

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700279

研究課題名(和文) 病理から理解する意思作用感のメカニズム：構成論的アプローチ

研究課題名(英文) Constructive approach to pathological mechanisms for disturbance of sense of agency

研究代表者

山下 祐一 (Yamashita, Yuichi)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・客員研究員

研究者番号：40584131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)： 行為の意思作用感(sense of agency)のメカニズムをロボット成論的アプローチにより理解することを目的とし、意思作用感の異常が、人が柔軟で多様な行動を生成するために欠かせない予測運動制御システムの機能的な階層性の異常に関連する、との計算論的モデルを検証した。統合失調症に特徴的な行為の意思作用感の異常が、階層的な神経回路における機能的断裂と、これによって生じる予測誤差最小化プロセスの異常に対する代償、として理解できることが示された。この結果は、統合失調症の病態に対するシステムレベルでの原理的説明を提供し、計算論的精神医学が、神経・精神疾患の研究に貢献できる可能性を示唆している。

研究成果の概要(英文)： We hypothesize that altered awareness of action in schizophrenia may arise from disturbance of the forward model originating in functional dysconnection in a hierarchical neural network. The proposed idea was tested through a neuro-robotic experiment using a hierarchical neural network model connected to a humanoid robot interacting with a physical environment. The results demonstrate that not only top-down forward dynamics, but also bottom-up regression processes driven by prediction error are important mechanisms for flexible adaptation to unpredictable changes in environment. In the simulated functional disconnection, in contrast to the normal condition, it turns out that this bottom-up regression process generates unnecessary modulatory signals which may induce altered awareness of action in patients. These results suggest that the proposed hypothesis may provide novel insight for understanding the pathological mechanisms of schizophrenia.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：脳・神経 神経科学 認知科学 ニューラルネットワーク 意思作用感 統合失調症 精神疾患

1. 研究開始当初の背景

自分の行為は自分の意思に基づいている、という感覚は、ふだん我々が自然にもっているものである。この感覚は意思作用感 (sense of agency) とよばれ、我々の自己・他者という意識の基礎をなすものと考えられている (Gallagher 2000)。統合失調症の患者は時に、自分の行為が自分の意思ではなく「他の何かによって影響を受けている」と感じることがある。この症状は、“させられ体験” もしくは“被影響体験” とよばれ、自己の行為の意思作用感の異常に由来すると考えられている。統合失調症の病理は、哲学・心理学・認知科学など自己・他者認知を研究対象とする幅広い分野で、たびたび研究の題材となってきた。それはその病理を理解することが自己・他者認知のメカニズムを理解するために非常に重要と考えられてきたからである。提案者自身も精神科医として臨床に従事する傍ら統合失調症の意思作用感の異常を研究しており (業績[7])、一貫して意思作用感成立のメカニズムに興味を持ってきた。

意思作用感の異常の病態メカニズムは、未だ明らかにされていないのが現状であるが、近年、認知神経科学者 Frith (2000) によって精神医学・神経科学をはじめ哲学まで幅広い分野にインパクトを与える重要な仮説が提案された。この仮説は計算論的な予測運動制御理論に基づいて、行為の意思作用感障害のメカニズムを概念的に説明したものである (forward model 仮説)。この仮説によれば、自己の運動結果の感覚入力予測である forward model と実際の感覚入力と一致するとき、感覚入力の減弱を引き起こし、この減弱が行為の意思作用感をもたらすとされる。統合失調症では、forward model による感覚入力の予測に障害があり、実際には意図された運動が生成できているにもかかわらず、予測との不一致があるため意思作用感の異常を来すとされる。この仮説を検証しようとする実証的な研究もいくつか存在するが、一貫した証拠は得られておらず、より詳しい理論や検証が求められている。

一方提案者は、統合失調症の患者に体験の分節化とその統合に障害があるという臨床的知見から、統合失調症の基本的な障害には、脳の情報処理における階層性が関与しているのではないかと考えてきた。提案者がこれまで行ってきた、神経システムにおける時系列情報の分節化と統合、階層的な情報処理プロセスの研究 (業績[2],[3]など) は、このような興味を背景にしている。本研究では、forward model 仮説と、提案者自身による予測運動制御システムにおける機能的階層性の研究を統合し発展させる形で、意思作用感とその病理のメカニズムのモデルを提案しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究は、行為の意思作用感 (sense of

agency) のメカニズムを構成論的アプローチにより理解することを目的とする。特に統合失調症における意思作用感の障害を標的とし、その病態を理解することで、正常な意思作用感の成立のために本質的な要素は何かということ明らかにしようとする。意思作用感の異常は、人が柔軟で多様な行動を生成するために欠かせない予測運動制御システムの機能的階層性の異常に関連する、との計算論的モデルを提案し、その妥当性をロボット実験で検証する。本研究は、柔軟な知性をもつロボットの設計原理といった技術面だけでなく、神経科学や精神医学などの実証研究への橋渡しとなるような洞察を得ることも目的とする。

