feed-forward 型姿勢制御であることを示している．従って，我々が歩き始める際に誘発される先行性姿勢制御は，運動プログラムの生成に関与する高次脳機能によって遂行されると考えられる．

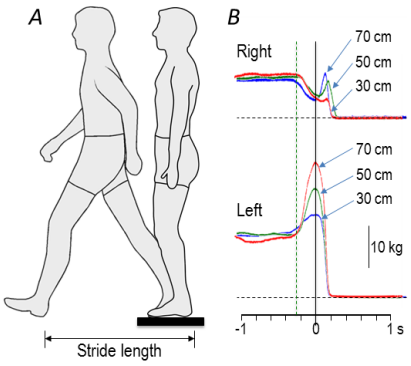



Fig. 1. 歩行開始と予期的姿勢調

障害物を回避し，正確な場所にステップを刻む歩行動作は，腕のリーチング動作と同様に正確な視覚-運動連関（visuo-motor coordination）を必要とする随意運動である．視覚-運動連関は大脳皮質視覚野から頭頂連合野を経由して補足運動野と運動前野に至る「前頭—頭頂ネットワーク」の活動を必要とする．この経路は自己身体と空間認知に基づく運動プログラム生成に必要な情報をコードしていることから，APA は自己身体を表現する間接マーカー（脳内身体表現マーカー）であると考えられる．運動プログラムの生成には，どこ経路でコードされる自己身体の認知情報に加えて，大脳皮質・大脳基底核・小脳を結ぶ運動ループ（Motor loop）の活動を必要とする．運動麻痺（大脳皮質の損傷），パーキンソン病（大脳基底核疾患），背髄小脳変性症（小脳系の疾患）では APA が障害されており，これらの疾患における姿勢 -運動連関の異常（転倒し易さ）を反映している．

## 2. サルの姿勢 -歩行戦略変更に関与する補足運動野活動

トレッドミル上で 4 足歩行と 2 足歩行をトレーニングしたニホンザルの姿勢変化を図 2 の右側に示した．4 足から 2 足歩行へと姿勢 -歩行戦略を変更させる際に，体軸は水平から垂直方向へと変化する（図 2 Transition）．従って，この姿勢変化に伴い，下肢筋と体幹筋の活動増加が誘発されると考えられる．そこで，下肢・体幹を支配する SMA 領域から導出される神経細胞活動が，この姿勢 -歩行戦略に可能とする発射動態をコードしているか否かを検討した．

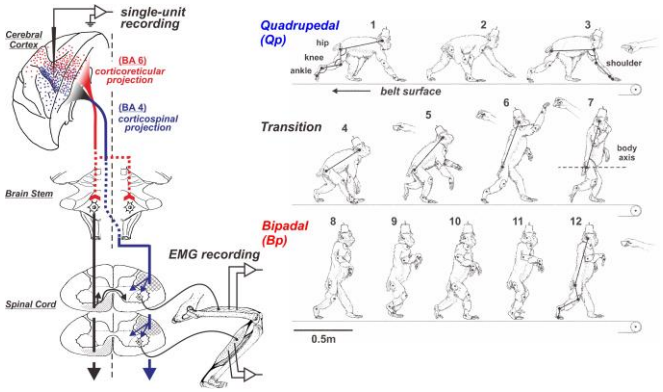



Fig. 2. 実験の模式図とサルの姿勢 - 歩行戦略の変化

SMA neuron 活動は，相動的・持続的・一過性の 3 種類に分類される．相動的活動は歩行の step cycle に対応していた．相動性活動および持続的活動を有する neuron の発射頻度は，4 足から 2 足へと姿勢―歩行戦略を変更させる際に増加し始め，2 足歩行の間，その発射頻度を維持していた．さらにその発射頻度の変化は，背柱起立筋ならびに下肢筋の活動と強い関係を有していた．一方，一過性活動を示す neuron は，4 足から 2 足，2 足から 4 足という姿勢―歩行戦略の変更に先行する活動を示した．

大脳皮質運動領野から背髄への投射系には，直接背髄に線維を投射する皮質背髄路と脳幹網様体を経由して背髄に至る皮質―網様体背髄投射とが存在する（図 2 左）．一次運動野（M1）に起始する皮質背髄路は体部位局在に対応する局所の巧緻動作の生成に関与する．しかし，本研究の成績は，SMA に起始する皮質―網様体背髄投射は姿勢―歩行戦略の変更ならびに，起立姿勢の維持（抗重力筋活動の維持）に極めて重要な役割を持つことを示唆する．さらに，SMA が運動プログラムの生成に寄与することを考慮すると，一過性活動を示す neuron の活動は APA の発現に関与すると推定することができる．

## 3. ネコの姿勢制御における網様体背髄路の機能解析

SMA の出力は皮質―網様体背髄投射系を構成する [3]．従って，2 足歩行時における SMA の活動は，網様体背髄路の活動を介して姿勢と歩行の制御に関与すると考えるのが妥当である．従って，抗重力筋活動（姿勢筋緊張）の維持に関与する網様体背髄路ニューロン群が存在することを同定することは，本プロジェクトの重要な必要条件である．そこで，抗重力筋活動が発達した除脳ネコ標本を用いて，これを検討した．

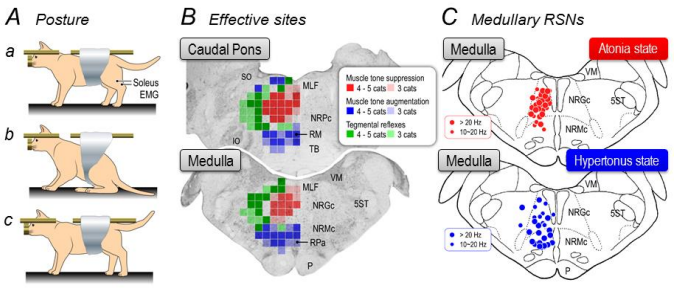



Fig. 3. 除脳ネコの脳幹網様体における筋緊張調節機構

図 3 は除脳ネコ標本から得られた成績である．除脳ネコは除脳固縮に伴う反射直立姿勢を維持する（図 3Aa）．橋および延髄網様体の内背側部（図 3B 赤）に連続微小電気刺激（20-40 μA, 50 Hz）を加えると除脳ネコの姿勢筋緊張が減少・消失する（図 3Ab）．しかし，橋延髄網様体の腹側部（図 3B 青）に同様の刺激を加えると姿勢筋緊張は亢進して除脳固縮は強調される（図 3Ac）．一方，網様体の外側部に加えた刺激は一側肢の屈曲と対側肢の伸展（非対称姿勢）を誘発した．次に，電気刺激が各々対応する領域の神経細胞の活動が筋緊張の変化と対応するのかを検証するため，除脳固縮状態ならびに筋緊張消失誘発標本を用いて，延髄網様体背髄路ニューロン（Reticulospinal neurons; RSNs）の発射頻度を解析した [4]．その結果，筋緊張消失および除脳固縮で発射頻度の高い RSNs は，各々，延髄網様体背内側部（図 3C 赤）と腹側部（図 3C 青）に局在していた．

## III. 考察と展望

ネコの大脳皮質運動領野の 6Aβは霊長類の SMA に相当する．6Aβからは橋・延髄網様体の腹側部への投射が極めて強い[5]．サルやヒトにおいても SMA から橋・延髄網様体への投射系が姿勢維持に寄与すると考えられる．従って，上記の研究成績は「前頭―頭頂ネットワークで生成される脳内身体表現は，SMA から下行する皮質―網様体背髄投射系を介して運動に先行する APA を司る」という作業仮説の必要条件を満たすものである．

今後，上記神経機構による姿勢―歩行制御のメカニズム，および，APA の脳内身体表現マーカーとして有用性を実験動物と臨床研究によって明らかにする必要がある．

## REFERENCES


[1] A. Snijders, et al. Neurological gait disorders in elderly people: clinical approach and classifi cation Lancet Neurol 2007; 6: 63–74

[2] J. Massion, Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination, Prog. Neurobiol. 1982; 2: 68-93.

[3] K. Keizer, HG. Kuypers. Distribution of corticospinal neurons with collaterals to the lower brain stem reticular formation in monkey (Macaca fascicularis). Exp Brain Res 1989;74:311–318.

[4] K. Takakusaki et al. Brainstem control of locomotion and muscle tone with special reference to the role of the mesopontine tegmentum and medullary reticulospinal systems. J Neural Transm 2015, DOI 10.1007/s00702-015-1475-4.

[5] K. Matsuyama, T. Drew. Organization of the projections from the pericruciate cortex to the pontomedullary brainstem of the cat: a study using the anterograde tracer Phaseolus vulgarisleucoagglutinin. J Comp Neurol , 1997; 389: 617–664.

# A03-1 研究項目の研究成果報告

鎌田恭輔
旭川医科大学　医学部　脳神経外科

***Abstract*— Brain-computer-interface (BCI) はそのユーザーの持つ脳信号検出により、出力装置、コンピュータのソフトウエア操作を行う機器である。多くの BCI では脳波(electroencephalogram:EEG)における感覚・運動想起に関連した脳の自発的律動振動に着目した報告が多い。脳皮質電位(electrocorticographic: ECoG) 信号は high gamma activity (HGA)と呼ばれ課題に関連したる高周波律動が注目されている。HGA の広がりは空間特異性が高く、その活動の広がりによる脳機能マッピングが注目されている。HGA 局在をもとに、各手指。複雑な指、把握運動の判別が最も効率的と期待が集まっている。莫大な情報量を判別する手法として Common spatial patterns (CSP)が最近 BCI に応用され、特徴量の抽出に加え解析次元を減らすことができる。本検討は以下の３つの項目に分けた。(i) ３つの複雑な hand pose の分離、(ii)EEG と ECoG を用いたときの平均訓練時間の比較。特に２例である S1 と S2 では単純に“グー”、”チョキ”、”パー”を最低２０回づつ施行した。１例 S3 では遠隔場所に存在しているヒューマノイドを WIFI を用いて"運動想起"により操作した。ii)ECoG 電極埋め込んだ４例の患者と２０例の健常ボランティアが BCI コントロール実験に参加した。ボランティアでは non-invasive (electroencephaography:EEG)法による解析を行った。ECoG 信号はすべて 100-500Hz の間の HGA の空間分布を CSP 法を用いて解析した。i)と ii): CSP による判別では S1 と S2 において、error rate は 7.22 % と 1.17 %であった。運動想起課題により、遠隔地にいるヒューマノイドのコントロールはほぼ 100%の読み取り成功率であり、かつ２日間のインターバルをおいて解読しても、その解読成功率は 90%を維持していた。(iii) EEG と ECoG による読み取り精度はそれぞれ 76.0 % と 94.6 %であった。EEG と比較すると ECoG による読み取り精度は統計的に有意に優れていた。**

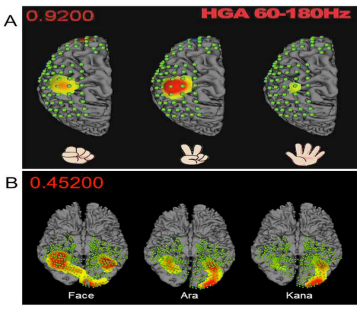
## I. はじめに

BCI は脳と外部出力系を直接コミュニケーション出力するデバイスである。BCI は失われた神経機能を補うための機器、また、障害を受けた認知、運動一感覚機能の回復を目指した機器である。脳信号を読み取るためには、多くの BCI では課題関連信号脱同期(event-related desynchronization: ERD)、または同期(event-related synchronization: ERS)を用いている。EEG は広く BCI 研究領域で普及しているが、その信号・雑音比が低いことと信号は広がっているため、局在性に乏しいことが指摘されている。BCI 研究では EEG は簡便ではあるが、その低い信号強度、局在性の低さなどが研究の限界であることが至適されてきた。そこで注目されてきたのは ECoG であり、これは EEG より信号・雑音比が 4 倍ほど高く、かつ脳表から限局した活動を検出することができる。このように ECoG は脳の局所の電気的特徴・および高い信号・雑音比で機能局在が可能であるため、本検討では ECoG による脳機能読み取りについて検討を行った。

先行研究として我々は電極留置した２０症例の ECoG 電極位置を１つのテンプレート脳に座標変換して重ね合わせた。これにより２０例の患者の同一課題における平均画像、つまり機能テンプレートを作成した[1]。この機能テンプレートにおいて HGA に着目すると、hand pose, 視覚認知課題などで特異的な HGA 活動パターンを可視化できた。本法は個々の患者機能マッピングにおいて、データバンクを用いることで効率的な脳信号の読み取り応用できる(Fig. 1)。

**Figure 1** 運動遂行(A)および視覚認知(B)関連 HGA ダイナミクス. ピースサインが最も強い HGA 集積を示した(A)。視覚認知は顔刺激は右、仮名刺激では左有意の HGA の広がりを認めた。

この検討では運動遂行、想起課題によるリアルタイム ECoG クラス分けが可能となった。我々は特異な皮質領域における HGA ダイナミクスに着目することが重要である。さらに、我々はこのリアル処理は BCI コントロールに有用であると認識した。



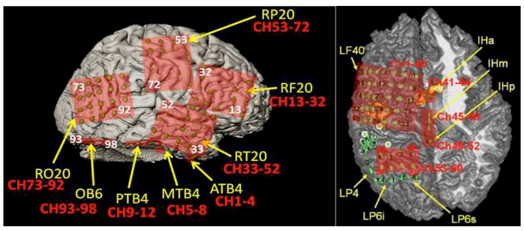

## 対象および方法

我々は 2014 年６月から 2016 年１月まで４例の難治性てんかん患者に診断目的で、旭川医科大学病院で硬膜下電極を留置した。ECoG 計測中は患者に様々な手指運動課題、運動想起課題が適切にできるように約半日をかけてトレーニングを行った。留置電極は、通常の硬膜下電極よりも高密度である硬膜下電極、つまり電極半径 1.5mm, 電極間距離 5mm であり、１グリッド電極数は 60 極であった。Table 1 と Fig2 は患者の詳細の一部を提示する。

**Table 1**. 検査した４患者の背景

| Subject | Gender | Age | Dominant hemisphere | Number of electrodes |
|---|---|---|---|---|
| S1 | Female | 35 | Right | 96 |
| S2 | Male | 22 | Left | 60 |
| S3 | Female | 54 | Left | 76 |
| S4 | Female | 32 | left | 118 |

**Figure 2**: S1 の電極配置図。右半球の運動野を含めた広範囲に電極が留置された。



## II. Research Topics

ECoG データ処理：すべての ECoG データ処理は Matlan R2008b ベースの改変ソフトウエアにより行った。また、課題による手の動きは 5DT monitor gloves により持続的に把握した。Common Spatial Patterns (CSPs)は標準的な判別関数であり、ECoG から運動遂行、運動想起などの特徴量を抽出した。CSP は各電極への分散を求め、適切な窓関数を収束計算で求める。その結果、最も適切な上位２パターンと、下位２パターンの４パターンを選び判別に用いた。その結果をもとに linear discriminant analysis (LDA)が”動き”、”休み”、さらに複数の運動反応の判別を行った。

I) Hand pose のクラス分け。

視覚的なクラス分けでは、S1 および S2 ではエラー率は 13.89%と 19,42%であった。一方、自動判別関数を用いたところエラー率は 7,22%と 1,17%であった。Figure 3 のなかの陰のある部分では 95% (dark gray)、99% (light gray)であった、統計学的な McNemar test ではすべての異なる３つの hand pose においても有意差をもって判別できた。

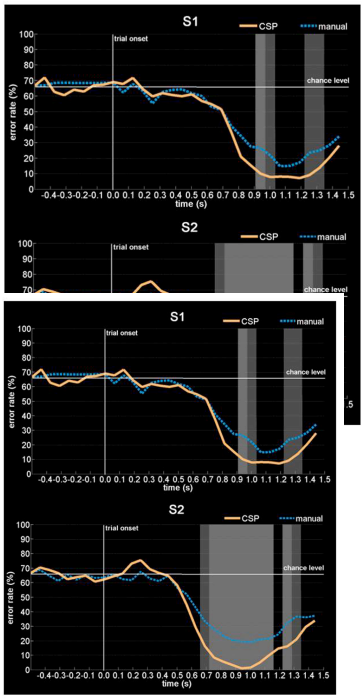


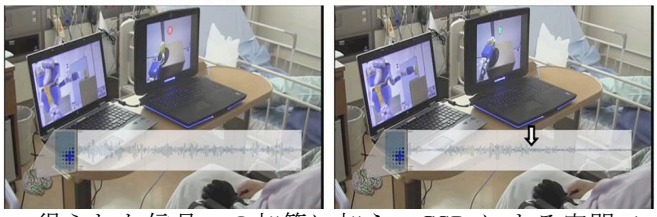

Figure 3 運動遂行における 3 つの hand pose のマニュアル処理 (blue dotted line) と CSP(red solid lines)の平均検出エラー率。垂線は視覚刺激野タイミングを示す。灰色の領域は統計学的に有意に異なる部分を示した (p<0.05)。CSP 判別が優れていた[2]。

II) ロボットアームとヒューマノイドのコントロール

Hand pose 運動遂行、と 2 つの hand pose 動作想起に関するロボットアーム操作の訓練時間は、4 患者の平均はそれぞれ 58.2 と 25,4min であった。一般的に EEG-based BCI ではトレーニング時間は最低 12 時間以上必要であった。ECoG の高い信号・雑音比による精確なデコーダー作成が有用であった。運動遂行では、最大パワーとその広がりが有意に各 hand pose で異なることが、hand pose 読み取りをより容易にしていた。ヒューマノイドのカンの把持コントロールする運動想起では、トレーニングを４セッション行った。はじめの３回のセッションは１日目に行った。最後の４セッション目を２日後に行い、デコーダーと脳機能の再現性を確認した。２日後の判別関数の成功率はおおよそ 90%程度であった。この研究では ECoG-based 運動想起課題では、EEG-based BCI に比して有意に短いトレーニングで確立し、かつその後のデコーダーは長く使用できる可能性があった (Fig.3)。

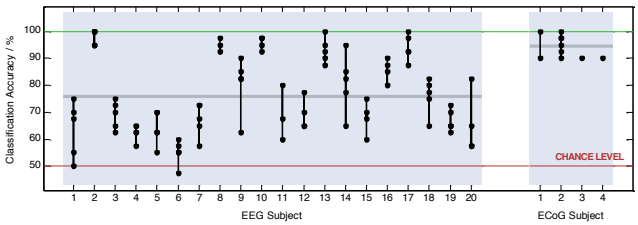
**Figure3**: ヒューマノイドによるカンの把持・安静課題。右モニター上の赤は安静、緑はカンの把持(active)の指示を示す。白枠内はデコーディングに用いたすべての電極の平均電位を示す。矢印の運動想起のタイミングでアルファ波の低周波成分の抑制が明らかである[2]。.

III) 侵襲・非侵襲的 BCI のオンライン処理精度



得られた信号への加算に加え、CSP による空間フィルター処理は最も重要な時間窓判別に有用である。LDA による判別には CSP 計算後ベスト２パターンとワースト２パターンの４パターンを用いた。Fig.4 のように EEG と ECoG の平均正答率は 76.0 % と 94.6 %であった (Fig 4) [3]。

**Figure 4**. 侵襲・非侵襲的 BCI のオンライン処理精度。右側 ECoG 使用 4 例では明らかにオンラインデコーディング精度が高かった。




## III. Future Perspective

1, さらなる症例蓄積が必要である。
2, 周波数カップリングと脳ネットワーク解析は脳信号解読により寄与すると期待できる。
3, 運動以外に言語機能などのネットワークの解明も機能分布把握に必要である。

## REFERENCES


[1] N Kunii, K Kamada, et al. The dynamics of language-related high-gamma activity assessed on a spatially-normalized brain. Clin Neurophysiol 124(1): 91-100, 2013

[2] C Kapeller, K Kamada, et al: Single trial detection of hand poses in human ECoG using CSP based feature extraction. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2014 4599-4602, 2014

[3] C Kapeller, K Kamada, et al. Online control of a humanoid robot through hand movement imagination using CSP and ECoG based features. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015

# A03-2 研究項目の研究成果報告

吉村 奈津江
東京工業大学 精密工学研究所

***Abstract*—本研究項目では，非侵襲的脳活動計測手法を用いて手や足の運動に関する脳内情報処理過程と筋肉の協調活動（筋シナジー）を可視化することを目的としている．この可視化技術を確立することで，短長期的な運動学習による脳内情報処理や筋シナジー体系の変容を直感的に捉えることができ，効果的なリハビリ介入にも応用可能と考えている．今年度は，第一段階として筋電信号を用いて 2 つの研究テーマにおいて筋シナジーを推定し，健常者と患者，および運動強度の違いにおける筋シナジーの違いを明らかにした．また，第二段階として脳活動信号と筋シナジーの関係を見出すための手法として考えている，脳波信号からの筋活動信号推定を，足の運動について行った．脳内情報処理過程の可視化技術については，脳波から推定した信号源レベルでの Functional connectivity を計算した結果を可視化する技術を確立した．**

## I. はじめに

研究代表者はこれまでに，手首の屈伸運動中の脳波を計測し，脳波から脳内に仮定した脳波信号源の電流信号を推定することを通して，手首運動に関する 2 つの筋肉の筋活動信号の推定に成功した[1]．この技術を用いれば，推定した筋活動信号から筋シナジーを推定し，筋活動信号の推定に寄与した脳領域と照らし合せることで，筋シナジーがどのように脳内で表現し得るかを検証することができると考えている．

## II. 目的

本研究項目の具体的な目的は，脳波と機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）を用いて，手や足の屈伸運動の開始から終了までの脳内神経伝達の流れを可視化し，さらにそれらの運動に関連する筋肉の筋シナジーが脳内レベルでどのように表現されているかを可視化することである．

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に 4 つ挙げ，それぞれ概要を説明する．

### *A.* 筋電信号を用いた健常者と患者における筋シナジーの比較[2]

健常者 6 名と片麻痺患者 7 名（Fugl-Meyer 上肢スコア 19-58）がペグという円柱形のピースを机の上で移動させる課題を行った時の表面筋電信号から非負値行列因子分解（NMF）[3]により筋シナジーを推定し，それを階層的クラスタリング法によって分類した．計測対象の筋は以下の 8 種とした：三角筋前部（DeltA）および中部（DeltM），僧帽筋上部（TrapUp），菱形筋（Rhom），上腕二頭筋（Biceps），上腕三頭筋（Triceps），橈側手根屈筋（FCR），橈側手根伸筋（ECR）．

計測した筋電信号は，カットオフ周波数 10Hz のハイパスフィルタ，全波整流，1500Hz から 50Hz のダウンサンプリング，各筋電波形の標準偏差を 1 とする正規化の順で信号処理を行い，処理後の波形を筋活性度として NMF を用いて各被験者について筋シナジーを推定した．その結果，各被験者における筋シナジー数は，健常者では 4.5±0.5（平均±標準偏差），患者では 4.0±1.2 となり，過去に発表された上肢の筋活動から得られる筋シナジー数と同様の結果となった．

次に，全被験者の筋シナジーを，凝集型階層的クラスタリング法[4]を用いて，7 個のクラスタと 14 個のサブクラスタに分類したところ，健常者と被験者で異なる特徴を示すサブクラスタが複数得られた．図 1 の例は，手関節の筋に関する筋シナジーを構成する 2 つのサブクラスタを示しており，サブクラスタの Synergy1-1 は健常者と患者の両方に使用されるのに対し，主働筋と拮抗筋の同時活性が強い Synergy1-2 は主に患者に多く認められた．またそれぞれの活性度波形に着目すると，健常者と患者では波形の時系列パターンが異なる傾向を示すことから，筋シナジーが似ていても動かすペグによる活性度の調整方法に違いがある傾向にあることが確認された．

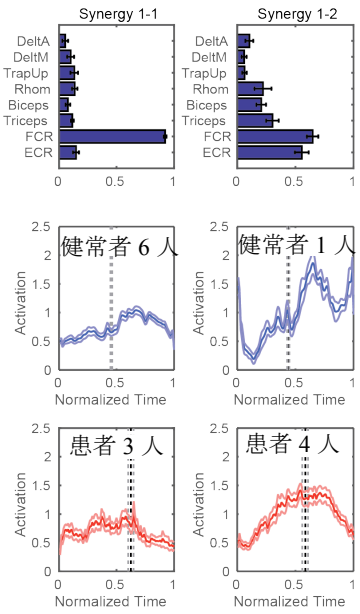



図 1. 手関節に関する筋シナジーの種類と使用者の比較

### *B.* 筋電信号を用いた健常者の運動強度の違いによる筋シナジーの比較[5]

スポーツやリハビリなどにおいて運動技能を指導する際に，お手本となる筋シナジーの使い方やパターンが実現できるように促す指導方法の可能性を見出すべく，

本テーマでは垂直跳びを用いた取り組みを行っている．最終的には初心者と熟練者との比較を行う予定であるが，今年度は 1 人の被験者において跳躍時の筋シナジーを NMF で推定し，跳躍強度による違いを確認した．その結果，シナジーの種類は跳躍の強度でほぼ同じものとなったが，脚の裏側の筋の寄与度が高い Synergy2 が跳躍強度の違いによって，飛び出し前の Rising 時のシナジー波形に違いが現れる傾向にあることが確認された．

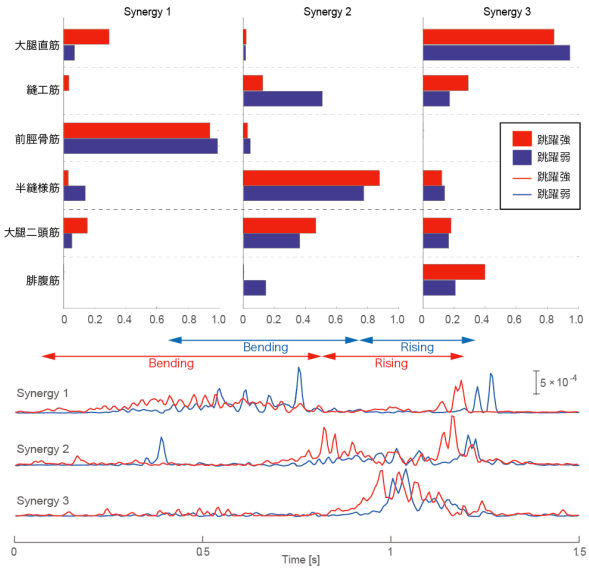



図 2．跳躍強度の違いによる筋シナジーパターンの違い

## C. 足首の屈伸運動に関する筋活動の脳波からの推定

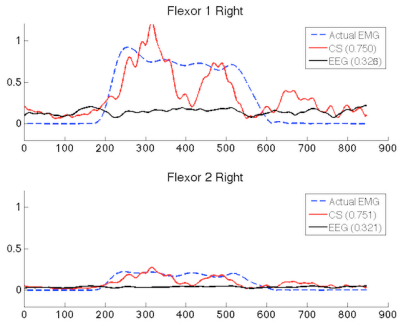



図 3．右足首の屈曲運動時の右の前頸骨筋（上）と短母趾伸筋（下）の活動信号推定結果．青点線が実測，赤線が信号源利用，黒線が脳波利用時の筋活動信号．

本テーマは歩行をサポートする装具あるいはリハビリを対象として，歩行に関する脳内バイオマーカーを抽出するための取り組みである．研究代表者の過去の実験では脳波から 2 つの筋肉の活動信号の推定に成功していたが，筋シナジーを推定するためにはより多くの筋活動信号を用いる必要がある．そこで，足首の屈伸運動を用いた実験では，左右の前頸骨筋，短母趾伸筋，腓腹筋，ヒラメ筋の合計 8 カ所の筋活動信号を脳波から再構築することを目的としている．手法は以前手首の実験で行った時と同様に，階層的変分ベイズ法[1,6]を用いて脳波の信号源信号を推定し，そこからさらにスパース回帰推定法[7]を用いて筋活動信号を推定する．これまでに 12 名分の fMRI 実験と 6 名分の脳波実験を終えた．図 3 に筋活動信号を推定した例を示す．現段階では，手首運動の場合と同様に，脳波よりも信号源信号を用いた方が，高い精度で筋活動信号が推定できる傾向が出ている．

## D. 脳波信号源レベルでの Functional connectivity 可視化技術の確立

脳内のどの信号源が筋シナジーとどのように関与しているかを可視化するための技術を確立した．言語関連のタスクの例ではあるが，言語の想起に関連する信号源を寄与度が大きいほど球体が大きくなるようプロットし，シードとして着目した信号源と時系列的な相関の高い信号源を線で結ぶ技術を確立した．

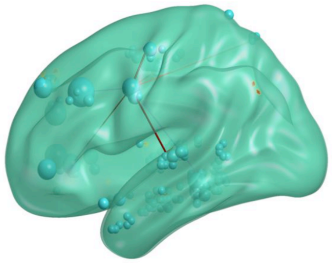


図 4．言語想起タスクに関連性が高い信号源とその時系列的相関の高い信号源を可視化した例

## IV. おわりに

本年度は筋電信号を用いたシナジー解析，脳波から筋活動信号の推定，信号源の可視化技術の 3 つの基本技術を確立した．次年度は第三段階である，脳波から推定した筋活動信号を用いて筋シナジーを求め，各筋肉の活動推定に寄与した脳領域を筋シナジーと関連づけることで筋シナジーの脳内表象の特定を試みる．

## REFERENCES


[1] Yoshimura et al., Reconstruction of flexor and extensor muscle activitices from electroencephalography cortical currents, Neuroimage, 59, pp. 1324-1337, 2012.

[2] 川瀬利弘ら，“片麻痺患者のシナジーによる運動解析”，電子情報通信学会，信学技報, vol. 115, no. 318, NC2015-38, 2015, pp.13-18.

[3] D. D. Lee and H. S. Seung, Learning the parts of objects by non-negataive matrix factorization, Nature, 401(6775), pp. 788-91, 1999.

[4] A. d'Avella et al., Control of fast-reaching movements by muscle synergy combinations, Journal of Neuroscience, 26(30), pp. 7791-810, 2006.

[5] 松村聖司ら，“飛躍時における下肢部の筋シナジー”，計測自動制御学会　システム・情報部門学術講演会，GS12-6，2015 年 11 月 19 日

[6] Sato et al., Hierarchical Bayesian estimation for MEG inverse problem, *Neuroimage*, 23(3), pp. 806-826, 2004. http://vbmeg.atr.jp/?lang=ja

[7] Sato et al., On-line model selection based on the variational Bayes, Neural Computation, 13, 1649-1681, 2001. http://www.cns.atr.jp/cbi/sparse_estimation/sato/VBSR.html

# A03-3 研究項目の研究成果報告書

中村 公一
京都大学 大学院医学研究科

***Abstract*—本研究項目は，ニューロン発火活動の異常な同期振動によって本来の脳内身体表現が損なわれることの指標として，パーキンソン病モデルラットの脳に出現する，異常に亢進したβ振動（13-30 Hz）を「負の脳内身体表現マーカー」と位置づけて注目する．本研究項目は異常β振動の時間分布と空間分布を明らかにし，β振動と運動障害との因果関係を検証することを目ざす．今年度は，A. パーキンソン病モデルラット黒質網様部ニューロンの発火活動が示す異常β振動の時間的性質を明らかにし，B. 電気生理学データと解剖学データを統合するためのシステムを構築し，また C. 視床と黒質網様部の局所電場電位（LFP）におけるβ振動の性質を明らかにした．**

## I. はじめに

パーキンソン病患者の無動・寡動など随意運動障害は，脳内身体表現の異常である．ドーパミンの慢性的な欠乏により大脳基底核を中心とした脳内の筋シナジー制御器が異常を起こし，運動制御不全により無動・寡動を生じる．実際，サルのパーキンソン病モデルでは淡蒼球や視床運動核の体部位局在性が失われるなど，脳内身体表現の変容（slow dynamics）が知られる[1]．ドーパミン欠乏の結果，視床運動核が過剰抑制されて無動・寡動に陥るという「発火頻度モデル」が広く知られるが，このモデルの予測する平均発火頻度異常については矛盾する文献がとても多く，研究代表者自身のパーキンソン病モデルラットを用いた実験においても視床運動核の発火頻度低下や黒質網様部の発火頻度上昇は認められない．「発火頻度モデル」に代わり無動・寡動の症状を説明し得る生理現象が，パーキンソン病患者や動物モデルの皮質運動野や大脳基底核で異常に亢進するβ振動（beta oscillations, 13–30 Hz）である[2]．異常亢進したβ振動中には，ニューロンの過剰な同期発火による情報喪失のため，本来備わっていた筈の脳内身体表現が失われると考えられ，異常β振動は「負の脳内身体表現マーカー」として有用である．特に，β振動の伝播機構の理解のためには，基底核出力部（黒質網様部・淡蒼球内節）および，基底核出力を大脳皮質に伝える役割を担う視床における異常β振動の分布の解明が重要である．また脳内身体表現の変容機構の解明のためには，介入的にβ振動を制御して運動機能を回復させることで因果関係を検証することが重要である．

## II. 目的

本研究項目の具体的な目的は，「負の脳内身体表現マーカー」として，パーキンソン病の大脳皮質-大脳基底核-視床ループ回路に出現する異常β振動に着目し，パーキンソン病モデルラットを用いて，その時間的・空間的分布を明らかにするとともに，介入的手法に依って異常β振動と運動障害との間の因果関係を明らかにすることである．

## 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. パーキンソン病モデルラット黒質網様部の単一ニューロン活動における異常β振動の時間的性質の同定*

大脳基底核出力の主要投射先である視床運動核は，大脳基底核入力受容帯（BZ = VA 核，VM 核に相当）と小脳入力を受ける小脳入力受容帯（CZ = VL 核に相当する）に区分される[3]．研究項目開始までに，我々はパーキンソン病モデルラットにおいては，CZ ニューロンではなく， BZ ニューロンのみが異常亢進した異常β振動を示すという結果を既に得ていた．そこで視床運動核 BZ のβ振動に対する大脳基底核入力の影響を検討するため，大脳基底核出力部の黒質網様部ニューロンについても単一ニューロン活動の発火特性を調べた[4,5,6].

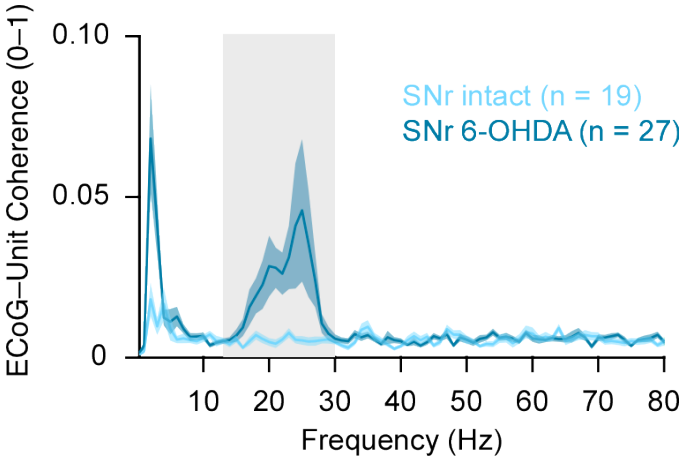



Fig. 1. 黒質網様部ニューロンのスパイク列と ECoG のコヒーレンスは異常β振動の存在を示す.

パーキンソン病モデルラットにおいて，視床 BZ ニューロンのスパイク列が顕著なβ振動のパワーを示すのとは対照的に，黒質網様部ニューロンのスパイク列のパワースペクトルには顕著なβ振動のパワーは認められない．しかし，皮質運動野の皮質脳波（ECoG）とβ周波数帯域でコヒーレントであることが分かった（Fig. 1）．さらにヒルベルト変換を用いた位相解析により，パーキンソン病モデルラット黒質網様部におけるβ振動は，統計的に有意な発火頻度の変動であるものの，視床 BZ のβ振動に比して，変動の幅がはるかに小さいことが分かった．これは，黒質網様部ニューロンは元来比較的高頻度（～25 Hz）で律動的かつ持続性の発火をする傾向があるためβ振動の影響が出にくいものと解釈される．

さらに，パーキンソン病モデルラット視床 BZ ニューロンは ECoG のβ振動の谷の直前に位相固定して発火確率が上がるのに対し，黒質網様部ニューロンは ECoG のβ振動の谷の直後に位相固定していた．β振動の位相に関して，黒質網様部と視床とがかなり（~280°）離れていることは，黒質-視床投射が抑制性であり，僅かとはいえ黒質網様部の発火確率が上がるとその直後は視床ニューロンが抑制されることを反映すると解釈される．

### *B. β振動分布地図作成システムの構築*

これまでに視床運動核の内部においては，異常β振動が BZ に局在し，CZ にはほとんど見つからないことが分かった．しかし，基底核入力を直接受ける視床核は，運動核 BZ の他にも MD 核，髄板内核後部（PF 核），髄板内核前部（CL 核，PC 核，CM 核）などがあり，それぞれが大脳皮質や線条体へ異なった様式で投射するため，大脳皮質-大脳基底核-視床ループ回路への影響が大きく異なる．よって視床全体の中における異常β振動の分布を運動核以外についても明らかにする必要がある．本年度はこの目的のために生理学データと解剖学データを統合するシステムの開発に注力した．すなわち，シリコンプローブで記録した多数の電気生理学データについて，プローブに DiI を塗布して行う蛍光染色と視床核の境界を同定するための GAD67, VGluT2, GlyT2 に対する免疫蛍光染色と組み合わせると，それぞれの記録部位の視床内の位置をかなりの精度で推定できる．生理学データと，解剖学的な位置座標データ，また同定された神経核名を統合することで，異常β振動の強度（スペクトルパワーもしくは ECoG とのコヒーレンス）を仮想的な標準の視床断面上にマッピングすることができる．このため，我々は記録部位の位置推定を行うグラフィックソフトウェアから書き出した EPS ファイルを解読して空間座標を取り出し，その情報を MATLAB の電気生理学データに取り込むためのシステムを Excel, Python と MATLAB の併用によって構築した．

### *C. 視床と黒質網様部の局所電場電位（LFP）におけるβ振動の解析*

活動電位が単一ニューロンの出力信号であるのに対して，局所電場電位（LFP）は局所のニューロン集団のシナプス後電位の重なりが観察されるものであり，近傍ニューロン集団への同期した入力信号の指標である．16 箇所の記録電極が並んだシリコンプローブを用いるとすべての電極から安定した LFP が記録でき，LFP はβ振動の脳内マッピングに適した信号であると考えられる．そこで視床運動核と黒質網様部から記録した LFP のパワースペクトルを調べたが，LFP におけるβ振動は単一ニューロンのスパイク列よりもパワーが小さい傾向にあった．また ECoG や視床・黒質網様部のスパイク列のパワースペクトルに見られたβ振動のピーク周波数が ~20 Hz であったのに対して，視床運動核 BZ と黒質網様部の LFP に見られるβ振動はどちらも ~15 Hz と，より低周波であった．さらに ECoG と LFP のコヒーレンススペクトルを調べると，視床 BZ や黒質網様部においてさえ，β振動はコントロール群と有意差がなかった．このように，視床や黒質網様部の LFP のβ振動の周波数は，ECoG や視床・黒質網様部のスパイク列のβ振動と異なっており，同期性も乏しいという以外な結果を得た．

## IV. おわりに

今年度は，パーキンソン病モデルラット黒質網様部におけるβ振動の時間的特性を明らかにした他，ラット生理学データの解析ツールの整備を行い，また LFP の解析に着手し別の角度から異常β振動の分布様式を明らかにすることが出来た．次年度以降は，今年度得られた成果を元にβ振動の視床内の空間分布を明らかにすることに加え，A01 班, A03 班と連携し，無麻酔覚醒化での記録装置の整備と介入的手法の確立を進める．

## REFERENCES


[1] A. Nambu. “Somatotopic organization of the primate basal ganglia.” Front Neuroanat 5, article 26, 2011

[2] J-S. Brittain, A. Sharott, P. Brown. The highs and lows of beta activity in cortico-basal ganglia loops. Eur J Neurosci 39(11), pp.1951–1959, 2014.

