

2008 年 11 月 7 日
独立行政法人 理化学研究所

行動に必要な脳の機能的な階層性に新たに活動時間のメカニズムを導入

- 複雑で多様な行動をスムーズに学習する脳型ロボット開発に新たな道 -

脳は、見る、聞く、嗅ぐ、味あう、触れるという五感ばかりか、走る、歩く、学ぶ、創造するなど、私たちの日ごろの行動そのものをつかさどっています。テーブルに置いてあるコーヒーを飲む、という何気なく日常的に行なっている行動を考えてみましょう。脳はこの日常的な行動を、運動パーツ（運動プリミティブ）とその柔軟な組み合わせ、という機能的な階層によって実現しています。具体的には、カップに手を伸ばす、持ち上げる、口元に持ってくるという一連の運動のパーツとそのパーツの組み合わせで成り立っているとされています。従来は、脳における低次のモジュールが運動パーツを、高次のモジュールがパーツの組み合わせを担う、という空間的な階層のメカニズムによって行動が実現していると考えられていました。

脳科学総合研究センターの動的認知行動研究チームは、この空間的な階層に代わり、神経活動の時間スケール（活動がゆっくり変化するニューロンと速く変化するニューロン）が行動生成における機能的な階層を実現させる、という多時間スケールモデルを提案しました。さらに、このモデルを組み込んだヒューマノイドロボット（実験には上半身の 10 関節のみを使用）が、学習により自己組織化したニューロンの機能的な階層に従って、複雑な行動パターンを正確にスムーズに動作することを確認しました。さらに、運動パーツの組み合わせを変化させることで、新しい行動パターンを生成させることにも成功しました。

このモデルを発展させることで介護ロボットなど実社会で活躍することができる、高度なロボット開発に貢献できると考えています。

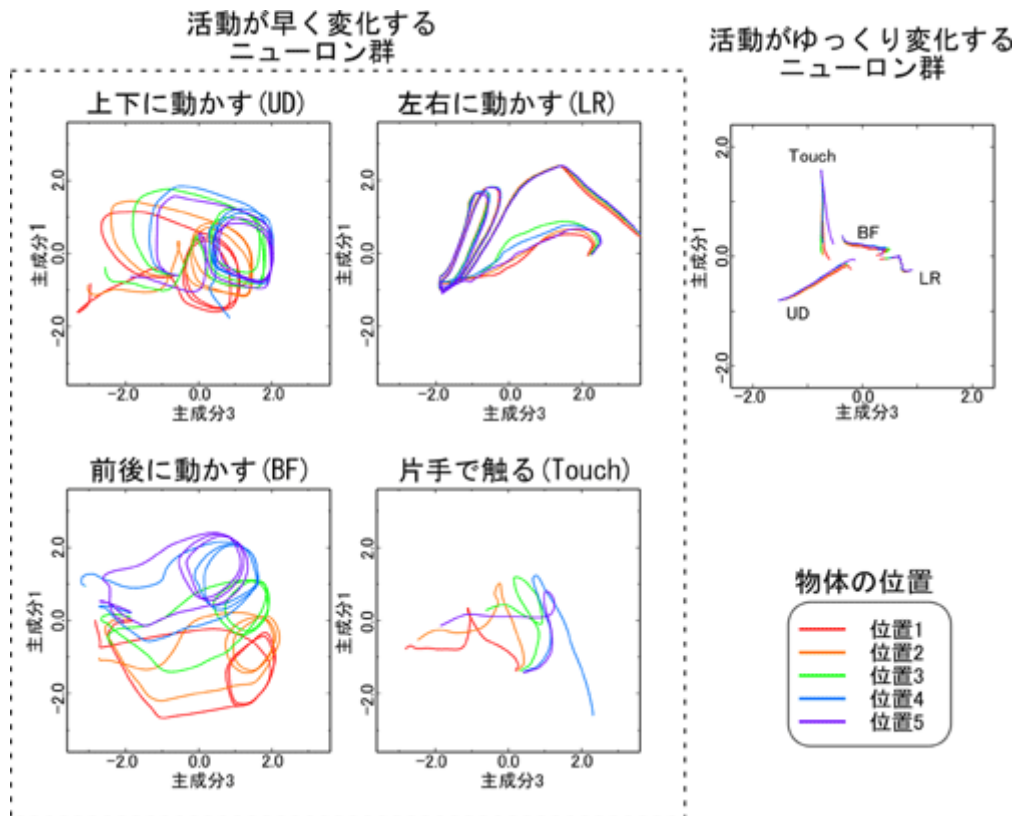


図 神経活動の時間スケールの違いに対応する階層的な機能分化

2008年11月7日
独立行政法人 理化学研究所

行動に必要な脳の機能的な階層性に新たに活動時間のメカニズムを導入

- 複雑で多様な行動をスムーズに学習する脳型ロボット開発に新たな道 -

◇ポイント◇

- 脳が生み出す行為生成に従来の空間的階層メカニズムに代わる新モデルが存在
- 神経システムの機能的な階層を実現する、一般原理の理解に貢献
- 神経活動の多時間スケールモデルを実装したヒューマノイドロボットで確かさを確認

