

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2014～2018

課題番号：26120005

研究課題名（和文）脳内身体表現のスローダイナミクスモデル

研究課題名（英文）Modeling of slow dynamics on body representations in brain

研究代表者

浅間 一（Asama, Hajime）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：50184156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 103,870,000円

研究成果の概要（和文）：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った。具体的に、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を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国は超高齢社会である。高齢者では加齢に伴う身体機能の低下だけでなく、脳卒中などになる割合も増え、その結果として片麻痺などが生じると運動機能が著しく制限される。特に片麻痺などでは運動機能の変化が急激に起こるため、発症前に脳内に構築されていた脳内身体表現と実際の身体との間に齟齬が生じてしまい、運動が適切に生成できなくなってしまう。このような状況を改善するためには、適切にリハビリテーションを行い、脳内身体表現の更新を行うことが重要である。本研究ではリハビリテーション中の運動主体感を高く保持させるシステムを構築し、リハビリテーションを通じて脳内身体表現の改善を行った。

研究成果の概要（英文）：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 perceptual and motion experience, which can be called “slow dynamics.” In this group, these dynamics on the process creating and updating body representation in brain related to body consciousness were investigated and modelled mathematically. B01 research group conducted mathematical modeling of creation of body consciousness and transformation of body representation of brain, verification of cognition-body mapping model, and examination of its application to model-based rehabilitation.

研究分野：システム工学

キーワード：システム工学 運動主体感 身体所有感 身体表象 リハビリテーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトは脳内に自己の身体の表象(脳内身体表現)を有している。運動主体感(自己の身体運動の主体が自分であるという感覚)や身体保持感(自己の身体が自分のものだという感覚)などの知覚(身体意識と呼ぶ)は、感覚器から得られる感覚情報がこの脳内身体表現に修飾され得られる[Gallagher 2005]。一方、脳内身体表現は、知覚経験に基づき、生成・更新される。前者は実時間であるのに対し、後者はゆっくりとした時定数を有しており、本研究では前者を fast dynamics、後者を slow dynamics と呼ぶ(図1)。

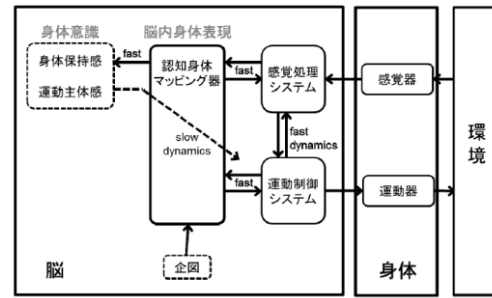


図1：脳内身体表現とそのダイナミクス

身体の一部を失った患者の幻肢痛は、身体と脳内身体表現の不一致によって知覚されたものであると考えられる。仮想情報提示と運動模倣による幻視痛のリハビリは、slow dynamics への外的介入による上記不一致の解消過程と捉えることができるが、そのメカニズムは明らかになっていない。脳内身体表現モデルを構築し、slow dynamics のメカニズムを理解できれば、より効果的なリハビリのための介入手法が導出できると期待される(図2)。

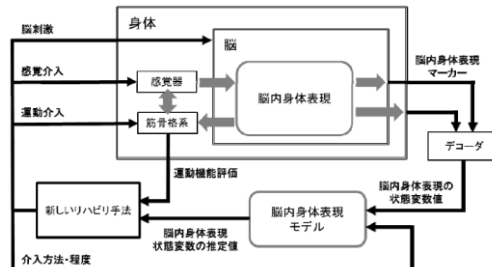


図2：脳内身体表現モデルに基づくリハビリ

一方、我々は、これまで特定領域研究「移動知」をはじめとする研究において、生物の適応的運動・行動生成の脳内の数理モデルの構築を行うとともに、マルチモーダルな感覚フィードバックの介入が、運動主体感・身体保持感やリハビリ効果に与える影響について明らかにしてきた。ここでは構成論的方法論に基づき行われ、セロトニン神経系の数理モデルの構築など、すでに極めて新規性の高い研究成果が得られている。ただし、これらの研究は、いずれも fast dynamics の解明に関するものであり、その背後に存在する slow dynamics までは考慮していない。

