

「意識の働き」を組み込んだ感覚運動制御の計算モデル Computational Approach to Human Sensorimotor Mechanism Involved in Function of Consciousness

阪口 豊[†]

Yutaka Sakaguchi

[†]電気通信大学

University of Electro-Communications

yutaka.sakaguchi@uec.ac.jp

Abstract

本稿では、身体技能の遂行・習得メカニズムを明らかにする方法論として、随意運動制御の計算モデルに意識の働きを組み込むことについて議論する。ヒトの運動制御の本質的な難しさが身体の多自由度性にあることを指摘するとともに、意識に上る認知の働きと無意識の下で働く運動計画・運動制御の働きがこの問題を解決するうえでどのように機能するかを考察したうえで、意識の働きを計算モデルに組み込むうえでの課題について論じる。

Keywords — 身体技能, 感覚運動システム, 身体の多自由度性, 注意, 計算モデル, 計測制御システム

1. はじめに

ヒトの感覚運動メカニズムを解明するためのアプローチの一つに計算モデルや計算理論がある。この方法論は、身体運動の実行や学習にかかわる脳内計算過程を数理モデルや制御モデルに基づいて説明するもので、脳の知覚・運動制御やその学習の原理を理解するうえで有用な視点を提供してきた[1]。このような計算理論における中心的話題は、物理的・神経実体としての身体運動メカニズムであり、身体を操る認知の働きが議論の対象となることはまれであった。しかし、身体技能を習得する際に個体がさまざまな試行錯誤を繰り返すプロセスを思い起こせば、現実の運動、特に技能的動作の遂行・習得において認知や意識といった精神的機能が果たす役割が大きいことはいうまでもない[2]。

本稿の目的は、身体技能の遂行・習得過程の理解を念頭において、このような認知プロセス（あるいは意識）の働きを、感覚運動制御の計算モデル・計算理論に組み込む方法論について議論することである。

神経科学を背景として発展してきた脳の計算理論の流れを考えれば、計算モデル研究の多くが、問題をその要素問題に切り分けてそれらの意味を個別に検証するアプローチをとっていることや、客観的に測定できない認知の働きにかかわる問題を避けてきたことは理解できることである。しかし、過去30年以上にわたるこのような方法論によって主要な問題が解決されてし

まったためであろうか、（あくまで私見ではあるが）少なくとも運動制御の問題に関しては、近年計算モデル研究に手詰まり感を感じることは否定できない。後述するように、ヒトの運動制御問題の本質的困難が身体の多自由度性にあることや、運動遂行において意識上と意識下のプロセスが相補的に働いていることを考えれば、還元主義的アプローチの枠を乗り越えて、新しい方法論を模索する時期が来ているといつてよいのではないだろうか。

以下では、「脳の計算モデル」という方法論について概観したのち、ヒトの運動制御の本質的問題が身体の多自由度性にあることを指摘し、それが運動制御における意識の働きとどのような関係にあるかを議論する。そのうえで、主観的な身体感覚の違いが運動の特性に影響を与える例を取り上げて、その現象をもたらす意識上と無意識下のプロセスの役割に関する計算モデルを構築する試みについて議論したい。

2. 脳の計算モデル

脳の計算モデルとは「脳の構成的研究」とも呼ばれるもので、脳内で行なわれていると想定される情報処理の内容を数理モデルやアルゴリズムとして記述し、その振舞いを現実の現象と対照することで、脳の情報処理メカニズムを間接的に理解しようとする方法論である。認知科学における「情報処理モデル」も基本的にはこれと同じものであるが、認知科学における多くの情報処理モデルが系の構造をブロック線図で表した概念モデルであるのに対し、脳の計算モデルでは、処理の内容が数式やアルゴリズムとして記述され、モデルの振舞いが神経細胞の活動頻度や身体運動軌道などの実験データと定性的・定量的に比較できる点で、より具体的なモデルであるといえる。運動制御の領域で例を挙げれば、上肢到達運動（手を目標に運ぶ運動）において手先が描く軌道は、躍度最小化規範、トルク変化最小化規範などの基づく計算モデルによりかなり

正確に再現できる[1].

ところで、随意運動の発現においては脳からその運動に関わる筋に対して運動指令が送られるが、運動指令を生成・送出する過程が我々の意識に上ることはない（意識に上るのは「手を動かす」ことであって「〇〇筋に対する運動指令を決めたり送ったりする」ことではない）。従来の計算モデルが説明しようとしていた対象が、運動課題の内容が規定されたときにその実行に必要な運動指令を計算・生成するメカニズムであったことを考えると、計算モデルは「無意識の情報処理過程」を説明するモデルであったといえる。

3. 身体の多自由度性

ヒトの運動制御を難しくしている問題の一つが「冗長性問題」であることは、これまでの計算理論の中で明確に指摘されている[1]. 上肢到達運動を例にとれば、手を目標に運ぶ際にとりうる手先軌道の可能性は無数にあり、軌道計画における冗長性問題と呼ばれている。先に述べた躍度最小化、トルク変化最小化といった規範はこの冗長性問題を解決するための規範であり、軌道計画の計算モデルでは、躍度やトルク変化量といった評価量を最小化する軌道を求めることによって、軌道の解を一意に定めてきた。