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、動物が行動するとき、脳内で発現するとされている機能的な階層性について、従来の空間的な階層のメカニズムに代わる神経活動の時間スケールによるメカニズムを提案、実際にこのメカニズムを組み込んだロボットが複雑な行動パターンを学習、動作することを確認しました。理研脳科学総合研究センター（田中啓治センター長代行）動的認知行動研究チームの谷淳チームリーダー、山下祐一テクニカルスタッフらによる成果です。

動物の複雑で多様な行動や運動は、さまざまな場面で繰り返し使われる運動のパーツ（運動プリミティブ^{*1}）とその柔軟な組み合わせ、という機能的な階層により実現しているとされています。これまでの研究では、この階層は運動プリミティブに相当する低次のモジュールと、それらプリミティブの組み合わせに相当する高次のモジュール、という空間的な階層によるとされてきました（局所表現モデル）。しかし、脳の運動皮質^{*2}では、解剖学的に、この局所表現モデルに対応する明確な空間的階層構造は見いだされず、行為生成の機能的な階層が、どのような神経メカニズムによるものかがわかっていませんでした。

研究チームは、局所表現モデルに代わり、多時間スケールモデルという新しい神経回路モデル^{*3}を提案しました。このモデルは、活動の時間スケールが異なる神経細胞（ニューロン）^{*4}群の存在を仮定しています。実証には、多時間スケールモデルによって運動が制御される、小型ヒューマノイドロボット^{*5}を使用しました。その結果、ロボットが、物体に手を伸ばす、物体をつかむ、物体を上下に動かす、などの運動プリミティブと、その組み合わせを含む複数の行動パターンを学習し、動作することに成功しました。また、学習した運動プリミティブの組み合わせを柔軟に変化することで、ロボットが新しい行動パターンで動作することにも成功しました。モデル化した神経回路の解析の結果、神経活動の時間スケールの違いが、自己組織的に運動プリミティブとその組み合わせの役割を担う、という階層的な機能分化の実現を確認できました。

今回の結果は、実際の脳における行為生成の神経メカニズムの理解に貢献する可能性があります。さらに、提案した多時間スケールモデルは、これまでのロボットと比較して多様な運動を学習し、それらを柔軟に組み合わせで動作することを可能にしました。このモデルを発展させることで、介護ロボットなど、実社会で活躍しうる、より高度なロボットの開発に貢献できると考えています。

本研究成果は、科学雑誌『*PLoS Computational Biology*』（11月7日付け：オンライン版）に公開されます。なおロボット実験はソニー株式会社の協力を得て行われ、研究成果の一部は、文部科学省特定領域研究の科学研究費助成を受けて実施されました。

1. 背景

動物の、複雑で多様な行動や運動は、さまざまな場面で繰り返し使われる運動のパーツ（運動プリミティブ）と、その柔軟な組み合わせ、という機能的な階層性の構造を持っているとされています。例えば、テーブルの上のカップを手に取り、コーヒーを飲むという一連の動作は、カップに手を伸ばす、カップを持ち上げる、持ち上げたカップを口元に持ってくる、といった一連の運動プリミティブと、それらプリミティブの適切な組み合わせで成り立っていると考えられます。この運動プリミティブは、似たような行動を繰り返し経験することによって獲得されると考えられていますが、実際の連続した行動では、明確な運動プリミティブの切れ目はありません。それではどのようなメカニズムによって、連続した運動の中から運動プリミティブが切り出され、またその運動プリミティブがどのように多様な運動パターンとして組み合わせられるのでしょうか？

これまでの研究では、そのような機能的な階層性が、運動プリミティブに相当する低次のモジュールと、それらプリミティブの組み合わせに相当する高次のモジュールという空間的な階層で実現していると考えられてきました（図 1A：局所表現モデル）。しかし、この局所表現モデルを組み込んだロボットは、連続した運動の中に似ている部分や重複する部分があると、うまく機能しないことが知られていました。また、脳の運動皮質の解剖学的所見でも、局所表現モデルのような明確な空間的階層構造は見いだされておらず、機能的な階層性の本当の神経メカニズムは謎とされていました。

2. 研究手法と成果

研究チームは、神経メカニズムの新たなモデルとして、局所表現モデルに代わり、多時間スケールモデルを提案しました。このモデルは、活動の時間スケールの異なる 2 つのタイプのニューロン群（神経活動がゆっくり変化するニューロン 20 個とそれより 14 倍速く変化するニューロン 60 個）で構成したものです。そして、機能的な階層性は、これら活動の時間スケールの異なるニューロン群が相互に関係をもって学習し、自己組織的に発現すると予想しました（図 1B：多時間スケールモデル）。

