

学び行動するロボットから人を知る

谷 淳 TANI Jun

脳科学総合研究センター
脳型計算論研究グループ
動的認知行動研究チーム チームリーダー

私たちは常に自分を取り囲む環境に行為を通して働き掛け、また働き掛けられている。その繰り返しの経験から、世界の意味や概念といったものを、人はどのように獲得していくのだろうか。また、人は未知の新しい行為、意味、概念を、経験の創造的組み合わせから編み出すこともできる。それはどのような脳内メカニズムにより可能となるのだろうか。このような問題を明らかにすることが、谷淳チームリーダー率いる動的認知行動研究チームの目的である。そのために、人の脳のメカニズムに基づいた神経回路モデルを搭載したロボットを使い、学習し、認知し、行動する過程を研究している。そこには、私たちがなぜ自己を意識するのか、その答えがあるかもしれない。

「例えば、この目の前にあるコーヒーカップは、脳の中ではどのように認識、理解されているのでしょうか」。谷淳チームリーダーは、机の上のコーヒーカップに手を伸ばしながら言った。「目で見たカップの形や色などで認識している、と言われるかもしれませんが。でもそれ以上に、カップの柄をつかんだときの指先の感触、口元に運んだときにカップから立ちのぼるコーヒーの香りといった毎日の身体的な経験から、コーヒーカップというものの存在を認識しているのではないのでしょうか？ 私たちは、行為を通して世界に繰り返し働き掛ける経験が積み重なり、それらの記憶からどのように脳内に“意味”や“概念”の空間が形づくられてくるのか、といった問題に興味を持って研究を進めています」

そしてコーヒーカップを持ち上げながら言う。「“コーヒーカップを持ち上げる”という動作は、“対象に手を伸ばす”“つかむ”“上げる”といった基本的な運動スキーマ(枠組み)のレパートリーがあって、それらを無意識的に、時間方向に一連のつながった行為として組み合わせることで達成されるのではないかと考えられます。無意識的に組み合わせるといったプロセスは、認知の中核です。また言葉を組み合わせることにより、多様な意味、概念を表現できますが、それらは経験した行為の記憶と相まって、脳内でどのように表現され得るのか？ 話すとき、文法



という規則を意識しなくても言葉の組み合わせがすらすら出てくるのは、どういったことなのか？ 脳の神経回路は元来アナログな動作をするわけで、“規則に従う”といったコンピュータが得意な論理操作にはあまり向いていないように思えます。決して言葉で書き下すことのできない暗黙知のようなものを、脳は無意識的に獲得し、作動しているように思えますが、その実態は何なのでしょう？」

こういった疑問に答えるため、動的認知行動研究チームでは神経回路モデルを組み込んだロボットの学習行動実験を行い、行為から認知に連なる脳のメカニズムを探っている。

言語を認識し行動するロボット

まず、杉田祐也研究員と谷チームリーダーが行っているロボットによる言語と行為の関連学習の研究を紹介しよう。初めは何も知らないロボットが、いろいろな組み合わせの言葉に対応する行動を繰り返し練習していくうちに、言われた通りのことができるようになるというものだ。

ロボットの前方左には赤、中央には青、右には緑色の物体が置かれている(表紙)。言語は3つの動詞と6つの目的語である名詞の組み合わせから成り、“hit red”と言われたらロボットは赤い物体に近寄っていきアームを伸ばしてたたく、“push blue”

と言われたら青色の物体に寄って行って体ごと押す、というように学習させていく。

「ここで大事なことは、分散記憶という考え方で」と谷チームリーダーは言う。「例えば、可能な組み合わせの行動を一つの神経回路の中に多重に記憶させるというものです。分散記憶では、一つ一つの行為を独立に暗記していくのではなく、多様な行為の関係性を学んでいくことになる。そのときに、一段深いレベルの意味や概念のようなものが浮かび上がってくるのでは、と考えています」