しかし、ヒトの運動制御において最も重要な冗長性はその身体自由度の大きさにある。ヒトの身体には200を超える関節、数百の骨格筋があり、身体技能の遂行（特に、身体の微妙な調整が要求される高度な技能）ではこの多自由度性が活用されていると推測される。したがって、ヒトの運動制御メカニズムの解明には、身体が多自由度性が本質的な要素となる問題を対象とした計算モデルの構築が望まれるところであるが、現実にはこの問題を正面から取り扱った議論はあまり見られない。上肢到達運動の例をみれば、この運動の特徴としてしばしば参照される「手先はほぼ直線経路を描き、接線方向速度はベル型の時間波形を描く」という性質は、肩を固定して上肢を肩と同じ高さの水平面内に制限した状況（つまり、上肢の動きを肩と肘の2関節の屈曲・伸展だけに制限した状況）での行なわれた行動実験において得られたものであり[3]、また、この現象を再現する計算モデルの数値シミュレーションも肩と肘の2関節から構成される冗長自由度のない条件で行なわれている[1]（注：このような制約を与えずに、到達運動中の全身の動きを計測した実験報告[4]もある）。測定条件を一定に保ち、データの再現性を高

めるために自由度に制限を加えることは自然科学の方法論として当然のことではあるが、結果として身体が多自由度性を封印した条件で議論が行なわれているもまた事実である。

身体が多自由度問題を取り扱う概念として、シナジー（motor synergy）という考え方が提案されている[5]. この概念の意味する内容は研究者ごとに違うが、基本的には、複数の身体自由度を協調的に機能させる脳神経系の仕組みを指す。シナジーの有力な考え方の一つは、「筋シナジー（muscle synergy）」と呼ばれる複数の筋への指令を支配する中間変数という位置づけである[6]. この考え方の下で、筋活動や脳神経活動の解析を通じて中間変数の神経実体の解明が進んでいるほか、ネコの歩行時の四肢の協調関係を議論した計算モデルも提案されている[7]. ただし、随意運動制御においてどのようにして多自由度問題を解決・活用するかという観点での議論はあまり進んでいないようである。一方で、運動のパフォーマンスを左右する変数（性能変数）の変動を抑えるように冗長自由度を相補的に変動させるなど身体自由度の大きさを積極的に活かす機能をシナジーと呼ぶ研究者もいる[4]. シナジーのこのような捉え方は運動制御における身体多自由度性をポジティブに捉えている点で、随意運動発現における多自由度性の本質を捉えているように思えるが、このアプローチに基づく研究は身体運動軌道を解析するなど現象論的な研究が中心で、その計算過程や神経実体を議論するには至っていない。

このように、身体が多自由度性を取り扱う運動制御方式の構築という問題はアプローチが困難な問題である。この問題が運動制御の計算理論やアルゴリズムとして難しい問題であるのであれば、現実には身体を操っている人間（脳）自身にとってもそれが難しい問題であることは明らかである。多くの身体技能がその習得に多大な時間を要するのは、大きな自由度が作る巨大な空間の中で、目的の動作を実現する適切な解を探索する必要があるからである。そして、この巨大な探索問題の解決には意識の働きが大きく関与しているといえる。というのも、我々は新たな身体技能を習得しようとするときさまざまな試行錯誤（＝探索）を行なうが、この試行錯誤の担い手は意識の働きであるからである。

4. 運動制御における意識や注意の働き

前節までは、随意運動メカニズムについて身体とい

う物理的実体とその制御を担う計算過程という観点から議論してきた。一方で、随意運動において運動の内容を決めるのは意識の働きである。個体は、(随意運動であるならば) 一つ一つの動作をする際に自分の身体や外部環境の状態を知覚・認知して動作内容を決めているのであるから、このような意識の働きは知能の働きにおける中心的問題であると同時に、随意運動制御の重要な要素である。

動作内容に関する意識の働きとは、「運動課題の内容をどのように捉えるか」ということである。上肢到達運動の例をとれば、この運動は物理的・客観的には「手の位置を目標位置に一致させる運動」である。そして、従来の計算モデルでは、手の位置と目標の位置とのずれ(誤差)が零になるような運動指令の生成方法を議論してきた。そこには、個体がどのようにして手や目標の位置情報を知覚するのか、どのようにして目標に到達したことを感じるのか、といった視点は含まれていない。しかし、現実には、個体はこのような主観的な感覚・知覚に基づいて運動を遂行しているものであり、また、このような「運動の捉え方」はただ一つ決まるものでもない。すなわち、到達運動は「目で見た手先が目標と重なるように動かす運動」として捉えることも、「手先が目標に触れるまで動かす運動」として捉えることも可能である。どのような感覚手がかりに基づいて運動を実行するかは個体の任意性に委ねられている。運動遂行時に参照する感覚手がかりを選択する機能を「注意の働き」と呼ぶのであれば、これは「注意の任意性」といってもよい。この任意性は異なる個体のあいだにも同じ個体の中にも存在し、これが、個体間や試行間の運動の変動を生み出す要因となる。

また、「運動の捉え方」にこのような主観性・任意性があることは、外見上は他人が自分と同じ動作を実行しているように見えても、他人は自分とは異なる感覚手がかりに基づいてその動作を実行している可能性があることを意味している。相手がどのような感覚手がかりに基づいてその運動を実行しているかを理解せずに同じ運動について議論すれば、両者のあいだに理解の齟齬が生じうことは容易に想像できる。すなわち、運動に対する主観的な捉え方の違いは、技能コミュニケーションを左右する重要な要素でもある。