[3] K.C. Nakamura, A. Sharott, P.J. Magill “Temporal coupling with cortex distinguishes spontaneous neuronal activities in identified basal ganglia-recipient and cerebellar-recipient zones of the motor thalamus.” Cereb Cortex 24(1), pp.81–97, 2014

[4] 中村 公一, “パーキンソン病モデルラット視床運動核のニューロン活動異常: 発火頻度かパターンか”, 第 9 回 Motor Control 研究会サテライト国際シンポジウム神経オシレーションカンファレンス, 京都大学, 2015 年 6 月 25 日

[5] 中村 公一, “発火頻度かパターンか：パーキンソン病モデルラットにおける視床運動核ニューロンの発火異常を探る”, 第 30 回日本大脳基底核研究会, 名鉄犬山ホテル，2015 年 7 月 18 日

[6] 中村 公一, A. Sharrot, F. Vinciati, 田中 琢真, N. Mallet, and P.J. Magill, “パーキンソン病モデルラット視床運動核のニューロン活動異常”, 神戸国際会議場神経科学学会 2015 年 7 月 30 日

# A03-4 研究項目の研究成果報告

松本理器
京都大学大学院医学研究科てんかん・運動異常生理学

***Abstract*—The implantation of subdural electrode grids over the parieto-frontal area for the presurgical assessment of patients with partial epilepsy offers the rare opportunities to record neural activities with wide-band ECoG, and apply 50 Hz (cortical mapping) and 1 Hz (connectivity mapping) electrical stimulation to delineate the parieto-frontal network for praxis. The praxis-related area was localized in the anterior part of SMG, mostly in PF. Transient functional impairment (fast dynamics) was specific to the tool use pantomime. Within the praxis network (PMv-PF), functional differentiation was observed between the interconnected PMv (negative motor response) and PF.**

## I. はじめに

難治部分てんかんの外科治療には、てんかん焦点の切除と同時に焦点周囲の脳機能の温存が大切であり、病態による機能可塑性を加味した包括的な脳機能マッピングが必要となる。てんかん焦点が機能野近傍に位置する場合や非侵襲的検索では焦点の同定が難しい場合、硬膜下電極の慢性留置による侵襲的術前評価を施行する。硬膜下電極を用いた臨床脳機能マッピングには、課題遂行中の脳活動計測（事象関連電位や高ガンマ活動計測）と高頻度皮質電気刺激が用いられる[1]。疾病（病巣）研究では、一般に slow dynamics による脳機能可塑性（代償機構）がみられた慢性期での評価となる。一方、皮質電気刺激の手法では、刺激介入による効果は一過性（〜5秒）で限局性（1x1~2 cm）であり、代償機転を伴わない fast dynamics による障害（変容）を評価する。特定の高次脳機能の課題遂行中に、急性介入することで、遂行に「必要」な皮質を同定することができる。この観点から、脳機能外科における脳機能マッピングの中核検査として位置づけられている。

脳疾病による脳内身体表現の障害後の slow dynamics による適応メカニズムの解明のためには、正常状態の脳内身体表現マーカー同定および急性刺激介入時の代償を伴わない身体認知・運動制御の変容の理解が欠かせない。本研究計画では、臨床神経学へのフィードバックを視野にいれて、複合的に脳活動計測と介入を用いて、前頭葉・頭頂葉連合野における脳内身体表現の神経機構とその変容の解明を目指す。

## II. 目的

本研究計画は、てんかん外科の術前評価のために前頭・頭頂葉に硬膜下電極を慢性留置した患者で同意を得られた者を対象とする（京大医の倫理委員会 C533, 443）。てんかん外科の術前評価目的に記録する皮質脳波(ECoG)データから、直接の脳表記録で得られる優れた時間･空間分解能で、道具使用・到達把持運動・巧緻運動にかかわる各種皮質活動を探索する。電気的線維追跡法である皮質皮質間誘発電位（cortico-cortical evoked potential: CCEP）の手法[2]を用いて、前頭葉・頭頂葉間の皮質間結合を明らかにし、これらの領域間の機能的結合様式から同定された中核ネットワークを同定する。中核ネットワークでの活動様式に基づき、道具使用・到達把持運動にかかわる脳内身体表現マーカー候補を同定する。次に、道具使用・到達把持運動・巧緻運動課題中に、高頻度皮質電気刺激の手法で中核前頭・頭頂葉ネットワーク（単一領野ないし複数領野）に介入を行い、各領域およびネットワークレベルの代償のともなわない身体認知・運動制御の変容様式 (fast dynamics)を明らかにする。

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に４つ挙げ，それぞれ概要を説明する.

### *A.* 道具使用にかかわる左前頭葉・頭頂葉ネットワークの同定、fast dynamics による変容の解明

てんかん焦点摘出術の術前評価のために、言語優位半球（左）の外側前頭葉・頭頂葉に電極留置した 5 例の難治部分てんかんを対象とした。臨床脳機能マッピングで行う定性的な高頻度皮質電気刺激の手法(50 Hz, 5sec, 10-15mA)を用いて、下頭頂葉に留置した硬膜下電極から、道具使用マントパイム課題中に刺激介入し、課題遂行障害の有無を検討した。下頭頂葉に留置した全 54 電極のうち、12 電極で道具使用パントマイムの課題遂行障害が刺激中に出現した。道具名や使用方法は理解できているが、実際の動作が遂行できなくなる、という内省であり、道具使用の企図・遂行障害と考えられた。一方、道具使用パントマイムの遂行障害がみられた電極では、道具の呼称、実際の道具使用、親指と人差し指の反復運動、到達運動、精密把持運動、手のジェスチャーは刺激介入による障害はみられなかった。解剖的には、縁上回前方領域に全電極が集族し、Jülich cytoarchitectonic atlas の PF 野にほぼ合致した。低頻度皮質電気刺激(1 Hz)を用いた

電気的線維追跡法(CCEP)により、4 例では同部位は腹側前頭前野（中心前溝周囲）と結合し、道具使用にかかわる行為関連ネットワークを形成していた。腹側運動前野の高頻度皮質電気刺激の症状は、頭頂葉と異なり、親指と人差し指の反復運動が停止するといった陰性運動反応がみられ、行為関連ネットワーク内の腹側運動前野と下頭頂小葉の 2 領域で機能的相違が示された。なお、行為ネットワーク関連の皮質間結合は、弓状束が担う背側言語経路（CCEP を用いた術中モニタリングの結果からは、より前方の前頭回三角部・弁蓋部とより腹側の後部上・中側頭回[3]）とは異なり、確率論的 MRI トラクトグラフィーの検討からは上縦束第 3 枝(SLF III)を介していた[4]。

今年度後半から、これらの高次運動課題下の脳活動（広帯域脳律動）の計測をはじめ、低頻度（ネットワーク）・高頻度（fast dynamics）皮質刺激の結果との照合から、行為の企図・遂行にかかわる脳内身体表現マーカーの同定に着手した。また、本年度導入した 3 次元モーションキャプチャーシステムを用いて、介入時の運動制御の変容（fast dynamics）の定量的評価を開始した。

### *B.* 背側頭頂葉・前頭葉の機能的結合地図の作成

外側頭頂・前頭葉ネットワークは、種々の感覚情報の運動出力系への変換や空間性注意に重要で、その障害により種々の失行、注意障害、身体失認が出現する。進化の過程においてヒトで発達した前頭葉・頭頂葉連合野（Brodmann 39,40 野など）では、サルの侵襲的トレーサー研究の知見との直接の比較が困難となる。研究代表者らは、てんかん外科の術前評価のために留置した硬膜下電極からの単発皮質電気刺激を用いて、cortico-cortical propagation と判断される短潜時の誘発電位（CCEP）を隣接・遠隔皮質から記録することにより、皮質領野間のネットワークを機能的に同定する手法を報告し、臨床応用してきた[2, 5]。頭頂葉・前頭葉の皮質間結合については、腹側領域を中心に機能的結合地図を報告してきた[6]。本研究計画では、これまで検討が十分になされていなかった、背側領域（外側・内側）の頭頂葉・前頭葉の皮質間結合について探索に着手した。上頭頂小葉は、頭頂葉内側域（楔前部・後部帯状回）と双方向性の皮質間結合を有し、中心前回（背側部中心）と背側運動前野と結合していた [7]。

### *C.* 身体・自己認識にかかわる右前頭葉・頭頂葉ネットワーク、fast dynamics による変容の解明

研究計画班 A02-1 の内藤栄一先生と共同研究を開始し、研究報告Ａと同様の手法（ECoG からの広帯域脳律動計測・解析、高頻度刺激による急性介入）を用いて、身体・自己認識にかかわる右前頭葉・頭頂葉ネットワーク、脳内表現マーカーの同定、fast dynamics による変容の解明に着手した。

### *D.* 運動主体感の代償機転の解明：脳病態・脳切除における fast から slow dynamics への遷移の検討

連携研究者の本学脳神経外科の國枝武治先生との密な連携のもと、研究計画班 A01-1 の今水寛先生、大木紫先生、前田貴記先生との共同研究を開始した。脳腫瘍などの脳外科手術で右側頭葉・頭頂葉接合部の切除予定の患者を対象に、手術前後に運動主体感を定量的に計測し、術後の運動主体感の変容（代償機転）を、急性期(fast dynamics)から亜急性期（slow dynamics）への遷移に焦点をあてて明らかにする予定である。

## IV. おわりに

本年度は、高・低頻度の皮質電気刺激研究から、道具使用にかかわる左前頭葉・頭頂葉ネットワークを同定し、fast dynamics による変容を明らかにした。皮質皮質間誘発電位(CCEP)を用いて、脳内身体表現の礎となる、背側前頭葉・頭頂葉間の皮質間結合を同定した。次年度は、臨床神経科学（術前脳機能評価や術後代償機転解明）への feedback を視野に入れ、

１）3 次元モーションキャプチャーを用いた、急性介入による行為ネットワークの fast dynamics による変容の定量的評価

２）対象症例を蓄積し、低頻度（ネットワーク）・高頻度皮質刺激（fast dynamics）の結果との照合から、道具使用をはじめとした様々な行為にかかわる脳内身体表現マーカーの同定、を推し進め、

３）A01-1, A02-1 班と連携を密にとり、右前頭葉・頭頂葉ネットワークが担う脳内身体表現マーカーの同定、fast dynamics および slow dynamics への遷移に焦点をあてて、共同研究を推進する。

## References


[1] Shimotake A, Matsumoto R, Ueno T, Kunieda T, et al. Direct exploration of the role of the ventral anterior temporal lobe in semantic memory: Cortical stimulation and local field potential evidence from subdural grid electrodes. Cereb Cortex 25:3802-17, 2015

[2] Matsumoto R, Nair DR, LaPresto E, et al. Functional connectivity in the human language system: a cortico-cortical evoked potential study. Brain 127:2316-30, 2004.

[3] Yamao Y, Suzuki K, Kunieda Y, Matsumoto R, et al. Clinical impact of intraoperative CCEP monitoring in evaluating the dorsal language white matter pathway. *under revision*

[4] Shimotake A, Matsumoto R, Kobayashi K et al. , Functional mapping of praxis network: Electrical cortical stimulation study, 56th annual meeting of Japan Society for Neurology, 2015

[5] Yamao Y, Matsumoto R, Kunieda T, et al. Intraoperative dorsal language network mapping by using single-pulse electrical stimulation. Hum Brain Mapp, 35:4345-4361, 2014.

[6] Matsumoto R, Nair DR, Ikeda A, et al. Parieto-frontal network in humans studied by cortico-cortical evoked potential. Hum Brain Mapp 33:2856-2872, 2012

[7] 十河正弥、松本理器、武山博文ら. ヒト内側頭頂葉の機能的結合性：皮質−皮質間誘発電位を用いた検討. 第 45 回日本臨床神経生理学会学術大会, 2015

# A03-5 感覚神経損傷による脳内身体表現の変容動態の可視化と制御

尾崎　弘展、　植田　禎史、　宮田　麻理子
東京女子医科大学　医学部　第一生理学講座

***Abstract*—末梢神経損傷は脳内神経回路の改編をもたらす。最近、我々は末梢神経切断により、視床ヒゲ感覚領域 (V2 VPm 核)における上行性支配様式が複数化すること、さらにその変化が 1 週間以内という時間軸で起こることを明らかにした[Takeuchi Y. *et al.* (2012) J Neurosci 32: 6917]。本研究では、ヒゲ感覚領域の内側毛体線維のみを蛍光タンパクで標識した遺伝子改変マウスを作成することにより、ヒゲ感覚神経 (V2) 損傷により新たに動員された神経線維が三叉神経核のヒゲ以外の領域や後索核といった部位に起因することを明らかにした。さらに神経損傷により V2 VPm 核の神経細胞が下顎領域 (V3) や背部に受容野を持つように変化することを発見した[Takeuchi Y. *et al.* submitted]。また、神経損傷群では、VPm 核の神経細胞の活動様式がよりバースト様になっていることも明らかにした。これらの結果から、末梢神経損傷は視床レベルで大規模な体部位情報の改編と神経細胞をバースト様に活動させることが分かった。**

## I. はじめに

末梢神経を損傷すると、大脳皮質レベルでの大規模な受容野改編が起こる。この受容野改編が幻肢痛などの脳内基盤とされており、この改編機構の解明は幻肢痛のメカニズムの理解に必要である。一方で、近年再生医療技術の進歩により、末梢感覚器を再生する試みが広く行われるようになり、残存中枢神経の受容野変容動態の理解は、期待される治療効果の予測に直結する重要な課題となっている。しかし従来は、末梢神経損傷後に入力が遮断された神経経路を選択的に観察する方法が無く、損傷神経から入力を受けていた感覚系大脳皮質の受容野変容動態を調べることは出来なかった。

## II. 目的

本研究では、神経損傷をした上行性線維（内側毛帯）を特異的に蛍光タンパクでラベルした遺伝子改変マウスを確立し、その線維のリモデリングを見る事で、身体変容様式を明らかにすることを目的とする。とりわけ、視床に入る内側毛帯の内、損傷神経経路を選択的に刺激することで大脳皮質レベルでの賦活化領域を可視化し、身体表現の変容動態を解明する。さらに損傷神経経路選択的な刺激を脳波と同期させることで、変容動態を制御することを試みる。

## III. 研究成果

### *A.* 遺伝子改変マウスを用いた特定体部位情報の可視化

我々は遺伝子改変マウスを作成し、三叉神経主知覚核の神経細胞の内、ヒゲ領域のみを選択的に可視化することに成功した。さらに、このマウスでは内側毛体線維、および視床 VPm 核での軸索終末もヒゲ領域が選択的に蛍光タンパク(td Tomato)で可視化されており、特定の体部位情報を形態学的に明らかにすることが可能となった。

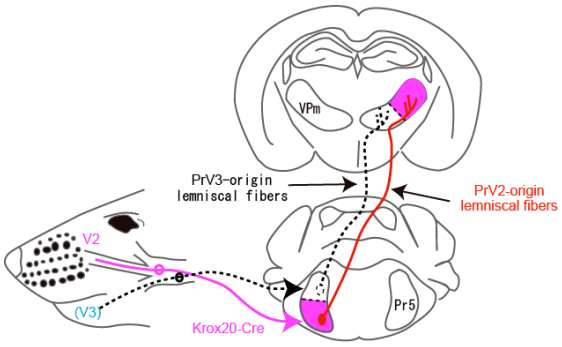



図 1. 三叉神経第二枝 (V2) 領域の神経経路（マゼンタ）と第三枝 (V3) 領域の神経経路（黒点線）の模式図

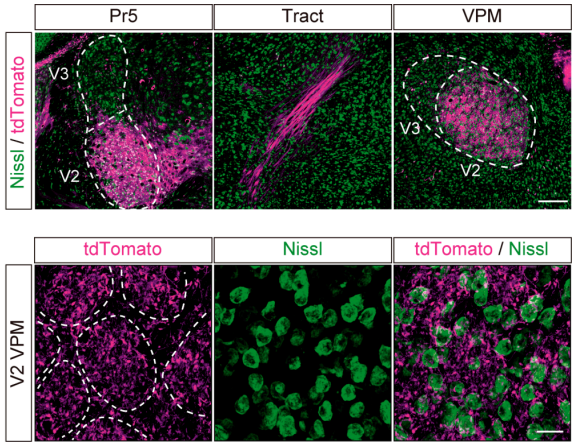



図 2. 三叉神経主知覚核(Pr5)、内側毛帯線維(Tract)、視床(VPM)で第二枝(V2)領域選択的に tdTomato（マゼンタ）でラベルされた組織（上段）。VPM 拡大図（下段）。

*B.* 神経損傷後のマウス視床 VPm 核における体部位情報再構築の可視化

次に、我々は三叉神経ヒゲ領域 (V2)の切断により三叉神経主知覚核ヒゲ領域(PrV2)由来の内側毛体線維が退縮し、PrV2 以外の領域由来の線維が入り込むことを発見した。また、逆行性色素(CTB)を V2 VPm 核領域に注入し、下顎領域 (V3) の三叉神経核や後索核由来の投射が存在することを明らかにした。

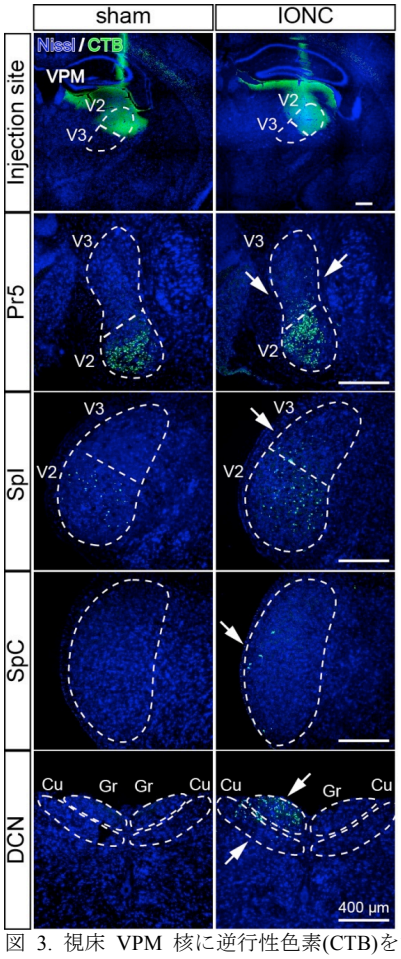



図 3. 視床 VPM 核に逆行性色素(CTB)を注入し、投射元を可視化した。コントロール群(sham)では V2 領域に限局していたが、神経損傷群(IONC)では、V3 領域の三叉神経核や後索核からの投射を受けるように変化していた。IONC: 眼窩下神経(ヒゲ感覚神経)切断. Pr5: PrV, SpI: spinothalamic interpolaris, SpC: spinal trigeminal nucleus caudalis, DCN: dorsal column nuclei.

*C.* 神経損傷後における、ヒゲ領域 VPm 核神経細胞の受容野再構築

続いて我々は *in vivo* 実験によってヒゲ感覚入力が遮断された視床 V2 VPm 核の神経細胞の受容野を計測した。その結果、V2 VPm 核の神経細胞は V2 領域以外の体部位である下顎や背部に受容野を持つように変化しており、*B* 項で示した形態学の結果と一致していた。一方で、ヒゲ感覚入力を遮断していない動物（コントロール群）では正常と同じく、受容野は V2 領域に限局していた。さらに、神経切断を行った群の VPm 核の神経細胞はコントロール群に比べ、バースト様発火を起こしやすくなっていた。

## IV. おわりに

まず我々は神経損傷が脳内身体表現の変容を引き起こすことを視床において明らかにした。今後は、視床－大脳皮質間結合などのより高次回路においてどのような変容が起こっているのかを明らかにする。そのために現在、我々は新たな２つの手法を導入している。１つ目は内因性シグナルを用いた光学イメージング技術で、これにより大脳皮質の体部位マップを可視化できるようになった。２つ目は、新たな遺伝子改変マウスで、光遺伝学的手法を用いて、ヒゲ感覚領域由来の内側毛帯線維にのみ選択的にチャネルロドプシン (ChR2)を発現させた。これらの技術により損傷ネットワークのみを選択的に賦活化し、損傷神経から入力を受けていた感覚系大脳皮質の受容野変容動態を可視化することを目指している。また、体部位情報に関わるバイオマーカーを明らかにするため、変容の分子機構の解明にも挑戦する。

## REFERENCES

[1] Takeuchi Y., Yamasaki M., Nagumo Y., Imoto K., Watanabe M., Miyata M. (2012) Rewiring of afferent fibers in the somatosensory thalamus of mice caused by peripheral sensory nerve transection. J Neurosci 32: 6917-6930.

[2] Takeuchi Y., Osaki H., Yagasaki Y., Katayama Y., Miyata M. Afferent fiber remodeling in the somatosensory thalamus of mice as a neural basis of somatotopic reorganization in the brain and ectopic mechanical hypersensitivity after peripheral sensory nerve injury. Submitted.

# A03-6 研究項目の研究成果報告

吉田 正俊
生理学研究所・認知行動発達研究部門

## I. はじめに

半側空間無視とは、主に右大脳半球の損傷によって引き起こされる、損傷と反対側の空間の感覚刺激に対する反応が欠如・低下する現象のことを指す。半側空間無視は感覚障害や運動障害によっては説明できない認知的障害である。近年のヒト患者での機能イメージングなどによる知見の蓄積から、半側空間無視は脳の限局した部分の障害というよりは、注意の背側・腹側ネットワークの失調であると考えられるようになってきた[1]。

## II. 目的

半側空間無視の脳内メカニズムの解明のためには動物モデルの開発が重要であるにもかかわらず、半側空間無視の動物モデルはまだ確立していない。近年の解剖学や機能イメージングの研究からは、マカクザルにも注意の背側経路と腹側経路に相同な神経ネットワークがあることが示唆されている[2], [3]。そこで本研究は以下を目的とする：1) マカクザルでの背側注意経路、または背側注意経路の相同部位を損傷させた前後の行動を定量化することによって半側空間無視の動物モデルを確立する。2) 視線計測と頭部のトラッキングを用いて、半側空間無視のモデル動物で網膜中心座標、頭部中心座標での処理がどのように影響を受けているかを解明する。3) そして機能的 MR イメージング法を用いて、半側空間無視の症状と機能回復過程がどのような脳内ネットワークの機能障害と関連しているかを神経生理学的に明らかにする。

## III. 研究成果

### *A. 注意経路への損傷による半側空間無視モデルの作成*

研究代表者らのグループは，本年度は 2 頭のサルで注意の腹側ネットワークの一部であると考えられている、右上側頭回(superior temporal gyrus: STG)へ損傷を加えて、注意機能への影響を定量化した。

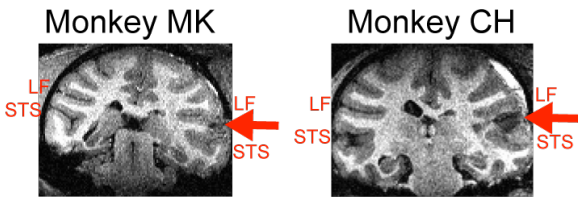



Fig. 1. 2 頭のサルでの損傷部位での MR 構造画像。撮影機器: Siemens Allegra 3T, 撮像シーケンス: MPRAGE3D; 解像度: 0.5mm * 0.5mm * 0.5mm voxel。LF: lateral fissure, STS: superior temporal sulcus

2 頭のニホンザル(monkey MK, male, 体重 8.2kg; monkey CH, male, 体重 7.2kg)を使用した。行動課題(後述)のトレーニング後、イソフルレン麻酔下で右上側頭回を吸引除去した。損傷範囲は、後端が MT 野を含まない、前端が第一次聴覚野を含まないようにした。損傷後 1 週間後に撮影した MR 構造画像では、狙った範囲に損傷が限局されていた(Fig.1)。

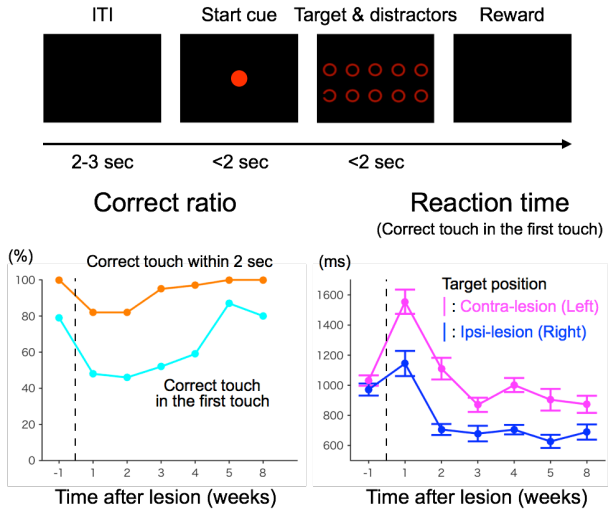



Fig. 2. Monkey MK での行動評価の結果。(上) Target-choice task の課題シークエンス。左側が欠けた円弧がターゲット。(下) 行動成績。正答率(左)および反応潜時(右)を計測して損傷前後の時期ごとにプロット。

行動評価としてはヒト半側空間無視患者のテストで用いられる線分抹消課題を動物用にアレンジした target-choice task を用いた(Fig.2)。動物は頭部無拘束条件下で、複数のターゲットの中から報酬と結びついたアイテムを選択する。Target-choice task において Monkey MK の正答率は損傷後 1-2 週間後までは低下したが、それ以降は術前と同じレベルに戻った。一方、応答潜時は損傷部位とは反対側(画面の左半分)に報酬と結び付けられたターゲットが提示された場合(Fig.2 下右のマゼンタ線)、同側に提示された場合(青線)と比べて有意に延長していた。Monkey CH においても損傷後に同様な成績低下が見られている(実験継続中)。以上のことは右上側頭回損傷後 2 ヶ月にわたって空間無視の症状が持続していることを示唆している。

### *B. 視線計測と頭部のトラッキング*

研究代表者らのグループは、同じ動物において視線計測と頭部のトラッキングを行った。半側空間無視患者

ではディスプレー上の画像や動画を見ているときの視線位置が損傷側と同側に偏位することが知られている[4]。これが損傷動物でも再現されるかどうか検証した。視線計測と頭部のトラッキングには Tobii 社のアイトラッカーTX300 を用いた。この機器は頭部無拘束下で視線位置(眼がどこを見ているか)と眼球位置(空間上での眼球位置、つまり頭部の回転、移動を反映)を 300Hz のサンプリングレートで計測することができる。

サルはフリービューイング課題を行った。この課題においてサルはモンキーチェアに座り、ディスプレー上に静止画が提示され、頭部無拘束下で視線と眼球位置を計測した。サルが画面を見ているあいだに報酬のジュースを適宜与えることで、画面を見ることを強化したが、画面中の特定のアイテムを見るような訓練を行っていない。ディスプレーの左右半分ずつでの視線位置の滞在時間を計測し、損傷前後での変動をプロットした(Fig,3 左)。その結果、Monkey MK では損傷後 1-2 週間で視線位置が損傷側と同側に偏位することを見出した(Fig,3 右)。Monkey CH においても損傷後に同様な偏位が見られている(実験継続中)。

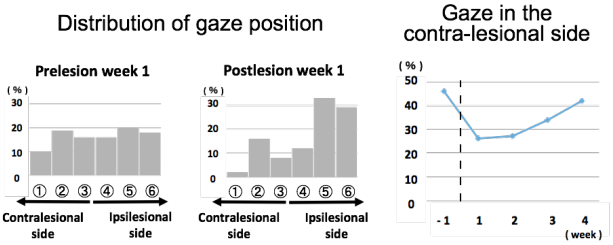



Fig. 3. Monkey MK での視線計測の結果。(左) 画面上での視線位置の分布。(右) 視線が損傷と反対側(左)に位置する時間の比率を損傷前後の時期ごとにプロット。

以上のことは右上側頭回損傷によって眼球運動においても無視症状が見られることを示唆している。このことは行動評価として手を用いた課題(結果 A)と眼球運動を用いた課題(結果 B)とで同様な傾向が見られることから、損傷の効果が効果器に依存する運動障害ではなく、注意障害であることを示唆している。また、結果 A,B ともに頭部無拘束下での評価で損傷の影響が見られることから、視野欠損などの一次的知覚への障害で説明することは出来ない。頭部のトラッキングのデータの予備的解析からは、視線位置だけでなく頭部位置でも損傷側と同側への偏位が起こっていることを見出している。

### *C. 機能的 MR イメージング法による検討*

研究代表者らのグループは、連携研究者である生理学研究所・心理生理部門 福永雅喜准教授とともに、機能的 MR イメージング法を用いて半側空間無視モデル動物の安静時脳活動(resting-state fMRI, rsfMRI)を計測した。1%イソフルレン麻酔下[5]でエコープラナー法(EPI)によって BOLD 活動を記録した。注意ネットワークの機能的結合を定量化するため、前頭眼野(frontal eye field, FEF)に seed を置いて、他の脳部位での BOLD 活動の時間的変動との相関を計算した。

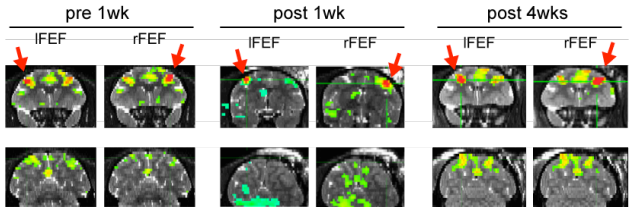



Fig. 4. Monkey MK での rsfMRI の結果。上段は FEF での seed (赤矢印) を含む coronal 面、下段は LIP を含む coronal 面での相関を色で示している。Post 1week のみ色表示の閾値を下げている。時間解像度: TR=2000ms; 空間解像度: 1.25mm * 1.25mm * 1.60mm。

その結果、損傷前には FEF と頭頂連合野に属する LIP 野(lateral intraparietal area)との間の相関(Fig.4 左)、そして FEF と上側頭回との間の相関が見られた。前者は注意の背側経路、後者は注意の腹側経路に対応した機能的結合を反映していると考えられる。FEF と LIP の BOLD 活動の相関は損傷後 1 週間では低下したが、損傷後 4 週間でふたたび高い相関が見られるようになった(Fig.4 中右)。以上のことは、注意の腹側経路の一部(右上側頭回)の損傷によって、注意の背側経路での機能結合の変化が起きていることを示唆している。

## IV. おわりに

注意の腹側経路の一部(右上側頭回)の損傷によって、重篤な無視症状が 1-2 週間程度持続し、さらに軽度な無視症状は 2 ヶ月以上持続していた。これらの症状の発現および回復と並行して注意の背側経路での機能結合の低下と回復が起きていることが明らかになった。次年度以降にはさらに多くの個体で結果の再現性を確認するとともに、視線と頭部トラッキングのデータの解析から身体図式に対する影響のモデリングを目指し、またそれと脳機能イメージングでの知見との関連付けを進めてゆく。

## REFERENCES


[1] M. Corbetta and G. L. Shulman, “Spatial neglect and attention networks.,” *Annu. Rev. Neurosci.*, vol. 34, pp. 569–599, 2011.

[2] J. D. Schmahmann, D. N. Pandya, R. Wang, G. Dai, H. E. D'Arceuil, A. J. de Crespigny, and V. J. Wedeen, “Association fibre pathways of the brain: parallel observations from diffusion spectrum imaging and autoradiography,” *Brain*, vol. 130, no. 3, pp. 630–653, Mar. 2007.

[3] D. Mantini, M. Corbetta, G. L. Romani, G. A. Orban, and W. Vanduffel, “Evolutionarily Novel Functional Networks in the Human Brain?,” *J Neurosci*, vol. 33, no. 8, pp. 3259–3275, Feb. 2013.

[4] H.-O. Karnath and C. Rorden, “The anatomy of spatial neglect.,” *Neuropsychologia*, vol. 50, no. 6, pp. 1010–1017, May 2012.

[5] R. M. Hutchison, M. Hutchison, K. Y. Manning, R. S. Menon, and S. Everling, “Isoflurane induces dose-dependent alterations in the cortical connectivity profiles and dynamic properties of the brain's functional architecture.,” *Hum. Brain Mapp.*, vol. 35, no. 12, pp. 5754–5775, Dec. 2014.

# A03-7 研究項目の研究成果報告

村田　弓
産業技術総合研究所人間情報研究部門

***Abstract*— We have investigated the mechanisms of functional recovery using a monkey model of cortical lesion, in which a focal lesion is induced in the primary motor cortex (M1). Brain imaging of M1-lesioned monkeys using positron emission tomography revealed overactivity of the PMv during the recovery period. The causal role in motor recovery was confirmed by means of pharmacological inactivation by muscimol, indicating that the remaining cortical area compensates for the motor deficit caused by the M1 lesion. This functional reorganization may be based on axonal and synaptic reorganization as indicated by the increased gene expression of growth-associated protein-43 in PMv. Moreover, as the first step to understand functional recovery mechanisms in a clinically more relevant model, we induce a focal stroke in the internal capsule, an area susceptible in human stroke patients. Gross movement such as reaching and power gripping improved, whereas impairment of dexterous hand movements remained until 3 months after stroke induction. The result is in contrast to that observed in our M1-lesion model, in which drastic recovery of dexterous movements was observed during the first month, suggesting that the compensatory mechanism after internal capsule stroke is different from that after cortical lesion.**

## I. はじめに

脳損傷後の機能回復の背景には神経回路の可塑的変化による代償機能が関わっていると考えられるが、メカニズムの理解は不十分である．私達は脳損傷後に行うリハビリテーション訓練（リハビリ訓練）が脳に与える影響を明らかにすることを目的として研究を行っている。これまでに、ヒトと脳や筋骨格構造が近いサルをモデル動物として、第一次運動野損傷後の回復過程を調べてきた。これまでの研究で、ヒトや一部のサルにしかできない、母指と人差し指の先端で把握する「精密把握（Precision grip）」の回復が、損傷後のリハビリ訓練によって促進することを明らかにした[1]。

## II. 目的

本研究項目の具体的な目的は、サルを用いた「第一次運動皮質損傷モデル」を対象に、第一次運動野損傷後の把握動作回復の背景にある脳活動および遺伝子発現変化を解明することである。さらに、より臨床に近い「脳卒中サルモデル」を確立し、このモデルを用いて脳損傷後の機能回復に関わる脳領域を明らかにする。

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に２つ挙げ，それぞれ概要を説明する．

*A.* 皮質損傷動物モデルによる把握機能回復に関わる神経機能の変化の解明．

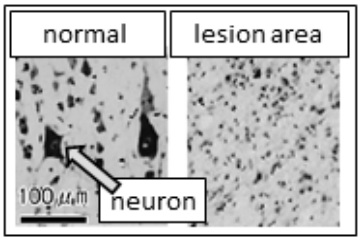



Fig. 1. The normal intact and lesion areas of the primary motor cortex

研究代表者らのグループは、「第一次運動皮質損傷モデル」を用いて、損傷後の精密把握の回復の背景にある脳活動および遺伝子発現変化を検証した。

運動出力に重要な役割を持つ大脳皮質第一次運動野に神経毒を注入して神経細胞を破壊し、人工的に不可逆的な損傷を作成した。具体的には、第一次運動野の中の手指を支配する領域を、神経細胞に弱い電気刺激を与えて筋活動を誘発する皮質内微小電気刺激法（ＩＣＭＳ）を用いて特定した。次に、特定した一次運動野の手指領域に、神経毒であるイボテン酸を注入して神経細胞を不可逆的に破壊した。イボテン酸を注入した脳領域は、神経細胞が失われ、グリア細胞の増殖が認められた(Fig.1)。

損傷による機能の変化と回復の経過を調べるために、把握の遂行に着目して運動機能評価を行った。第一次運動野損傷後は対側上肢の手指に弛緩麻痺が生じ、把握動作が困難となった。損傷後約 1 か月間の把握訓練期間を経て、精密把握を含む手の巧緻動作の回復が見られた。

次に、ＰＥＴ（陽電子放出断層撮影法）を用いて、精密把握を行っている時の脳活動を計測し、第一次運動野（Ｍ１）の損傷前と。損傷後に把握動作が回復した時期における脳活動の変化を検証した。撮影には動物用高解像度ＰＥＴ測定装置ＳＨＲ－７７００（浜松ホトニクス）を使用した。脳活動計測の結果、損傷前と比べて、損傷半球の運動前野腹側部（ＰＭｖ）の活動が上昇する

傾向が認められた（Fig.2）[2]。神経活動を抑制するムシモールを用いてこの領域の活動を抑制したところ、損傷後の把握動作回復時に抑制した場合には把握動作に障害が生じることが明らかになった。このことから、把握動作回復の背景として、ＰＭｖによる損傷した領域の機能代償があることが明らかになった。また軸索の伸長に関わる GAP-43（growth-associated protein-43）遺伝子の発現がこの領域で上昇していたことから、機能代償を実現する過程において、軸索の伸長を含むニューロンの構造変化があると考えられる[3]。

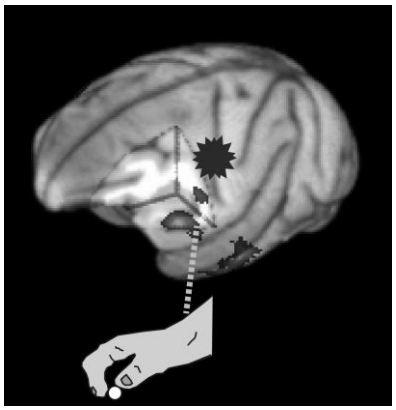


Fig. 2. A brain activity change that occurs during rehabilitative training-induced recovery in brain-lesioned monkeys.

