



## キカイの育て方

### 伊藤 宏司 研究室～知能システム科学専攻



伊藤 宏司 教授

不思議ではないだろうか。人間の赤ちゃんは親から教わることなく、周りの環境に適応していくことができる。

これは私たち人間の知能が「学習」という機能を備えているからである。もしも、人間の学習機能を解明しそれを機械に応用することができれば、変化する環境にも適応するロボットを生み出すことができるだろう。

今回紹介する伊藤先生は、運動のプランニングと制御のフィールドから学習機能にアプローチし、研究を重ねている。



## 時代は創発システム

現代社会の中では多数の機械やロボットが、あらゆる場所で様々な作業を受け持っている。その多くは工場などでの単調作業で、ロボットは毎日変わらない環境の中で同じ動きを繰り返している。これらはあらかじめ設計者によりプログラミングされた運動モデルのみで動いている。このように初期に与えられたモデルを変えないシステムを「閉じられたシステム(最適システム)」という。閉じられたシステムでは、ある一つの作業に特化した“最適”な運動モデルを一度作れば、どのロボットにも個体差無く最適な動作を行わせることが可能となる。このような作業ロボットが実現したために作業の効率が良くなり産業は急速に成長することができた。

しかし、このようなロボットは常に同じ環境におかれなければ働くことはできないので、使用場所が限られてしまうのが難点である。現在、この閉じられたシステムでは実現できない、環境に適応するロボットが求められている。

お掃除ロボットは、障害物などを感知して避けながら掃除しなければいけない。ロボットはまず実際に自分で歩き回ってみてその家の地図を作

る。そして人間の気分次第でランダムに置かれる椅子、散らばった子供のおもちゃ、また人間の足などをその都度感知する必要がある。なぜなら、ロボットがおかれる環境は常に変わっていくためである。このようなシステムを持ったロボットを環境に対して「開かれたシステム(創発システム)」で制御されているという。開かれたシステムとは「学習システム」を持つものであり、伊藤先生はこの学習システムについて研究している。

いずれのシステムでも環境を「内部モデル」という形で記述、保存する。これはいつでも参照できるようになっている。学習システムでは場合に応じて自己でそれを書き換えることができるのだ。内部モデルとは具体的には自分の体や環境を含む空間的、時間的な物体の位置関係と、各物体の物理特性のデータ、力場などを指す。ここで力場がある環境、例えば川の流れの中で脚を動かす場合を考えてみよう。このとき、脚を少し動かしてみれば「脚は川下の方向に流される」と知覚できる。内部モデルを書き換えられないロボットは何度やっても脚が川下に流されて倒れてしまうが、知覚した情報に基づいて内部モデルを書き換

えて力の加え方を調節すれば、倒れずに歩行ができる。学習システムはこのように内部モデルを通じることで、どう動かそうとすれば実際どう動くかの予測（運動のシミュレーションとプランニング）ができる。また常に目で追わなくても身体と対象物との相対的な位置関係の変化を予測できるのも、内部モデルを参照して実現されている。

先生は学習システムによるロボット制御を考える際人間を参考にしている。内部モデルという概念も人間の思考方法を模倣しようという姿勢から生まれたものである。人間は天然の学習システムを持つものであり、かつそれは何も知らない状態から、複雑で知的な思考が可能な段階まで導くことができる学習システムであるのだ。このシステムを数学的に記述、つまりプログラムとして記述できれば、人工知能は人間の知能に限りなく近づくことができるかもしれない。伊藤研究室では、今、その試みがなされている。