このような注意の働きは、特に、前節の最後で述べた技能習得過程(運動学習)における試行錯誤において重要である。注意(選択的注意・焦点的注意)という概念は、感覚情報処理において、多数の情報源のう

ちの特定のものに焦点を絞りそれを選択的に処理する機能として捉えられるが、運動制御においても「参照する感覚手がかりの選択」という意味で本質的な役割を果たす。随意運動の習得において注意の働きが重要である根本的理由は前節で述べた身体の高自由度性にある。自由度が少なければ注意を向けるべき先は限られるので、情報源選択という注意の働きは意味がなくなる。身体の高自由度が多からこそ、注意の向け先(どの感覚手がかりに注目するか)の候補が無数に存在し、その選び方が問題になるのである。

実際、運動学習中の試行錯誤において、我々は、身体や環境のさまざまな部分に注意を向けてパフォーマンスを向上させる上で有効な手がかりを探している。例えば、「腕に〇〇という感覚があった時に良い結果が得られた」といった経験をすれば、腕の感覚に注意を向けて、その感覚が再現できるように練習を繰り返すことになるであろう。そのような意味で、身体技能習得における試行錯誤とは、身体の動かし方の探索であると同時に、感覚手がかり(注意の向け方)の探索でもあるといえる。

さて、注意が運動パフォーマンスに与える影響については、注意を身体の外部に向ける条件(外的注意: external focus)の方が、身体の内側に向ける条件(内的注意: internal focus)と比較して一貫してパフォーマンスが高くなることが Wulf らの一連の研究によって明らかにされている[8,9]。彼女は、内的注意が働くと、無意識下で働く自動的プロセスに対して何らかの制約が加わり、その本来の働きが阻害されるため、結果として運動パフォーマンスが低下するという仮説(constrained action hypothesis)を提案している[10,11]。これは、Gulway による二つのセルフの議論[12]、すなわち、意識上の自己であるセルフ1が過剰に働くと、無意識下の自己であるセルフ2の働きを阻害して自分の本来もっている力を発揮できないという議論と同等の内容であると考えられる。

このように、随意運動遂行に関わる脳内計算過程を意識上のプロセスと無意識下のプロセスに分けて、これら二つのプロセスをつなぐ窓口として注意の働きに着目する枠組みは、すでに複数の研究者によって提案されている。以下で述べるように、筆者の枠組みも基本的にこれらの考えを踏襲するものである。一方で、Gulway や Wulf の主張・仮説はいずれも認知科学における情報処理モデル、すなわち、情報処理の仕組みを概念として表現することに留まっており、それがいか

なる感覚運動制御メカニズムの下で生じる現象であるかを具体的に議論するところまで進んでいない。また、これらの議論には「身体性」、すなわち、ヒトの身体がもつ物理的特性や神経系に内在する情報処理上の制約（例えば、信号伝達の遅れ）が含まれていない。ヒトの感覚運動制御の特性は、身体や環境のもつ物理的特性や神経系のもつ情報処理特性の下で発現するものであり、これらの要因を考慮することで初めて理解できることがあるはずである。

このように考えると、意識や注意に関わる認知プロセスの働きを考慮したうえで、物理的実体として環境と相互作用する感覚運動制御プロセスの仕組みを検討するという方法論に行きつくことになる。これが、本論のテーマである「意識の働きを組み込んだ計算モデル」である。2 節で述べたように、いったん運動の内容が規定されればそれを実現する運動指令を計算・生成するのは無意識下の計算過程であり、それはまた従来の計算モデルが解決してきた問題である。したがって、意識上の認知プロセスにおいて「運動の捉え方」を定め、その下で、意識下の感覚運動制御プロセスが運動実現に必要な運動指令が生成するという枠組みを設定すれば、意識上の働きと意識下の働きをつないだ随意運動制御の計算モデルを構成することができる。

5. 意識の働きの計算モデルへの組み込み

前節までの考察に基づけば、意識の働きを計算モデルに組み込むには、まず、前節で参照した Wulf や Gulway らの提案、すなわち、「意識上の情報処理過程」（＝認知プロセス）が「無意識下の情報処理過程」（＝感覚運動制御プロセス）に干渉するという構造からスタートするのが妥当であろう。ここでは、筆者が以前に提案した枠組み（図1）に沿って、想定する計算モデルの構成について説明する[13]。

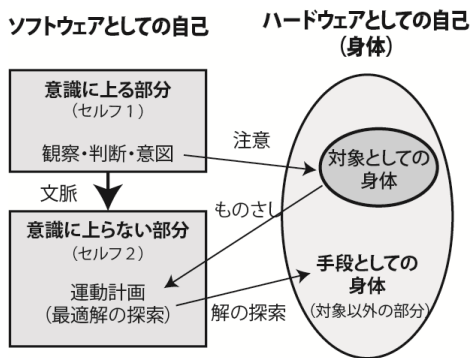


図1 モデルの大まかな枠組み（文献[13]）

ここで、脳は身体のあらゆる感覚器官、運動器官と何らかの形でつながっていることを考えれば、感覚運動制御プロセスは全身のあらゆる感覚情報へのアクセスが可能で、また、全身の筋をコントロールする役割を担っていると考えるとよいであろう。ただし、感覚情報へのアクセスや筋のコントロールが可能であることと、実際にそれらを利用したり制御したりすることとは別であることに注意が必要である。

