

## 運動能力発達過程の神経回路モデル

(分担研究：相互作用と乳幼児の心理・行動発達に関する基礎的研究)

鈴木良次<sup>\*</sup>，宇野洋二<sup>\*</sup>，川人光男<sup>\*\*</sup>

**要約** 人の運動能力は、生後の訓練によって習得される。未熟な段階では、視覚や体性感覚からの情報を頼りに、いわゆるフィードバック制御を行っているが、習熟するにつれ、フィードフォワード制御に移行する。この過程を神経回路モデルとして具体的に示した。ついで、運動技能の習得の過程が、一般に、意識的行動が無意識化される過程としてとらえられること、無意識化が神経回路の自己組織として理解し得ることを述べた。

見出し語：運動制御 学習 神経回路

**研究目的** 動物の運動能力には、生まれつき備わっているものと、生まれてからの訓練で獲得しなければならないものがある。たとえば、魚はふ化した直後から泳ぐことが出来るが、人間の赤ちゃんが立って歩き出すまでには、何ヵ月という訓練期間を必要とする。

この違いがどこから出てくるのか。それは、運動を制御する神経回路が、生まれたとき、すでに出来上がっているか、まだ未完成であるかにかかっている。

魚の遊泳をはじめとして、ミミズの移動、昆虫の飛行などリズムカルな運動を制御する神経回路の構造は比較的単純で、発生の段階で組み立てられると考えられている。もちろん、その過程の全容が明らかにされているわけではないが、下等動物の運動神経回路の構造が、遺伝情報によってほぼ完全に決ってしまうことを示唆する実験がある。

しかし、人間をはじめとして高等動物の行う

随意運動を制御する神経回路は、発生の段階では完成していないと考えられる。例えば、随意運動の中でも比較的簡単な手先を目標点まで移動させる運動(Reaching)にしても、生まれつき上手に出来るわけではない。未熟な内は、目標点と手先の位置の差を眼で確かめつつ、その差がなくなるまで手先を動かしていく。これは、眼を通してフィードバックされる手先の位置に関する情報を利用するフィードバック制御である。ところが、運動に習熟してくると、最初に目標点を確認しておけば、後は、眼をつぶっていても、大体、うまくいく。すなわち、フィードフォワード制御に移行する。

この、フィードバック制御からフィードフォワード制御への移行を説明するのに、「目標点が決まると、そこへ手先を移動させるに必要な運動指令を計算する神経回路が脳の中に出来上がるからだ」と考えることができる。この考えは、すでに伊藤らによって「運動系を含む制御対象のモデルが小脳内部に形成される」という表現で提案されていた。

本研究の目的は、この過程を神経回路のレベルで具体的に示し得るモデルを提出することである。

\* 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, University of Tokyo)

\*\* ATR 視聴覚機構研究所 (ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories)

**研究方法** まず、手先の移動など上肢を自由に動かす運動がどのような経緯で発現するかを考える。

例えば、手先で円を描く運動が計画されたでしょう。手の動きまわる空間を作業空間、そこでの座標を作業座標と呼ぶことにすると、目標軌道は、作業座標上の円ということになる。この運動を実現するには、肩、肘、手首の各関節をしかるべく回転させなければならない。そこで、各関節を時間と共にどの様に回転させるかを決める必要がある。運動を各関節の回転角の組で表すことを身体座標による表現と呼ぶ。作業座標上で計画された目標軌道は、身体座標に変換されるわけである。目標軌道の計画や座標変換が、どこでどのように行われるかは明らかではないが、一応、ここでは大脳連合野としておく。身体座標で表現された目標軌道は大脳連合野から大脳運動野に送られる。そこでは目標実現に必要な運動指令（各筋肉の収縮量あるいは関節に与えるトルク）が計算されて、脊髄内の運動ニューロンに送られる。この指令によって、運動ニューロンが活動し、所定の筋肉の収縮と関節の回転が生じ、手先の円運動が実現する。