提案した神経回路モデルの検証は、その神経回路によって行動が制御されるヒューマノイドロボットを実際に動かすことによって行いました。ロボットに、物体に手を伸ばす、物体をつかむ、物体を上下に動かす、などの運動プリミティブと、その組み合わせを含む複数の運動パターンの動作をするように学習させた結果、それぞれの動作を正確に行うことに成功しました。また、神経回路モデルの解析の結果、神経活動が速く変化するニューロン群が運動プリミティブに相当する情報を担い、活動がゆっくり変化するニューロン群が運動プリミティブの組み合わせに相当する情報を担う、という階層的な機能分化が、自己組織的に実現していることがわかりました（図 2）。

さらに、活動がゆっくり変化するニューロン群の活動パターンを変化させ、すでに獲得していた運動プリミティブの組み合わせを変化させることで、新しい行動パターンで動作させることにも成功しました。このことは、神経回路が獲得した運動プリミティブが、状況や目的の違いに応じて柔軟に変化することができ、またその

組み合わせを変えて、無数の行動パターンでの動作が可能であることを意味します。

これらの結果は、多時間スケールモデルのアイデアが、運動皮質の機能的な階層性の理解に貢献する可能性を示唆します。

3.今後の期待

多時間スケールモデルのアイデアは、今後、運動制御以外の一般的なシステムへも応用することで、神経システム全体の理解を促進すると期待できます。

さらに、多時間スケールモデルによって自己組織的に神経活動を機能分化することで、ロボットが柔軟で多様な行動を学習し動作することが可能であることがわかりました。このモデルを発展させることで、介護ロボットなど、絶え間なく変化する実社会で活躍できる、より高度なロボットを開発できると期待できます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

脳科学総合研究センター 動的認知行動研究チーム

チームリーダー 谷 淳 (たに じゅん)

Tel : 048-467-6467 / Fax : 048-467-7248

テクニカルスタッフ 山下 祐一 (やました ゆういち)

Tel : 048-467-6467 / Fax : 048-467-7248

脳科学研究推進部 大伴 康志 (おおばん やすし)

Tel : 048-467-9596 / Fax : 048-462-4914

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 運動プリミティブ

例えば、物体に手を伸ばす、握る、持ち上げる、などさまざまな場面で繰り返し利用され、複雑な行動を構成する基本単位になるような運動のパーツのこと。

※2 運動皮質

大脳の運動制御に関与する領域を運動皮質といい、一次運動野、運動前野、補足運動野などが含まれる。私たちが意識して体を動かす(随意運動)するとき、運動皮質から運動指令が出されると考えられている。

※3 神経回路モデル

動物の神経組織にみられる特性（ニューロンとシナプス結合）を、数学モデルで表現することによって、実際の神経組織における情報処理機構を計算機上にシミュレーションしたもの。

※4 神経細胞(ニューロン)

入力刺激に対して、電気的な活動をしてほかの細胞に情報を伝達するという特有の働きを持つ細胞。

※5 ヒューマノイドロボット

広い意味では、人間に似た形をしたロボットのこと。人間の身体構造や機能を模し、自律型 2 足歩行が可能なロボットのことが多い。本研究では、ロボットは台座に固定され、上半身の 10 関節のみを使用して実験を行った。

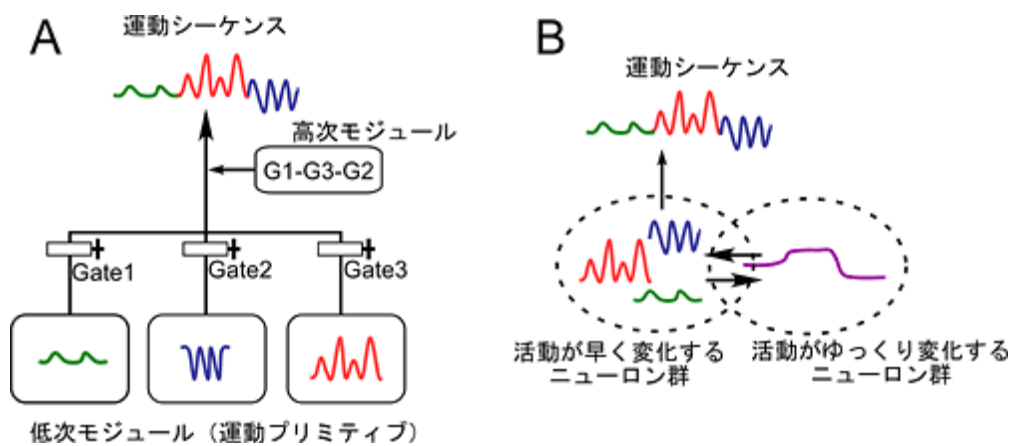


図 1 局所表現モデルと多時間スケールモデル

A: 局所表現モデル。

システムの出力行である一連の運動は、局所的な低次モジュールに表現された運動プリミティブと、それらプリミティブの組み合わせを制御する高次モジュールによって空間的な階層が生成するというモデル。