*B.* 内包脳卒中動物モデルの構築

「第一次運動皮質損傷モデル」は特定の脳領域のニューロンを不可逆的に破壊するため、脳損傷後の機能回復メカニズムを理解するための実験系として優れている一方、臨床の病態とは乖離があることが指摘されていた。そこで、脳卒中の好発部位である内包後脚に局所的な脳梗塞を作成した動物モデルを確立し、回復過程を調べた(Fig.3)。

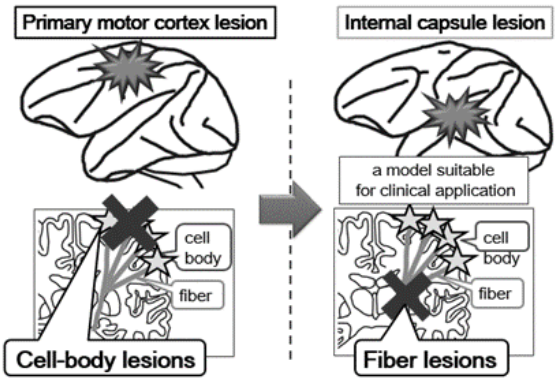



Fig. 3. The schema of two models.

第一次運動野の手領域からの下行路が通る内包後脚に血管収縮作用を持つ薬剤（Endothelin-1, 4198-v, Peptide Institute, Inc., 1.5 μg/μl, 15 tracks, 120 μl in total ） を投与し、局所的な微小梗塞を作成した。梗塞後、数ヵ月間にわたって把握動作の回復過程を調べるとともに、ＭＲＩ画像を用いて損傷部の体積の変化を調べ、把握動作と損傷領域範囲の関連を調べた。

損傷直後はつまみ動作を含む手の運動に障害がみられた。Ｔ２強調画像の高信号部位が内包後脚に認められたことから(Fig.4)、薬剤による梗塞の結果、浮腫などが生じて組織がダメージを受けていることが示唆された。ＭＲＩ画像の高信号部位は損傷後２週間から１ヵ月後には減少傾向を示したが、つまみ動作の使用頻度は回復しなかった。これらの結果から、画像上では確認できなくなっても、持続的な損傷が残存しており、協調した手の運動の遂行に影響を与えていることが推察された。

以上の結果、脳損傷後の機能回復のメカニズムや機能回復への運動訓練の影響を解明するために有益な、臨床に近い内包脳卒中動物モデルを確立できたと考える。

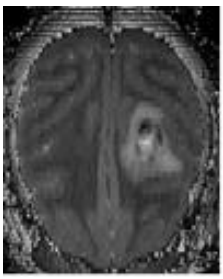


Fig. 4. A brain anatomical MRI after stroke in the internal capsule.

## IV. おわりに

本年度は皮質損傷動物モデルにおいて、把握機能の回復に関わる脳活動及び遺伝子発現の変化を明らかにした。また。臨床の病巣に近い内包脳卒中動物モデルの開発をおこなった。次年度は、２つの損傷モデルにおいて、機能回復と神経の変化の関連性について詳細に解析していく。

## REFERENCES

[1] Y. Murata, N. Higo, T. Oishi, A. Yamashita, K. Matsuda, M. Hayashi, S. Yamane, "Effects of motor training on the recovery of manual dexterity after primary motor cortex lesion in macaque monkeys", J Neurophysiol 99 2008, pp. 773-786.

[2] Y. Murata, N. Higo, T. Hayashi, Y. Nishimura, Y. Sugiyama, T. Oishi, H. Tsukada, T. Isa, H. Onoe, "Temporal plasticity involved in recovery from manual dexterity deficit after motor cortex lesion in macaque monkeys", J Neurosci 35 2015, pp. 84-95.

[3] Y. Murata, N. Higo, T. Oishi, T. Isa, "Increased expression of the growth-associated protein-43 gene after primary motor cortex lesion in macaque monkeys", Neurosci Res 98 2015, pp. 64-69.

うす緑の色紙はさむ

うす緑の色紙はさむ

# B 班（システム工学）の活動報告

太田　順
東京大学 人工物工学研究センター

## I. システム工学班の目的

システム工学班（B 班）では，感覚運動連関を表す fast dynamics に影響を受ける脳内身体表現の変容 slow dynamics の数理モデルの構成を目指している．B 班は以下の 3 つの研究項目から構成される（図 1）．

## II. 本年度の成果

以下項目毎に評価を行う．

B01 項目は，計画研究であり，身体認知からのアプローチを指向している．メンバー（研究代表者，研究分担者）は，淺間 一（東大．研究代表者），近藤 敏之（東農工大），田中 宏和（北陸先端大），矢野 史朗（東農工大），井澤 淳（筑波大）である．

本年度は，身体意識のモデル化に向け，多種感覚の呈示や注意が身体意識（身体保持感，運動主体感）に及ぼす影響を調査する心理実験を行った．また，運動企図・身体図式・身体意識を定量化する脳内身体表現マーカーの同定に向け，脳波特徴量（信号源推定，準備電位，事象関連脱同期）を検討した．さらに，運動野神経活動，統合失調症等の計算論モデル構築に取り組んだ．

B02 項目は，計画研究であり，運動制御からのアプローチを指向している．メンバーは，太田　順（東大．研究代表者），青井 伸也（京大），千葉 龍介（旭川医大）である．

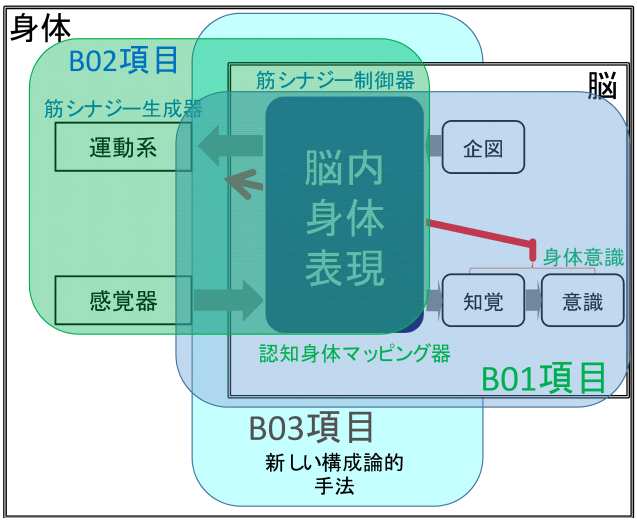



図 1　B 班内の各項目の位置づけ

本年度は，初年度に行った実験系の構築から、実験結果に基づく解析並びにモデル化を行った。姿勢制御の fast dynamics に対し、膝拘束による移動床面実験と筋骨格シミュレータを用いた姿勢制御モデルの構築を行った。また、歩行の fast, slow dynamics を提案し、2 足歩行ロボットとラットの筋骨格神経系モデルによる右分離型トレッドミル歩行実験での確認を行った。

B03 項目は，公募研究であり，新しい構成論的手法を指向している．本年度の成果を以下に示す．

B03-1（研究代表者：舩戸 徹郎(電通大)）では，ラットの動作解析を元に、脳内身体表現を反映すると考えられる筋シナジーの構成原理に迫った．(1)ラットの姿勢動作で重心に対応したシナジーの存在を示し，(2)ラットの歩行筋シナジーの解析、(3)疾患に伴う運動変化を表現できる姿勢制御モデルの構築を行った．

B03-2（研究代表者：長谷川 泰久(名大)）では，脳内身体表現を変容させる 3 自由度を有するロボット拇指を製作し，この拇指を操作する操作インタフェースを開発した．このロボット拇指およびインタフェースを用いて物体搬送作業を行い、視覚や接触力フィードバックの有無による作業性の変化を計測した．

B03-3（研究代表者：細田 耕(大阪大)）身体像の構成に関する，構成論的実験を行うための，筋骨格ロボットプラットフォームの試作を行った．また，身体像を構成するための脳型アーキテクチャに関する検討を行った．計画班との共同研究のための，マスタースレーブハンドの開発を行った．

B03-4（研究代表者：谷口 忠大(立命館大)）脳内身体表現スローダイナミクスを計算論的に表現するために，胎児のジェネラルムーブメントを模してランダムな動きをする多リンク系を考えた．この感覚情報より，身体構造のリンク数を推定するアルゴリズムを考案し，シミュレーションより有効性を示した．

## III. 現状理解

B 班の現状での成果をまとめると以下のようになる．

B01 項目は，身体認知に関わる身体意識のモデル化を行った．ラバーハンド実験等により，構造の推定（どの

パラメータが関連するか），定式化，実データとの関連付けを行った．

B02 項目は，姿勢制御，歩行に関する運動制御のモデル化を行った．多様な感覚入力や筋出力の重み付けやその変容を，筋シナジー，感覚フィードバックループを用いて行った．

B03 項目は，構成的アプローチによる，脳内身体表現の形成過程のモデル化，身体改変のモデル化を行った．

## IV. 班会議他

システム工学班では，以下に示す班会議を開催した．
日時：2015 年 11 月 24 日（火）10:00-12:00
会場：名古屋大学 VBL4 階セミナー室
出席者：班メンバー他，合計 19 名
内容：公募班研究者 3 名（舩戸，長谷川，荻原（谷口代理））による研究計画，進捗状況の報告および計画班と公募班の連携について総合討論を行った．

また，以下の学会でオーガナイズドセッションを企画し議論を進めた．
(1) 2015 年 3 月 15 日(日)，第 20 回ロボティクスシンポジア，発表 4 件
(2) 2015 年 7 月 28 日(火)，SICE Annual Conference，発表 6 件
(3) 2015 年 11 月 24 日(火)，IEEE MHS2015，発表 5 件
その他，研究項目単位ならびに他の研究項目と合同で小規模の会議を開催した．

## V. 今後の予定

今後も，定期的に班会議を開催し，計画班メンバー，公募班メンバー相互議論の場を設定する．これより，B 班の目指す目標を，班員全員が相互に連携しながら達成することを目指す．また，本年と同様に工学系の学会においてオーガナイズドセッションを開催し，対外発表を行う予定である．

B 班を構成する 3 項目は，slow dynamics を有する脳内身体表現を共有している．環境に働きかけ，slow dynamics を有する脳内身体表現を介して，環境および身体を認知する人間を表す数理モデル構築を目指す．身体認知と運動制御の関係に関する仮説的モデリング（A 班），モデルベーストリハビリテーションのためのモデル構築（C 班）という形で脳科学，リハビリテーション医学への貢献を図る．

# B01-1 研究項目の研究成果報告

淺間　一
東京大学 大学院工学系研究科

***Abstract*—Body consciousness such as sense of agency and sense of ownership is generated in real time based on the body representation in brain. This process can be called “fast dynamics.” On the other hand, the body representation is created, updated and transformed through perceptional and motion experience, which can be called “slow dynamics.” In this group, the these dynamics on the process creating and updating body representation in brain related to body consciousness are investigated and modelled mathematically.**

## I. はじめに

運動主体感や身体保持感などの身体意識は，脳内身体表現に基づき実時間で創出される(Fast dynamics)．一方，脳内身体表現は知覚運動経験を通してゆっくりと生成・更新され，変容する(Slow dynamics)．研究項目 B01 では，この身体意識に関する脳内身体表現の生成・更新のダイナミクスのモデル化を行う．

## II. 目的

本研究項目の具体的な目的は，身体意識の創出と脳内身体表現の変容の数理モデル化，認知身体マッピング器モデルの検証，およびモデルベーストリハビリテーションへの応用の検討である．

## III. 研究成果

図 1 に本研究における身体意識に基づく脳内身体表現の生成プロセスの概念と研究分担を示す．

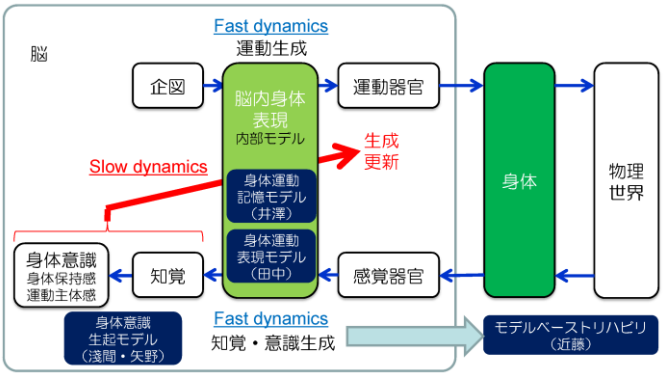



図 1　身体意識に基づく脳内身体表現の生成プロセス

本年度の具体的成果の概要を以下に記す．

### *A. 身体意識の生起モデル*

(1) スローダイナミクス発動に影響する身体意識の理解

研究代表者の淺間（東大）のグループは，身体意識が更新される際，高次な認知レベルのプロセスの役割，及び低次な感覚レベルのプロセスとの相互作用を調べた．その結果，動作目標と目標達成に関するフィードバックを比較する高次なプロセスは，運動指令に基づく予測と感覚フィードバックを比較する低次なプロセスと共に，運動主体感の生起を影響し[1, 2]，さらに，運動主体感を通じて身体図式の更新に影響することが分かった[3]．また，注意の負荷[4]や覚醒度[5]が変化すると，身体意識のこの 2 種類の下位プロセスの優位性も変化することが分かった．これらの成果は，身体意識の数理モデルの構築に及びパラメータの同定に重要な知見を提供した．

さらに，事象関連電位を用いて運動主体感の生起に関わる神経活動を調べた．その結果，動作を行う前に運動主体感に対する予期が弱い条件よりも，予期が強い条件において，動作の直前に見られる準備電位の立ち上がりが早く，振幅が大きいことがわかった[6]．

(2) 身体意識に基づく脳内身体表現変容のスローダイナミクスモデル

研究代表者の淺間（東大）のグループは，身体意識の生起に伴い，脳内身体モデルがゆっくりしたダイナミクスで変化する運動学モデルについて検討を行った．具体的には，腕のリーチングタスクにおいて，腕の長さ等が変化するダイナミクスとして記述することとした．

(3) 身体意識発現の確率論的モデル

研究分担者の矢野（東京農工大）のグループは，自己身体についての認識の仕方の理解と介入方法の探索を目指している．本年度は経験に伴う運動主体感の変化という現象を統計的学習の枠組みで捉え，運動主体感が予測分布の尤度に相当するという一般的枠組みを提案した．またこの枠組みから，運動主体感を計測する Keio Task を題材に仮説を導き検証した[7]．仮説は，被験者は確率的な時間遅れの平均時間遅れに最もよく運動主体感を感じるようになるというものであった．予測分布の更新はベイズ推定を仮定した．

加えて，観測数の少ない初期に汎化誤差の挙動が速くあるいは遅くなる条件について，理論的アイデアを提案した [8]．汎化誤差は予測分布と真の分布の離れ具合を評価する重要な量である．Keio Task においても学習が遅い被験者と早い被験者がいること，事前分布の分散が

小さいほど変化が遅いことを予測した．この予測は実証的に支持された [7, 8]．この理論的アイデアからは，学習の遅い被験者の学習を早める方策の示唆が得られ，運動学習を早めるといった応用が期待できる．

### *B. 身体運動の脳内表現モデル*

身体意識の理解には身体運動が脳内でどのように表現されているかの理解が不可欠である．研究分担者の田中（北陸先端科学技術大学院大学）は順モデルの入出力表現解明に向けて，他グループから提案されているモデルも含めて，運動野の計算論モデルの比較・検討を行った[9]．計算論モデルは（１）最適制御モデル，（２）ニューラルネットワークモデル，そして田中の提案する（３）空間表現モデルに大別できる．これらがどのような計算原理に基づくのか，またどのような運動野神経活動を説明するかを詳細に比較し，運動野の計算論モデルの課題を議論した．また，A02 筧グループと共同で，小脳皮質・小脳核神経活動と大脳・小脳ループにおけるダイナミクス計算のモデル化に関して議論した．

加えて，脳内の身体運動表現を調べるため，ヒト到達運動課題中の高密度脳波および身体運動の同時計測実験を行った [10]．被験者 19 名のデータを取得し，アーティファクト部分空間除去法・独立成分分析法・信号源推定法・因果的相互作用解析法といった信号解析法を適用し，脳内の信号源を同定した．その信号源が運動方向に関して選択性を持つこと（運動方向選択性），その選択性が異なる姿勢に応じて変化することを見出した．また脳波の時間的特性を活かし，運動課題中に運動方向選択性がどのように時間変化するかを，数百ミリ秒の時間スケールで明らかにすることができた．高密度脳波計測を用いて，非侵襲的にヒト脳内の運動表現や身体意識を探ることが可能であることを示した．

### *C. 身体運動の記憶モデル*

研究分担者の井澤（筑波大）は，運動記憶更新のファーストダイナミックスと，パラメータ調整に関わるメタ学習のスローダイナミックスを考慮した運動学習モデルを構築した[11]．この運動学習モデルに基づいて，脳の部位の変性が運動の機能障害を生み出すような運動機能障害モデルを構築することで，モデル規範型の診断方法を提案した[12]. さらに，これらモデルを発展させ機能回復モデルを構築した[13]．ドーパミン駆動型の行動選択（ファーストダイナミックス）と脳内身体表現の再構築（スローダイナミックス）の２つのダイナミクスのバランスを調整することが，安定した機能回復にとって重要であることを明らかにした．

### *D. モデルベーストリハビリテーション*

研究分担者の近藤（東京農工大学）らのグループは，身体保持感ならびに運動主体感を定量化する脳内身体表現マーカー（特に脳波特徴量）の探索と，それらが運動学習に及ぼす影響のモデル化を目指している．本年度は，（1）受動的な上肢運動経験が身体図式の変容に及ぼす影響の分析[14]，（2）RHI 課題下の脳血流動態データの機能的結合解析による身体保持感の定量化[15]，および（3）没入型 VR 映像呈示システムの開発とその身体意識への影響分析に取り組んだ．

（1）では，視覚運動回転変換課題を対象とし，能動的／受動的な到達運動経験の前後で，自己受容感覚に基づく手先推定位置（身体図式）の変化を心理測定関数で評価した．その結果，手先の身体図式は随意性の有無によらず摂動を補償する方向に一定量変化することを確認した．（2）では，RHI 実験下で計測した NIRS データについて，同期／非同期の刺激条件ごとにチャネル間の Granger Causality 解析を行った．身体保持感を自覚する期間に右前頭前野から右腹側運動前野に向けた因果的結合が有意に増加することを確認した．（3）では，没入型 VR システムを用いて把持運動映像を観察しながら運動想起を行わせることが，運動主体感，身体保持感を有意に向上させることを示した．

## IV. おわりに

本年度は，身体意識に基づく脳内身体表現の生成プロセス（Slow Dynamics）のモデル化とそれに基づくリハビリテーションについて研究を実施した．次年度以降は，A01 班や C01 班と連携し，生理学的モデルの検証と，モデルベーストリハビリの有効性の検証を行う．

## REFERENCES


[1] W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, “The sense of agency during continuous action: Performance is more important than action-feedback association,” PLos ONE, PLOS, 10(4): e0125226, 2015.

[2] W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, “The influence of goals on sense of control,” Consciousness and Cognition, Elsevier, 37:82-90, 2015.

[3] 村松克俊, 温文, 濱崎峻資, 山川博司, 安琪, 田村雄介, 山下淳, 淺間一, “動作意図が身体図式の変容に与える影響の評価, ” 精密工学会 2016 年度春季大会, H08, 2016.

[4] W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, “Divided attention and processes underlying sense of agency,” Frontiers in Psychology, Frontiers, 7:35, 2016.

[5] W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, “The influence of action-outcome delay and arousal on sense of agency and the intentional binding effect,” Consciousness and Cognition, Elsevier, 38:87-95, 2015.

[6] R. Minohara, W. Wen, S. Hamasaki, T. Maeda, H. Yamakawa, S. Shibuya, Y. Ohki, A. Yamashita, and H. Asama, “Readiness potential reflects the predictive aspect of sense of agency,” Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), pp.353-354, 2015.

[7] S. Yano, T. Kondo, Y. Yamashita, T. Okimura, H. Imamizu, and T. Maeda, “Bayesian model of the sense of agency in normal subjects,” IEEE 26th International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, p. 227, 2015.

[8] S. Yano, T. Maeda, T. and Kondo, “Slow dynamics perspectives on the embodied-brain systems science,” Neuroscience Research, in press.

[9] H. Tanaka, “Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics,” Neuroscience Research, in press.

[10] H. Tanaka, M. Miyakoshi, & S. Makeig, “Coordinate systems in the motor system: computational modeling and EEG experiment,” In Advances in Cognitive Neurodynamics (V) (pp. 85-92). Springer Singapore, 2016.

[11] J. Izawa, Y. Murata, T. Higo, and N. Schweighofer, “A computational approach to understand a valley of motor recovery,” Society for Neuroscience 45th Annual Meeting, 610.11/P16, San Diego, 2015.

[12] J. Izawa, T. Asai, and H. Imamizu, “Computational motor control as a window to understanding schizophrenia,” Neuroscience Research, in press.

[13] D. Sasaki, J. Izawa, and M. Morita, “A computational approach to detect a meta-learning of the cortical basis function during a motor adaptation study,” 26th 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, Nagoya, 2015.

[14] T. Sakamoto and T. Kondo, “Visuomotor learning by aassive motor experience,” Frontiers in Human Neuroscience, in press.

[15] N. Arizono and T. Kondo, “Functional connectivity analysis of brain hemodynamics during rubber hand illusion,” The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), pp.4258-4261, 2015.

# B02-1 研究項目の研究成果報告

太田 順
東京大学 人工物工学研究センター

***Abstract*— To elucidate mechanisms of the body representation in brain for adaptive motor control, we aim to construct fast and slow dynamics models by focusing on muscle synergy. We assume that the alteration of muscle synergy structure reflects the alteration of the body representation in brain, and we clarify the contribution of the body representation in brain through modeling the fast and slow dynamics of synergy structure. In this year, we proposed fast dynamics model for the postural control and fast and slow dynamics models for locomotion. The postural control model was verified in movable floor experiments and musculoskeletal simulations. The locomotion model was verified by split-belt treadmill walking of a biped robot and a rat neuro-musculoskeletal model. These results give much consideration of the body representation in brain for adaptive motor control.**

## I. はじめに

運動生成には、脳内身体表現が重要な役割を果たしており（fast dynamics）、脳の可塑性により脳内身体表現は長期的に変容する（slow dynamics）ことで、適応機能を生み出している。また、冗長多自由度の筋骨格系からなる生物の運動では、筋活動はタスクに応じた少数の典型的な時空間パターンの組み合わせで表現できることが知られている。この構造は筋シナジーと呼ばれ、生物の冗長性解決の戦略としてその存在が広く示唆されている。

本研究項目では、適応的な運動生成における脳内身体表現の機能解明のために、筋シナジーに着目して、脳内身体表現変容モデルの構築を目指す。具体的には、「運動における脳内身体表現の変容は筋シナジー制御器の変容として表出する」と考え、その slow dynamics と fast dynamics の数理モデルを構築することで、適応的運動機能に寄与する脳内身体表現の役割を明らかにする。

## II. 目的

本研究項目では次の 3 つの研究目標を設定している。

1. 筋シナジー生成器と筋シナジー制御器による筋活動の生成（fast dynamics）のモデル化：適応的運動における筋活動の即時的な生成メカニズムを筋シナジーの観点からモデル化する。
2. 筋シナジー制御器の変容（slow dynamics）のモデル化：筋シナジー制御の変容を脳内身体表現の現れとして捉え、その長期的な変容をモデル化する。
3. 筋シナジー制御器の状態の推定とその応用：fast dynamics, slow dynamics により、生理学的データから現在の筋シナジー制御器の状態を推定する技術を確立する。更に、これを表示するシステムと筋シナジー制御器の状態を予測するシミュレータの構築を行う。

## III. 研究成果

### *A. 姿勢制御における fast dynamics モデルの構築*

研究代表者と研究分担者の千葉（旭川医科大学）らのグループでは、A02-2 研究項目の高草木（旭川医科大学）らと協働で、ヒトの立位姿勢における脳内身体表現を用いた制御メカニズムの解明を目指し、姿勢制御の fast dynamics と slow dynamics のモデル化を行っている。

本年度は、ヒトの姿勢制御における fast dynamics を解明するため、まず、移動床面上での姿勢制御実験を行った。水平面とつま先上がり傾斜面の 2 種に対し、後方への床面移動に対する姿勢維持タスクを行った。この時、膝関節に屈伸を妨げる拘束具の有無による制御の相違を観察した。ここでは、姿勢の制御方法を解析するため被験者(健常 20 代男性)の脚・体幹の筋電を計測し、その結果を筋シナジーに基づくモデルとすることで解析を行った。その結果、膝関節への拘束が無い状態では、傾斜面での筋活動モデルが平面でのモデルとは異なることが確認された。しかし、拘束が有る状態では平面と傾斜面で筋シナジーモデルに相違が認められなかった。これは拘束による姿勢制御戦略の変容と考えられ、姿勢制御における筋シナジー制御器の fast dynamics が観察された [1]。

更に、この姿勢制御の妥当性および長期的変容(slow dynamics)を詳細に調査するために筋骨格系シミュレータ上で立位姿勢維持が可能な制御モデルの構築を行った。Feedback と Feedforward を組み合わせ、最適化によってパラメータ調整を行った制御系を構築することで、多自由度制御系で立位可能となった。このことから、全身への筋緊張の重要性が示唆された [2]。

この他に，小脳部分除去ラットの歩行解析を行った。小脳中央部皮質障害により筋緊張が低下するが、残存した小脳核により代償的に筋緊張が回復することを確認した [3]。更には感覚-運動連関から姿勢制御における感覚統合の重要性も示唆されており、現在、視覚・前庭感覚・体性感覚の統合による姿勢制御実験を行っている。

### *B. 歩行における slow dynamics のモデル化*

研究分担者の青井（京都大学）らのグループでは、B03-1 研究項目の舩戸（電気通信大学）らと協働で、ヒ

トやラットの歩行を対象に、運動制御に見られる fast, slow dynamics による適応メカニズムの解明を目指して、運動計測に基づくデータ解析、ならびに神経筋骨格系の数理モデルの構築と動力学シミュレーション研究を行っている。本年度は、昨年度までに構築した接地感覚情報に基づく筋シナジーの反射的なタイミング制御（fast dynamics）をモデル化したラット後肢歩行の神経筋骨格モデルを改良し、運動制御における slow dynamics のモデル化を目標とした。

生理学的な知見から、歩行中は接地タイミングを予測し、実際のタイミングとの間に違いがあると、それを補償するような運動を取ることが示唆されている。そこで、歩行における slow dynamics のモデルとして、接地タイミングを予測し、実際のタイミングとの誤差に基づいて学習的に筋シナジーの発火タイミングを調整するものを構築した。具体的には、筋シナジーに基づく制御入力を $\sum w_i(m)\cdot v_i(\phi)$ （$w_i(m)$:空間パターン($m$:筋)、$v_i(\phi)$：時間パターン($\phi$:位相)）として、次のように構成した。

$$\dot{\phi} = \omega + (\hat{\phi} - \phi)\delta(t - t^C)$$

$$\hat{\phi}_{n+1} = \hat{\phi}_n + \gamma \frac{\partial V(\hat{\phi}_n)}{\partial \hat{\phi}_n}$$

ここで、$\omega$ は歩行の基本周波数、$\hat{\phi}$ は接地タイミングの予測値、$t^C$ は接地時刻、$V$ は予測と実際の接地タイミングの誤差を評価する関数、$\gamma$ は学習率である。すなわち、fast dynamics における即時的な制御と、slow dynamics における予測と実際との誤差に基づく学習的な制御という時定数の異なる力学的要素が相互に関連して、適応的な歩行を作り上げていく。

この fast, slow dynamics のモデルを評価するために、左右分離型トレッドミル歩行に着目した。この特殊な歩行環境では、左右の肢運動の位相差など肢間の関係を説明する情報量に、環境変化に応じた即時的・長期的な変化が見られ、神経疾患によって、特に長期的な適応が大きく変化することが知られている。まずは、筋シナジーの代わりに運動学シナジーに基づく低次元制御を用いた 2 足ロボットを用いて、ヒトと同様の左右分離型トレッドミル歩行における即時的・長期的適応が再現されることを確認した [4]。更に、筋シナジーに基づくラットの後肢歩行シミュレーションにおいて、ヒトと同様の適応が再現されることを確認した [5]。現在、ラットの計測も進めており、このような即時的・長期的適応が見られるのか、また筋シナジーにこのような適応が見られるのかを確認しているところである [6]。

本研究項目の研究成果は、37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society と 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems における「Embodied-Brain Systems Sciences」ワークショップでの口頭発表、システム・情報部門学術講演会 2015（2015 年 11 月 18～20 日, 函館アリーナ）における「身体性システム科学」セッションでのポスター発表 [1, 7]、26th 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science（2015 年 11 月 23～25 日, Noyori Memorial Hall, Nagoya University）における「Embodied-Brain Systems Science」オーガナイズドセッションでの口頭発表 [2, 8]、第 28 回自律分散システム・シンポジウム（2016 年 1 月 21～22 日, 広島大学東広島キャンパス 学士会館）における「身体性システム科学」オーガナイズドセッションでの口頭発表 [3, 5]などで発表しており、これまでの研究成果を、Neuroscience Research 誌における「Body representation in the brain」特集号に寄稿している [9, 10]。

## IV. おわりに

本年度は、初年度に行った実験系の構築から、実験結果に基づく解析並びにモデル化を行った。これにより fast dynamics に関する制御メカニズムの考察を行い、更には slow dynamics に関する制御メカニズムへの考察を可能とした。次年度以降では、より詳細な slow dynamics モデルの構築を行い、そのモデルの妥当性の検証を開始する。また、他研究項目と連携し、生理学的裏付けとリハビリテーションへの応用可能性を調べる。

## REFERENCES


[1] 千葉, 高草木, 太田: 傾斜移動床における姿勢制御戦略の変更, システム・情報部門学術講演会(SSI2015), pp. 403-404, 2015.

[2] P. Jiang, R. Chiba, K. Takakusaki, and J. Ota: Generation of biped stance motion in consideration of neurological time delay through forward dynamics simulation. Proc. IEEE Int. Symp. Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2015), pp. 205-208, 2015.

[3] 白石, 高草木, 千葉, 太田: 小脳部分障害によるラットの障害物回避歩行の変容, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 37-40, 2015.

[4] S. Fujiki, S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya: Adaptation mechanism of interlimb coordination in human split-belt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study", J. R. Soc. Interface, 12(110):20150542, 2015.

[5] 藤木, 青井, 舩戸, 柳原, 土屋: ラットの神経筋骨格モデルに基づく左右分離型トレッドミル歩行における長期適応の生成, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 45-50, 2016.

[6] S. Fujiki, S. Aoi, D. Yanagihara, T. Funato, Y. Sato, K. Senda, and K. Tsuchiya: Investigation of adaptive split-belt treadmill walking by the hindlimbs of rats, Proc. Int. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2015), pp. 6756-6759, 2015.

[7] 安, 石川, 青井, 舩戸, 岡, 山川, 山下, 淺間: 筋シナジーの時間パターンがヒト起立動作に与える影響の神経筋骨格モデルを用いた解明, システム・情報部門学術講演会(SSI2015), pp. 374-378, 2015.

[8] S. Ishiduka, H. Oshima, S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, N. Tsujiuchi, A. Ito, and K. Tsuchiya: Kinematic analysis of low dimensional structure in walking and running, Proc. IEEE Int. Symp. Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS2015), pp. 287-291, 2015.

[9] R. Chiba, K. Takakusaki, J. Ota, A. Yozu, and N. Haga: Human upright posture control models based on multisensory inputs; in fast and slow dynamics, Neurosci. Res., in press.

[10] S. Aoi and T. Funato: Neuromusculoskeletal models based on the muscle synergy hypothesis for the investigation of adaptive motor control in locomotion via sensory-motor coordination, Neurosci. Res., in press.

# B03-1 研究項目の研究成果報告

舩戸 徹郎
電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻

***Abstract*—The coordination of movement: synergy provides a simple model of the body for managing a complex neuro-muscloskeletal system, and it is considered to reflect the body scheme. In order to approach the construction principle of the synergy, this group studies the functional role of the synergy using the animals with neural ataxia. In this year, we analyzed the synergy of healthy rats with standing and walking, and developed the experimental environment for the synergy of rats with neural ataxia. As the result of the analyses, standing and walking motions of rats were found to have similar characteristic of those of humans, and fundamental data for analyzing the change of synergy due to neural ataxia were obtained.**

## I. はじめに

ヒトや動物が歩行や直立などの全身運動を行うとき, 複数の関節や筋を協調して動かす協調関係 (シナジー) が見られる. このような運動中に観察される運動要素の協調関係は, 動作生成において冗長な身体を動かすための低次元表現となっており, 脳内身体表現を反映していると考えられる.

筋活動の協調関係を反映した筋シナジーは, 異なる速度や前後歩行などの異なる動作で共通した構造を示す一方で, 脳梗塞などの神経系の疾患によって, 複数の筋シナジーが統合するように変化し, また, 疾患後の長期的な変化によって, 筋シナジーの分解が行われることが知られている [1]. また, 小脳疾患では, 直立中の膝・体幹・腕の協調的な動作 (運動学シナジー) が低下すると報告されている [2].

本研究項目では, このような神経疾患に伴うシナジーの変化と運動制御系への影響を詳しく調べることで, シナジーがどのように構成され, 運動機能とどのように結びついているのかについての知見を得る. さらに, 臨床現場でのシナジー解析環境を開発することで, シナジーを介したリハビリテーション手法の構築を目指す.

## II. 目的

本研究項目では, 次の 3 つの研究目標を設定している.

1) 小脳疾患に伴う運動学シナジーと姿勢制御系への影響の解明: 小脳疾患を持つラットの直立運動における運動学シナジーの解析と力学解析によって, シナジーと姿勢制御機能の関係を明らかにする.
2) 脳梗塞に伴う筋シナジーの変容メカニズムの解明: 脳梗塞を持つラットの歩行運動における筋シナジーの解析によって, シナジーの変容メカニズムを明らかにする. (B02 班との連携研究)
3) 臨床現場における神経疾患患者の筋シナジー解析環境の構築 (C02 班との連携研究)

## III. 研究成果

本年度は, 健常ラットを対象として, 直立及び歩行中のシナジーの解析と力学モデルの構築を行った. さらに臨床現場で使用できるシナジー解析機器の開発を行い, 無痛無汗症患者を対象とした運動解析環境を構築したので, 報告する.

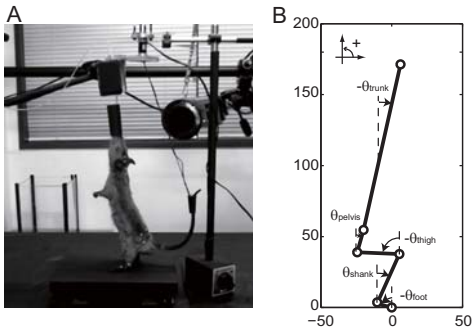



Fig. 1. Measurement of the motion of a standing rat

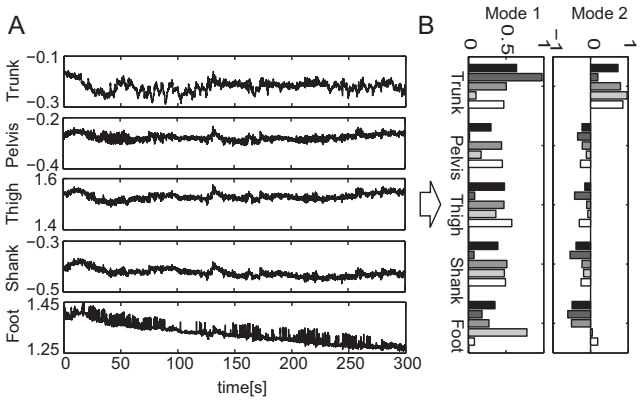



Fig. 2. Intersegmental coordination of a standing rat

### *A.* ラットの運動学シナジーと姿勢制御系の定量評価

*1)* 運動学シナジーの解析*:* ラットの姿勢維持運動にどのような関節間協調 (運動学シナジー) が見られるかを調べるために 図1A のような 2 足直立中のラットの運動をモーションキャプチャシステムを用いて計測し, 得られた体幹, 腰, 大腿, 下腿, 足の 5 つの体節の角度 (図 1B, 図 2A) に対して, 特異値分解を施すことで相関の高い動きを取り出した [3].