2. 研究の目的

本研究では、「slow dynamics は、fast dynamics によって得られる知覚に基づき、脳内身体表現を実際の身体と一致させるように生成・更新させるように作用する」という作業仮説に基づき、脳内身体表現生成・更新の slow dynamics のメカニズムを構成論的に明らかにする。特に、身体意識という認知機能がその力学系に重大な影響を与えると考え、脳内身体表現を認知身体マッピング器と捉える。具体的には、マルチモーダルな多重フィードバックを有する多様な時定数を持つダイナミカルシステムとして数理モデル化するとともに、仮想環境を用いた認知心理実験や fMRI 実験の結果からモデルパラメータの同定を行う。また知覚フィードバック系に人工的に介入した時のリハビリの効果も、モデルから推定されるものと比較し、モデルの妥当性を検証する。得られた脳内身体表現モデルの各要素機能が実際の脳のどこでどのように表象されているのかは、A01 の脳神経生理研究との連携により明らかにする。さらに、臨床研究で得られる知見との整合性の評価に基づきモデルの精緻化を行うとともに、脳内身体表現モデルから導出した新たなリハビリ介入手法の有効性を C01 と連携して確認する。

3. 研究の方法

(1) 知覚・脳内身体表現の生成モデル: fast model

図3は、「slow dynamics は、fast dynamics によって得られる知覚に基づき、脳内身体表現を実際の身体と一致させるように生成・更新させるように作用する」という作業仮説に基づき、Comparator model [Frith, 2000]を含む知覚・脳内身体表現の生成モデルをブロック線図として表わしたものである。これに基づき仮想環境を用いた認知心理実験や fMRI 実験の結果などからモデルパラメータを同定するとともに、臨床研究や脳生理研究の知見と各モジュールとの対応付けを行う。

(2) 脳内身体表現の表現形式および変容機構モデル: slow model

田中は、感覚運動連関を実現する神経・筋制御の観点から上肢到達運動学習における脳内身体表現のモデルとして、身体各部の空間表現を用いたモデルの構築に着手する。同モデルは、関節角を基準とした運動制御モデルとは異なり、各身体部位の空間表現を陽に持つことで複雑な逆運動学・逆力学計算を必要としない点に特徴がある。

(3) 知覚・脳内身体表現の相互作用モデル構築 (fast-slow model の結合)

意識上の脳内身体表現の更新に関わらず幻肢が保持される現象[Ramachandran, 1995]の機構を理解することは効果的なリハビリ法を設計する上で極めて重要である。この現象理解には、脳内身体表