B: 多時間スケールモデル。

運動プリミティブは、活動が速く変化するニューロン群によって分散的に表現され、運動プリミティブの組み合わせは、活動がゆっくり変化するニューロン群の活動によって表現されるというモデル。

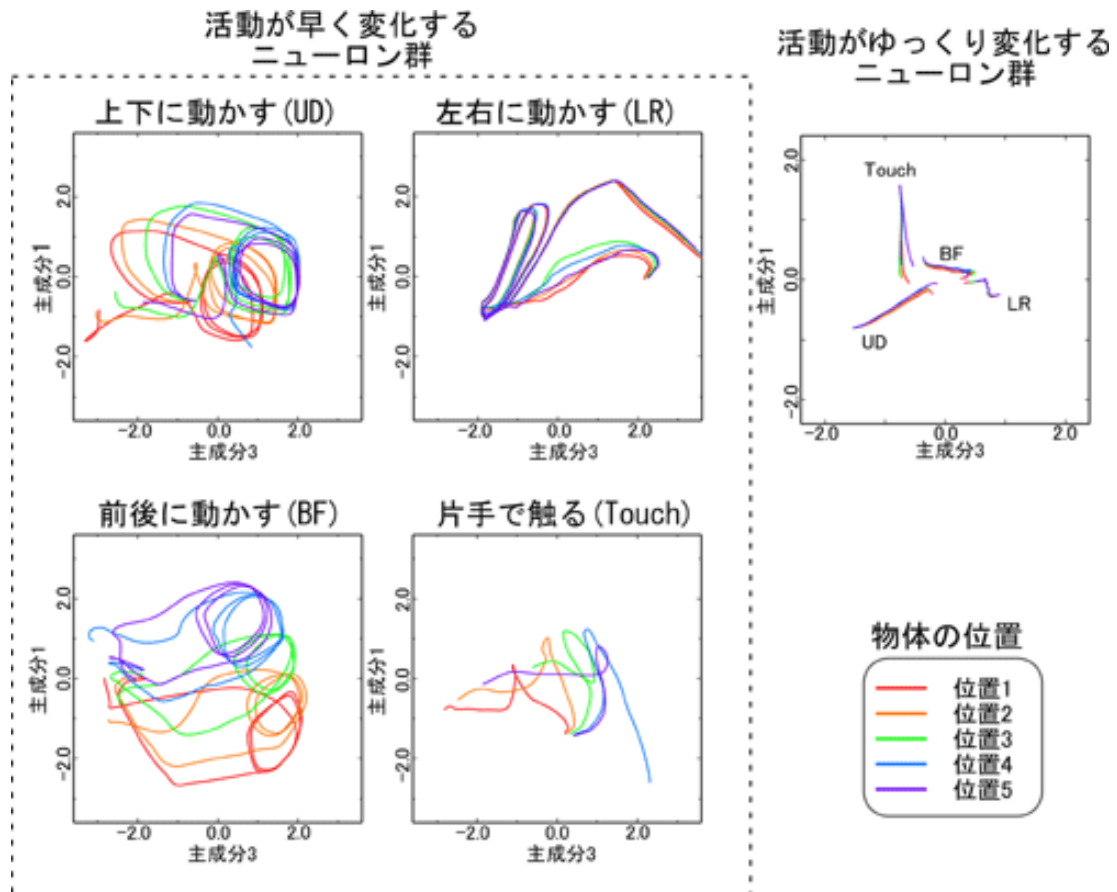


図2 神経活動の時間スケールの違いに対応する階層的な機能分化

時間スケールの異なるニューロン群の活動と一連の運動の関係を、主成分分析という統計的な解析を用いて2次元にプロットしたもの。この解析により各ニューロン群の活動が担っている主要な情報が何かを観察することができる。活動が速く変化するニューロン群の活動は、物体を上下に動かす、左右に動かす、前後に動かす、片手で触るなどの運動と、物体の位置の変化(位置1～位置5)に対応していることがわかる。このことは、活動が速く変化するニューロン群の活動が、物体の位置に柔軟に対応する運動プリミティブを表現していることを意味する。一方、活動がゆっくり変化するニューロン群の活動は、物体の位置に関係なく、運動プリミティブの組み合わせからなる一連の運動シーケンス全体に対応する。