さて、運動が未熟な時は、感覚系を通してフィードバックされる誤差信号に応じて、運動指令が修正される。しかし、練習を重ねるにつれて、小脳内に運動系の内部モデルが形成され、このモデルを用いたフィードフォワード制御に移行し、運動は円滑になる。

目的の項で述べたように、この考えは伊藤によって提出されたものであるが、われわれはこれを発展させたモデルを提出する。

図1にモデルの概念を示す。目標軌道としては、すでに身体座標に変換された後を想定している。

運動系の内部モデルを形成するという事は、構造はともかくとして、運動系と同一の入出力関係を持つシステムを構成することである。システム工学ではこれを同定問題、モデルを同定器と呼んでいる。それには、図2のごとく、対象とするシステムと共通の入力を同定器にあたえ、両者の出力を比較し、同一の出力が得られるように同定器の特性を調整すればよい。その

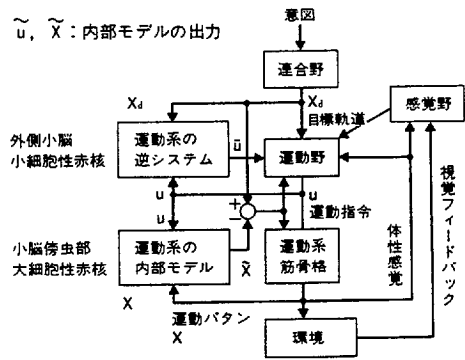


図1 運動系の内部モデルの学習と制御のシステム概念

結果は、対象とするシステムの特性が構造既知の同定器に写し取られたことになる。これでわかるように、同定器は対象の入力と出力を同時に観測出来る位置にいる。運動系に関してそのような位置にいるのが、図1の小脳傍虫部、大細胞性赤核と記したブロックである。われわれは、ここに運動系の内部モデルが形成されると考える。形成された内部モデルは運動指令を受けて、関節の動きに対応した出力を出す。これと目標軌道との誤差を運動指令の修正に用いると、感覚フィードバックに頼っていた時よりも運動は円滑になる。

しかし、われわれが本当に必要とする内部モデルはこれではない。今のモデルでは、運動系と同じく、入力に運動指令、出力は関節の動きである。このようなモデルは順システムの内部モデルという。もし、目標軌道が与えられると直ちに必要の運動指令が計算できるモデルがあれば、完全なフィードフォワード制御が可能となる。入出力関係が運動系と逆になっているという意味で、逆システムの内部モデルという。あるいは運動系の動力学特性に着目して、逆ダイナミクスシステムと呼んでいる。図1で、外側小脳、小細胞性赤核と記したブロックは、目標軌道と運動指令を同時に観測して、目標軌道

から運動指令を計算する逆ダイナミクスモデルを形成すると考えられる。

具体的に逆システムの内部モデルを形成するための、われわれの採用した仕組みを図3に示す。

これは、フィードバック制御系と逆システムの内部モデルによるフィードフォワード制御系を階層的に組み合わせたものである。フィードバック制御系は実際の軌道  $x$  と目標軌道  $x_d$  の差にもとづく制御信号  $u_f$  を出力する。一方、逆システムは目標軌道を入力として受けて、システム特性に従って計算された制御信号  $u_i$  を出力する。そして  $u_f$  と  $u_i$  の和  $u$  が制御信号として制御対象に送られる。制御開始の時点では、フィードバック制御だけが働くようにモデルの構造を指定しておく。学習の目標は、フィードバック制御からフィードフォワード制御へ移行させることであるから、 $u_f = 0$ 、 $u = u_i$  となればよい。そこで、 $u_f$  を誤差信号として内部モデルに与え、これが0になるように学習を行わせれば、制御を繰り返す内に、 $u_i$  が働き始め、逆に  $u_f$  にとって代わるようになる。この時、内部モデルには、運動系の逆ダイ