解析の結果, 全身の 5 つの体節の運動は図 2B に示す 2 つの協調的に動く組み合わせで 9 割以上の動作が表され, そのうち Mode 1 が 6 割, Mode 2 が 3 割の動きであった. また重心の回転動作及び体幹の動作のヤコビアンと比較したところ, Mode 1 が重心の動き, Mode 2 が体幹の動きを構成することが分かった.

以上の結果はヒトで報告された結果と同様であり [4], ラットの 2 足姿勢がヒトと同様の動作で構成されていることを示している. また, Mode 1 は 1 リンク, Mode 2 は 2 リンクの倒立振子による身体力学モデルの動作と対応し, ラットの姿勢制御モデルを構成する数理的基礎が得られた.

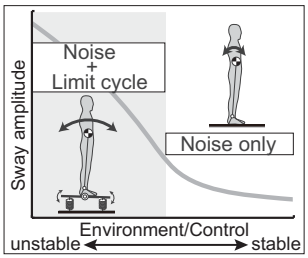



Fig. 3. Characteristic of the proposed posture control model

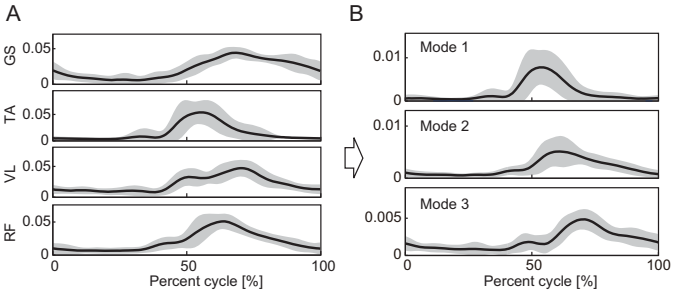



Fig. 4. Muscle synergy of a walking rat

*2)* 直立姿勢制御モデルの構築とラットの制御系の評価*:* ヒトの直立中の重心動作を基に, 姿勢制御モデルを構築した [5]. 2 足直立の間, ヒトの体は完全には静止せず, 常に微少に揺れている. またこのとき, 立っている床面を柔らかくして安定性を下げると, 揺れの大きさが明らかに大きくなる. 1 リンクの倒立振子と非線形 PID 制御モデルを用いてヒトの運動状態を評価したところ, 安定性に応じて “静止”(ノイズによって揺れている状態) から “リズム運動”(積極的に前後に揺れる状態) へと変化する図 3 のような性質を持つことで, このような運動変化が生じていることを示した [5].

2 足直立中のラットの運動に対して, 同様のモデルを用いて制御系を評価したところ, 安定な床面上で直立中の制御状態 (制御ゲイン) が, ヒトと同様に “静止” と “リズム運動” の間 (図 3 の中央) 付近で保たれていることが分かった [6].

以上より, ラットの直立動作の制御状態を定量評価する手法が構築できた. 今後, 小脳疾患を持つラットの運動学シナジーの変化と制御状態の変化を調べ, 運動学シナジーが姿勢制御機能にどのように影響を与えているかを明らかにする.

### *B.* ラットの歩行運動の筋シナジーと脳梗塞実験環境の構築

脳梗塞に伴う筋シナジーの変化を, 脳梗塞ラットの歩行運動の筋シナジー解析によって調べることを計画しており, 本年度は Photothrombosis 法による虚血性脳梗塞を持つラットの作成準備と, 健常ラットの歩行の筋シナジー解析を行った. B02 班と共同でラットの歩行実験を行い, 後肢 2 足によるトレッドミル上での歩行運動を計測した. 計測した筋は右後肢の Gastrocnemius, Tibialis Anterior, Vastus Lateralis, Rectus Femoris の 4 筋であり, 計測した結果を図 4A に示す. 得られた 4 筋の筋活動に非負値行列因子分解 (NMF) を施すことで, 図 4B の 3 つの筋シナジーを取り出すことができた.

以上の研究により, 脳梗塞ラットの歩行運動の筋シナジー解析を行うための実験環境が構築できた.

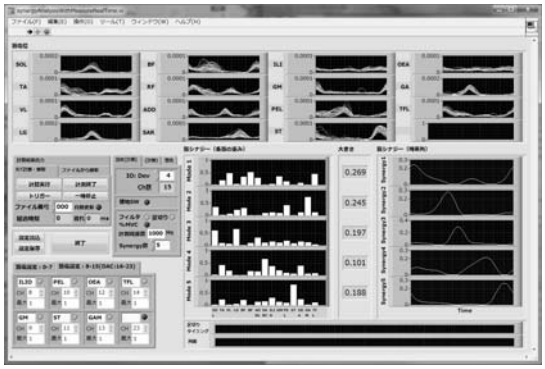


Fig. 5. Developed software for realtime synergy analysis

### *C.* 筋シナジー解析装置と無痛無汗症患者の計測環境の構築

神経疾患を持つ患者の筋シナジーを臨床の現場で解析し, その場でフィードバックをかけることのできる筋シナジー解析装置を開発した (図 5). 特に C02 班と共同で無痛無汗症患者の歩行運動の計測環境を構築し, シナジー解析を患者の計測と同時に行える環境が整った.

歩行運動の筋シナジーは発達に従って変化し, 新生児から子供の歩行へ移るに従ってシナジー数が増加し, その後, 未就学児から成人歩行に移る際には, 接地・離地感覚情報との統合が行われると考えられている [7]. ここで, 無痛無汗症患者では, 感覚情報が得られないことで, 後者の発達が阻害され, 筋シナジーが成人歩行と異なる可能性がある. 今後筋シナジーの解析を行うことで, 成人歩行との違いを調べ, さらに音刺激などを外部から感覚を追加することで, シナジーが変化するかを検証する. これにより, シナジー解析を介したリハビリテーション手法の構築を行う.

## IV. おわりに

本年度は, 健常ラットを中心としたシナジー解析と力学モデルを構築し, シナジーと運動機能との関係を明らかにするとともに, 疾患ラット及び患者の計測環境を構築し, 疾患に伴うシナジーの変化を解明するための環境を構築した. 次年度, 小脳疾患及び脳梗塞を持つラット, 無痛無汗症患者のシナジー解析によって, シナジーの構成原理に迫る.

## REFERENCES

[1] V. C. K. Cheung, et al., ”Muscle synergy patterns as physiological markers of motor cortical damage”, PNAS,vol. 109, pp. 14652-14656, 2012.
[2] U. M. Kung, et al., ”Postural instability in cerebellar ataxia: correlations of knee, arm and trunk movements to center of mass velocity”, Neuroscience, vol. 159, pp. 390-404, 2009.
[3] 佐藤 陽太, 舩戸 徹郎ら, ”ラットの二足直立運動の関節間協調の解析”, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 41-44, 広島, 2016.
[4] I. J. Pinter, et al., ”The dynamics of postural sway cannot be captured using a one-segment inverted pendulum model”, J Neurophysiol, vol. 100, pp. 3197-3208, 2008.
[5] T. Funato, S. Aoi, et al., ”Smooth enlargement of human standing sway by instability due to weak reaction floor and noise”, Royal Society Open Science, vol. 3, 150570, 2016.
[6] Y. Sato, T. Funato, et al., ”Measuring Body Sway of Bipedally Standing Rat and Quantitative Evaluation of Its Postural Control”, IEEE-EMBC, pp. 5311-5314, Milan, Italy, 2015.
[7] N. Dominici, et al., ”Locomotor primitives in newborn babies and their development”, Science, vol. 334, pp. 997-999, 2011.

# B03-2 研究項目の研究成果報告

長谷川 泰久
名古屋大学 大学院工学研究科

***Abstract*—駆動関節を有する人工指を研究開発し，訓練により物体搬送作業のパフォーマンスが向上することを確認した．人工指として、左手のひらに装着する３自由度を有するロボット拇指を製作し，このロボット拇指を右手拇指によって操作するインタフェースを開発した．ロボット拇指先端に作用する接触力を力センサによって計測し，操作インタフェースを介して右手拇指に触覚をフィードバックする電気刺激装置を搭載した．このロボット拇指および操作インタフェースを用い物体搬送作業を行い，視覚や触覚フィードバックの有無による作業性の変化を計測し，比較検討した．**

## I. はじめに

MIT の拡張指や拡張アームの研究など，近年，身体拡張義肢は活発に研究されている [1] [2]．人工物を身体化するために，擬似体性感覚フィードバックが用いられることが多い．西尾らにより振動フィードバックを用いてロボットアームの関節角度をフィードバックしアームの姿勢を提示する方法が研究されている [3]．関節角度は 4 つの振動のモードで提示され、角度提示には，より高い分解能が必要となる．また，杉山らにより電気刺激を用いてバーチャルハンドの身体化の研究が行われている [4]．彼らはモニター内のバーチャルハンドの触覚フィードバックに電気刺激を用い、高い分解能を得ることが出来ることを報告している．我々の研究では，身体図式を持っている部位から，身体図式を持っていない人工肢へ身体表現の転写を引き起こし，その転写を引き起こす因子やその転写過程を解明することを目指す．

## II. 目的

本研究では，擬似的な求心性感覚フィードバックを用いることにより身体以外の人工物を身体図式に取り込み，人工物を身体化することを目的としている．今回，感覚フィードバックとして電気刺激による触覚フィードバックに焦点を当て，図 1 に示すロボット拇指の製作を行った．このロボット拇指は 3 自由度を持ち，先端には触覚センサが取り付けられ，左手のひらに装着する。この触覚センサで計測した力覚に応じて，ロボット拇指を操作する右親指先端に電気刺激による触覚フィードバックが行われる．この電気刺激の有無の 2 条件でのボルトピッキング作業を行い，作業にかかった時間とピッキング失敗回数を比較し，製作した実験機の基本性能について評価する．

## III. 研究成果

本年度は人工拇指操作における身体表現変容実験の環境整備として，ロボット拇指および操作インタフェースの設計製作，物体搬送作業実験による基本性能評価を行った．

### *A. 3* 関節ロボット拇指の設計・製作

3 駆動関節を有する装着型ロボット拇指を製作した（図 1）．このロボット拇指は被験者の左手に，薬指・小指と対向するように装着され，示指，中指を含む 4 指と指先つまみ動作を行うことができる．サイズは人間の親指とほぼ同じであり，人の親指とほぼ同じ可動範囲を持つ．その先端には 3 軸力センサが搭載されており，z 軸方向軸力 0～40 [N], x,y 軸方向せん断力-20～20 [N] を測定することができる．

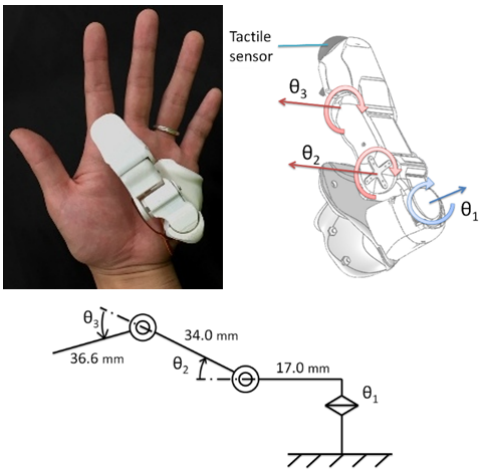



Fig. 1. ロボット拇指

TABLE I
ロボット拇指の仕様

| | |
|---|---|
| 長さ x 幅 x 厚み | 105 x 28 x 23 [mm] |
| 重さ | 61 [g] |
| 自由度 | 3 |
| 最大速度 | 130 [cm/s] |
| 指先力 | 2.0-3.2 [N] |

### *B.* 操作インターフェースの設計・製作

操作インターフェースは図 2 のように右手に装着され，右親指先端位置を計測する．このインターフェースには 4 つのロータリーエンコーダが内蔵されており，測定された角度情報を基に順運動学を解くことにより右親指先端位置を算出する．算出された右親指位置はロボット拇指に送信され，ロボット拇指は，右手親指の動きを模擬するように同期して動く．また，操作インターフェースには電気刺激装置が搭載されており，ロボット拇指の力覚センサで計測された接触力を，右親指の腹側にフィードバックすることができる．刺激用電極を右親指に装着し，マイスナー小体の感度が高くなる周波数 50Hz，デューティ比 1%のパルス波にて，計測された触力覚に応じて 255 段階にて触覚フィードバックを行う [5].

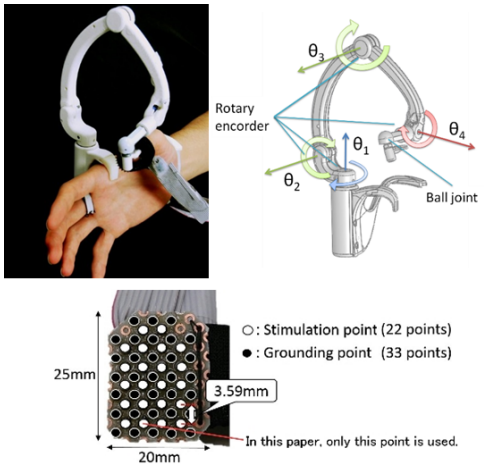



Fig. 2. ロボット拇指操作インターフェース

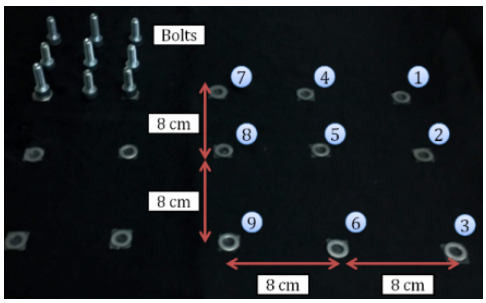



Fig. 3. 搬送物配置図

### C. 物体搬送作業の作業性変化

図 3 に示すようにテーブル上の 9 本のボルトを，被験者は左手小指・薬指とロボット拇指を使い掴み、右側の所定の位置に置く作業を行った．9 本のボルトを移動する作業を 1 セットとし、電気刺激による触覚フィードバックが有る場合で 10 セット、触覚フィードバックが無い場合で 10 セットの合計 20 セット行った．作業性の評価は，作業にかかった時間と作業失敗回数に加え，アンケート調査を行った．この作業時間と失敗回数を表 II に示す．触覚フィードバックが無い場合と比べ，触覚フィードバックが有る場合には，タスク処理時間が 7.2 %向上し，被験者は一度も失敗をしなかった．また，実験後のアンケートでは被験者のほぼ全員が「電気刺激がある方が操作がしやすかった」,「電気刺激が触覚のように感じた」と回答した（表 III）．アンケートの質問項目以外も触覚フィードバック有りの場合では,「実験後、右親指を動かすと左指が勝手に動いてしまった」,「右親指が左手に移動したような感覚があった」,「右腕がなくなるような感覚になった」といった意見が被験者から寄せられた．

## IV. おわりに

本論文では人工拇指を製作し，それを用いた物体搬送作業において，触覚フィードバックの有無による作業性の比較を行った．まず，触覚センサを備えた身体拡張拇指 (ERT) と親指位置計測装置 (TMC)，電気刺激装置を製作し，ERT を用いボルトのピッキング実験を行った．

TABLE II
実験時のタスク処理時間と失敗回数の比較

| Subject | | Required time [s] | Failure count |
|---|---|---|---|
| Subject A | With feedback | 28.8 | 0 |
| | Without feedback | 33.1 | 3 |
| Subject B | With feedback | 24.9 | 0 |
| | Without feedback | 25.5 | 1 |
| Subject C | With feedback | 19.8 | 0 |
| | Without feedback | 20.6 | 2 |
| **Mean** | **With feedback** | **24.5** | **0** |
| | **Without feedback** | **26.4** | **2** |

TABLE III
アンケート項目と平均回答点

| 質問項目 | 平均点 (1~5) |
|---|---|
| 右手親指がまるで<br>左手のひらに移動したかのように感じた | 3.7 |
| 親指の動きに追従できていた | 4.3 |
| 電気刺激の強さは適切であった | 4.7 |
| ボルトのサイズや形状に違和感があった。 | 1 |
| 操作は簡単であった | 5 |
| 電気刺激がある方が操作がしやすかった | 5 |
| 装置を外したあとに違和感があった | 5 |
| 電気刺激が触覚のように感じた | 4.7 |

電気刺激による触覚フィードバックが有る場合はタスク処理時間が 7.2%短くなった．また，ピッキング時の把持失敗回数は触覚フィードバックが無い場合では平均 2 回であったのに対して，フィードバックが有る場合はどの被験者も 0 回であった．この結果は触覚フィードバックが把持状態を的確に伝えることができ，ERT をより正確に操作するには重要であると言える．

本実験では，触覚フィードバックの重要性について確認したが，今後は，本人工拇指の操作訓練を重ねることによる「操作性向上」と人工拇指の「身体化レベル」の計測を行い，その身体表現変容因子について検討を行う．

## REFERENCES

[1] F.Y. Wu and H.H. Asada, “*Hold-and-Manipulate*” *with a Single Hand Being Assisted by Wearable Extra Fingers*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015), pp.6205-6212,2015.

[2] F. Parietti, K.C. Chan, B. Hunter, and H.H. Asada, *Design and Control of Supernumerary Robotic Limbs for Balance Augmentation*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5010-5017, 2015.

[3] 西尾智彦，エンリケズ ギエルモ，ヤップ フェイ イー，山口友之，橋本周司，**ロボットの状態把握に適した振動提示方法の検討**． ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，1P1-U02，2015.

[4] 杉山智紀，水品友佑，MHD Yamen SARAJI Charith Lasantha FERNANDO，佐藤克成，南澤考太，舘 暲 ，**圧覚提示と電気刺激の組み合わせによる装着型触覚ディスプレイの試作**． ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，2A2-W08，2015.

[5] Y. Hasegawa and K. Ozawa, *Pseudo-somatosensory feedback about joint's angle using electrode array*. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.644-649, 2014

# B03-3 研究項目の研究成果報告

細田 耕
大阪大学大学院基礎工学研究科

***Abstract*— this research proposal studies on the body image of a human, which can be obtained through the relation between image of the body in the vision and output from proprioceptive receptors of the muscles. We use a muscular-skeletal humanoid robot and brain-like neuron model to construct the system.**

## I. はじめに

本研究項目では，人間がどのような表現空間上に身体イメージを持ち，その身体イメージと筋骨格系からもたらされる自己受容情報との関係をどのように学習するかを，人間に相似な筋骨格系を持つヒューマノイドロボットと，脳型ニューロンモデルを使って，構成論的に研究する．

## II. 目的

さまざまなモダリティからなる自己のセンサ空間や自己中心座標系（以後，表現空間と呼ぶ）で，身体のボリュームや手先の位置が表現されたものを，身体イメージという．身体イメージは，自身の筋の状態（＝自己受容センサ）の関数であり，これを学習することによって，環境への働きかけを構造化，環境の変化に適応的に振る舞うことができると考えられている．本研究提案では，人間がどのような表現空間上に身体イメージを持ち，その身体イメージと筋骨格系からもたらされる自己受容情報との関係をどのように学習するかを，人間に相似な筋骨格系を持つヒューマノイドロボットと，脳のニューロンをモデルとしたダイナミクスを使って，構成論的に研究する．即時適応と，表現の変容を，ロボットの適応的振る舞いと，脳のニューロンをモデルとしたダイナミクスの時間発展としてモデル化する．その結果，①人間の身体イメージ生成モデルを使った，ヒューマノイドロボットの適応的行動の実現，②脳のモデルのの妥当性の評価，③接触など環境条件が変わる場合のリハビリに対する新しい手法，などが期待できる．

## III. 研究成果

### *A. 空気圧人工筋用自己受容センサボードの開発*

身体イメージの生成と変容を調査するためのプラットフォームとしての，人工筋駆動ヒューマノイドロボットを試作するにあたり，空気圧人工筋用自己受容センサボードを開発した．

人間の筋には，筋紡錘やゴルジ腱器官から，Ia 線維，II 線維を通して，脊髄を経由し，運動ニューロンへとフィードバックされる脊髄反射経路が備わっている．このような経路は，筋を使って身体を動かす際に，基本的ブロックとして作用していると考えられる．これまで，ロボットを用いて，身体イメージを構成論的に研究する場合に，ほとんどのケースで，自己受容センサは，ロボット自身の関節センサであり，関節の角度と，効果器の視覚上の位置が身体イメージとして定義されていた．しかし，実際には，人間は，筋紡錘から筋の伸縮に関する情報が得られるのみであり，たとえば関節包などから角度を得ているとは考えにくい．関節角ではなく，筋の伸縮量が計測可能であるとすると，身体イメージに関する知見は大きく変化する可能性がある．そのうえ，その構成には，筋に存在する基本的なフィードバックが絡むことも想定され，このようなシステムを実装し，身体イメージの実験を行うことは，これまでの「認知的な」身体イメージを変える可能性がある．

本研究では，このような筋長から，効果器のイメージを構成するために，基本的反射を備えた筋骨格ロボットを作るために，空気圧人工筋用自己受容センサボードを開発した（Fig. 1）．

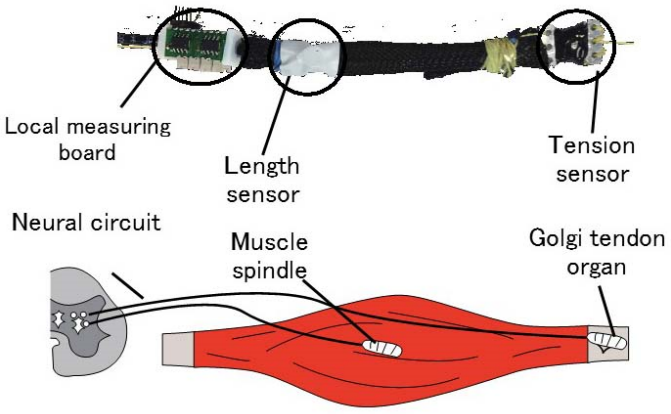



Fig. 1 空気圧人工筋用自己受容センサボード

センサボードは，磁気式の長さセンサと，圧力センサの出力を得て，ボード上のマイクロプロセッサにより，換算された I a 線維，Ⅱ線維のパルスをエミュレートする機能を持つ（エミュレートされた I a 線維の出力を Fig.2 に示す）．

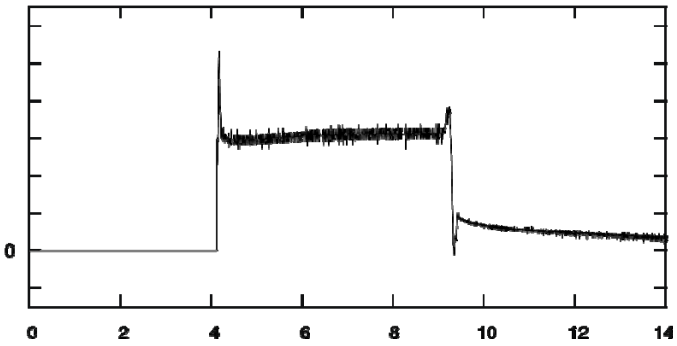
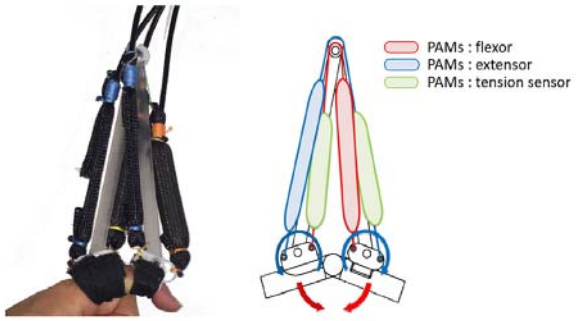



Fig. 2 エミュレートされた I a 線維の出力

### *B. 空気圧人工筋駆動マスタ・スレーブシステムの開発*

研究代表者らのグループは，fMRI 環境下で使用可能な，空気圧人工筋によって駆動される，手部のマスタ・スレーブシステムを開発した（Fig. 3）．空気圧人工筋をアクチュエータとしてだけではなく，センサとして使うことによって，金属を使わずに構成することができるため，fMRI の今日磁場環境でも安全に使用できることが期待される．




(a) Overview of the developed finger exoskeleton

(b) Movement of the finger exoskeleton

Fig. 3 空気圧人工筋駆動マスタ・スレーブシステム

## IV. おわりに

本年は，身体イメージの構成論的研究を行うための，ヒューマノイドロボットプラットフォームに必要な，空気圧人工筋用自己受容センサボードを試作し，その動作を確認した．また，計画班との共同研究のための実験プラットフォームとなる空気圧人工筋駆動マスタ・スレーブシステムの開発を行った．次年度は，これらのシステムを使い，実験からデータを収集する予定である．

## REFERENCES

[1] Hirofumi Shin et al., Development of an embedded sensor system as pneumatic artificial muscle proprioceptors, Proceedings of International Symposium on Artificial Life and Robotics, Jan. 2016.

[2] 瓜野琢也，池本周平， 細田耕，強磁場環境下で動作可能なマスタ・スレーブ型手指外骨格の開発，計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会，2016.

.

# B03-4研究項目の研究成果報告

谷口 忠大
立命館大学　情報理工学部

***Abstract*—To construct a computational model of the formation process of body schema in the human central nervous system. We proposed an unsupervised machine learning method that can estimate a topology of tactile sensor distribution and the number of limbs, i.e., body parts, sequentially and automatically from high dimensional tactile sensor data using a Dirichlet process Gaussian mixture model.**

## I. はじめに

本研究の目的は**ベイズ潜在木構造生成過程による脳内身体表現スローダイナミクス**を説明するモデルを明らかにすることである．人間は自らの四肢を動かし身体をコントロールするが，このモデル表現はしばしば多リンク系として表される．この表現は人間の身体の状態を縮約的に表現する意味において妥当かつ簡便であり，ロボティクス等において伝統的に用いられてきた．同時に，人間がそのような内部モデル，つまり，脳内身体表現の状態空間モデルを構築していると考えるのも妥当であり，人間の身体行動，認知過程の分析はこの状態空間表現に基づいてなされてきた．

しかし，人間が受け取る感覚情報は触覚，力覚，視覚，聴覚，自己受容感覚など身体と環境の相互作用の中で生まれる断片的なものであり，身体運動を表現する**状態空間そのものを人間がいかに獲得しているかは自明ではない**．人間は生まれながらにして四肢と五指を持つ状態空間表現を持っていると仮定すると，成長過程における身体パラメータに変化や，身体の損傷による身体構造の変化への適応が説明できない．また，欠損した身体部位が存在するように感じる**幻肢** *(phantom limb)*，また幻肢において現実とは異なる身体部位が存在するように感じる現象を説明することもできない [1].

我々人間が得るマルチモーダルな感覚運動情報と，多リンク系を扱う状態空間そのものの適応ダイナミクスを架橋するためには，脳内身体表現としての状態空間モデルを形成するスローダイナミクスを明らかにする必要がある．通常，身体のリンク系をグラフ構造で示した際には閉路を持たない．故に，本研究では身体のリンク構造が木構造であると仮定し，その生成過程として木構造生成過程を仮定する．潜在的な木構造が存在し，そこからの感覚情報（観測）が生成されるという生成過程に基づき，その観測からモデルの潜在変数をベイズ推論することで脳が潜在的な木構造が学習していると考え，このスローダイナミクスを明らかにする (Figure 1).

## II. 目的と方法

本研究項目の具体的な目的は，ベイズ潜在木構造生成過程による脳内身体表現スローダイナミクスモデルを構築し，そのモデルが現実の人間が得ているであろうセンサ・モータ情報（マルチモーダル情報）から身体構造を推論出来ることを示すことである．この目的が達成されることで，身体の骨格構造を脳が把握するためのスローダイナミクスのモデルを得ることができ，幻肢の治療の解釈や新たなリハビリテーション手法の提案に繋がることが期待される．

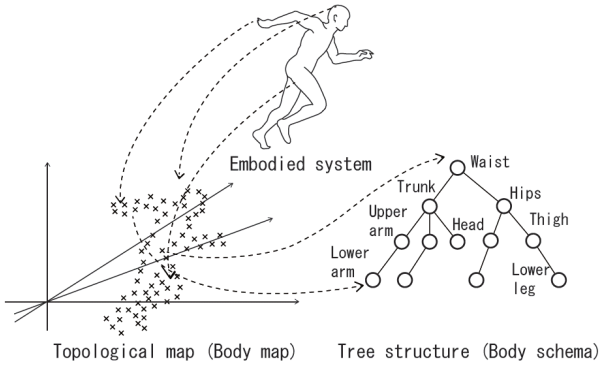



Fig. 1. Body map and body schema

研究の手順としては

1) ベイズ潜在木構造生成過程の生成モデルの開発
   - 1-1 感覚運動情報の因果性を考慮した低次元表現の形成手法の開発
   - 1-2 木構造生成モデルを潜在変数としたクラスタリング手法の開発
   - 1-3 ベイズ潜在木構造生成過程に基づく脳内身体表現推定手法の開発
2) エージェントシミュレータを用いたベイズ潜在木構造生成過程の有効性検証
3) ヒューマノイドロボットを用いた脳内身体表現獲得実験

に順次取り組むことにより，上記目的の達成を目指す．H27年度に関しては上記 1. ベイズ潜在木構造生成過程の生成モデルの開発に取り組み，一定の成果を得た．本報告書でその概要を報告する．

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に３つ挙げ概要を説明する．

### *A.* 身体地図学習のためのシミュレーション環境の構築

本研究は Mori et al. が行った胎内環境において胎児がジェネラルムーブメントを通して身体脳内表現を形成していく過程のシミュレーション実験 [2] を模倣した上で，ベイズ潜在木構造生成過程の可能な限り最小限のテスト環境を構築した．Figure 2 に構築したシミュレーション環境の概観を示す．多リンク木構造を持ったエージェントは各リンクに触覚センサを持ち，また各関節はユニバーサルジョイントにより接続されるものとした．

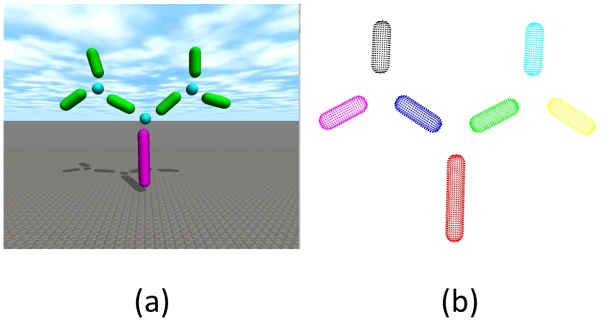



Fig. 2. Artificial agent with tree structure in simulation experiment

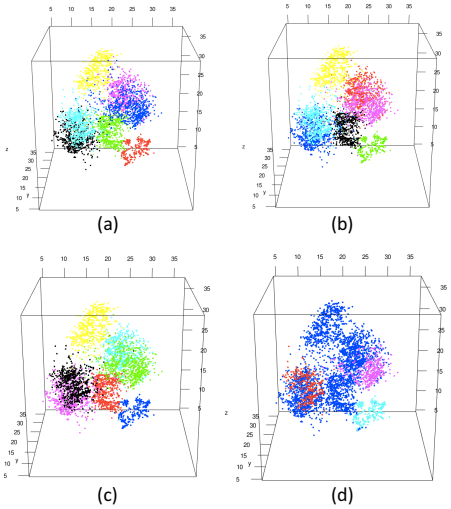



Fig. 3. Result (a) Ward's method (b) K-means (c) GMM (d) DPGMM (proposal)

### B. 触覚情報からの多リンク系のリンク数の自動推定の実現

本研究では Olsson et al. の手法 [3] を参考にしながら，コサイン尺度と相互情報量に基づく距離尺度を各触覚センサから得られる時系列情報の間に定義し，低次元空間へ写像することでトポロジカルなマップ（身体地図）を構成する方法を提案し，一定のトポロジカルな関係が低次元空間に構成されることを確認した (Figure 3)．また，ノンパラメトリックベイズモデルに基づくクラスタリング手法である Dirichlet Process Gaussian Mixture Model (DPGMM) を適用することで，リンク数の推定とほぼ完全なリンクと触覚センサの対応付けが可能なことが示された (Table I)．この成果は会議報告を行い，現在投稿準備中である [4].

### C. 木構造のベイズ推論を行う *Linked Gaussian Mixture Model* の提案

DPGMM を拡張することにより，クラスター間のリンク構造を木構造の制約を満たすように推論する手法として Linked Gaussian Mixture Model (Linked GMM) を開発した．人工データに対して，その有効性を示すことができた．この成果に関しては，現在投稿準備中である

TABLE I
RESULTS OF CLUSTERING TACTILE SENSORS ON BODY MAP

| Clustering methods | ARI (3 dimensional) | ARI (9 dimensional) |
|---|---|---|
| K-means | 0.9313 | 0.7728 |
| Ward's method | 0.8843 | 0.9988 |
| GMM | 0.9252 | 0.9972 |
| DPGMM | 0.2674 | 0.9988 |

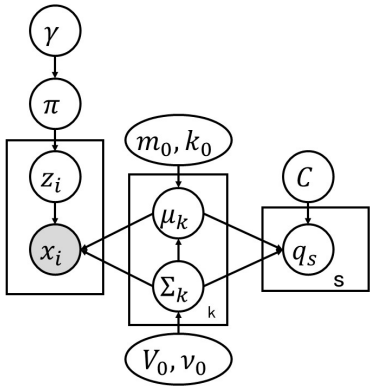



Fig. 4. Graphical model of linked GMM

## IV. おわりに

本年度では胎児の胎内環境の近似として流体内におかれた木構造の生物がランダムな動きをする中で，触覚情報のみから自らのリンク構造を推定するという問題に取り組んだ．相互情報量に基づく距離と低次元化手法により，一度トポロジカルなマップである身体地図を構成した上で，これらを生成モデルに基づくクラスタリング手法である DPGMM によりクラスタリングし，リンク数を推定することでリンク数を推定することが出来ることが明らかになった．また，DPGMM を拡張した Linked GMM を提案しその有効性を検証した．

今後の課題としては以下のものがあげられる．まず，現在のモデルは潜在的な木構造からの観測が身体地図上の点となっており，人間の触覚・運動情報と木構造を統一的な生成過程で表現したものにはなっていない．これを繋ぎ，一つの確率的な生成過程として表現し，効率的な推論手法を求めることは今後の課題である．また，次年度に計画している実ロボットでの実験環境を構築し，検証を可能とすることも今後の課題である．また，本年度，木構造の生成過程として Linked GMM を提案したが，近年，画像認識の分野などでも注目されている Latent Tree Models(LTM) の活用により運動情報を含んだマルチモーダル情報の因果関係も含めてモデル化出来る可能性があり，その応用の検討も今後の課題である．また，幻肢のリハビリテーションにおいては視覚情報の活用が非常に重要である．そのため触覚・運動情報のみならず視覚情報を含んだ脳内身体表現スローダイナミクスモデルへの拡張も今後の課題である．

## REFERENCES

[1] V. S. Ramachandran and S. Blakeslee, *Phantoms in the Brain: Human Nature and the Architecture of the Mind*. Fourth Estate, 1998.

[2] H. Mori and Y. Kuniyoshi, "A human fetus development simulation: Self-organization of behaviours through tactile sensation," in *IEEE 9th International Conference on Development and Learning (ICDL)*, 2010, pp. 82–87.

[3] L. Olsson, C. Nehaniv, and D. Polani, "From unknown sensors and actuators to actions grounded in sensormotor perceptions," *Connection Science*, vol. 18, no. 2, pp. 121–144, 2006.

[4] 三村知洋, 萩原良信, 高野敏明, 谷口忠大, and 稲邑哲也, "身体図式の形成のための身体地図のクラスタリング," in **計測自動制御学会　システム・情報部門学術講演会** *2015 (SSI2015)*, 2015.