一方、認知プロセスは、注意の働きによって意識下のプロセスが収集した情報の一部を選択的にアクセスして「知覚」を得るとともに、それに基づいて意思決定して行動の方向付けを行なう。いかなる行動を起こすか（＝行動の選択）、行動をいかなる運動課題として定式化するか、運動課題の遂行状況をいかなる感覚手がかりに基づいて評価するか（＝運動の捉え方と評価）、といったことを決めるのが認知プロセスの働きである。

感覚運動制御プロセスは、このような認知プロセスによって定められた方向付けの下で実際に運動指令を決定する。以下では、この運動指令を決定するメカニズムについて述べる。

前述したように、運動制御の計算モデルにおいては、実現したい運動の中身を評価関数（例えば、手と目標の位置誤差や軌道の躍度など）として表現し、それを最適化するような運動指令を求める。また、運動制御システムには、身体や環境の状態や運動指令を表す変数（信号）のほか、処理の特性を定めるパラメータ（例えば、フィードバック制御のゲイン）があり、これらのパラメータの値を変えれば運動の性質は変化することから、運動指令を直接決定するのではなくて、システムのパラメータを決定することで間接的に運動指令を定めることも可能である。いずれにしても、認知プロセスが定めた「運動の捉え方」の中身を評価関数の形で感覚運動制御システムに伝えることができれば、「意識の働き」を運動制御に反映させることができる。到達運動を例にとれば、従来の計算モデルが、（手先や目標の位置情報を常に正確に入手できるという前提の下で）手先と目標の誤差を小さくするような評価関数を設定していたのに対し、ここでは、個体それぞれがどのような手がかりに基づいて手や目標の位置を知覚し、どのような手がかりに基づいて自分の運動をモニタしているかといった認知プロセスの中身を運動指令生成の評価関数に組み込むことによって、個体の意識の働きに沿った運動制御の働きを説明することをめざす（注：自動化の進んだ動作では、認知プロセスはも

はやそのような内容を一つ一つ意識しなくなっていると考えられるが、自動化する以前はそのような内容も意識に上っていたはずであり、自動化後はその中身が「自動的に」想起・設定されるようになったものと考えればよい。

これにより、運動遂行において認知プロセスで行なわれる意思決定や試行錯誤の中身は、試行ごとの運動指令生成プロセスに反映されることになる。このような定式化を行なうことにより、個体ごと、試行ごとの運動の変動やばらつきを単なる確率的なゆらぎとしてではなく、因果性のある変動として扱うことができるようになる。

なお、このような個体ごと、試行ごとの変動は、外形的な身体運動だけでなく、運動に際して個体が主観的に感じる知覚内容にも現れる。前述したように、意識に上る知覚内容は、感覚運動制御プロセスの中に表現されている何らかの変数に注意が向けられて選択されたものである。したがって、外見上は同じ動作であっても個体を感じ取る内容は多様であること、つまり、物理的には同じ状態でも主観的な感じ方・捉え方が異なることは、注意の働きの違いとして理解することができる。そして、そのような注意の働きの違いが、その個体のその後の運動内容に影響を与えていくことになる。

運動制御における認知プロセスのもう一つの重要な機能は、運動学習のためのサンプリングにバイアスを与えることである。

感覚運動制御システムにおいて運動指令を計算する際には、過去の経験を通じて得られた身体や環境に関する内部モデルを参照する（評価関数に基づいて運動指令の良し悪しを評価するには、その運動指令を生成した際に生じる運動を予測するモデルが必要である）。このことは、逆にいえば、過去に経験したことのない動作については、それに関する内部モデルが構築されていないために、その動作が積極的に選択・生成される可能性が低いことを意味する。同様に、それまでに使ったことのない感覚手がかりは運動の良し悪しを定める指標として採用される可能性も低いと考えられる。このように、感覚運動制御システムが身体のすべての感覚器官や運動器官にアクセスできたとしても、運動実行時に参照する感覚情報や生成する運動指令においては、その資源がすべて活用されているとは限らない。この問題は強化学習における「探索と知識利用のジレンマ」（exploration-exploitation dilemma）と

同質の問題である。

認知プロセスが、論理的推論やヒューリティクスなど、無意識下の感覚運動制御システム単体では生成することが困難な新しい試みを発想し、新奇の動作や感覚手がかりの下で運動を繰り返すように行動を方向づけすることができれば、その下で感覚運動制御プロセスにおける内部モデルの学習を促進できる。いったん内部モデルの学習が進めば、感覚運動制御システムは獲得した内部モデルを用いて運動指令を生成できるようになる。