3. 研究の方法

意思作用感の異常が、予測運動制御システムの機能的階層性の異常に由来するとの仮説を、神経回路モデルとロボットをつかった実験により検証した。提案する適応行動における予測運動制御の計算理論を神経回路モデルとして具体化し、その妥当性をテストする。神経回路モデルとは、生物の神経システムを模した計算モデルで、人工ニューロン素子がシナプス結合によりネットワークを形成したものである。学習によってシナプスの結合強度を変化させることで、連想記憶、感覚・運動マッピング、時系列パタンの生成など、さまざまな知的情報処理を実現できる。特に、リカレント・ニューラル・ネットワーク recurrent neural network (以下 RNN) は、その再帰的な結合に基づいて内部状態を保持することにより複雑なダイナミクスを生成できるため、感覚・運動シーケンスなどの時空間的なパターン学習のモデルにしばしば利用される。神経回路モデルは、その情報処理機能が神経回路を構成するニューロン素子の活動レベルとシナプス結合から生成される、という意味で実際の神経システムの特徴をよく反映しており、マクロなレベルで生物学的な神経回路のメカニズムを模倣していると考えられることができる。

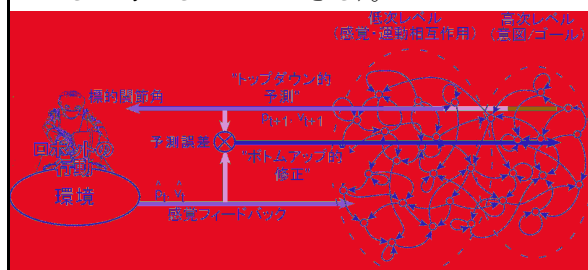


図1. システム概要

図1は、システムの概要を示している。神経回路は、現在の時刻 t におけるロボットの腕の関節角度の感覚 $p(t)$ と視覚イメージ $v(t)$ を入力として受け、次の時刻 $t+1$ の感覚の予測 p_{t+1} 、 v_{t+1} を出力する。関節角度の予測は、運動指令としてロボットに送られ、

ロボットはこれに基づいて動作を生成する。ロボットの動作の結果生じる環境の変化を反映した感覚情報は、感覚フィードバックとしてふたたびロボットに戻される。このループによって、ロボットは連続的な動作を生成することができる。神経回路のダイナミクスとして獲得される感覚予測の機能は、運動制御理論における順モデルとよばれるものに相当する。

本研究で用いる神経回路の主要部分は、連続時間型リカレント・ニューラル・ネットワーク continuous time RNN (CTRNN)でモデル化される。CTRNNはRNNの1つのタイプで、ニューロン素子の膜電位が現在のシナプス入力のみではなく過去の状態の履歴に影響される、という特性のために連続的に変化する感覚・運動シーケンスなどの学習に有利である。CTRNNは、外部との入出力を受け持つ入出力ニューロンと、入出力を受けないコンテキスト・ニューロンで構成される。本研究では特に、コンテキスト・ニューロンを活動の時間特性の異なる2つのグループに分ける。最初のグループは、活動が早く変化する、Cfニューロン (Cf)、もう一方は、活動がゆっくり変化するCsニューロン (Cs)である。この多時間スケールの特性を導入することにより、神経回路にプリミティブ (低次レベル) とその組み合わせ (高次レベル) といった機能的な階層性が自己組織化されることが可能になる。

神経活動と認知や行為の関係を検証するために、神経回路モデルに駆動され実際の物理環境で動作する小さなヒューマノイドロボットを使用する。ロボットの前には、操作対象の物体が置かれた作業台が設置され、ロボットは物体の位置や行動の順序に応じたルールに従う認知行動タスクをこなすことが求められる。