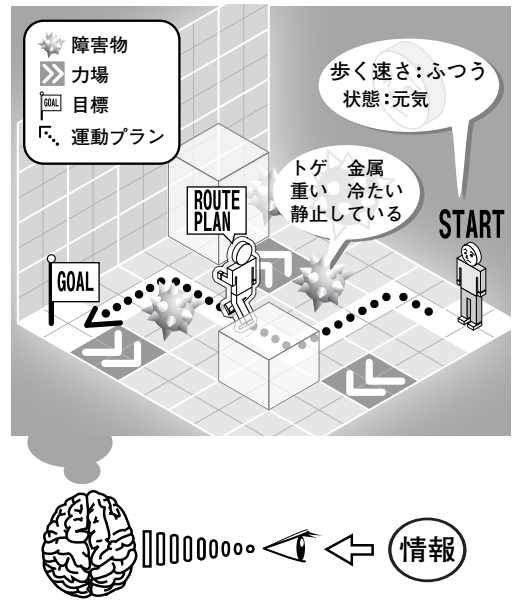


図1 内部モデルのイメージ

## ヒトのアルゴリズムを探る

人間の学習システムは環境の変化に対しどのような過程を経てどのような学習結果を得ているのだろうか。先生は人間の学習の仕方を解析するため、物に手を伸ばす動作（リーチング動作）の実験を行っている。

腕に筋電位を測る電極を付けた被験者は二次元水平方向に動かせるレバーを持つ。筋電位とは筋肉に脳からの電気信号が流れてきたとき皮膚の表面に顕われる1~2mVの電位である。電極端子を皮膚の表面に貼り付けて受容する。画面上には手先を到達させる目標点と被験者の手先の位置が仮想的に映し出されている。適当な力場を与えると、何も知らない被験者は最初はまっすぐ進もうとして力の方向に流されてしまう。ここで被験者は環境が変わったことを知覚し、まっすぐ目標物に到達できるようにレバーへの力の入れ方を模索する。何回か自分から積極的に動かしているうちに内部モデルは書き換えられ、学習を終える。被験者の内部モデルは力場を考慮に入れたモデルになっている。学習の過程での手先軌道は図2のように変化していく。先生は測定した筋電位などの詳細なデータより、学習が自己組織化により行われることが人間の学習システムの特徴であり、利

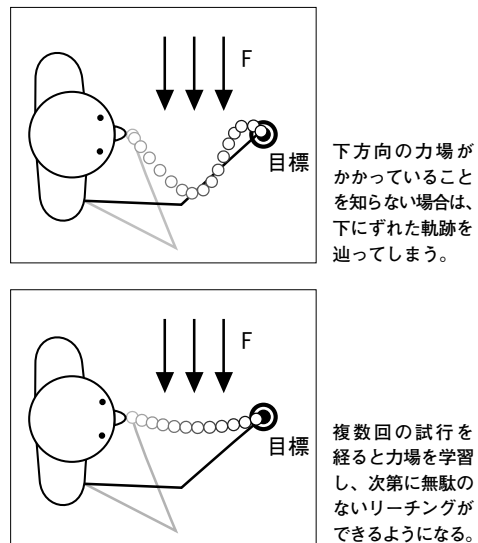


図2 ヒトのリーチング動作と学習

点でもあると考えている。

自己組織化学習システムは、幾らかの試行データ、つまり学習主体の行動（環境への入力）とその結果環境の変化の知覚（環境からの出力）の組から入力—出力間の対応関係を作り、最適だと思

われる行動（入力）を学習する。以下で自己組織化学習の方法を順を追って見ていこう。

まず学習主体がある行動目標を持って学習するとき、最初はある行動入力に対して環境からどんな出力が知覚できるかの関係は分からないので、出力は全て等しい確率でランダムに起きると仮定しておく。そして次に、とりあえず何か行動Aを入力しある出力A'を得る。このときA'が起くるのはAを入力したことと関係があるとして、予測の際の「AのときA'が起こり得る」という確率係数を高める。これを環境との相互作用という。このとき行動入力はある程度の範囲内から選ぶものでなければならない。こうして何回も確率関係を更新し、入力—出力間の対応付け（マッピング）をしていく。これで出力の予測ができるようになる。これを行動制御プロセスという。