このように考えると、身体技能習得における練習とは、さまざまな感覚手がかりに注意を向けながら試行錯誤を繰り返すことによって、感覚運動制御システムがもつ内部モデルの拡充を進める過程であるとみなせる。身体の多自由度性を考えれば、身体全体に関する内部モデルの獲得に莫大な回数の試行と経験が必要であり、ヒューリティクスを使っても優れた運動の獲得に長時間を要することは、我々の日常的経験が証明していることである。それでも、注意を向ける先や使う運動器官を適切に定めることによって、内部モデル獲得の向けた効率的なサンプリングが実現されれば、内部モデルの学習が素早く進むものと考えられる。また、複雑な内部モデルを獲得するうえで、単純な課題解決から複雑な課題解決へと段階を踏んでいくといったサンプリングのコントロールも重要な問題であると考えられる。練習における指導者の役割の一つは、学習者の状態に応じて適切なサンプリングを導くことであるといつてよいであろう。

6. ケーススタディ：仮想的知覚の効果

前節では、意識の働きを感覚運動制御の計算モデルに組み込む枠組みの概略について説明した。しかし、このような枠組みを示すだけでは、技能遂行・習得に関わる脳内メカニズムを具体的に議論するには不足している。実質的な議論をするには、具体的な例題を設定して、この枠組みの下でその問題を解決してみせる必要がある。

いま、ある研究者の頭の中に、現実の身体技能に関して興味のある問題や仮説があったとする。その研究者がその仮説を検証したいと思っても、現実の身体技能に関わる問題をそのままの形でモデル化して議論することは多くの場合不可能である。例えば、モデル構築時に参照する行動実験データを得ることが困難である、関係する変数が多すぎて身体モデルの記述が困難

であるといった理由で、計算モデルの形にすることができないのが通常である。

したがって、計算モデルとして有意義な研究にするには、関心をもった問題に含まれる重要な要素を抽出して本質的な問題意識に昇華し、それと同質の問題を包含する単純な例題を設定して議論する必要がある。「それでは従来の還元主義的方法論と同じではないか」という批判があるかもしれないが、これはバランスの問題である。以上で述べてきたように、ヒトの感覚運動制御の特徴は身体の多自由度性とその解決に関わる認知の働きにあると考えるのであれば、これらの要素を包含したまま問題を単純化することは、「意識の働きが感覚運動制御に影響を与えるメカニズム」を研究するうえでは妥当な選択である。どのような例題を設定するかは研究者としてセンスが問われるポイントである。いずれにしても、本質的問題を浮き彫りにした例題を設定し、その例題の中でヒトの多様な振舞いを説明できる計算モデルを構築することができれば、そこで明らかになったことを一般化して現実の身体技能に投影し、その意味を考察することができる。

以下では、このようなアプローチのケースステディとして「仮想的知覚の効果」という問題[14]を取り上げて、この問題に関する筆者自身の試みについて説明する（文献[15]は注意を向ける先が身体運動の協調性に与える効果を調べる単純化した実験例である）。

スポーツ、楽器演奏といった分野を問わずに、技能指導の場面では、指導者が学習者に対して「〇〇のように感じながら△△しなさい」と教示する場面がしばしばある。例えば、クラシックバレエでは「胸を天井からロープでつりさげられているような感じで」といった指導が行なわれる。この指導はおそらく体幹部の姿勢を整えるためのものと推測される（あくまで推測である）が、ここで重要なことは、指導者が「姿勢をよくしなさい」という指示ではなく、あえて「ロープでつりさげられている感じで」という指示を出す理由は何かという点である（注：この例は「外的注意」の一種のようにも見えるが、「ロープにつりさげられている」ことは運動課題の成績に関係しているわけではないので、従来の研究が扱ってきた問題とは明らかに異なる問題である）。このような指示を受けた学習者は何を感じようとし、その主観的感覚が学習者の運動制御にどのような影響を与えるのであろうか？

このような疑問を解決しようとしたときに、実際にダンサーを対象とした行動実験やダンサーの身体モデ

ルを使ったシミュレーション実験を行なうことは難しい。そこで、「〇〇のように感じながら」という要素を含む、実験室内で実験できる運動課題を設定することを考える。筆者は、「他者に導かれているように感じながら手を動かす」という課題を設定して行動実験を行った[14]。

この実験で、被験者は椅子に座った状態で、垂直に立てられた円柱上の二点間（膝の高さから目の高さまで）の到達運動を行なった。課題遂行中の被験者の身体運動は光学的モーションキャプチャ装置により測定した。実験条件は「（自然に）目標まで手を動かす」通常条件と「だれかに手を引かれているように感じながら目標まで手を動かす」誘導条件の二つである。実験では、通常条件、誘導条件、通常条件の順番でそれぞれ20,20,10回ずつ試行を行なった。二つの条件での身体運動軌道を比較したところ、

- ①誘導条件では、手先軌道の湾曲が減少して直線性が増すとともに、試行ごとの軌道のばらつきが減少すること（図2）、
 - ②誘導条件では、手首や肘の位置が相対的に高くなり、運動中の前腕の仰角の変化分が小さくなること、
 - ③一部の被験者では、誘導条件において体幹や頭部の動揺が減少すること
- が明らかになった。

この結果が明確に示していることは、「手を引かれているように」と仮想的に感じながら運動することによって、「手首や肘を高く保って運動する」という、仮想的知覚とは直接的には関係のない身体運動の変化が生じることである。このような変化はいかなるメカニズムによって生じるのであろうか？この仕組みを制御の問題として考察する計算モデルの役割である。