ナミクスが習得されたといえる。

内部モデルとしては、入力層、中間層、出力層の3層からなる神経回路を用いた。各層は、いくつかの神経細胞からなり、入力層の神経細胞は中間層の神経細胞に、また、中間層の神経細胞は出力層の神経細胞にシナプス結合している。各細胞は前の層から入ってくる信号にシナプス結合係数を乗じたものの総和を入力として受けて、ある種の非線形変換（例えば、s字形の関数）を施した後、次の層へ出力として送り出す。したがって、入力層に目標軌道が与えられたとき、出力層から得られる制御信号（運動指令） $u_i$  は、シナプスの結合状態を反映したものになる。もし、 $u_i$  が目標軌道と異なる軌道を制御対象にとらせるものであれば、フィードバック制御系が働いて軌道を修正しようとする。すなわち、神経回路が逆システムの内部モデルに正しくなっていないときは、フィードバック制御による指令信号  $u_f$  が0にならないことになる。そこでこれを誤差信号として、3層間の神経細胞間のシナプス結合係数を修正する。この修正の手続きとして、誤差逆伝播学習法を用いた。この方法は、ルーメルハートらによって提案されたもので、出力層での誤差信号をもとにして中間層のシナプス結合係数を修正できるというものである。

具体的には、制御対象として3関節からなる前腕のモデルを想定し、その手先を障害物のない自由な空間で、目標通りに動かす能力を獲得する過程をとりあげる。

そのために、逆ダイナミクスを学習する神経回路としては、入力層には3つの関節の運動目標（それぞれ、角度、角速度、角加速度の3つ）を入力するための9個のニューロン、出力層には3つの関節に与えるトルクを出力するための3個のニューロンを用意し、中間層のニューロンの数は10個とした。

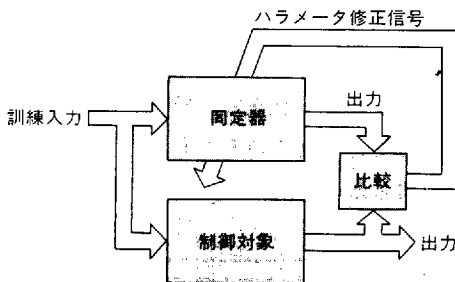


図2 学習同定法

**結果** トレーニングパターンとして、6秒間続く目標軌道を600回繰り返し与えることにより、60分間の学習を行わせた。図4の実線は、学習によって、3つの関節の目標角度と実際の角度との誤差の減少する様子を示す。第一関節は

非線形性が強いいため、誤差の減少に時間を要するが、他の二関節の誤差は急速に減少しているのがわかる。

次に、トレーニングに用いたものとは異なる目標軌道を与えたときの運動を調べた。同じく図4に重ねて示す。トレーニングパターンでの学習の過程で、その都度テストを行い、誤差をプロットしたもので、一点鎖線は、トレーニングパターンよりも高速の運動、二点鎖線は、低速の運動の結果である。高速パターンについて、特に、第二関節の動きは満足できるものとは言えないが、学習の汎化もある程度可能なことがわかった。

図5は、学習前後での、目標軌道(点線)と実際の軌道を重ね書きしたものである。学習前は、フィードバック制御のみによるもの、学習後は、神経回路の内部に、運動系の逆ダイナミクスが獲得されて、フィードフォワード制御が

行われている状態での結果である。

**考察** 人間の運動能力習得の過程を、脳内に運動系の逆ダイナミクスモデルが形成され、フィードバック制御がフィードフォワード制御に移行するものととらえ、それを実現する神経回路モデルを提案した。このモデルは、トレーニングパターン以外の運動パターンに対しても、良い制御能力を示したが、それは、モデルが、目標として与えられた運動パターンを学習するのではなく、運動系のダイナミクスを学習するように構成されているからである。いいかえれば、子供が自分の手を使っている中に、手の特性(癖)を体得して、初めて経験するような行動もうまくこなせるようになることをモデル化したものである。