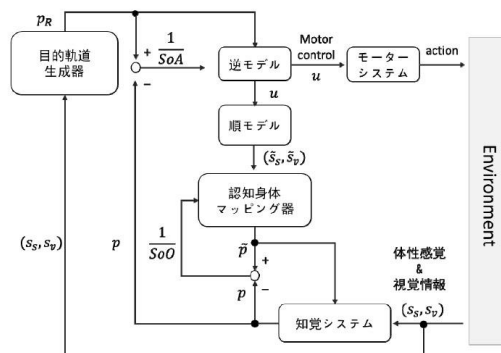


図3：知覚・脳内身体表現の相互作用モデル

- 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, 査読有, 82 巻, 2015, 1-11, DOI: 10.1299/transjsme.15-00424,
- [8] Shiro Yano, Takaki Maeda and Toshiyuki Kondo, Slow dynamics perspectives on the Embodied-Brain Systems Science, *Neuroscience Research*, 査読有, 104 巻, 2016, 52-5, DOI: 10.1016/j.neures.2015.11.002
- [9] Pekny Sarah E., Jun Izawa and Reza Shadmehr, Reward-dependent modulation of movement variability, *Journal of Neuroscience*, 査読有, 35 巻, 2015, 4015-4024, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3244-14.2015
- [10] Jun Izawa, Tomohisa Asai and Hiroshi Imamizu, Computational motor control as a window to understanding schizophrenia, *Neuroscience Research*, 査読有, 104 巻, 2016, 44-51, DOI: 10.1016/j.neures.2015.11.004
- [11] Takahiro Ishikawa, Saeka Tomatsu, Jun Izawa and Shinji Kakei, The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models? *Neuroscience Research*, 査読有, 104 巻, 2016, 72-79, DOI: 10.1016/j.neures.2015.12.003
- [12] Hirokazu Tanaka, Modeling the motor cortex: Optimality, recurrent neural networks, and spatial dynamics, *Neuroscience Research*, 査読有, 104 巻, 2016, 64-71, DOI: 10.1016/j.neures.2015.10.012
- [13] Ningjia Yang, Qi An, Hiroshi Yamakawa, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, Muscle Synergy Structure using Different Strategies in Human Standing-up Motion, *Advanced Robotics*, 査読有, 31 巻, 2017, 40-54, DOI: 10.3389/10.1080/01691864.2016.1238781
- [14] Yuki Ishikawa, Qi An, Junki Nakagawa, Hiroyuki Oka, Tetsuro Yasui, Michio Tojima, Haruhi Inokuchi, Nobuhiko Haga, Hiroshi Yamakawa, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita and Hajime Asama, Gait Analysis of Patients with Knee Osteoarthritis by Using Elevation Angle: Confirmation of the Planar Law and Analysis of Angular Difference in the Approximate Plane, *Advanced Robotics*, 査読有, 31 巻, 2017, 68-79, DOI: 10.3389/10.1080/01691864.2016.1229217
- [15] R. Minohara, W. Wen, S. Hamasaki, T. Maeda, M. Kato, H. Yamakawa, A. Yamashita, and H. Asama, Strength of Intentional Effort Enhances the Sense of Agency, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 7 巻, 2016, 1-5, DOI: 10.3389/fpsyg.2016.01165
- [16] W. Wen, K. Muramatsu, S. Hamasaki, Q. An, H. Yamakawa, Y. Tamura, A. Yamashita, and H. Asama, Goal-directed movement enhances body representation updating, *Frontiers in Human Neuroscience*, 査読有, 10 巻, 2016, 1-10, DOI: 10.3389/fnhum.2016.00329
- [17] N. Arizono, Y. Ohmura, S. Yano, and T. Kondo, Functional connectivity analysis of NIRS recordings under rubber hand illusion to find a biomarker of body ownership, *Neural Plasticity*, 査読有, 2016 巻, 2016, 1-9, DOI: 10.1155/2016/6726238
- [18] 近藤敏之, 長嶺 伸, 大村優慈, 矢野史朗, 没入型ヘッドマウントディスプレイの認知心理学実験への活用事例, *日本神経回路学会誌*, 査読有, 23 巻, 2016, 87-97, DOI: 10.3902/jnns.23.87
- [19] Shunsuke Hamasaki, Qi An, Masataka Murabayashi, Yusuke Tamura, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama, Evaluation of the Effect of Prime Stimulus on Sense of Agency in Stop Operation of the Object in Circular Motion, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 査読有, 21 巻, 2017, 1161-1171, DOI: 10.20965/jaciii.2017.p1161
- [20] Wen Wen, Daisuke Tomoi, Hiroshi Yamakawa, Shunsuke Hamasaki, Kaoru Takakusaki, Qi An, Yusuke Tamura, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama, Continuous Estimation of Stress Using Physiological Signals during a Car Race, *Psychology*, 査読有, 8 巻, 2017, 978-986, DOI: 10.4236/psych.2017.8706
- [21] Wen Wen, Atsushi Yamashita, Hajime Asama, Measurement of the perception of control during continuous movement using electroencephalography, *Frontiers in Human Neuroscience*, 査読有, 11 巻, 2017, 1-7, DOI: 10.3389/fnhum.2017.00392
- [22] Yoshida Kazunori, An Qi, Yozu Arito, Chiba Ryosuke, Takakusaki Kaoru, Yamakawa Hiroshi, Tamura Yusuke, Yamashita Atsushi, Asama Hajime, Visual and Vestibular Inputs Affect Muscle Synergies Responsible for Body Extension and Stabilization in Sit-to-Stand Motion, *Frontiers in Neuroscience*, 査読有, 12 巻, 2019, 1042, DOI: 10.3389/fnins.2018.01042
- [23] An Qi, Ishikawa Yuki, Wen Wen, Ishiguro Shu, Ohata Koji, Yamakawa Hiroshi, Tamura Yusuke, Yamashita Atsushi, Asama Hajime, Skill Abstraction of Physical Therapists in Hemiplegia Patient Rehabilitation Using a Walking Assist Robot, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, 13 巻, 2019, 217-278, DOI: 10.20965/ijat.2019.p0271
- [24] Shunsuke Hamasaki, Qi An, Wen Wen, Yusuke Tamura, Hiroshi Yamakawa, Satoshi Unenaka, Satoshi Shibuya, Yukari Ohki, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama, Changes in Body Representation of the Human Upper Limb as a Function of Movement and Visual Hand Position, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 査読有, 23 巻, 2019, 196-208, DOI: 10.20965/jaciii.2019.p01996
- [25] Wen Wen, Minohara Rin, Hamasaki Shunsuke, Maeda Takaki, An Qi, Tamura Yusuke, Yamakawa

- Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime, The Readiness Potential Reflects the Reliability of Action Consequence, *Scientific Reports*, 査読有, 8 巻, 2018, 11865, DOI: 10.1038/s41598-018-30410-z
- [26] An Qi, Nakagawa Junki, Yasuda Junko, Wen Wen, Yamakawa Hiroshi, Yamashita Atsushi, Asama Hajime, Skill Extraction from Nursing Care Service Using Sliding Sheet, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, 12 巻, 2018, 533-541, DOI: 10.20965/ijat.2018.p0533
- [27] Kogami Hiroki, An Qi, Yang Ningjia, Yamakawa Hiroshi, Tamura Yusuke, Yamashita Atsushi, Asama Hajime, Shimoda Shingo, Yamasaki Hiroshi, Itkonen Matti, Shibata-Alnajjar Fady, Hattori Noriaki, Kinomoto Makoto, Takahashi Kouji, Fujii Takanori, Otomune Hironori, Miyai Ichiro, Effect of Physical Therapy on Muscle Synergy Structure During Standing-Up Motion of Hemiplegic Patients, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 査読有, 3 巻, 2018, 2229-2236, DOI: 10.1109/LRA.2018.2811050
- [28] Lee Kangwoo, Oh Youngmin, Izawa Jun, Schweighofer Nicolas, Sensory prediction errors, not performance errors, update memories in visuomotor adaptation, *Scientific Reports*, 査読有, 8 巻, 2018, 16483, DOI: 10.1038/s41598-018-34598-y
- [29] Kita Kahori, Osu Rieko, Hosoda Chihiro, Honda Manabu, Hanakawa Takashi, Izawa Jun, Neuroanatomical Basis of Individuality in Muscle Tuning Function: Neural Correlates of Muscle Tuning, *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 査読有, 13 巻, 2019, 28, DOI: 10.3389/fnbeh.2019.00028
- [30] Tanaka Hirokazu, Miyakoshi Makoto, Makeig Scott, Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density EEG study, *Scientific Report*, 査読有, 8 巻, 2018, 8205, DOI: 10.1038/s41598-018-26609-9
- [31] Tanaka Hirokazu, Ishikawa Takahiro, Kakei Shinji, Neural Evidence of the Cerebellum as a State Predictor, *The Cerebellum*, 査読有, 1 巻, 2019, 1-23, DOI: 10.1007/s12311-018-0996-4
- [32] Sang Vu, Yano Shiro, Kondo Toshiyuki, On-Body Sensor Positions Hierarchical Classification, *Sensors*, 査読有, 18 巻, 2018, 3612, DOI: doi.org/10.3390/s18113612
- [33] Ota Nakao, Matsukawa Hidetoshi, Noda Kosumo, Sato Hirotaka, Hatano Yuto, Hashimoto Atsumu, Miyazaki Takanori, Kondo Tomomasa, Kinoshita Yu, Saito Norihiro, Kamiyama Hiroyasu, Tokuda Sadahisa, Kamada Kyoussuke, Tanikawa Rokuya, Evaluation of Microsurgery for Managing Giant or Complex Cerebral Aneurysms: A Retrospective Study, *World Neurosurgery*, 査読有, 115 巻, 2018, e190-e199, DOI: 10.1016/j.wneu.2018.04.007