意味の構造を見る？

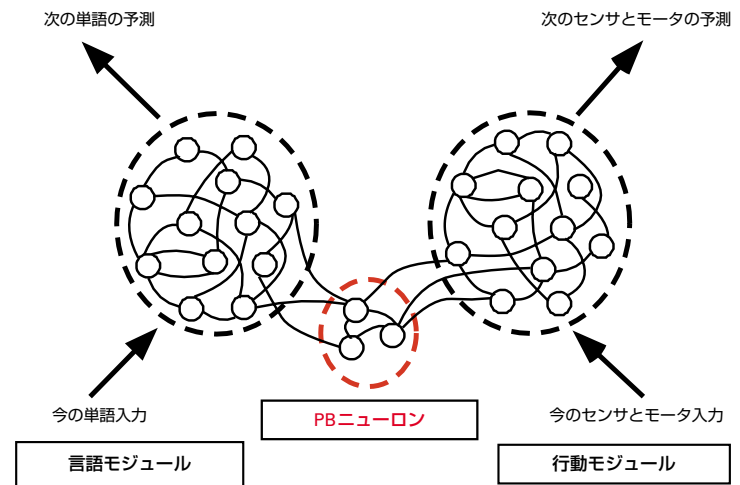
言語と行為の関連学習で使っている神経回路は、単語を順番に入力して文を認識する“言語モジュール”と、行為を時系列で生成する“行動モジュール”から成る(図1)。「両方のモジュールにおいて、“予測”というメカニズムが重要な役割を示しています。脳科学総合研究センター特別顧問の伊藤正男氏が、『小脳は自身の運動の結果として得られる知覚の予測をしている』と1970年代から言われていて、それがヒントになっています。言語モジュールでは単語のつながりを予測し、行動モジュールではセンサ入力とモータ出力の時系列的な流れを予測します。言語モジュールと行動モジュールを橋渡しするのが、私たちが考えるPB(Parametric Bias)ニューロンです」

PBニューロンは、どのような働きをするのだろうか。「PBニューロンには、学習時に両モジュールから情報が流れ込み、その場を通して両モジュールが相互作用し制約し合う。つまり、文と行為の対応がつかような構造ができてきます。学習後に、言語モジュールに“hit red”という2単語を入力すると、それに対応してPBニューロン群の発火パターンが生成され、それが行動モジュールに伝わり、“hit red”を実行するときのセンサとモータの時系列的な流れの予測が立ち上がり、実際に行為が発生します(図2左)」

図2右は、18種類の動詞と目的語の組み合わせを入力したときのPBニューロン群の発火パターンを、2次元の主成分でプロットしたものである。「すると、面白いことが分かりました。ここには、ある規則的な構造が見えています」と谷チームリーダー。

赤い物体は常にロボットから見て左にあるので、“push red”と“push left”は行為としては同じ意味を持ち、両者のPBプロットの点は近い位置にきている。同様のことがblueとcenter、greenとrightについて言える。さらに、各文は動詞と目的語に

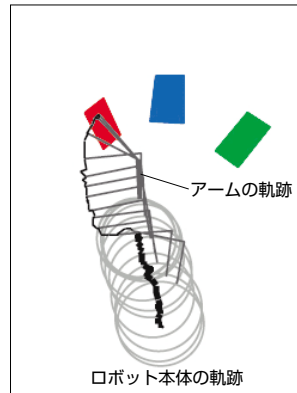
図1 言語と行為を統合する神経回路モデル



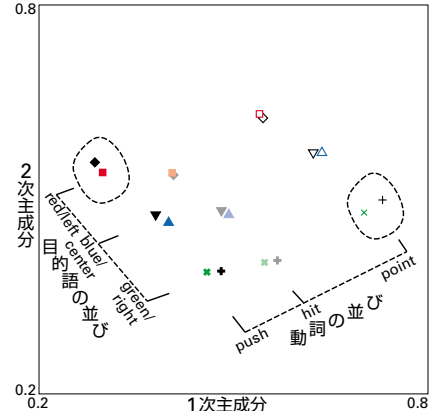
言語モジュールと行動モジュールの2つの神経回路から構成され、それらを仲介するものとしてPBニューロン群がある。まず言語モジュールでは、入力される単語列(文)の意味を認識して、その結果、PBニューロン群に特定の発火パターンが発生する。この発火パターンが行動モジュールに働き掛けて対応する行動が生成される。

図2 言語と行動の相互作用

ロボットが“hit red”を行っている様子



PBニューロン群の発火パターンの解析結果



右上図は右下表の18種類の文を入力した場合の、それぞれのPBニューロンの発火パターンを、2次元の主成分空間で表現している。PB値の分布には、動詞と目的語の組み合わせの関係性が表れている。プロットの点線内と凡例の下線は学習していない文。

□ point red	■ push red	▣ hit red
◇ point left	◆ push left	◆ hit left
△ point blue	▲ push blue	▲ hit blue
▽ point center	▼ push center	▼ hit center
× point green	✱ push green	✱ hit green
+ point right	✚ push right	✚ hit right