うす緑の色紙はさむ

うす緑の色紙はさむ

# C 班（リハビリテーション医学）の活動報告

東北大学大学院医工学研究科　出江 紳一

## I.　研究計画

C 班では，脳内身体表現マーカーを活用することでリハビリテーション効果の定量化に取り組む．また，脳内身体表現モデルと統合することでモデルベーストリハビリテーションを実践し，介入の帰結予測を行う．さらに，身体全体の感覚運動機能の適正化のための新しい介入法の開発を目指す．これらの課題を遂行するため，以下の研究項目を設定している．

C01-1：脳内身体表現の変容を用いたニューロリハビリテーション

我々の脳内に構築される脳内身体表現は，外部から観察することが困難とされている．そこで，四肢切断後に鮮明に知覚される切断肢の残存感覚である幻肢（脳内にのみ存在する身体）という特殊な症状に着目し，心理物理学的手法により，脳内身体表現を定量化・可視化する．この結果を用いて，脳内身体表現への介入によるニューロリハビリテーションを確立する．

C02-1：感覚入力への介入を用いた姿勢・歩行リハビリテーション

姿勢・運動制御の障害では，全身の筋の時間的空間的活動パターンが障害されており，筋シナジー制御の異常があると考えられる．本研究では，運動障害に伴う筋シナジー制御の異常を解明し，感覚介入による運動障害の改善を目指す新たなリハビリテーションを提案する．

## II.　班構成

研究項目 C01-1

出江紳一・田中尚文・大内田裕（東北大学）：脳内身体表現の状態推定とその視覚化

稲邑哲也（国立情報学研究所）：ニューロリハビリテーションのための VR シミュレータの開発

松宮 一道（東北大学 電気通信研究所 ブレインウェア研究開発施設　准教授）

阿部 浩明（広南病院リハビリテーション科　兼　東北大学大学院肢体不自由学分野 非常勤講師）

関口 雄介（東北大学病院リハビリテーション部 兼 東北大学大学院肢体不自由学分野 非常勤講師）

研究項目 C02-1

芳賀信彦・四津有人（東京大学）：固有知覚障害による運動障害患者研究

花川隆（国立精神・神経医療研究センター）・北佳保里（千葉大学）：神経疾患による運動障害患者研究

横井浩史・杉正夫（電気通信大学）：脳卒中による運動麻痺患者研究

石黒章夫・大脇大（東北大学）：感覚モダリティ変換装具の開発と適用試験

古屋 晋一（上智大学 理工学部 情報理工学科 准教授）

上原 一将（国立精神・神経医療研究センター 脳病態統合イメージングセンター 外来研究員）

## III.　研究成果

本年度の具体的成果については，各研究項目の報告書にて詳しく述べることとし，ここではその概要をピックアップして紹介する．

C01-1：脳内身体表現の変容を用いたニューロリハビリテーション

研究代表者の出江（東北大学）らのグループは，刺激検出反応課題を通して，健常者および片麻痺者の上肢の近傍とその周辺における刺激検出に要する時間を測定，比較することで，四肢の使用頻度と身体の注意量の関係性について検討を行った．また，研究分担者の稲邑（国立情報学研究所）のグループは，没入型仮想空間(VR)を用いたモデルベーストリハビリテーションを利用して実際に患者へ介入を行うための効果的なターゲット動作を健常者から収集する実験系の構築を行った．

C02-1：感覚入力への介入を用いた姿勢・歩行リハビリテーション

本年度は，各グループとも筋シナジーを計測するための機器整備を終了し，更に統合的な脳機能解析のシステム構築を行った．先天性無痛無汗症，パーキンソン病，脳卒中を対象に計測準備を終え，一部を開始した．介入として，経頭蓋直流電気刺激，機能的電気刺激に関する詳細な検討を行った他，感覚入力への介入として，感覚モダリティ変換装具等をパイロット的に使用し，改良を加えた．

## IV. 主な活動

・ 全体会議・シンポジウム

国立情報学研究所オープンハウス講演「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」

日時：2015 年 6 月 12 日

場所：国立情報学研究所

出席者：領域メンバー，一般 80 名

領域代表および領域研究者による講演，議論.

The 9th International Conference on Complex Medical Engineering (CME2015) OS: Neurorehabilitation

日時：2015 年 6 月 19 日

場所：岡山コンベンションセンター

出席者：領域メンバー，一般 20 名

領域研究者による講演および議論.

第 2 回身体性システム講演会「新しい身体運動学習理論に向けて」

日時：2015 年 6 月 26 日

場所：京都大学吉田キャンパス

出席者：領域メンバー他 50 名

領域研究者による講演および議論.

第 2 回領域全体会議

日時：2015 年 7 月 4 日

場所：杏林大学三鷹キャンパス

出席者：領域メンバー，100 名

領域代表，班代表，公募研究の研究代表者らによる研究発表.

IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy

日時：2015 年 8 月 25 日

場所：イタリア・ミラノ国際会議場

出席者：領域メンバー，一般 50 名

身体認知・身体意識，シナジー制御およびそのリハビリ応用に関する発表および議論.

IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany

日時：2015 年 9 月 28 日

場所：ドイツ・ハンブルグ国際会議場

出席者：領域メンバー，一般 30 名

身体認知・身体意識，シナジー制御およびそのリハビリ応用に関する発表および議論.

第 1 回身体性システム公開シンポジウム

日時：2015 年 10 月 25 日

場所：東京大学武田先端知ビル武田ホール

出席者：領域メンバー，一般 190 名

一般参加者を対象とした公開シンポジウムを開催．領域内研究者による講演，質疑応答.

第 39 回本高次脳機能障害学会学術総会・ワークショップ「sense of agency パラダイムによる新たなリハビリテーション戦略」

日時：2015 年 12 月 11 日

場所：ベルサール渋谷ファースト

出席者：領域メンバー，一般 2000 名

領域内研究者による講演，質疑応答.

第 2 回領域全体会議

日時：2016 年 3 月 7 日〜9 日

場所：花巻温泉ホテル千秋閣大会議室

出席者：領域メンバー，80 名

領域代表，班代表，各研究項目の研究代表者による H27 年度の研究成果報告．総括班評価者・招待講演者による特別講演．領域メンバーによるポスター発表.

・ 班会議

第 1 回 C01,02,03 合同班会議

日時：2015 年 7 月 23 日

会場：東北大学医学部

出席者：班メンバー他，合計 34 名

計画班研究者による活動報告，公募班研究者による研究計画報告および総合討論.

第 2 回 C01,02,03 合同班会議

日時：2016 年 1 月 28 日

会場：東北大学医学部

出席者：班メンバー他，合計 15 名

計画班研究者による活動報告および共同研究に関する報告，議論.

# C01-1 研究項目の研究成果報告

出江 紳一
東北大学大学院 医工学研究科

## I. はじめに

我々の脳内に構築される脳内身体表現は，通常外部から観察することが困難とされている．そこで幻肢と呼ばれる，四肢切断後に鮮明に知覚される切断肢の残存感覚に着目する．この幻肢という脳内にのみ存在する身体の変容過程を探ることにより，脳内身体表現を定量化・可視化する．この結果を用いて，脳内身体表現への介入によるニューロリハビリテーションの確立を目指す．

## II. 目的

近年医療技術の進歩や普及により，脳卒中による死亡率が減少する傾向にあるが，後遺症として運動機能等に何らかの障害を有する患者数は増大の傾向にある．このため，運動障害に対する効果的なリハビリテーションのニーズが高まっており，様々な手法が開発されてきた．しかし現状では，治療的な介入により機能の向上がみられても，日常生活において十分に発揮されないまま，次第に患側肢の不使用が恒常化していき，介入の効果が持続しないことが多い．このことは現状のリハビリテーションによる効果が，麻痺肢を実用肢のレベルにまで到達させられていないことに起因している．麻痺肢が実用肢となるには，単純に運動機能が改善するだけでは不十分であり，麻痺肢を自己の身体の一部と認識する神経基板が再構築され，環境に適応した運動指令が出力されることが必要である．

そこで，麻痺肢が実用肢として適切に表象されるようになるために，身体認知の側面からみた脳内身体表現として認知身体マッピング器を仮定し，その活動を観測する．認知身体マッピング器とは感覚情報や運動情報から，身体の状態や身体を取り巻く環境の状態を推定する神経機構のことである．患者の麻痺肢は認知身体マッピング器の神経活動で表現され，麻痺肢に対応した独特の身体保持感や運動主体感などの身体意識が体験されると考える．この認知身体マッピング器は可塑的に変容し，これに伴い身体意識も変化すると考えられるため，逆にこの認知身体マッピング器に積極的に介入すれば，リハビリテーションの効果を上げることが可能と考えられる．しかしながら，現状では認知身体マッピング器というものを客観的に計測する手法は確立していない．

本研究項目では，まず脳神経疾患および四肢切断者が呈する特異な感覚運動障害（脳神経疾患における身体軸の知覚の歪みや学習された不使用，切断における幻肢・幻肢痛等）に着目する．こうした様々な症状に対し，心理物理学的手法により，四肢の脳内身体表現を定量化・可視化し，脳内身体表現を理解する．またこの結果をもとに，脳内身体表現への介入による脳卒中後の運動障害に対しての新しいニューロリハビリテーションを確立する．

## III. 研究成果

本年度の具体的成果を以下に２つ挙げ，それぞれ概要を説明する．

### *A. 注意量を用いた脳内身体表現の状態推定*

身体およびその周囲空間には，身体外と比べ，空間的注意が強く向けられている．そのためこの空間における視覚刺激の検出処理が促進する現象が観測される（nearby hand effect）．この特性を利用して，四肢切断患者および脳卒中後片麻痺患者にとって患側肢およびその周辺空間において刺激検出反応時間課題による反応時間短縮を指標に脳内身体表現の描出を行う．このように描出されたものは，その時点での認知身体マッピング器が表現している身体の状態を反映し，患者の身体保持感の指標となると考えられる．

研究代表者ら（東北大学）のグループは，刺激検出反応課題を通して，身体の近傍とその周辺における刺激検出に要する時間を測定し，身体内外の注意量の違いを空間的にマッピングする試みを進めている．

昨年度に報告したデータに加え，片麻痺者の臨床データ測定を行い，健常成人における結果と比較検討を行った．机上に置いた自己の患側手および模造手上の 2 箇所のいずれかに視覚刺激をランダムに呈示し，視覚刺激の出現後に速やかにもう一方の手でボタン押しをするよう教示し，その反応時間を計測した．健常者に対し行った条件と同様に，手を正面に置く条件（Hand-L 条件），手を交差させて置く条件（Hand-R 条件）の 2 種の実験条件を設定したが，健常者ではいずれの条件でも，自己手上の視覚刺激に対する反応時間が模造手上の視覚刺激に対する反応時間より有意に短くなったのに対し，片麻痺患者の患側肢と机上の模造手上の視覚刺激に対する反応時間の間には，いずれの条件でも有意な差が認められなかった．また，片麻痺患者から計測したデータについて，運動機能等の様々な因子との相関を検討した結果，手指運動機能および発症後期間と麻痺手に対する注意の間に相関が認められた．これらの結果より，麻痺肢には健常者が通常身体に対して向けているような注意は向け

られていないこと，さらに，その注意量低下の直接の原因は脳損傷だけではなく，長期間に渡る不使用による二次的な要因によることが示唆された．

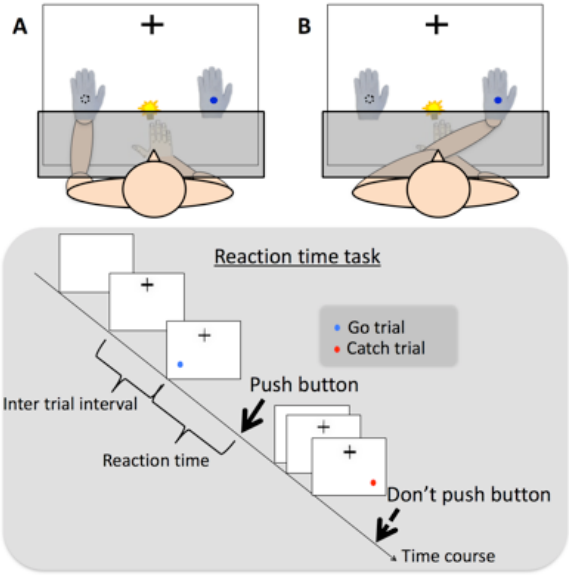



Fig. 1. 刺激反応検出課題の実験デザイン

### *B. ニューロリハビリテーションのための VR シミュレータおよびクラウド型運動データベースの開発*

研究分担者の稲邑（NII）のグループは，没入型仮想空間(VR)を用いたモデルベーストリハビリテーション構築を進めている．昨年度(H26 年度)では，患者の四肢の長さや視点の変更が可能な，没入型 VR インターフェースを持つニューロリハビリテーションのためのプラットフォームシステムを提案し，そのプロトタイプシステムを構築した．今年度(H27 年度)では，このプロトタイプシステムを更新し，最新版の動作計測デバイス（KinectV2）やヘッドマウントディスプレイ（Oculus DK2）を利用可能とし，ソフトウェアを公開した．さらに患者アバターに没入した視点での三次元映像を描画するソフトウェアを改良し，動作計測から表示までの時間遅延を，従来までの約 200～300[ms]から 100[ms]以下へと抑える事に成功した．動作遅延によって生じる運動主体感の鈍化はリハビリに悪影響を及ぼすが，おおむね 100[ms]の時間遅延であれば支障がないことが知られており，その基準をクリアした．

このシステムを活用し，実際に患者へ介入を行うための効果的なターゲット動作を健常者から収集する実験系を A01 班との共同研究により構築した．この実験系を通して，3D 没入感を伴う VR システム内で，アバター上の手の長さが，自己身体の知覚にどのように影響を与えるかを探る実験を進行中である．

また，模倣療法のためのクラウド型運動データベースとして，模倣療法で用いるターゲット動作および患者が行った追従動作の双方を記録，管理するシステムを考案しプロトタイプシステムを実装した．動作パターンは MySQL と呼ばれるデータベースシステムで管理されており，インターネット上のすべての端末から NII のサーバに対してデータを読み書き可能となっている．記録可能な動作の長さは 19 万時間(810 日分)であり，HDD の強化により，さらなるデータ量を保存可能である．さらに動作パターンのみならず，被験者の心拍数や EMG など，さまざまな生体信号を記録可能なフレキシブルな構造となっている．今後は VR インターフェースと連動させることにより，被験者の特性，実験条件などの情報も含め長時間の実験記録を領域全体で行い，脳内身体表現マーカーの抽出などの研究をサポートすることを検討する．

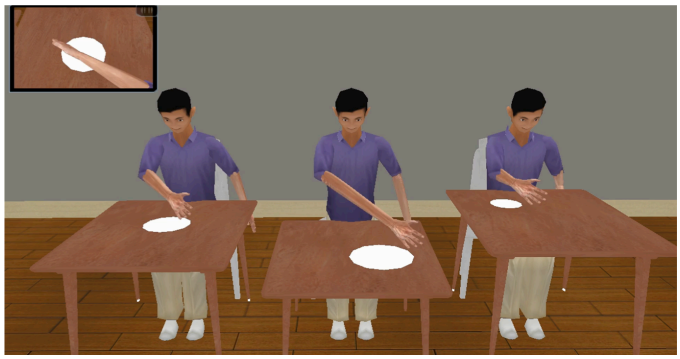


Fig. 2. 上肢の長さ変更を被験者に知覚させる試み

## IV. 今後の展望

本年度までの結果より，脳内身体表現を定量的に捉える試みにおいては，身体に向けられている注意は，物理的な身体よりも，より自己の身体であると強く感じるような主観的な身体に対して向けられていることが予測された．こうした結果に基づき，自己身体が自己の一部であると感じる身体所有感をパラメータとした実験系も順次導入し，VR シミュレータによる身体所有感の操作も組み合わせて計測・介入を実施していく．

## REFERENCES

[1] 大内田裕, 会津直樹, 出江紳一: 学習性不使用による脳内身体表現の変容, 第 9 回 Motor Control 研究会, 京都大学 2015

[2] T. Inamura, and Y. Oouchida: Neurorehabilitation based upon plasticity on body representations, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015

[3] T. Inamura: Immersive virtual reality system towards cloud based neurorehabilitation, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015

[4] 出江紳一，大内田裕: 一人称視点による模倣運動を利用した運動・感覚リハビリテーション, 第 39 回日本高次脳機能障害学会学術総会・ワークショップ「sense of agency パラダイムによる新たなリハビリテーション戦略」, ベルサール渋谷ファースト 2015

# C02-1 研究項目の研究成果報告

芳賀 信彦
東京大学 医学部附属病院

## I. はじめに

運動を適切に行うには，運動に先行・随伴して種々の感覚入力を姿勢・運動制御に反映させる必要がある．すなわち，運動障害には単に運動器障害だけでなく，各種感覚入力の障害も関わり，逆に感覚への介入により運動障害を改善できる可能性もある．

姿勢・運動制御の障害では，全身の筋の時間的空間的活動パターンが障害されており，筋シナジー制御の異常があると考えられる．すなわち，脳内身体表現の姿勢・運動制御の側面は，筋シナジー制御をマーカーとして捉えることができる．しかし運動障害をもたらす各種疾患について，筋シナジー制御がどのように変容しているかは分かっていない．また日々のリハビリテーションは Fast Dynamics (FD)に対する介入であるが，どのような介入がより効率的に Slow Dynamics (SD)をもたらすのか十分に分かっていない．本研究項目では，運動障害に伴う筋シナジー制御の異常を解明し，感覚介入による運動障害の改善を目指す新たなリハビリテーションを提案する．

## II. 目的

研究代表者らのグループ（芳賀・四津）の目的は，無痛無汗症患者の歩行障害を，筋シナジーをマーカーとしてとらえること．また，感覚障害を代償する介入により歩行障害が改善されるか，を明らかにすることである．

花川グループの目的は，運動障害と脳活動の計測・デコードに基づき，ジストニアやパーキンソン病などの神経疾患における脳内身体表現の変容の同定によるバイオマーカーを開発し，非侵襲脳刺激などの介入によるバイオマーカーの長期変化を明らかにすることである．

横井・杉グループの目的は，脳卒中患者の筋シナジー制御 SD の異常を明らかにすることであり，機能的電気刺激による筋シナジー制御 FD への介入および筋シナジー制御 SD に誘導される四肢の運動に生じる変化についての fMRI や fNIRS，筋電等の計測による解析を行う．

大脇・石黒グループの目的は，弱化あるいは欠損した感覚情報を別の感覚モダリティによって代償する「感覚モダリティ変換装具」の即時的および長期的効果を検証し，その過程における脳内身体表現の変容機序を解明することにある．

## III. 研究成果

### *A. 感覚障害による運動障害患者研究*

芳賀・四津グループは，先天性無痛症の歩容に異常があることをビデオによる観察で過去に報告してきた[1]．本研究では，歩容異常の背景に，筋シナジー制御の異常があるか否かを捉え，痛覚に代わる感覚介入をすることで，筋シナジー制御や歩容を改善できるかを検証する．代替感覚として，大脇・石黒グループの開発した足圧を音に変換する，感覚モダリティ変換装具を用いる．本年度は，先天性無痛症の疾患理解のために文献レビューを行い，最新の知見をまとめた [2]．また，筋シナジー計測のための機器整備を，C02 大脇・石黒グループ，B03 舩戸グループと共同で行い，動作解析・筋シナジー解析を同時に行えるシステムを構築した [3]．今後は患者での計測を開始し，筋シナジーの異常が感覚モダリティ変換装具による介入で改善するかを明らかにする．

### *B. 神経疾患における脳内身体表現の変容*

花川グループは，大脇・船戸グループと連携し，パーキンソン 病の歩行障害，特にすくみ足現象に関わるシナジー異常の測定に取り組むとともに，安静時機能結合 fMRI を用いた運動障害のバイオマーカー開発を行っている．本年度はシナジー計測のシステム構築を終え，パーキンソン病及び健常高齢者を対象とした計測に着手した．また連携研究者の古屋・北とともに，音楽家のジストニアを対象とし，経頭蓋磁気刺激，安静時機能結合 fMRI，課題 fMRI のデコーディング（A 班の内藤グループと連携），拡散強調 MRI による白質統合性の解析[4]などを統合的に用い，局所ジストニアによる脳内身体表現の変容の解明を目指すとともに，経頭蓋直流電気刺激（tDCS）を用いたニューロリハビリーテーション法の開発を行った．また、上記研究の予備的な解析結果と考察に基づきレビュー論文を執筆した[5-8]。

### *C. 脳卒中による運動麻痺患者研究*

横井・杉らのグループは，機能的電気刺激(FES)による筋シナジー制御 FD への介入を可能にするために，多点電極 FES システムを開発し，多様な手指姿勢を誘発できることを確認した．さらにこのシステムで手指姿勢制御のための筋シナジーを作り出す FES パターンを生成するための解析を行っている．また，fNIRS 計測と FES の併用による脳活動の SD の解析可能性を検討するために，

fNIRS 計測システムの構築および試験的運用を開始した．その有用性検証のために，健常者を対象に FES で FD への介入を行いながら 3 ヶ月間のレッグプレス運動を行い，誘導される SD を解析した．さらに片麻痺患者のためのサイクリング運動によるリハビリテーションにおける筋シナジー評価のために，筋電計測およびエコーによる筋活動測定と，関節角と踏力，クランク角計測による運動測定を行うシステムを開発し，transfer entropy の計算により SD の変化が評価可能であることを確認した．さらに運動訓練の効果を高めるため，目標運動との差異のフィードバックを FES により行う手法を確立するためにペダルの踏み込み運動を利用した検証実験を行った[9-13].

### *D. 感覚モダリティ変換装具の臨床効果の研究*

大脇・石黒グループは，提案した足底圧感覚を音情報としてフィードバックする感覚モダリティ変換装具 Auditory Foot [14]を改良すると同時に，C01 項目と協力し臨床効果について検証した．具体的には脳卒中および脳損傷による片麻痺患者 10 名を対象とし，計測条件として，装具のセンサ数を 2 個（踵と第 5 中足骨）とし，(i) 音フィードバックなし，(ii) 踵のみ，(iii) 第 5 中足骨のみ，(iv) 2 点でのフィードバック，の 4 条件で歩行の比較を行った．これまで，7 名の患者に対する適用結果について，(i)フィードバックなしと(iv)2 点の足底圧フィードバックの条件間において，支持脚中期及び支持脚後期の股関節最大伸展角度に優位な差が生じる結果を報告した[15]．また，特に，SIAS の下肢位置覚/触覚スコアが 0 点（脱失）の患者 1 名への力学的効果について解析した結果，音フィードバックありの条件において，床反力の前後成分のピーク値の上昇，支持脚期中の dynamic joint stiffness への寄与，運動力学的シナジー解析に基づく関節モーメント間の時間的協調パターンへの効果を確認した [16-21]．さらに芳賀・四津グループに協力し，先天性無痛症を対象とした計測の整備に関わった[2,3].

## IV. おわりに

本年度までに，C02 研究項目内，さらに A 班，B 班との議論や研究協力の結果，各種の運動障害を対象として筋シナジーを計測する準備を終え，一部で計測を開始した．また感覚モダリティ変換装具などの介入も開始している．次年度は計測を更に進めるとともに，介入による FD，SD の変化を捉え，感覚介入による運動障害の改善を目指す新たなリハビリテーション提案を目指す．

## REFERENCES


[1] Y. Zhang, N. Ogata, A. Yozu, and N. Haga, "Two-dimensional video gait analyses in patients with congenital insensitivity to pain," Dev Neurorehabil, vol. 16, pp. 266-70, Aug 2013.

[2] A. Yozu, N. Haga, T. Funato, D. Owaki, R. Chiba, and J. Ota, "Hereditary sensory and autonomic neuropathy types 4 and 5: Review and proposal of a new rehabilitation method," Neurosci Res (doi: 10.1016/j.neures.2015.10.011).

[3] A. Yozu, T. Funato, D. Owaki, and N. Haga, “Development of a measurement andreal-time display system for kinematics and muscle synergy of gait,” In: 26th2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, MHS 2015, Nagoya.

[4] K. Kita, K. Uehara, S. Furuya, R. Osu, T. Sakamoto, and T. Hanakawa, “White matter changes in pianists with focal hand dystonia.,” SfN2015, Chicago, USA.

[5] S. Furuya, and T. Hanakawa, “A curse of motor expertise: focal task-specific dystonia as manifestation of maladaptive changes in body representations,” Neurosci Res (doi: 10.1016/j.neures.2015.12.001).

[6] T. Hanakawa, “Organizing motor imageries,” Neurosci Res (doi: 10.1016/j.neures.2015.11.003).

[7] LM. Li, K. Uehara, and T. Hanakawa, “The contribution of interindividual factors to variability of response in transcranial direct current stimulation studies,” Front Cell Neurosci 9: 181 (doi: 10.3389/fncel.2015.00181).

[8] 東口 大樹, 花川 隆, “MRI や PET など神経画像による歩行機能検査,” Clinical Neuroscience 33(7): 793-795, 2015.

[9] M. Ohdaira, T. Kamisawa, S. Morishita, Y. Jiang, M. Sugi, O. Yamamura, and H. Yokoi, “fNIRS-based analysis of temporal changes of brain activation during long-term conditioning with functional electrical stimulation,” in Proc. of i-CREATe 2015, P4.3, Nanyang Technological University(Singapore), Singapore, Aug. 11-14, 2015.

[10] M. Ohdaira, T. Kamisawa, S. Morishita, Y. Jiang, O. Yamamura, and H. Yokoi, “fNIRS-based analysis of brain activation with knee extension induced by functional electrical stimulation,” in Proc. of IUPSCM 2015, SP008.4, Metro Toronto Convention Centre(Toronto), Canada, Jun. 7-12, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-19387-8_276

[11] 大平 美里, 佐藤 佑樹, 森下 壮一郎, 姜 銀来, 横井 浩史, “多点電極による刺激位置選択可能な機能的電気刺激システムの開発”, 日本神経回路学会全国大会(JNNS), 電気通信大学（東京）, 2015/9/3.

[12] 野櫻 舞, 森下 壮一郎, 大平 美里, 姜 銀来, 横井 浩史, “機能的電気刺激により誘発される筋活動と運動のモデル化のための相関係数に基づく距離を用いたクラスタ分析", 日本神経回路学会全国大会(JNNS), 電気通信大学（東京）, 2015/9/3.

[13] 桑原 昂士,大平 美里,杉 正夫,森下 壮一郎,横井 浩史, “運動トレーニングシステムのための表面電気刺激による情報提示手法の検討”, 2016 年度精密工学会春季大会講演論文集, 東京理科大学（千葉県野田市）, 2015/3/15.

[14] D. Owaki, Y. Sekiguchi, A. Ishiguro, and S. Izumi: Auditory Foot: A Novel Auditory Feedback System Regarding Kinesthesia, in Proc. of MHS2015, 229/230, Nagoya University (Aichi) (2015) : Best Poster Award

[15] 関口雄介，大脇大，本田啓太，田中尚文，石黒章夫，出江紳一：足底圧の聴覚フィードバックが片麻痺患者の歩行に及ぼす影響について，第 9 回モータコントロール研究会 採録，京都大学（京都） (2015)

[16] 大脇大，関口雄介，本田啓太，石黒章夫，出江紳一：足底圧感覚の聴覚フィードバックがもたらす片麻痺患者の歩行への即時的効果，第 28 回自律分散システムシンポジウム 予稿集，5/8，広島大学（広島） (2015)

[17] 堀切舜哉，大脇大，西井淳，石黒章夫：足底感覚情報を活用した二足歩行制御則の実験的検証，ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集，2A2-S04, 京都市勧業館（京都）(2015)

[18] D. Owaki, S. Horikiri, J. Nishii, and A. Ishiguro: “Load-dependent Interlimb Coordination for Bipedal Walking”, ICRA workshop , page not shown (http://biorob.epfl.ch/icra2015cpg), Seattle (USA) (2015)

[19] D. Owaki, S. Horikiri, J. Nishii, and A. Ishiguro: “Experimental Verification of Bipedal Walking Control Exploiting Plantar Sensory Feedback”, in Proc. of AMAM2015, page not shown, Boston (USA) (2015)

[20] 堀切舜哉，大脇大，西井淳，石黒章夫：足底感覚情報を用いた二足歩行制御の環境適応性に関する検証，SI2015 予稿集，468/471, 名古屋国際会議場（愛知）(2015) : 優秀演題賞

[21] 堀切舜哉，大脇大，西井淳，石黒章夫：「手応え関数」に基づく適応的二足歩行制御，自律分散システムシンポジウム資料，116/119, 広島大学（広島）(2016)

# C03-1 研究項目の研究成果報告

濱田　雅
東京大学医学部附属病院神経内科

***Abstract*—本研究項目の目的は神経修飾法による新しい運動障害治療の開発である。強力な神経修飾法である QPS を用いて運動障害疾患の治療を確立するため、今年度は QPS の効果のばらつき具合を明らかにした。また神経修飾法による行動指標への効果を検討し、更に歩行への影響を見るために歩行解析システムの構築を行った。これらの知見をもとに来年度以降は実際の運動障害の治療を視野に入れ神経修飾法による歩行を含む行動指標への影響を検討する予定である。**

## I. はじめに

脳の可塑性を誘導できる非侵襲的神経修飾法は、運動障害のリハビリテーション効果を更に向上させる介入的方法として、活用が期待されている。何故なら脳内ネットワークは運動障害を改善させるためにシナプス可塑性を利用した変容/適応を起こしているからである。したがって非侵襲的神経修飾法による運動機能障害回復の治療戦略としては、シナプス可塑性に類似した刺激終了後の効果を誘導することができる反復経頭蓋磁気刺激法（repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS）により、運動障害による脳内ネットワークの変容・適応をより効果的に促通することが理論的には考えられる。

しかしながらこれまでの rTMS を用いたの臨床研究では運動機能障害回復効果は弱く個人ごとにばらつきが大きい。これはまず rTMS 自体の効果がばらつくためであることがあげられる。

また神経修飾法の効果測定自体にも問題がある。すなわち様々な神経修飾法の短期・長期効果いずれでも、従来はもっぱら一次運動野刺激による運動誘発電位（MEP）の変化について研究されてきた。しかし問題は(1)MEP は錐体路の興奮性の一指標にすぎず、錐体路以外の運動制御に重要な網様体脊髄路・赤核脊髄路などの興奮性変化は不明である。動物実験では非侵襲的脳刺激は錐体路系と網様体脊髄路系には反対の効果（それぞれ興奮と低下）をもたらすことが近年明らかになった（Bolzoni et al.,J Physiol, 2013）。同様にヒトでも、運動制御に関わる系には MEP とは異なる効果をもたらしている可能性がある。そこで実際の運動制御に重要である運動エングラムを反映する行動指標測定系により、磁気刺激の効果を測定することが重要である。

## II. 目的

本研究では神経修飾法による新しい運動障害治療の開発を目的とする。そのため本研究では強力な rTMS 法である、申請者が開発してきた Quadripulse stimulation (QPS)を利用することとした。QPS は刺激間隔を調整することでシナプス可塑性の長期増強・抑圧に類似した効果を誘導できる[1,2]。これまでの経験では QPS は多くの被験者に同様の効果をもたらすことが可能であり、ばらつきが少ない印象であった。しかし、本当に QPS の効果にばらつきが少ないかについては未検討であった。したがって本年度は QPS のばらつきを検討することとした。

また神経修飾法の効果測定の問題点については、行動指標測定系の構築を行うことを目的とし、まず小脳適応学習の一つである gain adaptation 測定系の確立と、小脳学習に対する rTMS による効果を検討した。さらに将来的な治療応用の際に、定量的解析がむずかしい歩行についても歩行解析システムを構築することを目的とした。

## 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.* QPS のばらつき具合の検討

研究代表者らのグループは，QPS の効果のばらつきを健常成人 35 名で検討した。QPS は LTP 様効果をもたらす刺激間隔 5ms（QPS5）と LTD 様効果をもたらす 50ms を使用した。QPS 前後で MEP を測定し効果を判定した。結果を図に示す。

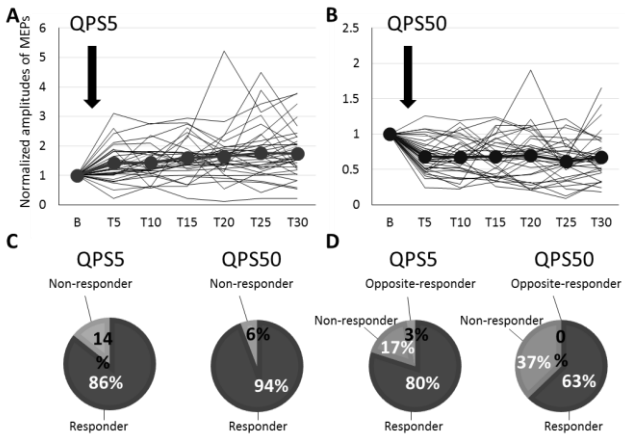



Fig. 1. QPS による個々の反応曲線と応答プロファイル

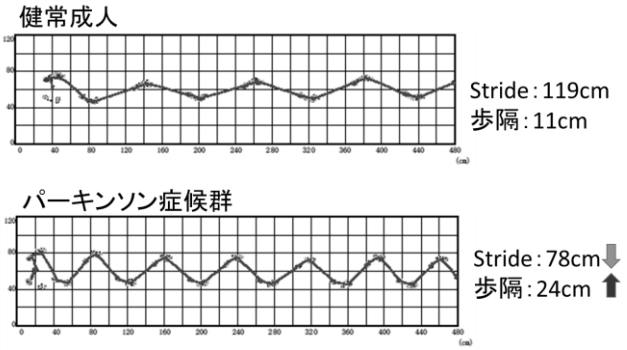
QPS では図 A,B に示すように多くの被験者で QPS5 で LTP 様効果,QPS5 で LTD 様効果がもたらされた。図 C は response profile である。QPS5 では 86%の被験者が LTP 様効果を示し、QPS50 では 94%の被験者で LTD 様効果が示された(図 C, D)。他の rTMS プロトコールではばらつきが大きく、被験者の半数しか期待通りの反応を示さないことが明らかになっており[3]、それに比して QPS は安定した効果を誘導できることを証明できたと考えられる。本研究成果を Brain Stimulation 誌に発表した[4]。

*B.* 運動学習システムの構築と神経可塑性による影響：小脳適応に対する影響

連合性対刺激法(PAS)は，正中神経の電気刺激と対側運動野への磁気刺激のペア刺激を繰り返すことで，脳の可塑性変化をもたらす手法であり，刺激間隔 20～25ms では LTP 様可塑性が誘導できる．今回，随意収縮下で PAS を加えた場合の運動誘発電位 (MEP)とモデルベース運動学習の成績の変化について健康成人 16 名で検討した．その結果，刺激間隔 25ms では，誘導電流を後向きとした PAS では MEP 振幅は上昇し，前向き PAS では MEP 振幅は不変だが，学習成績はいずれの方向でも悪化した．一方，刺激間隔 20ms では，後向き PAS で MEP 振幅及び学習成績はいずれも不変であった．これらの結果より，PAS の MEP への効果は誘導電流依存的であるが運動学習への効果は誘導電流でなく刺激間隔依存性であることが示唆された．既報告[5]では誘導電流の方向性が重要であることが示唆されていたが、実際は刺激間隔がより重要な因子であることが明らかとなった。また既報告では異なる使用依存性学習では PAS は学習を促通することが明らかとなっている[5]。これらの知見から運動学習に対する効果は一様ではなく、また目的とする運動学習次第で、神経修飾法のプロトコールパラメタを最適化する必要があることが明らかとなった。すなわち、運動障害治療に対して神経修飾法を利用する場合には、改善を目的とする運動障害ごとにプロトコールのパラメタの詳細な設定をする必要があることが示唆された。これはすなわち運動学習自体が様々な形で脳内に表現されておりその機構を理解することが重要であることを強く示唆している。

*C.* 歩行解析システムの構築とパーキンソン症候群患者での歩行測定

運動障害において歩行障害は一つ重要な臨床指標である。歩行についてより客観的な測定を目指すため C02 計画班との共同研究にて本年度から歩行解析システムを構築しパーキンソン症候群を呈する患者において試験的に歩行解析を実施した。使用したシステムは圧センサーシート（ウォーク Way MW-1000（アニマ社）：120 x 480 cm）である。歩行の時間・距離因子の評価のみならず圧計測により設置部位や足圧中心の軌跡も評価可能である。さらに通常の 4 倍のサイズのシートを用いることでより長距離での評価（進行方向のブレなど）が可能となる。下図は健康成人とパーキンソン症候群の歩行の差である。パーキンソン症候群ではストライドの減少、歩隔の増加が認められており、歩行障害を定量的に評価することが可能となっている。




## IV. おわりに

最後に本年度の成果をまとめ，次年度以降の展望を述べる。

本年度は、本研究項目で主として使用予定である神経修飾法 QPS のばらつき具合を検討し、予想された通り比較的ばらつきが少なく安定した長期増強・抑圧類似効果を誘導できることを示した。また神経修飾法による運動学習の効果は、運動学習自体が脳内にどのように表現されているかを十分に考慮したうえで使用する必要性があることを示した。さらに歩行解析システムを構築し試験的に運動障害患者で歩行解析を行った。

次年度以降には、まず当初予定していた通り多数部位同時刺激によるネットワークモデュレーションを試験的に行う。また運動学習は誘導電流方向依存的ではなかったものの、他の運動学習では誘導電流依存性が認められる可能性があるため、それを検討する。さらに神経修飾法の MEP に対する効果に誘導電流依存性があるかどうか検討する。最後に QPS などの神経修飾法を用いて運動障害患者における歩行にどのように影響があるか検討することとする。

## REFERENCES

[1] M. Hamada, et al. Bidirectional long-term motor cortical plasticity and metaplasticity induced by quadripulse transcranial magnetic stimulation. J Physiol 2008;586(16):3927-47.

[2] M. Hamada, et al. Primary motor cortical metaplasticity induced by priming over the supplementary motor area. J Physiol 2009;587(Pt 20):4845-62.

[3] M. Hamada et al. The role of interneuron networks in driving human motor cortical plasticity. Cereb Cortex 2013;23(7):1593-605.

[4] K. Nakamura, S.J. Groiss, M. Hamada, et al., Variability in response to quadripulse stimulation of the motor cortex. Brain stimul, in press

[5] M. Hamada et al., Two distinct interneuron circuits in human motor cortex are linked to different subsets of physiological and behavioral plasticity. J Neurosci 2014;34(38):12837-49.