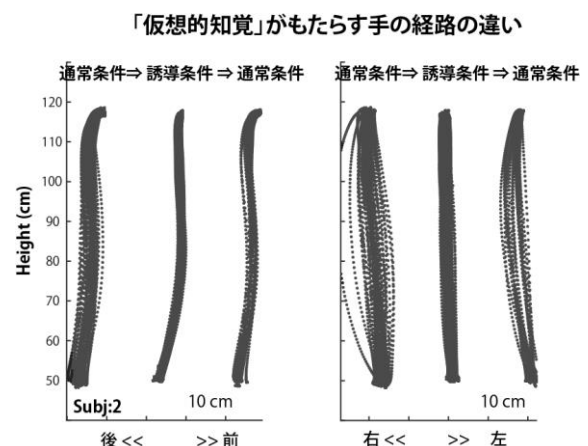


図2 「仮想的知覚」指示の効果

まず考慮すべきことは「手を引かれているように感じる」という指示が運動中の認知プロセスに与える影響である。このような指示のない通常条件では、運動者は手の身体感覚に特段の注意を向けることなく、目標までほぼ一息で（弾道的に）手を運ぶであろう。これに対し、このような指示のある誘導条件では、運動者は「誘導者が自分の手をどの方向にどれくらいの速さで引くのか」を感じながらそれに追従するように手を動かす必要があるので、必然的に、自分の手に加わる力の大きさや向きなどの感覚に注意を向けながら、手を漸次的に動かすことになるであろう。

このように考えると、「手を引かれているように感じながら」という指示には、運動者の身体感覚に対する注意のあり方や運動の実行方式、つまり、運動遂行の捉え方・規範を変容させる効果があると考えられる。そして、認知プロセスにおけるこのような規範の変化が、感覚運動制御プロセスに対して、手にかかる力を感じとりやすい体勢を維持しながら、誘導に追従する（つまり、手にかかる力が一定に保つ）制御方式を選択するように「指示」を出すものと推測できる。実際、行動実験で観察された「手首や肘を高い位置に保つ」という動作は、手関節を「手にかかる力を感じるセンサ」として使い、また、手関節をセンサとして使いやすい体勢を維持しながら手を動かすために、肘主導で運動を実行するという方略が動員されたために生じたものと推測できる（体幹の安定性が増した現象も、そのような体勢を維持するための副作用として解釈可能である）。

以上では、行動実験で観察された現象の原因を「外力を検出するためのセンサ機構を作る」「センサ機構を安定して動作させる」「検出される外力が一定に保たれるように腕を動かす」といった計測制御工学の言葉を使って論理的に考察してきた。実験で得られた現象論に対してこのような工学的考察を加えることも「脳の構成的研究」として一定の意義はあると考えられるが、このような考察は、筆者が自身の工学的知識に基づいて推論して得たものであって、実験に参加した被験者の頭の中でこのような考察が行なわれているわけではない。重要な点は、（仮に脳内で現実にはこのような制御方略が取られているとして）このような制御方略が無意識のうちに形成されていることである。つまり、運動者自身は、意識の上では「手を引かれているように感じる」ことだけを思っているものであって、「手首の姿勢やスティフネスを一定に保ちながら肘主導で運動し

よう」などと考えているわけではない。繰り返しになるが、このような方略は、「手を引かれているように」感じようとしている意識の働きに伴って無意識下で働くメカニズムが生み出したものであり、ここに、意識上の認知プロセスと意識下の感覚運動制御プロセスとの役割分担が見てとれるのである。

感覚運動制御プロセスにおいてこのような方略が生み出されるのは、過去の経験を通じて、手にかかる力を感じ取りやすい体勢、また、手先にかかる力を一定に保つための制御方略に関する「知識」を獲得しているためであると考えられる。あるいは、過去の膨大な感覚運動体験を経て、種々の体勢をとったときの外力の大きさと姿勢変化との関係性、運動指令に対して生じる手の動きやそれに伴って生じる知覚の変化、といった種々の関係性に関する内部モデルを獲得しているためと言い換えてもよいだろう。そのような内部モデルの中身やそれが形成された過程は非常に複雑で、極めて難しい問題である。後述するように、このような内部モデルの複雑さが計算モデルを具体的に実装しようとするときの大きな障害となる。

議論をもとにもどすと、以上では、「仮想的知覚」という教示方法が意識上における身体感覚に対する注意のあり方を変容させ、それが無意識下の運動方略の変更を誘導する、という原理的仮説を工学的な表現を用いて述べてきた。計算モデル研究の次の段階は、この原理的仮説に従って具体的なモデルを組み立ててシミュレーション実験を行ない、行動実験で観察された現象が再現できるかどうかを検証することである。

この作業は次の二つの段階を経て行なう。まず、上記の原理を数式やアルゴリズムとして、また、対象となる運動に関連する身体や環境の特性を数理的なモデルとして記述し、両者を接続して全体を一つの制御システムとして組み立てる（以上は、Marr の唱えた計算モデルのレベルでいえば「表現レベル」に相当する）。次に、数値シミュレーションによってその振舞いを検証するため、制御モデル、身体モデル等をすべてプログラムとして実装し、全体を一つのコンピュータプログラムとして動作させなければならない（Marr のいう「実装レベル」）。多自由度性を有する身体を扱う上で現実に一番難しいのはこの実装レベルでの作業である。実際、複雑な構造をもつ身体の特性を一つ一つ具体的に記述し、プログラムの中に組み込んでいくことには膨大な手間を要する。また、言葉としては一言で表される「内部モデル」についても、多次元の入出力関係