そしてこのプロセスと並行して内部学習プロセスと呼ばれるものがある。それは行動目標に沿う出力が得られるように行動を選ぶが、このとき予測通りの良い出力が得られたかどうかの「評価」をする。予測がはずれて目標より遠のいてしまったときは元のマッピングが間違っていたとして、確率係数を下げる方向に更新していく。このようにして自己組織化学習は進む。

この自己組織化学習を進めるには、多量の入力試行と出力結果の対応データと、評価関数が必要である。対応データは学習主体が能動的に試行を繰り返す限り際限なく得られるものであるので、自己組織化学習は学習課題においてある程度汎用性を持つ。例えば、自由度2のアームでのリーチング動作学習の「距離が減る入力は良い」という評価関数を持っているとすると、これは自由度が変わっても同様なので、自由度3のアームでの自

己組織化学習に活かすことができる。これが自己組織化学習の大きな利点である。

人間は評価関数も経験から自分で決定できるので、人間はどの学習課題においても評価が可能になり学習することができる。現時点のプログラムでは評価関数は設計者により与えられているが、将来的には適切な評価関数を自ら獲得できるようにすることも考えられている。

現在できている学習プログラムでは、図3のようなアームでリーチング動作をするシミュレーションが成功している。コンピュータは自身のアームの物理特性すら知らない状態から始め、動かしていく中で内部モデルを獲得、構築していく。そして目標物と手先の位置情報を基に「距離が減ったか」を評価し、ランダムに配置される目標物にアームを伸ばす。「姿勢は目標物の位置の変化に滑らかに対応すること」を前提とし、人間と同じように無駄のない動きを目指し学習する。

現状の理論では、アームが目標物に滑らかに到達できるようになるまでに1万回程度もの大量の試行を必要とするが、生まれたときから大人になるまでに人間が身体と環境を相互作用させる試行回数を考えてみると同程度かそれ以上だろう。人間は意識が芽生える前から少しずつ、しかし積み重ねると大量に、様々なことを学んでいるのだ。

しかしやはりロボットに学習を行って欲しいとき、人間の子供が成長するのを待つようには待てない。また実際にロボットに学習をさせようとしても、試行回数が多いため学習を終えるより先にロボットが壊れてしまうだろう。現実的な時間で学習目的を達成させるために、先生は学習時間を短縮させるような理論を今の理論から発展させていきたいと思っている。