# C03-2 研究項目の研究成果報告

島 圭介
横浜国立大学 大学院工学研究院

***Abstract*—脳卒中や脊髄損傷による片麻痺患者のリハビリテーションにおいては，患者と療法士双方の円滑なコミュニケーションが必要不可欠である．ただし，患者個々の関節運動に必要な筋収縮状態を療法士が適切かつ定量的に評価・訓練を実施することは非常に難しい．我々は効率的なリハビリテーションと運動学習支援の実現を目指し，機能的電気刺激と筋電位のパターン識別を組み合わせて被験者の筋収縮状態を制御することで動作の伝達と訓練が可能な新しいリハビリテーションシステムを提案した．本年度は，1) 学習時に想定していないクラスの確率密度関数を混合正規分布モデルとして表現し，生体信号から高精度な動作識別を可能とするニューラルネット理論の構築，2) 電気刺激と関節運動の関係性を表現する刺激モデルと関節運動を任意に制御する方法論の確立，そしてこれらの知見を利用して 3) 2 者間で関節運動，筋収縮状態を伝達可能な方法論の開発を行った．これにより，様々な部位の関節運動リハビリテーションにおける情報伝達を可能とし，運動学習支援のための基盤を整えた．**

## I. はじめに

関節運動のリハビリテーションにおいては，療法士は患者の残存する筋収縮能力や関節可動域などを適切に把握すること，自然な運動に必要な筋収縮の状態を患者に指示すること，患者の随意運動の意思を正確に読み取って適切に介助することなどが求められる．ただし，これらの評価，指示，介助は口頭による伝達を実施するか，あるいは患者の筋付近の皮膚を触る，たたく等の手技によって行う必要があり，客観的かつ定量的な実施が困難であるという問題がある [1]．そのため，リハビリテーションにおいて患者と療法士双方の情報伝達を円滑にし，運動学習を支援できる方法論の確立が必要である．

## II. 目的

本研究の目的は，関節運動リハビリテーションにおいて適切な筋収縮状態，力情報，タイミングを療法士と患者間で相互伝達可能とし，運動学習を効果的に支援する方法を確立することである．本年度はまず筋電位 (Electromyogram : EMG) を用いた筋収縮状態の評価と多チャネル電気刺激を組み合わせ，ヒト-ヒト間で筋の収縮状態と関節運動を伝達するヒューマンヒューマンインタフェースを提案した (Fig. 1)．提案法では，多チャネルの EMG を被験者から計測し，関節運動に伴う筋協調状態と発揮力の情報を抽出するとともに，ニューラルネットを用いて動作を推定する．推定した動作と筋収縮情報，力情報は電気刺激モデルに基づいて別の被験者に多チャネル電気刺激として伝達する．これにより，2 者間で筋収縮，力，関節運動の情報伝達が可能となり，リハビリテーションをはじめとする様々な運動学習・訓練の支援が期待される．

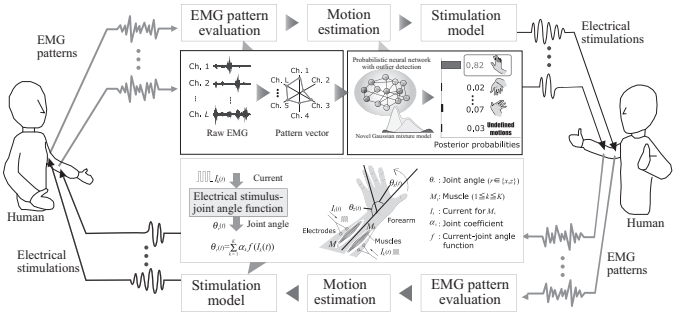
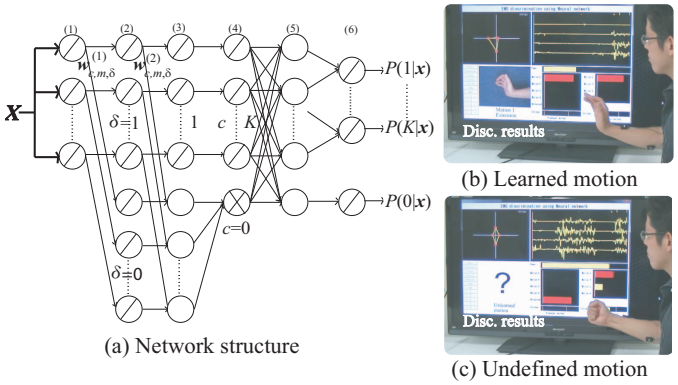



Fig. 1. Concept of the proposed EMG-based human-human interface using FES




(a) Network structure

(b) Learned motion

(c) Undefined motion

Fig. 2. Probabilistic neural network structure with anomaly detection [4]

## III. 研究成果

### A. 高精度な動作推定と誤動作防止を実現するニューラルネットの開発

電気刺激を用いて筋収縮情報を伝達する際には，学習器の誤識別が生じた場合に予期しない刺激が加えられてしまう問題がある．このため，EMG 信号から高精度に動作を推定できるだけでなく，誤識別を防ぐ機構が必要不可欠である．

本研究では，我々が提案する新たな混合正規分布モデル [3] に基づく未学習クラス推定ニューラルネット [4] を提案し，EMG 信号の識別精度を評価した (Fig. 2)．提案法は余事象分布に属するデータを学習分布から推定可能であり，図のようにあらかじめ学習させた動作 ((b)) のみならず，想定していない動作 ((c)) についても高精度に判別が可能である (平均識別率：$91.0 \pm 17,8$[%])．

### B. 電流–関節角度特性を考慮した電気刺激モデルの提案

関節運動は複数筋の協調的な収縮によって引き起こされ，電気刺激量と筋収縮量は非線形特性を有することが知られ

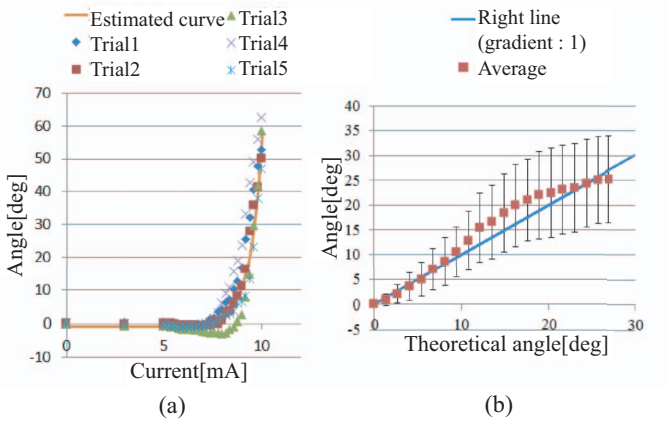



Fig. 3. Characteristics of the joint angle and the current [5]

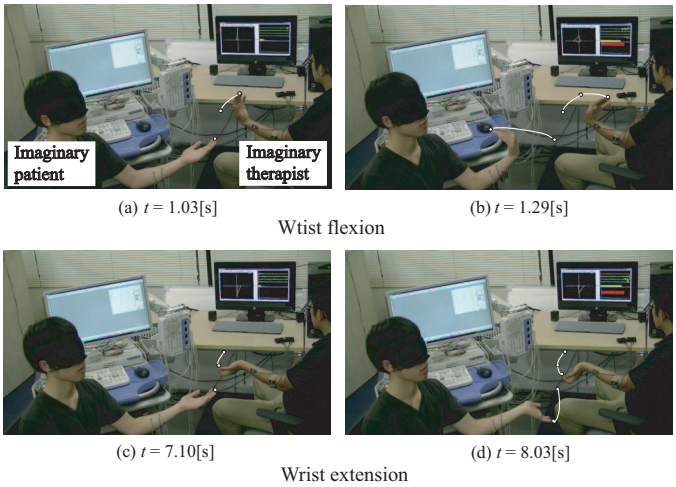



Fig. 4. A series of photos during motion control experiments in human–human condition [5]

ている [2]. Fig. 3(a) に被験者 A に対して電気刺激を与えた際の関節角度の計測結果の一例を示す．図は掌屈の主動作筋である撓側手根屈筋を対象とした際の結果をプロットしている．電流量に対して関節角度が指数関数的に増加する非線形特性を示していることから，関節角度と電流量の関係を次式（$a, b, c, d$ は実数パラメータ）で表現し，同式の逆関数を用いることで任意の関節角度を引き起こさせる電気刺激を生成して関節運動を制御できることを示した（理論値と実測値の相関係数 0.995）[5].

$$\theta(t) = ae^{b(I(t)-c)} + d \tag{1}$$

### C. *FES* と *EMG* 信号を利用した動作伝達法の実現

提案システムを用い，(1) 一方の被験者の筋収縮状態を他方の被験者に伝達 (ヒト–ヒト条件)，(2) 一人の被験者の前腕に対し，片側の腕の筋収縮状態を反対側の腕に伝達 (ミラー条件)，(3) 一人の被験者の僅かな動きを推定・増幅して同一部位に伝達 (増幅条件)，(4) ヒト–ヒト条件下における物体の運搬タスクの伝達 (運搬条件) という 4 つのケースについて有効性を検証した．それぞれのケースにおいて，筋収縮情報を評価する対象の前腕部に EMG 計測用の電極を取り付け，各動作時の EMG パターンをニューラルネットに学習させる．対象動作は，(1)–(3) では手首の掌屈，背屈，尺屈の 3 動作，(4) では肘関節の伸展動作と拇指の対立と示指の屈曲によるピンチ動作とした．刺激電極位置は解剖学的知見と予備実験により試行錯誤的に決定し，前腕および上腕にそれぞれ取り付けた．また，電気刺激を受ける被験者の被伝達部位（被刺激部位と呼ぶ）に対しては，あらかじめ電流と関節角度の関係性を調査して構築した刺激モデルに基づいて決定した位置に電極を配置した．

Fig. 4 に (1) ヒト–ヒト条件下の実験結果の一例を示す．図では，伝達側被験者が実施した手首関節動作をニューラルネットが正しく推定し，被伝達部位に前腕筋群に電気刺激が与えられ，伝達側被験者と同じ動作が誘発されている．図より，伝達される関節角度に誤差は含むものの，関節運動に必要な筋協調収縮パターンを 2 者間で伝達可能なことが示される．提案法は被伝達部位を別の被験者に限定する必要はなく，例えば同一被験者内での右腕から左腕，左足から右足，あるいは上腕から下肢など，様々な部位から部位への情報伝達が可能である [5]–[8].

## IV. おわりに

本年度は EMG 信号を用いて計測・評価した筋収縮パターンと多チャネルの電気刺激を組み合わせることで，ヒト - ヒト間で関節運動と筋収縮状態を伝達可能な方法論を構築した．次年度は，提案法を用いた運動学習効果について検証し，身体機能，脳機能に及ぼす影響を評価・検証する．さらに，各班との連携研究を推進することによって提案法が脳内の身体モデルに及ぼす影響を評価することを目指す．

## REFERENCES


[1] 島 圭介, 植野 岳, Erhan Akdogan, 辻 敏夫, 長谷川 正哉, 大塚 彰, “ EMG 信号と触覚刺激を用いた Human-Human Interface ” 計測自動制御学会論文誌, Vol. 48, No. 9, pp. 528-535, 2012.

[2] 松居 和寛, 菱井 康生, 前垣 和也, 山下 雄人, 植村 充典, 平井 宏明, 宮崎 文夫, “ 多チャンネル型機能的電気刺激によるヒト肘関節運動の平衡点制御 - 等尺性環境下における検証 - ”計測自動制御学会論文集, vol. 50, no. 11, pp. 755-562, 2014.

[3] K. Shima and T. Aoki, “ A Novel Classification Method with Unlearned-class Detection Based on a Gaussian Mixture Model, ”Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 3747-3752, 2014.

[4] 青木 貴裕, 島 圭介, “外れ値検知機能を有する未学習クラス推定ニューラルネットと筋電位識別”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会論文集, pp. 399-402, 2015

[5] 今野 和樹, 島 圭介, 島谷 康司, “機能的電気刺激によるリハビリテーションを目的とした前腕動作制御法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集, 1P2-M09, 2015

[6] 今野 和樹, 島 圭介, 島谷 康司, “機能的電気刺激と EMG 信号を利用したダイレクトリハビリテーション”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会論文集, pp. 410-413, 2015

[7] 島 圭介, 島谷 康司, “運動機能リハビリテーションのための機能的電気刺激に基づく筋電位駆動型ヒューマンヒューマンインタフェース”, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム講演論文集, pp. 3–4, 2016

[8] K. Shima, K. Konno and K. Shimatani, “Forearm Motion Control Using Functional Electrical Stimulation for Motor Function Rehabilitation,” Book of Abstract of 2015 RIC-IIT Workshop on Robotics and Interactive Technologies for Neuroscience and Neurorehabilitation, p. 51, 2015.

# C03-3 研究項目の研究成果報告

向野　雅彦、佐々　遼馬、松田　文浩
藤田保健衛生大学医学部リハビリテーション医学 I 講座
藤田保健衛生大学病院リハビリテーション科
藤田保健衛生大学医療科学部リハビリテーション学科

***Abstract*—近年、臨床においてバランス機能をシステムとして評価することの重要性が指摘されている。しかし、臨床においてはバランス機能の客観的評価法が乏しく、特に動作時のバランス機能評価については臨床スケールに頼っているのが実情である。システムとしてのバランス機能をより正確に理解するために、運動学的あるいは運動力学的な評価法の開発が望まれる。本研究の目的は、動作時の重心(COG)と足圧中心(COP)の動きから、動的バランス機能の客観的指標を開発することである。本研究では健常成人 5 名と脳卒中片麻痺患者 9 名を対象とし、ステップ動作時に三次元動作分析装置 KinemaTracer®(キッセイコムテック社)と床反力計(テック技販)を用いて動作中の計測を行った。指標値として、1 秒あたりの COG と COP の X 座標の差分の変化量(Averaged COP-COG subtraction value:ASV)を算出した。健常者と片麻痺者(麻痺側・非麻痺側)の指標値の比較、および片麻痺者の指標値と BBS との相関関係を検討した。片麻痺者の ASV は麻痺側・非麻痺側ともに健常者に比べ有意に小さい値を示し、さらに麻痺側・非麻痺側ともに BBS 得点と強い正の相関を認めた。麻痺側・非麻痺側の間には有意差を認めなかったが、麻痺側が非麻痺側よりも低値を示す傾向にあった。以上の結果より、COG-COP の関係性がバランスのコントロール能力を反映している可能性が示唆された。今後さらに妥当性の検証を行い、客観的評価指標としての有用性を検討する必要がある。**

## I. はじめに

先行研究において、バランス機能は複数の機能からなる複合的なシステムであることが指摘されている [1]。様々な疾患におけるバランス機能の障害に対しても、臨床的な知見から作成されたモデルが障害のメカニズムの説明に用いられているものの、まだこのようなモデルについて客観的な計測に基づいた検証が十分になされているとは言えない。特に動作中のバランス維持の仕組みについては、計測の手段が限られることから、臨床スコアによる評価が中心となっており、モデルの検証そのものが困難であるのが現状である。

本研究では、三次元動作分析と足圧測定を同時に行うことにより、動作中のバランス維持機能の客観的な評価指標を作成することを目指す。

## II. 目的

本研究では動作解析装置による体幹マーカーの動揺の測定および足圧計による足圧の測定を同時に施行し、被検者のバランス制御機能を測定する手法の確立を試みる。特に動作時において、体幹の動揺に対してそれを抑制する身体の反応のパターンがどのようにみられているかを計測によって明らかにし、制御能力そのものを適切に評価する仕組みを作り、身体性システムの理解のベースとなる知見を得ることを目標とする。

## III. 研究成果

本年度は計測プロトコルの作成と計測の妥当性について予備的な検討を行った。

### *A. 計測プロトコル作成*

研究代表者らのグループは、三次元動作解析およびフォースプレートの同時測定によるステップ動作時の側方バランスに対する評価の仕組みを作成した。

側方のバランス制御は力学的には重心(COG)と足圧中心(COP)の側方の位置関係が変化することによって加速度が発生し、制御されることで説明されている [2]。本研究では、三次元動作解析装置 Kinematracer およびフォースプレートを使用し、足圧と三次元計測を同期的に行った。マーカーは歩行分析研究会の推奨する設定[3]に基づき、１０箇所にマーカーを貼付した。重心の計算は、マーカーより身体の７つのセグメント（体幹および両側の大腿、下腿、足部）の中心を推定し、それぞれの相対重量を体幹 0.66、大腿 0.1、下腿 0.05、足部 0.02 と仮定して、仮想重心位置を算出した。課題動作としては、５秒の立位、１０回のステップ、５秒の立位の順番で施行し、側方への仮想重心位置の変位と足圧中心の側方への変位を記録することとした。

ステップ時の体幹の側方への動揺を制御するためには、重心の外側への移動に対してブレーキにあたる逆方向の加速度がタイミングよく発生することが必要である。この逆方向の加速度は、基本的には足圧中心が重心よりも外側に位置することで発生する。そのため、本研究では逆方向への加速度発生の契機となる踵接地から対側の踵接地までの期間において足圧中心が重心よりもどれだけ外側にあったかを一つの指標として妥当性を検討する

こととした (Averaged (|COP|-|COG|) subtraction value: ASV)。

### *B. 脳卒中片麻痺者における測定とバランス機能評価としての妥当性の予備的な検討*

以上の計測プロトコルに従い、脳卒中片麻痺患者9例と対照群として若年健常者5例を対象に、予備的な検討を行った。片麻痺患者における測定指標の妥当性検討のため、リハビリテーションの臨床においてよく用いられるBerg Balance Scale (BBS)[4]を比較対照として採点した。

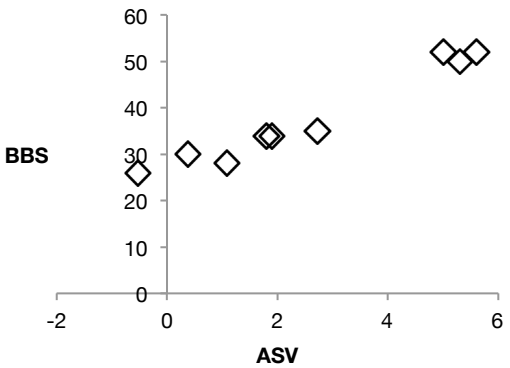
まず、COP と COG の関係性と COG の挙動との関連を検討するため、COP と COG の位置の側方成分の差分（COP-COG）と COG の加速度との相関を求めた。14 例中 13 例において、両者は強い逆相関の関係にあり、先行研究と同様 COP と COG の位置関係と COG の挙動との強い関連が示唆された (Table 1)。一方、BBS が最も低い一例においては相関が比較的弱く、COG の加速度パターンに COP-COG 関係以外の要因が関与している可能性が示唆された。

さらに、症例ごとに麻痺側の踵接地から対側の踵接地までの間の ASV を算出し、BBS との相関を検討した (Figure 1)。本検討の範囲では両者に高い相関関係が得られており、ASV が動的なバランス機能の指標としての妥当性を備えている可能性が示唆された。今後症例を重ね、詳細な検討の必要があると考えられる。

TABLE I. COG の加速度と COP-COG の差分との相関

| | ***Correlation coefficient*** | ***BBS*** |
|---|---|---|
| Pt 1 | −0.49 | 26 |
| Pt 2 | −0.85 | 28 |
| Pt 3 | −0.84 | 30 |
| Pt 4 | −0.94 | 34 |
| Pt 5 | −0.93 | 34 |
| Pt 6 | −0.94 | 35 |
| Pt 7 | −0.96 | 50 |
| Pt 8 | −0.91 | 52 |
| Pt 9 | −0.90 | 52 |
| Hs 1 | −0.91 | |
| Hs 2 | −0.86 | |
| Hs 3 | −0.90 | |
| Hs 4 | −0.92 | |
| Hs 5 | −0.93 | |

Fig. 1. BBS と ASV の相関




## IV. おわりに

本研究では、三次元動作分析と足圧測定を行い、計算による重心の側方位置と足圧中心の側方位置との関係性から姿勢制御能力の推定を試みた。予備的検討の範囲では、麻痺側の踵接地から対側の踵接地までの COP と COG の位置の差分は BBS と相関する傾向が得られた。

一方で、BBS が 20~30 の範囲にある患者では、非常に低い値を取っており、これらの患者における重心の動きの制御に対して、COP と COG の位置のギャップにより発生する加速度の寄与は少ない可能性がある。これらの患者におけるバランス制御の理解には、制御システムに関するより多面的な理解が必要と考えられる。

来年度は、より多くの症例で測定の信頼性と妥当性を検討するとともに、足圧中心の移動速度や反応時間、体幹の代償動作等、バランス機能に関わる機能を指標化することによって、バランス機能をより多面的にとらえることのできる仕組みの構築に取り組む。さらに B02 班との連携によって、バランス機能障害の回復過程、介入による変化のシミュレーションが可能となるよう姿勢制御システムのモデル化を試みる予定である。客観的な計測を基礎とした姿勢制御システムのモデル化により、将来的に脳科学分野との連携のベースとなる知見を得ることを目標とする。

## REFERENCES

[1] Horak, F.B., Wrisley, D.M. & Frank, J., 2009. The Balance Evaluation Systems Test (BESTest) to differentiate balance deficits. *Physical therapy*, 89(5), pp.484–98.

[2] Winter, D.: Human balance and posture control during standing and walking. Gait. Posture. 3, 193–214 (1995)

[3] Ehara Y, Y.S., 2001. *Introduction to body dynamics-analysis of standing up movement*, Tokyo: Ishiyaku Publishers (in Japanese)

[4] Berg, K.O., Maki, B.E., Williams, J.I., Holliday, P.J., Wood-Dauphinee, S.L.: Clinical and laboratory measures of postural balance in an elderly population. Arch. Phys. Med. Rehabil. 73, 1073–1080 (1992

# C03-4 研究項目の研究成果報告

森岡　周
畿央大学健康科学部

***Abstract*—身体失認と失行症における身体性の変容を，映像遅延装置システムを使用して評価した．その結果，失行症では，遠心性コピーに特異的な障害があることが示唆された．また，映像遅延装置システムによる生じる感覚運動の不協応は，周期運動中の筋活動を変化させるだけでなく，それに伴った身体性の変容ももたらすことを明らかにした．**

## I. はじめに

脳卒中後の高次脳機能障害である半側身体失認や失行症，あるいは脳卒中後片麻痺では，身体性の変容（身体所有感，運動主体感の障害害，異常感覚）が生じていることが指摘されている．しかしながら，これら症候に対して，身体性の変容を客観的かつ定量的に捉える評価法はない．

## II. 目的

映像遅延装置システムを用いて，身体性の変容を心理物理的および運動学的に定量化することを目的とした．研究Ａでは，半側身体失認と失行症における身体所有感および運動主体感の変容を，映像遅延装置システムを用いて定量的に捉えることを目的とした． 研究 B では，健常者を対象に，感覚運動の不協応によって生じる身体性の変容と関係のある筋活動を明らかにして，身体性の変容を運動学的に定量的に捉えることを目的とした．

## III. 研究成果

### *A.* 身体失認・失行症における身体性変容の定量的評価についての研究

対象は，脳卒中を罹患した患者 19 名であった．方法は，身体性評価として連携研究者の嶋田総太郎らが実装した映像遅延装置システム（Shimada et al 2009, 2010）を用いた感覚間不一致検出課題（触覚条件，受動運動条件，能動運動条件）を実施した（図 1）．各条件の不一致検出確率曲線から各条件の主観的等価点（point of subjective equality：PSE）とその勾配（a）を算出した．同時に脳卒中機能障害評価法（stroke impairment assessment set：SIAS）による運動機能評価と感覚機能評価，verbal asomatognosia and somatoparaphrenia Assessment と 7 件法による身体失認（身体所有感）評価，apraxia screen of TULIA （AST）による失行評価を実施した．

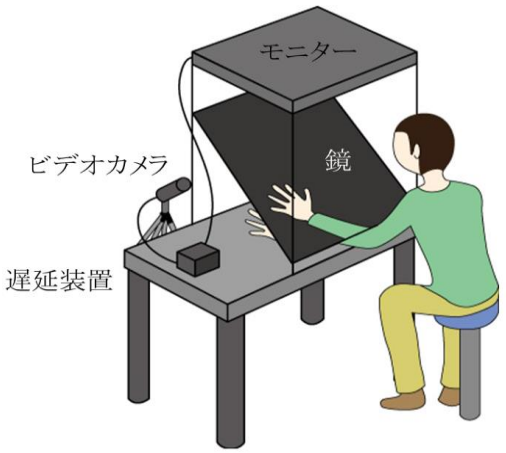



図 1. 映像遅延装置を用いた不一致検出課題

分析の結果，運動障害および感覚障害の有無によって PSE，a には有意差は認められず，運動障害および感覚障害の重症度と PSE，a の間には有意な関係は認められなかった（図 2，3）．一方で，身体所有感健常群の a と比較して，身体所有感低下群の a の有意な低下を認めた．また失行を有する群（失行＋群）の能動運動条件の PSE は，失行を有さない群（失行±群，失行－群）より有意に遅延しており，失行の重症度と能動運動条件の PSE には，有意な相関関係を認めた．

このことから，失行には遠心性コピーに特異的な障害があることが示唆された．

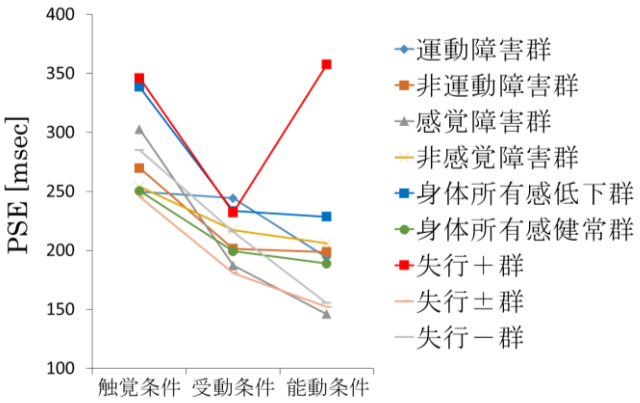



図 2. 各障害群における各条件 PSE

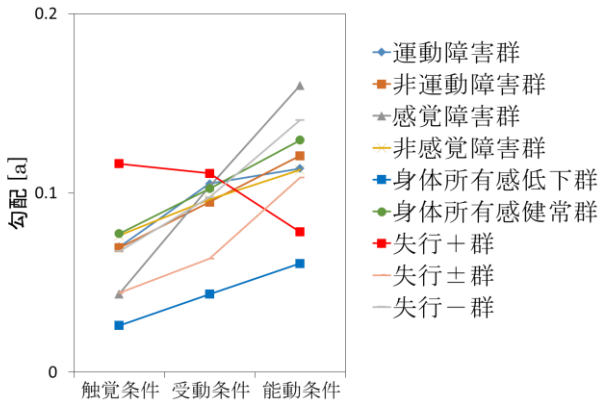



図 3. 各障害群における各条件 a

***B.*** 感覚運動の不協応が周期運動と主観的知覚に及ぼす影響についての研究

ヒトは運動指令とそれに対する感覚フィードバックの間に不一致が生じると過度な重さ知覚や異常感覚，さらには身体所有感の変容が生じることが報告されている．研究代表者らのグループは映像遅延システムを用いて，感覚運動の不協応が生じている時の周期運動の変化と主観的知覚（過度な重さ知覚・身体所有感の損失）との変化とそれらの関係について調査した．

対象は健常大学生 40 名として，運動指令に対して感覚フィードバックが遅延する環境を設けるために，連携研究者の嶋田総太郎らが実装した映像遅延システムを用いた（Shimada et al 2009, 2010）．映像遅延システムでは，被験者の手の映像に 5 水準の映像遅延 （0, 150, 250, 350, 600msec）を挿入し，それぞれの水準条件で手関節掌背屈運動時の撓側手根屈筋・撓側手根伸筋の筋活動を無線筋電計（DELSYS Trigno）で記録し，筋活動とピーク周波数を求めた．また，それぞれの水準条件における主観的知覚の変化を「自分の手ではないように感じた」，「動かしていると重いと感じた」という質問項目に対しての 7 段階のリッカート尺度で記録した．

その結果，筋出力の量的指標である積分値と周期運動のリズムであるピーク周波数は遅延時間増大に伴って低下した（図 4）．

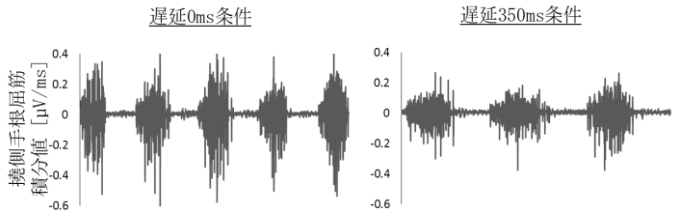



図 4. 時間遅延に伴う筋活動の変化

EMG データから算出されたこれらの指標を変数としてクラスター解析を実施し，被験者を 2 群に分類した．

その結果，分類されたクラスターA 群よりもクラスターB 群の方が遅延時間の増大に伴ってピーク周波数が低下していた．つまり，周期運動のリズムが緩慢になっていた．そして，両群における遅延時間増大に伴った身体所有感と重さ知覚の変化をロジスティック回帰曲線にフィッティングすると，クラスターB の方が重さ知覚の増大が大きいことが明らかとなった（図 5）．

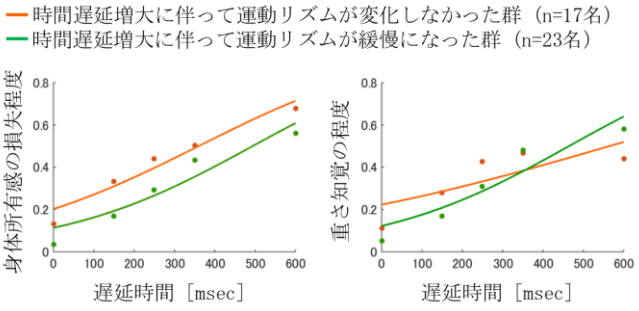



図 5. 時間遅延に伴う主観的知覚の変化

これらのことから，脳卒中片麻痺患者の愁訴にある「腕が重たい」などの重さ知覚の変調は，感覚運動の不協応による運動リズムの緩慢化と関係していることが考えられる．今後も引き続き主観的知覚の惹起させる運動パターンの特定化，主観的知覚の変調を訴える症例の運動計測によるキネマティックマーカーの作成に取り組む．

## IV. おわりに

映像遅延装置システムを用いて，失行症における遠心性コピーの特異的な異常を心理物理的に定量化することができる可能性が見出された．また，身体性の異常と関連する筋活動パターンの変化も見出すことができた．これらのことから，身体性の変容という現象を定量化することができる可能性が示唆された．今後は，映像遅延装置システムを用いた定量的評価の信頼性についてさらなる検証をするために，失行症あるいは身体所有感の損失が認められる症例での計測を継続する．それと並行して，身体性の変容を改善させ得るリハビリテーションアプローチを検討していく．

## REFERENCES

[1] S. Shimada, T. Suzuki, N. Yoda, T. Hayashi, “Relationship between sensitivity to visuotactile temporal discrepancy and the rubber hand illusion,” Neurosci. Res. Japan, vol. 85, pp. 33-38, August 2014.

[2] S. Shimada, K Fukuda, K. Hiraki, “Rubber hand illusion under delayed visual feedback,” PLoS. One. California, Vol. 9, pp. e6185, Jully 2009.

[3] S. Shimada, Y Qi, K Hiraki, “Detection of visual feedback delay in active and passive self-body movements,” Exp. Brain. Res. Vol. 201, pp. 359-364, March 2010.

うす緑の色紙はさむ

うす緑の色紙はさむ

# 2015 年度　活動報告リスト

1　日時：2015/4/2
　場所：杏林大学統合生理学教室
　名称：A01 打ち合わせ
　内容：MRI 内で用いる体部位位置計測システムについての打ち合わせ
2　日時：2015/4/6
　場所：東京大学本郷キャンパス
　名称：SoS 研究会
　内容：研究進捗の確認と本年度の課題についての議論
3　日時：2015/4/13
　場所：Skype
　名称：A02 項目研究ミーティング
　内容：研究進捗の確認と今後の検討課題について議論した
4　日時：2015/4/29
　場所：東大附属病院リハビリ室
　名称：研究ミーティング
　内容：計測機器のセットアップ
5　日時：2015/5/5
　場所：米国・ボルチモア、Johns Hopkins 大学・神経内科
　名称：研究打ち合わせ
　内容：脳皮質電位計測、データ処理方法に関する話し合い
6　日時：2015/5/11
　場所：Skype
　名称：A02 項目研究ミーティング
　内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
7　日時：2015/5/12
　場所：東京大学本郷キャンパス
　名称：SoS 研究会
　内容：運動主体感のモデル化に関する確認と今後の課題についての議論
8　日時：2015/5/16
　場所：福島県立医科大学
　名称：福島県てんかん懇話会
　内容：てんかん患者における脳内身体性システムの変容
9　日時：2015/5/18
　場所：大阪大学吹田キャンパス
　名称：大阪大学生物工学特別講義
　内容：脳内身体表現についての特別講義
10　日時：2015/5/20
　場所：Skype
　名称：A02 項目研究ミーティング
　内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
11　日時：2015/5/22
　場所：東大附属病院リハビリ室
　名称：研究ミーティング
　内容：装具のセットアップ
12　日時：2015/5/22
　場所：北陸先端科学技術大学院大学
　名称：A02-B01 研究打合せ

内容：小脳の解剖構造と小脳皮質・小脳核の神経活動、およびその順モデルとしてのモデル化に関する研究議論

13 日時：2015/5/29
場所：慶應義塾大学信濃町キャンパス
名称：SoA モデリング会議
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

14 日時：2015/6/2
場所：筑波大学
名称：研究打ち合わせ
内容：研究進捗の確認と今後の研究方針について議論した

15 日時：2015/6/3
場所：大阪大学吹田キャンパス
名称：大阪大学生命機能コロキアム
内容：身体図式の脳内表現を解説

16 日時：2015/6/10
場所：東大病院
名称：研究打ち合わせ
内容：歩行の筋シナジー解析システムのセットアップ

17 日時：2015/6/12
場所：一ツ橋講堂
名称：NII オープンハウス新学術領域研究セッション
内容：新学術領域研究の成果と今後の展開について，NII オープンハウスの併設イベントとして一般公開型の発表会を開催

18 日時：2015/6/25
場所：京都大学時計台講堂
名称：第 9 回モーターコントロール研究会・若手 OS「新しい身体運動学習理論に向けて」
内容：モーターコントロール研究会にて本領域の成果を講演するセッションにおける本領域の若手研究者三名による講演

19 日時：2015/6/25
場所：NICT 阪大キャンパス
名称：A02 項目研究打ち合わせ
内容：共同研究の検討課題の議論

20 日時：2015/6/25
場所：京都大学
名称：シンポジウム
内容：Super-passive language mapping combining real-time oscillation analysis with cortico-cortical evoked potentials for awake craniotomy
言語機能の脳内ネットワークの解読

21 日時：2015/6/26
場所：京都大学時計台講堂
名称：A01 項目研究打ち合わせ
内容： 共同研究の機器の進捗についての確認、課題の議論

22 日時：2015/6/30
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

23 日時：2015/7/3
場所：東京都医学総合研究所
名称：A02-B01 研究打合せ
内容：小脳の解剖構造と小脳皮質・小脳核の神経活動、およびその順モデルとしてのモデル化に関

する研究議論

24 日時：2015/7/3
場所：杏林大学・大木研究室
名称：A01 研究項目打合せ
内容：身体所有感の脳活動データの解析手法の検討

25 日時：2015/7/7
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

26 日時：2015/7/14
場所：東京大学本郷キャンパス
名称：SoS 研究会
内容：身体所有感と運動主体感の検証のための実験系についての議論

27 日時：2015/7/16
場所：慶應大学病院
名称：SoA 研究打ち合わせ
内容：SoA 数理モデル研究の進捗確認

28 日時：2015/7/22
場所：東大附属病院リハビリ室
名称：研究ミーティング
内容：共同研究

29 日時：2015/7/23
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

30 日時：2015/7/25
場所：CiNet
名称：取材
内容：週間ダイアモンドの取材を受け、7 月 25 日発売の週間ダイアモンド「特集 2 脳科学　解き明かされる神秘の世界」において、内藤が行ったネイマール選手に見られる効率的な運動制御の研究が紹介された

31 日時：2015/7/26
場所：京都大学
名称：A01 研究項目打合せ
内容：運動主体感の fMRI 研究の進捗状況について解析結果の議論

32 日時：2015/7/28
場所：慶應義塾大学医学部
名称：研究打ち合わせ
内容：共同研究の打ち合わせ

33 日時：2015/7/29
場所：NCNP　IBIC 棟
名称：A02-C02 共同研究打ち合わせ
内容：A02[廣瀬、内藤]-C02[花川、北、古屋]の共同研究を開始するにあたり、実験環境、実験手続きの確認及び予備実験

34 日時：2015/7/30
場所：東京大学柏総合研究棟
名称：高校生への説明
内容：私立高槻高校学生 59 名（含む引率教員 2 名）に対しての身体性システム科学の概要説明

35 日時：2015/7/30
場所：神戸国際展示場

名称：A02-2 項目研究打ち合わせ
内容：研究進捗の確認と今後の方針についての議論

36 日時：2015/8/3
場所：東大病院東研究棟
名称：C02-1 と C03-1 の共同研究ミーティング
内容：今後の共同研究の計画立案とスタートアップミーティング

37 日時：2015/8/4
場所：東京大学本郷キャンパス
名称：国際シンポジウム打合せ
内容：第 1 回国際シンポジウムの開催準備のための会議

38 日時：2015/8/4
場所：東京農工大学工学部
名称：B01 項目研究打合せ
内容：自己主体感と運動学習の相互作用についてモデルの立場からの議論

39 日時：2015/8/5
場所：北陸先端科学技術大学院大学
名称：A02-B01 研究打合せ
内容：運動制御の計算論に関する研究議論

40 日時：2015/8/6
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

41 日時：2015/8/17
場所：NCNP
名称：疾患のシナジー研究会議
内容：シナジー解析装置のセットアップ

42 日時：2015/8/17
場所：旭川医科大学
名称：A02, A03, B02 項目打ち合わせ
内容：研究の内容と進捗と今後の共同研究についての議論

43 日時：2015/8/18
場所：東大病院
名称：疾患のシナジー研究会議
内容：シナジー解析装置のセットアップ

44 日時：2015/8/18
場所：東大病院リハ部
名称：研究ミーティング
内容：研究についての今後の展望

45 日時：2015/8/18
場所：東大病院リハ科研究室
名称：歩行記述方開発ミーティング
内容：歩行の記述法の開発について特許出願も視野に入れた議論

46 日時：2015/8/19
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

47 日時：2015/8/19
場所：筑波大学付属病院
名称：MBR 勉強会
内容：運動学習やリハビリテーションに関わる研究報告、論文紹介および議論

48 日時：2015/8/20
場所：東北大学医学部
名称：C 班研究打ち合わせ
内容：共同研究の可能性についての検討・議論

49 日時：2015/8/22
場所：長野篠ノ井市民会館
名称：BINI perspective conference
内容：理学療法士を対象とした、感覚入力と運動制御の講演