感覚予測の順モデルは、学習を通じて神経回路のダイナミクスとして獲得される。学習の教示信号は、実験者がロボットの両手を保持して、ゴールとなる行為の軌跡を導き、記録された関節角度と視覚情報の時系列データを用いる。学習の目的は、神経回路の最適なシナプス結合を獲得することである。学習の初期には、シナプス結合強度はランダムに設定され、神経回路の出力によって生成される感覚予測とロボットの行為は、ランダムである。シナプス結合強度は、この神経回路が生成した予測と教示信号との誤差に基づいて、予測誤差を最小化する方向に更新される。シナプス結合更新の計算は、バック・プロパゲーションという数理的アルゴリズムに従って行われる。この更新プロセスを多数回くりかえすことで、最終的に予測誤差が最小化され、神経回路は最適なシナプス結合を得ることができる。

ロボットのタスクは、物体の位置と行為を対応づけたルールに基づいて、(A) 位置 R において物体を左右に 3 回動かす、(B) 位置 L

において物体を上下に 3 回動かす、という 2 つの異なるタイプの行為を繰り返し生成することである。ロボットは、これら一連の行為を生成することに加えて、実験者によって予期せぬタイミングで物体が動かされるのに柔軟に対応し、行為を切り替えることが求められる。このような柔軟な適応行動を実現するためには、ロボットは、現在実行しているタスクの内的な表象を持っている必要があり、さらにこの表象は、標的の行為が変わったときには更新されなくてはならない。本研究では、このようなロボットの内的な表象とそれに対応する神経活動のことを、それぞれ“意図/ゴール”、および“意図状態”とよぶ。

行為の実行中にリアルタイムに複数の行為のパターンを切り替えるため、Csニューロンの一部をパラメトリック・バイアス parametric bias (PB)として用いる。PBとは、神経回路への定常的な入力で、非線形な力学システムのダイナミクスを変化させる分岐パラメータとして機能する。PBのこの機能を利用すると、PBがある値をとることによって、神経回路は特定の行為のパターンをトップダウン的に生成することができる。特定のCsニューロンのダイナミクス (つまり、異なるプリミティブの組み合わせ) に関連づけられたPBニューロンの活動は、トップダウン的な意図状態に対応すると考えることができる。

意図/ゴールに基づくトップダウン的な行為の生成に加えて、外界の変化に迅速に柔軟に適応するために、ボトムアップ的な修正プロセスを導入する (図 1)。外界に予期せぬ変化があると、神経回路による感覚予測と実際の感覚フィードバックとの間に予測誤差が生じる。ボトムアップ的な修正プロセスでは、この予測誤差に基づいて、PBニューロンの活動 (意図状態) が予測誤差を最小化する方向に自律的に修正される。このプロセスの繰り返しにより、PBニューロンの活動は、新しい状況に適したもう一つのタスク行動に対応した値に到達し、結果、ロボットの行為は柔軟に変化させることができる。行為実行中の予測誤差最小化の計算は、学習における誤差最小化と同じバック・プロパゲーションのアルゴリズムで実現できる。行為の生成において、トップダウン的な意図とボトムアップ的な修正はリアルタイムで行われ、これによりロボットは予期できない外界の変化に柔軟に対応することが可能になる。

4. 研究成果

1) トップダウン的な予測とボトムアップ的な修正の相互作用による環境変化への柔軟な適応

学習を通じてロボットは、トップダウン的な意図に基づいて目標のタスク行為を実際の物理環境との相互作用の中で生成することに成功した。さらに、ボトムアップ的な修正のメカニズムを導入することで、トップダウ

ン的な行為の生成のみならず、外界の変化への柔軟な対応が可能になることが確かめられた。図 2A は、訓練された神経回路によって、ロボットがリアルタイムでトップダウン的予測とボトムアップ的な修正を繰り返しながら、タスクの行為を生成している際の感覚・運動シーケンスとニューロン活動の例である。予期できない物体の位置の移動によって、予測誤差が一時的に上昇し、ロボットの意図状態が修正され、結果的に柔軟な行為の切替えが達成されている (図 2A)。ここで予測誤差の上昇は、外的な攪乱の存在を意味し、予測誤差を最小化する方向に意図状態を修正することは、外的な変化を認識することに対応すると考えることができる。