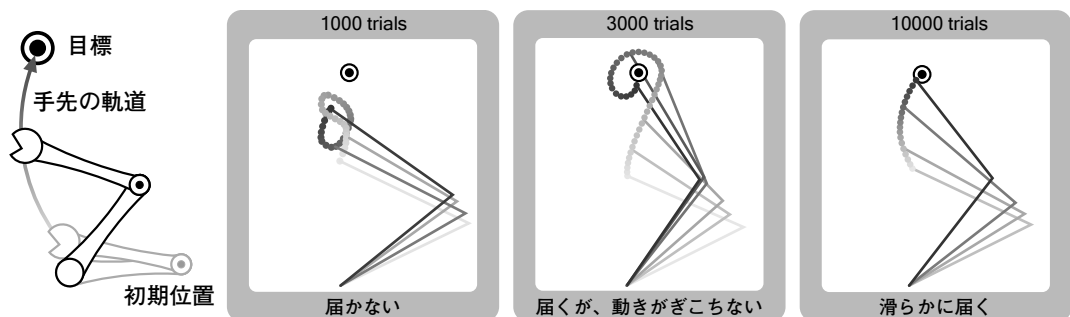


図3 リーチングシミュレーション



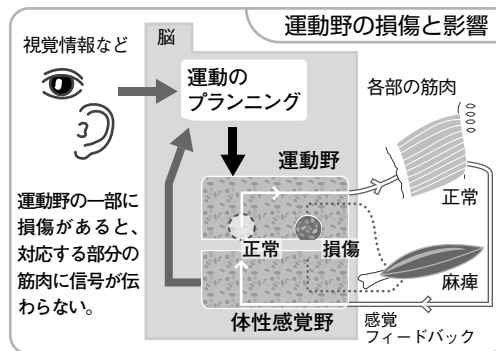
# 新時代の理学療法士 FES

脳出血や脳の損傷により身体の部位に麻痺症状が出てしまったときはリハビリテーションを行う。しかし、麻痺改善は必ずしも容易ではなく、長期にわたる厳しい訓練が必要であり、このため苦しんでいる人は沢山いる。この問題を解決するため、先生の研究室ではFES（機能的電気刺激）を使用したリハビリテーションについても研究が行われている。FESとは、電気パルス列を発生させて運動神経や筋を刺激して筋を収縮させる方法である。つまりこれを使用することにより脳の運動野の活動と感覚フィードバック信号の繋がりが得られるのだ。

先生の研究で興味深いのは、脳損傷患者は、その部位の内部モデルが破損したために麻痺が起こってしまっていると捉えていることだ。つまり、第二章で紹介した内部モデルが無い状態からの学習シミュレーションの応用であるともいえる。しかし脳損傷患者においては脳が指令を出そうとしても正しい指令が送れず、身体は動かないので、指令と実際の動き、体性感覚とのマッピングはできず、内部モデルは再構築されない。よって、マッピングは運動神経、筋肉、感覚神経を使う本来の経路とは別の経路でなくては行けない。

このとき、大脳新皮質の体性感覚野で「動いている」という感覚を受容し、運動野でプランニングに基づいた指令を運動神経に送っている。この二つの部位のニューロンは面状に並んでいて、各面は身体の各部の位置関係を地図のように保存しているので位相保存マップと呼ばれる。この二つは位相が揃っていて、体性感覚野と運動野それぞれの体の部位が対応して接するように重なっている。例えば体性感覚の左足のFESによる刺激は構造的に近い運動野の左足部分を刺激するので、運動神経の経路を使わず擬似的に関連性を持たせることができ、運動指令と体性感覚のマッピングが促進できるのだ。脳出血などで脳細胞の一部が死んでいる場合、その周りの別の部分の細胞の一部が代用される。これを脳の可塑性といい、リハビリテーションは脳のこの性質を利用している。

具体的な方法としては、足が動かない患者の場合まず映像で足が動いているのを見ながら、それ



## FESリハビリテーション

損傷した神経細胞の付近で起こる電位変化をとらえ、それと同時に筋肉や視覚に対して刺激を加える方法。

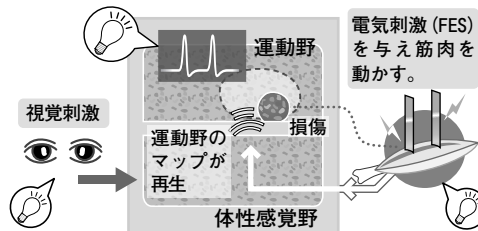


図4 運動の指令モデルとリハビリ

に合わせて一生懸命動かそうとする。そして運動野付近に配置した非侵襲性の皿型電極で運動指令の信号を調べ、運動スタートの時点割り出す。それにタイミングを合わせ、FESにより筋を収縮させる。

現在でも、理学療法士が麻痺部位を手で持って動かして刺激し、かつ患者は目で自分の足が動いているのを見てリハビリするという方法がある。しかしながらこれでは患者は自分の意思で動かしている感覚は無い。しかしこのFESを使用する場合は運動指令、FESでの体性感覚刺激、視覚刺激を同時に合わせて受け取ることができ、患者は自分が動かしたような感覚を持つことができるので、より効率良くマッピングの再構築が可能になると期待される。