50 日時：2015/8/24
場所：NCNP, IBIC 棟
名称：A02-C02 共同研究実験
内容：A02[廣瀬、内藤]-C02[花川、北、古屋]の共同研究で、fMRI 実験を実施

51 日時：2015/8/25
場所：東京女子医科大学
名称：宮田・矢野研究打ち合わせ
内容：具体的な共同研究課題のすり合わせの議論と、参加者各人の最近の代表的な研究内容についての紹介

52 日時：2015/8/25
場所：イタリア・ミラノ
名称：ワークショップ
内容：Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society において、BMI を用いることによるリハビリへの影響、身体認識の変容の説明

53 日時：2015/8/26
場所：東京都医学総合研究所
名称：神経生理学相談会
内容： 中村のもつラットの神経生理学データについての議論、解釈と実験計画についての話合い。

54 日時：2015/8/26
場所：近畿大学医学部
名称：A02-2 班会議
内容：研究進捗の確認と今後の方針についての議論

55 日時：2015/8/28
場所：ATR
名称：A01 研究項目打合せ
内容：運動主体感の fMRI 研究追加実験に関する打合せ

56 日時：2015/8/31
場所：NCNP, IBIC 棟
名称：A02-C02 共同研究実験
内容：A02[廣瀬、内藤]-C02[花川、北、古屋]の共同研究で、fMRI 実験および進捗確認

57 日時：2015/9/6
場所：大阪大学豊中キャンパス
名称：第 4 回発達神経科学大会
内容：音に同期する予測的運動制御の発達に関する講演

58 日時：2015/9/9
場所：東京大学本郷キャンパス
名称：B01 項目連携研究打ち合わせ（SoS 研究会）
内容：B01 班、A01 班、C01 班の連携研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

59 日時：2015/9/15
場所：東大法文 2 号館
名称：A01 研究項目打合せ
内容：運動主体感の fMRI デコーディングに関する研究計画の検討

60 日時：2015/9/16
場所：旭川医科大学脳機能医工学研究センター
名称：A02 班・B02 班研究打ち合わせ
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

61 日時：2015/9/18
場所：南相馬市立総合病院
名称：南相馬市立双合病院医局勉強会
内容：「身体性システム科学とリハビリテーション」と題しての 1 時間の講演
モデルベーストリハビリテーションの意義を述べ、リハビリテーション臨床への応用を紹介

62 日時：2015/9/24
場所：藤田保健衛生大学医学部
名称：リハビリテーション研究会での講演と B02, C03 打ち合わせ
内容：藤田保健衛生大学リハビリテーション研究会にて太田，千葉による講演
また、藤田保健衛生大学リハビリテーション部の見学を行った後、太田・千葉・向野で今後の研究について打ち合わせ

63 日時：2015/9/25
場所：大阪大学吹田キャンパス
名称：大阪大学医学部「生体情報科学」特別講義
内容：身体性の脳科学に関する特別講義

64 日時：2015/9/29
場所：東大病院リハ室
名称：研究ミーティング
内容：歩行のシナジー計測

65 日時：2015/10/2
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

66 日時：2015/10/13
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

67 日時：2015/10/14
場所：京都大学医学部付属病院
名称：A02-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：右半球前頭-頭頂ネットワークが関与する vibration illusion，自己顔認知について解説を受け、硬膜下電極留置症例でどのような課題を行うかについて議論した。

68 日時：2015/10/16
場所：慶應義塾大学医学部
名称：研究打ち合わせ
内容：研究打ち合わせ

69 日時：2015/10/20
場所：Skype
名称：A02 研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

70 日時：2015/10/24
場所：狛江市西河原公民館
名称：共同研究
内容：無痛無汗症の運動制御の計測

71 日時：2015/10/25
場所：東京大学武田ホール

名称：第一回身体性システム公開シンポジウム
内容：免疫染色用抗体の譲渡など、今後の共同研究の発展可能性についての議論

72 日時：2015/10/25
場所：栃木県総合文化センター
名称：シンポジウム
内容：蛍光血管撮影を用いた脳機能マッピング法の開発

73 日時：2015/10/27
場所：Skype
名称：A02 項目ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

74 日時：2015/10/29
場所：会津若松市
名称：竹田総合病院医局講演会
内容：講演「身体性の理解に基づくリハビリテーションと治療機器の開発」

75 日時：2015/10/31
場所：けいはんなプラザ
名称：けいはんな情報通信フェア 2015
内容：一般を対象として、ネイマールに学ぶ身体を動かす脳の仕組みを解説

76 日時：2015/11/3
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

77 日時：2015/11/6
場所：名古屋大学航空機械実験棟
名称：A02, C02,B03 融合会議
内容：内藤、四津、長谷川で集まり、共同研究の打ち合わせ

78 日時：2015/11/9
場所：CiNet
名称：Dutch Mission Japan to Osaka University
内容：Impact of bodily intervention in the brain の講演をオランダからの研究者に実施

79 日時：2015/11/9
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

80 日時：2015/11/10
場所：東京大学本郷キャンパス
名称：SoS 研究会
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

81 日時：2015/11/18
場所：筑波大学付属病院
名称：MBR 勉強会
内容：運動学習やリハビリテーションに関わる研究報告、論文紹介および議論

82 日時：2015/11/18
場所：東大法文２号館
名称：A01 研究項目打合せ
内容：運動主体感の fMRI 研究の進捗報告と今後の方針打合せ

83 日時：2015/11/19
場所：NCNP 研究所
名称：上肢シナジー研究打合せ
内容：上肢シナジーリハビリシステム構築のためのセンサ計測手法についての議論

84 日時：2015/11/19
場所：千葉
名称：第 26 回千葉臨床神経生理研究会
内容：リアルタイム脳機能マッピング・デコーディングの臨床応用

85 日時：2015/11/20
場所：NCNP, IBIC 棟
名称：A02-C02 共同研究実験
内容：A02(内藤 G)と C02(花川 G)による共同研究実験

86 日時：2015/11/23
場所：名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリ
名称：B 班会議
内容：公募班研究者（舩戸，長谷川，萩原）による研究発表・質疑，全体討論

87 日時：2015/11/25
場所：東大病院
名称：研究
内容：研究計測

88 日時：2015/11/27
場所：慶應義塾大学医学部
名称：研究打ち合わせ
内容：共同研究打ち合わせ

89 日時：2015/11/30
場所：国立情報学研究所稲邑研究室
名称：C01・A01SigVerse 実験打ち合わせ
内容：SigVerse を利用して仮想空間における身体の変化が、現実世界における身体の知覚にどのような影響を与えるかを調べる実験を行うための議論

90 日時：2015/12/3
場所：米国・フィラデルフィア
名称：ワークショップ
内容：Passive Intraoperative ECoG Mapping
術中に脳機能の身体システム認識を高周波律動のリアルタイム解析により解明

91 日時：2015/12/8
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

92 日時：2015/12/16
場所：NCNP, IBIC 棟
名称：A02-C02 共同研究実験
内容：A02(内藤 G)と C02(花川 G)による共同研究実験
また進捗、今後の方針について議論

93 日時：2015/12/16
場所：東大病院
名称：研究ミーティング
内容：研究計測

94 日時：2015/12/17
場所：総合南東北病院
名称：第１９７回　総合南東北病院　Medical Conference
内容：講演「身体性の理解に基づくリハビリテーションと末梢神経磁気刺激装置の開発」

95 日時：2015/12/19
場所： CiNet
名称：社会広報活動

内容：NHK BS-1　超人たちのパラリンピック　ブラインドサッカー　-リカルド・アウベス-
2015 年 12 月 19 日（土）21:00-21:49
「超人たちのパラリンピック」では、ブラインドサッカー選手の身体能力、脳の可塑性の秘密に迫る。番組ナビゲーター・為末大（元陸上選手・コメンテーター）が CiNet 研究チームが行った分析実験の結果を伺う様子も放送される予定。

96 日時：2015/12/19
場所：東京大学神経心理学研究室
名称：A01-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：右半球島および側頭葉・頭頂葉接合領域の疾病研究（脳切除外科手術患者）について、課題について議論し、今後の検討課題を明らかにした

97 日時：2015/12/24
場所：京都大学医学部付属病院
名称：A02-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：硬膜下電極留置症例で vibration illusion への刺激介入, 自己顔認知時の右半球の ERP, high gamma activity を確認する予定として具体的な課題の施行方法について検討

98 日時：2016/1/12
場所：筑波大学
名称：つくば研究打ち合わせ
内容：解析内容の報告と検討と今後の研究内容についての議論

99 日時：2016/1/12
場所：CiNet,　NICT
名称：A02-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：vibration illusion について被検者となって、検討している方法が実際に可能かどうか検証を行った

100 日時：2016/1/19
場所：慶應大学医学部
名称：研究打ち合わせ
内容：共同研究の打ち合わせ

101 日時：2016/1/21
場所：近畿大学会館
名称：A02-C02 共同研究打ち合わせ
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

102 日時：2016/1/21
場所：近畿大学会館
名称：A 班会議
内容：A 班の研究進捗の確認と今度の連携を計画班および公募班で実施

103 日時：2016/1/22
場所：広島大学学士会館
名称：B 班会議
内容：B 班の研究成果について主要メンバーによる話し合い、方向性のまとめ

104 日時：2016/1/23
場所：東大法文 2 号館
名称：A01 研究項目打合せ
内容：運動主体感の fMRI 研究の進捗報告

105 日時：2016/1/25
場所：東京大学本郷キャンパス
名称：SoS 研究会
内容：研究進捗の確認と今後のリハビリテーションへの応用可能性についての議論

106 日時：2016/1/26
場所：東大法文 2 号館

名称：A01 研究項目打合せ
内容：身体保持感の脳波デコーディングに関する打合せ
107 日時：2016/1/28
場所：慶應義塾大学医学部
名称：研究打ち合わせ
内容：共同研究の打ち合わせ
108 日時：2016/1/29
場所：藤田保健衛生大学医学部
名称：藤田保健衛生大学見学会
内容：若手研究者のためのリハビリ現場見学、今後の研究課題についての議論
109 日時：2016/1/31
場所：京都大学医学部付属病院
名称：A02-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：1/12 の検証をふまえて、実際の検査日程や最終的な課題の施行方法について確認
110 日時：2016/2/3
場所：京都大学付属病院
名称：A01-1, A03-4 班共同研究打ち合わせ
内容：運動主体感の共同研究について、課題、対象患者についての議論、今後の研究方針の明確化
111 日時：2016/2/4
場所：東京都医学総合研究所
名称：A02-B01 研究打合せ
内容：小脳の解剖構造と小脳皮質・小脳核の神経活動、およびその順モデルとしてのモデル化に関する研究議論
112 日時：2016/2/4
場所：東京大学柏総合研究棟
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
113 日時：2016/2/12
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
114 日時：2016/2/12
場所：東京大学 14 号館 321 セミナー室
名称：B01 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
115 日時：2016/2/12
場所：東京大学小柴ホール
名称：大脳新皮質構築終了国際シンポジウム
内容：今後の共同研究の発展可能性についての議論
116 日時：2016/2/13
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論
117 日時：2016/2/15
場所：Skype
名称：A02 項目研究ミーティング
内容：研究進捗の確認と今後の検討課題についての議論

# H27 年度 研究業績リスト

## 学術論文（英文誌）

1. H. Tanaka: Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics, Neuroscience Research, 2016, in press
2. Matsukawa H, Tanikawa R, Kamiyama H, Tsuboi T, Noda K, Ota N, Miyata S, Oda J, Takeda R, Tokuda S, Kamada K: Risk factors for neurological worsening and symptomatic watershed infarction in internal carotid artery aneurysm treated by extracranial-intracranial bypass using radial artery graft, J neurosurgery, 2015, in press
3. Yoshino Y, Kin T, Ito A, Saito T, Nakagawa D, Kamada K, Mori H, Kunimatsu A, Nakatomi H, Oyama H, Saito N: Diffusion tensor tractography of normal facial and vestibulocochlear nerves, Int J Comput Assist Radiol Surg, 2015, Vol.10, No.2, pp383-392
4. Yoshino M, Kin T, Ito A, Saito T, Nakagawa D, Ino K, Kamada K, Mori H, Kunimatsu A, Nakatomi H, Oyama H, Saito N: Feasibility of diffusion tensor tractography for preoperative prediction of the location of the facial and vestibulocochlear nerves in relation to vestibular schwannoma, Acta Neurochir, 2015, Vol.157, No.6, pp939-946
5. Wada H, Saito M, Kamada K: Evaluation of changes of intracranial blood flow after carotid artery stenting using digital subtraction angiography flow assessment, World J Radiol, 2015, Vol.7, No.2, pp45-51
6. Korostenskaja M, Kamada K, Guger C, Salinas C M, Westerveld M, Astillo E M, Salillas E, Chen Po-C, Harris E, Seddon I, Elsayed M, Kapeller C, Schaal A. Seo Joo-H, Baumgartner J, Lee Ki H.: Electrocorticography-Based Real-Time Functional Mapping for Pediatric Epilepsy Surgery, Journal of Pediatric Epilepsy, 2015, Vol.4, No.4, pp184-206
7. Tamura Y, Ogawa H, Kapeller C, Prueckl R, Takeuchi F, Anei R, Rittaccio A, Guger C, Kamada K: Passive language mapping combining real-time oscillation analysis with cortico-cortical evoked potentials for awake craniotomy, J neurosurgery, 2015, in press
8. Ogawa H, Kamada K: The Road to Nonawaking Functional Mapping Combining High Gamma Activity with Corticocortical Evoked Potential, World Neurosurgery, 2015, Vol.84, No.1, pp187-188
9. Yoshino M, Kin T, Ito A, Saito T, Nakagawa D, Ino K, Kamada K, Mori H, Kunimatsu A: The Road to Nonawaking Functional Mapping Combining High Gamma Activity with Corticocortical Evoked Potential, J neurosurgery, 2015, Vol.123, No.6, pp1480-1488
10. M. Hirashima and T. Oya: How does the brain solve muscle redundancy? Filling the gap between optimization and muscle synergy hypotheses, Neuroscience Research, 2016, in press
11. Y. Yamao, R. Matsumoto, K. Kunieda, Y. Arakawa, K. Kikuchi T, S. Shibata, A. Ikeda, H. Fukuyama, S. Miyamoto: A possible variant of negative motor seizure arising from the supplementary negative motor area, Clin Neurol Neurosurg, 2015, Vol. 134, pp. 126-29
12. T. Kunieda, Y. Yamao, T. Kikuchi, R. Matsumoto: New Approach for Exploring Cerebral Functional Connectivity: Review of CCEP (Cortico-cortical evoked potential), Neurol Med Chir (Tokyo), 2015, Vol. 53, pp. 805-813
13. T. Fumuro, M. Matsuhashi, T. Miyazaki, M. Inouchi, T. Hitomi, R. Matsumoto R, R. Takahashi, A. Ikeda: Alpha-band desynchronization in human parietal area during reach planning, Clin Neurophysiol, 2015 VOL. 126, No. 4, pp. 756-762
14. K. Kobayashi, R. Matsumoto, M. Matsuhashi, K. Usami, A. Shimotake, T. Kunieda, T. Kikuchi, N. Mikuni, S. Miyamoto, H. Fukuyama, R. Takahashi, and A. Ikeda: Different Mode of Afferents Determines the Frequency Range of High Frequency Activities in the Human Brain: Direct Electrocorticographic Comparison between Peripheral Nerve and Direct Cortical Stimulation, PLoS One, 2015, Vol. 10, No. 6, e0130461
15. J. Lee, Y. Kagamihara, S. Kakei: A new method for functional evaluation of motor commands in

patients with cerebellar ataxia, PLoS ONE, 2015, 10(7):e0132983. doi: 10.1371/journal.pone.0132983.
16. S. Tomatsu, T. Ishikawa, Y. Tsunoda, J. Lee, D.S. Hoffman, S. Kakei: Information processing in the hemisphere of the cerebellar cortex for control of wrist movement. Journal of Neurophysiology, 2016, Vol. 115, No. 1, pp.255-270
17. T. Ishikawa, S. Kakei, H. Mitoma: Overlooked Holmes' clinical signs: reevaluation by recent physiological findings Cerebellum and Ataxias, 2015 2:13. doi: 10.1186/s40673-015-0033-z.
18. T. Ishikawa, S. Tomatsu, J. Izawa, S. Kakei: The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models? Neuroscience Resesarch, 2015 pii: S0168-0102(15)00293-X. doi: 10.1016/j.neures.2015.12.003.
19. Wen, W., Yamashita, A., & Asama, H.: Divided attention and processes underlying sense of agency, Frontiers in Psychology, 2016, 7:35
20. T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya: Smooth enlargement of human standing sway by instability due to weak reaction floor and noise Royal Society Open Science, 2016, Vol. 3, 150570
21. Asai, T.: Agency elicits body-ownership: proprioceptive drift toward a synchronously acting external proxy. Experimental Brain Research, 2016, in press
22. Izawa, J., Asai, T. & Imamizu, H.: Computational motor control as a window to understanding schizophrenia. Neuroscience Research, 2016, in press
23. K Amemiya and E Naito: Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement, Cortex, 2016, in press
24. Grimaldi G, Argyropoulos GP, Bastian A, Cortes M, Davis NJ, Edwards DJ, Ferrucci R, Fregni F, Galea JM, Hamada M, Manto M, Miall RC, Morales-Quezada L, Pope PA, Priori A, Rothwell J, Tomlinson SP, Celnik P.: Cerebellar Transcranial Direct Current Stimulation (ctDCS): A Novel Approach to Understanding Cerebellar Function in Health and Disease., Neuroscientist., 2016, 22(1):83-97
25. Nakatani-Enomoto S, Hanajima R, Hamada M, Terao Y, Matsumoto H, Shirota Y, Ohminami S, Okabe S, Hirose M, Nakamura K, Furubayashi T, Groiss SJ, Kobayashi S, Mochizuki H, Enomoto H, Ugawa Y.: Somatosensory-evoked potential modulation by quadripulse transcranial magnetic stimulation in patients with benign myoclonus epilepsy. Clin Neurophysiol., 2016, 127(2):1560–1567
26. Terao Y, Fukuda H, Tokushige S, Inomata-Terada S, Yugeta A, Hamada M, Ichikawa Y, Hanajima R, Ugawa Y.: Is multiple system atrophy with cerebellar ataxia (MSA-C) like spinocerebellar ataxia and multiple system atrophy with parkinsonism (MSA-P) like Parkinson's disease? – A saccade study on pathophysiology., Clin Neurophysiol, 2016, 127(2):1491–1502
27. Asai, T.: Feedback control of one's own action: self-other sensory attribution in motor control., Consciousness and Cognition, 2015, 38, 118-129.
28. S. Kim, K. Ogawa, J. Lv, N. Schweighofer, and H. Imamizu: Neural substrates related to motor memory with multiple timescales in sensorimotor adaptation PLoS Biology, 2015, Vol. 13, No. 13, e1002312
29. Imaizumi, S. & Asai, T.: Dissociation of agency and body ownership following visuomotor temporal recalibration., Frontiers in Integrative Neuroscience., 2015, 9, 35.
30. Karabanov A, Ziemann U, Hamada M, George MS, Quartarone A, Classen J, Massimini M, Rothwell J, Siebner HR.: Consensus Paper: Probing Homeostatic Plasticity of Human Cortex With Non-invasive Transcranial Brain Stimulation. Brain Stimul., 2015, 8(5):993-1006.
31. S Hanawa, M Sugiura, T Nozawa, Y Kotozaki, Y Yomogida, M Ihara, Y Akimoto, B Thyreau, S Izumi, R Kawashima: The neural basis of the imitation drive., Soc Cogn Affect Neurosci. 2015, 11(1):66-77
32. A. Murata, W. Wen, H. Asama The body and objects represented in the ventral stream of the parieto-premotor network, Neuroscience Research, 2016, in press
33. Nambu I, Hagura N, Hirose S, Wada Y, Kawato M and Naito E, Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: an fMRI multi-voxel pattern analysis, European Journal of Neuroscience 2015, 10.1111/ejn.13063.
34. S. Tomatsu, T. Ishikawa, Y. Tsunoda, J. Lee, D. Hoffman, S. Kakei: Information processing in the

hemisphere of the cerebellar cortex for control of wrist movement, Journal of Neurophysiology, 2015, in press
35. J. Lee, Y. Kagamihara, S. Kakei: A new method for functional evaluation of motor commands in patients with cerebellar ataxia, PLoS ONE, 2015, 10(7):e0132983
36. H. Mitoma, S. Kakei, J. Lee: Consensus paper: Neuroimmune mechanisms of cerebellar ataxias Cerebellum, 2015, in press, PMID: 25823827
37. Huang, Zhifeng, Katayama, Takahiro, Kanai-Pak, Masako, Maeda, Jukai, Kitajima, Yasuko, Nakamura, Mitsuhiro, Aida, Kyoko Kuwahara, Noriaki, Ogata, Taiki and Ota,Jun: Design and evaluation of robot patient for nursing skill training in patient transfer Advanced Robotics, 2015, Vol. 29, No. 19, pp.1269-1285
38. S. Togo and H. Imamizu: Normalized Index of Synergy for Evaluating the Coordination of Motor Commands, PLoS ONE, 2015, Vol. 10, No. 10, e0140836
39. Jongho Lee and Shinji Kakei: Feature extraction for movement disorders of neurological patients based on EMG signals, IT Convergence Practice, 2015, in press
40. S. Fujiki, S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, Adaptation mechanism of interlimb coordination in human split-belt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study, Journal of the Royal Society Interface, 2015 12(110):20150542
41. S. Shibuya, S. Unenaka, and Y. Ohki, Is this my hand? Body-ownership and the rubber hand illusion, J Phys Fitness Sports Med, 2015, Vol. 4, No. 2, pp. 213-216
42. T. Zama, S. Shimada, Simultaneous measurement of electroencephalography and near-infrared spectroscopy during voluntary motor preparation. Scientific Reports, 2015, accepted
43. Puentes S, Seki K, Internal capsule stroke in the common marmoset, Neuroscience, 2015, 284, pp.400-411
44. Kazuhiko Seki, Hiroaki Yaguchi, Tomohiko Takei, David Kowalski, Takafumi Suzuki and Kunihiko Mabuchi: Modulation of spinal motor output by initial arm postures in anesthetized Monkeys, Journal of Neuroscience, 2015, Vol.35, No.17, pp.6937-6945
45. K. Usami, R. Matsumoto, T. Kunieda et al., Sleep Modulates Cortical Connectivity and Excitability in Humans: Direct Evidence From Neural Activity Induced by Single-Pulse Electrical Stimulation, Human Brain Mapping, 2015, E-pub, DOI: 10.1002/hbm.22948
46. Akihiro Koreki, Takaki Maeda, Hirokata Fukushima, Satoshi Umeda, Keisuke Takahata, Tsukasa Okimura, Michitaka Funayama, Satoru Iwashita, Masaru Mimura, Motoichiro Kato, Behavioral evidence of delayed prediction signals during agency attribution in patients with schizophrenia, Psychiatry Research, 2015, in press
47. W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, The sense of agency during continuous action: Performance is more important than action-feedback association, PloS ONE, 2015, Vol.10, No.4, e0125226
48. W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, The influence of action-outcome delay and arousal on sense of agency and the intentional binding effect Consciousness and Cognition, 2015, Vol.36, pp.87-95
49. W. Wen, A. Yamashita, and H. Asama, The influence of goals on sense of control, Consciousness and Cognition, 2015, Vol.37, pp.83-90
50. M. Tada, H. Uchida, T. Maeda, M. Konishi, S. Umeda, Y. Terasawa, S. Nakajima, M. Mimura, T. Miyazaki, T. Takahashi: Fear Conditioning Induced by Interpersonal Conflicts in Healthy Individuals., PLos One, 2015, 10(5):e0125729
51. T. Sakamoto, and T. Kondo: Visuomotor learning by passive motor experience, Frontiers in Human Neuroscience 2015, 9:279. doi: 10.3389/fnhum.2015.00279
52. T. Okimura, S. Tanaka, T. Maeda, M. Kato, and M. Mimura: Simulation of the capacity and precision of working memory in the hypodoparminergic state: relevance to schizophrenia, Neuroscience, 2015

## 学術論文（和文誌）

1. 松本理器、下竹昭寛、山尾幸広、國枝武治 てんかん外科における術前皮質・白質機能マッピング（特集：神経生理最前線） 最新精神医学 2016 Vol21, No.2, in press
2. 松本理器、國枝武治、池田昭夫 システム神経科学とてんかんの接点 最新医学 2015 Vol. 47, pp. 1051-1060
3. 山尾幸広、國枝武治、松本理器 皮質電気刺激によるヒト脳機能ネットワークの探索 脳神経外科速報 2016 Vol. 25, No. 5, in press
4. Qi AN, 柳井香史朗, 中川純希, 温文, 山川博司, 山下淳, 淺間一 実映像と筋活動の重畳表示によるローイング動作教育システム 日本機械学会論文集 2015 Vol. 82, No. 834, pp. 1-11
5. 青井伸也: ヒトの適応的な歩行を生み出す低次元構造と感覚-運動協調：運動学・筋シナジーと位相リセットの機能と応用, 計測と制御, 2015, Vol. 54, No. 4, pp. 278-283
6. 青井伸也: 筋シナジーに基づく生物の適応的歩行制御機序の構成論的理解, 日本神経回路学会誌, 2015, Vol. 22, No. 2, pp. 53-63
7. 青井伸也: 生物の歩行と力学系, 数理科学, 2015, No. 626 (2015 年 8 月号), pp. 47-52
8. 村田 哲, ミラーニューロンシステムの中の身体性, 認知リハビリテーション, 2015, Vol.20, No.2, pp.3-16
9. 村田 哲, 感覚とその異常　感覚の基礎知識　触覚, Clinical Neuroscience, 2015, Vol.33, No.5, pp.523-526
10. 出江紳一, 八島建樹, 抹消神経連続パルス磁気刺激の製品化, BIO Ckinica, 2015, Vol.30, No.12, pp. 45-49
11. 前田貴記: ”自我”の精神病理学から考える統合失調症, 臨床精神医学, 2015, 44(5), pp.701-706

## 国際会議 講演・発表

1. Kamada K: Novel Techniques of Real-time Blood Flow and Functional Mapping for Brain Surgery, 83rd AANS, Washington D.C.,USA, 2015
2. Kamada K: Functional dynamics of language and memory processing on ECoG, ISACM 2015, Helsinki, Finland, 2015
3. Kamada K: Acute and Chronic Functional Reorganization on Electrocorticogram for Application of BCI, EMBC Workshop & Tutorials, Milano, Itary, 2015
4. Kamada K: Passive Intraoperative ECoG Mapping, 9th International Workshop on Advances in Electrocorticography, Philadelphia,USA, 2015
5. Kamada K: Realtime oscillation analysis for epilepsy diagnosis and surgery and awake craniotomy, AES 2015, Philadelphia,USA, 2015
6. J Ota, E Naito, S Izumi, T Kondo, H Imamizu, K Seki, K Takakusaki, H Asama, N Haga, A Murata, T Inamura, & T Hanakawa: Understanding brain plasticity on body representations to promote their adaptive functions – embodied brain systems science World Engineering Conference and Convention (WECC2015), Kyoto, Japan 2015
7. A Ritaccio, R Matsumoto, M Morrell, K Kamada, M Koubeissi, D Poeppel, J-P Lachaux, Y Yanagisawa, M Hirata, C Guger, G Schal: Proceedings of the Seventh International Workshop on Advances, Epilepsy & Behavior, 2015, Vol.51, pp312-320
8. R. Matsumoto: Network Disorders, 20th Korean Epilepsy Congress Gwangju, South Korea 2015
9. R. Matsumoto: Functional connectivity revealed by Cortico-Cortical Evoked Potentials, 20th Korean Epilepsy Congress Gwangju, South Korea 2015
10. Q An, H Yamakawa, A Yamashita and H Asama: Muscle Synergies of Sit-to-Stand and Walking Account for Sit-to-Walk Motion, 6th International Conference on Advanced Mechatronics Tokyo, Japan 2015
11. J. Izawa, Y. Murata,  N. Higo, N. Schweighofer: A computational approach to understand a valley of motor recovery, Society for Neuroscience 2015 Chicago, USA 2015

12. T. Hayashi, S. Urayama, T. Ose, H. Watabe, K. Onoe, N. Tanki, Y. Murata, N. Higo, H. Onoe, H. Zhang: High-resolution diffusion and structural MRI brain atlas of rhesus macaques, The 74th Annual Meeting of the Japan Neurosurgical Society Sapporo, JAPAN 2015
13. T. Hayashi, G. Zhang , S. Urayama, T. Ose, H. Watabe, K. Onoe, N. Tanki, Y. Murata, N. Higo, H. Onoe: High-resolution diffusion and structural MRI brain atlas of rhesus macaques, OHBM 2015 Hawaii, USA. 2015
14. Arito Yozu, Tetsuro Funato, Dai Owaki and Nobuhiko Haga: Development of a Measurement and Real-time Display System for Kinematics and Muscle Synergy of Gait, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
15. Yuji Ohmura, Naoki Arizono, Shiro Yano and Toshiyuki Kondo: Effect of Visual Condition on Brain Activity and Motion Accuracy during Cane Usage, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
16. Daichi Misawa, Toshiyuki Kondo and Shiro Yano: Effect of Olfactory Stimulus on Simultaneous Learning of Conflicting Motor Tasks, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
17. Ping Jiang, Ryosuke Chiba, Kaoru Takakusaki and Jun Ota: Generation of Biped Stance Motion in Consideration of Neurological Time Delay through Forward Dynamics Simulation, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
18. Daisuke Tomoi, Wen Wen, Hiroshi Yamakawa, Shunsuke Hamasaki, Kaoru Takakusaki, Qi An, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: Estimation of Stress During Car Race with Factor Analysis, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
19. Shiro Yano, Toshiyuki Kondo, Yuichi Yamashita, Tsukasa Okimura, Hiroshi Imamizu and Takaki Maeda: Bayesian Model of the Sense of Agency in Normal Subjects, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
20. Dai Owaki, Yusuke Sekiguchi, Akio Ishiguro and Shin-Ichi Izumi: Auditory Foot: A Novel Auditory Feedback System Regarding Kinesthesia, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
21. Shunsuke Hamasaki, Qi An, Wen Wen, Yusuke Tamura, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, Hajime Asama, Satoshi Shibuya and Yukari Ohki: Evaluating Effect of Sense of Ownership and Sense of Agency on Body Representation Change of Human Upper Limb, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
22. Jun Ota, Hajime Asama, Toshiyuki Kondo, Hirokazu Tanaka, Shiro Yano, Jun Izawa, Shinya Aoi and Ryosuke Chiba: Modelling Method in Embodied-brain Systems Science, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
23. Daichi Sasaki, Jun Izawa and Masahiko Morita: A computational Approach to Detect a Meta-learning of the Cortical Basis Function during a Motor Adaptation Study, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
24. Masafumi Sobajima, Yuichiro Sato, Wang Xufeng and Yasuhisa Hasegawa: Improvement of Operability of Extra Robotic Thumb Using Tactile Feedback by Electrical Stimulation, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
25. Sekiya Noro, Tetsuro Funato, Yota Sato, Yamato Sato, Dai Yanagihara, Shinya Aoi and Kazuo Tsuchiya: Dynamical model of the Body Sway of Bipedally Standing Rat with Rat with Olivo-cerebellar Dysfunction, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
26. Shuntaro Ishiduka, Hiroko Oshima, Shinya Aoi, Tetsuro Funato, Nozomi Tomita, Nobutaka Tsujiuchi, Akihito Ito and Kazuo Tsuchiya: Kinematic Analysis of Low Dimensional Structure in Walking and Running, 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science Nagoya, Japan
27. Jun Ota, Eiichi Naito, Shinichi Izumi, Toshiyuki Kondo, Hiroshi Imamizu, Kazuhiko Seki, Kaoru Takakusaki, Hajime Asama, Nobuhiko Haga, Akira Murata, Tetsunari Inamura, and Takashi Hanakawa: Understanding brain plasticity on body representations to promote their adaptive functions – embodied brain systems science -, World Engineering Conference and Convention (WECC2015), Kyoto, Japan

28. Eiichi Naito and Satoshi Hirose: Efficient foot motor control by Neymar's brain, Human Brain Mapping 2015, Hawaii convention center 2015
29. Kaoru Amemiya and Eiichi Naito: Importance of human right inferior fronto-parietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory hand movement, Human Brain Mapping 2015, Hawaii convention center, 2015
30. R. Chiba, K. Takakusaki, and J. Ota: Posture Control Strategy Analysis on Movable Declined Floor, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), Milan, Italy, 2015
31. S. Shiraishi, K. Takakusaki, R. Chiba and J. Ota: Quantitative evaluation of muscle tonus in rats with medial and bilateral cerebellar ablation, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), Milan, Italy, 2015
32. Jiang,Ping, Chiba,Ryosuke, Takakusaki,Kaoru and Ota,Jun: Proposal of a neural controller able to compensate neurological time delay for stance postural control, Proceedings of SICE Annual Conference (SICE2015), Hangzhou, China, 2015
33. K. Shima, K. Konno, and K. Shimatani: Forearm Motion Control Using Functional Electrical Stimulation for Motor Function Rehabilitation, 2015 RIC-IIT Workshop on Robotics and Interactive Technologies for Neuroscience and Neurorehabilitation Arenzano, Italy 2015
34. Jongho Lee, Yuji Matsumoto, Tatsuji Morimoto, Yasuhiro Okada, Shinji Kakei: Quantitative evaluation of recovery process of stroke patients in terms of three components of tracking movement of the wrist, Neuro2015, Kobe, JAPAN, 2015
35. K. Min, J. Lee and S. Kakei: Analysis for mechanism of pulling directions of wrist prime movers on the wrist with a musculoskeletal model, The 38th annual meeting of the Japan neuroscience society, Kobe, Japan, 2015
36. R. Minohara, W. Wen, S. Hamasaki, T. Maeda, H. Yamakawa, S. Shibuya, Y. Ohki, A. Yamashita and H. Asama: Readiness Potential Reflects the Predictive Aspect of Sense of Agency, International Conference on Advanced Mechatronics 2015, Tokyo, Japan, 2015
37. J. Ota: Introduction to embodied-brain systems science, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
38. H. Imamizu: Neural mechanisms inducing plasticity on body representation, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
39. H. Asama: Modeling of slow dynamics on body representations in brain, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
40. T. Inamura: Immersive virtual reality system towards cloud based neurorehabilitation, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
41. K. Seki: Muscle synergy as a foundation of embodied brain, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
42. R. Chiba: Motion Dynamics Analysis and Modeling for Body Representation in Brain, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
43. K. Kita: Neural basis of task-specific focal hand dystonia, IEEE/RSJ IROS 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Sciences, Hamburg, Germany, 2015
44. Tanaka H: How motor cortex represents body movements: Optimality, recurrent neural networks and spatial dynamics, IEEE The 24th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) Kobe, Japan, 2015
45. Tanaka H, Miyakoshi M, Makeig S: Coordinate Systems in the Motor System: Computational Modeling and EEG experiment, The 5th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sanya, China, 2015
46. J. Ota: Overview of the research program on embodied-brain systems sciences — understanding brain plasticity on body representations to promote their adaptive functions –, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
47. Y. Ohki: Neural mechanisms inducing plasticity on body representation, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
48. T. Kondo: Modeling of slow dynamics on body representations in brain, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015

49. T. Inamura, and Y. Oouchida: Neurorehabilitation based upon plasticity on body representations, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
50. K. Seki: Neural adaptive mechanism for physical changes, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
51. S. Aoi: Modeling of motor control that alters body representation in brain, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
52. T. Hanakawa: Rehabilitation for postural/movement impairments using sensory intervention, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
53. E. Naito: Neuronal representation of human body schema and its essential contribution for motor control and self-consciousness, IEEE EMBC 2015 Half-day Workshop on Embodied-Brain Systems Science, Milan, Italy, 2015
54. S. Fujiki, S. Aoi, D. Yanagihara, T. Funato, Y. Sato, K. Senda, and K. Tsuchiya: Investigation of adaptive split-belt treadmill walking by the hindlimbs of rats, International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2015) Milan, Italy, 2015
55. Y. Sato, T. Funato, D. Yanagihara, Y. Sato, S. Aoi, S. Fujiki, K. Nakano, and K. Tsuchiya: Measuring Body Sway of Bipedally Standing Rat and Quantitative Evaluation of Its Postural Control, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society., Milan, Italy, 2015
56. S. Noro, T. Funato, Y. Sato, Y. Sato, D. Yanagihara, S. Aoi, and K. Tsuchiya: Evaluation of the Body Sway of Bipedally Standing Rat with Cerebellar Dysfunction, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Milan, Italy, 2015
57. Ngoc Quang Nguyen, Quang Dang Khoa Truong, Toshiyuki Kondo: Fractals Properties of EEG During Event-Related Desynchronization of Motor Imagery, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), Milan, Italy, 2015
58. Naoki Arizono, Toshiyuki Kondo: Functional Connectivity Analysis of Brain Hemodynamics during Rubber Hand Illusion, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), Milan, Italy, 2015
59. Kosuke Kitahara, Toshiyuki Kondo: Modulation of ERD/S by having a conscious target during lower-extremity motor imagery, The 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), Milan, Italy, 2015
60. Naoki Arizono, Toshiyuki Kondo: Functional connectivity analysis of brain hemodynamics concerning embodied cognition, The SICE Annual Conference 2015, International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration, Hangzhou, China, 2015
61. Kosuke Kitahara, Toshiyuki Kondo: The effects of foot and leg motor imageries on sensorimotor rhythms in EEG, The SICE Annual Conference 2015, International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration, Hangzhou, China, 2015
62. Tanaka H, Miyakoshi M and Makeig S: Movement Representation in the Motor System: Computational Modeling and EEG experiment, The 14th Brain Connectivity Workshop, San Diego, U.S.A., 2015
63. T. Funato, D. Yanagihara, S. Aoi, Y. Sato, and K. Tsuchiya: Spectrum Analysis of Body Sway in Bipedally Standing Rat, 2015 ISPGR World Congress, Seville, Spain, 2015
64. S. Aoi, S. Fujiki, D. Yanagihara, T. Funato, Y. Sato, N. Tomita, N. Ogihara, K. Senda, and K. Tsuchiya: Investigating adaptation in hindlimb split-belt treadmill walking by rats using kinematic measurement and a neuromusculoskeletal model, International Society for Posture and Gait Research World Congress (ISPGR World Congress 2015), Seville, Spain, 2015
65. Li L, Imamizu H and Tanaka H, Is movement duration predetermined in visually guided reaching? A comparison of finite- and infinite-horizon optimal feedback control, International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM) 2015 Tokyo, Japan, 2015
66. Satou H, Sasaki A, Nozaki D and Tanaha H: Formation of internal forward model with sensory and reward prediction errors: A behavioral confirmation, International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM) 2015, Tokyo, Japan, 2015