をいかなる形式で表現し、学習させるかを解決しなければプログラムとして実装することができない。

表現レベルの計算モデルとしては、「手を引く力を感じて相手の誘導についていく」ことは、「手にかかる力の大きさや向きに関する感覚情報量を最大化すること」「相手から受け取る力の大きさを一定に保つこと」という規範として書き下すことができる。したがって、運動計画・制御のアルゴリズムは、これらの規範に対応する評価関数を設定し、それを最適化する運動指令や制御パラメータを求めることとして定式化される（この作業は、従来の計算理論・計算モデル研究で行なわれてきたことと同じである）。前述したように、この計算によって適切な運動指令やパラメータが得られるのは、過去の経験を通じて身体や環境の内部モデルを獲得している、評価関数を最適化する体勢や運動指令が計算できるからである。このほか、相手からの誘導を受け取る手に注意を向ければ、手周辺の機構をセンサとして利用しようとする働きが生じることが事前に組み込まれていると考えることもできる。

図3に示したものは、そのような表現レベルの計算モデルの一例である。ここに示したものはブロック図にすぎず、認知科学における情報処理モデルの域を出るものではないが、この図のなかのボックス一つ一つの中身を数式やアルゴリズムとして記述することで、計測制御システムとしてのモデルが構成されることになる。例えば、評価関数のボックスの中身としては、手に加わる外力変化に対する情報量や、受け取る外力の方向や大きさを一定に保つと高評価となる評価関数を組み込むことになる。そして、運動計画器ではこれ

らの評価関数を最適化するような運動指令を内部モデルを参照しながら計算する。なお、「仮想的知覚」の場面では、現実には誘導者は存在せず、誘導者の動きも自分の「想像の中で」作り出すことになるが、ここでは、そのような「想像」は認知システムの役割であり、想像した結果を運動目標として感覚運動システムに伝えるものと想定している。なお、ここに示したのは可能性のある候補モデルの一例であり、ここに示したものの以外にも可能性のあるモデルは考えられる（このような複数の候補のうちいずれが脳のモデルとして妥当であるかを検証するには、次の数値シミュレーションが必要になる）。

このようにして制御系全体の枠組みを客観的に記述できれば、次は、実装レベルのモデル化へと進むことになる。計算モデル研究の目的は単純化された問題での動作を確認することにあるから、モデルの実装にあたって現実の問題に対して徒に忠実な設定（例えば、解剖学的構造に忠実な複雑な身体モデルを使うなど）を使う必要はないが、少なくとも、行動実験データの再現に必要な設定は必要である。例えば、上述の行動実験では、通常条件では肩関節は主として屈曲方向に動くが、誘導条件ではむしろ外転の働きが大きくなる（肘を高く維持する姿勢は、肩関節の屈曲では実現できず外転が必要になるため）。また、肩関節の外転によって肘を上げたときに前腕の向きを一定に保つには前腕の回外が必要である。このようなことを考えると、この例題を取り扱うには、肩関節の屈曲・伸展、外転・内転、外旋・内旋の自由度、肘関節の屈曲・伸展、前腕部の回内・回外の自由度、手関節の屈曲・伸展を考慮する必要がありそうである。いずれにしても、「主観的な運動の捉え方に依存して運動が変化する」という問題を扱う以上身体の多自由度性を取り扱うことは必要であり、単純化した問題設定であっても、従来の計算モデル研究ではあまり扱われたことのない大自由度のモデルを組み込んだ実装が求められることになる。

大自由度の身体モデルの構築はそれ自体がたいへんな作業であるが、筆者は現在、このような身体モデルの実装方法として、身体力学シミュレータシステムの一つである OpenSim[16]の活用を検討している。OpenSim は、Stanford 大学の Delp が中心となって開発しているオープンソフトウェアで、Matlab などの外部ソフトウェアと連携して身体運動の制御系を構築する機能を有している。このシステムには標準的な全身身体モデルが用意されているほか、上肢についても 2

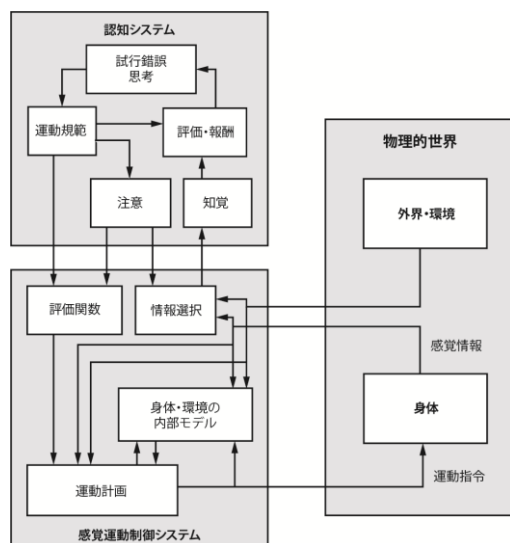


図3 制御モデルの全体構成

関節 6 筋モデルのほか, MoBL-ARMS dynamic musculoskeletal model などの多自由度モデルが提供されていて, これらを利用することが一つの解決策であると考えている. このようなオープンシステムを通じて同一のモデルを複数の研究者が共通して利用すれば, モデル動作の再現性や透明性確保, また, 将来のモデル拡張の可能性の点でも望ましい. このシステムを用いた身体モデルの実装はまだ実現できておらず, 引き続き作業を進めていきたい.