このように、人間の内部モデル表現を知ること、人工システムから臨床医学まで様々な分野につながっているのだ。

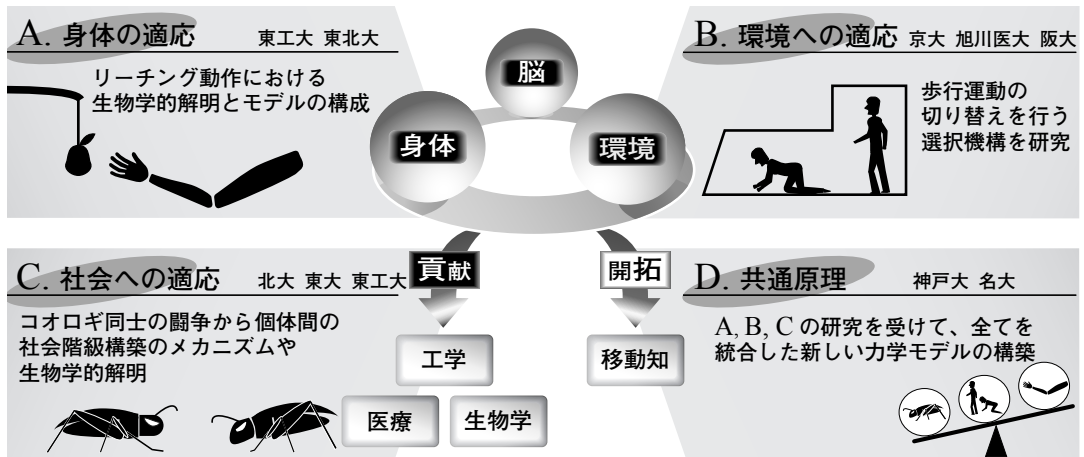


図5 「移動知」の構成論的理解のためのプロジェクト

## 新たな領域「移動知」

先生は昨年9月から5年間の新たな研究プロジェクト「移動知」にも参加している。この研究を通じて、生物の持つ様々な適応的行動のメカニズムを解明し、医療分野のリハビリ支援システム、工学分野における知的人工システムの設計原理の導出に貢献し、また「移動知」という新たな研究領域の開拓を目指す。

研究グループはA、B、C、Dの四つに分かれている。先生はA.「環境への適応」のグループで、リーチング動作での環境(力場)の変化への適応機能の生物学的解明と、モデル構成を行っている。これは二章で述べた内容に対応する。

**B. 「身体への適応」:** 人間やサルなどが環境に応じて歩行運動の切り替え、つまり四足と二足歩行の切り替えをすることについて、その選択機構について研究をする。動物型ロボットの運動パターン生成などへの応用をする。

**C. 「社会への適応」:** 比較的単純な神経回路構造を持つコオロギを実験対象とし、コオロギ同士の闘争行動時の脳内物質を調べ、個体間の社会階級構築のメカニズムや社会適応の生物学的解明と、

モデル構成を行う。異なる動物種で同じ脳内物質(NO、A ch、モノアミン系など)が発見されていて、脳内神経機構に類似性が見られており、「社会意志」に対する新たな知見が得られると期待される。

**D. 「共通力学原理の探求」:** A、B、Cを受け、統合した新しい力学モデルの構築、抽象的モデリングをし、人工システムを実現する設計原理を明らかにする。これは生物と人工システムの「移動知」の力学的共通原理を探求することである。

これらの研究により、人間、動物、また人工的システムが持つ適応行動についての共通原理が解明されるかもしれない。生物の持つ適応能力というものは、人類がまだまだ人工的に再現できない素晴らしい能力であり、研究対象として非常に興味深く好奇心に駆られるものである。この研究が進めば今まで不可能だったことも、もしかしたら可能になってくることがあるかもしれない。この素晴らしい能力がどのように実現されているか、それを理解することが人類の更なる発展の第一歩であるともいえるのだ。

研究内容が難しかったのでとにかく勉強を要しました。しかし伊藤研究室の研究は私の最も関心のある分野のひとつだったので勉強は楽しみで、

記事も書いていて非常に楽しいものでした。最後にお忙しい中取材に応じてくださった伊藤先生にお礼を申し上げます。(橋本 純香)