今回は、手の自由な運動に限って報告したが、

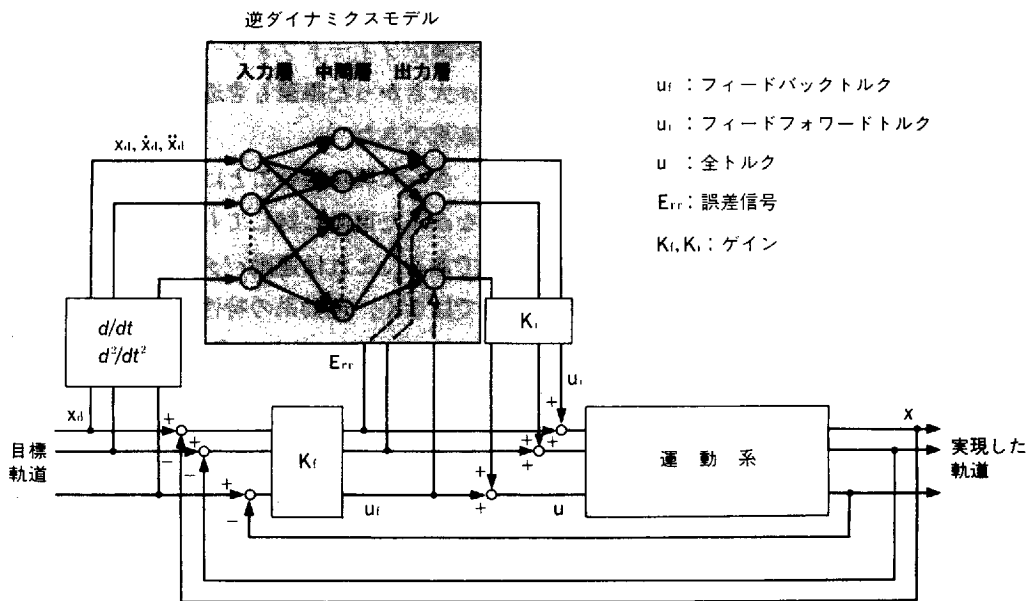


図3 多層神経回路網モデルを用いたフィードバック誤差学習モデル

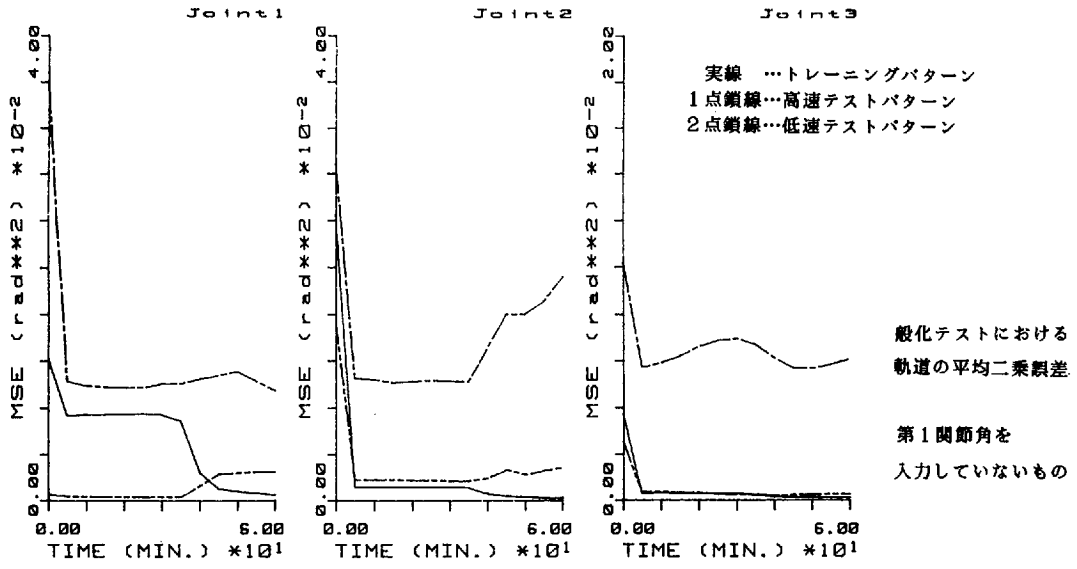


図 4

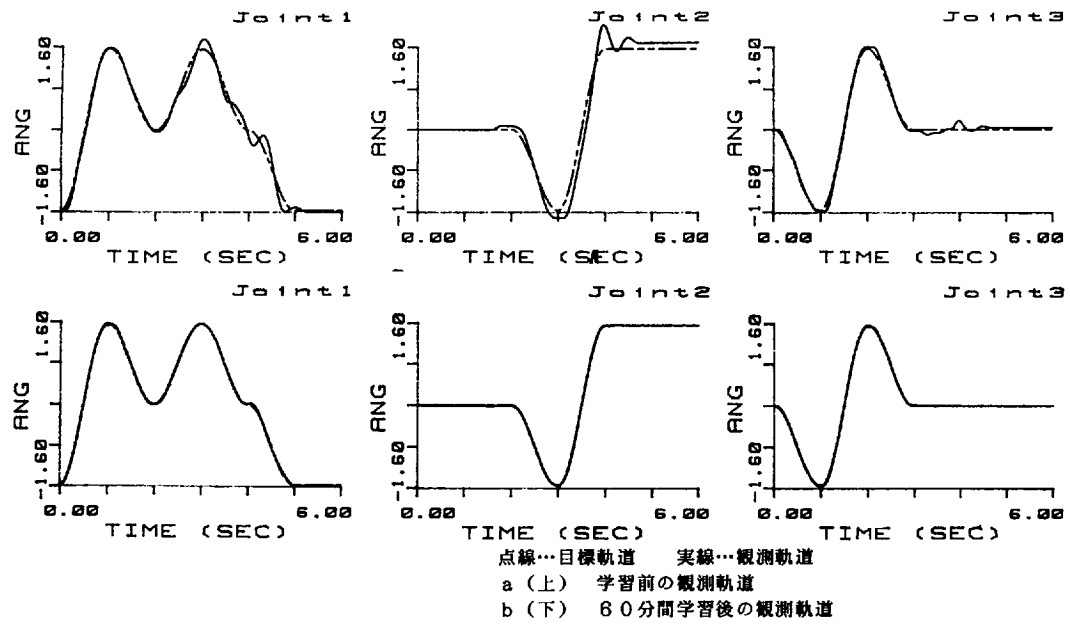


図 5

手の運動としては、障害物をさけたり、穴の中に手を通すなど運動範囲を制限された運動や、ものを掴んだり、支えたりなど、力の制御を必要とすることが多い。

このような運動の制御も可能なモデルについて、現在、研究を進めており、いずれ、発表の機会を得たいと考えている。

ところで、米国カリフォルニア大学の哲学の教授H. ドレイファスは最近の著書の中で、人間が技能を獲得する過程は、少なくとも5つの段階に分けられると書いている。

第一段階は初心者の段階で、指導を受けて新しい技能を獲得する最初の段階である。自動車の運転でいえば、ハンドルの回し方やギヤの入れ換えの規則を教えられている段階で、まわりの状況は無視される。教えられる規則が全体と関係なく単純化されているので「文脈不要の規則」と呼んでいる。

第二段階は、現実の状況に対処する経験がある程度深まって、状況に依存した行動がとれるようになる中級者の段階である。ギヤの入れ換えでいえば、速度ではなく、エンジンの音を聞き分けて入れ換えられるようになる。「状況依存の規則」の登場である。

第三段階は上級者である。「文脈不要の規則」や「状況依存の規則」の数が増すと中級者では対処できなくなる。そこでは、状況を構成する要素間の関係を把握し、目標の実現に最も必要な行動をとることが要請される。この段階に達した者が上級者である。

以上の段階では、程度の差はあれ、規則に照らして合理的な意志決定が行われているといえる。ところが、次の第四、第五の段階では事情が違って来る。

第四の段階はプロである。この段階に達すると、これまでのように状況を要素的に捉え、客観的に分析することはない。むしろ、全体の状況をかなり主観的に捉え、最近の経験に照らして、ものごとを判断するようになる。いわば、直観が働くようになる段階である。