2) 階層間の機能的断裂による異常な予測誤差

トップダウン的予測とボトムアップ的修正の相互作用における障害が、統合失調症の症状形成に関与するとの仮説を確かめるため、階層的ネットワークの機能的断裂をシミュレートする。正常に行為を生成することができるように訓練した神経回路の、プリミティブに相当する情報を表現する Cf ニューロン (低次レベル) と、意図/ゴールとプリミティブの切り替えを表現する Cs ニューロン (高次レベル) との間のシナプス結合に、ランダム・ノイズを加えることで、階層間の機能的な断裂を生じさせた。

シナプス断裂の程度が軽微な場合、ロボットは見た目上、正常な行為を生成する。しかし、シナプス断裂によって引き起こされた順モデルの異常があるため、散発的な予測誤差の増加が生じる。散発的な予測誤差の増加により、予測誤差を最小化するボトムアップ的プロセスが自律的に動作し、ときに不規則な意図状態の切り替えが引き起こされる (図 2B 矢印)。この自発的な予測誤差シグナルは、シナプス結合の異常に由来するため、環境には感覚的外乱がないにもかかわらず発生する。したがって、この内的に発生した、いわば“架空の”予測誤差は、正常に生成される予測誤差と原理的には区別できない。さらに、内的に発生した異常な予測誤差シグナルは、ときに不規則な意図状態の切り替えを引き起こす。これらの観察は、このような内的に発生した異常な予測誤差シグナルが、統合失調症の症状形成に重要な意味を持つ可能性を示唆する。例えば、発生源不明の予測誤差は、原因が特定できない「何かがおかしい」という感じ (妄想気分) を引き起こし、行動と乖離した不安定な意図の切り替えは、自分の行為が何か外の力によって影響を受けていると感じる体験 (被影響体験) を引き起こす原因となる可能性が考えられる。

シナプス断裂の程度が強くなると、ロボットの行動はタスクのルールに従った組織化された形を失い、見た目上ランダムな行為を生成する (解体した行為)。異常な行動は、

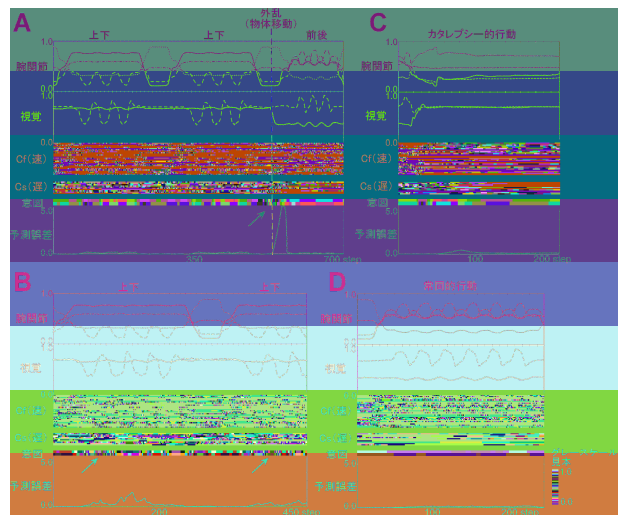


図 2. ロボットの行為とニューロン活動

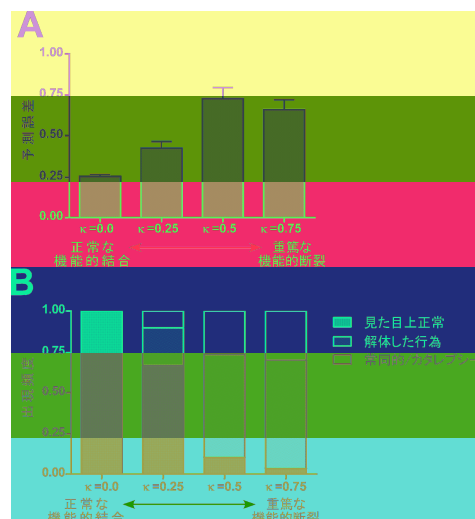


図3. シナプス断裂による変化

ときに統合失調症の重症例で観察されるものに類似したかたち、例えばカタレプシー的行動 (同一姿勢で停止: 図 2C)、常同症的行動 (同じ動作をくり返す: 図 2D) といった、統合失調症の重症例で観察されるものに類似したパターンを示した。ロボットのこれらの異常行動は、異常な予測誤差とその最小化のプロセスを通じて、神経回路のダイナミクスが特定の安定なパターン (周期と固定点のアトラクター) に収束する結果生じると考えられた。