〔学会発表〕 (計 65 件)

- [1] Q. An, Y. Ishikawa, S. Aoi, T. Funato, H. Oka, H. Yamakawa, A. Yamashita, H. Asama, Analysis of Muscle Synergy Contribution on Human Standing-up Motion Using Human Neuro-Musculoskeletal Model, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015)*, 2015 年 05 月 26 日～2015 年 05 月 30 日, Seattle, USA
- [2] Qi An, 石川雄己, 青井伸也, 船戸徹郎, 岡敬之, 山川博司, 山下淳, 浅間一, 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ウム, 2015 年 03 月 15 日～2015 年 03 月 16 日, 軽井沢プリンスホテルウエスト, 北佐久郡, 長野県
- [3] 簗原凜, 温文, 濱崎峻資, 前田貴記, 加藤元一郎, 山川博司, 山下淳, 浅間一, 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ウム, 2015 年 03 月 15 日～2015 年 03 月 16 日, 軽井沢プリンスホテルウエスト, 北佐久郡, 長野県
- [4] 田中宏和, 到達運動の運動方程式と前頭頭頂運動野の座標系, 第 120 回日本解剖学会 合同大会, 2015 年 03 月 21 日～2015 年 03 月 23 日, 神戸国際会議場・展示場, 神戸市, 兵庫県
- [5] 近藤敏之, 北原康佑, 林叔克, 佐伯碧, 運動想起型 BCI のためのニューロフィードバック訓練における受動的感覚呈示の影響, 第 27 回自律分散システム・シンポジウム, 2015 年 01 月 22 日～2015 年 01 月 23 日, 東京理科大学神楽坂キャンパス, 新宿区, 東京都
- [6] Kosuke Kitahara and 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)*, 2015 年 08 月 25 日～2015 年 08 月 30 日, Milan, Italy
- [7] Naoki Arizono and 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)*, 2015 年 08 月 25 日～2015 年 08 月 30 日, Milan, Italy
- [8] Ngoc Quang Nguyen, Quang Dang Khoa Truong and 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)*, 2015 年 08 月 25 日～2015 年 08 月 30 日, Milan, Italy

(以下省略)

〔図書〕（計 1 件）

近藤敏之, 朝倉書店, リズム運動, バイオメカニズム学会 (編) 「手の百科事典」 機能編, 第 16 章, 2017, 608

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：近藤 敏之

ローマ字氏名：Kondo, Toshiyuki

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号（8 桁）：60323820

研究分担者氏名：田中 宏和

ローマ字氏名：Tanaka, Hirokazu

所属研究機関名：北陸先端科学技術大学院大学

部局名：先端科学技術研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：00332320

研究分担者氏名：井澤 淳

ローマ字氏名：Izawa, Jun

所属研究機関名：筑波大学

部局名：システム情報系

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：20582349

研究分担者氏名：矢野 史朗

ローマ字氏名：Yano, Shiro

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：大学院工学研究院

職名：助教

研究者番号（8 桁）：90636789

(2)研究協力者

研究協力者氏名：山下 淳

ローマ字氏名：Yamashita, Atsushi

研究協力者氏名：矢野 雅文

ローマ字氏名：Yano, Masafumi

研究協力者氏名：安 琪

ローマ字氏名：An, Qi

研究協力者氏名：温 文

ローマ字氏名：Wen, Wen

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。