第五段階はエキスパートと呼ばれる段階である。経験に裏打ちされた円熟した理解力にもとづいて、何をなすべきかが判断できるようにな

る。技能が身体の一部ようになって、ほとんど意識にのぼらなくなる。

以上の技能獲得のプロセスに関するドレイファスの分析で特徴的なことは、状況を意識的に分解して、構成要素を識別する客観的、分析的な行動が、経験を積むにつれ、新しい状況の中に過去の経験との類似性を認め、直観的、全体的な認知による行動、しかも無意識に行われる行動に移行するという見方である。

よくコンピュータと脳の働きを比較して、コンピュータには脳もっている直観的能力や創造性がないといわれる。もし、ドレイファスのいう技能獲得のプロセスが理解されるならば、「創造性」はともかく、「無意識」や「直観」を理解する手がかりが得られるのではないか。しかも、「創造性」には「無意識世界」が重要な働きをするという見方もある。

実は、われわれのモデルは、その第一歩であると考えている。ドレイファスのいうように、手先の運動も、未熟な内は意識して行わなければならない。しかし、学習が進み、コツを覚えると無意識に手を動かせるようになる。われわれのモデルは、この学習のプロセスを説明したもので、最初はフィードバック誤差信号に頼って行われていたぎこちない制御が、学習が進むにつれ、神経回路内に運動系の逆ダイナミクスが形成され、円滑な制御が可能となる過程を示した。

このことから、学習によって「意識的」行動が「無意識的」行動になるのは、その行動を制御する神経回路が脳内に形成されるからだといえることが出来る。

一方、直観については「過去の経験との類似性」を認知するという点に手がかりが求められる。ドレイファスは、一つの可能性としてホログラフィーをとりあげている。ホログラフィーは、よく知られているように、二つのパタンの相関を並列的に計算する。さらに、その特徴として、部分から全体が再生でき、連想機能を持つことがあげられる。この考えは、決して新しいものではなく、強く支持すべき生理学的データも出ているわけではない。しかし、直観によって、あるいはコツを体得しての行動が、過去

の経験との類似性を認識することによれば、「相関」を計算している可能性は高く、神経系のような動作速度の遅い要素を使つての計算としては、ホログラフィーも重要な候補といえよう。

その具体的な方式の解明は、今後の課題であるが、直観が働くようになるということを、運動系の場合と同様に、学習を通して、「相関」を計算する神経回路が形成される過程と見なせないであろうか。

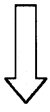
## 文献

- 1) 川人光男・宇野洋二・鈴木良次 「随意運動における適応と制御Ⅱ」日本ロボット学会誌 6, 3, 222/230(1988)
- 2) 瀬戸山徹・川人光男・鈴木良次「多層神経回路網内に学習される逆ダイナミクスモデルによるマニピュレータの制御」信学技報, MBE87-135,249/256(1988)
- 3) 鈴木良次・川人光男・宇野洋二「人間の手の技能はどのようにして獲得されるか—ニューラルネットワークの運動制御への応用—」BME(日本ME学会誌)2,10,676/682(1988)

## Abstract

### Neural Network Model of Human Motor Skill Development

A neural network model and the feedback-error-learning rule are proposed, by which an internal neural model of inverse dynamics of the motor system is acquired in a three-layer neural network. We used a modification of the back-propagation learning rule while still using the feedback motor command as the error signal. As motor learning proceeded, the inverse-dynamics model gradually took the place of the feedback loop as a main controller. Furthermore, the neural network can control quite new and fast movement pattern after learning a slow movement pattern.



## 検索用テキスト OCR(光学的文字認識)ソフト使用

論文の一部ですが、認識率の関係で誤字が含まれる場合があります



要約 人の運動能力は、生後の訓練によって習得される。未熟な段階では、視覚や体性感覚からの情報を頼りに、いわゆるフィードバック制御を行っているが、習熟するにつれ、フィードフォワード制御に移行する。この過程を神経回路モデルとして具体的に示した。ついで、運動技能の習得の過程が、一般に、意識的行動が無意識化される過程としてとらえられること、無意識化が神経回路の自己組織として理解し得ることを述べた。