これらの結果は、統合失調症の多彩な症状が、階層的な神経回路における機能的断裂に対する不適応プロセス、すなわち予測誤差最小化のバランスを維持するための代償、として理解できることを示した。このアイデアは、統合失調症との関与が目される脳領域の機能に関する知見と中核症状の形成メカニズムとを結びつける理論的なフレームワークを提供し、今後の神経機能画像研究などの基礎研究に貢献できると考えられた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 山下祐一 (2014) 精神医学研究の新潮流 Computational Psychiatry 2013, 精神医学 56: pp270-271. (査読有り)
<http://ej.islib.jp/ejournal/1405102680.html>
- ② 藤村友美、中谷裕教、山下祐一(2013) 感情の認知と遷移, 生物の科学 遺伝 67: 662-667. (査読無し)
http://www.nts-book.co.jp/item/detail/summary/bio/20051225_42bk13.html
- ③ 山下祐一、松岡洋夫、谷淳 (2013) 計算論的精神医学の可能性: 適応行動の代償としての統合失調症, 精神医学 55: pp885-895. (査読有り)
<http://ej.islib.jp/ejournal/1405102554.html>
- ④ Alnajjar F, Yamashita Y, Tani J. (2013) The hierarchical and functional connectivity of higher-order cognitive mechanisms: neurorobotic model to investigate the stability and flexibility of working memory. Front. Neurobot. 7:2. (査読有り)
doi:10.1007/978-94-007-4792-0_36.
- ⑤ Alnajjar F, Yamashita Y, Tani J. (2013) Formulating a cognitive branching task by MTRNN: A robotic neuroscience experiments to simulate the PFC and its neighboring regions. Advances in Cognitive Neurodynamics 3: 267-273. (査読有り)
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-007-4792-0_36
- ⑥ Yamashita Y, Tani J (2013) Neurodynamical account for altered awareness of action in schizophrenia: a synthetic neuro-robotic study. Advances in Cognitive Neurodynamics 3: 275-280. (査読有り)
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-007-4792-0_37
- ⑦ Yamashita Y, Tani J (2012) Spontaneous prediction error generation in schizophrenia. PLoS ONE 7(5): e37843. (査読有り)
DOI: 10.1371/journal.pone.0037843

[学会発表] (計 8 件)

- ① Murata S, Yamashita Y, Ogata T, Arie H, Tani J, and Sugano S (2013) Altered prediction of uncertainty induced by network disequilibrium: a neuro-robotics study. Computational Psychiatry 2013. Oct 22, 2013, Miami, USA.
- ② Yamashita Y, Izawa R, Tani J (2013) Prediction error disequilibrium in schizophrenia. International Congress of Schizophrenia Research. Apr 24, 2013, Orlando, USA.

- ③ Matsuoka J, Yamashita Y, Baba M, Funada E, Suyama M, Itokawa M, Izawa R. (2013) Suicide attempt correlate with delusional content in the first episode of schizophrenia. International Congress of Schizophrenia Research. Apr 23, 2013, Orlando, USA.
- ④ Yamashita Y, Honda M, Okanoya K, Okada M (2012) Sensitivity to social context in detection of facial expression change. IAS Research Conference 2012. Dec 4, 2012, Kyoto, Japan.
- ⑤ Yamashita Y, Tani J (2012) Disturbance of self as compensation for adaptive behavior. Association for Scientific Study of Consciousness 16. July 4, Brighton, United Kingdom.
- ⑥ Alnajjar F, Yamashita Y, Tan J (2012) Static and dynamic memory to simulate higher-order cognitive tasks, IJCNN2012, June 10, Brisbane, Australia.
- ⑦ Yamashita Y, Tani J (2011) Neurodynamical account for altered awareness of action in schizophrenia: a synthetic neuro-robotic study. ICCN2011, Jun 11, Hokkaido.
- ⑧ Alnajjar F, Yamashita Y, Tani J(2011) Formulating a cognitive branching task by MTRNN: A robotic neuroscience experiments to simulate the PFC and its neighboring regions. ICCN2011, Jun 11, 2011, Hokkaido.

[図書] (計 1 件)

- ① Yamashita Y, Tani J. (2013) Self-organized functional hierarchy through multiple timescale:neuro-dynamical accounts for behavioral compositionality.in Computational and Robotic Models of the Hierarchical Organization of Behavior. Gianluca Baldassarre and Marco Mirolli. eds. Springer, Berlin. pp 47-62

6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 祐一 (YAMASHITA, Yuichi)
独立行政法人 理化学研究所・脳科学総合
研究センター・客員研究員
研究者番号: 40584131