なお, 身体モデルの実装においては, このような筋骨格系の力学モデルだけではなく, 筋紡錘などの感覚受容器の特性のモデル化も必要である. 上述の例題では, 誘導者がもたらす外力を感度よく知覚する体勢を求めるうえで, 筋紡錘の感度が筋の収縮状態に応じてどのように変化するかは重要な問題である. 筋紡錘の感度問題は γ 運動ニューロンの働きも関与する複雑な問題であるが, 一定の仮定を置いて議論を進めていくしかない.

7. 今後の展開とむすび

本論では, 身体技能の遂行・習得過程の理解を念頭において, 意識の働きを組み込んだ感覚運動制御の計算モデルという方法論について論じてきた. この方法論は, 意識上での認知プロセスと無意識下の感覚運動制御プロセスの相互作用の仕組みを理解するための有効なアプローチであると筆者は考えている.

しかし, 上で述べてきたように, 筆者自身, 現在この方法論の下で模索を続けている最中であり, まとまった成果をあげているわけではない. これはまさに「言うは易し行なうは難し」アプローチであり, 時間をかけても少しずつ前進していくしかないと考えている. 少なくとも, この方法論が市民権を得るためには, このアプローチでの成功例を示さなければならない.

最後に, 本研究の社会的な意義について述べておきたい. この試みは, 元来, 身体技能の習得や指導・伝承の支援を想定して取り組んでいるものである. スポーツ, 楽器演奏, 演舞・演技, 工芸などの身体技能の習得には長期間の学習を要するが, その過程では無数の試行錯誤が繰り返されている. 上述したように, この試行錯誤の過程で指導者の果たす役割は大きい. おそらく, 優れた指導者と呼ばれる者は, 学習者の振舞いから学習者の主観的感覚 (何をしようとしているのか, 何を感じようとしているか) を読み取る能力を獲得していて, そこに介入することで生徒の試行錯誤を

方向づけているのであろう. 優れた指導者がこのようなことができるという事実は, 逆にいえば, 学習者の身体運動の中に学習者の主観的な感じ方が現れていて, 指導者は過去の経験からそのような主観的感覚と客観的動作の対応関係を学んでいることを示唆している. 本論の試みは, このような主観的世界と客観的動作のつながりを具体的な運動制御アルゴリズムとして記述することである. この方法論が確立できれば, 主観的感覚が身体動作に作用する過程をシミュレートすることで, 学習者の試行錯誤過程を支援するツールが提供できるのではないかと考えている.

参考文献

- [1] 川人正男, (1996) 脳の計算理論, 産業図書.
- [2] 諏訪正樹, (2016) 「こつ」と「スランプ」の研究 身体知の認知科学, 講談社.
- [3] Morasso, P., (1981) "Spatial control of arm movements", *Experimental brain research*, Vol. 42, No. 2, pp. 223–227.
- [4] Kaminski, T. R., Bock, C., & Gentile, A. M., (1995) "The coordination between trunk and arm motion during pointing movements", *Experimental Brain Research*, Vol. 106, No. 3, pp. 457–66.
- [5] Latash, M.L., (2008) *Synergy*, Oxford University Press.
- [6] Bizzi, E., & Cheung, V., (2013) "The neural origin of muscle synergies", *Frontiers in Computational Neuroscience*, Vol. 7, No. 51.
- [7] Ting, L., & McKay, L., (2007) "Neuromechanics of muscle synergies for posture and movement", *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 17, No. 6, pp. 622–628.
- [8] Wulf, G., (2007) *Attention and motor learning*, Human Kinetics.
- [9] Wulf, G., (2013), "Attentional focus and motor learning: a review of 15 years", *International Review of Sport and Exercise Psychology*, Vol. 6, No. 1, pp. 77–104.
- [10] Wulf, G., McNevin, N.H., & Shea, C.H., (2001) "The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus", *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 54A, pp. 1143–1154.
- [11] Wulf, G., & Lewthwaite, R., (2016) "Optimizing performance through intrinsic motivation and attention for learning: The OPTIMAL theory of motor learning", *Psychonomic bulletin & review*, Vol. 23, No. 5, pp. 1382–1414.
- [12] Gallwey, W.T. (1975) *The inner game of tennis*, Jonathan Cape, 1975 (後藤訳: インナーテニス, 日刊スポーツ新聞社, 1978).
- [13] 阪口 豊, (2017) "身体の主観的分節構造が技能動作に与える影響", 第 31 回人工知能学会大会論文集 (JSAI-2017), 103-OS-30c-2.
- [14] 阪口 豊, (2017) "課題実行時の主観的感覚が身体運動に与える影響", 第 11 回 Motor Control 研究会, B26.
- [15] 阪口 豊, (2017) "主観的課題規範に依存した身体運動の協調関係の変化", 第 27 回日本神経回路学会全国大会論文集 (JNNS2017), P-42.
- [16] OpenSim Homepage, <http://opensim.stanford.edu/>