67. Y. Ohki, S. Shibuya and S. Unenaka: Effects of manipulation of virtual body on body representations and bodily self-consciousness, The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME2015), Okayama, 2015
68. D. Owaki, H. Horikiri, J. Nishii, and A. Ishiguro: Experimental Verification of Bipedal Walking Control Exploiting Plantar Sensory Feedback 7th Int. Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines, Boston, USA, 2015
69. D. Owaki, H. Horikiri, J. Nishii, and A. Ishiguro: Load-dependent Interlimb Coordination for Bipedal Walking, ICRA2015 CPG Workshop Seattle, USA, 2015
70. M. Arif Fahmi Ismail and S. Shimada: The effect of delayed visual feedback on `Robot` hand illusion; a near-infrared spectroscopy study., 16th International Multisensory Research Forum (IMRF2015), Pisa, ITA 2015
71. Akira Murata: The body represented in the parieto-premotor network. Tohoku forum for creativity thematic program 2015, Frontier of brain science, Symposium on Memory and Mind, Sendai, Japan, 2015
72. Akira Murata: Self and other's body in the parietal mirror neuron system, Japan-China Joint Symposium for Understanding Cortical Cognitive Functions, Kyoto, Japan 2015
73. Tamami Sudo, Yutaka Oouchida, Shin-ichi Izumi, Ken Mogi: Mental transformation of bodily self: spatial and temporal aspects of imitation, The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME2015), Okayama, 2015
74. Mayumi Nagai, Yutaka Oouchida, Shin-ichi Izumi: The effects of transcranial direct current stimulation on child with involuntary movement after hypoxic encephalopathy: single case study, The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2015), Okayama, 2015
75. Tetsunari Inamura, Yutaka Oouchida, Shin-ichi Izumi: Immersive virtual reality system towards cloud based neurorehabilitation., The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2015), Okayama, 2015

## 国内会議 講演・口頭発表

1. 関口，大脇，本田，田中，石黒，出江: 足底圧の聴覚フィードバックが片麻痺患者の歩行に及ぼす影響について, 第 9 回モーターコントロール研究会, 京都大学, 2015
2. 大脇，関口，本田，石黒，出江: 足底圧感覚の聴覚フィードバックがもたらす片麻痺患者の歩行への即時的効果, 第 28 回自律分散システム・シンポジウム, 広島大学, 2016
3. 堀切，大脇，西井，石黒: 足底感覚情報を用いた二足歩行制御の環境適応性に関する検証, SI2015, 名古屋国際会議場, 2015
4. 堀切，大脇，西井，石黒: 「手応え関数」に基づく適応的二足歩行制御, 自律分散システム・シンポジウム, 広島大学, 2016
5. 嵯峨健広, 鎌田恭輔: Indocyanine Green Videoangiography の臨床応用, 脳神経外科, 2015, Vol.43, No.7, pp593-601
6. 鎌田恭輔: 後頭蓋窩類上皮腫手術のポイント～微小解剖の理解とモニタリング～, 脳神経外科速報　手術のコツとピットフォール, 2015, Vol.25, No.8, pp.802-809
7. 小川博司, 広島 覚, 竹内文也, 石橋秀昭, 鎌田恭輔: 皮質形成異常を有するてんかん患者に詳細な脳機能マッピングを行った症例, 脳神経外科ジャーナル, 2015, Vol.24, No.7, pp.485-489
8. 鎌田恭輔: 脳外科顕微鏡の比較と使いこなすためのコツ（第二報）～顕微鏡の特性を用いた操作～, 脳神経外科速報　手術のコツとピットフォール, 2015, Vol.25, No.12, pp.1258-1263
9. 鎌田恭輔: 脳外科顕微鏡の比較と使いこなすためのコツ（第二報）～顕微鏡光学原理と光軸の確保～, 脳神経外科速報　手術のコツとピットフォール, 2015, Vol.25, No.11, pp.1148-1155
10. 鎌田恭輔，國井尚人，小川博司，広島 覚: 機能 MRI による臨床脳機能マッピング, Clinical Neuroscience　神経放射線診断－最新情報と読影のピットフォール, 2015, Vol.33, No.10, pp.1129-1134
11. 石橋秀昭, 小川博司, 田村有希恵, 広島 覚, 鎌田恭輔: 医用技術の進歩に伴う近年のてんかん外科治療, 脳神経外科ジャーナル　特集　機能的脳神経外科, 2016, Vol.25, No.2, pp.112-127
12. 白石 匠, 高草木 薫, 千葉 龍介, 太田 順: 小脳部分障害によるラットの障害物回避歩行の変容 第 28 回自律分散システム・シンポジウム 広島大学, 2016
13. 太田　順: 身体性システム 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク冬のシンポジウム, 新学術領域「身体性システム・こころの時間学：身体とこころの融合」 一橋大学　一橋講堂, 2015

14. 松本理器、國枝武治、池田昭夫: 皮質・皮質間誘発電位（ＣＣＥＰ）記録・解析の実際．ワークショップ４．皮質・皮質間誘発電位 第 45 回日本臨床神経生理学会学術大会，大阪国際会議場，2015
15. 松本理器: ヒト脳の解剖・機能的結合地図：非侵襲・侵襲的計測による探索，第 27 回臨床神経生理研究会 ANA ホリデイイン宮崎 2015
16. 松本理器，山尾幸広，下竹昭寛，國枝武治，池田昭夫: 皮質電気刺激によるヒト脳機能ネットワークの探索．第 29 回日本微小脳神経外科解剖研究会合同セッション：脳機能解剖の多次元解析 第 35 回脳神経外科コングレス総会 パシフィコ横浜 2015
17. 佐藤陽太，舩戸徹郎，柳原大，佐藤和，藤木聡一朗，青井伸也，土屋和雄: ラットの二足直立運動の関節間協調の解析，第 28 回自律分散システム・シンポジウム，広島大学，2016
18. 松本理器，國枝武治，池田昭夫: ヒト脳の機能可塑性：皮質電気刺激・外科的脳切除の観点から，第 30 回日本生体磁気学会学術大会 旭川，2015
19. 坂本光弘，松本理器，下竹昭寛，國枝武治，池田昭夫: 左中心前回中・下部に限局した腫瘍切除後に anarthria を呈した 1 例，第 55 回近畿高次神経機能研究会 エーザイ株式会社大阪コミュニケーションオフィス，2016
20. 十河正弥，松本理器 ，武山博文，小林勝哉，下竹昭寛，宇佐美清英，中江卓郎，國枝武治，宮本享，高橋良輔，池田昭夫: ヒト内側頭頂葉の機能的結合性：皮質―皮質間誘発電位を用いた検討，第 45 回日本臨床神経生理学会学術大会，大阪国際会議場，2015
21. 十河正弥，松本理器，武山博文，小林勝哉，下竹昭寛，宇佐美清英，中江卓郎，國枝武治，宮本享，高橋良輔，池田昭夫: ヒト内側頭頂葉の機能的結合性：皮質―皮質間誘発電位を用いた検討，第 45 回日本臨床神経生理学会学術大会，大阪国際会議場，2015
22. 下竹昭寛，松本理器，小林勝哉，宇佐美清英，國枝武治，三國信啓，宮本亨，高橋良輔，池田昭夫: Functional mapping of praxis network: Electrical cortical stimulation study，第 9 回 Motor Control 研究会 ，京都大学，2015
23. 下竹昭寛，松本理器，小林勝哉，宇佐美清英，國枝武治，三國信啓，宮本亨，高橋良輔，池田昭夫: Functional mapping of praxis network: Electrical cortical stimulation study，第 56 回日本神経学会学術大会，新潟，2015
24. 村松克俊，温文，濱崎峻資，山川博司，An Qi，田村雄介，山下淳，淺間一: 動作意図が身体図式の変容に与える影響の評価，2016 年度精密工学会春季大会学術講演会，東京理科大学，2016
25. 村松克俊，温文，濱崎峻資，山川博司，An Qi，田村雄介，山下淳，淺間一: 行動目標がラバーハンド錯覚に与える影響，ライフサポート学会第 25 回フロンティア講演会，東京工科大学，2016
26. 山本，村田，林，肥後: マカクサル第一次運動野損傷後の機能回復に伴い形成される 腹側運動前野から小脳核へと向かう直接経路，第 50 回日本理学療法学術集会，東京国際フォーラム，2015
27. 宮田麻理子: 末梢神経損傷に伴う中枢神経回路の可塑的変化と身体表現の変容，東京大学大学院医学系研究科神経生理学分野研究会，東京大学，2016
28. 宮田麻理子: 末梢神経損傷による脳内身体表現の変容とその機構，群馬大学大学院医学系研究科セミナー群馬大学，2016
29. 宮田麻理子: 中枢神経系の維持改編に関わる分子機構，生理学研究所研究会「シナプス・神経ネットワークの機能ダイナミクス」，生理学研究所，2015
30. 宮田麻理子: 中枢神経系回路の維持，改編機構，同志社大学システム神経科学センター 特別セミナー，同志社大学，2015
31. 宮田麻理子: 幻肢痛～幻の痛みの正体：神経回路レベルの解明をめざして，東京医科大学・第 51 回医科学フォーラム，東京医科大学，2015
32. 近藤敏之，有薗直生，大村優慈，矢野史朗: ラバーハンド錯覚を用いた身体保持感のバイオマーカー同定，第 16 回システムインテグレーション部門学術講演会，名古屋市国際会議場，2015
33. 小川健二，今水 寛: 複数の感覚運動学習の神経表象とニューロフィードバックによる学習促進，第 9 回 Motor Control 研究会 シンポジウム「新しい身体運動学習理論に向けて」，京都大学時計台記念館，2015
34. 今水 寛: 結合ニューロフィードバックを用いた機能回復へのアプローチ 第 39 回日本高次脳機能障害学会学術集会・ワークショップ 「Sense of agency パラダイムによる新たなリハビリテーション戦 略―運動麻痺から高次脳機能障害まで」，ベルサール渋谷ファースト，2015

35. 今水 寛: 器用な動作を支える脳の仕組みとその評価 昭和大学発達障害医療研究所セミナー【招待講演】, 昭和大学附属烏山病院, 2015
36. 今水 寛: 安静時の脳活動を用いた認知機能の予測と制御, 国立神経・精神医療研究センター「システム神経科学セミナー」【招待講演】国立神経・精神医療研究センター, 2016
37. 前田貴記: 自己意識の神経科学ー時間知覚と sense of agencyー, 包括脳・平成 27 年度冬のシンポジウム, 一橋講堂
38. 前田貴記: 自己意識の神経心理学の試み, 第 39 回高次脳機能障害学会総会・ワークショップ「sense of agency パラダイムによる新たなリハビリテーション戦略」, ベルサール渋谷ファースト
39. 出江紳一、大内田裕: 一人称視点による模倣運動を利用した運動・感覚リハビリテーション, 第 39 回日本高次脳機能障害学会学術総会, ベルサール渋谷ファースト
40. 出江紳一: 片麻痺の治療を目的とした磁気刺激装置の評価に用いるガイドライン作成への取組み, 第 26 回磁気刺激法の臨床応用と安全性に関する研究会, 大阪国際会議場
41. 姜平, 千葉龍介, 高草木薫, 太田順: Generation of Biped Stance Motion in Consideration of Neurological Time Delay through Forward Dynamics Simulation, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
42. 白石匠, 高草木薫, 千葉龍介, 太田順: 小脳中央部・外側部除去ラットの姿勢計測による歩行時の筋緊張の定量的評価, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
43. 北原康佑, 矢野史朗, 近藤敏之: 下肢 ERD/S-BCI のための運動想起法に関する研究, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
44. 傍嶋將文, 大原崇義, 佐藤雄一朗, 王旭峰, 長谷川泰久: 触覚フィードバックを用いた身体拡張義指操作による身体図式の変容, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
45. 安琪, 石川雄己, 青井伸也, 舩戸徹郎, 岡敬之, 山川博司, 山下淳, 淺間一: 筋シナジーの時間パターンがヒト起立動作に与える影響の神経筋骨格モデルを用いた解明, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
46. 松村聖司, 川瀬利弘, 木村聡貴, 柏野牧夫, 吉村奈津江, 小池康晴: 跳躍時における下肢部の筋シナジー, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
47. 三澤大地, 近藤敏之, 矢野史朗: 相反する運動課題の同時学習における干渉に香りが及ぼす影響, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
48. 渋谷賢, 畝中智志, 大木紫: 操作する身体オブジェクトの方向性がドリフト運動に与える影響, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
49. 畝中智志, 渋谷賢, 大木紫: 仮想現実下における仮想手の操作が身体性自己意識および脳活動に与える影響, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
50. 瓜野琢也, 池本周平, 細田耕: 強磁場環境下で動作可能なマスタ・スレーブ型手指外骨格の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
51. 三村知洋, 萩原良信, 高野敏明, 谷口忠大, 稲邑哲也: 身体図式の形成のための身体地図のクラスタリング, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
52. 青木貴裕, 島圭介: 外れ値検知機能を有する未学習クラス推定ニューラルネットと筋電位識別, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
53. 千葉龍介, 高草木薫, 太田順: 傾斜移動床における姿勢制御戦略の変更, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
54. 楊濘嘉, 安琪, 山川博司, 田村雄介, 山下淳, 淺間一: Identification of Muscle Synergy Parameters in Different Strategies of Human Standing-up Motion, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
55. 今野和樹, 島圭介, 島谷康司: 機能的電気刺激と EMG 信号を利用したダイレクトリハビリテーション, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
56. 稲邑哲也: ニューロリハビリテーションのためのクラウド型 VR リハビリシステム, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015
57. 佐々木大地, 井澤淳, 森田昌彦: 不連続力場に対するメタ運動学習のモデル規範型運動解析手法の提案, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 函館, 2015

58. 太田：身体性システム科学の紹介，第 167 回藤田保健衛生大学リハビリテーション部門研修会，藤田保健衛生大学，2015
59. 千葉：ヒトの多種感覚入力に基づく姿勢制御研究について，第 167 回藤田保健衛生大学リハビリテーション部門研修会，藤田保健衛生大学，2015
60. 太田：身体性システム科学，高槻高等学校東京大学柏キャンパス施設見学，東京大学，2015
61. 太田：「身体性システム科学」構築に向けて，KACITEC 総会，柏の葉キャンパス駅前サテライト，2015
62. 太田：概要－身体性システム科学－，NII OPEN HOUSE 2015 新学術領域研究発表「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」，国立情報学研究所，2015
63. 寺前 達也，今水 寛，山下 歩，Robert Haschke，Risto Koiva. Helge Ritter，Florentin Woregotter：安静時 fMRI による外部座標系と内部座標系を組み合わせた学習タスクにおけるスコア予測，第 38 回日本神経科学大会，神戸国際会議場，2015
64. 今水 寛：脳内ネットワークの弱点を知り､補強する技術，第 5 回 CiNet シンポジウム/第 3 回大阪大学 COI シンポジウム【招待講演】 東京国際フォーラム，2015
65. 今水 寛：機械学習推定を用いた認知機能の低下の防止と回復，第 38 回日本神経科学会大会ランチョンセミナー【招待講演】，神戸国際会議場，2015
66. 今水 寛：学習と脳のネットワーク，CRASEED シンポジウム「徹底討論！脳科学とリハビリテーション」【招待講演】，兵庫医科大学，2015
67. 今水 寛：安静時の脳活動から作業記憶トレーニング効果の個人差を予測する：ゲームで認知機能は改善するか？，第 9 回パーキンソン病・運動障害疾患コングレス ランチョンセミナー【招待講演】，品川プリンスホテル，2015
68. 今野 和樹，島 圭介，島谷 康司：機能的電気刺激によるリハビリテーションを目的とした前腕動作制御法，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，京都市勧業館，2015
69. 松井 駿悟，青木 貴裕，島 圭介：未学習クラス推定ニューラルネットと自己組織化マップに基づく新規クラス生成，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，京都市勧業館，2015
70. 中村：発火頻度かパターンか：パーキンソン病モデルラットにおける視床運動核ニューロンの活動異常を探る，第 30 回日本大脳基底核研究会，名鉄犬山ホテル，2015
71. 越水，中村，田中，古田，金子：ラット視床下核ニューロンは新線条体インターニューロンへ入力する，第 30 回日本大脳基底核研究会，名鉄犬山ホテル，2015
72. 関　庚甫，李　鍾昊，筧 慎治：筋骨格系モデルを用いた手関節筋の機械的な構造に基づく筋制御特性の推定，第 9 回 Motor Control 研究会，京都大学 ，2015
73. 東郷俊太，今水 寛：目標の冗長性を保持した運動計画，第 9 回 Motor Control 研究会，京都大学，2015
74. 中村，Sharott，田中，Vinciati，Mallet，Magill：パーキンソン病モデルラット視床運動核のニューロン活動異常：発火頻度かパターンか，第 9 回モーターコントロール研究会，京都大学，2015
75. Nakamura，Sharott，Vinciati，Tanaka，Mallet，Magill：Abnormal neuronal activities in the motor thalamus of Parkinsonian rats：rate vs pattern，第 38 回日本神経科学大会，神戸国際会議場，2015
76. 越水，中村，田中，古田，金子：ラット視床下核ニューロンは新線条体インターニューロンへ入力する，第 9 回モーターコントロール研究会，京都大学，2015
77. Tanaka H：Equations of Motion for Reaching Dynamics and Coordinate Systems in Frontoparietal Motor System，第 92 回日本生理学学会 第 120 回日本解剖学会 合同大会，神戸国際会議場，2015
78. 平井，柴田，中村，田中，日置，金子，古田：ヒゲ感覚システムにおいて新たに発見した視床アルファ・オシレーションと皮質視床連関，第 38 回日本神経科学大会，神戸国際会議場，2015
79. 越水，中村，古田，金子：ラット視床下核は新線条体インターニューロンへ入力する，第 38 回日本神経科学大会，神戸国際会議場，2015
80. 戸枝美咲，青井伸也，舩戸徹郎，土屋和雄，柳原大：筋シナジー制御を用いた四肢神経筋骨格モデルの歩容生成とエネルギー効率の考察，第 70 回日本体力医学会大会，和歌山県民文化会館・ホテルアバローム紀の国，2015
81. Tanaka H, Miyakoshi M, and Makeig S：Directional tuning and reference frames revealed by non-invasive EEG in humans：A group analysis，第 9 回モーターコントロール研究会，京都大学，2015
82. 渋谷賢，畝中智志，大木紫：操作する身体オブジェクトの方向性が運動に及ぼす影響，第 32 回日本認知科学会，千葉大学，2015

83. Nagumo Yasuyuki, Takeuchi Yuichi, Miyata Mariko: Remodeling of somatosensory thalamic neural circuit and allodynia-like mechanical hypersensitivity, The 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kobe, Japan, 2015
84. Takeuchi Yuichi, Nagumo Yasuyuki, Osaki Hironobu, Katayama Yoko, Miyata Mariko: Large-scale somatotopic reorganization associated with afferent fiber rewiring in the whisker sensory thalamus, The 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kobe, Japan, 2015
85. Miyata Mariko, Takeuchi Yuichi, Katayama Yoko: Large-scale somatotopic refinement via experience-dependent synapse elimination in the whisker sensory thalamus, The 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kobe, Japan, 2015
86. 三澤大地，近藤敏之：相反する運動課題の同時学習に香りが及ぼす影響，第 21 回創発システム・シンポジウム，諏訪東京理科大学，2015
87. 三村，萩原，谷口：身体図式の形成のためのベイズ生成モデルの研究，第 21 回創発システム・シンポジウム，諏訪東京理科大学，2015
88. 堀切，大脇，西井，石黒：足底感覚情報を活用した二足歩行制御則の実験的検証，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015，京都，2015
89. 会津直樹，大内田裕，出江紳一：慢性期片麻痺者の麻痺手運動機能の改善による身体性注意の変化，第 9 回 Motor Control 研究会，京都大学，2015
90. 大内田裕，会津直樹，出江紳一：学習性不使用による脳内身体表現の変容，第 9 回 Motor Control 研究会，京都大学 2015
91. 近藤 ：NIRS による身体錯覚時の機能的結合の解析，第 54 回日本生体医工学会大会，名古屋国際会議場，2015
92. 東郷俊太，今水 寛：正規化協調指標による運動指令の協調の評価，電子情報通信学会・ニューロコンピューティング研究会，玉川大学，2015
93. 高草木：認知症患者の行動科学-認知症を知る-，第 24 回有病者歯科医療学会総会・学術大会，旭川市大雪クリスタルホール，2015
94. 高草木：姿勢-運動と身体の認知，第 92 回日本生理学会大会，神戸コンベンションセンター，2015
95. Qi An, 石川雄己，青井伸也，舩戸徹郎，岡敬之，山川博司，山下淳，淺間一：筋シナジーの時間パターンがヒト起立動作に与える影響の神経筋骨格モデルを用いた解明，第 20 回ロボティクスシンポジア，軽井沢プリンスホテルウエスト，2015
96. 簑原凜，温文，濱崎峻資，前田貴記，加藤元一郎，山川博司，山下淳，淺間一：スイッチ操作力の差異が運動主体感に与える影響の評価，第 20 回ロボティクスシンポジア，軽井沢プリンスホテルウエスト，2015

書籍

1. Matsumoto R, Kunieda T Cortico-cortical evoked potential mapping (Chapter 46, Section 5: Human Brain Mapping). Oxford University Press 2016 (in press)
2. 内藤栄一, 南部功夫, 廣瀬智士: イメージトレーニングによる運動学習と脳内機構 体育の科学, 2016, 66 巻 1 月号, 11-18
3. G Ganesh, T Ikegami: Beyond Watching: Action Understanding by Humans and Implications for Motion Planning by Interacting Robots Dance Notations and Robot Motion, Springer, 2016
4. Tanaka H, Katura T and Sato H: Data analysis method for neuroimaging data: Task-related component analysis and its applications to fNIRS data, In Neurophotonics and Brain Mapping, Chen, Y. and Kateb, B. Ed. CRC Press
5. H. Imamizu: Changes in human brain networks and spontaneous activity caused by motor and cognitive learning, In K. Kansaku, L. G. Cohen, and N. Birbaumer（Eds.）“Clinical Systems Neuroscience,” pp. 331-341, Springer, 2015
6. E. Oztop, E. Ugur, Y. Shimizu, and H. Imamizu: Humanoid brain science, In G. Cheng (Ed.) "Humanoid Robotics and Neuroscience: Science, Engineering and Society," pp. 29-48, CRC Press, 2015
7. 出江紳一: 回復の原理と身体性システム科学, BIO Clinica 30（12）13, 20151031

## 報道発表

1. 2015 年 12 月 9 日，A01-1 研究項目の今水教授（東京大学，ATR）らの研究がプレスリリースされた．短期と長期の運動記憶の画像化に成功 早く学んですぐ忘れる ・ ゆっくり学んで長く記憶 その違いはどこに？
2. 2015 年 9 月 3 日，BS 日テレ木曜スペシャル 第 35 回「すぐに役立つ！錯覚ミステリー！」の中で，C01-1 研究項目の稲邑准教授（国立情報学研究所）のグループが開発している「幻視痛リハビリシステム」が紹介された．
3. 2015 年 3 月 17 日に，デンマークのラジオ放送局 Danish Broadcasting Corporation の科学番組で，太田領域代表のインタビューが放送された．

## 受 賞

1. Qi An, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama, ICAM2015 Honorable Mention
2. 濱田 雅: 日本臨床神経生理学会 第 5 回奨励賞
3. 堀切舜哉, 大脇大, 西井淳, 石黒章夫: 足底感覚情報を用いた二足歩行制御の環境適応性に関する検証, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, SI2015 優秀講演賞
4. 近藤敏之, 有薗直生, 大村優慈, 矢野史朗: ラバーハンド錯覚を用いた身体保持感のバイオマーカー推定, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, SI2015 優秀講演賞
5. Dai Owaki, Yusuke Sekiguchi, Akio Ishiguro, Shin-Ichi Izumi: “Auditory Foot: A Novel Auditory Feedback System Regarding Kinesthesia”, 26th 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), Best Poster Award
6. Shunsuke Hamasaki, Qi An, Wen Wen, Yusuke Tamura, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, Hajime Asama, Satoshi Shibuya, Yukari Ohki, “Evaluating Effect of Sense of Ownership and Sense of Agency on Body Representation Change of Human Upper Limb”, 26th 2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), Best Poster Award
7. 安 琪，石川雄己，舩戸徹郎，青井伸也，岡 敬之，山川博司，山下 淳，淺間 一: 座面高と速度の異なるヒト起立動作における筋シナジー解析，2015 年度計測自動制御学会 学会賞（論文賞）
8. 青井伸也: 第 14 回 船井学術賞
9. 会津直樹: 第 9 回 Motor Control 研究会若手奨励賞

# メンバーリスト

**総括班 X00　脳内身体表現の変容機構の理解と制御に関する総括研究**

研究代表者　太田　順（東京大学 人工物工学研究センター　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　出江 紳一（東北大学 大学院医工学研究科　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）
連携研究者　今水　寛（東京大学 文学部　教授）
連携研究者　関　和彦（国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 モデル動物開発部　部長）
連携研究者　高草木 薫（旭川医科大学 医学部　教授）
連携研究者　淺間　一（東京大学 大学院工学系研究科　教授）
連携研究者　芳賀 信彦（東京大学 大学院医学系研究科　教授）
連携研究者　村田　哲（近畿大学 医学部　准教授）
連携研究者　稲邑 哲也（国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系　准教授）
連携研究者　花川　隆（国立精神・神経医療研究センター 脳病態統合イメージングセンター　部長）
研究協力者　岩村 吉晃（上野学園大学 特任教授，東邦大学　名誉教授）
総括班評価者　篠田 義一（東京医科歯科大学 大学院医歯学総合研究科　名誉教授）
総括班評価者　伊藤 宏司（東京都医学総合研究所　研究員，東京工業大学　名誉教授）
総括班評価者　才藤 栄一（藤田保健衛生大学 医学部　教授）
総括班評価者　Paolo Dario（Scuola Superiore Sant’Anna　教授）

**研究項目 A01-1　脳内身体表現の変容を促す神経機構**

研究代表者　今水　寛（東京大学 文学部　教授）
研究分担者　村田　哲（近畿大学 医学部　准教授）
研究分担者　大木　紫（杏林大学 医学部　教授）
研究分担者　前田 貴記（慶應義塾大学 医学部　講師）
連携研究者　渋谷　賢（杏林大学 医学部　助教）
連携研究者　小川 健二（北海道大学 文学部　准教授）
連携研究者　浅井 智久（NTT コミュニケーション科学基礎研究所　研究員）
連携研究者　沖村　宰（慶応義塾大学 医学部 特任助教）
連携研究者　山下 祐一（国立精神・神経医療研究センター 神経研究所　室長）
連携研究者　繁桝 博昭（高知工科大学 情報学群　准教授）
連携研究者　門田　浩（高知工科大学 総合研究所　准教授）
連携研究者　山下 真寛（国際電気通信基礎技術研究所 認知機構研究所　研究員）

**研究項目 A02-1 身体変化への脳適応機構の解明**

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 モデル動物開発研究部　部長）
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　筧　慎治（東京都医学総合研究所 運動失調プロジェクト　プロジェクトリーダー）
連携研究者　井上 謙一（京都大学 霊長類研究所　助教）
連携研究者　荻原 直道（慶應義塾大学 理工学部　准教授）
連携研究者　梅田 達也（国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 モデル動物開発研究部　室長）
連携研究者　大屋 知徹（国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 モデル動物開発研究部　室長）
連携研究者　平島 雅也（情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター　主任研究員）
連携研究者　池上　剛（情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター　研究員）
連携研究者　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）
連携研究者　竹村 尚大（情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター　研究員）
連携研究者　雨宮 薫（情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター　研究員）

連携研究者　Ganesh Gowrishanker（CNRS　研究員）
連携研究者　上原 信太郎（情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター　特別研究員）
連携研究者　関　庚甫（東京都医学総合研究所 運動失調プロジェクト　研究員）
連携研究者　李　鍾昊（東京都医学総合研究所 運動失調プロジェクト　研究員）
連携研究者　石川 享宏（東京都医学総合研究所 運動失調プロジェクト　研究員）
連携研究者　本多 武尊（東京都医学総合研究所 運動失調プロジェクト　研究員）

研究項目 A02-2　姿勢-歩行戦略の変更に伴う脳適応機能の解明
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　中溝 克己（近畿大学 医学部　講師）
連携研究者　船越　洋（旭川医科大学 医学部　教授）
連携研究者　杉内　友理子（東京医科歯科大学 医学部　准教授）
連携研究者　日暮 泰男（近畿大学 医学部　博士研究員）

研究項目 A03-1　ハイブリッド技術とリアルタイム処理による機能ダイナミクスの解明
研究代表者　鎌田 恭輔（旭川医科大学 医学部　教授）

研究項目 A03-2　脳波を用いた手首運動に係る脳内身体表現の学理とその可視化
研究代表者　吉村 奈津江（東京工業大学 精密工学研究所　准教授）
連携研究者　神原 裕行（東京工業大学 精密工学研究所　助教）

研究項目 A03-3　慢性ドーパミン欠乏による大脳基底核の脳内身体表現変容とその制御
研究代表者　中村 公一（京都大学 大学院医学研究科　助教）
連携研究者　日置 寛之（京都大学 大学院医学研究科　助教）
連携研究者　田中 琢真（東京工業大学 大学院総合理工学研究科　助教）

研究項目 A03-4　ヒト脳内身体表現の直接記録・刺激介入を用いた神経機構と変容の解明
研究代表者　松本 理器（京都大学 大学院医学系研究科　准教授）
連携研究者　池田 昭夫（京都大学 大学院医学系研究科　教授）
連携研究者　國枝 武治（京都大学 医学系研究科　講師）
連携研究者　松橋 眞生（京都大学 学際融合教育研究推進センター　准教授）
連携研究者　下竹 昭寛（京都大学 大学院医学系研究科　助教）
連携研究者　井内 盛遠（京都大学 大学院医学系研究科　助教）

研究項目 A03-5　感覚神経損傷による脳内身体表現の変容動態の可視化と制御
研究代表者　宮田 麻理子（東京女子医科大学 医学部　教授）
連携研究者　尾崎 弘展（東京女子医科大学 医学部　助教）
連携研究者　植田禎史（東京女子医科大学 医学部　助教）
連携研究者　三好悟一（東京女子医科大学 医学部　助教）

研究項目 A03-6　サル半側空間無視モデルにおける身体と空間
研究代表者　吉田 正俊（生理学研究所 認知行動発達研究部門　助教）
連携研究者　福永 雅喜（生理学研究所 心理生理学研究部門　准教授）

研究項目 A03-7　脳卒中後の把握機能回復をもたらす脳内身体表現の変化：サルモデルによる解明
研究代表者　村田 弓（産業技術総合研究所 人間情報研究部門　研究員）
連携研究者　上野 友之（筑波大学 医学医療系　病院講師）
連携研究者　山本 竜也（つくば国際大学 医療保健学部　助教）
連携研究者　林 拓也（理化学研究所 ライフサイエンス技術基盤研究センター　ユニットリーダー）
連携研究者　肥後 範行（産業技術総合研究所 人間情報研究部門　主任研究員）

研究項目 B01-1　脳内身体表現のスローダイナミクスモデル

研究代表者　淺間　一（東京大学 大学院工学系研究科　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　田中 宏和（北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科　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）
研究分担者　井澤　淳（筑波大学 システム情報系　准教授）
連携研究者　山下　淳（東京大学 工学系研究科　准教授）
連携研究者　矢野 雅文（東北大学 電気通信研究所　名誉教授）
連携研究者　安　琪（東京大学 大学院工学系研究科　特任助教）
連携研究者　温　文（東京大学 大学院工学系研究科　特任研究員）

研究項目 B02-1　脳内身体表現を変容させる運動制御モデル

研究代表者　太田　順（東京大学 人工物工学研究センター　教授）
研究分担者　青井 伸也（京都大学 大学院工学研究科　講師）
研究分担者　千葉 龍介（旭川医科大学 医学部　准教授）
連携研究者　緒方 大樹（東京大学 人工物工学研究センター　助教）
連携研究者　柳原　大（東京大学 大学院総合文化研究科　准教授）
連携研究者　土屋 和雄（京都大学 大学院工学研究科　名誉教授）
連携研究者　青柳 富誌生（京都大学 大学院情報学研究科　名誉教授）

研究項目 B03-1　疾患動物の運動機能回復の計測・解析に基づくシナジーの構成機序の解明

研究代表者　舩戸 徹郎（電気通信大学 情報理工学研究科　助教）

研究項目 B03-2　駆動関節を有する人工肢の運動学習過程における身体表現変容因子の同定

研究代表者　長谷川 泰久（名古屋大学 大学院工学研究科　教授）

研究項目 B03-3　筋骨格ヒューマノイドを用いた脳型身体表現モデルの構成論的研究

研究代表者　細田 耕（大阪大学 大学院基礎工学研究科　教授）
連携研究者　津田 一郎（北海道大学 電子科学研究所　教授）
連携研究者　久保 英夫（北海道大学　理学研究科　教授）
連携研究者　池本 周平（大阪大学 基礎工学研究科　助教）

研究項目 B03-4　ベイズ潜在木構造生成過程による脳内身体表現スローダイナミクスモデル

研究代表者　谷口 忠大（立命館大学 情報理工学部　准教授）
連携研究者　萩原 良信（立命館大学 情報理工学部　助教）

研究項目 C01-1　脳内身体表現の変容を用いたニューロリハビリテーション

研究代表者　出江 紳一（東北大学 大学院医工学研究科 リハビリテーション医工学分野　教授）
研究分担者　稲邑 哲也（国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系　准教授）
連携研究者　田中 尚文（東北大学 大学院医学系研究科 肢体不自由学分野　准教授）
連携研究者　大内田 裕（東北大学 大学院医学系研究科 肢体不自由学分野　助教）
連携研究者　松宮 一道（東北大学 電気通信研究所 ブレインウェア研究開発施設　准教授）
連携研究者　阿部 浩明（広南病院リハビリテーション科　兼　東北大学大学院肢体不自由学分野 非常勤講師）
連携研究者　関口 雄介（東北大学病院リハビリテーション部 兼 東北大学大学院肢体不自由学分野 非常勤講師）

研究項目 C02-1　感覚入力への介入を用いた姿勢・歩行リハビリテーション

研究代表者　芳賀 信彦（東京大学 大学院医学系研究科　教授）
研究分担者　花川　隆（国立精神・神経医療研究センター 脳病態統合イメージングセンター 部長）
研究分担者　横井 浩史（電気通信大学 情報理工学研究科　教授）
研究分担者　大脇　大（東北大学 電気通信研究所　助教）
連携研究者　石黒 章夫（東北大学 電気通信研究所　教授）
連携研究者　四津 有人（東京大学 大学院医学系研究科　特任助教）
連携研究者　杉　正夫（電気通信大学 情報理工学研究科　准教授）
連携研究者　北 佳保里（千葉大学 フロンティア医工学センター　助教）
連携研究者　古屋 晋一（上智大学 理工学部 情報理工学科　准教授）
連携研究者　上原 一将（国立精神・神経医療研究センター 脳病態統合イメージングセンター　外来研究員）

研究項目 C03-1　神経修飾法による新しい運動障害治療の開発

研究代表者　濱田　雅（東京大学 医学部附属病院　助教）

研究項目 C03-2　動作推定と機能的電気刺激に基づく筋協調制御能力獲得型ダイレクトリハビリテーション

研究代表者　島　圭介（横浜国立大学 大学院工学研究院　准教授）
連携研究者　島谷 康司（県立広島大学 保健福祉学部　准教授）
連携研究者　中野 英樹（畿央大学 ニューロリハビリテーション研究センター　客員研究員）
連携研究者　田坂 厚志（大阪行岡医療大学 医療学部　講師）

研究項目 C03-3　新しいバランス機能評価システムの開発

研究代表者　向野 雅彦（藤田保健衛生大学 医学部　講師）
連携研究者　松田 文浩（藤田保健衛生大学 医療科学部　助教）

研究項目 C03-4　身体失認・失行症における身体性変容の解明とニューロリハビリテーション法の開発

研究代表者　森岡　周（畿央大学 健康科学部　教授）
連携研究者　嶋田 総太郎（明治大学 理工学部　教授）
連携研究者　松尾　篤（畿央大学 健康科学部　教授）
連携研究者　冷水　誠（畿央大学 健康科学部　准教授）
連携研究者　岡田 洋平（畿央大学 健康科学部　助教）
連携研究者　前岡　浩（畿央大学 健康科学部　助教）
連携研究者　信迫 悟志（畿央大学 ニューロリハビリテーション研究センター　助教）
連携研究者　大住 倫弘（畿央大学 ニューロリハビリテーション研究センター　助教）