関する2次元格子の上に規則的に配列されている。

「ここで大事な事実は、組み合わせが可能な18文のうち14文しか学習していないということです。4つの文は学習していないにもかかわらず、ロボットはそれらの文を認識して正しい行動を生成でき、4つの文に対応するPBのプロット点(図2右の点線内)は2次元格子上のそれらしい位置にきています」

この結果を谷チームリーダーは、こう解説する。「未学習の事柄についても、学習された事柄から類推できることを示しています。それが可能になったのは、動詞と目的語を組み合わせるような図2右に示す構造が、神経回路内部に自己組織化されたから

だと言えます。これが分散的な記憶の重要な特徴です。意味は一つ一つの事柄について独立では存在できない。私たちの実験では、ロボットが言葉の束と行為の束を相互に絡ませて学習させていったときに形づくられる関係性の構造の中に“意味”が浮かんでくるがよく示されています」

ヒューマノイドロボットとの相互行動

動的認知行動研究チームでは、ソニー株式会社と共同で、ヒューマノイドロボットQRIOを使った人間との相互作用行動の研究も行っている。なぜQRIOなのか？「これだけ動きの自由度の高いロボットは、私たちでは作れません。それに、あまり大きくないので、倒れたりしても壊れないし危なくないので、試行錯誤の実験研究にはうってつけです」

QRIOにPBニューロンの付いた行動モジュールを搭載して、人間の上半身の複数の運動パターンを見真似学習させた。対面する人間の腕の位置情報がビジョンカメラから行動モジュールに入力され、人間の腕の動きを、繰り返し入力される時系列パターンから予測学習していく。同時に、QRIO

自身の腕が人間の腕の運動パターンを真似て動くように、QRIOの腕を人間が持って動かしながら、腕のモータ時系列を教示学習させていく。

「学習を進めると、運動パターンごとに異なるPBニューロンの発火の空間パターンが得られてきます。学習がほぼ終了したところで、学習した一つの運動パターンをQRIOの前で人間が示すと、行動モジュールに視覚入力される人間の腕の運動パターンに引き込まれる形で、PBニューロンの発火パターンが特定の学習した空間パターンに収斂していく。その結果として、QRIOは対応する運動パターンを生成し始めます(図3)。ここでのPBニューロンは、センサ入力時系列パターンを認識して、それに対応する運動パターンを生成するという働きをしています。これは前述の、言葉を認識して対応する行為を生成するメカニズムと同じです。このような認識と生成を同時に情報表現する神経細胞はミラーニューロンといわれ、サル電気生理実験などで、その存在が確認されています」

この実験では、ほかにも面白いことが分かっているという。「いろいろな運動パターンを一つの神経回路に多重に学習させていくと、QRIOは新規の運動パターンも生成するようになるのです。これは、多数詰め込まれた異なる運動パターンが記憶の中で押し合いへし合いして、記憶の内部構造が歪むことにより発生すると考えられます。学習したQRIOと人間が互いに運動しながら相互作用していると、QRIOはあたかも自由意志があるかのように新しい運動パターンを生成しだすことがあります。でも、その自由意志のようなものは外から与えられたものではなく、記憶の内面の潜在的な歪みがそうさせるのだと考えられます。QRIOがただ学習したことを繰り返すだけではなく、思いがけず新しい動きを生成しだす刹那に、機械を超えたような主観的な実在を思わず感じてしまうのですが……」

谷チームリーダーが取り組んでいるロボット研究は、意識やこころといった脳科学の大きな問題にも迫っていく。「私たちは、普段よくする行動をしているときには、オートマチックであまり意識しません。でも、いつもと違うことが生じたときには、は何だろうと意識が立ち上がると考えられます。QRIOの実験では、センサから入ってきた情報と記憶に基づく予測が矛盾するときに、その誤差がPBニューロンの発火パターンを変更し、別の運動が起動されます。外の世界のリアリティとその主観的なイメージの間に矛盾が生じたときにこそ、自己と外部世界の境界が“意識”されるのだと思います」 **R**

図3 QRIOと人間の相互作用行動の実験の様子



対面した人間がQRIOに学習させた運動パターンを示すと、QRIOは同じ運動をする。写真は、共同研究者であるソニー株式会社の伊藤真人研究員。

脳科学が、分子から神経細胞、脳領野、個人、社会まで見通せる理論を提示できたときに、初めて脳が分かったという気持ちになれるのかなと思っています。